



tmmob
makina mühendisleri odası



XI.

Uluslararası Katılımlı Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi

**AKILLI BAKIM,
GÜVENLİ ORTAMLAR**

BİLDİRİLER KİTABI

16-17-18
EKİM
2025

 DENİZLİ BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ
KONGRE VE KÜLTÜR MERKEZİ



BTKS | 16-17-18 EKİM 2025
DENİZLİ | TÜRKİYE

Yayın No: E/MMO/775

TMMOB Makina Mühendisleri Odası Denizli Şubesi | Tel: 0 258 263 36 38
E-posta: bakimkongresi@mmo.org.tr | URL: <http://www.bakimkongresi.org>
Sırapapılar Mahallesi Saltak Caddesi No:83 DENİZLİ



TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI
UCTEA CHAMBER OF MECHANICAL ENGINEERS

MEŞRUTİYET CADDESİ NO:19 KAT:6-7-8 KIZILAY - ANKARA

Telefon (*Phone*) : +90 850 495 0 666

Faks (*Fax*): +90 312 4178621

E-Posta (*E-mail*): mmo@mmo.org.tr

Yayın No: E/MMO/775
ISBN No: 978-605-01-1716-5

EDİTÖRLER / EDITORS

Prof.Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK
Prof.Dr. Cemal MERAN
Prof.Dr. Aşkîner GÜNGÖR
Prof.Dr. Olcay POLAT
Dr.Öğr.Üyesi Sidem KANER

Bu yapının yayın hakkı Makina Mühendisleri Odası'na aittir. Kitabın hiçbir bölümü değiştirilemez. MMO'nun izni olmadan kitabın hiçbir bölümü elektronik, mekanik vb. yollarla kopya edilip kullanılamaz. Kaynak gösterilmek kaydıyla alıntı yapılabilir.

The copyright of this work belongs to the Chamber of Mechanical Engineers. No part of the book can be modified. Without the permission of MMO, no part of the book may contain electronic, mechanical, etc and cannot be copied. Citation can be made provided that the source is indicated.

EKİM 2025 / DENİZLİ / TÜRKİYE
OCTOBER 2025 / DENİZLİ / TURKIYE

KONGRE AMACI

AIM OF CONGRESS

Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi(BTKS), bakım ve onarım süreçlerine ilişkin en son teknolojik gelişmeleri, yenilikçi uygulamaları ve sektördeki en iyi uygulamaları tartışmak amacıyla düzenlenen bir etkinliktir. Bu etkinlik Makina Mühendisleri Odası adına Denizli Şubesi sekreteryasında düzenlenmektedir.

Makina Mühendisleri Odası, Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi'nin on birincisini 16-17-18 Ekim 2025 tarihlerinde düzenleyerek, bakım ve bakım mühendisliği ile ilgili tarafları kongre ve sergi çerçevesinde bir araya getirecek, sektöre ve sektörün gelişmesine önemli bir katkı sağlayacaktır.

Makina Mühendisleri Odası tarafından daha önce on kez düzenlenen bu etkinlikte, sektörde gelişen teknolojiler, yenilenen sistem ve ekipmanlar, inovasyon çalışmaları, IoT çalışmaları ve veri bilimi üzerine sorulan soruları yanıtlamış ve verimli geçen buluşmalara paydaşlık etmiştir.

XI. BTKS'nin sergi boyutunda yeni cihaz ve ekipmanların tanıtımını yaparak, yeni iş birliklerine zemin oluşturarak, eğitim ve bilgi paylaşımı yaparak ve sektörel farkındalık oluşturarak sektör profesyonellerini bir araya getirecektir.

Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi(BTKS)'nin bu etkinlikte bakım ve bakım mühendisliği alanlarında gelişen teknoloji kapsayarak, başarılı ve verimli sonuçlar elde etmesi amaçlanmaktadır. Dijital dönüşüm, veri analitiği, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik, bakım yönetimi, regülasyonlar ve standart çalışmaları, vaka çalışmaları, teknik eğitimler ve gelecek trend araştırmaları vb. daha birçok konuda katılımcılara çok faydalı bilgiler aktaracaktır.

XI. BTKS Türkçe-İngilizce dillerinde gerçekleştirilecektir. Kongreye gönderilen tam metin bildiriler çift körlleme yöntemi ile hakem değerlendirilmesinden geçecektir. Kabul edilen bildiriler Kongre programında yer alacaktır. Kongrede sunulan tam metin bildiriler, tekrar hakem değerlendirilmesinden geçirilecek ve TR Dizin'de taranan Mühendis ve Makina, Endüstri Mühendisliği ve Tesisat Mühendisliği dergilerinde yayınlanacaktır.

XI. BTKS Yürütme Kurulu

1. Sanayi Tesislerinde Bakım

- Öngörücü Bakım
- Kestirimci Bakım
- Önleyici Bakım
- Bakımda Yağlama Teknikleri
- Bakım Sistemlerinde Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik
- Bakımda Arıza Tespit İşlemleri
- Bakımda Tahribatsız Muayeneler
- Enerji Sistemlerinde Bakım, Onarım ve Atık Yönetimi

2. Bakımda Dijitalleşme

- Dijital İkiz ve Simulasyon Teknolojileri
- Otonom ve Robotik Bakım Sistemleri
- Otomasyon Sistemlerinin Bakımı
- Bakım Yönetim Sistemi Yazılımları
- İnsan ve Teknoloji Entegrasyonu
- Dijitalleşme ve Veri Analitiği
- Bakımda Nesnelerin İnterneti
- Bakımda Yapay Zeka Kullanım Alanları

3. Yapılarda Bakım

- Bina-Hastane-AVM vb. Yapılarda Bakım Yönetimi
- Yüksek Yapılarda Bakım
- İklimlendirme Proseslerinde Bakım

4. Bakım ve İnsan

- Bakımda İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği
- Bakım Mühendisliği Eğitimi ve Belgelendirmesi
- Bakım Alanında Tekniker / Teknisyen Yetiştirilmesi
- Bakım Açısından Tasarım ve Ergonomi
- Bakımda Maliyet Analizi

5. Ulaşım Araçlarında Bakım

- Havayolu Ulaşımında Bakım
- Araç Bakımlarında Yeni Teknolojiler
- Ulaşım Araçlarında Bakım Yönetimi
- Ulaşım Araçlarında Periyodik Muayene

KONGRE PROGRAMI

CONGRESS PROGRAMME

XI

Uluslararası Katılımlı
Bakım Teknolojileri
Kongresi ve Sergisi

PROGRAM

www.bakimkongresi.org

16 EKİM 2025
PERŞEMBE

SALON 1

09:00 - 09:30	Kayıt Kabul / Karşılama
09:30 - 09:45	Açılış Gösterisi
09:45 - 10:15	Açılış Konuşmaları
10:15 - 11:15	AÇILIŞ KONFERANSI MODERATÖR: Prof. Dr. Cemal MERAN Behçet CÜVEN - Özen Mensucat Gül AKTAŞ KUŞ - Dijital Dönüşüm Lideri A. Aytağ KADIOĞLU - Polisan Kansai Boya
11:30 - 12:30	SERGI AÇILIŞI
12:30 - 13:30	ÖĞLE YEMEĞİ

SALON 1

1. Oturum Oturum Başkanı : Prof. Dr. İbrahim Atmaca

13:30 - 13:45 ULTRASONİK KAYNAK VE KESİM SİSTEMLERİNDE ARIZA ÖNLEME, EKİPMAN EŞLEŞTİRMESİNİN REZONANS FREKANSINA ETKİSİ VE DOĞRU UYGULAMALAR DR. SEMİH ÖNGİR PETLAS LASTİK SAN. ve TİC. A.Ş.	13:45 - 14:00 SMED YAKLAŞIMININ ENDÜSTRİYEL BAKIM VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ: GERÇEK VAKA ÜZERİNDEN NİCEL BİR DEĞERLENDİRME MUHAMMET YASİR KOÇ DR. SEMİH ÖNGİR DİNÇER YURDULU PETLAS LASTİK SAN. ve TİC. A.Ş.	14:00 - 14:15 PLC VE HMI TABANLI ENTEGRE BAKIM PLANLAMA VE EKİPMAN ÖMRÜ İZLEME SİSTEMLERİ ÇAĞATAY BAŞÇUL, DR. SEMİH ÖNGİR PETLAS LASTİK SAN. ve TİC. A.Ş.
---	---	---

2. Oturum Oturum Başkanı : Prof. Dr. Tezcan Şekercioğlu

14:30 - 14:45 GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI ÖNLEYİCİ BAKIM: LASTİK YERLEŞİM HATALARININ NEDEN OLUĞU MAKİNE ARIZALARININ ENGELLENMESİ MEHMET FATİH DEMİRDÖĞEN, ÖZTAN ÖZKARA, DİNÇER YURDULU, DR. SEMİH ÖNGİR PETLAS LASTİK SAN. ve TİC. A.Ş.	14:45 - 15:00 V-SAM ÇOK KANALLI PLATFORMU VE EŞZAMANLI TİTREŞİM SINYALI İŞLEME KULLANILARAK ENDÜSTRİYEL BİR BİLİYALİ DEĞİRMENİN ENTEGRE DURUM İZLEMESİ ALİREZA MANGOURİ, MOHAMMAD ESMAİL AKBARI ISLAMIC AZAD UNIVERSITY	15:00 - 15:15 SENSÖRSÜZ POMPA PERFORMANS VE DURUM İZLEME: BİR ALTIN MADENİNDE %50 ENERJİ TASARRUFU VAKA ANALİZİ CUMALI ÖZEL, BÜLENT YAŞAR ARTESIS TEKNOLOJİ SİSTEMLERİ A.Ş.
---	--	---

Sektör Oturumu / Dijital Dönüşüm Moderatör: Umut Cüneyt İyiol

SALON 1

16:00 - 16:30 Dijital İkiz, Yapay Zeka ve Makina öğrenmesi Ahmet AKÇAKAYA Dual Vision	16:30 - 17:00 Bakımda Dijital Dönüşüm Melih UMAR Aybit Teknoloji	17:00 - 17:30 Akıllı Bakım İbrahim TATAROĞLU Koç Digital	17:30 - 18:00 Operasyonel Veri Yönetimi Taner ÖZDEN Schneider Electric
--	---	---	---

SALON 3

13:30-14:30 Yağlamada Temel Bilgiler ve Kavramlar Murat İdil / Interflon Turkey

SALON 3

14:30-15:30 Pnömatik Sistemlerde Makina Emniyeti ve Bakım Yavuz Değirmenci / SMC Turkey

SALON 3

16:00-17:00 Kompresör Bakım ve Servisi Mehmet Caner Çakar / Dalgakıran Makina

SALON 5

13:30-15:30 Temel Buhar Eğitimi ve İş Kazaları Buhar Kapanı ve Çeşitli Eğitim VSR ve Kondens Pompası Eğitimi Serter Büker - Uğur Çetin / Venkava
--

SALON 5

16:00-17:00 Online Vibrasyon İzleme Sistemleri Emre Orhon / Voce Danışmanlık
--

SALON 5

17:00-18:00 Titreşime giriş; Balans Kerem Ak / Pro-Plan

XI

Uluslararası Katılımlı
Bakım Teknolojileri
Kongresi ve Sergisi

17 EKİM 2025
CUMA

SALON 1

1. Oturum

Oturum Başkanı: Prof. Dr. Olcay Polat

10:00 - 10:15

PV SİSTEMLERDE ATIK
MİKTARININ AZALTILMASINDA
AKILLI BAKIM
TEKNOLOJİLERİNİN ROLÜ
PROF. DR. AŞKİNER GÜNGÖR
DR. ÖĞR. ÜYESİ ÖZAN ÇAPRAZ
DR. ÖĞR. ÜYESİ ESREF BOĞAR
DR. ZEYNEP ÖZSÜT BOĞAR
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ

10:15 - 10:30

GEÇMİŞ ARIZA VERİLERİNİN ANALİZİNE
DAYALI RÜZGAR TÜRBİNİ BAKIM
STRATEJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ:
UYGULAMALI BİR ÇALIŞMA
PROF. DR. HARUN KEMAL ÖZTÜRK
PROF. DR. AŞKİNER GÜNGÖR
DR. ÖĞR. ÜYESİ ÖZAN ÇAPRAZ
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ

10:30 - 10:45

DÖNEN MAKİNELERDE RULMAN
VE DENGESİZLİK ARIZALARININ
YAPAY SİNİR AĞLARI
KULLANILARAK TESPİTİ
PROF. DR. HASAN ÖZTÜRK
PROF. DR. ZEKİ KURAL
İSA YARDIMCI
MAHMUT SABRİ KAYA
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

SALON 3

SEMİNER

10:00 - 11:00

BASINÇLI HAVA
İSTASYONLARINDA AKILLI
BAKIM YÖNETİMİ / SAM 4.0
SERKAN DURSUN / ONUR GÖKDEMİR
KAESER KOMPRESÖR

SALON 1

2. Oturum

Oturum Başkanı: Prof. Dr. Aşkın Güngör

11:00 - 11:15

VERİ ANALİTİĞİ VE YAPAY GÖRME
SİSTEMLERİNİN MODERN BAKIM
TEKNOLOJİLERİNDEKİ ETKİSİ
İBRAHİM KARATAŞ, ZEYNEP HATUN
ALINDAİR SOĞUTMA SİSTEMLERİ
SAN. ve TİC. A.Ş.

11:15 - 11:30

ENDÜSTRİYEL BAKIM SÜREÇLERİNDE
AÇIK KAYNAK KODLU OTOMASYON
SİSTEMLERİ VE YAPAY ZEKA
UYGULAMALARI
İBRAHİM KARATAŞ, ZEYNEP HATUN
ALINDAİR SOĞUTMA SİSTEMLERİ
SAN. ve TİC. A.Ş.

11:30 - 11:45

STEAM IQ - STEAM AND CONDENSATE
MANAGEMENT SYSTEM
ALİ PALA, RAMAZAN GÜRİSOY
PL ENERJİ A.Ş.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ

SALON 3

SEMİNER

11:00 - 12:00

TASK 360 - YAPAY ZEKA
DESTEKLİ MOBİL BAKIM
ONARIM SİSTEMİ
BERKHAN ESMER - YİĞİT YILDIRIM
PARGESOFT

SALON 1

12:00 - 13:00

ÖĞLE YEMEĞİ

Sektör Oturumu / Gıda

Moderatör: Fatih Temizsoy

13:00 - 13:20

Emrah Erdoğan
ETİ

13:20 - 13:40

Yener Can Canarslan
ETİ

13:40 - 14:00

Anıl Ünlü
ETİ

14:00 - 14:20

Seda Şahin
ETİ

SALON 1

3. Oturum

Oturum Başkanı: Prof. Dr. Tefvik Küçükömeroğlu

15:30 - 15:45

DİŞ DİBİ ÇATLAKLARININ DÜZ
DİŞLİ SİSTEMLERİN DİNAMİK
DAVRANIŞINA ETKİSİ
PROF. DR. NİZAMİ AKTÜRK
AHMED KEREM DENİZ
GAZİ ÜNİVERSİTESİ

15:45 - 16:00

SÜRTÜNME AŞINMASININ
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ
İLE ÖNCEDEN TESPİTİ
DR. ÖĞR. ÜYESİ ÖZGÜN SUNAR
EŞKİŞEHİR TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

16:00 - 16:15

RULMANLARDA TİTREŞİM TABANLI
KESTİRİMCİ BAKIM: RULMAN
KUSURLARININ 5-DOF ŞAFT-YATAK
MODELİ KULLANILARAK SPEKTRAL
ANALİZİ
PROF. DR. NİZAMİ AKTÜRK
DR. ÖĞR. ÜYESİ HİKMET BAL,
DR. ÖĞR. ÜYESİ TURAN ŞİŞMAN,
OSTİM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ,
GAZİ ÜNİVERSİTESİ

SALON 3

EĞİTİM

13:00 - 14:30

ÖRNEK UYGULAMA VE
SONUÇLARI İLE
VİBRASYON ANALİZİ
YAVUZ TUTUNOĞLU
MARAY MAKİNA

SALON 1

4. Oturum

Oturum Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi Özgün Sunar

16:30 - 16:45

HAVAYOLU ULAŞIMINDA BAKIM
PROGRAMI GELİŞTİRME
METODOLOJİSİ "MSG-3"
CİHAN POLAT, NECDET DEMİR
TUSAŞ MOTOR SANAYİ A.Ş.

16:45 - 17:00

UÇAK MOTORLARININ BAKIM
İŞLEMLERİNDE BAROSKOP
KONTROLLERİNİN UÇUŞ
EMNİYETİ AÇISINDAN ÖNEMİ
CİHAN ALTUN, İSMAİL ŞAÇKESEN

17:00 - 17:15

ASKERİ UÇAK BAKIMCILIĞIMIZIN
TARİHİ: KURUMSAL YAPILANMA,
EĞİTİM SÜREÇLERİ VE TEKNOLOJİK
EVİRİM
PROF. DR. SELİM GÜRGEN,
PROF. DR. M. CEMAL KUŞHAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ SEYİD FEHMİ DİLTEMİZ
OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ

SALON 3

Moderatör: Behiç Akkan

15:30 - 15:45

MURAT İDİL
Interflon

15:45 - 16:00

EFEKAN ŞEŞEN
SMC Turkey

16:00 - 16:15

SERTER BÜKER
VENKAVA

16:30 - 16:45

ALPASLAN GÜVEN
SERDEMİR MÜHENDİSLİK

16:45 - 17:15

ÖZGÜN YAKAR
RESONANCE INSTITUTE

SALON 5

SEMİNER

10:00 - 11:45

Forkliftlerde Bakım Uygulamaları
Maliyet ve Verimlilik Kıyaslamaları
Emre Turan / Deniz Lift Forklift

SALON 3

SEMİNER

14:30 - 15:30

Canlı İzleme ve Kestirimci Bakım: Toplam
Bakım Yönetiminde Yeni Çağın Anahtarları
Cökhan Önsoy / Mint Teknoloji Mühendislik

KONGRE PROGRAMI

CONGRESS PROGRAMME

XI

Uluslararası Katılımlı Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi

PROGRAM

18 EKİM 2025
CUMARTESİ

SALON 1

1. Oturum

Oturum Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi Sidem Kaner

10:00 - 10:15

MONTE CARLO SİMÜLYASYONU İLE KRİTİK BOYAMA MAKİNELERİNİN BEKLENEN ARIZA SAYISININ VE GÜVENİLİRLİĞİNİN TAHMİNİ

ASLI ÖZMEN SELÇUK, MUSTAFA ÇÖREKÇİOĞLU
ARZU ŞAHİNDİR, MELİHAN KÜPELİOĞLU,
PROF. DR. AŞKINER GÜNGÖR

10:15 - 10:30

İPR YANGIN SÖNDÜRME SİSTEMLERİ VE TRAFİKO YANILARINDA KULLANIMI

SERHAN KÜRKÇÜ
EZGİL GÜVENLİK TEKNOLOJİLERİ LTD.ŞTİ.

10:30 - 10:45

POMPA DEBİ ANOMALİLERİNİN LSTM İLE TESPİTİ VE KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI

ARMAÇAN AKYURT, SENCER SULTANOĞLU
ELİAR ELEKTRONİK SANAYİ A.Ş.

SALON 1

2. Oturum

Oturum Başkanı: Prof. Dr. Harun Kemal Öztürk

11:00 - 11:15

BÜKÜM MAKİNELERİNDE STANDARTLAŞTIRILMIŞ HAFTALIK TEMİZLİK PROSEDÜRÜNÜN BAKIM PERFORMANSINA ETKİSİ

ASLI BAYLAN, ASLI ÖZMEN SELÇUK,
MUSTAFA ÇÖREKÇİOĞLU ARZU ŞAHİNDİR,
MELİHAN KÜPELİOĞLU, PROF. DR. AŞKINER GÜNGÖR
OZAN TEKSTİL SAN. TİC. A.Ş., PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ

11:15 - 11:30

ORTA GERİLİM KABLO ÜRETİM EKSTRÜZYON MAKİNESİNDE KESTİRİMCİ BAKIM

PROF. DR. CEMAL MERAN, KÖKSAL İLHAN,
BERRANUR ÇEKER, SEZAL KUNAN,
MURAT MAT
NEXANS TÜRKİYE ENDÜSTRİ VE TİCARET A.Ş.,
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ

11:30 - 11:45

TEL ÇEKME MAKİNESİNDE KESTİRİMCİ BAKIM

PROF. DR. CEMAL MERAN, FATİH ÖZTEKİN,
DİLUBA YAVAŞ, MUSTAFA FURKAN ORHA,
AYŞENUR KABUKÇU
NEXANS TÜRKİYE ENDÜSTRİ VE TİCARET A.Ş.,
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ

12:00 - 13:00

ÖĞLE YEMEĞİ

SALON 1

Sektör Oturumu / Titreşim Analizi

Moderatör: Prof. Dr. Zeki Kırıl

13:00 - 13:20

YAVUZ TÜTÜNOĞLU
MARAY MAKİNA

13:20 - 13:40

EMRE ORHON
VOCE DANIŞMANLIK

13:40 - 14:00

ÖZGÜN YAKAR
RESONANCE INSTITUTE

14:00 - 14:20

ATANUR DÜNDAR
DORUK CBM

SALON 1

3. Oturum

Oturum Başkanı: Doç. Dr. Serdar Halis

15:00 - 15:15

ARAÇ BAKIMINDA YENİ NESİL ARAZİ TESPİT SİSTEMLERİ: ARAZİ ÜSTÜ TESPİT (E080) TEKNOLOJİSİNİN UYGULAMA ALANLARI VE TANI YETKİNLİĞİ

PROF. DR. TAYYİP KÜÇÜKÖMERİOĞLU
DOÇ. DR. AHMET İSMALOĞLU
DR. ÖZGÜR ÜYESİ SEMİH MAHMOUD AKTARER
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ

15:15 - 15:30

OTOMOTİV SERVİSLERİNDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ RİSKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: 5X5 MATRİS YAKLAŞIMI İLE ANALİTİK BİR İNCELEME

DOÇ. DR. AHMET İSMALOĞLU
DR. ÖZGÜR ÜYESİ SEMİH MAHMOUD AKTARER
ONUR YILDIZ
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ

15:30 - 15:45

GENERATÖR HAVA ARALIĞI ÖLÇÜMÜYLE EKSEN KAÇIKLIĞININ BELİRLENMESİ

EMRE ORHON
VOCE DANIŞMANLIK SAN. TİC. LTD. ŞTİ.

SALON 1

4. Oturum

Oturum Başkanı: Ali Pala

16:00 - 16:15

KİMYASAL TARTIM SİSTEMLERİNDE YAPAY ZEKA DESTEKLİ AKILLI BAKIM VE İZLEME ASİSTANI

BİLAL EKİNCİ, SENCER SULTANOĞLU
ELİAR ELEKTRONİK SANAYİ A.Ş.

16:15 - 16:30

ELEKTRİK İÇİN TİTREŞİM TABANLI DURUM İZLEME SENSÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ

ZEHRA BAYIN, EKREM SAVAŞ,
ÇAĞRI ŞENTÜRK, PROF. DR. TUNÇAY KARACAÇAY
MEKA GAZİBİLİ MAKİNE İMALAT SANAYİ VE TİCARET A.Ş.,
BEYES TEKNOLOJİ A.Ş., GAZİ ÜNİVERSİTESİ

SALON 5

SEMİNER

10:00 - 10:45

Durum İzleme Sistemleri ile Enerji ve Üretim Optimizasyonu

ATANUR DÜNDAR
DORUK CBM

SALON 5

SEMİNER

11:00 - 11:45

Koruyucu İzlemede Eküpmen Modernizasyonu: Setpoint

KEREM AK
PRO-PLAN

SALON 3

Oturum Başkanı:
Ömer Aksoğan

10:00 - 10:15

KENT İÇİ HAFİF RAYLI SİSTEMLERDE PERİYODİK ARAÇ VE HAT BAKIM UYGULAMALARI

ALİ SAMET AYVAZ,
DR. ÖZGÜR ÜYESİ CENGİZ GÖRKEM DENGİZ
19 MAYIS ÜNİVERSİTESİ

10:15 - 10:30

MESLEK YÜKSEKOKULLARINDA İŞ MAKİNELERİ BAKIM VE ONARIM EĞİTİM MÜFREDATININ SEKTÖREL GEREKSİNİMLERLE UYUMUNUN İNCELENMESİ

ÖZGÜR ÜYESİ CENGİZ
SAMUN ÜNİVERSİTESİ

10:30 - 10:45

İNTRAOPERATİF GAMA PROB PERFORMANS PARAMETRELERİ VE KALİTE KONTROLÜNÜN ÖNEMİ

ÖMER FARUK DEMİRTAŞ, PROF. DR. TUNÇAY BAYRAM
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

SALON 3

Oturum Başkanı:
Dr. Öğr. Üyesi Öner Atalay

11:00 - 11:15

ENVIRONMENTAL SURFACE CLEANING TECHNIQUES FOR MAINTENANCE APPLICATIONS

DOÇ. DR. FATİH HAYATİ ÇAKIR
OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ

11:15 - 11:30

BAKIM UYGULAMALARINDA ATIK MALZEMELERİN DEĞERLENDİRİLMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

PROF. DR. AYŞEGÜL AKDOĞAN EKER
PROF. DR. BÜLENT EKER
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ,
NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ

11:30 - 11:45

BAKIM UYGULAMALARINDA YAPAY ZEKA YAYILI ÇÖZÜMLERDE PYTHON PROGRAMININ KULLANILMASI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

PROF. DR. BÜLENT EKER
NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ

17:00

KAPANIŞ OTURUMU

KURULLAR

COMMITTEES

ETKİNLİK DÜZENLEME KURULU

Yunus Yener	Genel Merkez	Ali Ulvi Avanoğlu	Denizli Şube
Bedri Tekin	Genel Merkez	Halil Mavi	Denizli Şube
Umut Kurt	Genel Merkez	Zekeriya Özgülen	Edirne Şube
Ümit Galip Uncu	Adana Şube	Özgür Ünsal	Eskişehir Şube
Mehmet Serdar Ulu	Ankara Şube	Ömer Yardımcı	Samsun Şube
Devrim Kılıç	Antalya Şube	Şeref Parlak	İstanbul Şube
Murat Korkut	Bursa Şube	Esra Uzel Baskan	İzmir Şube
Mehmet Orçun Çiğdem	Denizli Şube	Süleyman Varol	Kayseri Şube
Umut Cüneyt İyiol	Denizli Şube	Osman Ozan Aydın	Kocaeli Şube
Ali Pala	Denizli Şube	Ömer Aksoğan	Konya Şube
Burak Ökünç	Denizli Şube	Fezzay Aydın	Mersin Şube
Mehmet Tunç Ertaşın	Denizli Şube	Celal Çağatay Saka	Trabzon Şube
Mehmet Günlük	Denizli Şube	Hasan Andaç Acar	Zonguldak Şube
Olgun Eyidoğan	Denizli Şube		
Semayî Yaman	Denizli Şube		

ETKİNLİK YÜRÜTME KURULU

Prof.Dr. Cemal Meran
Prof.Dr. Aşkıner Güngör
Prof.Dr. Olcay Polat
Prof.Dr. Tezcan Şekercioğlu
Prof.Dr. İsmail Ovalı
Prof.Dr. H. Kemal Öztürk
Doç.Dr. Serdar Halis
Dr. Öğr. Üyesi Öner Atalay
İlker Bitişyılmaz
Behice Çetinkaya Dilbaz
Behiç Akkan
Fatih Temizsoy
İlkin Boz
Z. Göksel Parlar
*Mustafa Cemal Özkan (*Kongre Sekreteri)

KURULLAR

COMMITTEES

AKADEMİK BİLİM KURULU

Prof. Dr. Cemal MERAN	Pamukkale Üniversitesi
Prof.Dr. Marcin ADAMIAK	Silesian Teknoloji Üniversitesi Polonya
Prof.Dr. Mirosław BONEK	Silesian Teknoloji Üniversitesi Polonya
Prof.Dr. Malgorzata SZYMICZEK	Silesian Teknoloji Üniversitesi Polonya
Prof. Dr. Zeki KIRAL	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Tuncay BAYRAM	Karadeniz teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU	Pamukkale Üniversitesi
Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU	Karadeniz teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Sadettin ORHAN	Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
Prof. Dr. Pınar DEMİRCİOĞLU	Adnan Menderes Üniversitesi
Prof. Dr. Özlem Baran ACIMERT	Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Prof. Dr. Osman ASİ	Uşak Üniversitesi
Prof. Dr. Olcay POLAT	Pamukkale Üniversitesi
Prof. Dr. Nizami AKTÜRK	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ	Çankaya Üniversitesi
Prof. Dr. Melih Cemal KUŞHAN	Osmangazi Üniversitesi
Prof. Dr. İsmail OVALI	Pamukkale Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim ATMACA	Akdeniz Üniversitesi
Prof. Dr. Hülya DURMUŞ	Celal Bayar Üniversitesi
Prof. Dr. Hikmet ÇİÇEK	Erzurum Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Hasan ÖZTÜRK	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK	Pamukkale Üniversitesi
Prof. Dr. Emel TABAN	Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Fatih KAHRAMAN	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Ertuğrul DURAK	Süleyman Demirel Üniversitesi
Prof. Dr. Cevat Erdem İMRAK	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Bülent EKER	Namık Kemal Üniversitesi
Prof. Dr. Aşkın GÜNGÖR	Pamukkale Üniversitesi
Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. İsmet ÇELİK	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Prof. Dr. İsa YEŞİLYURT	Uşak Üniversitesi
Doç. Dr. Nilay ÇÖMEZ	Ege Üniversitesi
Doç. Dr. M.Mehmet Fatih KARAHAN	Celal Bayar Üniversitesi
Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU	Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Doç. Dr. Serdar HALİS	Pamukkale Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Özgün SUNAR	Eskişehir Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Öner ATALAY	Pamukkale Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Hikmet BAL	OSTİM Teknik Üniversitesi



2025
btkS

BİLDİRİLER KİTABI • PROCEEDINGS

BİLDİRİ BAŞLIKLARI / PAPER TITLES

SAYFA / PAGE

İNTRAOPERATİF GAMA PROB PERFORMANS PARAMETRELERİ VE KALİTE KONTROLÜNÜN ÖNEMİ, Sağ. Fiz. Ömer Faruk DEMİRTAŞ, Prof. Dr. Tuncay BAYRAM	17
KENT İÇİ HAFİF RAYLI SİSTEMLERDE PERİYODİK ARAÇ VE HAT BAKIM UYGULAMALARI, Ali Samet AYVAZ, Dr. Öğr. Üyesi Cengiz Görkem DENGİZ	25
SMED YAKLAŞIMININ ENDÜSTRİYEL BAKIM VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ GERÇEK VAKA ÜZERİNDEN NİCEL BİR DEĞERLENDİRME, Muhammet Yasir KOÇ, Dinçer YURDULU, Dr. Semih ÖNGİR,	41
TİTREŞİM ANALİZİ YÖNTEMİ İLE ASENKRON MOTORDA KIRIK ROTOR ÇUBUĞU TESPİTİ, Abdulkadir YAVER, Baver AKBURAK, Metin ÖZDEMİR, Murat DURAN, Serkan ÖZEK	47
ULTRASONİK KAYNAK VE KESİM SİSTEMLERİNDE ARIZA ÖNLEME, EKİPMAN EŞLEŞTİRMESİNİN REZONANS FREKANSINA ETKİSİ VE DOĞRU UYGULAMALAR, Dr. Semih ÖNGİR	57
ELEKLER İÇİN TİTREŞİM TABANLI DURUM İZLEME SENSÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ, Zehra BAYIN, Ekrem Savaş, Çağrı ŞENTÜRK, Tuncay KARAÇAY	64
ENDÜSTRİYEL BAKIM SÜREÇLERİNDE AÇIK KAYNAK KODLU OTOMASYON SİSTEMLERİ VE YAPAY ZEKA UYGULAMALARI, İbrahim KARATAŞ, Zeynep HATUN	75
ENVIRONMENTAL SURFACE CLEANING TECHNIQUES FOR MAINTENANCE APPLICATIONS, Fatih Hayati ÇAKIR	94
GENERATÖR HAVA ARALIĞI ÖLÇÜMÜYLE EKSEN KAÇIKLIĞININ BELİRLENMESİ, Emre ORHON	101
GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI ÖNLEYİCİ BAKIM LASTİK YERLEŞİM HATALARININ NEDEN OLDUĞU MAKİNE ARIZALARININ ENGELLENMESİ, Mehmet Fatih DEMİRDÖĞEN, Öztan ÖZKARA, Dinçer YURDULU, Dr. Semih ÖNGİR	111
ASKERİ UÇAK BAKIMCILIĞIMIZIN TARİHİ KURUMSAL YAPILANMA, EĞİTİM SÜREÇLERİ VE TEKNOLOJİK EVRİM, Dr. Öğr. Üyesi Seyid Fehmi DİLTEMİZ, Prof. Dr. Selim GÜRGEN, Prof. Dr. Melih Cemal KUŞHAN	119
HAVAYOLU ULAŞIMINDA BAKIM PROGRAMI GELİŞTİRME METODOLOJİSİ “MSG-3”, Cihan POLAT, Necdet DEMİR	127
POMPA DEBİ ANOMALİLERİN LSTM İLE TESPİTİ VE KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI, Armağan AKYURT, Sencer SULTANOĞLU	143

BİLDİRİ BAŞLIKLARI / PAPER TITLES	SAYFA / PAGE
BAKIM UYGULAMALARINDA YAPAY ZEKÂYA DAYALI ÇÖZÜMLERDE PYTHON PROGRAMININ KULLANILMASI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA, Prof.Dr. Bülent EKER	153
BAKIM UYGULAMALARINDA ATIK MALZEMELERİN DEĞERLENDİRİLMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA, Prof.Dr.Ayşegül AKDOĞAN EKER, Prof.Dr.Bülent EKER	160
INTEGRATED CONDITION MONITORING OF AN INDUSTRIAL BALL MILL USING THE MULTI-CHANNEL V-SAM PLATFORM AND SYNCHRONOUS VIBRATION SIGNAL PROCESSING, Alireza MANGOURI, Mohammadesmaeil AKBARI, Sajjad ATAZADEH	169
SÜRTÜNME AŞINMASININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ÖNCEDEN TESPİTİ , Özgün SUNAR	184
DİŞ DİBİ ÇATLAKLARININ DÜZ DİŞLİ SİSTEMLERİN DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ, Ahmed Kerem DENİZ, Prof. Dr. Nizami AKTÜRK	196
DÖNEN MAKİNELERDE RULMAN VE DENGESİZLİK ARIZALARININ YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANILARAK TESPİTİ, İsa YARDIMCI, Mahmut Sabri KAYA, Hasan ÖZTÜRK, Zeki KIRAL	214
IPR YANGIN SÖNDÜRME SİSTEMLERİ VE TRAFO YANGINLARINDA KULLANIMI, Serhan KÜRKÇÜ	226
VERİ ANALİTİĞİ VE YAPAY GÖRME SİSTEMLERİNİN MODERN BAKIM TEKNOLOJİLERİNDEKİ ETKİSİ, İbrahim KARATAŞ, Zeynep HATUN	235
MESLEK YÜKSEKOKULLARINDA İŞ MAKİNELERİ BAKIM VE ONARIM EĞİTİM MÜFREDATININ SEKTÖREL GEREKSİNİMLERLE UYUMUNUN İNCELENMESİ, Öğr. Gör. Emine Özlem DENGİZ	252
ORTA GERİLİM KABLO ÜRETİM EKSTRÜZYON MAKİNESİNDE KESTİRİMCİ BAKIM, Prof.Dr. Cemal MERAN, Berranur ÇEKER, Sezai KUNAN, Murat MAT, Köksal İLHAN	273
PLC VE HMI TABANLI ENTEGRE BAKIM PLANLAMA VE EKİPMAN ÖMRÜ İZLEME SİSTEMLERİ, Çağatay BAŞGÜL, Dr. Semih ÖNGİR	284
RULMANLARDA TİTREŞİM TABANLI KESTİRİMCİ BAKIM RULMAN KUSURLARININ 5-DOF ŞAFT-YATAK MODELİ KULLANILARAK SPEKTRAL ANALİZİ, Dr. Öğr. Üyesi Hikmet BAL, Dr. Öğr. Üyesi Turan ŞİŞMAN, Prof.Dr. Nizami AKTÜRK	290

BİLDİRİ BAŞLIKLARI / PAPER TITLES

SAYFA / PAGE

TEL ÇEKME MAKİNESİNDE KESTİRİMCİ BAKIM

Prof.Dr. Cemal MERAN, Dilrüba YAVAŞ, Mustafa Furkan ORHA, Ayşenur KABUKÇU, Fatih ÖZTEKİN

322

MONTE CARLO SİMÜLASYONU İLE KRİTİK BOYAMA MAKİNELERİNİN BEKLENEN ARIZA SAYISININ VE GÜVENİLİRLİĞİNİN TAHMİNİ,

Aslı ÖZMEN SELÇUL, Mustafa ÇÖREKÇİOĞLU, Arzu ŞAHPENDER, MelihCan KÜPELİOĞLU, Aşkner GÜNGÖR

335

BÜKÜM MAKİNELERİNDE STANDARTLAŞTIRILMIŞ HAFTALIK TEMİZLİK PROSEDÜRÜNÜN BAKIM PERFORMANSINA ETKİSİ

Aslı BAYLAN, Aslı ÖZMEN SELÇUK, Mustafa ÇÖREKÇİOĞLU, Arzu ŞAHPENDER, MelihCan KÜPELİOĞLU, Aşkner GÜNGÖR

336

GEÇMİŞ ARIZA VERİLERİNİN ANALİZİNE DAYALI RÜZGÂR TÜRBİNİ BAKIM STRATEJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ: UYGULAMALI BİR ÇALIŞMA

Ozan ÇAPRAZ, Harun Kemal ÖZTÜRK, Aşkner GÜNGÖR

337

PV SİSTEMLERDE ATIK MİKTARININ AZALTILMASINDA AKILLI BAKIM TEKNOLOJİLERİNİN ROLÜ

Zeynep ÖZSÜT BOĞAR, Ozan ÇAPRAZ, Eşref BOĞAR, Aşkner GÜNGÖR

338

ARAÇ BAKIMINDA YENİ NESİL ARIZA TESPİT SİSTEMLERİ: ARAÇ ÜSTÜ TESPİT (EOBD) TEKNOLOJİSİNİN UYGULAMA ALANLARI VE TANI YETKİNLİĞİ

Semih Mahmut AKTARER, Ahmet İSMAİLOĞLU, Tefik KÜÇÜKÖMEROĞLU

339

OTOMOTİV SERVİSLERİNDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ RİSKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: 5X5 MATRİS YAKLAŞIMI İLE ANALİTİK BİR İNCELEME

Ahmet İSMAİLOĞLU, Semih Mahmut AKTARER, Onur YILDIRIM

340

SUNUŞ

Makinaların ve Tesislerin arızasız, verimli ve uzun ömürlü şekilde çalıştırılması; üretimin kesintisiz devam etmesi, işletme güvenliğinin sağlanması ve sürdürülebilir bir ekonomi için hayati öneme sahiptir. Düzenli ve programlı bakım yapıldığında, makina ve tesisler kendi fonksiyonlarını yerine getirecek şekilde sürekli hazır durumda olur. Bu yaklaşım yalnızca arıza oranlarını azaltmakla kalmaz; işletme, tesis ve ülke ekonomisine de önemli katkılar sunar. Ne var ki ülkemizde birçok alanda olduğu gibi bakım alanında da hâlâ arıza sonrası müdahale anlayışı yaygındır. Bu yaklaşım, hem yüksek maliyetlere hem de üretim kayıplarına yol açmaktadır. Bu nedenle modern bakım anlayışı; koruyucu, kestirimci ve planlı bakım uygulamalarının işletmelerde yaygınlaştırılmasını zorunlu kılmaktadır.

Makina Mühendisleri Odası'nın bakım konusundaki farkındalığı artırmaya yönelik çabaları, 2003 yılında Denizli'de başlayan kongre ve sergi organizasyonlarıyla ivme kazanmış; yıllar içerisinde Kocaeli, Sakarya, Eskişehir gibi farklı illerde devam etmiş ve 2019'da ilk kez uluslararası boyuta taşınmıştır. Pandemi nedeniyle ertelenen 2021 etkinliğinin ardından 2022 yılında yeniden uluslararası katılımı gerçekleştirilen kongre, sektörün önemli bir buluşma noktası olmayı sürdürmüştür.

Dünya, yapay zekâ çalışmaları, dijitalleşme, otonom sistemler, veri işleme teknolojileri, uzaktan kontrol mekanizmaları ve nesnelerin interneti gibi yeniliklerle hızlı bir dönüşüm içindedir. Bu dönüşümün doğal bir sonucu olarak bakım süreçleri, klasik yöntemlerin ötesine geçmekte; kestirimci bakım, veri odaklı izleme ve dijital platformların entegrasyonu gibi yeni yaklaşımlar öne çıkmaktadır. Bu gelişmeler doğrultusunda XI. Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi'nin ana teması da bakım sektöründeki güncel dönüşümü yansıtacak şekilde "**Akıllı Bakım, Güvenli Ortamlar**" olarak belirlenmiştir.

XI. BTKS kapsamında; **36 bildiri, 11 seminer, 4 sektör oturumu** ve geniş ölçekli bir **sergi alanı** ile bakım teknolojileri alanında güncel bilimsel çalışmalar, sektörel uygulamalar ve yenilikçi teknolojiler katılımcılarla buluşturulmuştur. Sergi alanında yer alan firmalar, geliştirdikleri ekipmanları, çözümleri ve son teknolojik yaklaşımları meslektaşlarımız ve sektör profesyonelleri ile paylaşma fırsatı bulmuştur.

Bu kongre ile bakım mühendisliği ve paralel disiplinlerin gelişimine katkı sunmayı, sektörün dönüşümünü desteklemeyi ve bakım alanındaki tüm tarafları ortak bir platformda buluşturmayı hedefleyen bir etkinliği daha başarıyla tamamlamış bulunuyoruz.

Bu süreçte emeği geçen tüm meslektaşlarımıza, kurum ve kuruluşlara, akademisyenlere, sektör temsilcilerine, sergi açan firmalara ve değerli katılımcılara teşekkür ederiz. Bir sonraki buluşmamızda görüşmek dileğiyle...

TMMOB
Makina Mühendisleri Odası
Yönetim Kurulu



btk²⁰²⁵s

BİLDİRİLER

Intraoperatif Gama Prob Performans Parametreleri ve Kalite Kontrolünün Önemi

Sağ. Fiz. Ömer Faruk DEMİRTAŞ¹ ve Prof. Dr. Tuncay BAYRAM^{2,3}

E-posta:

omerfarukdemirtas@ktu.edu.tr (Ö. F. Demirtaş),

t.bayram@ktu.edu.tr (T. Bayram)

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Radyoloji Anabilim Dalı, Trabzon, Türkiye

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Trabzon, Türkiye

³University of Wah, Department of Physics, Wah Cantt, Pakistan

Özet

Gama prob cihazları, cerrahi uygulamalarda özellikle sentinel lenf nodu biyopsisi gibi işlemlerde kullanılan taşınabilir radyoaktif dedektörlerdir. Bu cihazlar, sintilasyon kristalleri (NaI(Tl) veya CZT) ve fotodetektörler (PIN fotodiyot) gibi bileşenlerden oluşur. Gama probun enerji çözünürlüğü, hassasiyeti ve uzaysal çözünürlük parametreleri cihazın doğruluğunu doğrudan etkiler. Kalite kontrol parametrelerinin düzenli olarak değerlendirilmesi, hasta güvenliği ve cerrahi başarı açısından kritik önem taşımaktadır. Bu çalışmada, CsI(Tl) kristali ve PIN fotodiyot kullanan bir gama probun performansı, Monte Carlo tabanlı GATE benzetim platformu ile analiz edilmiştir. Kristal-fotodiyot etkileşimi ve optik foton transferi modellenerek, NEMA NU3-2004 standartlarına göre hassasiyet, enerji çözünürlüğü ve uzaysal çözünürlük gibi parametreler değerlendirilmiştir. Ayrıca, kristal derinliği ve kolimatör hizalaması gibi faktörlerin kalite kontrol testlerindeki önemi tartışılmıştır. Özellikle, teknik destek sağlanamayan eski model ancak işlevsel gama problemlerinde meydana gelebilecek kristal deformasyonu ve sorunlarında kristal değişimi gibi bakım süreçlerinde optimum kristal ve kristal boyutu tercihinde GATE platformunun kullanımının öneminin altı çizilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Cerrahi gama prob, Monte Carlo benzetimi, GATE, Kalite kontrol, NEMA NU3-2004

1. Giriş

Nükleer tıp, radyofarmasötiklerin kullanımıyla hastalıkların teşhisinde önemli bir rol oynamaktadır. Tanı ve tedavi amaçlı olarak kullanılan bu maddeler, özellikle intraoperatif uygulamalarda gama problemleri aracılığıyla cerrahlara operasyonda radyoaktif olarak işaretlenmiş dokuları tespit etme olanağı sağlar. Sentinel lenf nodu biyopsisi, bu cihazların temel kullanım alanlarından biridir. Gama prob cihazları genellikle sintilasyon kristalleri olan NaI(Tl) veya CsI(Tl) ile veya yarıiletken dedektörler olan CdTe veya CZT ile çalışmakta olup, sinyal üretimi için fotodetektörler (PMT, PIN fotodiyot, SiPM) kullanılmaktadır. Bu cihazların enerji çözünürlüğü, hassasiyeti ve uzaysal çözünürlüğü gibi parametreler, cerrahi başarı ve hasta güvenliği üzerinde



doğrudan etkili olmaktadır. Bu nedenle, cihazların güvenilir çalışmasını sağlamak adına düzenli kalite kontrol testleri büyük önem taşımaktadır. Cihaz bakım faaliyetleri sonrasında da bu kalite kontrol testlerinin yapılması ve cihaz kullanım uygunluğunun test edilmesi zaruridir.

Bu çalışma kapsamında CsI(Tl) kristali ve PIN fotodiyot tabanlı bir gama probun performansı, Monte Carlo tabanlı GATE simülasyon platformu kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada özellikle kristal-fotodiyot etkileşimi, optik foton transferi ve elektronik sinyal oluşumu detaylı olarak modellenmiş, NEMA NU3-2004 standartlarına göre cihazın performans parametreleri değerlendirilmiştir. Böylelikle, deneysel tasarım öncesi optimizasyon sağlanarak daha verimli sistemler geliştirilmesine yönelik bilimsel katkı sunulması amaçlanmıştır (1-4). Ayrıca ülkemizde üretimi olmayan bu cihazların yedek parça tedariki sağlanamaması durumunda sintilasyon kristali gibi arızalı ürünlerin yenilenebilmesi için (tür ve boyut bağlamında) gerçekleştirilecek çalışmalarda GATE platformunun etkin bir şekilde kullanılabileceği gösterilmektedir.

Literatürde gama prob sistemleri üzerine yapılan çeşitli çalışmalar, cihaz tasarımında ve performans optimizasyonunda farklı yaklaşımlar ortaya koymuştur. Mariangela ve arkadaşları (2009), Avrupa pazarında mevcut altı üreticiye ait sentinel probun performansını NEMA NU3-2004 standardı aracılığıyla karşılaştırmışlardır. Bunlardan biri CsI(Tl) kristaline dayalı büyük prob olup yüksek enerjili fotonları tespit etmek için tasarlanmış, diğeri ise kadmiyum tellür yarıiletken dedektörüne sahip küçük prob olup düşük enerjiler için uygun bulunmuştur (5,6). Tiourina ve çalışma arkadaşları (1998), hassasiyet, spektral çözünürlük, açısal hassasiyet ve derinlikteki kaynak yanıtı gibi parametreleri test ederek cerrahi kullanıma uygunluğu değerlendirmişlerdir (7). Kaviani ve arkadaşları (2016), yeni geliştirilen SURGEOGUIDE adlı gama prob sistemini incelemiş ve yüksek hassasiyet ve düşük yan sızıntı değerleriyle klinik kullanıma uygun olduğunu göstermiştir (8). Itikawa ve arkadaşları (2017), EUROPROBE II gama probunu NEMA NU-3-2004 standardına göre karşılaştırarak kolimatörün açısal ve uzaysal çözünürlük üzerindeki etkilerini vurgulamışlardır (9). Kolcu ve arkadaşları (2023), GEANT4 tabanlı benzetim ile aktif korumalı bir gama prob tasarlamış ve geleneksel problemlere kıyasla duyarlılık artışı sağlandığını göstermiştir (10). Bedir ve arkadaşları (2020), GammaPen isimli probun yüksek hassasiyet ve çözünürlük sunduğunu, radyocerrahi sırasında sentinel lenf nodu tespiti için güvenle kullanılabileceğini ifade etmişlerdir (11). Radnia ve arkadaşları ise el tipi bir radyasyon dedektörünün enerji çözünürlüğü ve fotopik verimliliğini inceleyerek MCNP6X ile benzetim sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırmış ve cerrahi uygulamalar için umut verici olduğunu göstermiştir (12). Costa ve arkadaşları (2006) tarafından geliştirilen TlBr kristalli prob, yüksek hassasiyet ve düşük yanıl sızıntı değerleri ile klinik kullanıma uygun bulunmuştur (13). Berdnikova ve arkadaşları (2016), LaBr₃:Ce kristali ve silikon fotoçoğaltıcı kullanan bir gama prob geliştirmiş ve cihazın spektrometrik özelliklerinin dünyadaki en iyi sistemlerle kıyaslanabilir olduğunu rapor etmiştir (14). Bu çalışmalar, hem deneysel hem de simülasyon tabanlı araştırmalarla gama prob tasarımlarının geliştirilmeye devam ettiğini ve özellikle daha yüksek çözünürlüklü, verimi yüksek ve taşınabilir cihazlara yönelik ilginin arttığını ortaya koymaktadır.

Cerrahi gama problemleri Temel bileşenleri sintilasyon kristali, kolimatör, fotodetektör ve elektronik devrelerden oluşur. Sintilasyon kristalleri gama ışınlarını görünür ışığa çevirirken, yarıiletken kristaller doğrudan elektrik sinyali üretir. Kullanılan kristal malzemesi cihazın performansını doğrudan etkiler. Örneğin NaI(Tl) kristali yüksek ışık verimine sahipken, CsI(Tl) kristali daha kompakt yapısıyla cerrahi uygulamalarda avantaj sağlar (15-17). Gama prob performans parametreleri arasında hassasiyet, enerji çözünürlüğü, uzaysal çözünürlük ve açısal çözünürlük

yer almaktadır. Hassasiyet, cihazın birim aktivite başına üretebildiği sayım oranıdır. Enerji çözünürlüğü, farklı enerjilere sahip gama fotonlarının ayrılabilme kabiliyetini tanımlar. Uzaysal çözünürlük, radyoaktif kaynağın konumunun ne kadar hassas belirlenebileceğini gösterirken, açısal çözünürlük cihazın yönlendirme doğruluğunu ifade eder. Bu parametreler NEMA NU3-2004 standardına göre test edilmekte ve cihazın klinik geçerliliği bu ölçütlerle doğrulanmaktadır (1, 3-5).

Bu çalışmada, ilk olarak HISENS marka cerrahi gama prob referans alınarak bu cihaz boyutları ve bileşenleri GATE simülasyon platformuna entegre edilerek bir benzetim kodu geliştirilmiştir. Cihaz katalog verileri ile doğrulanan benzetim sonrası farklı simülasyon kristali derinlikleri için sayım hassasiyeti, enerji çözünürlüğü ve uzamsal çözünürlük incelemeleri yapılarak kristal derinliğinin bu nicelikler üzerindeki etkisi detaylıca irdelenmiştir.

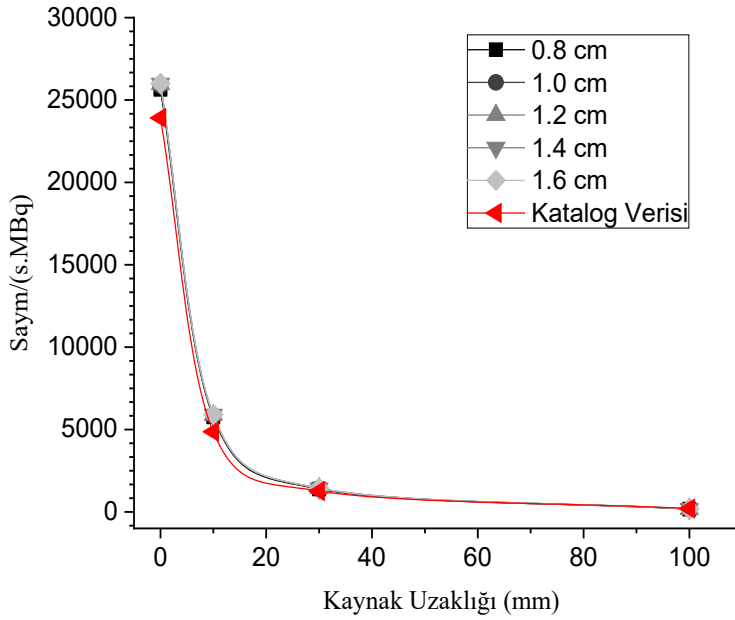
2. Yöntem

Bu çalışmada, Monte Carlo tabanlı GATE benzetim platformu kullanılmıştır. GATE, GEANT4 kütüphanesine dayalı bir simülasyon yazılımıdır ve özellikle medikal görüntüleme ve tedavi cihazlarının modellenmesi için geliştirilmiştir. Bu çalışmada CsI(Tl) kristali ve PIN fotodiyot içeren bir gama prob modeli oluşturulmuş, farklı kristal boyutları ve derinlikleri için hassasiyet, enerji çözünürlüğü ve uzaysal çözünürlük analizleri yapılmıştır.

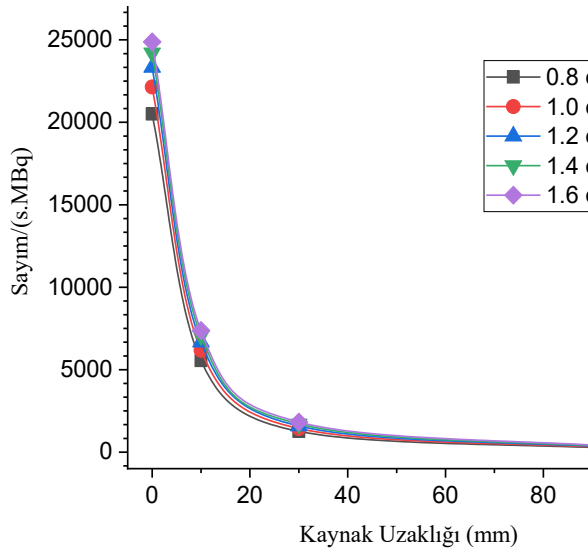
Simülasyonlarda kullanılan kaynaklar, 140 keV (^{99m}Tc) ve 511 keV (^{18}F) gama enerjilerine sahip noktasal radyoaktif kaynaklardır. Bu sayede düşük ve yüksek enerjili gama fotonlarına karşı cihaz performansı test edilmiştir. NEMA NU3-2004 standartlarına uygun şekilde hassasiyet (cps/MBq), enerji çözünürlüğü (%FWHM) ve uzaysal çözünürlük (mm) parametreleri elde edilmiştir. Ayrıca kolimatör hizalaması ve kristal derinliği gibi tasarım faktörlerinin performansa etkileri analiz edilmiştir.

3. Bulgular

Şekil 1’de 140 keV’lik gama ışınlarına karşı farklı CsI(Tl) kristal derinliklerinin farklı kaynak uzaklığına göre hassasiyet değerleri (saniye/sayım) gösterilmektedir. Yapılan benzetim çalışmasının doğrulaması için ilk olarak CsI(Tl) kristal derinliği 0,8 cm olan HISENS marka gama prob katalog hassasiyet verileri (kırmızı üçgen sembol), model tabanlı sonuçla (kare sembol) ile karşılaştırılmış ve iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Bu doğrulama sonrası farklı kristal derinlikleri, 1.0, 1.2, 1.4 ve 1.6 cm için elde edilen benzetim hassasiyet sonuçları Şekil 1’de gösterilmektedir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, CsI(Tl)-PIN fotodiyot tabanlı gama probun sayım performansının derinliğe bağlı olarak değiştiği görülmekle birlikte Şekil 1’de verildiği gibi kristal derinliğinin artmasının hassasiyeti belirgin bir şekilde artırmadığı görülmektedir. Bu da 0.8 cm’lik kristal derinliğinin 140 keV’lik gama ışınlarının neredeyse tamamını soğurmak için yeterli olduğu sonucuna ulaştırmaktadır. Bu nedenle 0.8 cm’lik kristal derinliğinden daha fazla kristal derinliğinin hassasiyete önemli bir katkısının olmayacağı sonucuna ulaşılmaktadır. Benzer şekilde, 511 keV gama enerji değeri için elde edilen hassasiyet değerleri Şekil 2’de gösterilmekte olup 1.6 cm’lik kristal derinliğinin cihaz hassasiyet uygunluğuna ulaşmak için makul bir değer olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.



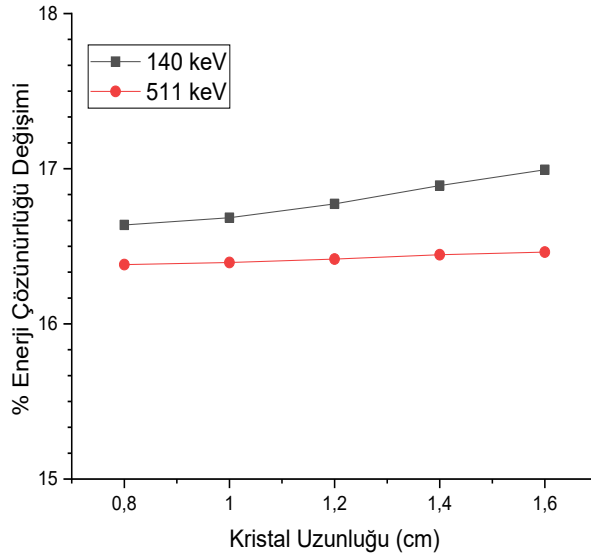
Şekil 1. 140 keV gama enerjisi için simüle edilmiş farklı CsI(Tl) kristal derinliklerinin (0.8, 1.0, 1.2, 1.4 ve 1.6 cm) farklı kaynak uzaklıklarına göre hassasiyet değerleri. 0.8 cm kristal derinliğine sahip HISENS marka cihaz katalog verisi karşılaştırma için gösterilmektedir.



Şekil 2. 511 keV gama enerjisi için simüle edilmiş farklı CsI(Tl) kristal derinliklerinin (0.8, 1.0, 1.2, 1.4 ve 1.6 cm) farklı kaynak uzaklıklarına göre hassasiyet değerleri.

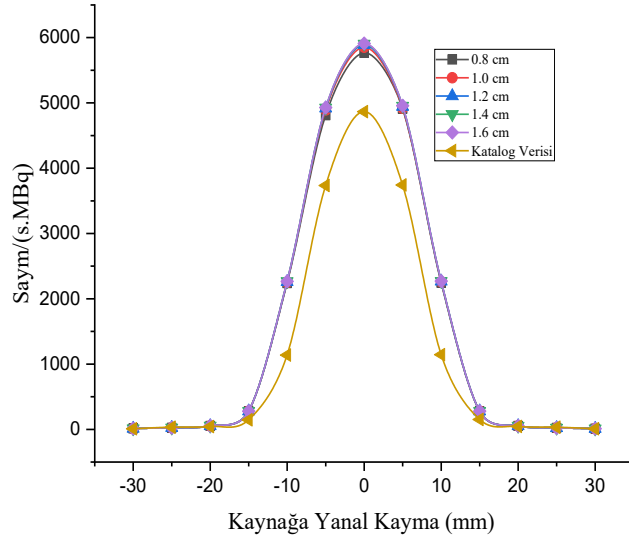
Enerji çözünürlüğü, dedektörün farklı enerji seviyelerini ayırt etme yeteneğini ifade eder. Daha düşük değer, daha iyi enerji ayırımı anlamına gelir. Kotzassarlidou ve ark. (2004), Co-57 kaynağı

ile yaptıkları çalışmada intraoperatif gama problemlerin enerji çözünürlüğünü %5–25 aralığında rapor etmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ile 140 keV ve 511 keV gama enerji değerleri için enerji çözünürlüğünün kristal derinliğinden etkilenip etkilenmediği incelenmiştir. Şekil 3'te 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 ve 1.6 cm CsI(Tl) kristal derinliği için 140 keV ve 511 keV gama enerjisi için enerji çözünürlüğünün değişimi incelenmiştir. Şekil 3'te görüldüğü gibi enerji çözünürlük değerleri %16-%17 arasındadır. 140 keV gama enerjisi için enerji çözünürlüğü kristal derinliği arttıkça az olsa da artmaktadır (kötüleşmektedir). Bu kötüleşmenin nedeni düşük gama enerji değerlerinde kristal derinliği arttıkça daha fazla saçılma ve ikincil etkileşme olarak değerlendirilmelidir. Çünkü yüksek enerjili gama enerjisi için (511 keV) çözünürlükte kristal derinliğine bağlı belirgin bir değişim görülmemektedir.

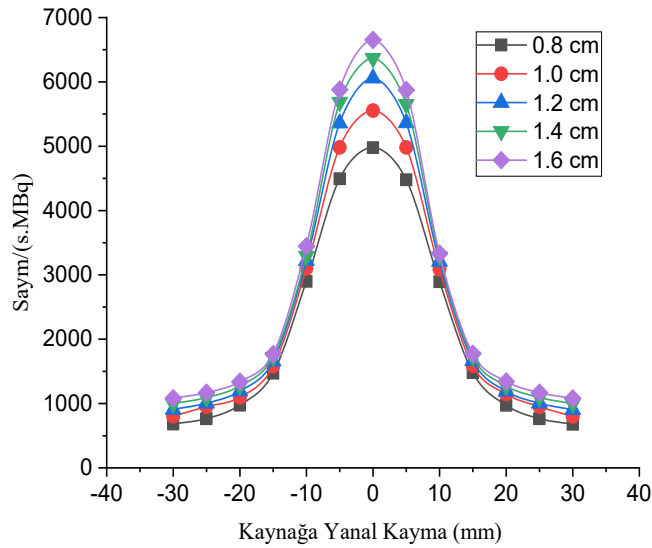


Şekil 3. 140 keV ve 511 keV gama enerjileri için simüle edilen % enerji çözünürlük değerlerinin kristal uzunluğuna göre değişimi

Cerrahi gama problemler için bir başka önemli performans parametresi yanal sapma olarak değerlendirilebilir. Yanal sapma ilgili radyasyon kaynağına doğrudan değil belirli bir yanal kayma ile gören gama probun sayım hassasiyeti olarak değerlendirilebilir. Şekil 4'de 0.8 cm kristal derinliğine sahip HISENS marka gama probun 140 keV gama ışını için yanal kayma katalog verisi ile birlikte farklı kristal derinlikleri için elde edilen simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Simülasyon sonuçları kendi içerisinde değerlendirildiğinde 140 keV için kristal derinliğinin yanal kayma üzerinde etkisinin olmadığı değerlendirilebilir. Cihaz katalog verileri ile simülasyon sonucu arasındaki sayım etkinliği farkı ise simülasyonların geometri açısından daha idealize olması şeklinde değerlendirmek mümkündür. 511 keV için yapılan simülasyon çalışması sonucu (Şekil 5) ise yüksek enerjilerde Kristal derinliğinin sayım etkinliğini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.



Şekil 4. 140 keV gama enerjisi için farklı kristal derinliklerinde yanıl kayma simülasyon sonuçları. HISENS marka cihaz katalog verileri karşılaştırma için gösterilmektedir.



Şekil 5. 511 keV gama enerjisi için farklı kristal derinliklerinde yanıl kayma simülasyon sonuçları.

4. Tartışma ve Sonuç

Simülasyon tabanlı çalışmalar, deneysel prototip geliştirilmeden önce cihaz tasarımının optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, hem maliyeti düşürmekte hem de daha verimli cihazların geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda bu simülasyon araçları bakım sırası ve sonrası cihaz performanslarının incelenmesi içinde önemli araçlardır. Bu çalışmada, Monte Carlo tabanlı GATE simülasyon aracı ile CsI(Tl)-PIN fotodiyot tabanlı bir gama probun performansını kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Öncelikle simülasyon modeli HISENS marka cerrahi prob katalog verileri ile karşılaştırılarak modelin geçerliliği test edilmiştir. Modelin geçerliliği doğrulandıktan sonra farklı sintilasyon kristal derinliklerinin farklı gama enerjilerine karşın davranışları cihaz performans parametreleri bağlamında incelenmiştir. Elde edilen bulgular, kristal derinliği ve kolimatör hizalamasının cihaz performansında kritik rol oynadığını göstermektedir.

Cerrahi problarda kullanılan sintilasyon kristallerinin ani sıcaklık değişimi ve neme maruz kalma gibi durumlarda işlevlerini (ışık üretme) yitirdikleri iyi bilinmektedir. Ayrıca uzun süreli kullanımlarda sürekli gama ışınlarına maruziyet nedeni ile kristal deformasyonları oluşabilmektedir. Bu durumda sıklıkla karşılaşılan cihaz teknik bakımı sintilasyon kristalinin değişimi odaklı olmaktadır. Uzun süreli kullanılan ve yedek parça sağlama olanağının dışında kalan durumlarda uygun Kristal teminin yanı sıra Kristal boyutlarının belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmadan görüleceği üzere düşük gama enerji (140 keV civarı) kullanımı için Kristal derinliği 0,8 cm olarak önerilirken , yüksek enerjili gama ışınları (511 keV civarı) için sintilasyon kristalinin derinliği 1,6 cm olarak önerilmektedir.

Bu çalışma aynı zamanda garanti kapsamı dışına çıkmış ve yedek parça tedariki mümkün olmayan cerrahi gama problemlerin bakımında sintilasyon kristal seçimi ve bu kristallerin etkinliğinin yanı sıra kullanılacak kristallerin boyutlarının optimizasyonunda GATE gibi benzetim kodlarının önemli bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

5. Kaynaklar

- [1] NEMA NU3-2004, Performance Measurements of Gamma Probes for Intraoperative Detection of Radiopharmaceuticals.
- [2] Gündoğdu E, Ozgenc E, Ekinci M, Özdemir D, Aşıkoğlu M (2018). Nükleer Tıpta Görüntüleme ve Tedavide Kullanılan Radyofarmasötikler. Literatür Eczacılık Bilimleri Dergisi. 7(1): 24-34.
- [3] Beenen E, Van DR, Zuidewijn DB (2005). Patients blue on patent blue: an adverse reaction during four sentinel node procedures. Surg Oncol. 14(4):151-4.
- [4] Demirtaş, Ö.F., İntraoperatif Gama Prob için Benzetim Tabanlı Kavramsal Tasarım Geliştirme ve Optimizasyon, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2024.
- [5] NEMA NU3 Performance measurements and quality control guidelines for non-imaging intraoperative gamma probes. 2004.
- [6] Zamburlini M, Keymeulen K, Bemelmans M, Brans B, Kemerink GJ (2009). Comparison of sentinel gamma probes for 99mTc breast cancer surgery based on NEMA NU3-2004 standard. Nucl Med Commun. Nov;30(11):854-61.
- [7] Tiourina, T, Arends B, Huysmans D (1998) et al. Evaluation of surgical gamma probes for



radioguided sentinel node localisation. Eur J Nucl Med 25, 1224–1231

[8] Kaviani S, Zeraatkar N, Sajedi S (2016). Development and characterization of a compact hand-held gamma probe system, SURGEOGUIDE, based on NEMA NU3-2004 standards. Journal of Instrumentation 11(12), 1200.

[9] Itikawa E N, Santosa L A, Trevisan A C, Pitellaa F A, Katoa M, Moraesb Ed R, Wichert-Ana L (2017). Characterization of resolution, sensitivity, and shielding of a gamma-probe for sentinel lymph node localization: an experimental study. Nuclear Medicine Communications 38: 837-842.

[10] Kolcu OB, Yetkin T, Iren E (2023). Development of active shielding gamma probe: asimulation study. Eur. Phys. J. Plus 138, 169.

[11] Bedir ME, Thomadsen BR, Bednarz BP (2020). Development and characterization of a handheld radiation detector for radio-guided surgery, Radiation Measurements 135.

[12] Radnia A, Abdollahzadeh H, Teimourian B (2021). Development and characterization of an all-in-one gamma probe with auto-peak detection for sentinel lymph node biopsy based on NEMA NU3-2004 standard. Nucl Med 35, 438–446.

[13] Costa FE, Rela PR, Oliveira IB, M. Pereira CC, Hamada MM (2006). “Surgical gamma probe with TlBr semiconductor for identification of sentinel lymph node,” IEEE Transactions on Nuclear Science, 1403-1407.

[14] Berdnikova AK, Dubinin FA, Kantserov VA (2016). Medical gamma probe based on LaBr3:Ce scintillation crystal. Bull. Lebedev Phys. Inst. 249–251.

[15] Ricard M (2001). Intraoperative detection of radiolabeled compounds using a hand held gamma probe. Nucl Instrum Meth Phys Res A. 458:26-33.

[16] Barber HB, Barrett HH, Hickernell TS, Kwo DP, Woolfenden JM, Entine G, Ortale Baccash C (1991). Comparison of NaI(Tl), CdTe, and HgI2 surgical probes: physical characterization. Med Phys. 18:373-381.

[17] Morris Jr, Barclay TR, Tanida R, Nemcek JV (1971) A Miniaturized Probe for Detecting Radioactivity at Thyroid Surgery Phys. Med. Biol. 16(1971) 397.

Kent İçi Hafif Raylı Sistemlerde Periyodik Araç ve Hat Bakım Uygulamaları

Periodic Maintenance Practices for Vehicles and Track Infrastructure in Urban Light Rail Systems

Ali Samet AYVAZ, Dr. Öğr. Üyesi Cengiz Görkem DENGİZ

Samsun Üniversitesi, 19 Mayıs Üniversitesi

E-posta:

alisamet.ayvaz@samsun.edu.tr

gorkem.dengiz@omu.edu.tr

Özet

Kent içi hafif raylı sistemlerin artan yolcu talebi, hizmet sürekliliği ve altyapı genişlemesi karşısında, bakım faaliyetleri yalnızca arıza sonrası müdahalelerle sınırlı kalmamakta; önleyici, koşul temelli ve kestirimci stratejilerle bütünleşmiş, çok boyutlu bir yönetime dönüşmektedir. Bu çalışma, araç ve sabit hat sistemlerine yönelik bakım uygulamalarını, bakım türlerinin teknik gerekçelerini, uluslararası standartlara dayanan stratejileri ve dijitalleşme sürecini bütüncül bir çerçevede incelemektedir. CMMS yazılımları, MEMS sensörleri ve yapay zekâ destekli karar sistemlerinin entegrasyonu sayesinde, bakım süreçleri operasyonel verimlilik, sürdürülebilirlik ve hizmet kalitesi odaklı olarak yeniden tanımlanmaktadır. Bulgular, etkin bakım yönetiminin teknik uygulamaların ötesinde stratejik ve örgütsel bir yaklaşımı gerektirdiğini ortaya koymakta; bakımın yalnızca işletme güvenliğini değil, aynı zamanda uzun vadeli sistem değerini belirleyen kritik bir faktör olduğunu vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hafif Raylı Sistemler, Periyodik Bakım, Kestirimci Bakım, Dijitalleşme, Bakım Yönetimi

Abstract

In response to increasing passenger demand, service continuity expectations, and infrastructure expansion, maintenance in urban light rail systems has evolved beyond post-failure interventions into a multidimensional management strategy incorporating preventive, condition-based, and predictive approaches. This study offers a comprehensive analysis of vehicle and infrastructure maintenance practices, maintenance strategy classifications, internationally recognized standards, and the transition toward digitalization. Through the integration of CMMS platforms, MEMS sensors, and AI-supported decision-making systems, maintenance processes are being redefined with a focus on operational efficiency, sustainability, and service quality. The findings emphasize that effective maintenance management requires not only technical proficiency but also strategic and organizational alignment, establishing maintenance as a key determinant of long-term system reliability and value.

Keywords: Light Rail Systems, Periodic Maintenance, Predictive Maintenance, Digitalization, Maintenance Management



1. Giriş

Hafif raylı sistemler (HRS), kent içi toplu taşıma altyapılarının en kritik bileşenlerinden biri olarak, yüksek taşıma kapasiteleri, çevresel sürdürülebilirlikleri ve düşük işletme maliyetleriyle giderek daha yaygın hale gelmektedir. Artan yolcu talebi, genişleyen hat uzunlukları ve hizmet sürekliliği beklentileri, bu sistemlerin yalnızca tasarım ve inşaa süreçlerini değil, aynı zamanda etkin ve kesintisiz işletme politikalarını da zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda bakım ve onarım faaliyetleri, yalnızca arıza sonrası müdahale değil, aynı zamanda riskleri önceden tahmin ederek güvenliğin sürekliliğini sağlayan stratejik bir yönetim alanı hâline gelmiştir.

Bakım faaliyetleri, hem araçların (rolling stock) hem de sabit hat altyapısının (track infrastructure) fiziksel ve işlevsel bütünlüğünü korumayı hedefler. Zaman içinde oluşabilecek yıpranmaların, titreşim temelli deformasyonların, iklim koşullarının etkisiyle meydana gelen aşınmaların ya da elektronik sistemlerdeki arızaların önceden tespit edilmesi, bakım süreçlerinin sistematik bir yaklaşımla yürütülmesini gerektirir. Bu süreçte yalnızca planlı bakım periyotlarının belirlenmesi değil, aynı zamanda bakım kaynaklarının (zaman, iş gücü, yedek parça, test ekipmanı vb.) doğru planlanması ve izlenebilirliğinin sağlanması da büyük önem taşır. Uluslararası standartlar, özellikle ISO 55000 varlık yönetimi, BS EN 50126 güvenilirlik-erişilebilirlik-bakım kolaylığı-güvenlik (RAMS) sistemi ve UIC teknik dokümanları gibi düzenlemelerle bu sürecin çerçevesini belirlemektedir.

Modern raylı sistem işletmeleri, yalnızca takvim temelli değil, aynı zamanda koşul temelli ve kestirimci bakım stratejilerini de süreçlerine entegre etmeye başlamıştır. Gelişen sensör teknolojileri, veri işleme altyapıları ve yapay zekâ tabanlı tahminleme algoritmaları sayesinde bakım faaliyetleri daha esnek, önleyici ve maliyet etkin hâle getirilebilmektedir. Ancak bu dönüşüm, yalnızca teknolojik altyapının değil, aynı zamanda kurumsal süreçlerin ve insan kaynağının da yeniden yapılandırılmasını gerektirmektedir.

Bu çalışma, hafif raylı sistemlerde bakım ve onarım süreçlerini sistematik bir bütünlük içinde ele alarak, farklı bakım türlerini, uygulama prensiplerini, araç ve hat altyapısına yönelik örnekleri ve dijitalleşme eğilimlerini teknik bir perspektiften incelemeyi amaçlamaktadır. Amaç, bakımın sadece teknik bir faaliyet değil, aynı zamanda hizmet kalitesi, yolcu güvenliği ve sistem verimliliği üzerinde doğrudan etkisi olan yönetimsel bir unsur olduğunu vurgulamak; bu alandaki güncel eğilimleri literatür ve uygulama deneyimleri üzerinden okuyucuya aktarmaktır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Kent içi hafif raylı sistemlerde bakım yönetimi, son yıllarda yalnızca zaman temelli rutin işlemlerden ibaret olmaktan çıkmış, risk bazlı, kestirimci ve veri odaklı stratejilere doğru evrilmiştir. Bu dönüşüm, hem sistem güvenliği hem de bakım maliyetlerinin kontrolü açısından önemli avantajlar sunmakta, hem akademik çalışmalarda hem de uluslararası standartlarda giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Literatürde, bakım planlamasına ilişkin çok çeşitli stratejiler, optimizasyon modelleri, veri destekli karar sistemleri ve teknoloji entegrasyonları ele alınmaktadır.

Bakım süreçlerinin uluslararası standartlarla uyumlu hâle getirilmesi, modern raylı sistemlerde öncelikli bir gereklilik haline gelmiştir. ISO 55000, BoStrab, DIN EN 13231, UIC teknik rehberleri ve BS EN 50126 gibi düzenlemeler, bakım planlamasında varlık yönetimi, performans değerlendirme, risk önceliği ve sistem güvenilirliği gibi parametreler çerçevesinde yönlendirici rol oynamaktadır (Consilvio et al., 2021; Davis et al., 2019). Bu çerçevede, bakım kararlarının ağ düzeyinde ele alınması; örneğin maksimum arıza yanıt süresi, düğüm önceliği ve bakım garantisi gibi parametrelerin dikkate alınması önerilmektedir (Sun et al., 2020). Özellikle kentsel ölçekte hizmet veren karmaşık sistemlerde bu tür parametrelerin çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarıyla bütünleştirilmesi önem kazanmaktadır.

Çok sayıda çalışmada, bakım sıklığı, maliyet ve sistem kullanılabilirliği arasında Pareto dengesine dayalı modeller geliştirildiği görülmektedir (Lin et al., 2019; Peng et al., 2024). Bu modellerde NSGA-II, parçacık sürü optimizasyonu, büyük komşuluk arama gibi sezgisel algoritmalarla yüksek çözünürlüklü zamanlama çözümleri sunulmaktadır (Tian & Wang, 2022; Sun et al., 2023). Ayrıca gerçek zamanlı veriye dayalı olarak bakım planlarının dinamik şekilde güncellenmesine olanak tanıyan rolling-horizon yapılar da önerilmektedir (Consilvio et al., 2021). Bu modeller, özellikle kestirimci bakım stratejileri ile birlikte kullanıldığında, bakım süresi ve arıza sıklığında önemli azalmalar sağlamaktadır. Titreşim, sıcaklık, gerilim gibi parametrelerin sensör tabanlı izlenmesi sayesinde, arıza meydana gelmeden önce müdahale mümkün hale gelmekte, bu da sistem sürekliliğini artırırken işletme maliyetlerini düşürmektedir (Feng et al., 2020; Vračar et al., 2025). Günümüzde VOB sistemleri, fren diskleri ve enerji altyapısı gibi birçok kritik bileşen bu tür sistemlerle izlenebilir hâle gelmiştir (Sun et al., 2023; He et al., 2020).

Her ne kadar kestirimci yaklaşımlar yükselişte olsa da, zaman temelli periyodik bakım hâlen yaygın biçimde uygulanmaktadır. Özellikle fren sistemleri, akü ve inverter modülleri, kapı mekanizmaları ve HVAC sistemleri gibi alt bileşenlerde belirli aralıklarla bakım zorunluluğu bulunmaktadır (Bradley, 2013; Kraijema, 2015). Bununla birlikte, bu bakım türleri giderek daha fazla şekilde koşul temelli veri ile desteklenmektedir. Örneğin Kwon et al. (2021), fren sistemleri için artırılmış gerçeklik (AR) destekli eğitim uygulamalarının, bakım süresini kısaltarak hata oranını düşürdüğünü göstermiştir. Firlik et al. (2012) ise tramvay araçlarında ve ray altyapısında entegre sensörlerle erken hata tespiti mümkün olduğunu vurgulamıştır.

Bakım performansı artık sadece maliyet ve zaman parametreleriyle değil; aynı zamanda hizmet kalitesi, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik gibi geniş kapsamlı anahtar performans göstergeleri (KPI, KEPI) ile de değerlendirilmektedir (Awad et al., 2023; González-Gil et al., 2015). Bu göstergeler, bakım yönetiminde yalnızca teknik değil, stratejik ve çevresel etkilerin de dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bu noktada veri madenciliği, yapay zekâ, IoT sistemleri ve MEMS tabanlı sensör teknolojileri devreye girmektedir. Bu teknolojiler, bakım önceliklendirmesinde karar destek sistemi işlevi görerek akıllı bakım modellerine geçişi mümkün kılmaktadır (Ahmad, 2019; Jelila & Pamula, 2022). Özellikle derin öğrenme algoritmaları, tahmine dayalı modelleme ve otomatik alarm sistemleri, bakım sıklığını azaltarak sistem ömrünü uzatmakta ve bakım kaynaklarının daha etkin yönetilmesini sağlamaktadır (Padhi et al., 2022; Martins et al., 2023).

Bu bulgular, bilimsel yazında öne çıkan eğilimin, bakım stratejilerinin yalnızca teknik düzeyde değil; aynı zamanda dijital, örgütsel ve ekonomik açılardan da çok boyutlu biçimde ele alınması



gerektiğini ortaya koymaktadır. Etkili bir bakım yönetimi yaklaşımı ise yalnızca operasyonel güvenliği sağlamakla kalmayıp; karar süreçlerine bütünlük verisi akışı, sistematik risk yönetimi ve uzun vadeli sürdürülebilirlik gibi faktörleri de dikkate almalıdır.

3. Bakım Türleri ve Uygulama Prensipleri

Kent içi hafif raylı sistemlerin güvenli, verimli ve sürdürülebilir şekilde işletilebilmesi, bakım süreçlerinin yalnızca uygulama düzeyinde değil, aynı zamanda stratejik ve sistematik yaklaşımlarla yönetilmesini gerektirir. Bu bağlamda bakım türleri genel olarak üç ana grupta sınıflandırılmaktadır: zaman temelli, koşul temelli ve kestirimci bakım. Her bir strateji, bakımın zamanlaması, uygulanma biçimi, veri gereksinimi ve maliyet-etkinlik dengesi açısından farklı avantaj ve sınırlılıkları beraberinde getirir.

Zaman temelli bakım, belirli aralıklarla yapılan ve üretici talimatlarına veya işletme geçmişine dayalı olarak tanımlanan periyodik müdahaleleri içerir. Bu yaklaşım, uygulanması kolay ve yönetilmesi öngörülebilir olduğu için uzun yıllar boyunca yaygın şekilde tercih edilmiştir. Örneğin haftalık kontroller, aylık yağlamalar, yıllık sistemsel revizyonlar bu gruba girer. Ancak bu yöntemin en büyük dezavantajı, sistemin gerçek durumunu dikkate almaması ve bazı bileşenlere gereğinden önce ya da sonra müdahale edilmesine yol açabilmesidir. Özellikle az kullanılan ya da çevresel koşullardan etkilenmeyen alt sistemlerde bu durum, kaynak israfına ve potansiyel güvenlik risklerine neden olabilir.

Koşul temelli bakım stratejileri ise sistemin fiziksel durumu hakkında gerçek zamanlı ölçümler yapılmasına dayanır. Titreşim analizi, sıcaklık artışı, elektriksel direnç değişimi gibi ölçülebilir parametreler kullanılarak, bir arıza belirtisinin erken aşamada tespiti sağlanır. Bu yaklaşım, aşınma, gevşeme, dengesiz yük veya ısıl bozulmalar gibi fiziksel sorunların gözle görülebilir hale gelmeden önce saptanmasına olanak tanır. Böylece bakım yalnızca gerektiğinde yapılır ve hem maliyet hem de işletme sürekliliği açısından avantaj sağlanır. Ancak koşul temelli bakımın uygulanabilmesi için sistemin sensörlerle donatılması, bu verilerin izlenebilir formatta toplanması ve yorumlanabilir karar eşiklerinin tanımlanması gerekir. Bu nedenle altyapı yatırımı ve teknik uzmanlık gereksinimi açısından zaman temelli yaklaşıma göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir.

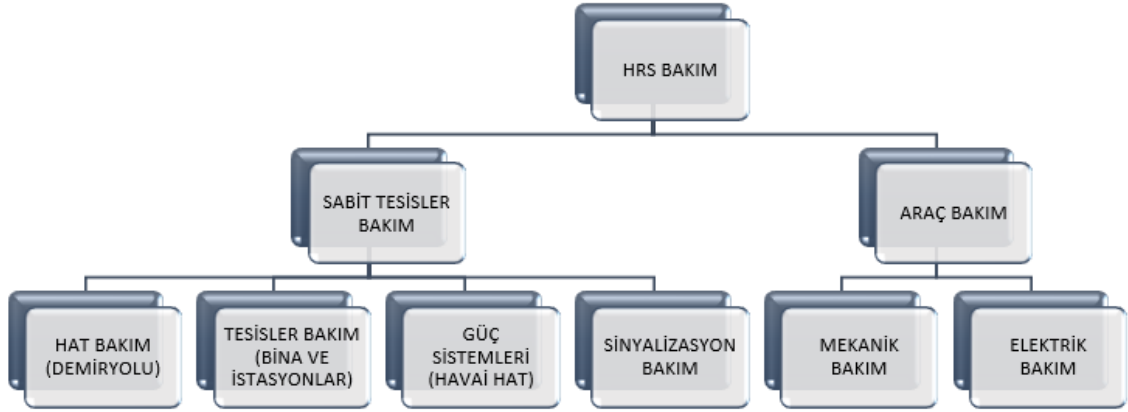
Kestirimci bakım ise veri analitiği, makine öğrenmesi ve istatistiksel modelleme tekniklerini kullanarak, bakım ihtiyacını önceden tahmin etmeyi amaçlar. Bu yöntemlerde sensör verileri, geçmiş arıza kayıtları, ortam koşulları ve kullanım sıklığı gibi çok sayıda değişken analiz edilerek, bir bileşenin arıza yapma olasılığı hesaplanır. Derin öğrenme, zaman serisi modelleme, karar ağaçları ve regresyon analizi gibi yöntemler, bu amaçla geliştirilen algoritmalar arasında yer alır. Kestirimci bakım, sadece sistem güvenliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda stok yönetimi, iş gücü planlaması ve arıza sonrası onarım süresi gibi operasyonel faktörlerde de iyileşme sağlar. Bununla birlikte, bu stratejinin başarısı; sensör kalibrasyonunun doğruluğuna, veri bütünlüğüne ve modelin eğitildiği örneklemenin sistemle ne kadar örtüştüğüne doğrudan bağlıdır.

Bu üç temel strateji çoğu zaman birbirini dışlamaz, aksine sistemin karmaşıklığına ve bakım bütçesine bağlı olarak birlikte uygulanabilir. Örneğin, tekerlek geometrisi veya fren balatası

gibi yüksek öneme sahip ama ölçülebilir bileşenler için koşul temelli bakım tercih edilebilirken, yolcu bilgilendirme ekranları gibi daha düşük riskli sistemlerde zaman temelli bakım yeterli olabilir. Kritik sistemlerde ise kestirimci bakımın entegrasyonu, hizmet kalitesini artırırken beklenmedik duruşların önüne geçilmesini sağlar. Bu bağlamda en uygun bakım stratejisinin belirlenmesi, sistemin teknik özelliklerinin yanı sıra işletmecinin organizasyonel kapasitesi, bakım kültürü, dijitalleşme düzeyi ve yasal düzenlemelere uyum gibi çok sayıda faktörün birlikte değerlendirilmesini gerektirir.

4. Bakım Uygulamaları

Hafif raylı sistemlerde bakım faaliyetleri, araç sistemleri ile sabit tesis ve hat altyapısı olmak üzere iki temel alanda yürütülmektedir. Bu iki alan, hem işlevsel olarak birbirinden farklı bakım gereksinimlerine sahip hem de sistemin bütünsel işletme güvenliği açısından birbirini tamamlayıcı niteliktedir. Araç sistemlerinde mekanik ve elektriksel bileşenlerin performansını korumaya yönelik işlemler ön plandayken, sabit hat altyapısında ray, makas, kurp ve drenaj gibi fiziksel unsurların düzenli kontrolü ve korunması esastır. Bu bölümde, bakım faaliyetlerinin her iki kapsamda nasıl uygulandığı, hangi yöntemlerin benimsendiği ve hangi teknik parametrelerin göz önünde bulundurulduğu alt başlıklar hâlinde ele alınacaktır.



Şekil 1. Demiryolu işletmelerinin bakım onarım departmanlarında organizasyon şeması

4.1. Araç sistemlerinde bakım

Kent içi hafif raylı sistemlerde kullanılan araçların mekanik ve elektriksel alt sistemleri, sürekli ve güvenli işletim için düzenli olarak kontrol edilmesi gereken bileşenlerden oluşur. Bu bakım faaliyetleri; güvenlik, konfor, enerji verimliliği ve sistem ömrü açısından kritik rol oynar. Araç bakımında uygulanan işlemler, genellikle haftalık, aylık ve yıllık olmak üzere farklı zaman periyotlarına göre planlanır ve üretici teknik dokümanları, ulusal yönetmelikler ve uluslararası standartlara dayalı olarak gerçekleştirilir.



Mekanik sistemler kapsamında öncelikli olarak fren sistemi, boji yapıları, süspansiyon elemanları ve tekerlekler öne çıkar. Fren disklerinin çatlak kontrolü, balata kalınlığının ölçümü ve piston hareketinin testi gibi işlemler, araç güvenliğini doğrudan etkilediğinden haftalık ve aylık periyotlarla kontrol edilir. Tekerlek profili ve flanş yüksekliği ise özel ölçüm ekipmanları ile belirli kilometre aralıklarında ölçülerek, aşırı aşınma durumunda torna işlemi veya değişim planlanır. Boji sistemi üzerinde amortisör, bağlantı milleri ve taşıyıcı sistemin bütünlüğü, özellikle yıllık bakım döngülerinde detaylı şekilde incelenir. Kapı sistemleri ve yolcu iniş-biniş güvenliği açısından kritik sensörler de görsel ve fonksiyonel testlere tabi tutulur.

Elektriksel sistemler arasında en kritik unsurlar inverter birimleri, akü modülleri, HVAC sistemleri, aydınlatma ve yolcu bilgilendirme ekranlarıdır. Akülerin voltaj değerleri, bağlantı noktalarının sıklığı ve yedekleme kapasiteleri düzenli olarak test edilir. HVAC sistemlerinde filtre değişimleri, hava akış yönleri, sıcaklık duyargalarının tepki süreleri gibi parametreler ölçülerek hem konfor hem de enerji verimliliği korunur. İnverter sistemleri ise genellikle özel test cihazları ile motor gücü aktarım performansı, ısı dağılımı ve enerji geri kazanım oranı açısından değerlendirilir. Özellikle frenleme sırasında üretilen enerjinin yeniden sisteme kazandırılması, modern hafif raylı sistem araçlarında verimlilik açısından önemli bir kriterdir.

Araç bakımında belirli görevlerin ne zaman ve hangi sırayla yapılacağı, bakım zaman çizelgeleriyle düzenlenir. Bu çizelgeler, her bir alt sistem için bakım sıklığını, işlem süresini, gerekli ekipmanları ve sorumlu personel profilini içerir. Bu tür çizelgeler, bakım sürecinin standardize edilmesini ve izlenebilirliğini sağlar. Aşağıda örnek bir haftalık araç bakım görev takvimi şematik olarak sunulabilir:

Şekil 1. “Haftalık Araç Bakım Görev Takvimi” — Bu şemada, fren kontrolü, akü voltaj testi, HVAC filtre denetimi gibi işlemlerin gün bazında dağılımı gösterilebilir.

Tüm bu işlemlerin kayıt altına alınması ve gerektiğinde dijital bakım sistemleriyle entegrasyonu, bakım kalitesinin artırılmasını ve denetim süreçlerinin kolaylaşmasını sağlar. Özellikle bakım geçmişinin izlenebilirliği, arıza kök neden analizlerinin yapılması ve bakım performansının ölçülmesi açısından büyük önem taşır.

4.2. Hat ve Sabit Tesis Sistemlerinde Bakım

Hafif raylı sistemlerin sürekliliğini ve yolcu güvenliğini sağlayan en temel unsurlardan biri, sabit hat altyapısının düzenli ve öngörülü biçimde bakımının yapılmasıdır. Raylar, makas sistemleri, kurplar, sinyalizasyon elemanları ve drenaj hatları gibi unsurlar; hem mekanik hem de çevresel etkiler altında zamanla deformasyona uğrayabilir. Bu nedenle, sabit tesis ve hat bakım faaliyetleri; periyodik kontroller, durum izleme ve arıza önleme perspektifiyle yürütülmelidir.

Ray altyapısında bakım faaliyetleri, ray başı aşınması, geometrik bozulma, trifen gevşemesi, izolasyon kırılması ve kaynak deformasyonu gibi parametreler üzerinden değerlendirilir. Ray profil kontrolü, ultrasonik hata taramaları ve gevşek bağlantıların torklanması gibi işlemler, hat

boyunca belirlenen periyotlarla gerçekleştirilir. Kurp bölgeleri (eğrisel hat kesitleri), tekerlek-ray etkileşiminin en yoğun yaşandığı alanlar olup, burada ray yağlama uygulamaları hayati önem taşır. Yağlama yapılmaması durumunda hem raylarda hem de tekerlek flanşlarında hızla gelişen aşınmalar, gürültü artışı ve yolcu konforunun bozulmasına yol açar. Otomatik yağlama sistemleri bu sorunu minimize ederken, manuel uygulamalar hâlâ birçok sistemde yaygın olarak sürdürülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2. Ray bağlantı elemanları – trifon ve takoz torklama ve değişimi



(a)



(b)

Şekil 3. Kayar selet ve kurp yağlama bakımı

Makas sistemleri, trenin hat değiştirme ve yön geçişi yaptığı bileşenler olduğundan yapısal hassasiyeti yüksek bölgeler olarak öne çıkar. S tipi makas geçişlerinde zamanla oluşan tutukluk, selet kaymaları, ayar vidası gevşemeleri ve hidrolik aktüatörlerdeki basınç düşüşleri, düzenli bakım gereksinimini ortaya koyar. Bu nedenle makas motorlarının yılda en az iki kez sökölüp test edilmesi; elektriksel bağlantılar, tork değerleri ve konum sensörlerinin işlevselliği açısından denetlenmesi gerekmektedir. Ayrıca makas seletleri ve dil ucu bağlantılarında yağlama yapılmaması, ilerleyen aşamalarda sistematik arızalara yol açabilir.

Hat boyunca sürdürülen bakım faaliyetlerinde sıklıkla göz ardı edilen ancak kritik öneme sahip bir diğer sistem, drenaj altyapısıdır. Yoğun yağış, sel veya kar erimesi gibi durumlarda ray yatağının suyla dolması, hem elektriksel kısa devre riskini artırmakta hem de ray zemininde oturma ve boşluk oluşumuna neden olmaktadır. Menhol kapakları, oluk altı tahliye boruları ve drenaj şaftları, bu gibi durumlarda aktif olarak çalışmak zorundadır. Bu nedenle drenaj sistemlerinin periyodik olarak temizlenmesi, özellikle riskli kot farkı bulunan hat kesitlerinde aksatılmamalıdır. Drenaj bakımı, genellikle aylık planlamaya dâhil edilir; ancak geçmiş yıllarda yaşanan aşırı yağış sonrası kapanma vakaları, bu bakım kaleminin dinamik risk analizlerine göre esnekleştirilmesi gerektiğini göstermektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4. Drenaj kanalı temizliği

Sinyalizasyon ve enerji iletim sistemleri de sabit tesis bakımının ayrılmaz parçalarıdır. Hat boyunca yer alan röle kutuları, kablo kanalları, sinyal lambaları ve kesintisiz güç kaynakları (UPS), elektriksel test cihazları ile periyodik olarak denetlenmeli; gerilim toleransları ve röle tepki süreleri belirli sınırlar içinde kalmalıdır. Ray devresi üzerinde oluşabilecek kaçak akımlar, özellikle yüksek nemli ortamlarda sinyal gecikmelerine veya yanlış yönlendirmelere neden olabilir.

6. Bakım Planlamasında Dijitalleşme ve Entegrasyon

Hafif raylı sistemlerde bakım faaliyetleri, geleneksel zaman temelli uygulamalardan veri destekli ve otomasyona entegre süreçlere doğru hızla evrilmektedir. Bu dönüşümde, dijital teknolojilerin bakım yönetim sistemlerine entegrasyonu, yalnızca arıza sonrası müdahaleleri değil, arıza öncesi tahmin ve kaynak planlamasını da içeren bütüncül bir yaklaşımı beraberinde getirmektedir. Bu yaklaşım, bakımın teknik bir faaliyet olmanın ötesinde, bir karar destek ve stratejik planlama mekanizması olarak ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Bakım planlamasında en yaygın dijital araçlardan biri, CMMS (Computerized Maintenance Management System) sistemleridir. Bu sistemler, bakım görevlerinin zamanlanması, yedek parça stok takibi, iş gücü ataması, maliyet hesaplaması ve geçmiş kayıtların arşivlenmesi gibi birçok

işlevi tek bir dijital platformda bütünleştirir. Özellikle çok sayıda araç ve hat segmentinden oluşan karmaşık raylı sistem ağlarında, CMMS yazılımları bakımın kurumsal hafızasını oluşturmak açısından kritik rol oynar. Bu sistemlerin sahadan gelen gerçek zamanlı verilerle beslenmesi, yalnızca planlama açısından değil, denetim ve kalite kontrol süreçlerinde de önemli avantajlar sunar.

Dijitalleşmenin bir diğer temel bileşeni, MEMS (Mikro-Elektromekanik Sistemler) tabanlı sensörlerin kullanımıdır. Bu sensörler; titreşim, sıcaklık, nem, akım, gerilim ve yük gibi çok çeşitli parametreleri izleyerek bakım kararlarının veriye dayalı biçimde alınmasını sağlar. Özellikle fren sistemleri, boji alt bileşenleri ve inverter birimleri gibi hareketli ve arıza riski yüksek noktalarda kullanılan bu sensörler, arıza belirtisi olan mikro düzeydeki sapmaları yüksek hassasiyetle tespit edebilir. Bu sayede hem arızaların meydana gelmeden önce engellenmesi hem de bakımın sadece gerekli olduğunda yapılması sağlanır. Bu da bakım sıklığının azaltılması, sistem ömrünün uzatılması ve kaynakların daha verimli kullanılması anlamına gelir.

Yapay zekâ (AI) ve makine öğrenmesi (ML) uygulamaları, bakım planlamasında daha gelişmiş analiz olanakları sunmaktadır. Geçmiş bakım verileri, arıza kayıtları, çevresel koşullar ve kullanım yoğunluğu gibi parametreler büyük veri kümeleri olarak ele alınmakta; bu veriler üzerinden arıza eğilimlerini öngören modeller geliştirilmektedir. Derin öğrenme algoritmaları ve karar ağaçları, özellikle fren sistemleri, inverter arızaları ve enerji altyapısındaki kesinti öngörülerinde başarılı sonuçlar vermektedir. Bu modellerin başarısı, eğitim verisinin kalitesi ve sürekliliğiyle doğrudan ilişkilidir. Özellikle rolling-horizon yapısında güncellenebilen sistemler, gerçek zamanlı karar destek sağlayarak bakım stratejilerinin dinamik olarak güncellenmesini mümkün kılar.

Bakım verisinin güvenli ve merkezi biçimde saklanması ise kurumsal entegrasyon açısından önemli bir konudur. Bulut tabanlı altyapılar, hem farklı birimlerin eş zamanlı veri erişimini sağlar hem de saha operatörleri ile yönetim birimleri arasında hızlı iletişim kurma olanağı sunar. Mobil cihazlarla entegre çalışan bakım uygulamaları, teknik personelin sahadaki görevleri dijital ortamda tamamlamasını, ölçüm verilerini anlık olarak yüklemesini ve bakım sonrası değerlendirme raporlarını doğrudan sisteme işlemesini sağlar.

Dijitalleşme yalnızca teknolojik bir dönüşüm değil; aynı zamanda organizasyonel kültürde değişimi de beraberinde getirir. Etkin bir dijital bakım yönetimi sistemi kurmak, sadece yazılım ve donanım altyapısını değil, aynı zamanda süreç tasarımı, personel eğitimi ve veri yönetim kültürünü de kapsar. Başarılı uygulamalarda dijital sistemlerin yalnızca karar alma sürecine değil, aynı zamanda stratejik planlamaya, sürdürülebilirlik hedeflerine ve kurumsal risk yönetimine katkı sağladığı görülmektedir.

7. Tartışma

Hafif raylı sistemlerde bakım yönetimi üzerine yapılan bu teknik değerlendirme, mevcut uygulamaların büyük ölçüde zaman temelli ve prosedür odaklı kaldığını; ancak gelişen teknoloji ve artan işletme karmaşıklığı karşısında bu yaklaşımın yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır. Araç bakımında fren sistemi, tekerlek profili, HVAC birimleri ve enerji modülleri gibi bileşenler



hâlâ sabit periyotlarla kontrol edilmekte; bu da gereğinden erken parça değişimlerine ya da gecikmiş arıza müdahalelerine neden olabilmektedir. Oysa koşul temelli izleme sistemleri, aynı bileşenlerin performansını doğrudan ölçerek bakım kararlarını nesnel verilere dayandırma imkânı sunmaktadır. Titreşim, sıcaklık ve elektriksel verilerin düzenli takibi, özellikle tekrarlayan arızaların önlenmesi ve yedek parça planlamasının iyileştirilmesi açısından stratejik değer taşımaktadır.

Sabit tesislerde ise özellikle kurp bölgelerinde yapılan yağlama uygulamaları, bakımın en hassas kalemlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Yağlama sıklığının gecikmesi, hem tekerlek hem de ray profillerinde hızla artan aşınmalara yol açmakta, bu da tornalama sıklığını artırmakta ve sistemin ekonomik ömrünü kısaltmaktadır. Benzer şekilde drenaj sistemlerinin yalnızca planlı temizlik dönemlerinde değil, meteorolojik riske göre de dinamik biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir. Yıllık bakım planları bu tür dışsal etkilere göre esnekleştirilmediğinde, sistemin dış hava koşullarına karşı dirençsiz kalması olasıdır.

Dijitalleşme eksenli gelişmeler, mevcut bakım yaklaşımını yalnızca hızlandırmakla kalmayıp, aynı zamanda yapısını da dönüştürmektedir. CMMS gibi entegre yazılımlar, bakımın planlama, uygulama ve raporlama döngüsünü tek bir platformda birleştirerek süreç görünürlüğünü artırmaktadır. Ancak bu yazılımların etkili çalışabilmesi için veri bütünlüğü, kullanıcı disiplini ve sahadan gelen geribildirimlerin sistematik olarak işlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde dijital altyapı yatırımının performans kazanımı sağlayamaması kaçınılmazdır. Bunun yanında yapay zekâ tabanlı karar destek sistemleri, yalnızca kestirimci bakımın değil, uzun vadeli bakım bütçesi planlamasının da temel girdisi hâline gelmektedir. Geçmiş arıza örüntülerini kullanarak arıza olasılığı öngören bu sistemlerin başarısı ise sahadan gelen verinin güvenilirliği ile doğrudan ilişkilidir.

Uluslararası standartlarla karşılaştırıldığında, özellikle RAMS (güvenilirlik, erişilebilirlik, bakım kolaylığı, güvenlik) uyumu ve ISO 55000 varlık yönetimi ilkeleri, yerel sistemlerde hâlen yeterince entegre edilmiş değildir. Risk önceliklendirme, performans değerlendirme ve bakımın stratejik hedeflerle uyumu gibi temel prensipler, çoğu zaman uygulamada göz ardı edilmektedir. Oysa UIC ve EN normlarında belirtildiği üzere, bakım yalnızca teknik bir operasyon değil, aynı zamanda sistemin toplam yaşam döngüsü boyunca güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir biçimde çalışmasını sağlayacak bir yönetim aracıdır.

Özetle, geleneksel bakım yapıları dijital ve veri temelli sistemlere evrilirken, bu dönüşüm yalnızca teknolojik değil, organizasyonel ve kültürel olarak da desteklenmelidir. Etkin bir bakım yönetimi ancak; izlenebilirlik, karar destek mekanizmaları, personel eğitimi, sürdürülebilirlik hedefleri ve risk temelli planlama gibi çok boyutlu kriterlerin birlikte ele alındığı bir çerçevede mümkündür. Teknik iyileştirmelerin uzun vadeli başarıya dönüşmesi için sistematik değerlendirme mekanizmalarının ve sürekli iyileştirme döngülerinin bakım yönetimine entegre edilmesi kaçınılmazdır.

6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, kent içi hafif raylı sistemlerde bakım ve onarım faaliyetlerinin teknik yapısını,

stratejik önemini ve dijitalleşme süreciyle birlikte yaşadığı dönüşümü kapsamlı bir biçimde değerlendirmeyi amaçlamıştır. Araç ve sabit tesis bakımına yönelik teknik işlemler, zaman temelli klasik uygulamalardan koşul temelli ve kestirimci sistemlere doğru önemli bir gelişim göstermektedir. Araçların fren, boji, HVAC ve inverter gibi kritik alt sistemlerinde yürütülen bakım görevlerinin çoğu hâlâ periyodik düzende gerçekleştirilmektedir. Ancak bu sistemlerin koşul verileriyle desteklenmesi, gereksiz müdahalelerin azaltılması ve arızaların erken aşamada önlenmesi açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Benzer şekilde, hat bakımında özellikle kurp yağlama, makas sistemleri ve drenaj altyapısına yönelik işlemlerin sadece takvime dayalı değil, çevresel risk ve fiziksel etkileşim verilerine dayalı olarak planlanması gerektiği ortaya konmuştur.

Dijitalleşme süreci bakım faaliyetlerine yeni bir perspektif kazandırmakta; CMMS yazılımları, MEMS tabanlı sensör sistemleri ve yapay zekâ destekli karar mekanizmaları sayesinde bakım, bir müdahale süreci olmaktan çıkıp bir öngörü ve optimizasyon faaliyetine dönüşmektedir. Ancak bu dönüşümün başarıya ulaşması için yalnızca teknolojik altyapı yeterli değildir. Organizasyonel yapıların bu sistemlerle entegre çalışabilmesi, veri güvenliğinin sağlanması, personelin dijital sistemlerle ilgili eğitiminin tamamlanması ve bakım süreçlerinin şeffaf biçimde izlenebilir hale getirilmesi gerekmektedir.

Uluslararası bakım standartları ve literatürdeki uygulama örnekleri, bakım yönetiminin yalnızca teknik değil, aynı zamanda stratejik bir alan olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda RAMS uyumu, KPI/KEPI temelli performans takibi, varlık ömrü optimizasyonu ve sürdürülebilirlik ilkeleri bakım planlamasında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Yerel raylı sistem işletmelerinde bu kavramların kurumsal hedeflerle ilişkilendirilmesi, uzun vadede sistemin maliyet etkinliğini ve operasyonel güvenilirliğini artıracaktır.

Sonuç olarak, hafif raylı sistemlerde bakım faaliyetleri, artık yalnızca arızaya müdahale değil; sistem güvenliğini önceden planlamak, maliyetleri optimize etmek ve kurumsal hedeflerle uyumlu bir varlık yönetimi sağlamak amacıyla yürütülmelidir. Bu kapsamda, bakım yönetiminin geleceğine yönelik aşağıdaki öneriler geliştirilebilir:

- Zaman temelli bakımların koşul verileriyle desteklenmesi ve gereksiz bakım sıklıklarının gözden geçirilmesi,
- Kritik sistemlerde MEMS sensörler ve kestirimci algoritmalarla bakım ihtiyaçlarının erken tespit edilmesi,
- CMMS yazılımlarının kurum genelinde standartlaştırılarak süreç şeffaflığı ve kayıtlılık sağlanması,
- Personel eğitiminin yalnızca teknik değil, veri yönetimi ve dijital okuryazarlık alanlarında da genişletilmesi,
- Uluslararası standartlarla (BS EN 50126, ISO 55000, UIC) uyumlu bakım stratejilerinin geliştirilmesi ve denetlenebilir hale getirilmesi.

Bu öneriler, bakım yönetiminin teknik derinliği kadar, organizasyonel sürdürülebilirliğini de hedeflemektedir. Gelecekteki çalışmalarda, farklı şehirlerde uygulanan bakım modellerinin karşılaştırmalı analizi, dijitalleşmenin bakım performansına etkisi ve maliyet-yarar



değerlendirmeleri gibi konulara odaklanmak, sektörel bilgi birikiminin gelişimine katkı sağlayacaktır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Genişletilmiş Özet

1. Giriş ve Araştırmanın Amacı

Kent içi hafif raylı sistemler (HRS), toplu taşıma altyapısının en kritik bileşenlerinden biridir. Yüksek taşıma kapasiteleri, çevre dostu yapıları ve düşük işletme maliyetleri sayesinde giderek yaygınlaşmaktadır. Ancak artan yolcu talebi, hizmet sürekliliği beklentileri ve genişleyen altyapı, bakım faaliyetlerini yalnızca arıza sonrası müdahalelerden ibaret olmaktan çıkarmış; önleyici, koşul temelli ve kestirimci yaklaşımların önemini artırmıştır. Bu çalışma, HRS’lerde bakım faaliyetlerini bütüncül bir perspektiften ele alarak, araç ve hat bakım uygulamalarının teknik gerekçelerini, uluslararası standartlarla ilişkilerini ve dijitalleşme süreciyle birlikte ortaya çıkan yeni eğilimleri incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma ile cevap aranan temel soru, hafif raylı sistemlerde bakım stratejilerinin nasıl daha güvenli, sürdürülebilir ve verimli bir yapıya dönüştürülebileceğidir

2. Çalışma Konusu

Makalede özellikle araç sistemleri (fren, boji, HVAC, inverter vb.) ve sabit hat altyapısı (raylar, makaslar, kurplar, drenaj, sinyalizasyon vb.) bakım uygulamaları teknik bir çerçevede incelenmiştir. Literatür taraması göstermektedir ki, geleneksel zaman temelli bakım uygulamaları artık yetersiz kalmakta, veri temelli koşul ve kestirimci bakım stratejileri öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, çalışma mevcut literatürdeki boşluğu doldurarak bakım faaliyetlerini yalnızca teknik bir süreç olarak değil, aynı zamanda stratejik bir yönetim ve dijitalleşme ile bütünleşen bir organizasyonel dönüşüm alanı olarak ele almaktadır. Çalışmanın katkısı, uluslararası standartlar (ISO 55000, BS EN 50126, UIC vb.) ile uyumlu bir çerçevede bakım yönetimini açıklamak ve yerel uygulamalara yönelik çıkarımlar yapmaktır

3. Yöntem

Araştırma, kavramsal ve literatür taramasına dayalı bir yaklaşımla yürütülmüştür. Öncelikle ulusal ve uluslararası standartlar incelenmiş, daha sonra bakım stratejilerinin sınıflandırılması ve uygulama örnekleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, CMMS yazılımları, MEMS sensörleri ve yapay zekâ destekli karar sistemlerinin bakım yönetimindeki rolü analiz edilmiştir. Yöntemsel olarak, çalışma yalnızca teknik ayrıntıları değil, aynı zamanda bakım yönetiminin örgütsel ve stratejik boyutlarını da kapsayan disiplinler arası bir çerçeveye dayandırılmıştır.

4. Bulgular ve Tartışma

Çalışmanın bulguları, mevcut bakım uygulamalarının çoğunlukla zaman temelli ve prosedür odaklı olduğunu, ancak bu yaklaşımın modern sistemlerin karmaşıklığı karşısında yetersiz kaldığını göstermektedir. Araç bakımında fren sistemleri, tekerlek profilleri ve enerji modülleri hâlâ sabit periyotlarla kontrol edilmektedir. Oysa koşul temelli izleme sistemleri, titreşim, sıcaklık ve elektriksel verilerle bakım kararlarını nesnel verilere dayandırarak gereksiz parça değişimlerini azaltmaktadır. Sabit hat altyapısında ise özellikle kurp bölgelerindeki yağlama ve drenaj sistemleri, sistem güvenilirliği açısından kritik rol oynamaktadır. Ayrıca CMMS yazılımları, MEMS tabanlı sensörler ve yapay zekâ algoritmaları bakımın yalnızca teknik değil, aynı zamanda veri odaklı ve stratejik bir yönetim süreci olduğunu ortaya koymaktadır. Uluslararası standartlarla karşılaştırıldığında, RAMS uyumu ve varlık yönetimi ilkelerinin yerel sistemlerde yeterince entegre edilmediği görülmüştür.

5. Sonuç ve Öneriler

Sonuç olarak, kent içi hafif raylı sistemlerde bakım faaliyetleri, arıza sonrası müdahalelerden çıkarak önleyici, koşul temelli ve kestirimci stratejilere dayalı bir yapıya dönüşmektedir. Çalışma, bakım yönetiminin yalnızca teknik bir operasyon değil, aynı zamanda hizmet kalitesi, yolcu güvenliği, maliyet optimizasyonu ve sürdürülebilirlik açısından kritik bir stratejik alan olduğunu vurgulamaktadır. Geleceğe yönelik olarak:

- Zaman temelli bakımların koşul verileriyle desteklenmesi,
- MEMS sensörler ve yapay zekâ algoritmalarıyla arıza tahminleme sistemlerinin yaygınlaştırılması,
- CMMS yazılımlarının kurum genelinde standardize edilmesi,
- Personel eğitimlerinin dijitalleşme odaklı genişletilmesi,
- Uluslararası standartlarla uyumlu bakım stratejilerinin geliştirilmesi,

önerilmektedir. Bu öneriler, bakım yönetiminin hem teknik derinliğini hem de organizasyonel sürdürülebilirliğini güçlendirecek niteliktedir.

Extended Abstract

1. Introduction and Research Purpose

Urban Light Rail Systems (LRS) are among the most critical components of public transportation infrastructure due to their high passenger capacity, environmental sustainability, and low operational costs. Increasing passenger demand, service continuity expectations, and expanding infrastructure have transformed maintenance activities from post-failure interventions into proactive, condition-based, and predictive strategies. This study aims to systematically analyze maintenance practices in LRS, focusing on vehicle and track infrastructure, the technical rationale behind maintenance types, their alignment with international standards, and the role of digitalization. The key research question is: How can maintenance strategies in light rail systems be transformed to ensure higher safety,



sustainability, and efficiency?

2. Scope of the Study

The article specifically examines vehicle systems (braking, bogies, HVAC, inverters, etc.) and fixed track infrastructure (rails, switches, curves, drainage, signaling, etc.) within a technical framework. Literature review highlights that traditional time-based maintenance is increasingly inadequate, while data-driven condition-based and predictive approaches are gaining prominence. In this context, the study fills a gap in the literature by conceptualizing maintenance not only as a technical process but also as a strategic management domain integrated with digitalization and organizational transformation. Its contribution lies in framing maintenance practices in accordance with international standards (ISO 55000, BS EN 50126, UIC) while providing insights for local applications.

3. Methodology

The research adopts a conceptual and literature-based methodology. It reviews international and national standards, classifies maintenance strategies, and evaluates implementation practices. The study also analyzes the integration of CMMS software, MEMS sensors, and AI-driven decision-making systems into maintenance management. Methodologically, it builds on an interdisciplinary framework that addresses both the technical specifics and the organizational and strategic aspects of maintenance.

4. Findings and Discussion

The findings indicate that current maintenance practices remain largely time-based and procedure-oriented, which is insufficient for the complexity of modern systems. For vehicles, braking systems, wheel profiles, and energy modules are still checked on fixed schedules, often leading to premature replacements or delayed interventions. Condition-based monitoring, by contrast, enables data-driven decisions through vibration, temperature, and electrical measurements, reducing unnecessary interventions. In track infrastructure, curve lubrication and drainage systems emerge as critical elements for reliability and safety. Furthermore, CMMS platforms, MEMS-based sensors, and AI algorithms demonstrate that maintenance is not merely technical but also a data-centric and strategic management process. Compared with international standards, compliance with RAMS principles and asset management guidelines remains insufficient in many local applications.

5. Conclusions and Recommendations

This study concludes that maintenance in urban light rail systems is shifting from corrective interventions toward preventive, condition-based, and predictive strategies. Maintenance should be seen not only as a technical task but as a strategic determinant of service quality, passenger safety, cost optimization, and sustainability. Based on the findings, the following recommendations are proposed:

- Supporting time-based maintenance with condition monitoring data,
- Expanding the use of MEMS sensors and AI algorithms for early fault detection,
- Standardizing CMMS platforms across organizations to ensure transparency and

traceability,

- Enhancing staff training with a focus on data management and digital literacy,
- Developing and auditing maintenance strategies in line with international standards (BS EN 50126, ISO 55000, UIC).

These recommendations aim to strengthen not only the technical depth but also the organizational sustainability of maintenance management. Future studies should focus on comparative analyses of maintenance models across cities, the impact of digitalization on maintenance performance, and cost-benefit evaluations, thereby enriching the sector's knowledge base.

Kaynaklar

Ahmad, W. (2019). Artificial intelligence-based condition monitoring of rail infrastructure: A review. *Transportation Research Procedia*, 37, 322–329.

Awad, A., Ahmed, S., & Elshaer, M. (2023). Key performance indicators for maintenance strategy selection in rail systems. *International Journal of Industrial Engineering and Operations Management*, 5(1), 14–28.

BoStrab. (2012). *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen* (German Federal Regulation for the Construction and Operation of Tramways). Germany: Bundesministerium für Verkehr.

Bradley, J. M. (2013). Vehicle Maintenance Practices in Urban Transit: A Review of Best Practices. *Urban Transit Journal*, 9(2), 45–57.

BS EN 50126. (2017). *Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 1: Generic RAMS Process*. European Committee for Standardization.

Consilvio, A., Pellerey, F., & Ciarapica, F. E. (2021). Predictive maintenance planning to reduce the risk of rail service disruptions. *IEEE Transactions on Reliability*, 70(1), 277–290.

Davis, D., Smith, L., & Holland, M. (2019). Implementing ISO 55000 in urban transit infrastructure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 233(6), 654–664.

DIN EN 13231. (2020). *Railway applications – Track – Acceptance of work – Part 3: Acceptance of reprofiling of rails in track*. Deutsches Institut für Normung.

Feng, H., Ding, X., & Li, Q. (2020). Sensor-based condition monitoring for rail infrastructure: A machine learning approach. *Measurement*, 164, 107987.

Firlik, B., Gucma, L., & Wydra, B. (2012). Condition monitoring system for light rail vehicle



and track. *Key Engineering Materials*, 518, 57–62.

González-Gil, A., Palacin, R., Batty, P., & Powell, J. P. (2015). A systems approach to reduce urban rail energy consumption. *Energy Conversion and Management*, 80, 509–524.

He, X., Sun, Q., & Liu, L. (2020). Energy-efficient operation strategies for tramway traction systems. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 14, 100202.

Jelila, Y., & Pamuła, W. (2022). Detection of tram wheel faults using MEMS-based sensors and decision trees. *Sensors*, 22(5), 1812.

Kraijema, B. (2015). Optimized Maintenance Planning for Tram Systems. *Railway Technology Journal*, 7(4), 201–212.

Kwon, Y., Choi, J., & Kim, H. (2021). AR-based maintenance training for urban transit braking systems. *Computers in Industry*, 129, 103458.

Lin, S., Tan, K., & Yang, H. (2019). Multi-objective optimization of preventive maintenance scheduling in railway networks. *Expert Systems with Applications*, 125, 13–25.

Martins, A., Sousa, R., & Monteiro, J. (2023). Online monitoring of sensor calibration status for railway maintenance. *Sensors*, 23(6), 2844.

Padhi, S., Tripathy, A., & Panda, S. (2022). IoT-enabled predictive maintenance for rail transport using deep learning techniques. *Procedia Computer Science*, 200, 274–282.

Peng, Y., Li, J., & Xu, C. (2024). Pareto optimization of maintenance cost and system availability in light rail systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 238, 109367.

Sun, B., Liu, Y., & Guo, H. (2020). Maintenance decision-making of an urban rail transit system based on failure risk and resource constraints. *Sustainability*, 12(2), 555.

Sun, J., Xue, L., & Chen, Z. (2023). Real-time data-driven maintenance optimization in urban rail networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 239, 109384.

Tian, Z., & Wang, T. (2022). Particle swarm and large neighborhood search-based hybrid method for rail maintenance scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(1), 239–253.

UIC. (n.d.). International Union of Railways – Technical Guidelines on Track and Infrastructure Maintenance. Retrieved from www.uic.org

Vračar, L., Bošković, D., & Jurišić, V. (2025). Automated inspection system with GPS and deep learning for tram maintenance. *Acta Polytechnica Hungarica*, 22(1), 118–130.

SMED Yaklaşımının Endüstriyel Bakım Verimliliğine Etkisi: Gerçek Vaka Üzerinden Nicel Bir Değerlendirme

¹ Muhammet Yasir KOÇ, ¹ Dinçer YURDULU ² Dr. Semih ÖNGİR,

¹ Bakım Planlama Mühendisi, Petlas Lastik Sanayi ve Ticaret A.Ş./Kırşehir,
muhammet.koc@petlas.com.tr

¹ Elektronik Bakım Şefi, Petlas Lastik Sanayi ve Ticaret A.Ş./Kırşehir,
dincer.yurdulu@petlas.com.tr

² Bakım Müdürü, Petlas Lastik Sanayi ve Ticaret A.Ş./Kırşehir,
semih.ongir@petlas.com.tr

Özet

Endüstriyel üretim süreçlerinde hızlı ve etkin bakım uygulamaları, ekipman verimliliğinin artırılması ve plansız duruşların minimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, SMED (Single-Minute Exchange of Die) yaklaşımı, üretim hatlarının ayar sürelerinin kısaltılması ve bakım operasyonlarının optimize edilmesi amacıyla geliştirilmiş önemli bir metodolojidir. SMED, iç ve dış işlerin ayrıştırılması ve optimize edilmesiyle, bakım ve kurulum süreçlerinde zaman tasarrufu sağlamayı hedefler. Ancak, bu yöntemin sadece üretim hattı ayarlarında değil, aynı zamanda bakım süreçlerinde de uygulanabilirliği ve bu uygulamanın verimlilik üzerindeki nicel etkilerinin ortaya konması gerekmektedir. Bu çalışma, mevcut koruyucu bakım planlarından yola çıkarak, iç ve dış işlerin ayrıştırıldığı ve gruplanarak birleştirildiği gerçek bir vaka üzerinden SMED yaklaşımının uygulanmasını incelemektedir. Ayrıca, bakım süresi, işçilik maliyetleri, imalat kaybı ve planlama rahatlığı açısından sağlanan kazançlar detaylı olarak analiz edilmektedir. Böylece, SMED'in endüstriyel bakım verimliliğine katkıları nicel veriler ışığında sistematik bir şekilde değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Koruyucu bakım, SMED, Endüstriyel bakım verimliliği, Bakım sürelerinin optimizasyonu, Bakım planlaması

Abstract

In industrial production processes, rapid and effective maintenance practices are of critical importance for increasing equipment efficiency and minimizing unplanned downtime. In this context, the SMED (Single-Minute Exchange of Die) approach is an important methodology developed to shorten setup times of production lines and optimize maintenance operations. SMED aims to save time in maintenance and setup processes by distinguishing and optimizing internal and external tasks. However, it is necessary to demonstrate not only its applicability to production line setups but also its use in maintenance processes and the quantitative effects of this application on efficiency. This study examines the implementation of the SMED approach through a real case based on existing preventive maintenance plans, where internal and external tasks are distinguished, grouped, and consolidated. Furthermore, the gains achieved in terms of maintenance duration, labor costs, production losses, and planning flexibility are analyzed in



detail. Thus, the contributions of SMED to industrial maintenance efficiency are systematically evaluated in the light of quantitative data.

Keywords: Industrial maintenance efficiency, Maintenance planning, Optimization of maintenance times, Preventive maintenance, SMED

1. Giriş

Endüstriyel üretim ortamlarında, ekipman verimliliğinin artırılması ve plansız duruş sürelerinin minimize edilmesi, rekabet avantajı sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu hedeflere ulaşmak, yalnızca arıza sonrası müdahalelere dayalı düzeltici bakım stratejileriyle mümkün değildir, sistematik ve planlı bakım süreçlerinin uygulanması gerekmektedir. Koruyucu ve öngörücü bakım yaklaşımları, üretim sürekliliğini sağlamak ve bakım kaynaklarının etkin kullanımını garanti etmek için giderek daha fazla ön plana çıkmaktadır.

Bununla birlikte, bakım süreçlerinin verimliliğinin artırılması ve sürelerinin optimize edilmesi, endüstriyel uygulamalarda hâlen önemli bir araştırma alanıdır. SMED (Single-Minute Exchange of Die) metodolojisi, başlangıçta üretim hattı kurulum sürelerini kısaltmak amacıyla geliştirilmiş olsa da iç ve dış işlerin ayrıştırılması ve optimize edilmesi mantığı bakım operasyonlarına da uyarlanabilir. Böylece, bakım faaliyetlerinin planlanması ve yürütülmesi daha hızlı, sistematik ve maliyet açısından etkin bir hale getirilebilir.

Bu çalışmada, mevcut koruyucu bakım uygulamaları temel alınarak SMED yaklaşımının bakım süreçlerine entegrasyonu incelenmektedir. Amaç, bakım süresi, işçilik maliyetleri, üretim kayıpları ve planlama kolaylığı gibi parametreler açısından elde edilen kazanımları analiz etmek ve endüstriyel bakım verimliliğine olan katkılarını ortaya koymaktır. Bu bağlamda, çalışma hem uygulamalı hem de teorik olarak bakım süreçlerinin optimizasyonuna yönelik bir katkı sunmaktadır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Ondra, P. (2022) yapmış olduğu çalışmada, endüstri mühendisliği araçlarının, yani SMED ve TPM'in kullanımını incelemiş, Çek Cumhuriyeti'ndeki endüstriyel şirketlerde Genel Ekipman Etkinliği (OEE)'ni izlemiş ve değerlendirmiştir. 2019'un üçüncü çeyreğinden 2020'nin üçüncü çeyreğine kadar 200 şirketin katılımıyla kapsamlı bir anket çalışması yapmış ve 92 şirketin operasyonel performansının ayrıntılı bir değerlendirmesini gerçekleştirmiştir. Araştırma sonucunda, şirketlerin %20,5'inin SMED'i, %26,5'inin TPM'yi uyguladığı ve %54,0'ının OEE'yi izlemediği ve değerlendirmedeği tespit edilmiştir. Çalışma, SMED ile OEE ve OEE ile TPM arasındaki teorik bağlantıyı doğrulamaktadır. SMED ve TPM'nin ayrı ayrı kullanımının istatistiksel olarak anlamlı etkisi gösterilememiştir. Ancak, TPM ve SMED'in birlikte kullanımının OEE seviyesine etkisi kanıtlanmıştır.

J.C. Quiroz-Flores & M.L. Vega-A. (2022) yaptıkları çalışmada düşük üretim kapasitesi nedeniyle siparişlerin zamanında karşılanamamasının, plastik sektöründeki şirketlerin karşılaştığı başlıca sorunlardan biri olduğunu belirtmiştir. Bu durumun, müşteri memnuniyetsizliğine yol açtığını ve üretim maliyetlerini artırarak doğrudan kârlılığını etkilediğini belirlemişlerdir. Bu sorunların başlıca nedenleri arasında, yüksek kurulum süreleri ve üretim sürecinde meydana gelen makine

arızalarından kaynaklanan üretim duruşları yer almaktadır. Bu sorunları çözmek amacıyla, 5S, SMED (Tek Dakikada Kalıp Değişimi), TPM (Toplam Verimli Bakım) ve Jidoka araçlarını içeren bir yalın üretim modeli önermişlerdir. Bu model, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle plastik üretimi yapan bir şirkette uygulanmış ve sonucunda Toplam Ekipman Etkinliği (OEE) %13 artarken, kurulum sürelerinde %48 azalma sağlandığını iddia etmişlerdir.

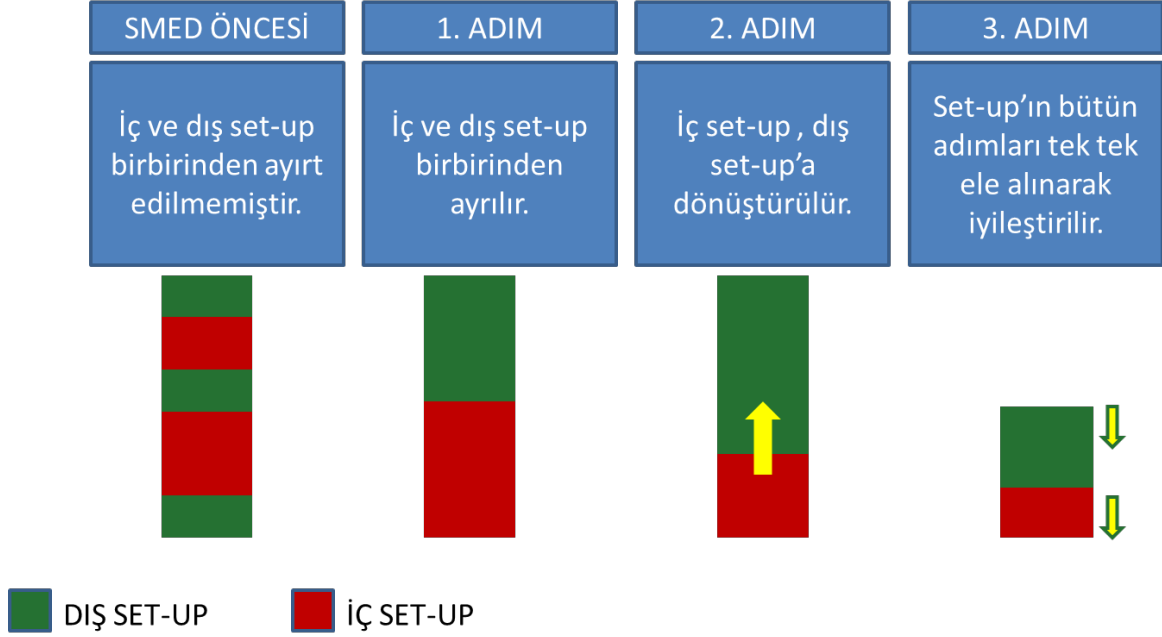
3. Genel SMED yaklaşımı

SMED (Single-Minute Exchange of Die) normalde ölçü değişimlerinde (set-up) kullanılan bir araçtır. Ölçü değişimleri demontaj, montaj ve ayar gibi iç set-up' lardan, teçhizat getirme ve götürme işlemleri gibi dış set-up'lardan oluşur. Şekil 1' de ölçü değişiminin adımlarının genel bir görünümü verilmiştir.



Şekil 1: Ölçü değişiminin adımları

SMED yaklaşımı ile bu birbiriyle iç içe geçmiş olan iç ve dış set-up'lar öncelikle mümkün olduğunca birbirinden ayrılarak kendi aralarında gruplandırılırlar. Sonrasında makinenin duruşu sırasında gerçekleştirilmek durumunda olunan iç set-up'lar, makine duruşu gerektirmeyen dış set-up'lara dönüştürülmeye çalışılır. En son, her iki set-up türü mümkün olduğunca kısaltılmaya çalışılır. Burada amaç mümkün olan en kısa sürede ölçü değişimini tamamlamak ve değişim sırasında yapılacak işlerin çoğunu yine mümkün olduğunca makinayı durdurmadan gerçekleştirmektir. Şekil 2'de ölçü değişim adımlarına SMED yaklaşımının uygulanmış hali gösterilmektedir.



Şekil 2: Ölçü değişimi adımlarına SMED yaklaşımının uygulanmış hali

3. SMED yaklaşımının planlı bakım çalışmasında uygulanması

Örnek uygulamanın yapılması için lastik pişirme preslerinin koruyucu bakım sırasında yapılan iş adımları ve periyotları ele alınmıştır. Normal koruyucu bakım uygulamasında kullanılan form Şekil 3'te gösterilmektedir. Okunabilirlik açısından formun sadece bir kısmı gösterilmektedir.

MAKİNE PERİYODİK BAKIM DETAY FORMU										
NO:	Kontrol Noktası	Açıklama	Sıklık (Ay)	Kont. Eden (Süre-ki)	Toplam Bakım Süre(s)	Plan (Ay)				
						1	2	3	4	2025
7	TAVA									
1	Sağ tava döndürme ve kilitleme pistonlarının iç ve dış kapağa karşı kontrolü (Ref: 190-T-081)		12	M	99					
2	Sol tava döndürme ve kilitleme pistonlarının iç ve dış kapağa karşı kontrolü (Ref: 190-T-081)		12	M						
3	Tavaların paralellik kontrolü		12	M						
2	LOADER									
1	Loader merkez ayan kontrolü (Ref: 190-T-034)		12	M	142					
2	Loader cetvelinin doğrulaması (Ref: 190-T-015)		12	E						
3	Loader hidrolik pistonun iç ve dış kapağa karşı kontrolü (Ref: 190-T-081)		12	M						
4	2 adet Loader iğeri-dışarı pistonun iç ve dış kapağa karşı kontrolü (Ref: 190-T-081)		12	M						
5	2 adet Loader çene açma-kapama pistonun iç ve dış kapağa karşı kontrolü (Ref: 190-T-081)		12	M						
6	4 Adet Loader darbe sönümleyicisinin kontrolü		12	E						
7	4 Adet Loader piston iğeri-dışarı konum switch i kontrolü		12	E						
8	Loader çenelerinin temizlenmesi		12	E						

Şekil 3: Lastik pişirme presi koruyucu bakım formu

Toplamda 59 maddelik bakım işleminin toplam süresi mevcuttaki durumu ile 2341 dk' dır. SMED yaklaşımı ile her adım tek tek incelenmiştir. Sadece iyileştirme yapılan adımlardaki işlemler ele alınacaktır.

- 12 dk'lık Pres pompa basıncının kontrolünün makinanın üretimi sırasında pompa çıkışına bağlanan bir manometreden yapılması sağlanmış ve bu adım dış işlem haline dönüştürülmüştür.
- Periyodu yılda bir olan 42 dk'lık pres aşağı-yukarı hidrolik pistonu alt sabitleme somunu sıkılık kontrolü, yıl içerisindeki üretimin komple durduğu tatil günlerine kaydırılmış ve bu madde makine durdurmadan yapılan işlem haline dönüştürülmüştür.
- 340 dk lık Bladder hidrolik pistonun iç ve dış kaçağa karşı kontrol edilip gerekirse değiştirilmesi maddesindeki kontrol kısmı kaldırılmış, piston 2 yılda bir doğrudan değiştirilmeye başlanmıştır. 240 dk süren değişimin periyodunun 2 katına çıkarılmasından dolayı bu işlem için harcanan makine duruşu gerektiren süre yıllık 120 dk olarak değerlendirilebilir. Buradan elde edilen süre kazancı 220' dk dır.
- 25 dk lık Hidrolik tank yağ seviye kontrolü ve gerekli miktarda ilave işlemi, tanka konulan bir seviye sensörüyle takip edilmeye başlanmış uyarı alındıktan sonra ilk programsız duruşunda takviye işlemi yapılmak üzere listeden çıkarılmıştır. Yerine 5 dk lık yağ seviye sensörü aktif çalışıyor mu maddesi konulmuş ve 20 dk kazanç sağlanmıştır.
- 120 dk lık soğutma eşanjörünü kontrol et gerekiyorsa değiştir maddesinin kontrol kısmı makinanın çalıştığı zaman dilimine alınmıştır. Yağ sıcaklığını ölçen sensör PLC ye bağlıdır ve sıcaklık HMI üzerinden zaten takip edilebilmektedir. Kontrol kısmının kaldırılması bize 20 dk kazandırmıştır.
- 80 dk'lık hidrolik yağın, yağ filtrasyon cihazı ile filtre edilmesi maddesi iptal edilmiş, makinaya çalışma sırasında yağı filtrelemek için çeviren bir sistem ilave edilmiştir.
- 45 dk'lık pano kliması kontrolü yerine (klima açıldıktan sonra panonun soğuması beklendiğinden 45 dk, pişirme bölgesi olduğu için soğuma uzun sürmektedir), pano içi sıcaklık ölçer kullanılmış çalışma sırasında bu kontrol yapılabilmiştir. Kapağı şeffaf olan pişirme harici bölgelerde pano içlerine kırmızı ve mavi ışık eklenmiş, sıcaklık limit altındaysa mavi, üstündeyse kırmızı ışık yakılarak panonun uzaktan durumunu anlama şansıda oluşturulmuştur.
- 420 dk lık 6 Adet PT100 ün doğrulanması, işlemi iptal edilip yerine doğrudan kalibrasyonu önceden yapılmış yeni PT100' ler takılmaya başlanmıştır. Ölçüm ve doğrulama için gereken bekleme ortadan kalkmış yalnızca değişim süresi kalmıştır. Değişim ortalama 240 dk sürmekte, kazanç 180 dk olmaktadır.
- Termal kamera ile ana panonun kontrolü, panolardaki, klemens ve kablo bağlantılarının gevşek olanlarını sıkılması, pano kilitlerini kontrol edilmesi, bozuk olanların onarılması veya değiştirilmesi, pano içerisindeki güç kontaktörlerinin kontağının gözle kontrol edilmesi, pano içerisine hava tutularak temizlik yapılması, pano üstü buton, lamba ve OP panellerinin sökülerek panonun temizlik sıvıları ile temizlenmesi, temizlenmiyor ise boyanması gibi maddelerin tamamının elimine edilerek panonun komple değişiminin yapılması ve çıkan panonun gerekli bakımlarının bakım alanlarında yapılmasına yönelik bir hazırlığımız bulunmakta, lakin henüz aktif hale getirilememiştir.



4. Sonuçlar

Yapılan çalışmaların sonucunda 2341 dk olan süre, SMED yaklaşımından esinlenerek 1722 dk ya düşürülmüş yaklaşık %25,6 oranında makinanın durmasını gerektiren süre kısaltılmıştır.

Bu kazanım sağlanırken makine bakımı için bakım atölyelerinde ilave iş gücü kullanımı ve makinalara kurulan yeni sistemler için ilave harcamalar yapılmıştır.

SMED yaklaşımının endüstriyel bakım verimliliği üzerindeki etkileri, yapılan çalışmalarda genellikle olumlu sonuçlar göstermektedir. İç ve dış işlerin ayrıştırılması, kurulum süreçlerinin standartlaştırılması ve zamanın etkin kullanımı gibi stratejiler, bakım sürelerini kısaltmakta ve ekipman verimliliğini artırmaktadır. Özellikle TPM ile entegrasyon, Genel Ekipman Etkinliği (OEE) üzerinde belirgin iyileşmeler sağlamaktadır.

Ancak, SMED'in bakım süreçlerine entegrasyonunun sektöre özgü farklılıklar gösterebileceği ve uygulama sırasında karşılaşılan zorlukların dikkate alınması gerektiği unutulmamalıdır. Bu nedenle, SMED'in etkin bir şekilde uygulanabilmesi için sektöre özel analizler ve stratejiler geliştirilmesi önemlidir.

5. Kaynaklar

Ondra, P. (2022). The Impact of Single Minute Exchange of Die and Total Productive Maintenance on Overall Equipment Effectiveness. *Journal of Competitiveness*, 14(2), 113–132. <https://doi.org/10.7441/joc.2022.03.07>

J.C. Quiroz-Flores & M.L. Vega-A. (2022). Review Lean Manufacturing Model of Production Management Under the Preventive Maintenance Approach to Improve Efficiency in Plastics Industry SMED: A Case Study, *South African Journal of Industrial Engineering*, Jul 2022 Vol 33(2), pp 143-156

Titreşim Analizi Yöntemi ile Asenkron Motorda Kırık Rotor Çubuğu Tespiti

Detection of CRACKED-Broken Rotor Bar in Asynchronous Motor by Vibration Analysis Method

¹ Abdulkadir YAYER, abdulkadir.yaver@enerjisauretim.com, ORCID No : 0009-0001-8339-2729

<http://orcid.org/>

² Baver AKBURAK baver.akburak@enerjisauretim.com, ORCID No : 0009-0005-4751-8514 [http://](http://orcid.org/)

orcid.org/

³ Metin ÖZDEMİR metin.ozdemir@enerjisauretim.com, ORCID No : <http://orcid.org/>

⁴ Murat DURAN murat.duran@enerjisauretim.com ORCID No : 0009-0007-1299-8903 <http://orcid.org/>

[org/](http://orcid.org/)

⁵ Serkan ÖZEK serkan.ozek@enerjisauretim.com, ORCID No : 0009-0009-8390-8295 <http://orcid.org/>

[org/](http://orcid.org/)

DOI : <http://dx.doi.org/10.31796/ogummf.xxxxxx>

Özet

Elektromekanik enerji dönüşüm ekipmanlarının önemli bileşenlerinden biri olan asenkron motorlar, endüstride düşük maliyet, dayanıklılık ve kolay kurulum avantajlarıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu motorlarda oluşabilecek arızaların erken tespiti, üretim sürekliliği ve ekonomik kayıpların önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, asenkron motorlarda nadir görülen elektriksel bir arıza türü olan kırık rotor çubuğunun tespit edilmesi ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, bir Hidroelektrik Santrali'nde yer alan HPU (Hydraulic Power Unit) pompa motorunda meydana gelen arıza, durum izleme yöntemlerinden titreşim analizi ile incelenmiştir. Motorun genel titreşim seviyeleri ISO 10816-3 standardına göre iyi seviyelerde olmasına rağmen, FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) analizi ile spektrum üzerinde yan bantlar tespit edilmiş ve kırık rotor çubuğu arızası doğrulanmıştır. Arızanın oluşum mekanizması, rotor çubuğu boyunca akımın iletilmemesi sonucu manyetik alan dengesizlikleri, moment dalgalanmaları ve bunların titreşimlere yansması şeklinde açıklanmıştır. Bulgular, basit titreşim değerlerinin yeterli olmadığını, detaylı spektral analiz yöntemlerinin uygulanması gerektiğini göstermiştir. Çalışma sonucunda, erken arıza tespiti sayesinde yaklaşık 25.000 \$ ekipman maliyetinin ve 45.000 \$ üretim kaybının önüne geçilebileceği ortaya konmuştur. Bu bağlamda, periyodik ve çevrimiçi titreşim analizlerinin güvenilirlik ve verimlilik açısından kritik olduğu vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motor, Kırık Rotor Çubuğu, Titreşim Analizi ,FFT, Hidroelektrik Santral

**Abstract**

Asynchronous motors, which are important components of electromechanical energy conversion equipment, are widely used in industry due to their low cost, durability, and ease of installation. However, early detection of possible faults in these motors is critical for ensuring production continuity and preventing economic losses. In this study, the detection of a rare type of electrical fault in asynchronous motors, namely a broken rotor bar, is addressed. Within the scope of the study, the fault that occurred in the HPU (Hydraulic Power Unit) pump motor of a Hydroelectric Power Plant was examined using vibration analysis, one of the condition monitoring methods. Although the general vibration levels of the motor were found to be within good limits according to the ISO 10816-3 standard, sidebands were identified on the spectrum by FFT (Fast Fourier Transform) analysis, and the broken rotor bar fault was confirmed. The fault mechanism was explained as imbalances in the magnetic field, torque fluctuations, and their reflections on vibrations due to the inability of current to pass through the rotor bar. The findings showed that simple vibration values are not sufficient and that detailed spectral analysis methods should be applied. As a result of the study, it was revealed that early fault detection could prevent approximately \$ 25.000 in equipment costs and \$45,000 in production losses. In this context, it was emphasized that periodic and online vibration analyses are critical in terms of reliability and efficiency.

Keywords: Asynchronous Motor, CRACKED-BROKEN Rotor Bar, Vibration Analysis, FFT, Hydroelectric Power Plant

1. Giriş

Asenkron motorlar, düşük maliyetleri, dayanıklılıkları ve hızlı kurulum avantajları nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yüzyılda, bu motorlarda durum izleme ve arıza tespiti önemli bir konu haline gelmiştir. Özellikle, endüstride yaygın olarak kullanılan asenkron motorlarda erken arıza tespiti, üretim verimliliği ve mali kazanç açısından kritik öneme sahiptir. Bir arıza durumunda, sistemin durması üretim verimliliğinin azalmasına, finansal kayıplara ve iş-zaman kaybına neden olabilir. Bu nedenle, asenkron motorlarda arızaların erken tespiti için durum izleme ve arıza tespit sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Asenkron motorlarda meydana gelen arızaları genellikle mekanik ve elektriksel olarak iki grupta sınıflandırabiliriz. Mekanik arızalar, motorun mekanik bileşenlerinden kaynaklanan sorunları içerir ve yataklama ekipmanlarının eksantriklik ve eksen kaçıklığı gibi durumları kapsar. Elektriksel arızalar ise, kırık rotor çubuğu, stator kısa devre gibi elektriksel bileşenlerde meydana gelen sorunları ifade eder. Özellikle, kırık rotor çubukları gibi nadir bir elektriksel arıza türü, motor performansını önemli ölçüde etkileyebilir ve diğer mekanik ve elektriksel arızalara yol açabilir. Kırık rotor çubukları; imalat hataları, rotorun aşırı akıma maruz kalması, mekanik zorlanmalar veya sık sık durma-kalkma gibi durumlar sonucunda ortaya çıkabilir. Bu arıza, motorun dinamik performansını düşürebilir, moment ve hızda dalgalanmalara neden olabilir. Bu makalede bir Hidroelektrik santralinde bulunan HPU (Hydraulic Power Unit) Governor pompasında meydana gelen kırık rotor çubuğu arızasına değinilecektir.

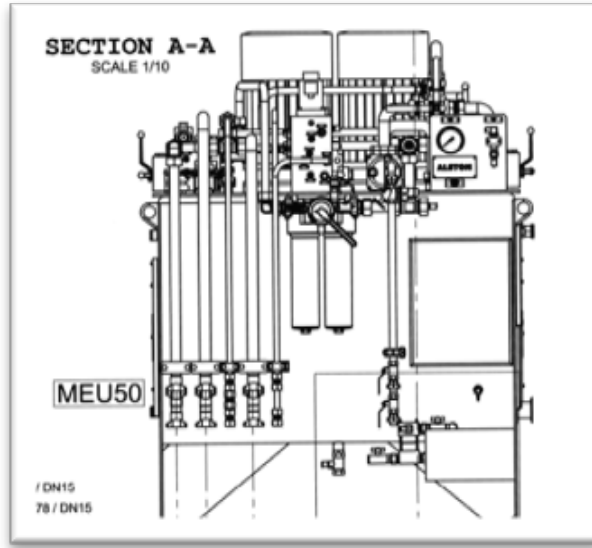
2. Yöntem

2.1. Hidroelektrik Santral

Hidroelektrik santral, akan veya düşen suyun yerçekimi etkisiyle meydana getirdiği kinetik veya potansiyel enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir tesis veya yapıdır. Bu tür santraller, genellikle barajlarla birlikte inşa edilir ve suyun biriktirilmesi, yönlendirilmesi ve kontrol edilmesi ile bir akış üstüne kurulur

2.2. HPU – Hidrolik Güç Ünitesi

Hidrolik Güç Ünitesi (HPU), hidroelektrik santrallerde kullanılan bir bileşendir ve genellikle tüm hidroelektrik santrallerde bulunur. HPU, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek akışkan yüksek basınç altında taşıyan pompa sistemlerini kontrol eder. Bu sistem, santrallerdeki bir çok ekipmanın hareket kabiliyetini gerçekleştirir. HPU'nun temel bileşenleri arasında pompalar, motorlar, valfler ve kontrol sistemleri bulunur.



Şekil 1. HPU Teknik Görüntüsü

2.3. Titreşim Analizi İle Kırık Rotor Çubuğunun Tespiti

Asenkron motorlar, elektrik sistemlerinin simetrik bir örneğidir. Bu simetri, motorun tasarımında ve işleyişinde önemli bir rol oynar. Ancak motorun bu simetrik yapısı rotorda meydana gelen herhangi bir arıza durumunda özellikle de kırık çubuk gibi durumlarda bozulabilir.

“Rotor çubuğu, rotorun bütünleyici bir parçası olup motorun kararlı ve verimli çalışması açısından hayati öneme sahiptir. Çubuklardan birinin kırılması durumunda, akım ilgili çubuk üzerinden iletilemez. Bu durum motorun manyetik alanında dengesizliklere yol açarak, manyetomotor kuvvet (MMK) olarak tanımlanan kuvvetin düzensizleşmesine neden olur. Manyetomotor kuvvetteki bu dengesizlik, motor torkunda modülasyonların ortaya çıkmasına sebebiyet verir. Tork, motorun dönme hareketini sağlayan temel büyüklük olduğundan, söz konusu modülasyonlar doğrudan motor performansını olumsuz yönde etkiler. Ayrıca, dengesiz MMK’nın sonucu olarak motor gövdesinde artan titreşimler meydana gelir ve bu titreşimler motorun genel işleyişi ile verimliliğini ciddi şekilde azaltabilir

2.4. Arıza Tespiti

Arıza tespiti ve teşhisi için en sık kullanılan tekniklerden biri Motor Akım Sinyali Analizidir (MCSA) Bunun temel nedeni, bu tekniğin motor parametrelerinin tahmin edilmesini gerektirmemesidir ve non-invaziv bir yaklaşım sunmasıdır. MCSA, motorun besleme akımındaki frekans bileşenlerini analiz ederek, motorun durumu hakkında detaylı bilgi sağlar ve arızaların erken tespit edilmesine yardımcı olur. Bir faz akım spektrumunun analizi, akım sinyali ana frekansı (f_1) yan bantlarla birlikte kutup geçiş frekansı ile aralıklı bir merkez frekans olarak gösterdiğinde kırık çubuğun varlığı hakkında doğrudan bilgi sağlar. Bu, aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$f_{sb} = f_1 (1 \pm 2ks) \quad (1)$$

Burada f_{sb} yan bant frekanslarıdır, $k = 1, 2, 3, \dots$ asenkron kaymayı ifade eder ve aşağıdaki ifade ile verilir:

$$s = (ns - n) / ns$$

(2)

Burada n_s senkron hızı ve n rotor hızını ifade eder.

Yan bant bileşeninin büyüklüğü hasar boyutu ile artar ve mekanik yük konumlarını değiştirir. Bu nedenle, asenkron motor yüksüzken küçük bir arızayı (bir kırık çubuk) veya daha ciddi bir arızayı tespit etmek daha zordur. Başka bir şekilde, kırık çubukların sayısı veya tork yoğunluğu arttığında arızalar tespit edilir. Bu nedenle, motor yüksüz çalışırken ortaya çıkan arızalar, çok düşük kaymalar nedeniyle MCSA yöntemi tarafından tespit edilemeyebilir.

Bir rotor çubuğu kırıldığında, o çubuktan akamayan akım yan çubuklardan akacaktır. Bu yüzden motorda elektriksel, manyetiksel ve mekaniksel düzensizlikler oluşacaktır. Bu düzensizliklerden dolayı karakteristik arıza sinyalleri, motorun stator akımında denklem (1)'deki gibi görülür. Motordan elde edilen elektriksel ve mekaniksel büyüklükleri zaman ekseninde incelemek oldukça zordur. Bu yüzden elde edilen mekaniksel ve elektriksel büyüklükler frekans-genlik eksenine (Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ile) dönüştürülerek karakteristik arıza sinyalleri incelenmektedir.

Titreşim analizi temel olarak; motordaki mekaniksel titreşimleri bir titreşim sensörü kullanılarak ölçmek ve bu titreşim büyüklüğünü frekans-genlik ekseninde ifade etmektir. Burada dikkat edilecek en önemli hususlardan biri ölçüm yapılacak ortamda diğer çevresel yanıltıcı sinyallerin olmaması veya bu yanıltıcı sinyallerin en düşük seviyeye indirgenmesidir.

2.5. Titreşim Analizi

Asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızası, ilgili rotor çubuğundaki akımın diğer sağlam rotor çubuklarına göre daha düşük olmasına yol açar. Bu durum, rotorun dönmesi sırasında arızalı çubuğun stator sargılarından geçtiğinde, daha az tork üretmesine neden olur. Torktaki bu dalgalanmalar belirli frekanslarda titreşimlere yol açabilir. Kırık rotor çubuğu arızasına sahip motorlarda, besleme frekansı, dönüş hızı ve motorun yük durumu gibi faktörlere bağlı olarak vibrasyon spektrumunda arıza karakteristikleri gözlemlenebilir.

Bu titreşim sinyalleri, rotor çubuklarının oluşturduğu elektromanyetik kuvvetlerdeki dengesizliklerden kaynaklanır. Kırık rotor çubuğu, rotorun kayma frekansında ters yönde dönen bir manyetik alan meydana getirir. Bu manyetik alan, statorun manyetik alanıyla etkileşime girerek $2sf_s$ frekansında tork ve hızda titreşimlere yol açar. Bu titreşimler, dönüş frekansının yan bantları olan $f_r \pm 2sf_s$ frekanslarında belirgin şekilde ortaya çıkar.

Deneyisel çalışmalar, kırık rotor çubuk arızası olan asenkron motorlarda, vibrasyon sinyalinde rotor çubuk geçiş frekansı (rotor bar pass frequency- RBPF) civarında karakteristik arıza sinyallerinin etkin bir şekilde tespit edilebileceğini göstermiştir. Bu arıza sinyalleri, belirli frekanslarda ortaya çıkar ve denklem (3) ve (4)'te ifade edilen frekans bileşenleriyle uyumlu olarak arıza teşhisi için kullanılabilir.

$$f_{b,1} = N_r f_r - 2 f_s \pm 2 s f_s \quad (3)$$

$$f_{b,2} = N_r f_r - 4 f_s \pm 2 s f_s \quad (4)$$

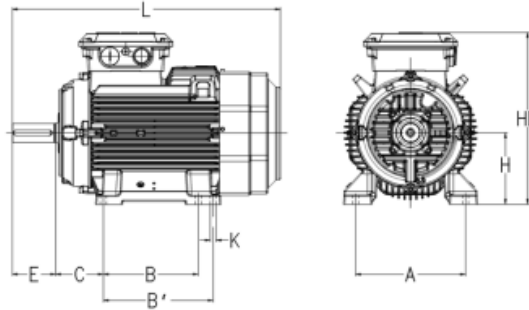
$$RBPF = N_r f_r$$

Bu bağlamda, N_r rotor çubuk sayısını, f_r rotor dönme frekansını, f_s besleme kaynağı frekansını ve s motorun kayma değerini ifade eder. Kırık rotor çubuğu arızasında oluşan bu sinyallerin genliği, motorun yüklenme durumu ile doğrudan ilişkilidir. Motor yükü arttıkça, titreşim sinyallerinin genliği de artabilir. Ayrıca, kırık rotor çubuğu sayısı arttıkça, motorun elektromanyetik dengesizliği daha da büyüyeceğinden, bu sinyallerin genliği de artacaktır. Bu artış, arıza teşhisinde önemli bir gösterge olarak kullanılabilir.

3. Veriler

						IE2	
3~Motor	M3AA180MLA4	CI,F	IP.55	IEC 60034-1			
	V	Hz	kW	r/min	A	cos φ	duty
240	Δ	50	18,5	1477	57,8	0,83	S1
400	Y	50	18,5	1475	34,4	0,84	S1
415	Y	50	18,5	1477	33,4	0,83	S1
460	Y	60	18,5	1779	29,8	0,84	S1
3GAA182031-BSG +VC				No. 3GV1210954566002			
50 Hz: IE2-92.0 (100%) - 93.0 (75%) - 92.8 (50%)							2012
60 Hz: IE2-92.7 (100%) - 93.1 (75%) - 92.4 (50%)							↔
6310-2Z/C3		6209-2Z/C3		153 Kg			

Arızanın meydana geldiği HPU pompa motoru hakkında bilgiler:



Tablo 1. Motor Etiketi

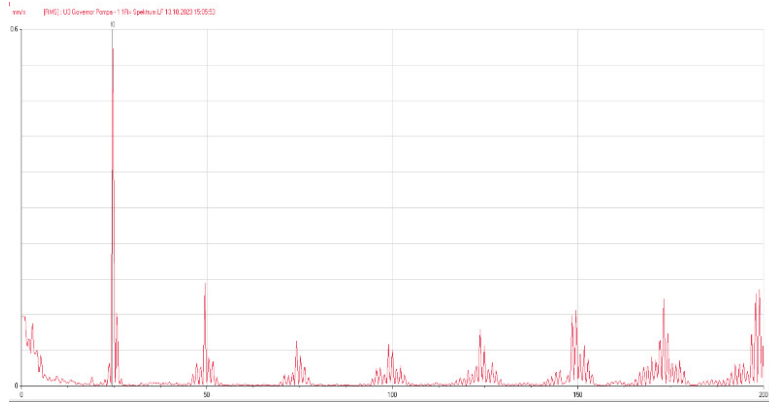
Şekil 2. Motorun Teknik Görüntüsü

	1MT-NDE			2MT-DE		
	1Ax	1R=	1RT	2Ax	2R=	2RT
Toplam Hız	0,853	1,08	1,49	0,923	0,304	0,349
Toplam İvme	0,13	0,167	0,143	0,208	0,134	0,153
Defect factor	2,84	2,38	2,74	2,39	2,62	2,9
SFx	0	0	0	0	2	3
HMx	2	2	2	2	2	2
Toplam İvme Pk-Pk	1,04	1,24	1,42	1,7	1,11	1,37

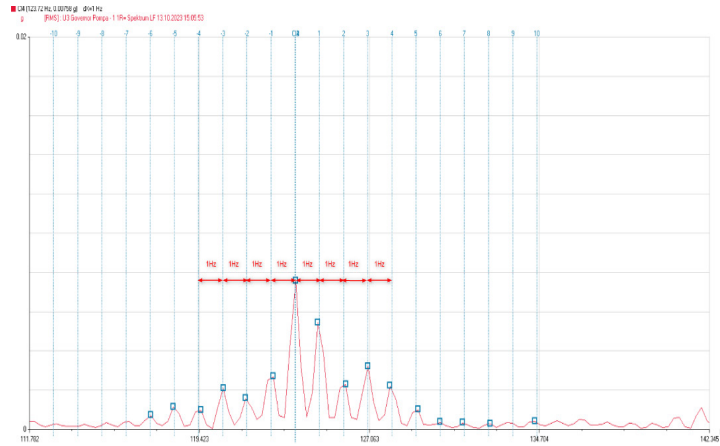
Titreşim Verileri mm/s rms:

Tablo 2. Toplam Titreşim Değerleri

Ekipman ISO 10816-3 bölgesinde incelendiğinde tüm değerlerin iyi seviyelerde olduğu yukarıdaki tabloda görülmektedir fakat FFT spektrumlarının analizi yapıldığında kırık rotor bar arızası olduğu tespit edilmiştir.



Grafik 1. 0-200 Hz FFT Spektrumu



Kırık-çatlak rotor çubuk arızasında 1X harmonikli, her biri kutup geçiş frekansı yan bantlarına sahip, çok yoğun bir spektrum görülebilir. Kutup geçiş frekansı, kayma frekansının kutup sayısının çarpımıdır. Kayma frekansı, gerçek RPM ile senkron hız arasındaki farktır. Kırık-Çatlak rotor çubuklarına sahip bir asenkron motor, motorun kayma frekansının iki katı hızda genliği yavaşça yukarı ve aşağı değişen bir titreşim ivmelenmesi üretecektir. Bu olguya “vuru” adı verilir ve sıklıkla ölçülebilir ve duyulabilir. Vuruşların genliği ve frekansı motor üzerindeki yüke bağlıdır (çünkü bu kayma frekansını etkiler). Motor akım imza analiziyle de bulunabilir.

tespit edilemeyen bir arıza, güç aktarma elemanlarında yüksek ısıya neden olarak pompanın kullanılamaz hale gelmesine yol açabilir. Bu durum yaklaşık 25.000 \$'luk bir ekipman (pompa-motor-kaplin) maliyetine neden olacaktır. Bakım için harcanacak iş gücü minimum 8 adam/saat olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, 78 MW kapasiteli bir ünitenin üretim kaybı ise 45.000 \$ olarak görülmüştür.

Bu yaklaşım, arıza tespit süreçlerinde ortaya çıkabilecek başarısızlıkların yüksek maliyetlere yol açmasını engellemek ve hidroelektrik santrallerin operasyonel verimliliğinin sürekliliğini sağlamak bakımından stratejik bir öneme sahiptir.

Teşekkür

Enerjisa Üretim Hidroelektrik Santraller ekibinde teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Introduction/ Background

Asynchronous motors are among the most widely used electrical machines in industrial applications due to their low cost, high reliability, and ease of installation. However, early detection of faults in these motors is critical to ensure production continuity and prevent economic losses. The main research question of this study is: "How can the rarely encountered broken rotor bar fault be reliably detected through vibration analysis?" The necessity of this research arises from the fact that failures in auxiliary motor systems in hydroelectric power plants may cause high costs and production losses.

Objectives/ Research Purpose

This study focuses on the detection of a broken rotor bar fault in the HPU (Hydraulic Power Unit) pump motor at a Hydroelectric Power Plant. Widely reported in the literature, this study emphasizes the evaluation of vibration analysis and FFT spectra. Thus, it contributes to the limited field-based research on broken rotor bars and provides a practical case study for predictive maintenance in hydroelectric plants.

Methods/ Methodology

In this research, vibration data from the HPU pump motor were collected and evaluated according to the ISO 10816-3 standard. FFT analysis was conducted to identify sidebands, using slip ratio, pole pass frequency, and rotor bar pass frequency in the calculations. Online vibration monitoring sensors were used for data collection, and the results were analyzed in the frequency-amplitude domain.

Results/ Findings

The results showed that although the overall vibration values of the motor were within acceptable limits, distinct sidebands in the FFT spectrum confirmed the presence of a broken rotor bar fault. The study highlighted that simple vibration values alone are insufficient, and detailed spectral analysis methods are necessary. The findings are consistent with previous research, while providing additional contributions in the context of hydroelectric power plant applications.



Discussion and Conclusions

The study revealed that early detection of broken rotor bar faults can prevent approximately \$25,000 equipment costs and \$45,000 production losses. These results underline the critical role of periodic and online vibration analysis in reliability-centered maintenance strategies. As a recommendation, integrating hybrid methods such as MCSA and acoustic analysis with vibration analysis may enhance fault detection systems and provide more reliable monitoring approaches.

Kaynaklar

Kim D. J., Kim H. J., Hong J. P., Park C. J., “Estimation of Acoustic Noise And Vibration in an Induction Machine Considering Rotor Eccentricity”, IEEE Transactions on Magnetics 50: 857-860, 2014

Hidroelektrik Enerji Santrali (HES) Nedir?” (Enerji Atlası) - enerjiatlası.com

“Hidroelektrik Enerji Santrali” (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu) - epdk.org.tr

“Hidroelektrik Enerji Santrali Nedir?” (Enerji Bakanlığı) - enerji.gov.tr

Bayrak, M , Küçüker, A., “Üç Fazlı Asenkron Motorlardaki Kırık Rotor Çubuğu Arızalarının Tespiti için Güç Tabanlı Bir Algoritmanın Geliştirilmesi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31, 2016

Ünsal, A., Kabul, A., “Asenkron Motor Rotor Arızalarının İstatiksel Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi”, Politeknik Dergisi 20, 283-289,

A. E. Treml, R. A. Flauzino, R. A. Ramos “Broken Rotor Bar Fault Detection in Asynchronous Machines Using Vibration Analysis”

Gama, R. S., Silva, C. C. J., Nascimento, C. E. F., da Silva, A. M., da Costa, C., “Analysis of Combined Motor Current Signature and Vibration-Monitoring Techniques in the Study of Broken Bars in Three-Phase High-Performance Induction Motors”, J Electr Electron Syst 6: 235, 2017

Kuş,M.,“ Asenkron Motorlarda Kırık Rotor Çubuk Arızasının Vibrasyon Sinyali ile Tespiti”, Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 4(2): 36-43, (2019).

©2018 Mobius Institute Vibration Training Quick Reference Handbook.

Ultrasonik Kaynak ve Kesim Sistemlerinde Arıza Önleme, Ekipman Eşleştirmesinin Rezonans Frekansına Etkisi ve Doğru Uygulamalar

¹ Dr. Semih ÖNGİR

¹ Bakım Müdürü, Petlas Lastik Sanayi ve Ticaret A.Ş./Kırşehir,
semih.ongir@petlas.com.tr

Özet

Ultrasonik kaynak ve kesim sistemleri, yüksek frekanslı mekanik titreşimler ile çalışan, özellikle plastik ve hafif metal malzemelerin birleştirilmesi ile kesilmesinde kullanılan hassas sistemlerdir. Bu sistemlerde performans ve verimlilik, bileşenlerin doğru seçimi, uygun şekilde eşleştirilmesi ve doğru bakım ile sağlanmaktadır. Horn (titreşim başlığı) tasarımı ve malzeme seçimi, sistemin rezonans frekansı ile uyumlu çalışması açısından kritik öneme sahiptir. Alüminyum, çelik ve titanyum gibi malzemelerden üretilen hornlar, malzemenin akustik özelliklerine, geometrisine ve boyutlarına bağlı olarak farklı rezonans tepkileri göstermektedir. Sistem verimliliği, jeneratör, booster, piezoelektrik seramikler ve horn bileşenlerinin aynı rezonans frekansında çalışmasına bağlıdır. Bu uyum sağlanamadığında performans kaybı, aşırı ısınma, enerji verimsizliği ve ekipman arızaları gibi problemler ortaya çıkabilir. Bu çalışma, ultrasonik sistemlerde kullanılan temel bileşenlerin yapısal ve işlevsel özelliklerini, uygun eşleştirme ve uygulama yöntemleri ile sık karşılaşılan hata senaryolarını ele almaktadır. Amaç, bu teknolojiyi kullanan teknik personel için işlevsel ve yönlendirici bir kaynak sunmaktır.

Anahtar Kelimeler: Ultrasonik sistemler, Ultrasonik kesim, Ultrasonik kaynak, Rezonans frekansı, Piezo-seramik malzemeler

Abstract

Ultrasonic welding and cutting systems are precision technologies that operate through high-frequency mechanical vibrations and are primarily employed in the joining and cutting of plastics and lightweight metals. The performance and efficiency of such systems are determined by the correct selection of components, their proper matching, and appropriate maintenance practices. The design and material selection of the horn (sonotrode) are of critical significance to ensure operation in harmony with the system's resonance frequency. Horns manufactured from materials such as aluminum, steel, and titanium exhibit distinct resonance responses depending on their acoustic properties, geometry, and dimensions. System efficiency is contingent upon the generator, booster, piezoelectric ceramics, and horn components functioning at the same resonant frequency. Failure to achieve this compatibility may result in performance degradation, overheating, energy inefficiency, and equipment malfunction. This study examines the structural



and functional characteristics of the fundamental components utilized in ultrasonic systems, highlights suitable matching and application methods, and discusses frequently encountered fault scenarios. The objective is to provide a practical and instructive reference for technical personnel engaged in the operation of this technology.

Keywords: Ultrasonic systems, Ultrasonic cutting, Ultrasonic welding, Piezo-ceramic materials, Resonance frequency,

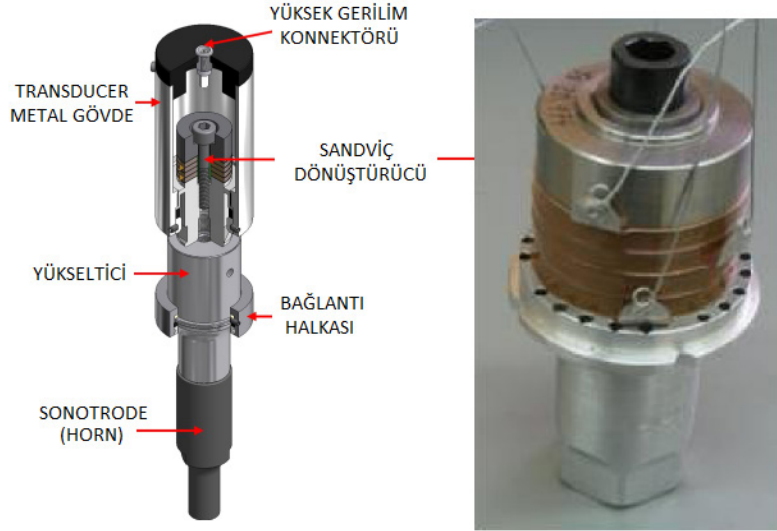
1. Giriş

Ultrasonik kaynak ve kesim, yüksek frekanslı elektrik sinyallerinin piezo-seramik malzemelere uygulanmasıyla mekanik titreşimlerin üretilmesi ve bu titreşimlerin işlenecek malzemeye aktarılması prensibine dayanan, plastik, metal ve kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan ileri üretim teknolojileridir. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren piezo-seramik malzemeler, mekanik titreşimi güçlendiren yükseltici, kaynak veya kesim uygulama kısmında kullanılan sonotrode (horn) ile birlikte, iş parçasının da sisteme katılması sonucunda oluşturulan yapı birlikte, bu yapının rezonans frekansında titreşim üretirler. Kaynak işlemlerinde piezoelektrik transdüserler aracılığıyla elde edilen titreşimler, parçaların temas yüzeylerinde lokal ısınma ve malzeme akışı oluşturarak güvenilir bir birleştirme sağlar. Kaynak işlemlerinde kullanılan frekans aralıkları genellikle 15–70 kHz arasında, kesim işlemlerinde ise 20–100 kHz arasında değişmektedir.

Ultrasonik jeneratör tarafından üretilen elektriksel sinyalin (çoğunlukla sinüs dalga formunda) frekansı ile mekanik yapının rezonans frekansı örtüşmediğinde çeşitli performans sorunları ortaya çıkmaktadır. Kullanılan frekans azaldıkça ihtiyaç duyulan güç artmaktadır. Güç arttıkça da bu problemler çok daha rahat tespit edilebilmektedir. Bu çalışmada söz konusu problemlerin nedenleri, bunların önlenmesi için alınması gereken tedbirler ve uygulamada sıkça karşılaşılan hatalar ile doğru uygulama yöntemleri ele alınmıştır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Ultrasonik kaynak ve kesim sistemleri, seri üretim uygulamalarında sürekli çalışma modunda işletilmekte olup, bu sistemlerde meydana gelen herhangi bir arıza, üretici açısından oldukça yüksek maliyetler doğurmaktadır. Dolayısıyla, ultrasonik kaynak ve kesim alanında karşılaşılan temel zorluklardan biri, ultrasonik yığının (stack) güvenilirliğinin ve kullanım ömrünün artırılmasıdır. Şekil 1’de, ultrasonik yığının temel bileşenleri şematik olarak sunulmaktadır.



Şekil 1: Ultrasonik yığının temel bileşenleri (Andrzej M. ve arkadaşları, 2015)

Kaynak veya kesim süreçleri sırasında ultrasonik yığın bileşenleri, yüksek düzeyde elektriksel ve mekanik zorlanmalara maruz kalmaktadır. Özellikle yüksek güçlü ultrasonik sandviç transdüserler, etkin değeri 3,2 kV'a ulaşabilen elektriksel sinüs dalgası ile uyarılmakta ve bu uyarım sonucunda mekanik titreşimler üretmektedirler. Sonotrod ucunda ölçülen mekanik titreşim genliği, onlarca mikrometre mertebesine kadar çıkabilmektedir. Bununla birlikte, ultrasonik yığın, pnömatik bir aktüatör aracılığıyla kaynak veya kesim malzemesine 10 bar'a varan basınç altında uygulanabilmektedir. Ortaya çıkan bu yüksek frekanslı titreşimsel zorlanmalar, bileşenlerde kademeli ve sistematik bozulmalara yol açmaktadırlar.

Bunun bir sonucu olarak, ultrasonik yığının ortalama arızalar arasındaki süre (MTBF), kullanılan sonotrod malzemesine (ör. alüminyum, çelik veya titanyum) ve maruz kaldığı yük koşullarına bağlı olarak, yalnızca birkaç ay ile sınırlı kalabilmekte ve en fazla birkaç yıl seviyesine ulaşabilmektedir. Literatürde birçok kaynaktan da belirtildiği üzere, piezo-seramik halkalar ve titanyum gibi kritik bileşenlerin yüksek maliyeti ile ultrasonik yığın imalat sürecinde karşılaşılan zorluklar (ör. titanyum sonotrodlar da yüksek hassasiyetli tezgahlarda işleme gerekliliği), yığının kullanım ömrünün uzatılmasını zorunlu kılmaktadır. Dolayısıyla, yüksek kaliteli ve uzun ömürlü ultrasonik yığınların elde edilebilmesi için, bileşenlerin uygun matematiksel modeller temel alınarak optimize edilmiş tasarımlar ile geliştirilmesi gerekmektedir (Andrzej M. ve arkadaşları, 2015).

Konvansiyonel yüksek güçlü ultrasonik sistemler, özellikle kesme, kaynak ve şekillendirme gibi imalat uygulamalarında uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, temel olarak elektriksel sinyalleri mekanik titreşimlere dönüştüren piezoelektrik bir transdüserle bağlanmış bir veya birden fazla ayarlanmış bileşenden oluşmaktadır. Ayarlanmış bileşenler, belirli bir uyarım frekansında özel bir titreşim moduna yanıt verecek şekilde tasarlanmaktadır. Literatürde en sık rapor edilen titreşim modu boyuna mod olmakla birlikte, bazı uygulamalarda radyal veya torsiyonel modların da tercih edildiği belirtilmektedir. Uygulamaya bağlı olarak farklı geometriler kullanılmakta olup, boyuna titreşim modları için basamaklı, konik ve katenoidal



horn profilleri en yaygın tasarımlar arasında yer almaktadır.

Yüksek güçlü ultrasonik sistemlerin, özellikle işlem kuvvetlerinde azalma ve yüzey kalitesinde iyileşme gibi çok sayıda avantaj sağladığı bilinmektedir. Bununla birlikte, literatürde bu sistemlerin düşük işletim güvenilirliği ve sık karşılaşılan bileşen arızaları ile sınırlı kaldığı da vurgulanmaktadır. Bu sınırlılıklar, çoğunlukla ultrasonik sistemlerin temel dinamiklerinin yeterince anlaşılmamasına bağlanmaktadır. Hatalı kullanımlar, sistem bileşenlerinde yüksek gerilmelere ve kabul edilemez seviyelerde gürültü oluşumuna neden olmaktadır. Bu durum hem sistemin mekanik dayanımını azaltmakta hem de süreç esnasında operatör güvenliği açısından risk oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, literatürdeki mevcut bulgular, yüksek güçlü ultrasonik sistemlerin sunduğu işlem avantajlarına rağmen, temel tasarım ve dinamik etkileşimler konusundaki bilgi eksikliklerinin yeni ultrasonik süreçlerin endüstriyel ölçekte uygulanmasını ciddi şekilde sınırladığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, güvenilir ve uzun ömürlü ultrasonik sistemlerin tasarlanabilmesi için, titreşim modlarının etkileşimlerini dikkate alan daha kapsamlı matematiksel modelleme ve deneysel doğrulama çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır (A. Cardoni & M. Lucas, 2005).

3. Ultrasonik sistemlerde karşılaşılan problemler, çözüm yöntemleri

3.1. Rezonans Frekansı ile İlgili Problemler

Ultrasonik sistemlerin problemlerinin başında rezonans frekansı ile ilgili problemler gelmektedir. Jeneratör frekansı ile sistemin doğal frekansı eşleşmediğinde, frekans değerindeki kayma miktarına bağlı olarak sistemde güç kaybı, titreşim verimsizliği ve aşırı ısınma gibi problemler ortaya çıkar. Frekans kayması sıcaklık değişimi, yük değişimi gibi çevresel koşullara bağlı olarak ta ortaya çıkabilmektedir.

Sisteme elektrik sinyali sağlayan jeneratörün belli oranlarda değişen rezonans frekansını yakalama kabiliyeti vardır. Örneğin 20kHz frekansta çalışan bir ultrasonik plastik kaynak makinasının jeneratörü 19kHz ile 21kHz arasındaki frekansları üretebilmektedir. Bu tolerans aralığını artırmaya yönelik çalışmalar halen devam etmektedir. Rezonans frekansı jeneratörün sağlayabileceği frekans aralığının dışına çıktığında sistemin çektiği akım artar, titreşim genliği düşer veya kaybolur, çalışmaya devam edilebiliyor ise özellikle sonotrod kısmında ısınma meydana gelir. Jeneratörün aşırı akım koruma devreleri genellikle vardır ve bu gibi durumlarda jeneratör çıkışını keserek sistemi korumaya alırlar. Bazı durumlarda bu koruma yeterince hızlı olmadığında sistemin bileşenleri (jeneratör, dönüştürücü, yükseltici ve sonotrod) zarar görebilir. Bu zarar jeneratörde elektronik ekipmanların arızalanması, dönüştürücüde (transdüser) piezo-seramik halkaların çatlaması, sonotrodta kılcal çatlakların oluşması şeklinde kendini gösterebilmektedir. Bu durumda zarar gören kısmın değişimi bakım personeli için en hızlı çözümdür.

Jeneratörün kendini aşırı akım korumasına alması durumunda ise genellikle jeneratörün üzerinde bulunan ve sınırlı oranda sinyalin genliği ve frekansı üzerinde değişim yapma imkânı sağlayan ayar noktaları kullanılarak rezonans frekansı yakalanmaya çalışılır. Sinyalin genlik ayar noktasından genliğinin düşürülmesi kaymış olan frekansta titreşim elde ediliyorsa ve iş parçası da üzerinde beklenen kaynak ya da kesim işlemi gerçekleştiriliyorsa sadece sistemin daha az ısınmasını sağlayabilmektedir.

Herhangi bir bileşen zarar görmemiş ve jeneratör üzerindeki ayar noktaları ile de gerekli olan rezonans frekansı sağlanamadığında ise bakım personelleri sistemin bileşenlerini sıra ile değiştirerek çözüm üretmeye çalışırlar. Bu noktada yapılan en sık karşılaşılan hata değişen bileşenin arızalı olduğu düşünülerek atılmasıdır. Gerçek durum ise bir arada olan bileşenlerin jeneratörün sağlayabileceği aralıkta rezonans frekansı oluşturmamış olmasıdır. Bu noktada tavsiye edilen sökülen bileşenlerin atılmayıp, farklı bileşen kombinasyonlarla bir araya getirilerek tekrar tekrar denenmesidir. Bu yöntem tecrübe etme imkânı bulduğum tekstil, plastik ve lastik sektöründe denenmiş ve atılması düşünülen ultrasonik bileşenlerin ortalama %80'ni tekrar kullanılmıştır.

3.2. Aşırı Isınma ve Termal Problemler

Yine sık yaşanan problemlerden biride, ultrasonik sistemde kullanılan piezo-seramik elemanların (sandviç dönüştürücü içerisinde kullanılan piezo-seramik halkalar) aşırı ısınmasıdır. Bu problemde başlıca sebeplerinden biri, rezonansı kaymış fakat bu koşullarda iş gördüğü için çalıştırılmaya devam ettirilmiş sistemlerdir. Uzun süre bu şekilde çalıştırılmaya devam edilen sistemlerde ömür kısalması ve seramiklerde çatlama ve kullanılamaz hale gelme sorunları ortaya çıkmaktadır. Bu durumlar için her ne kadar dönüştürücünün olduğu bölgeye hava üfleme yerleri konulsa da endüstriyel kullanım alanlarında gözlemlenen bu soğutma sisteminin kullanılmıyor olmasıdır. Bunun sebebi bilinçsizlik veya hava tüketimi endişesi olabilmektedir. Aralarında bakır plakaların yerleştirildiği piezo-seramik halkaların oluşturduğu sandviç şeklindeki dönüştürücü gerekli olan torkun dışında (az veya çok) sıkıldığında da titreşim tamamen kaybedilebilir veya yine ısınma sorunu ile karşılaşılabilir. Bu durum sandviç halinde bir araya getirilmiş halkaların çok az miktarda olsa gevşemesiyle de mümkün olabilir. Bu sebepten dolayı bu bölgeye uzmanlığı olmayan kullanıcı tarafından herhangi bir müdahale tavsiye edilmez. Birçok üretici firma bu bölgeyi kapalı ve kolay açılmayacak şekilde üretmektedir.

Soğutma sistemleri aynı ısınma sebebinden dolayı sonotrod tarafına da konulmaktadır. Fakat bu noktada ki soğutma sistemi de birçok işletmede zaman içerisinde veya hiç kullanılmamaktadır. Bakım personellerine önerilen özellikle ısınma meydana geliyor, sorun giderilemiyor ve çalışmaya devam edilmek zorunda kalınan durumlarda mutlaka bu soğutma sistemlerinin devreye alınmasıdır.

İş parçası ile doğrudan temasta bulunan ultrasonik sistem bileşenleri sonotrodlardır. Isıl genleşme ve sürekli titreşimden dolayı zamanla deformasyona uğrayan parça yine ısınmaya ve frekans kaymasına sebep olabilir. Nadirde olsa sonotrodtan bir önceki bileşen olan yükselticide de bu ısınma durumu oluşabilir. Uzun süre yüksek ısılara maruz kalan bu iki bileşende özellikle yapıldıkları malzeme homojenliği düşük olan bir malzeme olduğunda kılcal çatlaklara sebep olabilmektedir. Çatlak oluştuğunda rezonans frekansı tolere edilemeyecek kadar kaydığında bileşen kullanılamaz hale gelir. Tüm bunların yanına kullanılmasına rağmen yetersiz kalan soğutma sistemlerini de oluşabilecek problemlerin sebebi olarak düşünmemiz mümkündür.

3.3. Mekanik Yorgunluk ve Aşınma

Yüksek frekanslarda sürekli çalışmaya bağlı olarak ortaya mekanik yorgunluktan kaynaklı oluşan çatlaklar çıkabilir. Bu genel olarak çok uzun süre kullanımlarda mümkündür ve malzeme ömrü olarak tanımlanabilir ve üzerinde fazla durulması gerekmemektedir. Sadece ömrü uzatmak için bakım personeline ve operatörlere sistemin doğru kullanımı ve koruyucu sistemlerin devrede



olması önerilebilir.

Çok sık karşılaşılan hatalardan biri de kaynak sistemlerinde yüzeyi aşınmış olan sonotrodun taşlanarak boyunun kısaltılması, kesme işlemlerinde ise genellikle bıçak şeklindeki sonotrodun bilinmesidir. Sonotrodlar tasarlanırken ses dalgalarının sonotrodun yapıldığı malzeme içerisindeki hızı büyük önem taşır. Titreşim genliğinin iş parçasına uygulama noktasında maksimum genliğe ulaşması için sonotrod boyu sesin malzeme içindeki yayılma hızının dalga boyunun yarısının katları şeklinde olması gerekmektedir. Boydaki değişimler rezonans frekansının yine kaymasına ve bileşenlerin ısınmasına sebep olur. Bu sebepten malzemeyi doğrudan kullanımdan kaldırmamak için yapılacak mikron seviyesindeki değişikliklerin dışında bu tarz müdahalelerin bakım personeli tarafından yapılmaması önerilmektedir. Bir diğer sık görülen hata da boyuna titreşim yayan ultrasonik kesim sistemlerinde bıçak şeklindeki sonotrodun yan yüzeylerinin kullanılmaya çalışılması ve sisteme aşırı yük bindirilmesidir. Ultrasonik teknolojisi hakkında yeterli bilgiye sahip olmayan makine üreticileri de bu hatayı sıklıkla yapmaktadırlar.

Titreşimin kaybedilmesine, aşırı ısınmaya ve beraberinde gürültülü bir çalışmaya sebep olan problemlerden biride, ultrasonik bileşenleri birbirine bağlayan civataların zamanla gevşemesidir. Müdahale edilmediği takdirde bu gevşeme de daha önce bahsedilmiş olan benzer problemlere sebep olacaktır. Mekanik titreşimin bileşenden bileşene kayıpsız aktarılması için civataların sıkılma torku önem taşımaktadır. Periyodik bakım çalışmalarında bu kontrollerin yapılması bakım personellerine önerilmektedir.

3.4. Elektriksel Problemler

Ultrasonik sistemlerde şu ana kadar anlatılan problemler kadar olmasa da elektriksel problemlerde yer almaktadır. Piezo-seramik sandviç dönüştürücüler yapım sırasında aşırı tork ile sıkıldığında kılcal çatlamalardan dolayı di-elektrik arızalar, az tork ile sıkılmasından dolayı delaminasyon problemleri oluşabilir. Jeneratör tarafından uygulanan elektrik sinyalinin voltajının yüksek olmasından dolayı zayıf yalıtımların bozulması, piezo-seramik halkalar arasına yerleştirilen bakır plakalar arasında kısa devre veya ark oluşumu mümkündür. Düşük frekanslı (15-20kHz) ve yüksek güçlerde kullanılan ultrasonik sistemlerin yüksek gerilim konnektöründe de yine ark oluşma ihtimali mümkündür. Dış etmenlerden bağımsız olarak yine jeneratör içinde kullanılan elektronik ekipmanlarda çoğunlukla üretim kaynaklı problemler ortaya çıkabilmektedir. Ağırlıklı olarak bu problemler jeneratörün güç elektroniği katmanlarında olmaktadır.

Yüksek gerilim konnektörü temasa açık bırakılan sistemlerde ise jeneratörün enerjisi kesik olsa dahi sistemin tersine de çalışacağı akılda tutulmalıdır. Sonotrod tarafından titreşim doğrultusunda uygulanacak fiziksel bir darbe, konnektörde yüksek gerilim ve temas var ise çarpılma riski oluşturacaktır.

3.5. Titreşim ve Gürültü Problemleri

İstenen mod (boyuna titreşim) yerine yan modların (radial, torsional) uyarılması, sistemde istenmeyen yönde titreşimler oluşmasına sebep olabilir. Bu da sistem bileşenlerinde yüksek lokal gerilmelere ve istenmeyen gürültüye yol açar. Bu durum operatör sağlığı açısından da risk oluşturabilir. Bilindiği üzere insan kulağının duyma üst eşik frekansı 20kHz olarak kabul edilir. Dolayısı ile doğru çalışan sistemlerde dahi frekans 15-20kHz olduğunda kulakta rahatsızlık oluş-

turabilecek durumlar ortaya çıkabilir. Bu frekanslarda çalıştırılmak zorunda olunan durumlarda sistem mümkün olduğunca operatörden uzak tutulmalıdır.

3.6. İş Parçası ile İlgili Problemler

Daha önce bahsedildiği gibi sistem rezonans frekansını belirlerken iş parçası da işin içine girmektedir. Özellikle kesim yapılan işlemlerde iş parçasının ultrasonik bıçağın çalışacağı bölgeye metal rulolar ile getirildiği sıklıkla görülmektedir. Eğer bıçak pozisyonlaması ile ilgili bir hata var ise bıçak metal ruloya temas etmekte ve rezonans frekansı ani ve aşırı sapmakta, bıçak başta olmak üzere çeşitli bileşenlere zarar verebilmektedir. Tavsiye edilen daha az etki yaratacak olan plastik içerikli ruloların kullanılmasıdır. 40 adet ultrasonik kesme sistemi kullanılan bir işletmede yapılan bu iyileştirme sonrası aylık 20 adet olan bıçak değişimi 2 ye düşürülmüştür.

Eğer iş parçası zamanla sonotrod üzerinde kirliliğe sebebiyet verecek bir malzeme ise, düzenli olarak temizlik yapılmalı, temizlik sırasında ege, zımpara gibi aşındırıcı malzemeler kullanılmamalıdır. İş parçasına göre doğru basınç, frekans ve genlik seçimi yapılmalıdır.

3.7. Bakım ve Montaj Kaynaklı Problemler

Bakım ve montaj sırasında dönüştürücü–yükseltici–sonotrod yüzeylerinin düzgün temas etmemesi, yüzeylerde korozyon veya kirlenme, yanlış torklama, bağlantı gevşemesi veya seramiklerin kırılması yine bahsedilen problemlere sebep olacaktır. Bu sebepten dolayı sisteme müdahale edecek bakım personeline ve kullanıcı operatörlere gerekli eğitimler verilmelidir.

4. Sonuçlar

Yapılan çalışmadaki bilgiler tekstil, otomotiv, plastik ve lastik sektöründe edinilmiş tecrübeler ışığında ve 3 yıl boyunca ultrasonik plastik kaynak makinaları üretilen bir firmada tasarım mühendisliği çalışmaları sırasında edinilmiş ve bakım personellerinin ve ultrasonik sistem kullanıcılarının bilgilendirilmesi amacı ile bildiri haline getirilmiştir. Verilen bilgilerin birçoğu literatürde bulunmadığından değerli bir çalışma literatüre kazandırılmış ve bakım personellerinin kullanımına sunulmuştur.

4. Kaynaklar

Andrzej M., Piotr K., Witold K. & Paweł K. (2015). Modelling and Designing of Ultrasonic Welding Systems. Archives of Acoustics Vol. 40, No. 1, pp. 93–99 (2015)

A. Cardoni & M. Lucas (2005). Strategies for Reducing Stress in Ultrasonic Cutting Systems Blackwell Publishing Strain (2005) 41, 11–18



Elekler için Titreşim Tabanlı Durum İzleme Sensörü Geliştirilmesi

Development of a Vibration-Based Condition Monitoring Sensor for Screens

Zehra BAYIN¹, Ekrem Savaş¹, Çağrı ŞENTÜRK², Tuncay KARAÇAY³

¹*zbayin@mekaglobal.com, Meka Global Makine İmalat Sanayi ve Ticaret A.Ş., Ar-Ge Mühendisi

¹esavas@mekaglobal.com, Meka Global Makine İmalat Sanayi ve Ticaret A.Ş., Ar-Ge Müdürü

²cagri@beyes.com.tr, Beyes Teknoloji A.Ş., Bilgisayar Mühendisi

³karacay@gazi.edu.tr, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Prof. Dr.

Sorumlu yazar; e-posta : zbayin@mekaglobal.com

DOI : <http://dx.doi.org/10.31796/ogummf.xxxxxx>

Özet

Nesnelerin interneti altyapısı ve algılayıcı teknolojilerinde son yıllarda yaşanan gelişmeler her alanda kendisine uygulama bulmaktadır. Kırma ve eleme makineleri sektöründe de hem durumun izlenmesi hem bakım planlaması hem de makine performansın değerlendirilmesi için çeşitli sensörlerin kullanımı gittikçe artmaktadır. Titreşimli eleklerde durum takibinin yapılması titreşim, gürültü, motor gücünün takibi ve yine sürücü sistemlerin sıcaklık takibi ile yapılmaktadır. Fakat makinenin dinamik durumundaki değişim doğrudan titreşim ölçümleri ile takip edilebilmektedir. Bu çalışmada eleğin titreşim ölçümlerinin gerçek zamanlı takibi ile elek bileşenlerinde oluşacak arızalar ve bunların elek performansına etkisinin belirlenmesi amacıyla kablosuz iletişim ve veri aktarımına sahip, çevresel koşullara dayanıklı ve diğer sensörler ile senkron çalışabilen bir durum izleme sensörü geliştirilmiştir. Eleğin üç boyutlu ve altı serbestlik dereceli hareketini ölçebilmek ve mevcut elek tasarımlarına da uyumlu olması amacı ile geliştirilen sensör eleğin dört yay konsoluna montajı yapılmıştır. Sensörler birbirleri ile haberleşerek senkron olduktan sonra eş zamanlı veri toplayarak eleğin dinamik hareketini temsil eden titreşim genliği, eleme düzlemindeki orbit ve orbit şekli elde edilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Titreşim sensörü, titreşimli elek, durum izlemesi

Abstract

Recent developments in IoT infrastructure and sensor technologies are finding applications in every field. The use of various sensors for condition monitoring, maintenance planning, and evaluating machine performance is increasingly prevalent in the crushing and screening machinery industry. Condition monitoring in vibrating screens is achieved through monitoring vibration, noise, motor power, and the temperature of the drive system. However, changes in the machine's dynamic condition can only be monitored directly through vibration measurements. In this study, a condition monitoring sensor capable of wireless communication and data transfer, resistance to environmental conditions, and synchronous operation with other sensors was developed to monitor real-time screen vibration measurements and identify malfunctions in screen components and their effect on screen performance. The sensor, developed to measure the three-dimensional, six-degree-of-freedom motion of the screen and to be compatible with existing screen designs, is mounted at the four spring consoles of the screen. Sensors communicate and synchronize with each other, and then they collect data simultaneously, obtaining the vibration amplitude, orbital shape, and orbital shape representing the screen's dynamic motion.

Keywords: Vibration sensor, vibrating screen, condition monitoring



1. Giriş ve Bilimsel Yazın Taraması

Son yıllarda, endüstriyel makinelerin verimli çalışabilmesi için sürekli izleme, bakım ve performans değerlendirmeleri önemli bir hale gelmiştir. Makinelerdeki izleme ve durum tespiti süreçlerinde önemli bir dönüşüm yaşanmıştır. Nesnelerin İnterneti (IoT) altyapısı ve gelişmiş sensör teknolojilerinin entegrasyonu, makinelerin izlenmesi, kontrol edilmesi ve performanslarının optimize edilmesi açısından bakım operasyonlarına yeni bir boyut kazandırmıştır. Bu teknolojiler, makinelerin dinamik durumlarının anlık ve doğru bir şekilde izleyerek gelen verilerin toplanmasını ve analiz edilmesini sağlar. Böylece arızaların erken tespiti, bakım planlaması ve genel performans izlemesi gibi kritik süreçlerin daha verimli hale gelmesine katkı sağlamaktadırlar (Bandyopadhyay & Sen, 2011). Sürekli dinamik davranış sergileyen kırma eleme ekipmanlarından titreşimli eleklerde sensör teknolojileri kullanımı giderek artmakta ve yaygınlaşmaktadır.

Titreşimli eleklerin verimli çalışabilmesi için titreşim, motor gücü, sürücü sistem sıcaklıkları gibi pek çok parametrenin anlık olarak izlenmesini gerekmektedir. Geleneksel yöntemlerle çoğunlukla titreşim verileri üzerinden durum izleme yapılırken, gelişen sensör teknolojileri ve veri analiz teknikleri sayesinde titreşim, motor gücü, yatak sıcaklıkları ve hatta gürültü seviyelerinin takibi ile durum izleme yapılabilmektedir (Bandyopadhyay & Sen, 2011; Zuo & Xie, 2002). Yalnızca bu parametreler üzerinden yapılan izlemeler, makinelerin gerçek performansını tam anlamıyla yansıtmakta yetersiz kalabilir. Titreşimli eleklerin dinamik davranışlarını daha doğru bir şekilde izlemek ve arızaların önceden tespit edilmesi için daha kapsamlı ve hassas ölçüm yöntemleri gerekmektedir.

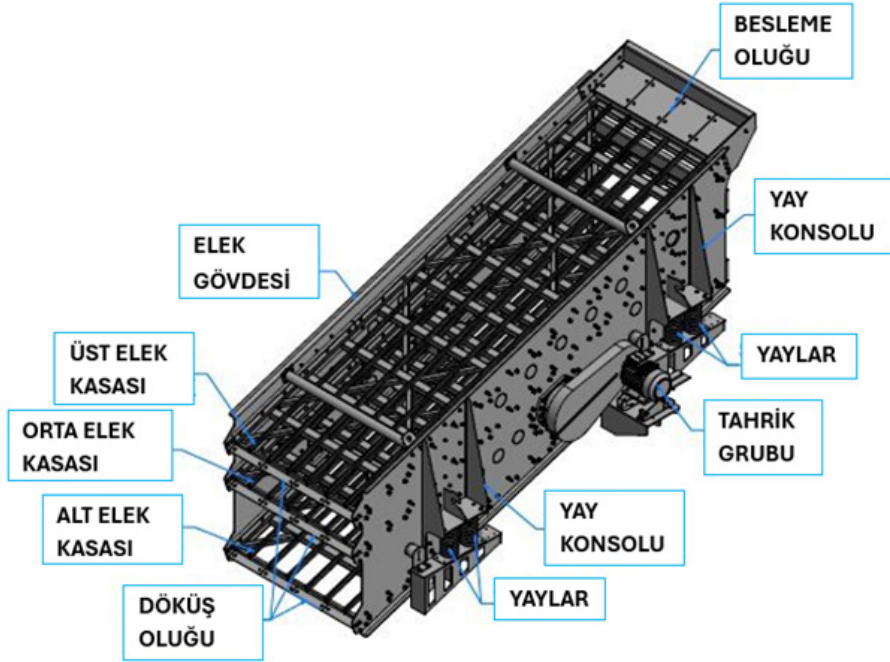
Günümüzde kablosuz iletişim altyapısına sahip sensörlerin kullanımı giderek artmaktadır, kablosuz sensör ağları ve veri aktarım teknolojileri ile makinelerin performanslarını gerçek zamanlı olarak izlenmesine imkân sağlamaktadır. Bu sensörlerin çevresel faktörlerden etkilenmeden çalışabilmesi için kullanılan sensörlerin dayanıklılığı büyük bir önem taşımaktadır. Endüstriyel makineler genellikle zorlu koşullarda çalıştığından, sensörlerin sıcaklık, nem, toz ve titreşim gibi etmenlere karşı dayanıklı olması gerekmektedir ((Zhao & Liu, 2012, Kim & Kim, 2013). Bu zorlu çevresel koşullara dayanıklı sensörler, makinelerin sürekli izlenmesi ve gerçek zamanlı veri analizi yapılabilmesi için kritik bir rol oynamaktadır. Kablosuz sensör ağları, makinelerin farklı bileşenlerinden veri toplar ve bu veriler, merkezi bir kontrol sistemine iletilerek analiz edilmektedir. Bu sensörlerin kablosuz ağlar aracılığıyla senkronize çalışabilmesi, makinelerin tüm hareketlerinin eş zamanlı olarak izlenmesini mümkün kılmaktadır. Böylece yalnızca makinelerin durum izlemesini takip etmekle kalmaz, aynı zamanda üretim süreçlerinin iyileştirilmesine de olanak tanımaktadır. Örneğin, Zhang ve Li (2010), endüstriyel makinelerde kablosuz sensör ağlarının uygulanabilirliğini inceleyerek, bu teknolojilerin veri iletimi ve arıza tespiti süreçlerine etkisini gözlemlemiştir.

Titreşimli eleklerde performansın doğru değerlendirilmesi için eleğin üç boyutlu hareketlerini ölçen sensörler ve altı serbestlik derecesine sahip sensörlerin kullanılması gerekmektedir. Bu tür sensörler, eleğin her yöndeki hareketini analiz ederek, arızaların erken tespiti ve performans bozulmalarının daha hızlı bir şekilde tespit edilmesini sağlamaktadır (Cheng & Zuo, 2012). Lee ve Ni (2007), özellikle titreşimli sistemlerin izlenmesinde bu tür sensörlerin kullanımının önemine değinerek, çok eksenli sensörlerle yapılan izlemelerin arıza tespitinde önemli bir gelişim sağladığını belirtmiştir. Elde

edilen veriler, makinelerin sadece arıza tespiti sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda performanslarını iyileştirme konusunda da önemli bir rol almaktadır. Kim ve Kim (2013), endüstriyel sensörler ve IoT tabanlı izleme sistemlerinin, makine performansının sürekli izlenmesine olanak tanıdığını ve böylece üretim süreçlerinin daha verimli hale getirildiğini belirtmiştir. Bu veriler, makinelerin çalışma koşullarına göre bakım planlamalarının yapılabilmesine, gereksiz duruşların önlenmesine ve bakım maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada, titreşimli eleklerde kullanılmak üzere, çevresel koşullara dayanıklı ve kablosuz iletişim altyapısına sahip, çok eksenli titreşim sensörünün geliştirilmesi hedeflenmiştir. Eleğin dört konsoluna yerleştirilen sensörler, birbirleriyle senkronize çalışarak eş zamanlı veri toplamakta ve bu veriler üzerinden titreşim genliği, orbit şekli gibi dinamik parametreler elde edilmektedir. Geliştirilen sensörün, eleğin dinamik davranışını izleyerek elekte meydana gelebilecek potansiyel arızaları daha erken tespitini sağlayarak ve elek performansını değerlendirerek bakım ve iyileştirme süreçleri daha verimli hale getirilmesi amaçlanmıştır.

Eleme işlemleri endüstriyel tesislerin kritik proseslerinden biridir. Titreşimli elekler, malzemeleri tane boyutuna göre sınıflandırmak için kullanılan önemli makinelerdir (Zhao, ark., 2011). Titreşimli elekler, malzemenin elek üzerindeki hareketini ve eleme işlemini doğrusal, dairesel ve eliptik titreşim hareketi ile sağlayacak şekilde tasarlanmıştır (He ve Liu, 2009, Krot ve diğerleri, 2019). Açılı elekler, madencilik ve agrega endüstrilerinde yaygın olarak tercih edilen eleklerdir. Açılı elekler, malzemenin elek kasası üzerinde ilerlemesini ve elenmesini dairesel hareketle sağlamaktadırlar. Şekil 1’de titreşimli açılı eleği oluşturan temel bileşenler; elek gövdesi, besleme oluğu, yay konsolları, yaylar, tahrik grubu, üst, orta, alt elek kasaları ve döküş oluğu gösterilmiştir. Şekil 2’de Meka Global’de üretimi Yapılmış titreşimli açılı eleğin genel görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 1. Titreşimli açılı elek temel bileşenleri



Şekil 2. Meka titreşimli açılı elek genel görüntüsü

Eğimli elekler çalışma prensipleri gereği sürekli dinamik yüke maruz kalmaktadır (Rodriguez vd., 2016). Sağlıklı bir şekilde çalışan açılı eleklerde dairesel bir hareket gözlemlenmektedir. Fakat sürekli yük altında ve zorlu çevre koşullarında çalışmak durumunda olan eleklerin dairesel hareketi zamanla bozulmalar gözlemlenebilmektedir. Açılı eleğin mevcut hareketinde bozulmalar, dairesellikten sapmalar meydana geldikçe eleğin performansı ve eleme verimi düşmektedir. Titreşimli eleklerde yaylarda meydana gelen arızalar, düzensiz besleme, yapısal ve alt bileşenlerde meydana gelen arızalar, yorulma vb. problemler elek hareketinde bozulmalara yol açabilmektedir (Lyan ve ark., 2021). Arıza durumlarında, mümkün olan en kısa sürede bozulmanın fark edilip önlem

alınması düşük bakım maliyetleri ile kısa sürede çözülmesini sağlamak için önem arz etmektedir.

2. Yöntem

Titreşimli eleklerde meydana gelecek bu arızaların kısa sürede fark edilip çözülmesi için Titreşim Sensörü M-Vibras geliştirilmiştir. Geliştirilen sensör donanımı, IP67 koruma sınıfında çevre koşullarına dayanıklı bir gövde içinde, 3 eksenli MEMS ivmeölçer, sıcaklık sensörü, dijital basınç sensörü gibi çoklu sensörlerle donatılmıştır. Mikrodenetleyicilerle desteklenen devreler WiFi, Bluetooth ve RS485 modülleri üzerinden veri iletişimini sağlamaktadır. Güç devresi, 3.7V Li-ion batarya destekli olup, 3.3V DC-DC konvertör ve LDO regülatör içermektedir. Değiştirilebilir SD kart ile yüksek veri depolama kapasitesine sahip olup pil ömrü ölçüm süresine göre ayarlanabilmekte ve 2 yıl boyunca şarj edilmeden çalışabilmektedir.

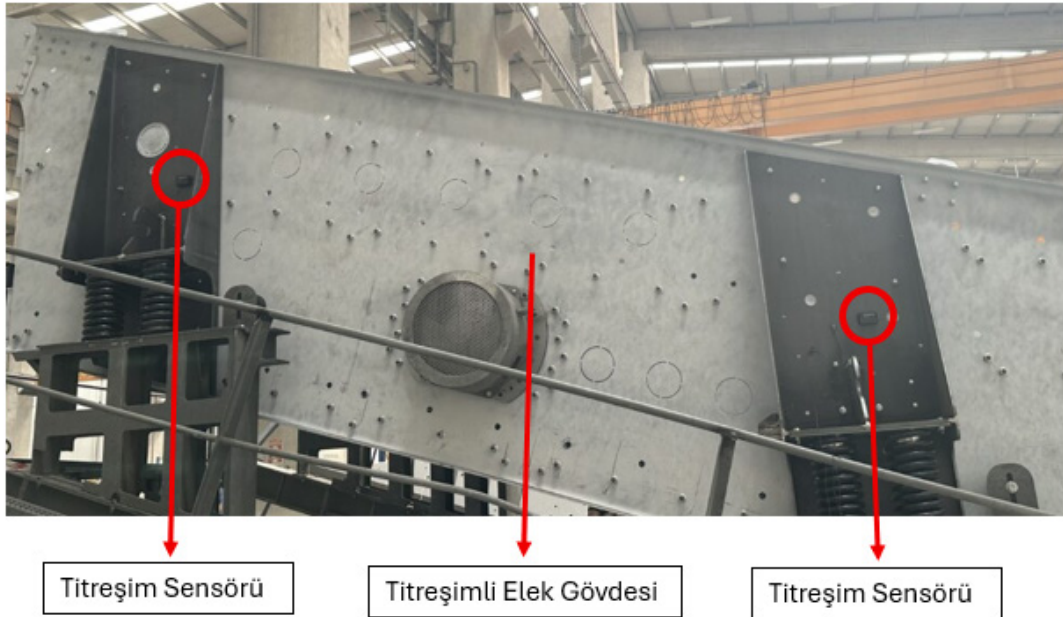
Backend katmanı, sensörlerden gelen verilerin TCP/IP protokolüyle toplanmasını, PostgreSQL ve API servisleri aracılığıyla işlenmesini sağlamaktadır. API üzerinden gelen veriler FFT, konum ve orbit hesaplamalarına tabi tutulup; bu veriler Blazor tabanlı arayüzde görselleştirilmektedir. Backend, mobil ve web sistemleriyle REST API üzerinden entegre çalışarak zaman damgalı veri arşivi ve uyarı üretimi görevlerini üstlenmektedir.

Eleklerin boyutları ve çalışma koşulları göz önüne alındığında sensörlerin kablolar ile birbirine ve/veya veri toplama sistemine bağlanması uygun bir çözüm olmamaktadır. Şantiyelerdeki çalışma koşulları sebebi ile makine ve çevresinde oluşan yoğun titreşim, taş vb. düşmesi, toz yayılımı ve eleme sırasında yıkama olması durumunda sürekli sıvı teması gibi durumlar oluşmaktadır. Bu koşullar göz önüne alınarak sensörlerin çevresel koşullara dayanıklı ve kablosuz bağlantı ve iletişim sistemine sahip olmasına karar verilmiştir. Fakat farklı noktalara yerleştirilen kablosuz sensörlerden alınan verilerin eş zamanlı toplanması ya da sensörlerin eş zamanlı olarak ölçüme başlaması aşılması gereken başka bir zorluk olmuştur. Mikrodenetleyici tabanlı firmware, kendi yazılım mimarisi çalışarak güç yönetimi, örnekleme, veri filtreleme ve haberleşme işlevlerini yerine getirmektedir. RTC, ADC, UART, SD, SPI ve PWM donanım modülleri kullanılmış; uyku modları optimize edilmiştir. Donanım, belirli zamanlarda uyanarak WiFi/TCP/RS485 bağlantı denemesi yapmaktadır ve yukarıda izah edildiği gibi verilerin eş zamanlı toplanmasının sağlanması için başarılı bağlantı sonrası veri gönderimi gerçekleştirmektedir. Geliştirilen sistem 1ms mertebesinde hata payı ile senkron olabilmektedir ve elek titreşimlerinin zorlama frekansının 10 Hz ila 15 Hz arasında olduğu göz önüne alındığında bu hata payı kabul edilebilir sonuçlar vermektedir. Ayrıca, donanımın belirli aralıklarla uyanması, bağlantı denemeleri yapması ve başarılı olursa API'ye sensör verisi göndermesi şeklinde tanımlanmış bir yazılım mantığı uygulanmıştır. Bu yapı sayesinde hem enerji verimliliği sağlanmakta hem de veri kaybı önlenmektedir.

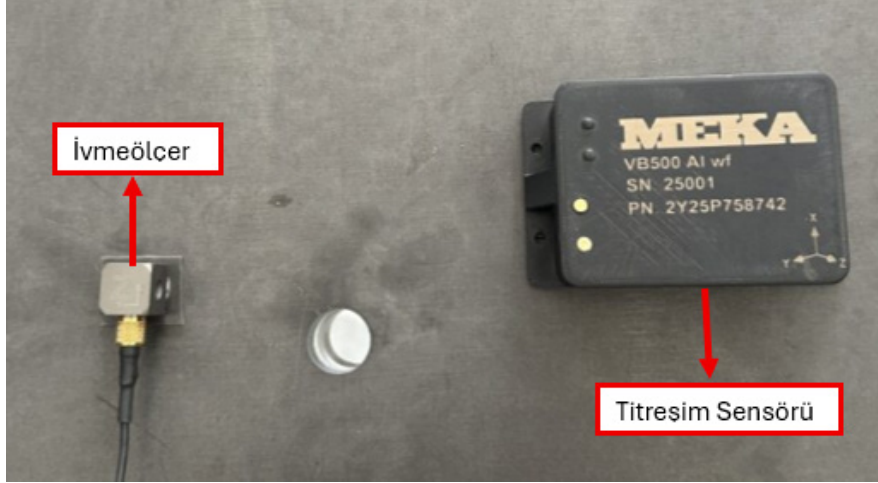


Şekil 3. Titreşim sensörünün imal edilmiş genel görüntüsü

Bu çalışmada geliştirilen titreşim sensörü, üretilen açılı eleklerin fabrika testleri sırasında kullanılarak test edilmiştir ve konvansiyonel bir veri toplama sistemi ile eş zamanlı ölçümler alınarak sonuçları doğrulanmıştır. Titreşim sensörü test edilecek açılı eleğin yay konsollarına sabitlenerek elek 15 dakika boyunca çalıştırılmaktadır. Şekil 5'te titreşim sensörünün elek yay konsollarına bağlantısı gösterilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü üzere geliştirilen sensör aynı noktada piezoelektrik ivmeölçer bağlanarak bilgisayarlı bir veri toplama sistemi ile aynı anda ölçümler yapılmıştır.

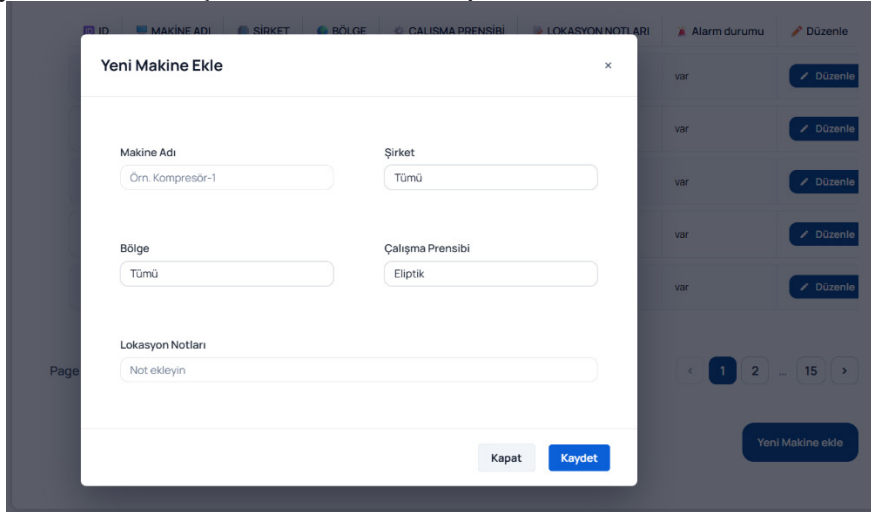


Şekil 4. Titreşim sensörünün titreşimli elek ile bağlantısı

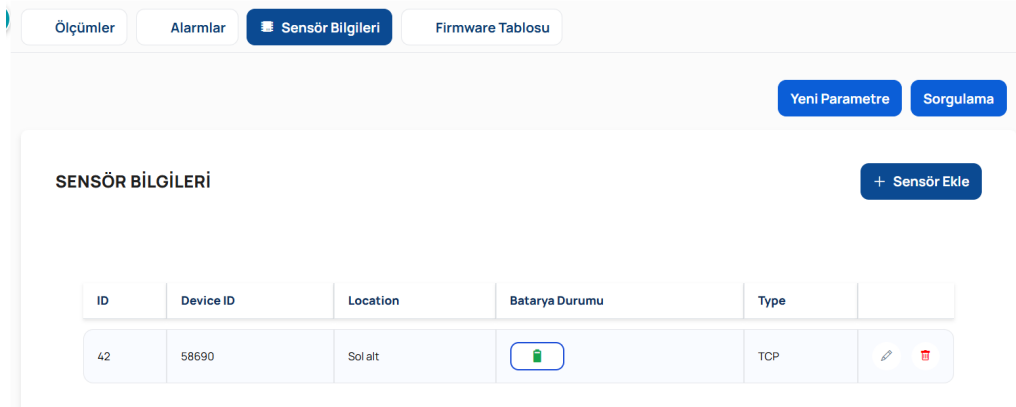


Şekil 5. İvmeölçer ve titreşim sensörü

Titreşim sensörünü elek üzerinde çalıştırmadan önce geliştirilen arayüzde bazı ayarlamaların yapılması gerekmektedir. Öncelikle titreşim ölçümü hangi makine üzerinde yapılacaksa ilgili makinenin kaydı ayarlar sekmesinde Şekil 6'da gösterilen Yeni Makine Ekle bölümünden eklenerek titreşimli eleğin adı, çalıştırıldığı şirket, bölge ve çalışma prensibi (dairese, eliptik, doğrusal) bölümler doldurulmaktadır. Daha sensörün bağlı olduğu makine seçilerek Sensör Bilgileri sekmesinden eklenecek sensörün Şekil 7'de görüldüğü üzere ID, konum ve frekans aralıkları eklenmektedir. Sensör bilgileri girildikten sonra Şekil 8'de görüldüğü üzere Sensör Parametreleri sekmesinden ölçüm zamanı ve ölçüm periyodu belirlenir. Bu aşamadan sonra artık gerekli ayarlamalar yapılmış olup titreşimli elek çalıştırılarak ölçüm alınmaktadır. Ölçüm sonuçları arayüz üzerinden eş zamanlı olarak takip edilebilmektedir.



Şekil 6. Titreşim sensörünün bağlanacağı makine bilgilerinin kayıt yapıldığı arayüz



Şekil 7. Sensör bilgilerinin eklendiği arayüz

Yeni Sensör Parametreleri

Yeni Sensör Parametreleri

Device ID Seç

Ölçüm Zamanı

Ölçüm Zamanı (sn)

Ölçüm Periyodu

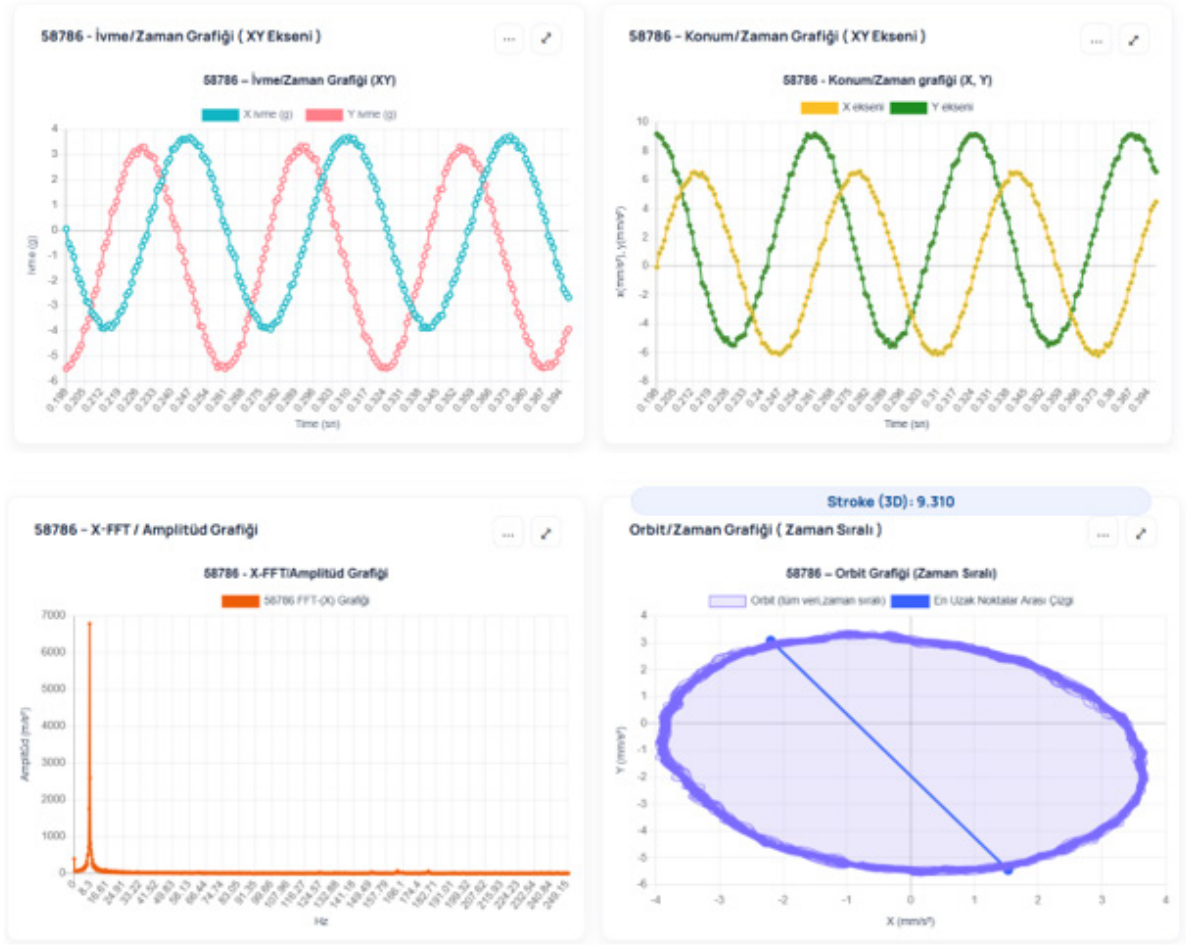
Ölçüm Periyodu (dk)

Kaydet

Şekil 8. Ölçüm aralıklarının belirlendiği arayüz

3. Bulgular ve Sonuçlar

Titreşimli elekler üzerinde yapılan titreşim testlerinde eleğin dinamik davranışı hem konvansiyonel piezoelkerler ivmeölçerler ile hem de geliştirilen kablosuz titreşim sensörü ile takip edilmiştir. Normal test koşullarında imalatı yapılan titreşimli eleğin çalışma strok değeri 8.6 mm'dir ve hem ivmeölçerler ile hem de genik kartları ile bu genlik takip edilebilmektedir. Fakat bu çalışmada eleğin farklı noktalarında farklı titreşim genlikleri ve şekilleri oluşması için test sırasında titreşimli elekte kasten bir hata oluşturmak amacıyla eleğin dört köşesindeki taşıyıcı konsol yaylarından bir tanesi olması gerekenden daha düşük yay katılığına sahip sahip yaylar ile değiştirilmiştir. Bu durumda titreşim sensörü ile yapmış olduğumuz ölçümlerde Şekil 8'de arayüz grafiklerinde de görüldüğü üzere hareket orbiti muntazam dairesel şekilden sapmış ve oval bir yapı olmuş, salınım açısı değişmiş ve genlik de 9.3 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9. Titreşim sensörü arayüzünde ölçüm sonuçları grafikleri

Son kullanıcı sensör arayüzünde orbit grafiğinde stroke değerini 9.3 mm olarak gözlemlediği zaman mevcut elekte bir problem olduğunu anlayarak gerekli önlemleri alabilmektedir. Bu durumda daha arızayı erken bir şekilde fark ederek hem yüksek bakım maliyetlerinin önüne geçmiş olacak hem de makine performansının düşmesini engellemiş olacaktır. Strok değerinin yanı sıra orbit şeklini tanımlayan orbit açısı gibi diğer bilgiler ile birlikte eleğin dinamik davranışındaki değişikliğin tanımlaması kolaylaşmaktadır. Makinelerden elde edilen bu veriler yapay zeka öğrenmesi için aktif olarak toplanmaktadır. Mevcut durumda arayüzde bulunan alarm sekmesi yeteri kadar veri toplandıktan sonra aktifleştirilerek son kullanıcıya uyarı verilecektir.

Teşekkür

Bu projemiz 1707 - Siparişe Dayalı Ar-Ge Projeleri için KOBİ Destekleme Çağrısı kapsamında TÜBİTAK tarafından 2023-3225041 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.



Kaynaklar

1. Bandyopadhyay, S., & Sen, J. (2011). Internet of Things: Applications and Challenges in Technology and Standardization. *Wireless Personal Communications*, 58(1), 49–69.
2. Zuo, M. J., & Xie, L. (2002). Condition monitoring and fault diagnosis of rotating machinery using vibration signals: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 16(5), 1019–1045.
3. Zhao, J., & Liu, J. (2012). Wireless sensor networks in industrial automation: A review. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 8(8), 267–275.
4. Kim, H., & Kim, J. (2013). Development of a robust sensor network for industrial machinery monitoring. *Journal of Industrial Information Integration*, 1(1), 22–30.
5. Zhang, L., & Li, D. (2010). Design of wireless sensor networks for industrial machine monitoring. *Sensors*, 10(11), 9951–9973.
6. Cheng, L., & Zuo, M. J. (2012). Condition monitoring and fault diagnosis of multicomponent systems using vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 31(2), 585–601.
7. Lee, J., & Ni, J. (2007). Recent advances in predictive maintenance and condition monitoring of machines. *Journal of Vibration and Acoustics*, 129(5), 504–514.
8. (Zhao, ark., 2011). - Zhao, L., Zhao, Y., Liu, C., Li, J., & Dong, H. (2011). Simulation of the screening process on a circularly vibrating screen using 3D-DEM. *Mining Science and Technology (China)*, 21(5), 677–680.
9. He ve Liu, 2009 - He, X.M., & Liu, C.S. (2009). Dynamics and screening characteristics of a vibrating screen with variable elliptical trace. *Mining Science and Technology (China)*, 19(4), 508–513.
10. Krot ve diğerleri, 2019 - Krot, P., & Zimroz, R. (2019, November). Methods of springs failures diagnostics in ore processing vibrating screens. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 362, No. 1, p. 012147). IOP Publishing.
11. Rodriguez vd., 2016) - Rodriguez, C.G., Moncada, M.A., Dufeu, E.E., & Razeto, M.I. (2016). Nonlinear model of vibrating screen to determine permissible spring deterioration for proper separation. *Shock and Vibration*, 2016.
12. Lyan ve ark., 2021 - Lyan, I., Panovko, G., & Shokhin, A. (2021). Creation and verification of spatial mathematical model of vibrating machine with two self-synchronizing unbalanced exciters. *Journal of Vibroengineering*, 23(7), 1524–1534.

Endüstriyel Bakım Süreçlerinde Açık Kaynak Kodlu Otomasyon Sistemleri ve Yapay Zeka Uygulamaları

Open Source Automation Systems and Artificial Intelligence Applications in Industrial Maintenance Processes

İbrahim Karataş^[1] & Zeynep Hatun^[2]

¹ Malzeme Teknolojileri Yüksek Mühendisi

² Bilgisayar Mühendisi

Alindair Soğutma Sistemleri San. ve Tic. A.Ş.

email: erp@alindair.com.tr

Özet

Bu çalışma, endüstriyel bakım süreçlerinde açık kaynak kodlu akış tabanlı otomasyon sistemleri ve Yapay zekâ uygulamalarının kullanımını incelemektedir. Geleneksel bakım yaklaşımlarının yetersizliklerinden yola çıkarak, modern teknolojilerin bakım süreçlerini nasıl dönüştürdüğü ve verimliliği artırdığı örnek senaryolar üzerinden açıklanmaktadır. Araştırma, akış tabanlı otomasyon platformlarının çalışma prensiplerini detaylandırırken, öngörülü bakım, otomatik iş emri oluşturma ve gerçek zamanlı izleme gibi kilit uygulamaları ele almaktadır. Sonuçlar, bu teknolojilerin %30-50 arası duruş azalması ve %25 bakım maliyeti tasarrufu sağladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Dijital bakım, veri analitiği, yapay görme, endüstri 4.0

Abstract

This study examines the use of open source flow-based automation systems and artificial intelligence applications in industrial maintenance processes. Based on the shortcomings of traditional maintenance approaches, it explains how modern technologies transform maintenance processes and increase efficiency through example scenarios. The research details the working principles of flow-based automation platforms and addresses key applications such as predictive maintenance, automatic work order creation, and real-time monitoring. The results show that these technologies reduce downtime by 30-50% and save 25% on maintenance costs.

Keywords: Digital maintenance, data analytics, artificial vision, Industry 4.0

Kısaltmalar

AI: Artificial Intelligence
API: Application Programming Interface
CAPEX: Capital Expenditure
CNC: Computer Numerical Control
CNN: Convolutional Neural Networks
ERP: Enterprise Resource Planning
FFT: Fast Fourier Transform
IEC: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IoT: Internet of Things
LSTM: Long Short-Term Memory
MES: Manufacturing Execution System
ML: Machine Learning
MTTR: Mean Time to Repair
MQTT: Minimum Message Queuing Telemetry Transport
NLP: Natural Language Processing
OPEX: Operational Expenditure
SCL: Structured Control Language
SVM: Support Vector Machine
UPS: Uninterruptible Power Supply

1. Giriş

Endüstriyel üretimde ekipmanların düzenli bakımı, operasyonların kesintisiz devam etmesi ve yüksek verimliliğin sağlanması açısından hayati bir rol oynamaktadır. Bazı araştırmalara göre, plansız duruşların endüstriyel üreticiler için büyük kayıplara yol açtığı ve bu kayıpların ise neredeyse yarısının ekipman arızalarından kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Geleneksel bakım stratejileri olan reaktif ve planlı bakım yöntemleri bu kayıpları önlemede çoğu zaman yetersiz kalmakta, bu durumda yeni nesil teknolojik çözümlere olan ihtiyacı artırmaktadır.

Günümüzde yapay zekâ (AI) ve makine öğrenmesi (ML) teknolojileri, endüstriyel otomasyon alanında öne çıkan en yenilikçi gelişmelerden biri olarak dikkat çekmektedir. Bu teknolojiler sayesinde makineler yalnızca mevcut durumlara tepki vermekle kalmaz, aynı zamanda öğrenme ve uyum sağlama yetenekleri kazanarak karar alma süreçlerinde daha etkin hale gelir. Bu durum hem üretkenliği artırır hem de nitelikli iş gücü açığını kısmen telafi etmektedir.

Bu çalışmada, açık kaynak kodlu akış tabanlı otomasyon sistemlerinin bakım süreçlerinde sunabileceği avantajlar incelenmekte ve yapay zekâ entegrasyonunun sağlayabileceği faydalar örnek senaryolarla ele alınmaktadır.

2. Literatür Taraması

2.1 Endüstriyel Bakımda Dijital Dönüşüm

Son yıllarda endüstriyel bakım alanında dijitalleşme, işletmelerin rekabet gücünü artıran en önemli dönüşüm unsurlarından biri haline gelmiştir. Yapay zekâ temelli endüstriyel otomasyon pazarı, 2024 yılı itibarıyla yaklaşık 20,2 milyar dolar büyüklüğe ulaşmış olup, 2025–2034 dönemi boyunca yıllık ortalama %18,8 oranında bir büyüme sergileyerek 2034 yılında 111,8 milyar dolar seviyesine erişeceği öngörülmektedir. Bu büyümenin özellikle öngörücü bakım (predictive maintenance), kalite kontrol ve denetim, tedarik zinciri optimizasyonu ve endüstriyel robotik uygulamalarında yoğunlaştığı literatürde çalışmalarında fazlasıyla yer almaktadır.

Bakım yönetimi bağlamında yapay zekâ teknolojilerinin kullanımı, yalnızca klasik senaryolarıyla sınırlı kalmayıp, giderek daha geniş kapsamlı süreçlere entegre edilmektedir. Özellikle otomatik bakım planlama, doğal dil işleme (NLP) destekli iş emri yönetimi ve uzaktan yardım sistemleri gibi yenilikçi uygulamalar, bakım süreçlerinde etkinlik ve verimliliği artırmaya yönelik önemli katkılar sağlamaktadır. Bu bağlamda, dijital dönüşümün endüstriyel bakım sistemlerine entegrasyonu, yalnızca operasyonel sürekliliği güvence altına almakla kalmayıp aynı zamanda stratejik bir rekabet avantajı da yaratmaktadır.

2.2 Açık Kaynak Otomasyon Platformları

Açık kaynak tabanlı iş akışı otomasyon araçları, organizasyonların iş süreçlerini daha verimli ve esnek bir şekilde yönetmelerine olanak sağlayan maliyet etkin çözümler sunmaktadır. Bu tür platformlar, özellikle iş süreci standardını desteklemeleri, görsel kullanıcı arayüzleri aracılığıyla süreç tasarımı kolaylaştırmaları ve gelişmiş uygulama programlama arayüzü (API) entegrasyon imkânları sağlamaları nedeniyle öne çıkmaktadır.

Günümüzde gelişen akış tabanlı otomasyon sistemleri, yapay zekâ teknolojilerini iş süreci otomasyonu ile bütünleştirerek, işletmelere hem yüksek düzeyde teknik esneklik hem de kodsuz (no-code) geliştirme hızını aynı anda sunmaktadır. Bu yaklaşım, teknik bilgi gereksinimini azaltırken, aynı zamanda yazılım geliştirme süreçlerinde çeviklik ve ölçeklenebilirlik sağlamaktadır. Böylece organizasyonlar, operasyonel verimliliklerini artırmanın yanı sıra bakım, üretim ve tedarik zinciri gibi kritik alanlarda dijital dönüşüm süreçlerini hızlandırabilmektedir.



3. Yöntem

Bu araştırmanın metodolojik çerçevesi, literatür taraması ve endüstriyel uygulama örneklerinin analizi üzerine inşa edilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle, açık kaynak akış tabanlı otomasyon sistemlerine ilişkin mevcut akademik ve sektörel kaynaklar incelenmiş, söz konusu sistemlerin temel çalışma prensipleri ortaya konulmuştur. Ardından, bu sistemlerin endüstriyel bakım süreçlerine entegrasyon potansiyeli, seçilmiş uygulama örnekleri üzerinden değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular analitik bir çerçevede yorumlanmıştır.

Bu yaklaşım, konunun hem teorik hem de pratik boyutlarının karşılaştırmalı olarak ele alınmasına olanak tanımış; aynı zamanda literatürdeki mevcut boşlukların belirlenmesine ve uygulamaya dönük önerilerin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3.1 Açık Kaynak Kodlu Akış Tabanlı Otomasyon Sistemleri

3.1.1 Çalışma Prensipleri

Akış tabanlı otomasyon sistemleri, iş süreçlerini görsel akış diyagramları aracılığıyla modellemek ve otomatikleştirmek amacıyla geliştirilmiş yapılardır. Bu sistemler, karmaşık iş süreçlerini daha anlaşılır ve yönetilebilir hale getirirken aynı zamanda teknik bilgi gereksinimini azaltmaktadır. Temel çalışma prensipleri aşağıdaki başlıklar altında özetlenebilir:

Düğüm Tabanlı Mimari

Akış tabanlı sistemler, birbirine bağlı düğümlerden (node) oluşan bir mimari üzerinde çalışmaktadır. Her düğüm, belirli bir işlevi yerine getirmek üzere tasarlanmıştır:

Girdi Düğümleri: Sensörlerden alınan veriler, API çağrıları veya manuel kullanıcı tetikleyicileri üzerinden sisteme bilgi aktarır.

İşleme Düğümleri: Veri dönüştürme, hesaplama, koşullu mantık ve iş kurallarının uygulanması gibi süreçleri gerçekleştirir.

Çıktı Düğümleri: Bildirimlerin oluşturulması, veri tabanına kayıt yapılması veya harici sistemlerle entegrasyon gibi görevleri üstlenir.

3.1.2 Olay Tetiklemeli Yürütme

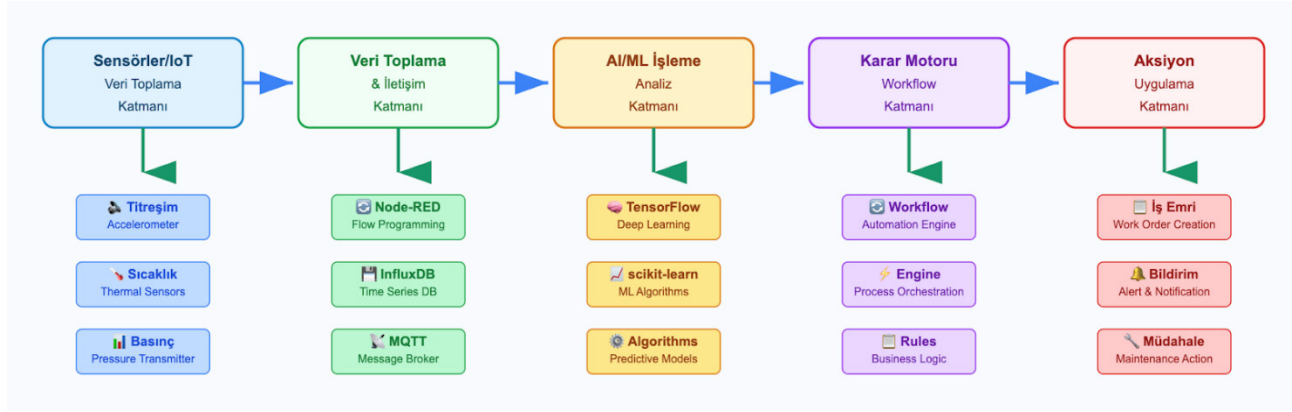
Bu sistemler, olay tabanlı bir yürütme modeline (Event-Driven Execution) dayanır. Süreçlerin tetiklenmesi farklı türde olaylar aracılığıyla gerçekleşebilir:

- Sensörlerde tespit edilen anomaliler,
- Zaman planlamasına bağlı tetikleyiciler,
- Manuel kullanıcı müdahaleleri,
- Harici sistemlerden gelen bildirimler.

3.1.3 Görsel Akış Tasarımı

Kullanıcılar, sürükle-bırak (drag-and-drop) tabanlı görsel arayüzler üzerinden iş akışlarını tasarlayabilmektedir. Bu yaklaşım, kod yazma gerekliliğini en aza indirerek iş analistleri ve teknisyenlerin bağımsız şekilde akış oluşturabilmesine olanak tanır. Ayrıca süreçler görsel olarak izlenebilir, anlaşılabilir ve gerektiğinde kolayca düzenlenebilir hale gelir.

3.2 Sistem Mimarisi



Şekil 1: Sistem Mimarisi

3.3 Avantajlar

Açık kaynak kodlu akış tabanlı otomasyon sistemleri, endüstriyel bakım ve operasyon süreçlerinde önemli avantajlar sağlamaktadır:

Maliyet Etkinlik: Lisans ücretlerinin olmaması ve topluluk desteği sayesinde düşük maliyetli çözümler sunar.

Esneklik ve Özelleştirilebilirlik: Kaynak koduna erişim, organizasyonların ihtiyaçlarına uygun uyarlamalar yapmasına olanak tanır.

Hızlı Uygulama: Görsel akış tasarım araçları sayesinde süreçler kısa sürede modellenebilir ve devreye alınabilir.

Yapay Zekâ Entegrasyonu: Makine öğrenmesi, doğal dil işleme veya veri analitiği gibi teknolojilerin süreçlere entegrasyonu kolaylaşır.

Topluluk ve Ekosistem Desteği: Geniş geliştirici toplulukları tarafından sürekli geliştirilen eklenti ve modüller, sistemin işlevselliğini artırır.

Kodsuz/ Az Kodlu Yaklaşımı: Teknik bilgi düzeyi sınırlı olan kullanıcıların da süreç tasarlamasına olanak sağlar.

3.4 Sınırlılıklar

Bu sistemlerin sağladığı avantajlar ile birlikte, açık kaynak kodlu akış tabanlı otomasyon sistemlerinin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır:

Kurumsal Destek Eksikliği: Ticarî yazılımlarda olduğu gibi profesyonel destek hizmetleri her zaman mevcut olmayabilir.

Güvenlik Riskleri: Açık kaynak yapısı, güvenlik açıklarının hızlıca giderilmemesi durumunda siber saldırılara karşı savunmasız bırakabilir.

Ölçeklenebilirlik Sorunları: Çok büyük ölçekli ve karmaşık endüstriyel ortamlarda performans kısıtları yaşanabilir.

Entegrasyon Zorlukları: Mevcut kurumsal ERP, MES veya bakım yönetim sistemleriyle tam entegrasyon sağlamak ek geliştirmeler gerektirebilir.

Kullanıcı Eğitimi: Görsel tasarım kolaylığına rağmen, ileri düzey konfigürasyonlar için teknik bilgi gerekebilir.



Sürüm ve Güncelleme Yönetimi: Topluluk tabanlı geliştirme nedeniyle uyumluluk sorunları ve güncelleme takibi işletmeler için zorluk oluşturabilir.

3.5 Açık Kaynak Kodlu Otomasyon Araçları Karşılaştırması

Tablo 1: Açık Kaynak Kodlu Otomasyon Araçları Karşılaştırması

Platform	Temel Özellikler	Avantajlar	Dezavantajlar
Node-RED	- IBM tarafından geliştirildi - Flow tabanlı görsel programlama - Node.js tabanlı çalışma zamanı 3000+ topluluk düğümü - MQTT, HTTP, WebSocket desteği	- Güçlü IoT entegrasyonu - Geniş topluluk desteği - Kolay öğrenme eğrisi - Raspberry Pi uyumluluğu - Gerçek zamanlı gösterge paneli - IBM Cloud entegrasyonu	- Sınırlı hata yönetimi - Büyük ölçekli dağıtım zorlukları - Performans sınırlamaları - Kurumsal seviye eksiklikleri - Sürüm kontrolü zorluğu
n8n	- Düğüm tabanlı iş akışı otomasyonu 400+ entegrasyon seçeneği - JavaScript fonksiyon desteği - Kendi sunucu ve bulut seçenekleri - RESTful API desteği	- Kullanıcı dostu arayüz - Güçlü API entegrasyonu - Son derece esnek özelleştirme - Adil kod lisansı - Aktif geliştirme süreci - Kurumsal kullanıma hazır özellikler	- Görece yeni platform - Sınırlı topluluk kaynakları - JavaScript öğrenme eğrisi - Belgeleme eksiklikleri - Sınırlı endüstriyel protokol desteği
Apache Airflow	- Python tabanlı iş akışı düzenleme - DAG (Yönlendirilmiş Döngüsüz Grafik) yapısı - Planlama ve izleme 100'den fazla operatör - Web tabanlı kullanıcı arayüzü	- Güçlü planlama kapasitesi - Python ekosistem avantajı - Büyük veri işleme uyumluluğu - Kurumsal düzeyde ölçeklenebilirlik - Zengin görüntüleme seçenekleri ve uyarılar	- Karmaşık kurulum süreci - Python bilgisi gereklidir - Gerçek zamanlı işleme eksikliği - Kaynak yoğun - Dik öğrenme eğrisi
Apache NiFi	- Veri akışı otomasyonu - İşlemci tabanlı mimari - Web tabanlı yapılandırma - Veri kaynağı izleme - Kümeleme desteği	- Güçlü veri kökeni takibi - Kurumsal güvenlik özellikleri - Ölçeklenebilir mimari - Görsel akış tasarımı - Yerleşik veri dönüştürme	- Karmaşık arayüz - Yüksek bellek kullanımı - Zor öğrenme eğrisi - Sınırlı IoT sensör desteği - Java ekosistemine bağımlılık
Zapier	- SaaS tabanlı otomasyon 5000'den fazla uygulama entegrasyonu - Tetikleyici-eylem mantığı - Kod gerektirmeyen yaklaşım - Çok adımlı iş akışları	- Kullanımı çok kolay - Kapsamlı SaaS entegrasyonu - Kod gerektirmez - Hızlı dağıtım - Otomatik güncellemeler	- SaaS bağımlılığı - Sınırlı özelleştirme - Maliyet ölçeklendirme sorunları - Yerinde kurulum seçeneği yok - Endüstriyel protokoller eksikliği
Huginn	- Ruby tabanlı platform - Araç tabanlı mimari - Web kazıma yetenekleri - Senaryo oluşturma - Olay izleme	- Esnek araç sistemi - Veri toplama için uygun - Aktif topluluk - Yerinde barındırma kontrolü - Ruby on Rails aşinalığı	- Ruby uzmanlığı gerektirir - Sınırlı endüstri entegrasyonları - Daha küçük topluluk - Belgeleme kalitesi sorunları - Performans endişeleri

Açık kaynaklı platformların kullanımında dikkat edilmesi gereken başlıca hususlar; güçlü bir topluluk desteğinin bulunması, uygulamaların düzenli güncellenmesi ve teknolojik gelişmelerle eş zamanlı olarak ilerlemesidir. Ayrıca platform seçimi sırasında, temel gereksinimlerin kurumun ihtiyaçlarına uygunluğu değerlendirilmelidir. Bu süreçte, söz konusu çözümlerin avantajları ile olası dezavantajlarının kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır.

3.6 Yapay Zekâ Entegrasyonu ve Uygulamalar

3.6.1 Öngörücü Bakım

Nesnelerin interneti (IoT) sensörleri ve makine öğrenmesi algoritmalarıyla desteklenen öngörücü bakım, ekipmanlardan toplanan verilerin analiz edilmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, potansiyel arızalar meydana gelmeden önce tahmin edilmekte ve bakım faaliyetleri proaktif biçimde planlanabilmektedir. Böylelikle plansız duruş süreleri en aza indirilirken bakım maliyetleri de önemli ölçüde azaltılmaktadır.

Teknik Uygulama

Öngörücü bakımın teknik altyapısı, birden fazla aşamadan oluşmaktadır:

Veri Toplama: Titreşim, sıcaklık, basınç gibi parametreleri ölçen IoT sensörleri aracılığıyla ekipmanlardan sürekli veri akışı sağlanır.

Yapay Zekâ Modelleri: Zaman serisi tahminleri için LSTM ağları, sınıflandırma için Random Forest ve SVM gibi algoritmalar kullanılabilir.

Anomali Tespiti: İstatistiksel analiz yöntemleri ve makine öğrenmesi tabanlı anomali algılama algoritmalarıyla normal dışı davranışlar belirlenir.

Tahmin Modelleri: Regresyon analizi ve zaman serisi tahminleme yöntemleri kullanılarak arıza olasılığı hesaplanır ve bakım takvimi optimize edilir.

3.6.2 Akıllı Bakım Planlaması

Yapay zekâ destekli bakım planlama sistemleri, ekipmanlardan elde edilen sensör verilerini, geçmiş bakım kayıtlarını ve operasyonel sistemlerden gelen bilgileri bütüncül bir şekilde analiz ederek her ekipman türü için en uygun bakım programlarını oluşturabilmektedir. Bu sistemler, bakım programlarını yalnızca makine koşullarına göre değil; aynı zamanda tedarik zinciri planlaması, üretim programları ve işgücü erişilebilirliği gibi dış faktörlere göre de dinamik biçimde uyarlayabilmektedir.

Bu yaklaşım, bakım faaliyetlerinin daha verimli planlanmasını sağlamakla kalmayıp; aynı zamanda gereksiz bakım maliyetlerini önlemekte, kaynak kullanımını optimize etmekte ve genel operasyonel sürekliliğe katkı sunmaktadır.

4. Bulgular

4.1 Örnek Senaryo 1: Pompa Sistemi Öngörücü Bakım

4.1.1 Sistem Kurulum

Bir petrokimya tesisinde kritik pompa sistemlerinin izlenmesi için açık kaynak akış tabanlı otomasyon sistemi kurulumu:

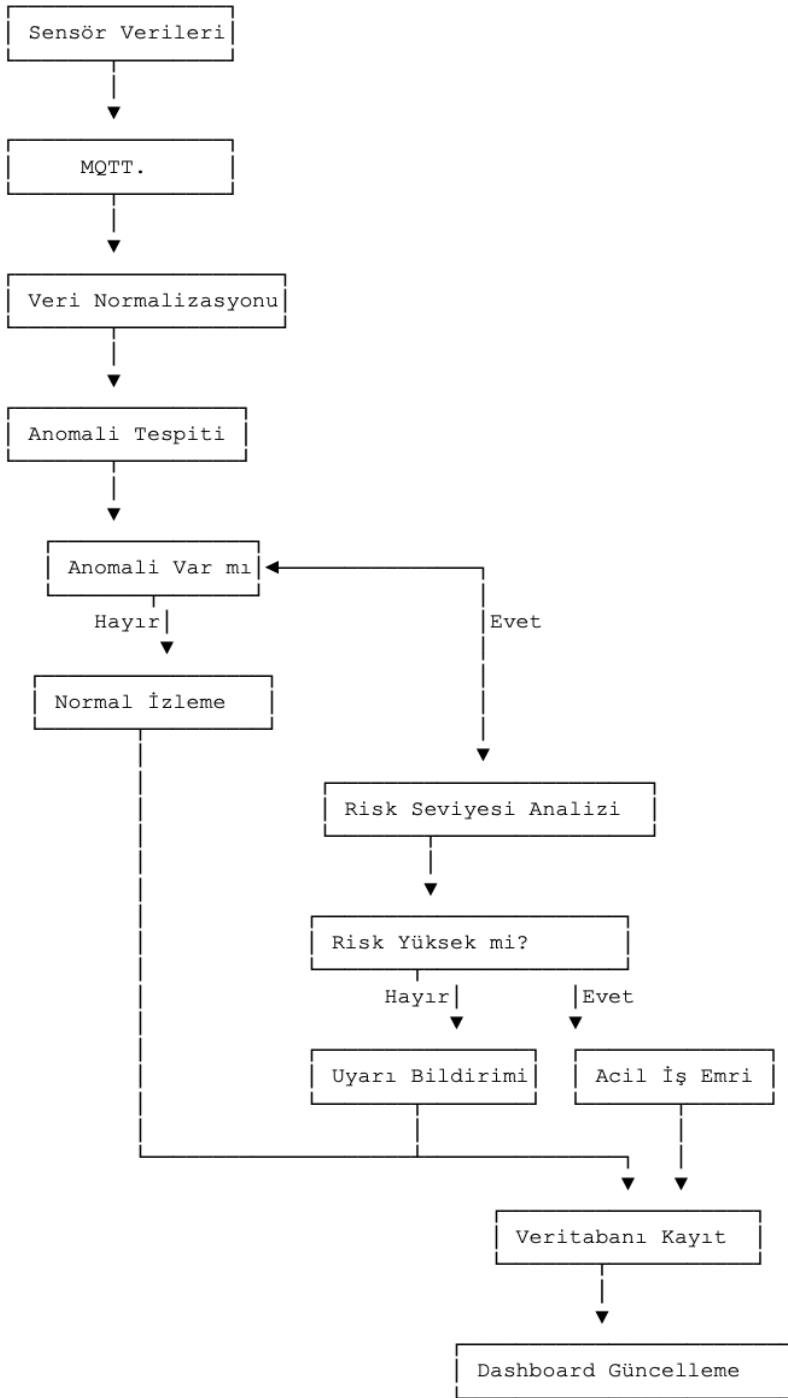
Donanım Katmanı:

- Titreşim sensörleri (3-eksenli accelerometer)
- Sıcaklık probu
- Basınç transmitterleri
- Akım ve voltaj ölçüm modülleri

Yazılım Katmanı:

- MQTT aracı (Eclipse Mosquitto)
- Zaman serisi veritabanı (InfluxDB)
- Makine öğrenimi boru hattı (Python/scikit-learn)
- İş akışı otomasyon motoru

4.1.2 Akış Diyagramı



Şekil 2: Akış Diyagramı

4.1.3 AI Modeli ve Algoritma

Anomali Tespiti için Isolation Forest: Endüstriyel bakım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı yöntemlerin kullanımı, özellikle anomali tespiti ve arıza tahmini alanlarında öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, anomali tespiti için Isolation Forest (Ayrıştırma Ormanı) algoritması tercih edilmiştir.

Isolation Forest, yüksek boyutlu veri kümelerinde anormal örnekleri tespit etmek amacıyla geliştirilmiş bir makine öğrenmesi yöntemidir. Algoritma, veri noktalarını karar ağaçları

(decision trees) yardımıyla rastgele bölerek çalışır. Normal veri noktaları genellikle çok sayıda bölünmeye ihtiyaç duyar; buna karşılık anormal noktalar daha az bölünme sonucunda izole edilebilir. Bu özellik sayesinde, algoritma veri kümesindeki azınlık ve sıra dışı gözlemleri etkin bir şekilde ayırt edebilir.

Anomali tespiti süreci şu adımlardan oluşmaktadır:

Veri Hazırlığı: Sensörlerden toplanan titreşim, sıcaklık, basınç gibi parametreler ön işleme tabi tutulur (gürültü azaltma, normalizasyon).

Model Eğitimi: Isolation Forest modeli, normal operasyon verileri kullanılarak eğitilir.

Anomali Skorlama: Her yeni veri noktası için bir anomali skoru hesaplanır. Skor belirlenen eşik değerini aştığında, ilgili gözlem olası bir arıza belirtisi olarak işaretlenir.

Uyarı Mekanizması: Tespit edilen anomaliler bakım yönetim sistemine bildirilir ve önleyici aksiyon alınması sağlanır.

Isolation Forest, özellikle yüksek hacimli ve sürekli akış halinde gelen IoT verilerinde hızlı çalışabilmesi ve gözetimsiz (unsupervised) öğrenme yaklaşımı sayesinde etiketli veriye ihtiyaç duymamasıyla öne çıkmaktadır. Bu yönüyle, endüstriyel bakım uygulamalarında gerçek zamanlı anomali tespiti için güçlü bir araçtır.

4.1.4 Workflow Konfigürasyonu

Tetikleme Koşulları:

- Anomali skoru < -0.3
- Sıcaklık $> 85^{\circ}\text{C}$
- Titreşim amplitüdü $> \text{normal range } \%20$

Otomatik İşlemler:

- Bakım ekibine bildirim (SMS/E-posta)
- CMMS’de iş emri oluşturma
- Yedek parça envanter kontrolü
- Uzmanlığa göre teknisyen atama
- Geçmiş veri korelasyon analizi

4.1.5 Sonuçlar ve Faydalar

IoT tabanlı öngörücü bakım uygulamaları, endüstriyel üretim süreçlerinde operasyonel sürekliliğin sağlanması ve maliyetlerin azaltılması açısından önemli katkılar sunmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar, bu yaklaşımın makine duruşlarını (downtime) $\%30-50$ oranında azaltabildiğini ve ekipman ömrünü $\%20-40$ oranında uzatabildiğini göstermektedir. Bu araştırma kapsamında geliştirilen senaryo uygulamasında elde edilen bulgular, plansız duruşlarda $\%45$ oranında bir azalma sağlandığını ve bunun üretim sürekliliğine doğrudan katkı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bakım Maliyetlerinde Tasarruf: Optimizasyon sayesinde bakım giderlerinde $\%30$ ’luk bir düşüş elde edilmiştir.

Erken Uyarı Kapasitesi: Sistem, olası arızaları gerçekleşmeden 7–14 gün önceden tahmin edebilmiştir.

Tahmin Doğruluğu: Kullanılan modelin genel doğruluk oranı $\%92$ olarak ölçülmüştür.

Bu sonuçlar, yapay zekâ ve IoT entegrasyonunun yalnızca arıza tahmininde değil, aynı zamanda bakım süreçlerinin daha etkin planlanmasında da kritik bir değer yarattığını göstermektedir. Dolayısıyla öngörücü bakım, endüstriyel işletmeler için hem ekonomik fayda hem de



stratejik rekabet avantajı sağlayan bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

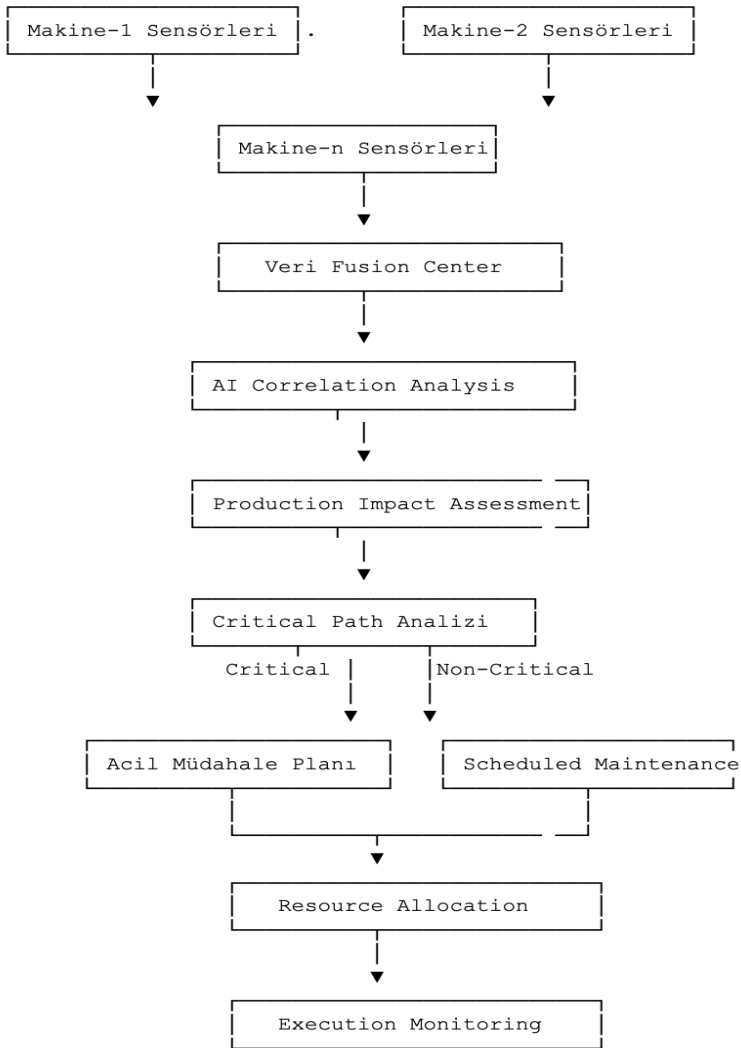
4.2 Örnek Senaryo 2: Üretim Hattı Entegre Bakım Yönetimi

4.2.1 Sistem Mimarisi

Çoklu Ekipman İzleme:

- Konveyör bantlar
- Robot kollar
- CNC tezgahlar
- Paketleme makineleri

4.2.2 Akış Tasarımı



Şekil 3: Akış Tasarımı

4.2.3 Yapay Zekâ Destekli Karar Verme

Korelasyon Analizi Algoritması: Endüstriyel bakımda yapay zekâ tabanlı karar destek sistemleri, büyük ölçekli veri kümelerinden anlamlı bilgilerin çıkarılmasını sağlayarak

yöneticilerin ve mühendislerin daha doğru ve hızlı kararlar almasına imkân tanımaktadır. Bu kapsamda kullanılan yöntemlerden biri de Korelasyon Analizi (Correlation Analysis Algorithm) yaklaşımıdır.

Korelasyon analizi, farklı sensörlerden elde edilen veriler ile ekipman performansı arasındaki ilişkileri inceleyerek bakım kararlarının veri odaklı biçimde şekillendirilmesine olanak tanır. Örneğin, sıcaklık, titreşim ve basınç verileri arasındaki istatistiksel bağıntılar hesaplanarak arızaya giden yolun belirlenmesi mümkündür.

4.2.4 Otomasyon Akışı Detayları

Otomasyon süreci, belirli tetikleyici olaylar ve bu olaylara verilen otomatik yanıtlar üzerinden yürütülmektedir. Bu yapı, bakım faaliyetlerinin sistematik, hızlı ve minimum insan müdahalesi ile gerçekleştirilmesine imkân tanır.

Tetikleyici Olaylar:

- Tekil makinelerde meydana gelen anomaliler,
- Birden fazla makine arasında gözlemlenen korelasyon desenleri,
- Üretim planındaki çakışmalar,
- Kaynak kullanılabilirliğinde yaşanan değişiklikler.

Otomatik Yanıtlar:

- Risk Değerlendirmesi: Makine öğrenmesi tabanlı model, olası arıza ihtimalini hesaplar.
- Etki Analizi: Üretim hattındaki bağımlılıklar incelenerek potansiyel etkiler değerlendirilir.
- Kaynak Kontrolü: Teknik personel uygunluğu ve yedek parça envanteri otomatik olarak kontrol edilir.
- Zamanlama Optimizasyonu: Bakım faaliyetleri, üretim sürecini en az etkileyecek şekilde yeniden planlanır.
- Paydaş Bildirimi: İlgili ekip ve yöneticilere otomatik bilgilendirme yapılır.

Bu yaklaşım, bakım süreçlerinde proaktif karar alma mekanizmalarının işletilmesini sağlamakta hem operasyonel sürekliliği korumakta hem de üretim verimliliğini artırmaktadır.

4.2.5 Performans Metrikleri

ArcelorMittal'ın Avrupa tesislerinde uyguladığı AI destekli öngörücü bakım sistemi, IoT sensörleri ve Google Cloud Platform üzerindeki makine öğrenmesi algoritmaları kullanarak ekipman sağlığını gerçek zamanlı izlemekte ve arızaları 2 hafta önceden tahmin edebilmektedir.

Bu senaryoda elde edilen sonuçlar:

Genel Ekipman Verimliliği: %15 artış

Arıza Arası Ortalama Süre: %35 iyileşme

Birim Başına Bakım Maliyeti: %25 azalma

Acil Onarımlar: %60 azalma

4.3 Örnek Senaryo 3: Enerji Sistemleri Akıllı Bakım

4.3.1 Sistem Özellikleri

İzlenen Sistemler:

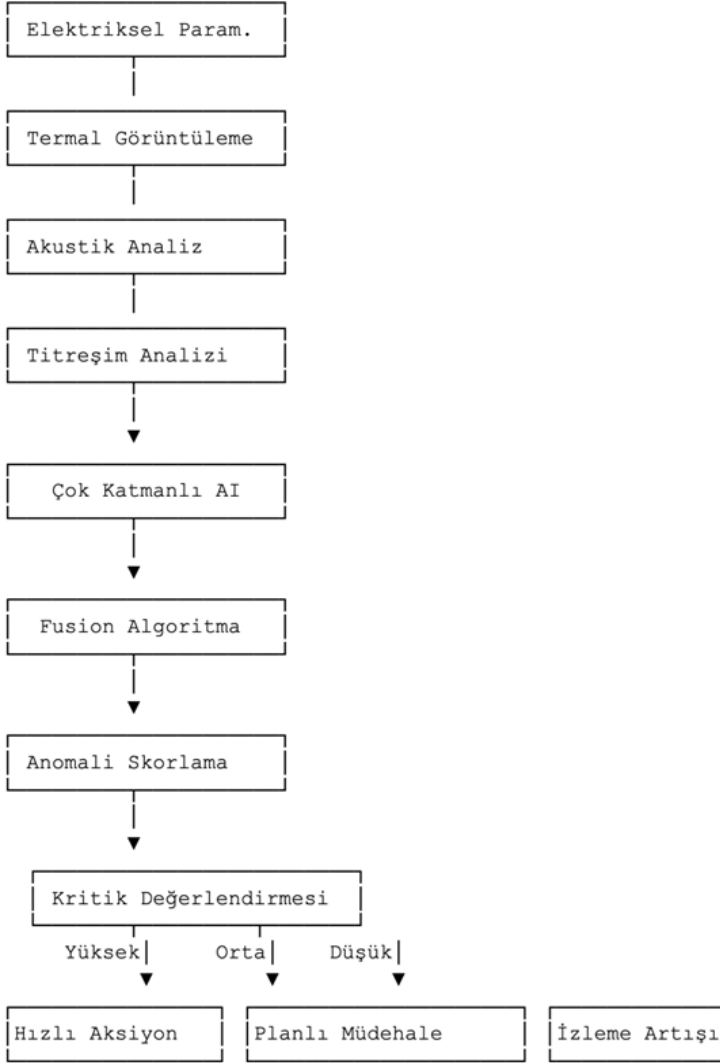
Transformatörler

Güç dağıtım panoları

UPS sistemleri ve Elektrik motorları



4.3.2 Çok Modlu Yapay Zekâ Entegrasyonu



Şekil 4: Çok Modlu Yapay Zekâ Entegrasyonu

4.3.3 Gelişmiş Analitik

Termal Desen Tanıma: Endüstriyel bakım süreçlerinde termal desen tanıma (thermal pattern recognition), ekipmanların ısı dağılımlarının incelenmesine dayalı gelişmiş bir analitik yöntemdir. Termal kameralar ve kızılötesi sensörler aracılığıyla elde edilen veriler, makine bileşenlerindeki olağandışı sıcaklık artışlarını ve düzensizlikleri ortaya çıkararak potansiyel arızaların önceden tespit edilmesini mümkün kılar.

Bu yöntemin işleyişi şu aşamalardan oluşmaktadır:

Veri Toplama: Ekipman yüzeylerinden termal kameralar aracılığıyla sürekli görüntü ve sıcaklık verileri elde edilir.

Görüntü İşleme: Toplanan veriler üzerinde ısı dağılım haritaları çıkarılır ve normal çalışma koşullarına ilişkin referans desenler belirlenir.

Anomali Tespiti: Normalden sapmalar, makine öğrenmesi tabanlı algoritmalar (ör. CNN) ve istatistiksel analiz teknikleriyle tespit edilir.

Tahmin ve Karar Destek: Anormal termal desenler, olası arıza göstergesi olarak değerlendirilir ve bakım yönetim sistemine entegre edilerek proaktif aksiyonların alınmasına imkân tanır.

Termal desen tanıma, özellikle motorlar, elektrik panoları, yataklar, rulmanlar ve yüksek enerji tüketen bileşenlerde erken arıza tespiti için etkili bir yöntemdir. Bu yaklaşım, ekipman ömrünü uzatmanın yanı sıra, enerji verimliliğini artırmakta ve beklenmedik duruşların önüne geçerek bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Akustik İmza Analizi: Makinelerden yayılan ses dalgalarının incelenmesi yoluyla ekipman sağlığının değerlendirilmesini sağlayan gelişmiş bir bakım analitiği yöntemidir. Her makine veya ekipman, çalışma sırasında kendine özgü bir akustik profil (imza) üretir. Normal çalışma koşullarında bu imza istikrarlı bir desen gösterirken, mekanik aşınmalar, gevşek parçalar, hizalama hataları veya rulman arızaları gibi sorunlar akustik desende belirgin değişimlere yol açar.

Yöntemin işleyiş adımları şu şekilde özetlenebilir:

Veri Toplama: Mikrofonlar ve akustik sensörler aracılığıyla ekipmanlardan sürekli ses verileri kaydedilir.

Ön İşleme: Gürültü filtreleme, frekans analizi (FFT) ve sinyal normalizasyonu yapılır.

Özellik Çıkarma: Akustik dalgaların frekans, genlik ve spektral özellikleri belirlenerek karakteristik öznitelikler elde edilir.

Modelleme ve Anomali Tespiti: Makine öğrenmesi yöntemleri (ör. SVM, CNN tabanlı ses sınıflandırıcılar) kullanılarak akustik imzadaki normal dışı desenler tespit edilir.

Karar Destek: Anormal akustik sinyaller, bakım sistemine bildirilerek olası arızalara yönelik proaktif önlemler alınır.

Akustik imza analizi, özellikle rulman arızaları, pompa ve kompresörlerde kavitasyon, dişli kutularındaki aşınmalar ve motor titreşimleri gibi erken aşamada tespit edilmesi güç sorunların belirlenmesinde oldukça etkilidir. Bu yöntem, bakım maliyetlerini azaltmanın yanı sıra iş güvenliği açısından da kritik öneme sahiptir; zira erken dönemde fark edilmeyen ses anomalileri ilerleyen aşamalarda büyük arızalara ve üretim kayıplarına yol açabilmektedir.

4.3.4 Otomatik Yanıt Stratejileri

Enerji sistemlerinde yapay zekâ tabanlı otomasyon, olası anomalilere karşı hızlı ve etkili müdahaleler geliştirmeyi mümkün kılmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen otomatik yanıt stratejileri hem operasyonel sürekliliği korumakta hem de enerji verimliliğini artırmaktadır. Başlıca stratejiler şunlardır:

Yük Dengeleme: Enerji talebinin otomatik olarak yeniden dağıtılması yoluyla sistem dengesinin korunması.

Yedek Sistemlerin Devreye Alınması: Ana sistemde bir arıza veya kesinti meydana geldiğinde, yedek enerji kaynaklarının otomatik olarak aktive edilmesi.



Güç Kalitesi İzleme: Harmonik bozulmalar, voltaj dalgalanmaları ve titreşim analizleri ile enerji kalitesinin sürekli izlenmesi.

Koruyucu Anahtarlama: Arıza riskini en aza indirmek için koruyucu anahtarlama operasyonlarının uygulanması.

4.3.5 Düzenleyici Uygun Entegrasyonu

Enerji sistemlerinde otomasyon yalnızca operasyonel verimliliği değil, aynı zamanda düzenleyici gerekliliklere uyumu da güvence altına almaktadır. Uyum yazılımları (compliance software), tüm prosedürlerin yasal ve standartlara uygun şekilde yürütülmesini sağlamaktadır. Bu kapsamda öne çıkan unsurlar şunlardır:

Güvenlik Standartları: IEC 61511 ve IEC 61508 gibi endüstriyel güvenlik standartlarına uyumun sağlanması.

Çevresel Düzenlemeler: Emisyonların sürekli izlenmesi, raporlanması ve çevre mevzuatına uygunluk.

Denetim İzleri: Tüm operasyonel süreçlerin otomatik olarak belgelenmesi ve kayıt altına alınması.

Düzenleyici Raporlama: Gereken resmi raporların otomatik oluşturulması ve ilgili otoritelere iletilmesi.

Bu entegrasyon sayesinde enerji sistemlerinde yalnızca teknik güvenilirlik değil, aynı zamanda yasal uyumluluk ve sürdürülebilirlik hedefleri de güvence altına alınmaktadır.

5. Tartışma

5.1 Teknolojik Avantajlar ve Faydalar

5.1.1 Operasyonel Faydalar

Üretim akış otomasyonu, çok sayıda ortak üretim kullanım durumunda değer sağlamaktadır: üretim çalışmalarını ve iş sıralamasını otomatik olarak planlama, varlık durumunu izleme ve arıza öncesi bakım ihtiyaçlarını tahmin etme, incelemeyi otomatikleştirme ve kusurları minimize etmek için süreçleri ayarlama.

5.1.2 Nicel Faydalar

Arıza Süresinin Azaltılması:

- Planlanmamış arıza süresi: %30-50 azalma
- Ortalama onarım süresi (MTTR): %40 iyileşme
- Ekipman kullanılabilirliği: %95+ seviyelere çıkış

Maliyet Optimizasyonu:

- Bakım maliyetleri: %12-25 azalma
- Enerji tüketimi: %8-15 tasarruf
- Yedek parça envanteri: %20-30 optimizasyon

5.1.3 Kalite ve Güvenlik İyileştirmeleri

AI destekli kalite kontrol sistemleri, bilgisayarlı görüş (computer vision) ve derin öğrenme (deep learning) algoritmalarını kullanarak kalite kontrol süreçlerini otomatikleştirmektedir. Bu sistemler, insan gözüne görünmez olabilecek kusurları tespit ederek üretim kalitesini önemli ölçüde artırmaktadır.

Güvenlik İyileştirmeleri

Proaktif Risk Yönetimi:

- Güvenlik risklerinin erken tespiti
- Güvenlik protokollerinin otomatik olarak devreye alınması
- Personel güvenlik bildirimleri
- Acil durum müdahalesinin otomasyonu

5.1.4 Sürdürülebilirlik ve Çevre Etkileri

AI, enerji tüketimini optimize etmek için gerçek zamanlı olarak enerji verimsizliği merkezlerini tespit ederek ısıtma, aydınlatma ve diğer sistemleri kontrol etmekte, güç tüketimini azaltmakta ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunmaktadır.

5.2 Gelecek Trendleri ve Gelişmeler

Endüstriyel otomasyon alanında yapay zekâ destekli çözümler, bakım ve operasyon yönetiminde yeni bir dönüşüm dalgasını başlatmaktadır. Siemens'in geliştirdiği Industrial Copilot, doğal dil girdilerini kullanarak otomasyon kodu üretebilen ve özellikle SCL kod geliştirme sürecini hızlandırırken hata oranını minimize eden üretken yapay zekâ tabanlı ilk endüstriyel ürün olarak dikkat çekmektedir. Bu gelişme, bakım ve üretim süreçlerinde kullanıcı dostu arayüzlerin ve akıllı otomasyonun giderek daha fazla öne çıkacağını göstermektedir.

Üretken yapay zekâ (Generative AI), bakım süreçlerinde farklı kullanım alanlarıyla yeni fırsatlar sunmaktadır:

- Otomatik dokümantasyon oluşturma,
- Doğal dil tabanlı bakım talimatlarının üretilmesi,
- Akıllı arıza giderme kılavuzlarının hazırlanması,
- Kullanıcı ihtiyaçlarına uyum sağlayan adaptif arayüzlerin geliştirilmesi.

Dijital ikiz (Digital Twin) teknolojisi, fiziksel sistemlerin dijital ortamda simüle edilmesine ve izlenmesine olanak tanıyarak, gerçek dünyada ortaya çıkmadan önce potansiyel sorunların tahmin edilmesini sağlamaktadır. Bu yaklaşım, ekipman performansının optimize edilmesine, bakım planlarının iyileştirilmesine ve karar alma süreçlerinin daha bilinçli bir şekilde yürütülmesine katkıda bulunmaktadır.

Küresel pazar trendleri, akıllı ve bağlantılı teknolojilere olan talebin hızla arttığını ortaya koymaktadır. Yapılan öngörülere göre, kurumsal IoT'nin toplam pazar gelirlerindeki payı 2023 yılında %70 iken, 2028 yılına kadar %72'ye **yükselmesi** beklenmektedir. Bu değişim, endüstrilerin otomasyonun bir sonraki aşamasına geçmek için daha entegre, veri odaklı ve akıllı çözümlere yatırımlarını artırdığını göstermektedir. Özellikle yapay zekâ, IoT ve dijital ikiz teknolojilerinin birleşimi, endüstriyel bakım ve üretim süreçlerinde verimlilik standartlarını yeniden tanımlayacak stratejik bir dönüşümün temelini oluşturmaktadır.

6. Sonuçlar

Bu çalışma, açık kaynak kodlu akış tabanlı otomasyon sistemlerinin endüstriyel bakım süreçlerinde önemli katkılar sağladığını ortaya koymaktadır. Araştırma bulguları, operasyonel verimlilikte %30–50 oranında duruş azalması ve bakım maliyetlerinde %25'e varan tasarruf elde edilebildiğini göstermektedir. Ayrıca proaktif bakım stratejileri sayesinde ekipman ömrünün uzatılması, açık kaynak çözümlerin sağladığı esneklik ile birlikte teknolojik uyum kolaylığı ve hem sermaye giderleri (CAPEX) hem de faaliyet giderleri (OPEX) açısından



maliyet optimizasyonu öne çıkan faydalar arasında yer almaktadır. Bu bulgular, açık kaynak temelli dijital bakım çözümlerinin yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda stratejik avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Uygulama açısından değerlendirildiğinde, başarılı bir entegrasyonun kademeli bir yol haritası (pilot projeler, model geliştirme, kurumsal ölçekte yayılım ve ileri analitik optimizasyon) üzerinden ilerlemesi önerilmektedir. Sürecin başarısı ise üst yönetimin desteği, fon tahsisi, disiplinler arası ekiplerin iş birliği, kademeli eğitim ve değişim yönetimi ile sürekli iyileştirme kültürünün yerleşmesine bağlıdır. Bu bağlamda, yapay zekâ destekli bakım sistemlerinin yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda kurumsal dönüşümün bir unsuru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Gelecek araştırmalar açısından ise dağıtık öğrenme (federated learning) yaklaşımıyla dağıtık yapay zekâ modellerinin geliştirilmesi, açıklanabilir AI yöntemleri ile karar süreçlerinin şeffaflaştırılması, otonom bakım sistemleri *üzerinde çalışmalar yapılması ve sürdürülebilirlik odaklı bakım optimizasyonu kritik odak alanları olarak öne çıkmaktadır. 2025 ve sonrasında, yapay zekânın otomasyon teknolojileriyle bütünleşmesi yalnızca duruş zamanını azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda endüstriler arası inovasyonun kapılarını aralayarak üretim verimliliğinde yeni standartların oluşmasına katkı sağlayacaktır.*

Araştırmacıların Katkısı

Bu makale, Alindair Soğutma Sistemleri A.Ş. Bilgi Teknolojileri Müdürü ve ERP Uzman Yardımcısı tarafından hazırlanmıştır. Yazarlar, firmanın dijital dönüşüm sürecinde açık kaynak kodlu otomasyon sistemleri ve yapay zeka tabanlı yazılım projelerinin geliştirilmesinde aktif olarak görev almışlardır. Çalışmada yer alan yazılımlar, firma bünyesinde geliştirilmiş, saha ortamında test edilmiş ve edilmeye devam etmektedir. Araştırmacılar, hem yazılım geliştirme süreçlerinde hem de saha testlerinden elde edilen verilerin sistematik biçimde toplanması, analiz edilmesi ve raporlanmasında etkin rol üstlenmişlerdir. Böylece, teorik altyapı ile pratik uygulamalar birleştirilerek çalışmanın bilimsel katkısı güçlendirilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde bizlere destek olarak değerli katkılar sunan Alindair Soğutma Sistemleri A.Ş.'ye teşekkür ederiz. Ayrıca, kongrede yapmış olduğumuz çalışmalarını sunma imkânı sağlayan Makina Mühendisleri Odası'na şükranlarımızı sunarız.

Dijitalleşmenin, modern bakım teknolojilerinde yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesine ve endüstriyel verimliliğin artırılmasına olan katkısının bilinciyle bu çalışmanın literatüre fayda sağlaması en büyük temennimizdir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

Kaynaklar

Accelirate. (2024, August 14). Top 10 use cases & benefits of RPA in manufacturing. *Accelirate*. <https://www.accelirate.com/rpa-in-manufacturing-industry/>

Activepieces. (n.d.). Top 10 open source workflow automation tools in 2025. *Activepieces*. <https://www.activepieces.com/blog/top-10-open-source-workflow-automation-tools-in-2024>

Airbyte. (2025, March 21). 10 best open-source workflow automation software in 2025. *Airbyte*. <https://airbyte.com/top-etl-tools-for-sources/open-source-workflow-automation-software>

Atlassian. (n.d.). 11 workflow examples & use cases [2024]. *Atlassian*. <https://www.atlassian.com/agile/project-management/workflow-examples>

Automation.com. (2025, July). Predictive maintenance with IoT and AI. *Automation.com*. <https://www.automation.com/en-us/articles/july-2025/predictive-maintenance-iot-ai-equipment>

Automation.com. (2025, August). Solving industrial machine health challenges at the edge. *Automation.com*. <https://www.automation.com/en-us/articles/august-2025/solving-industrial-machine-health-challenges-edge>

Capella Solutions. (n.d.). Manufacturing workflow automation: The future of smart factories. *Capella Solutions*. <https://www.capellasolutions.com/blog/manufacturing-workflow-automation-the-future-of-smart-factories>

Cigniti Technologies. (2024, September 30). 5 use cases of intelligent automation transforming the manufacturing industry. *Cigniti*. <https://www.cigniti.com/blog/5-intelligent-automation-use-cases-manufacturing/>

Cloud4C. (n.d.). Intelligent automation in manufacturing: 10 use cases. *Cloud4C*. <https://www.cloud4c.com/blogs/intelligent-automation-powered-manufacturing-top-10-use-cases>

Fingent. (2024, October 28). AI applications in manufacturing: Use cases & examples. *Fingent*. <https://www.fingent.com/blog/ai-applications-in-manufacturing-use-cases-examples/>

IIoT World. (2025, May 19). The rise of industrial AI: Automation trends to watch in 2025. *IIoT World*. <https://www.iiot-world.com/artificial-intelligence-ml/artificial-intelligence/industrial-ai-trends-2025/>

Industrial Automation India. (2025, January 4). Top industrial automation trends for 2025: AI, IoT, and smart manufacturing innovations. *Industrial Automation India*. <https://www.industrialautomationindia.in/articles/industrial-automation-trends-2025-ai-ml-smart-manufacturing>

Insight Ace Analytic. (n.d.). AI in industrial automation market demanding trends analysis



2025-2034. *Insight Ace Analytic*. <https://www.insightaceanalytic.com/report/ai-in-industrial-automation-market/2739>

L2L. (2025, January 20). 6 applications of AI in maintenance management. *L2L*. <https://www.l2l.com/blog/ai-in-maintenance>

MaintainX. (2025, May 28). Guide to effective maintenance workflow automation. *MaintainX*. <https://www.getmaintainx.com/blog/guide-to-effective-maintenance-workflow-automation>

Medium. (2024, November 27). Top 10 open-source workflows projects with the most GitHub stars. *Medium*. <https://medium.com/@nocobase/%EF%B8%8F-top-10-open-source-workflows-projects-with-the-most-github-stars-nocobase-28e216e09cc8>

Medium. (2025, April 11). AI in industrial automation: How AI is transforming industries. *Medium*. <https://medium.com/@eastgate/ai-in-industrial-automation-how-ai-is-transforming-industries-d908c6429884>

NocoBase. (n.d.). 5 best tools for building workflow automation. *NocoBase*. <https://www.nocobase.com/en/blog/workflow-automation-tools>

n8n. (n.d.). AI workflow automation platform & tools. *n8n*. <https://n8n.io/>

PIPEFORCE. (2024, March 7). Workflow automation: 4 open source alternatives. *PIPEFORCE*. <https://pipeforce.io/en/workflow-automation-4-open-source-alternatives/>

Pneumatic. (n.d.). Open-source workflow management. *Pneumatic*. <https://www.pneumatic.app/>

Pyramid Solutions. (2021, July 6). 101 use cases for workflow automation. *Pyramid Solutions*. <https://pyramidsolutions.com/enterprise-content-management/101-use-cases-for-workflow-automation/>

Redwood. (2024, November 20). What is workflow automation? Benefits and examples. *Redwood*. <https://www.redwood.com/article/workflow-automation-management/>

Rockwell Automation. (2025, February 25). 8 key industrial automation trends in 2025. *Rockwell Automation*. <https://www.rockwellautomation.com/en-us/company/news/the-journal/8-key-industrial-automation-trends-in-2025.html>

Siemens. (n.d.). Siemens introduces AI agents for industrial automation. *Siemens*. <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-introduces-ai-agents-industrial-automation>

Southwest MT Series. (n.d.). Four use cases for intelligent automation in manufacturing. *Southwest MT Series*. <https://southwest.mtseries.com/news/4-use-cases-intelligent-automation-in-manufacturing/>

TRACTIAN. (n.d.). Artificial intelligence (AI) in the maintenance industry. *TRACTIAN*. <https://traction.com/en/blog/ai-maintenance-industry>

Wexflow. (n.d.). Open source workflow engine. *Wexflow*. <https://wexflow.github.io/>

Windmill. (n.d.). Open-source developer platform and workflow engine. *Windmill*. <https://www.windmill.dev/>



Environmental Surface Cleaning Techniques for Maintenance Applications

Fatih Hayati ÇAKIR ¹

¹Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir Vocational School,
Eskişehir, Turkey
e-mail: fcakir@ogu.edu.tr

Abstract:

This paper reviews advanced and environmentally friendly surface cleaning techniques for maintenance applications across industries. Traditional methods such as chemical cleaning and abrasive blasting often have detrimental environmental impacts. Therefore, this study explores alternative methods like laser cleaning, dry ice blasting, ultrasonic cleaning, nutshell blasting, and plastic media blasting. The paper evaluates their effectiveness, operational costs, environmental impact, and suitability for various maintenance scenarios. Key challenges and future research opportunities are also discussed to guide sustainable practices.

Keywords: Cleaning; Grid Blasting; Maintenance; Surface Cleaning,

1. Introduction

Effective surface cleaning is a critical step in maintenance operations, ensuring optimal performance, longevity, and safety of components. However, conventional cleaning techniques often involve hazardous chemicals or produce significant waste, leading to environmental concerns. Furthermore, cleaning older parts presents unique challenges, as their surfaces may be more prone to damage or may have accumulated residues that are difficult to remove. These difficulties are compounded by the need to balance cleaning efficacy with the preservation of component integrity. Traditional cleaning methods pose significant risks, such as the degradation of sensitive materials, and contribute to environmental pollution through hazardous chemical discharge and particulate emissions. As global industries move toward more sustainable practices, the need for effective, eco-friendly cleaning solutions becomes increasingly urgent.

This paper aims to: Highlight the environmental impacts of traditional cleaning methods, Review advanced techniques like laser cleaning, dry ice blasting, ultrasonic cleaning, nutshell blasting, and plastic media blasting. Provide a comparative analysis of these methods in terms of performance, cost, and sustainability.

2. Traditional Surface Cleaning Techniques

2.1 Chemical Cleaning

Chemical cleaning involves the use of solvents and detergents to remove contaminants. While effective, these chemicals can be toxic, leading to air, water, and soil pollution if not managed properly. Frequently used hazardous cleaning agents include trichloroethylene, perchloroethylene, and hydrochloric acid, which are known for their environmental and health risks. Additionally, incomplete removal of cleaning chemicals can pose significant risks to sensitive components such as gaskets and plastics. Residual chemicals may degrade these materials over time, compromising their integrity and functionality. Careful rinsing and drying processes are essential to prevent such issues [1].

2.2 Abrasive Blasting

Abrasive blasting uses materials like sand or grit to remove dirt and coatings. Common abrasives include steel grit, aluminum oxide, and ceramic beads. Steel grit is durable and aggressive, suitable for heavy-duty cleaning, while ceramic beads are often used for precision applications. Though efficient, abrasive blasting generates significant particulate matter and poses health risks to operators. Additionally, the use of hard particles can cause substrate damage, especially on delicate surfaces. The embedding of abrasive materials into the surface is another potential issue [2], which may lead to contamination or adversely affect subsequent processes such as painting or coating. Careful selection of abrasive material and process parameters is crucial to mitigate these risks.

3. Advanced Environmental Cleaning Techniques

3.1 Laser Cleaning

Laser cleaning uses focused laser beams to vaporize contaminants without damaging the substrate. Advantages include precision and control, No secondary waste generation, Applicability to delicate and complex surfaces [3]. Challenges include high equipment costs and power consumption. Typical laser powers range from 50 to 1000 watts, depending on the application of cleaning. While effective against rust, oxides, and organic contaminants, laser cleaning may struggle with thick grease or heavy tar layers. It is less effective on transparent contaminants due to their low absorption of laser energy. Since the laser cleaning is based on the heating of surface contaminants which lowers the bonding of contaminants and surface.

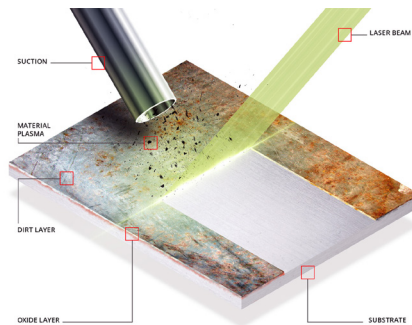


Figure 1 Laser Cleaning schematic [4]

3.2 Dry Ice Blasting

Dry ice blasting uses compressed air to propel dry ice pellets at high speeds, effectively removing contaminants. Key benefits are the process is non-toxic and residue-free, it is environmentally friendly as CO₂ sublimates without generating waste [5]. However, the method is relatively expensive due to the cost of dry ice production and storage. Equipment setup can also be costly, making it less feasible for smaller operations. Despite these limitations, dry ice blasting is highly effective for delicate surfaces like electrical components.



Figure 2 Use of Dry ice in Cleaning Purposes [6] "container-title": "ics-dryice.com", "title": "ICS", "URL": "https://www.ics-dryice.com/en/news/223/safe-way-of-electrical-equipment-maintenance", "author": [{"family": "Frio.sk", "given": ""}], "accessed": {"date-parts": [{"2025", 1, 20}]}, "schema": "https://github.com/citation-style-language/schema/raw/master/csl-citation.json"

3.3 Ultrasonic Cleaning

Ultrasonic cleaning immerses objects in a liquid bath where high-frequency sound waves create cavitation bubbles that dislodge contaminants. It offers uniform cleaning, even in hard-to-reach areas, Low environmental impact due to reduced chemical use [7]. Generic applications include cleaning medical instruments, electronic components, and precision mechanical parts. However, the process is limited by the size of the cleaning tank, which restricts the size of the parts that can be cleaned. Larger components may require alternative methods or specialized equipment. Nevertheless the method is generally preferred as a final cleaning operation after other cleaning methods prior to component installation.



Nutshell blasting uses crushed nutshells as an abrasive medium. Nutshell blasting uses crushed nutshells as an abrasive medium. Origins of nutshell abrasives include walnut, pecan, and other tree nuts, which are processed into fine granules. Advantages include: Biodegradability and non-toxic properties. Gentle cleaning suitable for delicate surfaces such as wood, soft metals, and historical artifacts. Specific applications include paint stripping, especially for aerospace and automotive components where minimal surface damage is critical [9]. Recommended blasting speeds range from 10 to 20 meters per second, with a typical consumption rate of 2 to 5 kilograms per minute, depending on the nozzle size and application. To reduce dust generation, nutshell abrasives can be mixed with water or other fluids, creating a slurry that enhances safety and reduces airborne particles. Used nutshells, once contaminated, may be repurposed into biofuel pellets or compost.

Plastic media blasting involves the use of plastic particles to clean surfaces. Benefits include minimal substrate damage, reusability of plastic media, reducing waste. Compared to nutshell or sandblasting, plastic media blasting is gentler and more suitable for cleaning composite materials and soft metals. It is also effective for removing coatings without altering the underlying geometry. However, plastic media are less effective on heavy rust or thick contaminants [10]. Plastic media can be produced from recycled materials, such as post-industrial or post-consumer plastics, enhancing their environmental benefits.

Recycled ground materials, such as crushed glass or ground rubber, offer eco-friendly alternatives for blasting. These materials are effective for applications like rust removal and surface texturing. Hybrid approaches, such as combining blasting with chemical pre-treatment or ultrasonic



cleaning, can enhance efficiency. For instance, blasting can remove heavy contaminants, while ultrasonic cleaning ensures residue-free surfaces.

4. Comparative Analysis

The table below summarizes the key characteristics of the reviewed techniques:

Table 1 Summary of the reviewed techniques

Technique	Environmental Impact	Effectiveness	Cost	Applications
Laser Cleaning	Minimal	High	High	Aerospace, Automotive
Dry Ice Blasting	Minimal	Moderate to High	Moderate	Industrial, Food Processing
Ultrasonic Cleaning	Low	High	Moderate to High	Medical, Electronics
Nutshell Blasting	Low	Moderate	Low to Moderate	Historical, Precision Cleaning
Plastic Media Blasting	Moderate	Moderate	Moderate	Aerospace, Automotive
Recycled Materials	Low	Moderate	Low	Industrial, Rust Removal

5. Challenges and Future Directions

In recent years, there has been a growing emphasis on the development and implementation of environmentally friendly surface cleaning techniques for maintenance applications. These methods aim to reduce the environmental impact, improve sustainability, and ensure worker safety while maintaining high operational standards. However, several challenges and areas for future development remain. This paper explores the key challenges faced in implementing such technologies and highlights the future directions needed to overcome them.

Difficulty in providing environmentally friendly compounds One of the primary challenges in adopting environmentally friendly cleaning techniques is the difficulty in sourcing and formulating compounds that meet both environmental standards and operational efficiency. Traditional cleaning agents often contain harsh chemicals that are effective but harmful to the environment. Finding alternatives that are effective yet sustainable requires ongoing research and development. Another aspect is lack of operational expertise. The transition to eco-friendly cleaning methods often demands specialized knowledge and expertise to ensure the effectiveness of these methods. Many organizations struggle with the lack of skilled personnel who understand the nuances of these new technologies. The reliance on operational experts to ensure proper implementation and maintenance of these techniques is crucial for their success.

Reliability of methods Ensuring the reliability and consistency of environmentally friendly cleaning techniques can be challenging. Standardized protocols and testing methods need to

be developed to validate the effectiveness of these methods over time and across different applications. Without a thorough understanding of long-term performance, organizations may hesitate to adopt newer technologies.

Cost of technology access The adoption of innovative cleaning technologies often requires significant investment in equipment, training, and research. Small and medium enterprises (SMEs) may find it difficult to afford the cost of technology upgrades, which creates a barrier to widespread adoption. Cost-effective solutions need to be explored to make these technologies accessible to a broader range of industries.

Research and development Continued research into the development of sustainable cleaning compounds and methods is essential. Collaborative efforts between industry, academia, and research institutions will help bridge the knowledge gap and facilitate the creation of advanced, environmentally friendly solutions. To overcome the challenge of operational expertise, targeted training programs and certification courses for professionals are necessary. These programs should focus on practical knowledge of the latest eco-friendly techniques and ensure the workforce is equipped to manage and maintain these technologies effectively.

Standardization and testing protocols The development of standardized testing methods and evaluation criteria for environmentally friendly cleaning techniques will ensure their reliability and effectiveness. This will provide a basis for consistent performance across different industries and applications.

Cost optimization and accessibility Efforts should be made to optimize the cost of implementing environmentally friendly cleaning technologies. Encouraging partnerships, subsidies, and financial support mechanisms can help industries access advanced technologies without compromising financial sustainability.

In conclusion, while there are significant challenges associated with the adoption of environmentally friendly surface cleaning techniques, a multifaceted approach involving research, expert training, and cost-effective solutions will pave the way for a more sustainable future in maintenance applications.

6. Conclusion

Advanced environmental surface cleaning techniques offer promising alternatives to traditional methods. By adopting these sustainable practices, industries can achieve effective maintenance while minimizing their environmental footprint. Collaboration among researchers, manufacturers, and policymakers is essential to drive innovation and widespread adoption. Hybrid approaches, such as combining blasting with chemical pre-treatment or ultrasonic cleaning, can enhance efficiency. For instance, blasting can remove heavy contaminants, while ultrasonic cleaning ensures residue-free surfaces.



References

- [1] S. Korga, K. Żyła, and J. Józwiak, ‘Analysis of the Abrasive-Type Influence on the Effectiveness of Rotary Cleaning of Machine Parts with Complex Geometric Features’, *Materials*, vol. 13, no. 22, p. 5144, Nov. 2020, doi: 10.3390/ma13225144.
- [2] F. H. Cakir, A. Sert, O. N. Celik, and N. Dereoglu, ‘Maintenance Error Detection Procedure and A Case Study of Failure Analysis Locomotive Diesel Engine Bearings’, *J. Fail. Anal. Prev.*, Feb. 2018, doi: 10.1007/s11668-018-0415-7.
- [3] M. Omkumar and R. Saravanan, ‘Laser Cleaning and Its Advancements’, in *Laser-Assisted Machining*, 1st ed., S. Kurnar and P. Chatterjee, Eds., Wiley, 2024, pp. 447–459. doi: 10.1002/9781394214655.ch26.
- [4] stig@p-laser.com, ‘How does laser cleaning work?’ Accessed: Jan. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.p-laser.com/services/the-technology>
- [5] V. Máša, D. Horňák, and D. Petrilák, ‘Industrial use of dry ice blasting in surface cleaning’, *J. Clean. Prod.*, vol. 329, p. 129630, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129630.
- [6] Frio.sk, ‘ICS’, ics-dryice.com. Accessed: Jan. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.ics-dryice.com/en/news/223/safe-way-of-electrical-equipment-maintenance>
- [7] F. J. Fuchs and J. D. Kramlick, ‘Ultrasonic cleaning’, in *Power Ultrasonics*, Elsevier, 2023, pp. 455–471. doi: 10.1016/B978-0-12-820254-8.00019-1.
- [8] ‘Industrial and Commercial Ultrasonic Cleaners of Choice’, Omegasonics. Accessed: Jan. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.omegasonics.com/>
- [9] I. Zulkarnain *et al.*, ‘Sustainability-Based Characteristics of Abrasives in Blasting Industry’, *Sustainability*, vol. 13, no. 15, p. 8130, Jul. 2021, doi: 10.3390/su13158130.
- [10] Ü. Üner, S. Orak, and M. A. Sofuoğlu, ‘Effect of plastic media blasting method on mechanical properties of Al 2024-T6 alloy’, *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 10, pp. 4559–4564, Oct. 2016, doi: 10.1007/s12206-016-0926-7.

Generatör Hava Aralığı Ölçümüyle Eksen Kaçıklığının Belirlenmesi

Detection of Generator Static Eccentricity Using Air Gap Measurements

Emre ORHON¹

¹ Voce Danışmanlık / İzmir, ORCID No : <http://orcid.org/0009-0009-8021-7915>

DOI : <http://dx.doi.org/10.31796/ogummf.xxxxxx>

e-posta : emre.orhon@voceltd.com

Özet

Bu çalışmada, Karakaya Hidroelektrik Santralında revizyondan çıkan üniteye yaşanan yüksek titreşimlerin kaynağının belirlenmesine yönelik bir vaka analizi yer almaktadır. Üniteye mevcut bulunan vibrasyon ve hava aralığı izleme sistemindeki verilerin analizi ile, ikaz geriliminin verilmesi ve kesilmesi anlarında yaşanan yüksek titreşimlerin sebebinin, rotor ve statorun eş merkezli olmamasından kaynaklanan manyetik dengesizlik sonucu oluşan kuvvetler nedeniyle rotorun hava aralığının düşük olduğu yöne doğru hareket etmesi olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hava aralığı, Titreşim, Generatör, Durum izleme, Hidroelektrik

Abstract

This study presents a case study to determine the source of high vibrations experienced in a unit undergoing revision at the Karakaya Hydro Power Plant. Analysis of data from the unit's vibration and air-gap monitoring system reveals that the high vibrations experienced during the application and interruption of the excitation voltage are due to magnetic imbalance forces resulting from the rotor and stator not being concentric resulting the rotor moving in the direction of the lower air gap.

Keywords: Air Gap, Vibration, Generator, Condition Monitoring, Hydropower



1. Giriş

Büyük hidroelektrik makinalarda stator ve rotor, çalışma koşullarındaki merkezkaç kuvvetleri, ısı ve manyetik kuvvetler nedeniyle şekil değişimine yatkındır. Stator ve rotorda oluşabilecek dış merkezlilik (eksantrisite), çembersellikten sapma gibi sorunlar üretim verimini düşüreceği gibi, manyetik kökenli ısınmaların yol açtığı arızalara neden olabilmekte ve rotor kutuplarının stator duvarına çarpması gibi büyük hasarlara sebebiyet verebilecek boyutlara ulaşabilmektedir. Hava aralığının sürekli olarak izlenerek farklı çalışma koşullarında ne şekilde değiştiğinin gözlenmesi, büyük hasarların önüne geçebilmek için makinayı servis harici etmek üzere makina operatörlerine gerekli bilgiyi sağlamakta ve hava aralığındaki anormalliklerin önceden belirlenmesi sayesinde durum bazlı erken uyarıcı bakıma imkan tanımaktadır.

2. Hava Aralığı Ölçümü Hakkında Bilgiler

2.1. Hava Aralığı Nedir?

Generatörlerde, rotor dış çapı ile generatör iç çapı arasındaki mesafe “hava aralığı” (Air Gap) olarak adlandırılır. Sargıların bulunduğu stator duvarı ile kutuplar arasında çevresel olarak üniform olan bir hava aralığı mevcuttur.

2.2. Niçin Ölçülüp İzlenmelidir?

Büyük hidroelektrik makinalarda stator ve rotor, çalışma koşullarındaki merkezkaç kuvvetleri, ısı ve manyetik kuvvetler nedeniyle şekil değişimine yatkındır. Stator ve rotorda oluşabilecek dış merkezlilik (eksantrisite), çembersellikten sapma gibi sorunlar üretim verimini düşüreceği gibi, manyetik kökenli ısınmaların yol açtığı arızalara neden olabilmekte ve rotor kutuplarının stator duvarına çarpması gibi büyük hasarlara sebebiyet verebilecek boyutlara ulaşabilmektedir. Hava aralığının sürekli olarak izlenerek farklı çalışma koşullarında ne şekilde değiştiğinin gözlenmesi, büyük hasarların önüne geçebilmek için makinayı servis harici etmek üzere makina operatörlerine gerekli bilgiyi sağlamakta ve hava aralığındaki anormalliklerin önceden belirlenebilmesi sayesinde durum bazlı erken uyarıcı bakıma imkan tanımaktadır.

2.3. Hava Aralığı Ölçümü İle Ne Tür Sorunlar Teşhis Edilebilir?

Rotor problemleri:

- Kutupların konumlarında değişim
- Rotor çemberinde gevşeklik
- Rotor çemberindeki deformasyon
- Rotor dönme merkezinde kaçıklık

Stator problemleri:

- Betonda genleşmeler (Alkali agrega reaksiyonu)
- Stator ankraj cıvatalarının ısı genleşmeye izin vermemesi
- Stator çekirdeği ve çerçevesinin ayrışması

Hava aralığı sensörlerinden elde edilen çıktılar vibrasyon izleme sisteminin çıktıları ile birlikte yorumlandığında makinanın dinamik davranışı hakkında bütünsel bir kavrayış elde edilebilir.

2.4. Nasıl Ölçülür?

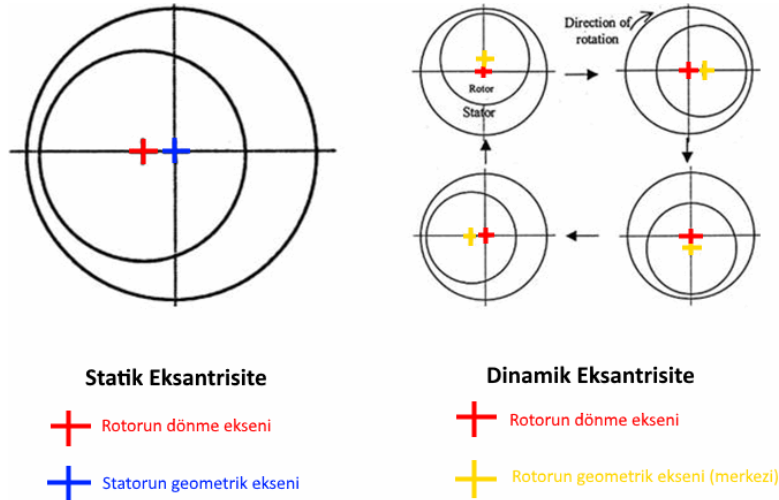
Hava aralığı, stator iç duvarına bir veya birden fazla düzleme yerleştirilen çeşitli sayıda kapasitif sensörlerle ölçülmektedir. Her bir rotor kutbu ile sensör arası mesafe devir tetiklemeli ölçümler vasıtası ile takip edilebilmektedir. Bu sayede minimum hava aralığı değerinin yanısıra rotor şekli grafiği çıkarılabilmektedir. Çoklu hava aralığı sensörlerinden alınan veriler doğrultusunda stator şekli grafiği de elde edilebilmektedir.

2.5. Dış Merkezlilik (Eksantrisite) Durumu ve Hava Aralığına Etkisi

Rotor ve statordaki problemler “statik” ve “dinamik” eksantrisite olmak üzere iki şekilde ortaya çıkar.

Statik eksantrisite, rotorun dönme eksenini ile statorun merkezinin çakışmaması şeklinde tanımlanmaktadır. Rotorun statorun bir tarafına daha yakın olması durumudur. Bu durumda rotor dönerken hava aralığı dinamik olarak değişmemektedir, sabit bir eksantrisite olmaktadır. Bu sebeple buna “statik eksantrisite” denmektedir.

Diğer bir durum ise “dinamik eksantrisite” olarak adlandırılır ve rotorun dönme eksenini ile yine rotorun kendi geometrik ekseninin çakışmaması durumudur. Rotor dönerken eksantrik dönmektedir ve stator duvarının iç kısmındaki tek bir noktadan bakıldığı zaman her turda bir rotorun stator duvarına yaklaşıp uzaklaşması gözlenmektedir. Bu yaklaşıp uzaklaşmanın yer değişimi genlik-zaman grafiği sinüsoidal niteliktedir. Yataklarda yapılan titreşim ölçümünde tıpkı balanssızlıktaki gibi devir hızındaki frekans bileşeninde baskın titreşimler görülecektir.



Şekil 1. Generatörlerde statik ve dinamik eksantrisite.

Şekil 1’de statik ve dinamik eksantrisite arasındaki fark görünmektedir. Soldaki büyük grafik statik eksantrisiteyi göstermektedir; rotorun dönme merkezi stator merkezine göre kaçık durumdadır. Tek bir hava aralığı sensöründen bakıldığında hava aralığı tek tur boyunca sabit kalmaktadır. Her bir sensörün okuduğu değer farklıdır, ancak tur boyunca değişmemektedir. Sağdaki dört grafik ise dinamik eksantrisite durumunda bir turda rotorun ne şekilde davrandığını göstermektedir. Tek bir hava aralığı sensöründen bakıldığında bir tur boyunca hava aralığı azalır artmaktadır, yani dinamik bir değişim söz konusudur.



Hidroelektrik generatörlerin ilk montajında veya yıllar sonra yapılan büyük revizyonlarda “statik eksantrisite” durumu iki ana pratik sebepten ötürü oluşabilir:

1 – Generatör kılavuz yatakları montaj sırasında bir tarafa doğru kayık monte edilmiştir ve bundan ötürü rotorun dönme merkezi statorun geometrik merkezinden uzaklaşmış ve eksantrisite oluşmuştur.

2 – Stator revizyonunda sargı paketlerinin değişimleri yapılırken, stator çemberinin merkezi ile rotor çemberinin merkezinin çakışması sağlanamamıştır. Yani rotor ile stator arası dış merkezlik (eksantrisite) oluşmuştur.

Santral yaşlandıkça ünitenin bağlı bulunduğu betonda oluşabilecek alkali agrega reaksiyonu gibi nedenlere bağlı genleşme ve çatlamlar da statorun şeklini etkileyeceği için statik eksantrisiteye sebebiyet verecektir.

Statik eksantrisiteden ötürü generatörde oluşan manyetik dengesizlik, ikazlama geriliminin artışı ile birlikte shaftın manyetik kuvvetlerce hava aralığının düşük olduğu tarafa doğru çekilmesine sebebiyet vermektedir [2]. Bu nedenle yataklara aşırı yük binebilmekte, ikaz kısmında eksantrisite nedeniyle sürtmeler yaşanabilmektedir. Shaftın bir yöne kayması nedeniyle generatör yataklarında bulunan izafi shaft titreşimi sensörleri de shafta sürterek hasar görebilmektedirler.

Dinamik eksantrisite ise; rotor kutuplarının yerel ısı genleşmeler veya mekanik gevşeklik/kırılmalar nedeniyle yerlerinden oynaması, rotor çerçevesinin gevşekliği veya deformasyonu, shaft ile rotorun eş merkezli olmamasından ötürü oluşabilir. Her iki durum da ünite enerji üretim veriminin düşmesine neden olmaktadır.

3. Yöntem

Karakaya HES Ünite 1’in devreye alma sırasında yüksek titreşimden servis dışı kaldığı bildirilmiş, tarafımızdan inceleme ve analiz raporu talep edilmiştir. Ünite kurulu bulunan mevcut durum izleme sistemine tarafımızca uzaktan bağlanılarak Generatör Hava Aralığı, İzafi Shaft Titreşimleri ve Mutlak Yatak Titreşimleri incelenmiştir.

Mevcut durum izleme sistemi aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

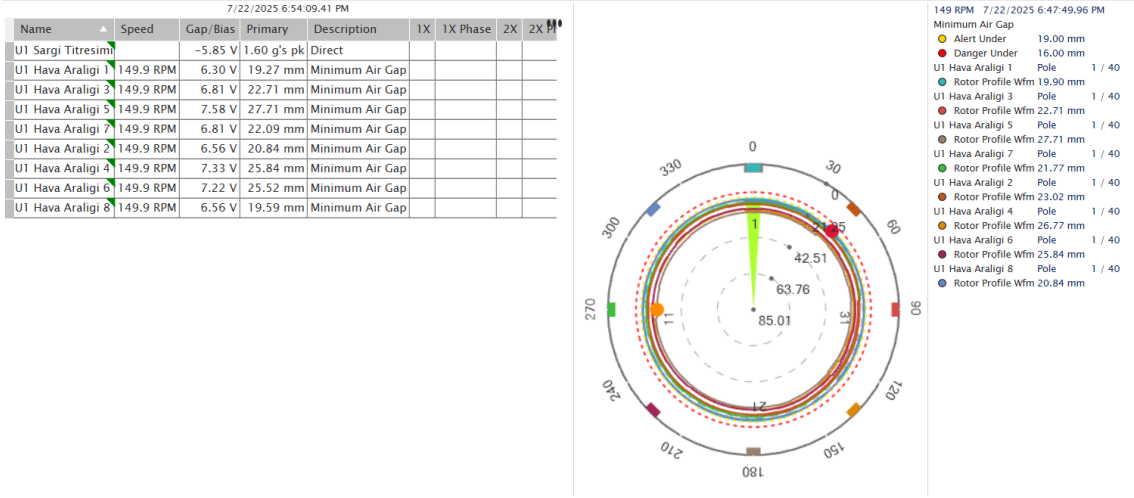
- Tüm yataklarda X ve Y yatay radyal yönlerinde 90 derece açı ile yerleştirilmiş eddy current tipi izafi shaft titreşimi (proximity) sensörleri
- Tüm yataklarda X ve Y yatay radyal yönlerinde 90 derece açı ile yerleştirilmiş piezoelektrik tip mutlak yatak titreşimi sensörleri
- Generatör iç duvarına yaptırılarak yerleştirilen, çevresel olarak 8 adet kapasitif tip hava aralığı sensörü
- Her bir turda tek bir tetikleme alan lazerli devir hızı sensörü

4. Bulgular

Yapılan incelemeler sonucunda edinilen bulgular aşağıdaki alt başlıklarda yer almaktadır.

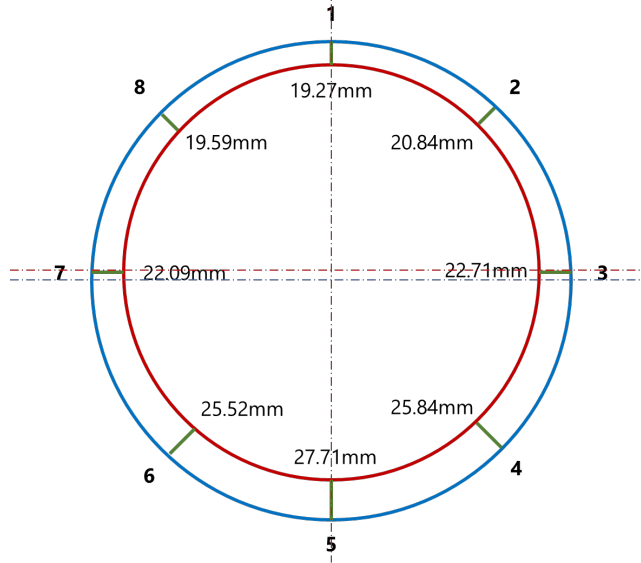
4.1. Genertör Hava Aralığı İle İlişkili Bulgular

Generatör Hava Aralığı sensörlerinden 22.07.2025 tarihinde alınan ölçüm değerleri **Şekil 2’de** tablo olarak gösterilmiştir. Tabloda **Primary** olarak belirtilen değer ölçülen **Minimum Hava Aralığını** göstermektedir.



Şekil 2. Generatör minimum hava aralığı değerleri (primary) tablosu (solda) ve rotor profili grafiği (sağda).

1 numaralı sensör mansap tarafında olup, diğer sensörler üstten bakıldığında saat yönünde 45'er derece ara ile yerleştirilmiştir. Şekil 2'deki grafikte yer alan ölçüm değerlerini polar grafikte çizdirilecek olursa, rotorun stator içerisindeki konumu Şekil 3'teki gibi elde edilecektir. Rotor ile stator arası hava aralığı değerlerinin eşit dağılmadığı, rotorun stator içerisinde 1 numaralı sensöre (mansap tarafına) daha yakın durduğu görülmektedir.



Şekil 3. Generatör minimum hava aralığı değerleri ile çizilen rotor-stator polar grafiği.

Ünitenin Eylül 2023'te revizyona çıkmış olduğu ve Mart 2025'te tekrar devreye alındığı tarafımıza bildirilmiştir. Revizyon öncesi ve sonrası çeşitli tarihlerde ölçülen minimum hava aralığı değerleri Tablo 1'de yer almaktadır. Revizyon öncesinde hava aralığının çevresel dağılımının daha üniform olduğu (eş merkezlilikten sapma yaklaşık 1.5 mm), revizyondan hemen sonra ise yukarıda belirtildiği gibi eş merkezlilikten sapmanın 4.0 - 4.5 mm civarına çıktığı görülmektedir. Normalde çevresel olarak tüm sensörlerde yaklaşık 25.5 mm olması

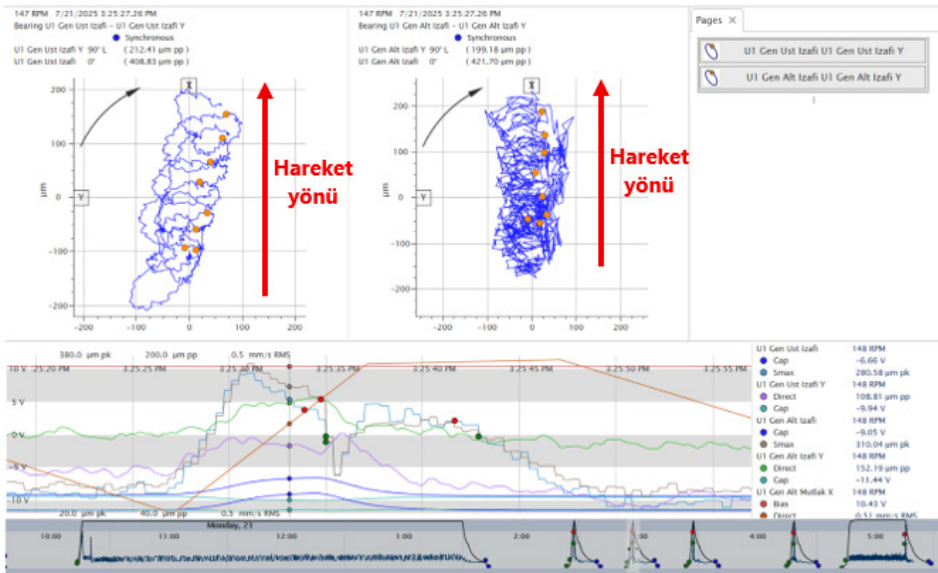
gereken hava aralığı, revizyon sonrasında yaklaşık 4.5 mm kayma nedeniyle 1 numaralı sensörde yaklaşık 21 mm, 5 numaralı sensörde ise yaklaşık 31 mm olarak ölçülmüştür. (Not: Mevsim geçişleri ve ünitenin çalışarak ısınması nedeniyle oluşan genleşmeler hava aralığı ölçümlerini bir miktar değiştirebilmektedir ama sözkonusu eksen kayması **Tablo 1**'deki revizyon sonrası tüm ölçümlerde görülmektedir).

Tablo 1. Revizyon öncesi ve sonrası çeşitli tarihlerde ölçülen minimum hava aralığı değerleri.

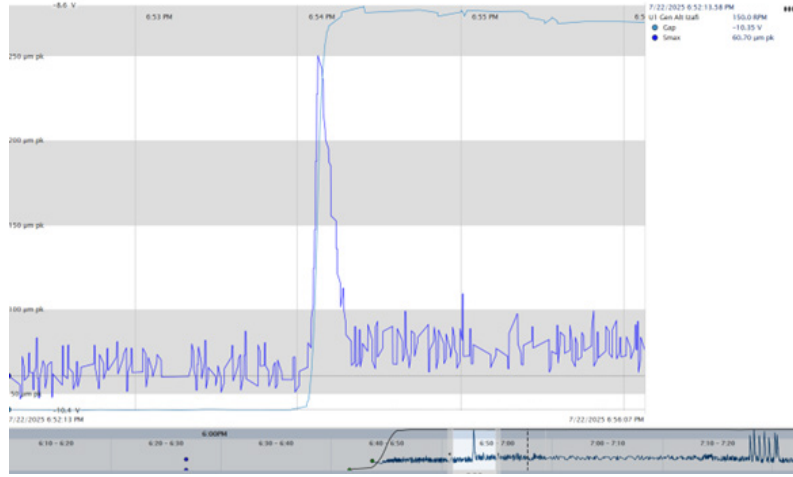
Ölçüm Adı	28.08.2023	09.09.2023		12.03.2025	26.03.2025	02.05.2025	22.07.2025
U1 Hava Aralığı 1	23,97 mm	25,21 mm	REVIZYON	21,77 mm	20,84 mm	21,46 mm	19,27 mm
U1 Hava Aralığı 3	24,59 mm	23,96 mm		24,27 mm	24,59 mm	24,27 mm	23,02 mm
U1 Hava Aralığı 5	26,97 mm	27,09 mm		30,52 mm	30,83 mm	30,52 mm	28,34 mm
U1 Hava Aralığı 7	24,90 mm	24,83 mm		23,65 mm	24,10 mm	23,79 mm	22,40 mm
U1 Hava Aralığı 2	23,65 mm	24,27 mm		21,77 mm	21,46 mm	22,09 mm	20,18 mm
U1 Hava Aralığı 4	26,15 mm	25,84 mm		28,29 mm	28,65 mm	28,34 mm	26,77 mm
U1 Hava Aralığı 6	26,15 mm	25,73 mm		27,40 mm	28,34 mm	28,02 mm	26,15 mm
U1 Hava Aralığı 8	24,90 mm	24,86 mm		21,46 mm	21,46 mm	21,41 mm	20,21 mm

4.2. Genertör Alt ve Üst Yatak İzafi Şaft Titreşimleri İle İlişkili Bulgular

Generatör Üst ve Alt yataklardaki izafi şaft titreşimi sensörlerinden alınan **Şekil 4**'teki Orbit grafiklerinde görüldüğü üzere, ikazlama anında şaft X sensörüne doğru (mansap tarafına doğru) yaklaşık 250 mikrometre yaklaşmaktadır. Bu durum, generatör rotorunun manyetik kuvvetler nedeniyle hareket ettiğini işaret etmektedir. **Şekil 5**'te ikazlama anında X yönündeki sensörün Gap voltajı değerinin -10.4 V'tan -8.6V'a değişmesi de rotorun sensöre doğru yaklaşık 225 mikrometre yaklaştığını doğrulamaktadır.

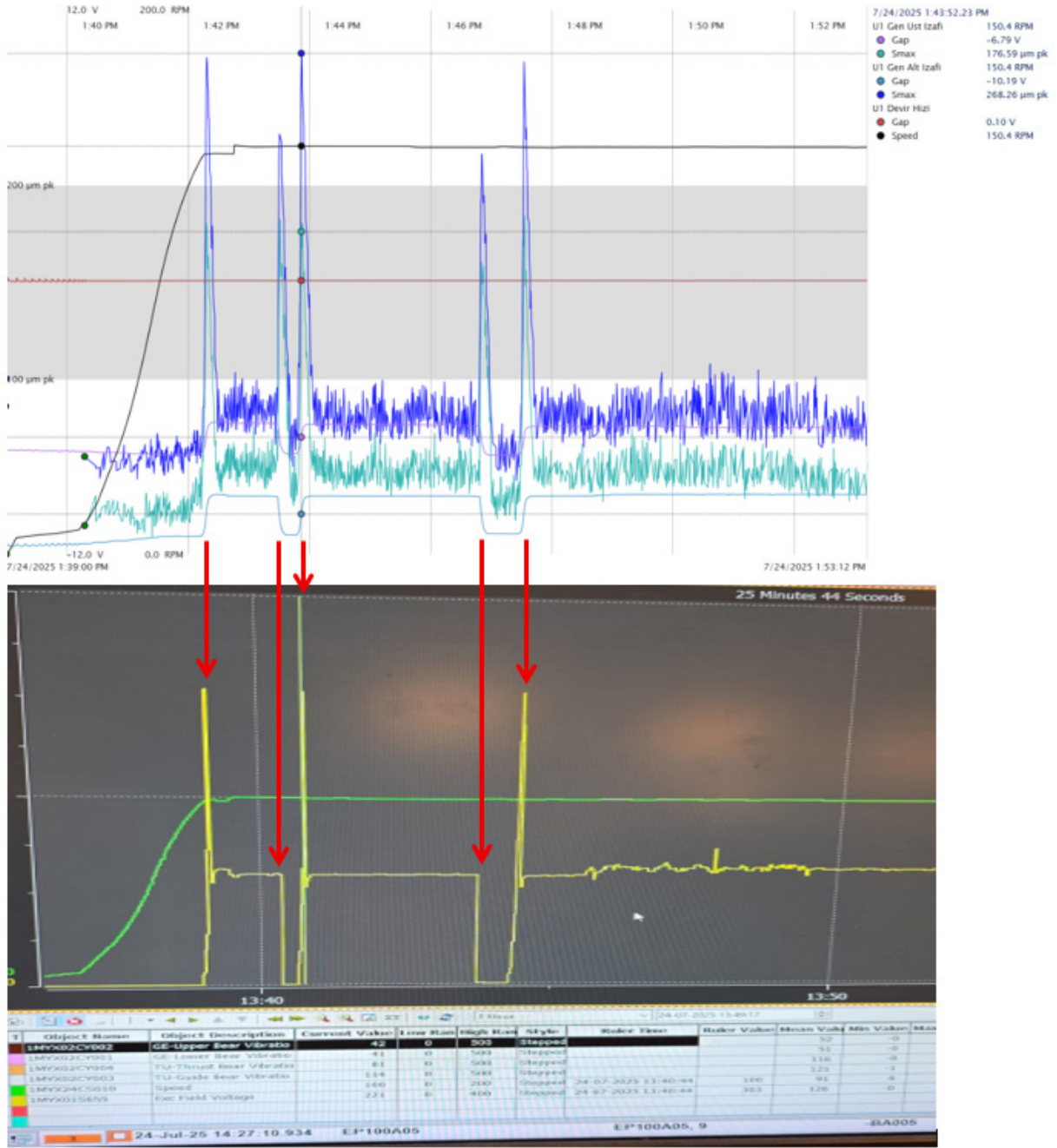


Şekil 4. Generatör üst yatak (solda) ve generatör alt yatak (sağda) Orbit grafikleri.



Şekil 5. Generatör alt yatak vibrasyon seviyesinin (S_{max}) ve X sensörü Gap Voltajının ikazlama anında değişimini gösterir grafik.

Şekil 6'da vibrasyon izleme sisteminden alınan generatör üst ve alt yatak vibrasyon seviyeleri (S_{max}) ve X sensörü Gap Voltajlarını gösterir grafik ile DCS sisteminden alınan ikazlama voltajını gösterir grafik üst üste çizdirilmiştir. İkazlama açma ve kapama anlarında vibrasyon seviyeleri artmaktadır. X sensörü Gap voltajı ikaz verildiğinde pozitif yönde (sensöre yaklaşacak şekilde), ikazlama kesildiğinde ise negatif yönde (sensörden uzaklaşacak şekilde) değişmektedir.



Şekil 6. Vibrasyon izleme sisteminden alınan generatör üst ve alt yatak vibrasyon seviyeleri (Smax) ve X sensörü Gap Voltajlarını gösterir grafik (üstte) ve DCS sisteminden alınan ikazlama voltajını gösterir grafik (altta).

5. Tartışma

Elde edilen bulgular ışığında, hava aralığı ölçümleri, rotorun stator içerisinde eş merkezli olmadığını, rotorun 1 numaralı sensöre (mansap tarafına) yakın konumda durduğunu göstermektedir. Eş merkezlikten kaçıklık miktarı yaklaşık 4 mm civarındadır. Bu durum, revizyon sırasında rotor montajı yapılırken generatör üst ve alt yatakların yatay düzlemde yaklaşık 4 mm mansap tarafına kaçık olarak konumlandırılmasından kaynaklanmaktadır.

Yukarıda bahsedilen duruma “statik eksantrisite” adı verilmektedir ve generatörde manyetik düzensizliklere neden olmaktadır. Bu manyetik dengesizlik, generatör ikazlandığında, rotoru hava aralığının düşük olduğu yöne doğru iten statik kuvvetlere yol açmaktadır. Bunun sonucu olarak rotor 400 mikrometre civarında anlık olarak hareket etmekte ve vibrasyon izleme sistemi bunu bir titreşim hareketi olarak algıladığı için kısa süreli olarak yüksek titreşim seviyeleri okunmaktadır. İkazlama anlarında çoğu zaman vibrasyon eşik seviyeleri aşılarak ünite trip etmektedir. Eşik seviyeleri aşılmazsa vibrasyon seviyeleri normal kabul edilebilecek seviyelere inerek ünite çalışmaya devam etmektedir. Bir süre sonra ikazlama kesildiğinde rotoru mansap tarafına çeken kuvvet ortadan kalkmakta ve bu sefer de rotor diğer yöne (rezervuar yönüne) doğru hareket etmektedir. Aynı şekilde bu anlık hareket de izafi shaft titreşimi sensörlerince bir titreşim hareketi olarak algılanmakta ve yüksek titreşim seviyeleri okunmaktadır. Hem ikaz verildiği hem de kesildiği anlarda görülen yüksek titreşim seviyelerinin nedeni bu şekilde açıklanmaktadır.

İkazlama ve ikaz kesme anlarında sensörlerdeki Gap voltajı değişimi yaklaşık 2 Volt civarındadır. Bu voltaj değişimi shaftın yatağa yaklaşık 250 mikrometre yaklaşmasına denk gelmektedir. Yatak boşlukları kontrol edilerek, bu seviyenin yarıçapsal yatak boşluğunu aşmadığının teyid edilmesi tavsiye edilmiştir. İzafi shaft titreşimi ve mutlak yatak titreşimi seviyeleri ikazlama anları haricinde normal düzeylerde seyretmektedir.

Minimum hava aralığı değerinin zamanla takip edilmesi, 19 milimetrenin altında düşüş trendine girerse müdahale edilmesi tavsiye edilmiştir. Eğer generatör sargı sıcaklıklarında artış, yatak sıcaklıklarında artış, verimde düşüş gibi proses parametrelerinde değişim gözlenmiyorsa ünitenin uzun süreli çalışmasında sorun olmayacağı değerlendirilmiştir.

6. Sonuçlar

Hava aralığı izleme sistemleri, generatör durumu ile ilgili olarak başka ölçüm yöntemleri ile elde edilemeyecek özgün bilgiler sunmaktadırlar. Bu çalışmada incelenen örnekte, ikazlama sırasında titreşimlerin anlık artışının kök nedeninin sadece titreşim verilerinin incelenmesi ile teşhis edilemediği, titreşime ilave olarak hava aralığı verilerinin incelenmesi ile konunun aydınlığa kavuştuğu görülmüştür. Hidroelektrik santrallerdeki büyük çaplı generatörler için hava aralığı bilgileri makina sağlığı ve üretim sürekliliği açısından hayati nitelikte olabilmektedir. Hava aralığı izleme sisteminin izafi shaft titreşimleri izleme sistemi ile entegre halde bulunması birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Her iki ölçüm metodu ile elde edilen dinamik ve statik veriler aynı yazılımda eş zamanlı olarak değerlendirilebilir ve bunun yanı sıra güç, ikazlama gerilimi gibi makinanın diğer parametreleri ile ilişkilendirilerek kullanıcının elinde erken arıza teşhisi amaçlı kullanılabilecek daha fazla gereç olması sağlanır. Böylece makina durumu hakkında bütünsel bir kavrayışa varılabilmesi kolaylaşır.

**Teşekkür**

Bu çalışma Elektrik Üretim A.Ş. Karakaya Hidroelektrik Santralı Ölçü Kontrol Birimi tarafından desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Orhon, B.E. 2019. “Hidroelektrik Santrallarda Generatör Hava Aralığı İzleme Sistemleri”, BTKS2019, pp. 323-331.

Moore, B. 2012. “The Effects of Cycling on Generator Rotors”, Proc. ASME. 44977; Volume 3: Thermal-Hydraulics; Turbines, Generators, and Auxiliaries, pp. 857-862.

Bissonnette, M.R., Stevenson, A., Wallman, R. 2006. “Case studies of problems diagnosed using on-line machine monitoring on hydro-generating machines”, HydroVision 2006

Canadian Electrical Association (CEA). 1989 (rev. 1998). “Hydroelectric Turbine Generator Units - Guide for Erection Tolerances and Shaft System Alignment, Part V”

Görüntü İşleme Tabanlı Önleyici Bakım: Lastik Yerleşim Hatalarının Neden Olduğu Makine Arızalarının Engellenmesi

¹ Mehmet Fatih DEMİRDÖĞEN, ² Öztan ÖZKARA, ³ Dinçer YURDULU,
⁴ Dr. Semih ÖNGİR

¹ Mekanik Bakım Mühendisi, Petlas Lastik Sanayi ve Ticaret A.Ş./Kırşehir,
fatih.demirdogen@petlas.com.tr

² Elektronik Bakım Uzmanı, Petlas Lastik Sanayi ve Ticaret A.Ş./Kırşehir,
oztan.ozkara@petlas.com.tr

³ Elektronik Bakım Şefi, Petlas Lastik Sanayi ve Ticaret A.Ş./Kırşehir,
dincer.yurdulu@petlas.com.tr

⁴ Bakım Müdürü, Petlas Lastik Sanayi ve Ticaret A.Ş./Kırşehir,
semih.ongir@petlas.com.tr

Özet

Bu çalışmada, lastik test makinelerinde dinamik balans ölçümünden önce meydana gelebilecek, lastik jant pozisyonu yerleşim hatalarına bağlı makine arızalarının önlenmesi amacıyla geliştirilen görüntü işleme tabanlı bir kontrol sistemi sunulmaktadır. Dinamik balans ölçüm istasyonunda lastiğin alt ölçüm jantı üzerine eksenel hizadan saparak yerleştiği durumlarda, alt janta merkezli olan üst jantın kapanmak için aşağı doğru hareketi esnasında hatalı konumlanmış lastikle teması sonucu üst jant biriminin merkezi bozulmakta ve bu durum alt gövdeye çarpma neticesinde ciddi ekipman hasarlarına yol açmaktadır. Geliştirilen sistemde, Hikrobot MV-SC3016C model akıllı kamera ve SCMVS (Smart Camera Machine Vision Software) yazılımı aracılığıyla lastiğin makineye yan (eğik) açıyla girip girmediği analiz edilmekte, hatalı yerleşim tespit edildiğinde test döngüsü PLC tarafından otomatik olarak durdurulmaktadır. Böylece, ekipman hasarı riskini ortadan kaldıran ve bakım maliyetlerini azaltan bir kontrol mekanizması sağlanmıştır. Geliştirilen sistem, üretim ortamında ciddi arızalara yol açabilecek hatalı yerleşim vakalarını tespit ederek üretim hattındaki duruş sürelerini minimize etmiştir. Sistem öncesinde 6 aylık periyotta meydana gelen 32 arıza, sistemin devreye alınmasıyla birlikte aynı sürede 2'ye düşürülmüş; böylece %93,75 oranında başarı sağlanmıştır. Uygulama sonuçları, sistemin hem makine güvenliği hem de bakım maliyetlerinin azaltılması açısından önemli katkılar sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca çalışma, görüntü işleme teknolojilerinin proaktif bakım stratejilerine entegrasyonu açısından endüstriyel ölçekte uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Görüntü işleme, Dinamik balans ölçümü, Önleyici bakım, Endüstriyel otomasyon, Hikrobot kamera



Abstract

This study presents an image processing-based inspection system developed to prevent positioning errors that may occur prior to dynamic balance measurement in tyre uniformity test machines. In the dynamic balance measurement station, when the tyre is positioned off-centre on the lower measurement rim, the upper rim, which is centred on the lower rim, moves downwards to close. During this movement, contact with the incorrectly positioned tyre causes the centre of the upper rim unit to become distorted. This situation leads to serious equipment damage as a result of impact with the lower body. In the developed system, the Hikrobot MV-SC3016C model smart camera and SCMVS (Smart Camera Machine Vision Software) software analyse whether the tyre enters the machine at an angle, if incorrect positioning is detected, the test cycle is automatically stopped by the PLC. This provides a control mechanism that eliminates the risk of equipment damage and reduces maintenance costs. The developed system has minimised downtime on the production line by detecting cases of incorrect placement that could cause serious malfunctions in the production environment. The 32 failures that occurred in 6-months period prior to the system were reduced to 2 in the same period after the system was put into operation, thus achieving a 93.75% success rate. The results of the application demonstrate that the system makes significant contributions in terms of both machine safety and reducing maintenance costs. Furthermore, the study offers an industrially scalable solution for integrating image processing technologies into proactive maintenance strategies.

Keywords: Image processing, Dynamic balance measurement, Uniformity test, Industrial automation, Hikrobot camera

1. Giriş

Lastik üretim sürecinde, ürün kalitesinin güvence altına alınması ve nihai ürünün performans değerlerinin doğrulanması açısından üniformite test makineleri ve dinamik balans ölçüm makineleri kritik bir rol oynamaktadır. Ancak bu testlerin sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi, lastiğin makineye doğru şekilde yerleştirilmesine bağlıdır. Üretim hattındaki yoğunluk, makine ekipmanlarında oluşabilecek düzensizlikler ve operatör kaynaklı hatalar, lastiklerin makineye eğik veya yan konumda yerleştirilmesine neden olabilmekte, bu durum hem test sonuçlarının güvenilirliğini düşürmekte hem de ekipmanlarda fiziksel hasara ve üretim hattında istenmeyen duruşlara yol açabilmektedir.

Bu tür hataların önlenmesi, geleneksel yöntemlere ve yoğunlukla operatör dikkatine bırakılmıştır. Ancak insan gözüyle yapılan kontroller, özellikle yüksek hacimli üretim hatlarında yetersiz kalabilmekte, bu da otomatik ve akıllı sistem ihtiyacını doğurmaktadır. Günümüzde, yapay zekâ ve görüntü işleme teknolojilerinin gelişimi, üretim süreçlerinde otomasyon seviyesini artırarak hem hataları azaltmakta hem de üretim verimliliğini önemli ölçüde iyileştirmektedir.

Bu çalışmada, lastik dinamik balans ölçüm makinasında lastiğin hatalı (yan/eğik) yerleşimini test öncesinde tespit edebilen ve gerekli durumlarda süreci otomatik olarak durdurarak müdahale eden bir sistem tasarlanmıştır. Geliştirilen sistem, kamera ve görüntü işleme yazılımı kullanılarak üretim ortamına entegre bir biçimde uygulanmış ve yüksek doğruluk oranlarıyla çalışmıştır. Bu sayede hem test makinelerinin güvenliği hem de üretim sürekliliği sağlanmıştır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Mohammadi ve arkadaşları (Mohammadi, Sattarpanah Karganroudi, & Rahmanian, 2025), endüstriyel makineler ve altyapı elemanlarının görsel tabanlı nondestructive evaluation (NDE, yıkıcı olmayan muayene) işlemlerinde derin öğrenme modellerinin etkin kullanımını incelemişlerdir. Çalışmada, Convolutional Neural Network (CNN), Vision Transformer (ViT) ve hibrit modeller aracılığıyla drone, yer kamerası ve ultrasonik görüntülerdeki yüzey kusurları (çatlak, pas, bozulma) yüksek hassasiyetle tespit edilmiştir. Bu tespitler, bakım operasyonlarının daha verimli ve planlı yürütülmesine katkı sağlamaktadır. Segmentasyon, nesne algılama ve sınıflandırma görevleri için Mask Region-based Convolutional Neural Network (Mask R-CNN), You Only Look Once (YOLO) ve benzeri modeller kullanılmış, böylece gerçek zamanlı ve kapsamlı bakım çözümleri sunulmuştur. Performans ölçümleri için mean Average Precision (mAP), Intersection over Union (IoU) ve doğruluk/recall metrikleri kullanılmıştır. Ayrıca, hibrit modeller lokal ve global özellikleri birleştirerek model performansını optimize etmektedir.

Kuric ve arkadaşları (Kuric et al., 2021) lastik yan duvarlarındaki anormallikleri tespit etmek amacıyla derin öğrenme ve görüntü işleme tekniklerini birleştiren bir sistem geliştirmişlerdir. Çalışmada, kamera görüntüleri polar dönüşüm ve polinomal regresyon yöntemleriyle işlenerek görsel veriler elde edilmiş, lazer sensörü verileri ise 3B verilerden 2B görüntüye dönüştürülmüştür. Bu veriler üzerinde, DBSCAN algoritması anormalliklerin tespit edilmesi için uygulanmıştır. Tespit edilen anomaliler, VGG-16 tabanlı R-CNN modeli kullanılarak sınıflandırılmıştır. Önerilen yaklaşım, hem etiketli (denetimli) hem de etiketsiz verilerle çalışabilen esnek bir sistem sunmaktadır.

Saleh ve Ertunç (Saleh & Ertunç, 2025) yaptıkları çalışmada, lastik üretiminde kalite kontrolü amacıyla geliştirdikleri bir hibrit derin öğrenme modelini sunmuşlardır. Model, Vision Transformer (ViT) ve Convolutional Neural Network (CNN) mimarilerini birleştirerek, görüntü yamalarından hem yerel hem de küresel özellikleri etkili bir şekilde çıkarabilmektedir. Çalışmada model, 83.985 kusursuz ve 38.710 kusurlu lastik X-ray görüntüsü içeren bir veri seti üzerinde eğitilmiş ve test edilmiştir. Elde edilen yüksek performans değerleri, modelin endüstriyel ortamlarda güvenilir ve etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Zu ve arkadaşları (Zhu, Han, & Wang, 2021) çalışmalarında, lastik ömrü tahmini için görüntü işleme ve makine öğrenmesi yöntemlerini birleştirmiştir. Çalışmada, özellikle gri tonlar üzerine odaklanılmış ve gri tonlardaki gradyanların birlikte görülme matrisini ifade eden GGCM (Gray-Gradient Co-occurrence Matrix) ile görüntüdeki doku yapısını istatistiksel olarak modelleyen GMRF (Gauss-Markov Random Field) teknikleri kullanılarak lastik yüzeyinden doku özellikleri çıkarılmıştır. Elde edilen bu özellikler, örneklerin en yakın komşularına bakarak sınıflandırma yapan KNN (K-Nearest Neighbors) algoritmasıyla analiz edilmiştir. Modelin başarımı, MAP (Mean Average Precision) ve karmaşıklık matrisi gibi kriterlerle değerlendirilmiştir. Bu yöntem, lastiklerin ömrünü tahmin ederek güvenliğini artırmayı hedeflemektedir.

Nolan ve Reynolds (Nolan & Reynolds, 2025), endüstriyel sistemlerde tahmine dayalı bakım (Predictive Maintenance, PdM) uygulamalarında derin öğrenme tekniklerinin rolünü kapsamlı bir biçimde incelemişlerdir. Çalışmada, endüstriyel ekipmanların karmaşıklığının artması ve sensörlerden yüksek hacimli verilerin üretilmesi nedeniyle, geleneksel bakım yöntemlerinin



yeterli olmadığı vurgulanmıştır. Öngörücü bakım bağlamında, derin öğrenme yaklaşımları anomali tespiti, arıza tahmini ve durum izleme gibi alanlarda güçlü araçlar sunmaktadır. Makale, Convolutional Neural Network (CNN), Recurrent Neural Network (RNN), oto enkoderler ve pekiştirmeli öğrenme gibi derin öğrenme yöntemlerinin PdM uygulamalarındaki kullanımını detaylı bir şekilde ele almaktadır. Ayrıca, derin öğrenmenin Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) ve Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (Industrial IoT, IIoT) çerçeveleri ile entegrasyonu incelenmiş ve bu teknolojiler arasındaki ilişkiler tartışılmıştır. Makale, veri kalitesi, model yorumlanabilirliği ve hesaplama maliyeti gibi sınırlamaları ve karşılaşılan zorlukları değerlendirmekte, ayrıca gelecekteki araştırma yönlerini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, derin öğrenmenin PdM uygulamalarında yüksek potansiyele sahip olduğu ve endüstriyel operasyonların verimliliğinin artırılmasında kritik bir rol oynayabileceği ifade edilmektedir.

Hütten ve arkadaşları (Hütten et al., 2024), imalat ve bakım süreçlerinde otomatik görsel denetim uygulamalarında derin öğrenme yöntemlerinin etkinliğini incelemişlerdir. Çalışmada, Convolutional Neural Networks (CNN) tabanlı modellerin, üretim hattından elde edilen görüntülerde kusur tespiti ve sınıflandırma görevlerinde yüksek doğruluk sağladığı gözlemlenmiştir. Model performansı, görüntülerin ön işleme süreçleri, veri artırma teknikleri ve transfer öğrenme yöntemleri ile optimize edilmekte, ayrıca ResNet ve EfficientNet gibi çeşitli mimarilerden faydalanılmaktadır. Görüntü işleme teknikleri, ham veriden anlamlı özellikler çıkararak modelin öğrenme ve genelleme yeteneğini artırmakta, bu sayede insan hataları azaltılmakta ve üretim kalitesi ile bakım kararlarının doğruluğu iyileştirilmektedir. Makale hem teorik temelleri hem de endüstrideki uygulamaları ele alarak, otomatik görsel denetimin sektördeki önemini ve potansiyelini detaylı biçimde ortaya koymaktadır.

Chen ve arkadaşları (Chen et al., 2024), karmaşık yol koşullarına bağlı olarak oluşan lastik yüzey hasarlarının (çizik, aşınma, ezik vb.) otomatik tespiti için bir görüntü işleme temelli bakım çözümü önermişlerdir. Çalışmada, ilk adımda lastik yan yüzeylerinin görüntüleri kameralar aracılığıyla elde edilmekte ve ardından çok ölçekli bilateral filtre ile kenar bilgileri korunurken gürültü azaltılmaktadır. Ön işleme sonrası görüntüler, kümeleme (clustering) yöntemi ile segmentlere ayrılarak hasar alanları izole edilmektedir. Daha sonra, Harris köşe tespiti ile tespit edilen “tuz ve biber” (salt-and-pepper) tipi köşe noktaları, histogram korelasyonu kullanılarak hasar bölgeleriyle eşleştirilmekte ve doğruluğu yüksek bir tespit sağlanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, sistemin bakım süreçlerinde hızlı, güvenilir ve otomatik hasar tespiti gerçekleştirebildiğini göstermektedir. Bu sayede insan müdahalesine olan ihtiyaç azalmakta ve bakım kararlarının doğruluğu artırılmaktadır.

3. Yöntem

Dinamik balans ölçüm istasyonunda alt jant alt gövdede, üst jant ise vidalı somun ve mil mekanizması sayesinde hareket edebilen bir üst üniteye bulunmaktadır. Lastik yatay pozisyonda konveyör üzerinde taşınır ve jant merkezine geldiğinde konveyör aşağı yönde hareket ederek lastiği alt jant üzerine bırakır. Konveyör lastiği janta bırakmak üzere aşağı yönde hareket ettiği sırada üst jant kapanmak için aşağı yönde harekete başlar. Konveyör üzerindeki lastik herhangi bir sebeple janta oturmadığında kayarak kilitleme mekanizmasının bulunduğu alt gövdedeki şaftın üzerinde Şekil 1'deki gibi kalır.



Şekil 1: Lastiğin ölçüm istasyonuna yan oturduğu durumlar

Lastik şaft üzerindeyken üst jant indiğinde çarpışma gerçekleşir ve kilitleme mekanizması yerine oturamadığı için eğilip merkezden saparak farklı bir yönde hareket eder. Örnek olay görüntüleri Şekil 2’de ki görselde yer almaktadır.



Şekil 2: Lastiğin ölçüm istasyonuna merkezless geldiği durumlarda yaşanan çarpışma görüntüleri

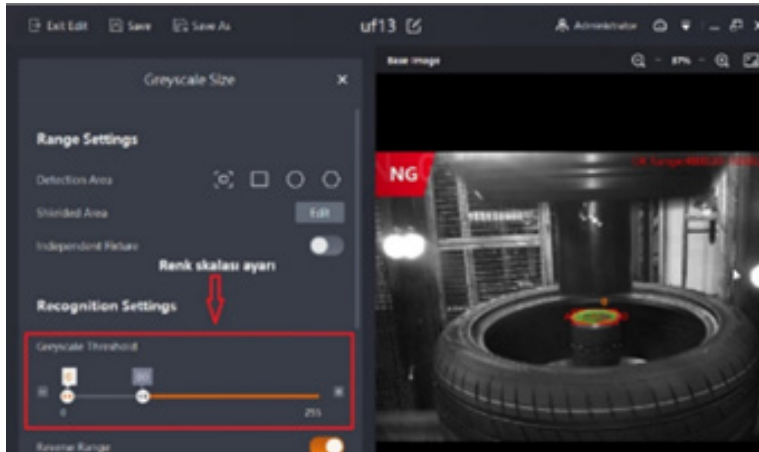
Çalışmamızda, lastiğin janta düzgün oturmaması durumunda oluşabilecek olası hasarların önlenmesi amacıyla görüntü işleme tabanlı bir kontrol sistemi geliştirilmiştir. Sistemin çalışma prensipleri, lastiğin eğik oturma durumlarını tespit etmek ve bu durumu belirledikten sonra makinayı durdurmak üzerine yapılandırılmıştır. En uygun kontrol zamanının, lastiğin jant üzerine bırakıldıktan sonra görüntü alarak şaft üzerindeki yüzeyin gözlemlenmesi olduğu kararına varılmıştır. Bu amaçla, Hikrobot SCMVS (Smart Camera Machine Vision Software) yazılımında bulunan Greyscale Size metodu kullanılmıştır.

Lastiğin dinamik balans ölçüm makinesine girişi, Hikrobot MV-SC3016C model kamera aracılığıyla gözlemlenmektedir. Kamera, lastiğin janta oturduğu esnada, alt gövde merkezindeki şaft üzerindeki belirli bir alandaki renk aralığını analiz etmektedir. Eğer lastik jant üzerine düzgün oturmazsa, alt gövdedeki şaftın üst yüzeyindeki renk değeri, olması gereken aralıktan farklı olacaktır. Görüntü işleme için yüksek çözünürlüklü bir endüstriyel kamera kullanılmış ve sistemde temel görüntü oluşturularak analiz süreci başlatılmıştır. Kamera parametreleri önceden tanımlanmış ve sabit bir kurulumla referans alınmıştır.

Şekil 3'te gösterilen alt gövde merkezindeki şaft üzerinde bulunan alan, kamera tarafından izlenen bölgeyi temsil etmektedir. Greyscale Size metodu, gri tonlama analizi yaparak lastiğin hatalı bir şekilde yerleşip yerleşmediğini tespit eder. Denetlenecek bölge, Greyscale Size aracı ile manuel olarak seçilmiş ve ilgi alanı (Region of Interest – ROI) olarak belirlenmiştir. Tanımlanan ROI içerisindeki piksellerin gri ton aralıkları analiz edilerek uygunluk kriterleri belirlenmiştir. Gri ton değeri belirli bir aralıkta olan pikseller “geçerli (OK)” olarak, bu aralık dışında kalanlar ise “geçersiz (Not OK - NG)” olarak sınıflandırılmıştır. Uygunluk için gerekli alt ve üst limitler (Recognition Settings) tanıma ayarları bölümünden yapılandırılmıştır. Şekil 4'te gösterilen kamera tarafından kontrol edilen yüzeydeki renk aralığı ve bu aralık ile olması gereken ton karşılaştırması, bu sürecin ayrıntılarından biridir. Kamera, seçilen yüzeyi kontrol ettikten sonra, orada gözlemlenen renk aralığını, sistemde ayarlanan gri ton eşiği ile karşılaştırır. Eğer algılanan ton, belirlenen eşik değerinden yüksekse, bu durum lastiğin hatalı bir şekilde oturduğu anlamına gelir.



Şekil 3: Dinamik balans ünitesi alt gövde üzerindeki kontrol edilen yüzey



Şekil 4: Renk skalasının ayarlandığı ve kontrol edilen yüzeyin seçildiği arayüz görüntüsü

Model, lastiğin eğik gelmesi durumunu başarılı bir şekilde tanımlar ve bu tespiti yaparak makineyi durdurma sinyali üretir. Bu sinyal, doğrudan Rockwell otomasyon sistemine bağlı PLC üzerinden kontrol birimine iletilir. Hatalı yerleşim tespit edildiğinde, test işlemi başlatılmadan sistem otomatik olarak durur. Bu entegrasyon, görüntü işleme ve PLC kontrollü durdurma mekanizması sayesinde, üretim hattında oluşabilecek kazaları engeller ve güvenliği artırır. Geliştirilen sistem, (Test Running) test çalıştırma modu kullanılarak çeşitli senaryolar altında test edilmiştir. Farklı gri ton varyasyonlarına sahip numuneler kullanılarak sistemin güvenilirliği ve karar doğruluğu analiz edilmiştir.

4. Bulgular

Geliştirilen sistem, üretim ortamında ciddi arızalara yol açabilecek hatalı yerleşim vakalarını tespit ederek üretim hattındaki duruş sürelerini minimize etmiştir. Sistem öncesinde 6 aylık periyotta meydana gelen 32 arıza, sistemin devreye alınmasıyla birlikte aynı sürede 2'ye düşürülmüş, böylece %93,75 oranında başarı sağlanmıştır. Lastik pozisyonu kontrolü, test işlemi başlamadan önce gerçekleştirilmekte ve milisaniyeler içinde analiz tamamlanarak karar üretilmektedir. Uygulama sonuçları, sistemin hem makine güvenliği hem de bakım maliyetlerinin azaltılması açısından önemli katkılar sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca çalışma, görüntü işleme teknolojilerinin proaktif bakım süreçlerine entegrasyonu açısından endüstriyel ölçekte uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır.

5. Tartışma

Bu çalışmada geliştirilen görüntü işleme temelli sistem, lastik dinamik balans ölçüm istasyonunda yaşanan önemli bir problemi etkili şekilde çözmektedir. Geleneksel sistemlerde, lastiğin test alanına yan şekilde girmesi durumunda ciddi mekanik arızalar meydana gelmekte ve bu durum üretim hattında ortalama 8 saatlik duruş süresi ile sonuçlanmaktadır. Önerilen sistem ise bu tür arızaları tamamen önleyerek hem maliyet kayıplarını azaltmakta hem de üretim sürekliliğini sağlamaktadır.

Literatürde benzer görüntü işleme uygulamaları genellikle yüzey hatalarının tespiti ya da eksik parça analizi gibi konulara odaklanırken, bu çalışmanın farklılığı, test öncesi güvenlik kontrolünü sağlamasıdır. Ayrıca sistemin yalnızca kamera ve yazılım ile uygulanabilir olması, donanımsal modifikasyon gerektirmemesi sayesinde kolay entegrasyon imkânı sunmaktadır.

6. Sonuçlar

Bu çalışma, lastik üniformite test makinelerinde dinamik balans ölçümü öncesinde meydana gelebilecek hatalı yerleşimlerin önlenmesine yönelik geliştirilen görüntü işleme tabanlı bir denetim sisteminin endüstriyel uygulama sonuçlarını ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, sistemin makine güvenliğini artırarak ekipman hasarlarının önüne geçtiğini, bakım maliyetlerini azalttığını ve üretim hattındaki sürekliliği desteklediğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, bu yaklaşım görüntü işleme teknolojilerinin proaktif bakım stratejilerine entegrasyonu açısından endüstriyel ölçekte uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. İleriye dönük olarak, sistemin farklı lastik tipleri ve makine modellerine adaptasyonunun değerlendirilmesi ve yapay zekâ tabanlı karar mekanizmalarıyla desteklenmesi planlanmaktadır.



Kaynaklar

- Chen, J., Li, A., Zheng, F., Chen, S., He, W., & Zhang, G. (2024). Research on Tire Surface Damage Detection Method Based on Image Processing. *Sensors*, 24(9), 2778. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/9/2778>
- Hütten, N., Alves Gomes, M., Hölken, F., Andricevic, K., Meyes, R., & Meisen, T. (2024). Deep Learning for Automated Visual Inspection in Manufacturing and Maintenance: A Survey of Open- Access Papers. *Applied System Innovation*, 7(1), 11. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2571-5577/7/1/11>
- Kuric, I., Klarák, J., Sága, M., Císar, M., Hajdučík, A., & Wiecek, D. (2021). Analysis of the Possibilities of Tire-Defect Inspection Based on Unsupervised Learning and Deep Learning. *Sensors (Basel)*, 21(21). doi:10.3390/s21217073
- Mohammadi, S., Sattarpanah Karganroudi, S., & Rahmanian, V. (2025). Advancements in Smart Nondestructive Evaluation of Industrial Machines: A Comprehensive Review of Computer Vision and AI Techniques for Infrastructure Maintenance. *Machines*, 13(1), 11. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2075-1702/13/1/11>
- Nolan, J., & Reynolds, S. (2025). Deep Learning Approaches for Predictive Maintenance in Industrial Systems. *ITSI Transactions on Electrical and Electronics Engineering*, 13(1), 25–32. Retrieved from <https://journals.mriindia.com/index.php/itsiteee/article/view/69>
- Saleh, R. A. A., & Ertunç, H. M. (2025). Attention-based deep learning for tire defect detection: Fusing local and global features in an industrial case study. *Expert Systems with Applications*, 269, 126473. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.126473>
- Zhu, J., Han, K., & Wang, S. (2021). Automobile tire life prediction based on image processing and machine learning technology. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(3), 16878140211002727. doi:10.1177/16878140211002727

Askeri Uçak Bakımcılığımızın Tarihi: Kurumsal Yapılanma, Eğitim Süreçleri Ve Teknolojik Evrim

Dr. Öğr. Üyesi Seyid Fehmi Diltemiz*

fdiltemiz@ogu.edu.tr

Prof. Dr. Selim Gürgen*

slm.gurgen@gmail.com

Prof. Dr. Melih Cemal Kuşhan*

erzesk@gmail.com

* Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Teknolojileri

Uygulama ve Araştırma

Merkezi (HUZTAM)

Özet

Bu çalışma, Türkiye’de askeri uçak bakımcılığının tarihsel gelişimini kurumsal yapılanma, eğitim süreçleri ve teknolojik evrim eksenlerinde irdelemektedir. Sivil havacılıktaki BOY/MRO birikimi ile askeri bakımıcılık arasındaki etkileşim; yazarın önceki bildirileri ve güvenilir dış kaynaklar ışığında değerlendirilmektedir. Kestirimci bakım (CBM/CBM+), HUMS/SHM, tahribatsız muayene (termografi, eddy current) ve dijital ikiz uygulamaları örneklerle tartışılmakta; 2025–2035 dönemine ilişkin küresel MRO talebi ve filo dinamikleri sayısal göstergelerle sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Askeri uçak bakımı; kurumsal yapılanma; eğitim; MRO; NDT; SHM; CBM; dijital ikiz

Abstract

This paper reviews the historical evolution of military aircraft maintenance in Türkiye along three axes: institutional structures, training pathways, and technological transformation. Civil BOY/MRO experience is synthesized with the military context to highlight mutual learning. Recent advancements—CBM/CBM+, HUMS/SHM, non-destructive testing (infrared thermography, eddy current), and digital twins—are discussed with selected implementations. Quantitative indicators for 2025–2035 illustrate global MRO demand and fleet dynamics.

Keywords: Military aircraft maintenance, institutional framework, training, MRO, NDT, SHM, CBM, digital twin

1. Giriş

Türkiye’de askeri hava araçlarının emniyetli ve etkin kullanımında MRO faaliyetleri belirleyici önemdedir (Şekil 1.). Tarihsel çizgi, kurumlaşma ve endüstriyel ekosistemin rolü birlikte ele alınırken; sivil havacılıktaki BOY birikimi ile askeri bakımcılık arasındaki karşılıklı öğrenme vurgulanır (Kuşhan, 2001; Gürgen ve diğ., 2019).



Şekil 1. 1’inci HBFM ASFAT desteği ile Türk Hava Kuvvetleri’ni uçak & motor revizyon ihtiyacı için dışa bağımlılıktan kurtarıyor (Sünnetçi, 2024)

Cumhuriyet’in erken dönemlerinde bakım çoğunlukla üretici el kitaplarıyla yürütülmüş, zamanla ulusal mevzuat ve kurumsal yapıların olgunlaşmasıyla planlama-icra-kalite güvence süreçleri sistematik bir bütünlüğe kavuşmuştur (Kuşhan, 2001). Sivil BOY birikiminden öğrenilen hangar/atölye süreç yönetimi ve tedarik/lojistik deneyimi; askeri tarafta görev profilleri ve çevresel şartlara uyarlanarak farklılaşmaktadır (Gürgen ve diğ., 2019).

2. Türkiye’de Askeri Uçak Bakımcılığının Tarihsel Gelişimi

2.1. Erken Cumhuriyet Dönemi ve İlk Kurumsallaşma

Cumhuriyetin ilk yıllarında bakım faaliyetleri, üretici el kitapları ve ustalık bilgisinin önderliğinde, sınırlı altyapı ile yürütülmüştür. Zamanla yerli atölye/imalat-tamir kabiliyetleri ve teknik personel eğitim hatları oluşmaya başlamış; standardizasyon ve dokümantasyon kültürü gelişmiştir (Kuşhan, 2001; Kuşhan, 2003a; Kuşhan, 2003b).

2.2. Soğuk Savaş Yılları: Modernizasyon ve Entegrasyon

1950–1980 aralığında envanter çeşitliliği ve görev profillerindeki değişim; bakım planlama, yedek parça tedariki ve kalite güvencesi süreçlerinde kurumsal reflekslerin güçlenmesine yol açmıştır. MRO disiplinlerinin sistematikleşmesi ve uluslararası standartlarla uyum arayışı belirginleşmiştir (Kuşhan ve diğ., 2011).

2.3. 1980–2000: Süreç Olgunlaşması ve Yetkilendirme Kültürü

Kalite sistemlerinin ve yetkilendirme yaklaşımlarının (atölye/kuruluş) yaygınlaşması; bakım

mühendisliği birimlerinin kurumsal yapı içindeki rolünü belirginleştirmiştir. Eğitim-sertifikasyon zinciri güçlenmiş, dış kaynak-iç kaynak dengesi üzerine politikalar geliştirilmiştir (Kuşhan, 2013; Kuşhan, 2003a).

2.4. 2000 Sonrası: BOY/MRO Birikimi ve Sivil-Askeri Etkileşim

Sivil havacılıktaki BOY/MRO birikimi; hangar/atölye organizasyonu, komponent onarımı ve lojistik yönetiminde askeri tarafa model oluşturmuştur. Karşılıklı öğrenme ve insan kaynağı mobilitesi artmıştır (Gürgen ve diğ., 2019).

2.5. 2010 Sonrası: Dijitalleşme, SHM/HUMS ve CBM+

Kestirimci bakım (CBM/CBM+), HUMS/SHM ve veri temelli karar destek uygulamaları; NDT teknikleriyle birlikte bakım çevrimlerini kısaltmayı ve görev-hazırlığını artırmayı hedeflemiştir. VR/AR tabanlı eğitim ve icra çözümleri yaygınlaşmaya başlamıştır (Tat ve Kuşhan, 2017; Sofuoğlu ve diğ., 2019; Kuşhan, 2019; Eroğlu ve diğ., 2022; Kuşhan ve diğ., 2022). Bu dönemlerin özeti için bkz. Tablo 1.

Tablo 1. Türkiye’de askeri uçak bakımcılığının tarihsel gelişimi: dönem, kurumsal gelişme, teknik/mühendislik etkisi ve örnek kaynaklar.

Dönem	Kurumsal Gelişme	Teknik/Mühendislik Etkisi	Örnek Kaynak
1923–1950	İlk kurumsallaşma, atölye/onarım hatları	Dokümantasyon kültürü, temel bakım süreçleri	Kuşhan (2001, 2003a, 2003b)
1950–1980	Envanter çeşitlenmesi, modernizasyon	Planlama/QA/QC sistematikleşmesi	Kuşhan ve diğ. (2011)
1980–2000	Kalite sistemleri, yetkilendirme kültürü	Bakım mühendisliği rolünün belirginleşmesi	Kuşhan (2013); Kuşhan (2003a)
2000–2010	BOY/MRO birikiminin askeriye ile etkileşimi	Hangar/atölye/lojistik uygulamalarının uyarlanması	Gürgen ve diğ. (2019)
2010–günümüz	Dijitalleşme, SHM/HUMS, CBM+, VR/AR	Proaktif bakım, veri-odaklı karar destek	Tat ve Kuşhan (2017); Sofuoğlu ve diğ. (2019); Kuşhan (2019); Eroğlu ve diğ. (2022); Kuşhan ve diğ. (2022)

3. Bilimsel Yazın Taraması

Bakım düzenlemelerinde EASA Part-145 ve Part-66; yetkili bakım kuruluşları ve bakım lisansı çerçevesini tanımlar. FAA rehberleri (AC 120-16G; AC 43-210A) bakım programı kapsam ve veri onay operasyonlarını destekler (EASA, 2025a; EASA, 2024; FAA, 2016; FAA, 2018).

SHM/NDT tarafında, aktif kızılötesi termografi kompozit yapılarda hasar tespitine yönelik güçlü bir araçtır; E2582-21 standardı uygulama pratiğini çerçeveler (Ciampa ve diğ., 2018; ASTM, 2021). HUMS/SHM verilerinin CBM+ mimarisine entegrasyonu olgunluk gerektirir

(DoD, 2020; Skybrary, n.d.). Dijital ikiz uygulamalarında veri entegrasyonu, model doğrulama ve siber güvenlik kritik başlıklardır (Werbińska-Wojciechowska ve diğ., 2024; Moenck ve diğ., 2024).

4. Yöntem

Bu çalışma derleme niteliğindedir. Kaynak seçiminde hakemli dergiler, standart kurumları (EASA/FAA/ASTM), saygın savunma kurum dokümanları (DoD) ve endüstri raporları (Oliver Wyman) önceliklendirilmiştir. Dahil etme ölçütleri: (i) konuyla doğrudan ilgili, (ii) güncellik ve (iii) erişilebilirlik/doğrulanabilirlik.

Nicel bölümde 2025–2035 MRO talebi, 2025 değeri 119 milyar \$ başlangıcı ve %2,7 YBBO varsayımıyla ara yıllara dağıtılmış; 2035 değeri 156 milyar \$ hedefine ölçeklendirilmiştir (Oliver Wyman, 2025). Çalışma insan verisi içermez; araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

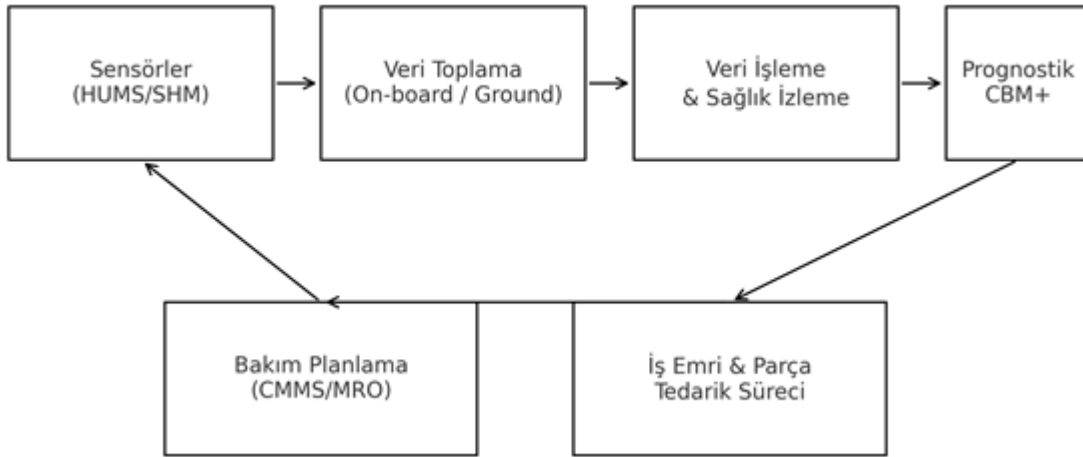
5. Teknolojik Evrim

NDT cephesinde kızılötesi termografi, ultrasonik C-scan, shearografi ve girdap akımları farklı hasar türlerine duyarlıdır; kompozit-metal hibrit bölgelerde yöntem kombinasyonları kalite güvencesini artırır (ASTM, 2021).

Endüstri 4.0 kapsamında sensörleşmiş komponentler, kestirimci algoritmalar ve bakım yönetim yazılımları arasındaki veri senkronizasyonu; konfigürasyon yönetimi ve emniyet değerlendirmeleriyle birlikte ele alınmalıdır (Tat ve Kuşhan, 2017; Kuşhan, 2019).

VR/AR çözümleri; bakım talimatlarının sayısal ikizle bağlanması, eğitim verimliliği ve hatasızlık açısından ümit vericidir (Kuşhan ve diğ., 2022).

CBM+ mimarisi, HUMS/SHM verilerinin sensör→toplama→işleme→prognostik zinciri üzerinden CMMS/MRO süreçlerine beslendiği kapalı çevrimli bir yaklaşımdır. Bu çalışmada izlenen temel iş akışı Şekil 2’te özetlenmiştir.



Şekil 2 . CBM+ veri akışı ve süreç diyagramı

6. Örnek Olaylar ve Uygulamalar

Hat bakım gövde kontrollerinde kablosuz girdap akımı yaklaşımı; erişimi zor bölgelerde kablo karmaşıklığını azaltarak, taşınabilirlik ve S/G oranında kazanımlar sağlamıştır (Göde ve diğ., 2013).

Üretim ortamında SHM (Structural Health Monitoring/Yapısal Sağlık İzleme); sensör yerleşimi, kalibrasyon ve veri bütünlüğü süreçleriyle standart operasyon akışlarına entegre edildiğinde verimliliği artırır (Sofuoğlu ve diğ., 2019).

Kompozit yapılarda SHM/termografi uygulamaları; saha koşullarında hızlı tarama ve erken

uyarı kapasitesini güçlendirmektedir (Eroğlu ve diğ., 2022). IoT-tabanlı izleme ve VR/AR destekli eğitim modülleri; adım adım görsel-etkileşimli yürütme ile hataları azaltır (Kuşhan ve diğ., 2022).

7. Tartışma

Yetkin insan kaynağı ve sürekli eğitim; CBM+/SHM projelerinin başarısında belirleyicidir. Tip eğitimlerinin yanı sıra veri bilimi ve model doğrulama yetkinlikleri önerilir (EASA, 2021).

Siber güvenlik, veri sahipliği ve standardizasyon; bağlı bakım ekosisteminde kritik olup tedarik zinciriyle birlikte yönetilmelidir (DoD, 2020).

Yatırım değerlendirmelerinde, ROI yalnızca parça tüketimi ve iş gücü süreleriyle değil; emniyet ve görev-hazırlığı metrikleriyle birlikte ele alınmalıdır (EASA, 2025a; FAA, 2016).

8. Sonuç ve Öneriler

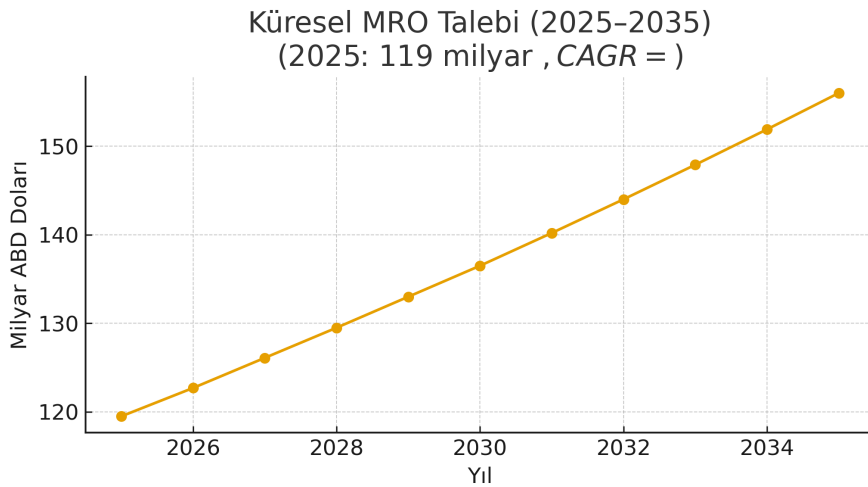
Kısa vadede: (i) bakım veri yönetimi için asgari veri kümesinin tanımlanması, (ii) VR/AR destekli bakım talimatı pilotları, (iii) NDT yöntem kombinasyonlarının platform-özel matrislerle standardizasyonu.

Orta vadede: (i) CBM+/HUMS verilerinin bakım planlama yazılımlarıyla çift yönlü entegrasyonu, (ii) dijital ikiz doğrulama prosedürlerinin oluşturulması, (iii) eğitim-yetkilendirme matrislerine veri analitiği/SHM modüllerinin eklenmesi.

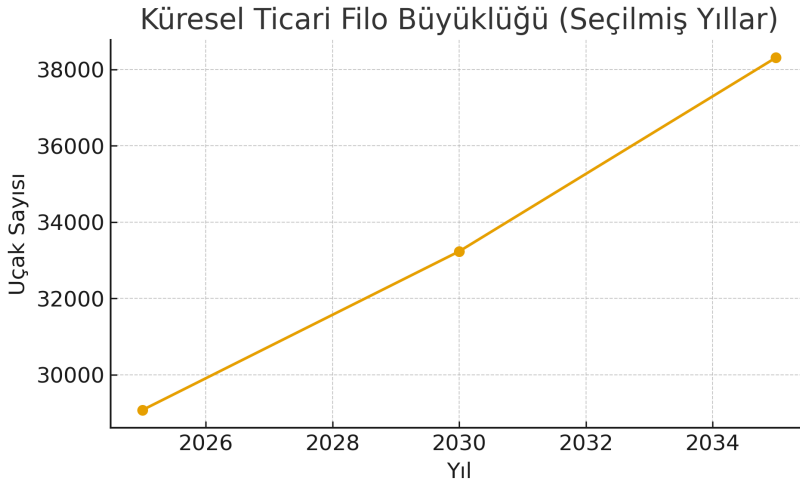
Uzun vadede: (i) platformlar arası öğrenen veri havuzu, (ii) yerli sensör ve analitik çözümlerinin olgunlaştırılması, (iii) düzenleyici kurumlarla erken etkileşimli kabul-onay süreçlerinin tesis edilmesi.

9. Nicel Göstergeler ve Bulgular

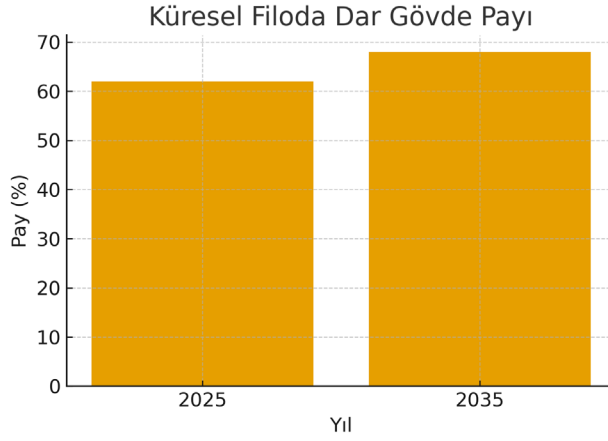
Bu bölüm, Oliver Wyman (2025) küresel filo ve MRO öngörülleri temel alınarak oluşturulmuştur. MRO talebi 2025–2035 için %2,7 YBBO ile 119 milyar \$’dan 156 milyar \$’a yükselmektedir (Şekil 3); filo büyüklüğü ve dar gövde payı seçilmiş yıllar üzerinden gösterilmiştir (Şekil 4 ve 5) (Oliver Wyman, 2025).



Şekil 3. Küresel MRO talebi (2025–2035). (Wyman, 2025).



Şekil 4 . Küresel ticari filo büyüklüğü . (Wyman, 2025).



Şekil . Küresel filoda dar gövde payı. (Wyman, 2025).

Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemektedir.

Yazarların Katkıları

Katkı beyanı — Diltemiz: bilimsel yazın taraması, düzenleyici çerçeve ve editöryal değerlendirme; Gürgen: örnek olaylar, sayısal göstergelerin derlenmesi ve şekillerin gözden geçirilmesi; Kuşhan: çalışmanın kavramsal kurgusu, ana metnin yazımı, sayısal analizler ve nihai kontrol.

Kaynakça

- ASTM (2021). E2582-21: Standard Practice for Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications. ASTM International.
- Ciampa, F., Mahmoodi, P., Pinto, F., & Meo, M. (2018). Recent Advances in Active Infrared Thermography for NDT of Aerospace Structures. *Sensors*, 18(2), 609.
- DoD (2020). Condition Based Maintenance Plus (CBM+) Guidebook. U.S. Department of Defense/DAU.
- EASA (2021). How to get an EASA Part-66 AML (Aircraft Maintenance Licence). European Union Aviation Safety Agency.
- EASA (2024). Appendices to Annex II (Part-145): Terms of Approval – classes/ratings. Easy Access Rules online publication.
- EASA (2025a). Easy Access Rules for Continuing Airworthiness (Part-M, Part-ML, Part-145, Part-66, etc.), September 2025 revision. European Union Aviation Safety Agency.
- Eroğlu, E., Diltemiz, S. F., & Kuşhan, M. C. (2022). Hava Araçlarında Kullanılan Kompozit Yapılarında Yapısal Sağlık İzleme. *Savunma Sanayii Sempozyumu ve Sergisi'22*, 13–15 Ekim 2022, Kayseri.
- FAA (2016). AC 120-16G: Air Carrier Maintenance Programs. Federal Aviation Administration.
- FAA (2018). AC 43-210A (Change 1): Approval of Data for Major Repairs and Major Alterations. Federal Aviation Administration.
- Göde, E., Kuşhan, M. C., & Ayva, E. (2013). Uçakların Hat Bakım Gövde Kontrolunda Yeni Bir Yöntem: Kablosuz Eddy (Girdap) Akımı Yöntemi. VI. Bakım Teknolojileri Kongre ve Sergisi, 30 Mayıs – 1 Haziran 2013, Sakarya.
- Gürgeç, S., Sofuoğlu, M. A., Çakır, F. H., & Kuşhan, M. C. (2019). Dünyada ve Ülkemizde Sivil Havacılık Bakım Onarım ve Yenileme (BOY) Faaliyetleri. 9. Uluslararası Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi (BTKS), 26–28 Eylül 2019.
- Kuşhan, M. C. (2001). Sivil Havacılığımızın Dünü, Bugünü ve Geleceği. 1. Ulusal Uçak Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı, 12 Mayıs 2001, Eskişehir.
- Kuşhan, M. C. (2003a). Türkiye’de Bakım Mühendisliği Eğitiminin Gereği ve Uçak Bakım Mühendisliğinin Önemi. 2. Ulusal Uçak Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı, 10 Mayıs 2003, Eskişehir.
- Kuşhan, M. C. (2003b). Ülkemizde Uçak Bakım Mühendisliği. Bakım Teknolojileri Kongre ve Sergisi, 16 Ekim 2003, Denizli.
- Kuşhan, M. C. (2013). Havacılıkta Standartizasyonun Önemi. Uluslararası ‘Standardizasyonun Küresel Ekonomiye Etkileri Sempozyumu’, 25–26 Kasım 2013, İstanbul, Türkiye.
- Kuşhan, M. C. (2019). Havacılıkta MRO ve Endüstri 4.0. *Makina*, 17–18, 153.
- Kuşhan, M. C., Değerli, M. C., Şahin, Ö., & Yazar, I. (2022). Internet of Things in Maintenance and Virtual Reality/Augmented Reality Applications in Aircraft Maintenance. X. International Maintenance Technologies Congress and Exhibition, Pamukkale University, Denizli, Turkey, 20–22 October 2022.
- Kuşhan, M. C., Diltemiz, F., Uzgur, S., & Uzunonut, Y. (2011). Uçak Bakımında Ülkemizin Dünyadaki Konumu. V. Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi, 14–16 Ekim 2011, Sakarya.
- Moenck, K., et al. (2024). Digital twins in aircraft production and MRO: challenges and opportunities. *CEAS Aeronautical Journal*.
- Oliver Wyman (2025). Global Fleet and MRO Market Forecast 2025–2035.



- Skybrary (n.d.). Health and Usage Monitoring System (HUMS). <https://skybrary.aero/>
- Sofuoğlu, M. A., Orak, S., & Kuşhan, M. C. (2019). STRUCTURAL HEALTH MONITORING AND ITS APPLICATIONS IN MANUFACTURING ENVIRONMENT. 5th International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME 2019), Istanbul, 17–19 December 2019.
- Sünnetçi, İ. (2024), 1'inci HBFM ASFAT Desteği ile Türk Hava Kuvvetleri'ni Uçak & Motor Revizyon İhtiyacı için Dışa Bağımlılıktan Kurtarıyor, Defence Turkey, 135, Kasım 2024
- Tat, M. E., & Kuşhan, M. C. (2017). Impact of Industry 4.0 to Aircraft Maintenance, Repair and Overhaul. VII International Symposium Engineering Management and Competitiveness 2017 (EMC 2017), 16–17 June 2017, Zrenjanin, Serbia.
- Werbińska-Wojciechowska, S., et al. (2024). Digital Twin Approach for Operation and Maintenance of Transportation Systems. Sensors, 24(18), 6069.

Havayolu Ulaşımında Bakım Programı Geliştirme Metodolojisi “MSG3”

Cihan Polat

Kıdemli Uzman Uyum Doğrulama Mühendisi, TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş.

(TEI), Eskişehir, Türkiye

cihan.polat@tei.com.tr

Necdet Demir

Uzman Emniyet ve Güvenilirlik Mühendisi, TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş.

(TEI), Eskişehir, Türkiye

necdet.demir@tei.com.tr

ÖZET

Günümüzde hızla gelişen teknoloji, artan rekabet ve maliyetler, yerel ve/veya global belirsizlikler özellikle rekabetinin yoğun, teknolojinin ileri, maliyet baskısının ise ön planda olduğu havacılık sektöründe maliyet ve güvenilirlik etkin bakım programlarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda havayolu ulaşımına hizmet eden tüm üreticiler için bakım programı geliştirilmesi en önemli mühendislik başlıklarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bir havayolu taşıtı geliştirme sürecinde, ürünün tasarımı ile paralel olarak bakım programı geliştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda bir bakım programı geliştirme metodolojisi olarak “MSG3” havacılık sektöründe otoriteler ve üreticiler tarafından kabul görmüş bir yöntem olarak yaygın olarak karşımıza çıkmaktadır. MSG3; genel hatları ile hava araçlarının bakım programını emniyet ve güvenilirlik odaklı bir yaklaşımla oluşturmayı ve aynı zamanda emniyet seviyesine etki etmeyen gereksiz bakım işlemlerinden kaçınmayı hedeflemektedir. MSG3 metodolojisi uçak /motor üreticisi, ürünün kullanıcısı ve ilgili havacılık otoritelerini optimum bakım görevlerini oluşturabilmek için bir araya getiren ve ürün ömür devri boyunca yaşayan bir bakım stratejisi kurmayı hedeflemektedir.

Bu çalışmada genel hatları ile havacılık motoru geliştirme sürecinde MSG3 metodolojisi incelenecek olup bir örnek değerlendirmeler gerçekleştirilecektir.



1. Giriş

MSG3 (Maintenance Steering Group - 3) metodolojisi, sivil havacılıkta uçak / motor bakım programlarının oluşturulmasında kullanılan, planlı bakım görevlerini oluşturmaya yarayan bir analiz yöntemidir. MSG3 analizi üreticilerin daha güvenilir, etkili ve ekonomik bir planlı bakım planı geliştirmelerini sağlar.

Bu çalışmada genel hatları ile havacılık motoru geliştirme sürecinde MSG3 metodolojisi incelenecek olup değerlendirmeler gerçekleştirilecektir.

2. Yöntem

2.1. Tarihçe

MSG3 Analizi, havacılık alanında uzun yıllardır planlı bakım görevlerinin oluşturulmasında kullanılmaktadır. EASA ile FAA otoriteleri tarafından kabul edilmiş bir uyum doğrulama yöntemidir. MSG3 analizi amacı bir ekipmanın veya ürünün güvenilirliğini ve performansını sağlarken minimum seviyede önleyici bakım gerçekleştirmeyi hedefler.

MSG3 analizi 1960'lı yılların sonunda FAA ve ATA (Air Transport Association; havayolları, uçak üreticileri ve tedarikçilerden oluşmaktadır) yetkililerinin yönlendirmesi ile oluşturulan Maintenance Steering Group (MSG) tarafından ortaya çıkmıştır.

MSG3 ve öncülü olan MSG1 ve MSG2 analizlerinden önce uçaklarda bulunan tüm parçaların düzenli olarak değiştirilmesi şeklinde bir bakım stratejisi yaygın olarak uygulanmaktaydı. 1968 yılında yukarıda belirtilen MSG (Maintenance Steering Group) çalışmaları neticesinde ilk versiyon; MSG1 ortaya çıkmıştır.

MSG1 analizinde iki tip bakım görevi bulunuyordu. Bunlar;

- Hard Time (HT): Komponent veya sistemin sabit periyotta komple değişimi.
- OnCondition (OC): Belirli periyotlarda tekrarlı olarak komponent veya sistemin kontrolü ve buna bağlı değişimi.

MSG1 metodolojisinin ilk uygulandığı model olan Boeing 747 ile beraber sektör yetkilileri bu ikili yaklaşımın farklı bakım görev tiplerine izin vermediğini ve çoğu zaman gerçekten problematik olan bakım görevlerine odaklanmadığını, ve aynı zamanda bazı noktalarda gereksiz bakıma sebep olduğunu değerlendirdiler. Böylece 1970'lere gelindiğinde MSG2 analizi bakım görev tipi geliştirmesi ve bakım için önemli komponent ve sistemlerin belirlenmesi kurgusu (MSI; Maintenance Significant Item, Bakım önemli Ögesi) geliştirmeler ile birlikte ortaya çıktı.

MSG2 analizinde MSG1 analizine ek olarak bir bakım görev tipi daha eklenmiştir. Bu görev;

- Condition Monitoring (CM): MSG1 ve MSG2'de belirtilen HT ve OC kategorilerinde olmayan, hata durumunda kritik bir etki oluşturmayan parçaların takibinin sağlandığı bir görev türü.

MSG2 analizi ilk olarak Lockheed L1011 Tristar ve McDonnell Douglas DC10 uçaklarında kullanılmaya başlamıştır. 1980 yılına gelindiğinde ise MSG2 metodolojisindeki eksikler ve tecrübeler ve yaşanan petrol krizinin maliyetler üzerindeki etkisi ile birlikte MSG3 metodolojisi ortaya çıkmıştır. Daha önceki versiyonlar arasındaki temel fark hata etkilerine odaklanarak aşağıdan yukarıya doğru (parçadan komponent ve sisteme doğru) bir yaklaşım sunmasıdır. MSG3 analizi öncül analizlere göre daha fazla görev odaklı yaklaşım sergilemektedir, böylelikle CM ve OC ile HT arasındaki karışıklık ortadan kalkmıştır. Ayrıca MSG3 ile pilot ve uçuş ekibi için gizli olan hataların da yakalanması amaçlanmıştır.

2.2. MSG3 Analizi

MSG3 analizi topdown (yukarıdan aşağıya) bir analiz olup bu çalışmada ATA MSG3 Volume

2 (Rotorcraft) üzerinden süreç anlatılacaktır. ATA MSG3 Volume 2 (Rotorcraft) dökümanında planlı bakım 4 ana başlık üzerinden tanımlanır. Bunlar;

- Systems / Powerplant (component ve APU dahil)
- Aircraft Structures
- Zonal Inspections
- L/HIRF (Lightning/High Intensity Radiated Field)

Her bir bölümün tanımlayıcı bilgileri ve akışı farklı tanımlanmaktadır. Her bölüm birbirinden bağımsız olarak kullanılabilir.

Bu çalışmada sadece “Systems/Powerplant” akışı aktarılacaktır

2.2.1. MSG3 Analizi

MSG3 analizinde planlı bakım görevleri 5 ana başlıkta toplanmıştır. Detaylar aşağıda iletilmektedir.

1. Lubrication/Servicing (LUB/SV or LUB/SVC): Tasarımın sağladığı kabiliyeti korumak amaçlı yapılan yağlama ve servis işlemleri bu görev grubu içerisinde yer alır. Örneğin; bir dişlinin yağlanması (LUB), bir dişli kutusunun yağ değişimi veya yağ ilave edilmesi (SVC) olarak tanımlanır.

2. Operational/Visual Check (OP/VC or OPC/VCK): Operational check; bir parçanın tasarım tasarım tarafından tanımlanan fonksiyonunu yerine getirip getirmediğinin kontrolü olarak tanımlanır. Herhangi nicel bir tolerans tanımlanmaz. Bu tip görevler arıza tespit görevi olarak tanımlanırlar. Visual check ise bir parçanın görsel olarak tasarım tarafından tanımlandığı şekilde olup olmadığının kontrolü olarak tanımlanır. Bu görev tipinde de nicel bir tolerans tanımlanmaz. Operational check’e benzer şekilde arıza tespit amaçlı kullanılır, fakat kesin bir geçme/kalma kriteri tanımlanmıştır. Örneğin; bir aktüatörün istenilen konuma gelip gelmediğinin kontrolü (OPC) olarak tanımlanır. Bir yakıt filtresinin impending bypass valfinin açılıp açılmadığının kontrolü ise (VCK) olarak tanımlanmalıdır.

3. Inspection/Functional Check (IN/FC or */FNC)

- General Visual Inspection (GV or GVI): Bu görev türü bir montajın, parçanın veya ünitenin görsel olarak kontrolünü ifade eder. Burada herhangi bir fiziksel müdahale yoktur. Sadece görme mesafesinden görsel kontrol değerlendirilir. Görsel kontrol yapılırken ayna, ilave ışıklandırma, erişim panellerine müdahale gibi öncül ve beraberinde görevler tanımlanabilir. Öncül olarak temizlik görevi de dikkate alınabilir. Örnek olarak; bir boru bağlantısının sızıntı kontrolü (GVI) olarak tanımlanır. Veya bir access panel menteşesinin kilit mekanizmasının kontrolü (GVI) olarak tanımlanmalıdır.
- Detailed Inspection (DI or DET): GVI’ya benzer şekilde bir montajın, parçanın veya ünitenin hasar, arıza veya düzensizlik durumunun detaylı olarak incelenmesi şeklinde tanımlanır. Genellikle ekstra bir ışık kaynağı yardımı, ayna ve büyüteç gibi destek ekipmanlar kullanılır. Öncül olarak temizlik veya ayrıntılı erişim görevi tanımlanabilir. Örnek olarak; bir civata somun bağlantısının sıkılık kontrolü, yapısal bir parçada hasar kontrolü (DET) olarak tanımlanır.
- Special Detailed Inspection (SI or SDI): Detailed inspection’a benzer şekilde bir montajın, parçanın veya ünitenin hasar, arıza veya düzensizlik durumunun tahribatsız muayene yöntemleri (boroskop, videoskop, yağ numunesi vb) veya benzeri özel muayene yöntemleri (penetrant, xray vb.) kullanılarak incelenmesi şeklinde tanımlanır. Öncül olarak karmaşık, detaylı temizlik veya ayrıntılı erişim görevi tanımlanabilir. Bir görevin (SDI) olarak sınıflandırılması, görevi gerçekleştiren kişi için gerekli nitelikleri tanımlamaz. Örnek olarak; Yanma odası boroskop kontrolleri, yağ numunesi kontrolleri (SDI) olarak tanımlanır.
- Scheduled Structural Health Monitoring (SSHM): (SHM), potansiyel olarak uçak yüklerini ve yapısal hasarı izleyebilen sensör teknolojisi ve uçuş parametreleri kullanan bir yapısal durum değerlendirme sistemidir. Buna bağlı olarak sabit bir zaman çizelgesinde belirlenen



bir aralıkta bir SHM cihazını kullanma/çalıştırıp okuma eylemi gerçekleştirilir. Uçak yapısal parçaları için geçerli bir metoddur.

- **Scheduled Health and Usage Monitoring (SHUM):** (HUM) sistemi, kritik sistemlerin ve bileşenlerin durumunu kaydeder, böylece ilerleyen arızaların veya bunların belirtilerinin erken tespiti mümkün olur ve arızalar operasyonel emniyeti etkilemeden önce düzeltme yapılabilir. Buna bağlı olarak sabit bir zaman çizelgesinde belirlenen bir aralıkta bir HUMS cihazı çalıştırılıp kullanma/çalıştır/okuma ve verilerini belirli bir zaman çizelgesinde belirlenen aralıklarla analiz etme eylemi gerçekleştirilir. Bazı kaynaklarda healt monitoring olarak da tanımlanmaktadır.

4 Restoration (RS or RST): Restorasyon (RST), bir montajın, parçanın veya ünitenin hasar, arıza veya düzensizlik durumunu belirli bir standarda (genellikle ilk durumuna) döndürmek için gerekli olan görev olarak tanımlanır. Restorasyon, tek tek parçaların temizlenmesinden veya değiştirilmesinden tutun komple bir elden geçirmeye (overhaul) kadar değişebilir. Örnek olarak; Magnetic Plug üzerinde bulunan partiküllerin temizlenmesi, platformda bir bölgenin yanabilecek malzemeler açısından periyodik temizlik işlemi, bir ünitenin pillerinin değiştirilmesi, yağ filtresinin temizlenmesi ya da temizle/değiştir şeklindeki görevler (RST) olarak tanımlanır.

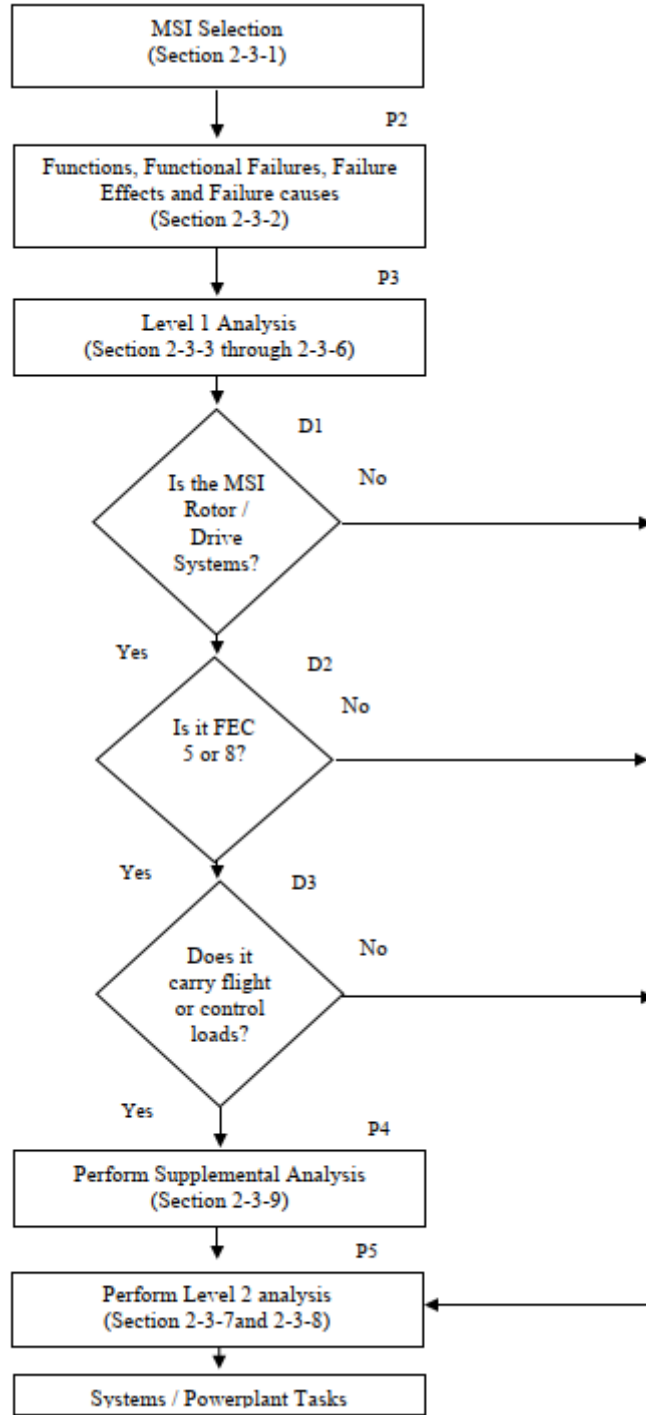
5 Discard (DS or DIS): Discard (DIS): bir montajın, parçanın veya ünitenin belirli bir kullanım ömrü sonrasında değiştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Genelde belirli bir kullanım ömrü olan parçalar için kullanılır. Örnek olarak; bir filtrenin veya check valfin belirli bir zaman sonunda değiştirilmesi, uçaklarda bulunan oksijen maskelerinin değişimi, life limited parçaların değişimi şeklindeki görevler bu kapsamda değerlendirilir.

2.2.2. System / Powerplant Analiz Prosedürü

System / Powerplant için MSG3 analizi bakım görevleri ve bakım aralıkları için iteratif bir yaklaşım kullanır. Bir önceki bölümde iteratif olarak kullanılacak bakım görevleri detayı olarak açıklanmaktadır. Bu yaklaşımda her bir Maintenance Significant Item (MSI) için mevcut teknik veriler ve montaj/parça/ünite için Functional Failure (FF) ve Failure Cause (FC) değerlendirilir. Bu aşamada bu kavramları açıklamak doğru olacaktır.

- **Maintenance Significant Item (MSI):** Üretici tarafından tanımlanan ve arızası aşağıda belirtilen etkilere sahip parçalar olarak tanımlanır. İlerleyen bölümde alt başlıklar detaylı olarak açıklanacaktır.
- **Functional Failure (FF):** Bir öğenin belirtilen sınırlar içinde amaçlanan işlevini yerine getirememesi olarak tanımlanır.
- **Failure Cause (FC):** Fonksiyonel arızanın meydana gelme nedeni olarak tanımlanır.

Systems / Powerplant için logic diagram aşağıda iletilmektedir.



Şekil 1 System / Powerplant Analiz Akışı

2.2.3. MSI Seçimi

MSG3 System / Powerplant akışında ilk aşamada MSI (Maintenance Significant Item – Bakım Önemli Öğesi) seçimi yapmak gerekmektedir. Bunun için öncelikle Motor / Uçak için önemli sistem ve komponentlerin tanımlanması gerekmektedir. Service BOM tarzında bir yapı kurulması faydalı olacaktır.



MSI seçimi, bir önceki bölümde belirtilen, aşağıda iletilen 4 soru ile başlamaktadır. Bu dört sorudan birine evet cevabı verilen her parça / komponent MSI olarak tanımlanmaktadır. MSI seçimi aşağıdaki akışla ilerler.

- İlk adımda üretici uçak / motor'un majör fonksiyonel alanlarını tanımlar. Bu tanımlamalara ilave olarak tüm değişebilir parçaların (LRU, SRU gibi) tanımlanması gerekir.
- Örneğin; motor için komponent / sistem / aksesuar bazında tanımlama yapılabilir. (Yanma odası, ADK, vb. gibi)
- İkinci aşamada yukarıdan aşağı bir yaklaşım uygulanarak hangi item'lara MSI sorularının sorulacağı belirlenir. Burada amaç en üst seviyede item'ı belirleyebilmektedir. Mühendislik değerlendirmesi ile karar verilir.

Örneğin; ADK içerisinde bir dişli için item seviyesinde değerlendirme yapılırken MSI sorusunu ilgili dişlinin olduğu dişli grubuna, veya ADK ya sormak doğru bir yaklaşım olacaktır. Benzer şekilde bir yağ filtresi için değerlendirme filtre elemanı için değil, filtre ünitesi, hatta bazı durumlarda yağlama sistemi için yapılmalıdır.

- Üçüncü aşamada bir önceki bölümde belirtilen MSI soruları belirlenen item için sorulur. Sorulardan birine veya birkaçına verilecek evet cevabı parçayı aday MSI statüsüne sokacaktır. Bunlar;
 - a) Arıza, normal görevler sırasında Operasyon ekibi (pilot ve görevli personel, yer ekibi dahil değildir) tarafından tespit edilemeyebilir veya tespit edilmesi olası olmayabilir mi?
 - b) Arıza, emniyet/acil durum sistemleri veya ekipmanları da dahil olmak üzere, yerde veya uçuşta emniyeti etkileyebilir mi?
 - c) Arıza durumu önemli bir operasyonel etki oluşturur mu?
 - d) Arıza durumu önemli bir ekonomik etki oluşturur mu?
- Dördüncü aşamada aday MSI olarak tanımlanan item için genellikle bir üst seviye olarak tanımlanan (highest manageable level) sistem seçilerek belirlenir. İlerleyen aşamada bu belirlenen seviye için mantıksal akış diyagramı yapılacaktır.

Örnek olarak; yağ filtresinin bu kapsamda değerlendirildiği durumda filtre ünitesinin bağlı olduğu pompa sistemi aday MSI olarak belirlenmelidir. Eğer filtre sistemi pompaya ait değil, ayrı bir filtrasyon sistemine dahil olsaydı bu durumda filtrasyon sistemini aday MSI olarak değerlendirmek doğru olacaktır.

- Beşinci aşamada belirlenen MSI'lar aday MSI kategorisinde olacak şekilde üretici tarafından ISC (Industrial Steering Comitee)'ye sunulur. ISC bu aday MSI'ları değerlendirir ve WG (Working Group)'lara aktararak WG değerlendirmesine sunar.
- Altıncı aşamada WG tarafından değerlendirilen aday MSI'lar ISC tarafından onaylanarak MSI statüsünde kabul edilir. Bu aşamadan sonra Fonksiyon, Fonksiyonel Hata, Hata Etkisi ve Hata Nedeni (FFFFEFC) kısmına geçilir.

2.2.4. Fonksiyonel hata, hata modu ve etkilerinin tanımlanması

MSI listesi belirlendikten sonra ilgili MSI için fonksiyon, fonksiyonel hata, hata etkisi ve hata nedeni belirlenir. Bu süreçte FMECA analizinden girdileri eklemek (fonksiyonel FMECA) faydalı olacaktır. Kavramları açıklamak gerekir ise;

- Fonksiyon (lar); Item'ın normal karakteristik fonksiyonunu ifade eder.
- Fonksiyonel hata (lar); Item'ın amaçlanan görevini belirli sınırlar içerisinde yerine getirememesini durumunu ifade eder.
- Hata etkisi (leri); Fonksiyonel hatanın sonucunu ifade eder.

- Hata nedeni (leri); Fonksiyonel hatanın nedenini ifade eder.

Bu aşamada bir MSI için tanımlamaları yaparken tüm emniyet ekipmanlarını (sensörler, shut-off valve benzeri yapılar vb.) dikkate almak gerekmektedir. Bu tip itemlere ve fonksiyonlarına örnek vermek gerekir ise;

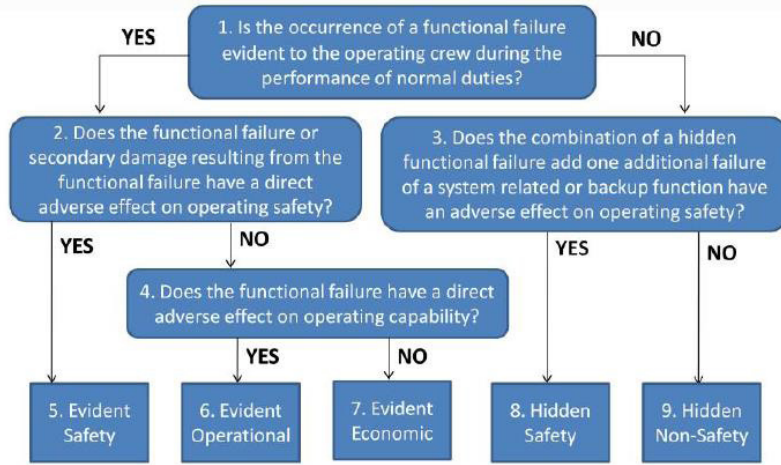
- Operasyon ekibi'nin dikkatini anormal duruma dikkat çekebilecek ekipman/sistemler (yüksek sıcaklık/titreşim durumunu pilot'a bildiren sistemler vb.)
- Hata durumunda item'i durdurmak, kapatmak (emergency shut of valve vb. ekipmanlar)
- Hata durumunda oluşacak anormal durumu ortadan kaldırmaya ya da etkisini hafifletebilecek (platformda bulunan yangın söndürme sistemleri vb. sistemler)
- Hata durumunda hatalı fonksiyonun yerini alan bir fonksiyona sahip (yedeklilik sağlayan sistemler, dual ECU vb. sistemler)

Emniyet ekipmanlarının tanımlaması yapılırken emniyet ekipmanın fonksiyonunu gerçekleştirmesinin öncül ve ardıl durumu da ifade edilmelidir. Örneğin; "sistem x basıncının 100 bar'ı aşması halinde emniyet valfi açılır" vb. gibi.

Eğer oluşabilecek bir hata durumu yapısal bütünlüğü bozuyor ise, bu hata yapısal çalışma grubuna incelenmek üzere aktarılır. Örneğin; yük limitleme sistemi arızaları, hidrolik kaçakları veya bleed havası kaçakları gibi.

2.2.5. Level – 1 Analiz (Fonksiyonel Etkilerin Sınıflandırılması)

Fonksiyon, fonksiyonel hata, hata etkisi ve hata nedeni belirlendikten sonra ilk aşama olan Level 1 analiz adımı gerçekleştirilir. Burada her bir fonksiyon ve fonksiyonel hata için analiz gerçekleştirilerek ilgili fonksiyonel hatanın sınıflandırılması yapılır. İlgili görsel aşağıda iletilmektedir.



Şekil 2 Level – 1 Analizi (Fonksiyonel Etkilerin Sınıflandırılması)

Level – 1 kapsamında MSI'lara sorulması gereken sorular sırası ile aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.

1. IS THE OCCURRENCE OF A FUNCTIONAL FAILURE EVIDENT TO THE OPERATION EKIBİ DURING THE PERFORMANCE OF NORMAL DUTIES?

Bu soru ile amaçlanan, olası bir failure durumunda operasyon ekibi tarafından farkedilebilir olup olmamasıdır. Böylelikle olası bir hatanın gizli mi (hidden) yoksa evident (belirgin) mı olup olmadı belirlenmiş olur. Operasyon ekibi, yani uçuş ekibinden kasıt kabin personeli ve pilotlardan oluşmaktadır. Rutin olarak operasyonu gerçekleştiren personel kastedilmektedir. Yer/Bakım personeli bu kapsama dahil değildir.



Bu soruya verilecek evet cevabı sonrasında MSI'a 2. Soru sorulur. Hayır cevabında ise 3. Soru ile analiz devam etmektedir.

Not: Eğer birinci soru sürekliliği olmayan bir fonksiyona sahip bir MSI'a soruluyor ise belirli kabuller dahilinde soru cevaplanır. Sonrasında bu kabuller kayıt altına alınarak ileride doğrulama için saklanır. (Örneğin yangın söndürme sisteminin MSI olduğu bir senaryoda hangi sıklıkta bu sensörün çalışacağı kabulü yapılır, ardından çalışmadığı senaryo için analize devam edilir.)

Not: Operasyon ekibi için normal görevler genellikle "operating manual" adı verilen dökümanlarda bakım el kitapları kapsamında belirtilir. Analiz yapılırken normal operasyon esnasında hata durumu farkedilebilir mi sorusuna cevap verilirken normal operasyon kapsamı için bu döküman dikkate alınmalıdır. Operasyon ekibinden normal bir operasyon esnasında beklenmeyen bir görev/farkındalık bu soru kapsamında beklenmez. Bu durumda ilk soru için cevap hidden olarak belirlenmelidir. Eğer MSG3 analizi yapılırken bu döküman mevcut değil ise, belirli kabuller ile analiz gerçekleştirilir ve kayıtlar saklanır. Operating manual yayımından sonra analiz tekrar değerlendirilerek güncellenir. Bu bağlamda analiz sonucunda bir hata durumu için operasyon ekibi için farkındalık gerekliliği ortaya çıkabilir. Bu durumda analizi güncellemek gerekecektir.

2. DOES THE FUNCTIONAL FAILURE OR SECONDARY DAMAGE RESULTING FROM THE FUNCTIONAL FAILURE HAVE A DIRECT ADVERSE EFFECT ON OPERATING SAFETY?

İlk soru için evet yanıtı verilmesi durumunda (evident failure) MSI'a ikinci soru sorulur. Bu soru ile hata durumunun ya da hatanın sebep olduğu ikincil bir hasarın (secondary damage) uçuş emniyeti için direk olumsuz bir operasyonel etki oluşturup oluşturmadığı sorulur. Bu soru ile belirgin bir hata durumunun emniyet veya operasyonel/ekonomik etkiye sahip olup olmadığı belirlenmiş olur.

Bu soruya verilen evet cevabı MSI'ı CAT 5 – Evident Safety kategorisine sokacaktır. Hayır cevabı sonrasında parçaya 4. Soru sorulacaktır.

Not: İkinci soruda geçen, sırası ile direk etki, emniyet olumsuz etki, ve operasyonel etki kavramlarını açıklamak gerekmektedir. Bunlar;

- Direk etki; bu tanımlama ile fonksiyonel bir hatanın veya bu hatadan ötürü ortaya çıkan ikincil bir hasarın oluşturduğu etki tanımlanmaktadır. Başka bir hata veya ikincil bir hata ile kombinasyon ile ortaya çıkan hatalar bu kapsama girmemektedir. (yedeklilik durumu kapsam dışındadır)
- Emniyet olumsuz etki; arıza durumunda hava taşıtının emniyetli bir şekilde uçuşu ve inişinin engellendiği, yolcular için ciddi veya ölümcül yaralanmalara sebep olabilecek durumlar bu kapsamda değerlendirilmektedir. (Örneğin; hazardous veya catastrophic etki değerlendirmesine sahip MSI'lar genellikle bu kapsamda değerlendirilmektedir.)
- Operasyonel etki; yolcuların ve uçuş ekibinin uçuş amaçlı hava taşıtında bulunduğu süre aralığında gerçekleşebilecek etkiler operasyonel etki olarak değerlendirilmektedir. (Örneğin; hava taşıtının operasyon dışında bakım fazı, motorlar için ağır bakım sonrası test fazları bu kapsamda değerlendirilmemektedir.)

3. DOES THE COMBINATION OF A HIDDEN FUNCTIONAL FAILURE AND ONE ADDITIONAL FAILURE OF A SYSTEM RELATED OR BACKUP FUNCTION HAVE AN ADVERSE EFFECT ON OPERATING SAFETY?

İlk soru için hayır cevabı verilmesi durumunda gizli fonksiyonel hata olarak tanımlanan ilgili MSI'ya 3. soru sorulur. Bu soruda gizli bir fonksiyonel hata ile birlikte başka bir hatanın (sistem ile ilişkili veya bir backup fonksiyonu ile alakalı) uçuş emniyeti için olumsuz bir operasyonel etki oluşturup oluşturmadığı sorulur. Gizli bir fonksiyonel hatanın tek başına etkilemesi dikkate alınmaz. Verilen cevap evet ise MSI CAT 8 – Hidden Safety olarak tanımlanır, hayır ise CAT 9 – Hidden nonSafety olarak tanımlama yapılır.

Not: Koruma fonksiyona sahip cihazların koruma fonksiyonunu engelleyebilecek gizli fonksiyonel arızaları için ek arıza, sistemin veya ekipmanın bu fonksiyonunun tasarlandığı olaydır. Yani bu tip cihazların hata durumlarında, tasarlandıkları tespit veya engelleme amacıyla fonksiyonlarının kaybı ikincil fonksiyona örnek teşkil etmektedir. Bu duruma ilave olarak eğer koruma/emniyet sistemi yedekli, fakat hata durumunda yedeklilik sistemi devreye giriyor fakat ilk hata gizli kalmaya devam ediyor ise 3.soruya evet olarak cevap verilmelidir.

Örneğin; Surge koruma fonksiyonuna sahip bir bleed valfte oluşabilecek bir hata ile, hava taşıtının surge'e girme durumu birleştiğinde bu durumum 3.soru için evet cevabı verilmesine neden olacaktır.

4. DOES THE FUNCTIONAL FAILURE HAVE A DIRECT ADVERSE EFFECT ON OPERATING CAPABILITY?

2. soruya verilen hayır cevabının ardından 4. Soru sorulur. Bu soru ile MSI'nın fonksiyonel hata durumunda operasyonel kabiliyet üzerinde doğrudan olumsuz bir etkiye sahip olup olmadığı değerlendirilir. Operasyonel kabiliyet etkisi;

- Uçuş öncesinde operasyon kısıtlamalarının veya düzeltmelerin uygulanmasını gerektiren; veya
- Uçuş ekibinin anormal veya acil durum prosedürleri kullanmasını gerektiren

olarak tanımlanır.

Not: Bir failure'ın operasyon kabiliyeti üzerinde etkisinin olup olmadığının değerlendirilmesi her durumda mümkün olmayabilir. Operasyon kabiliyetini tarif eden dökümanlar (MMEL, Operating manual vb. gibi) analiz yapıldığı esnada hazırlanmamış olabilir. Bu durumda belirli kabuller / varsayımlar ile analiz gerçekleştirilebilir. Kabuller / varsayımlar kayıt altına alınmalı, ilgili dökümanlar yayınladıktan sonra yapılan analizler doğrulanmalıdır.

Bu soruya verilen cevap evet ise MSI CAT 6 – Evident Operational, hayır ise CAT 7 – Evident Economic olarak tanımlanır.

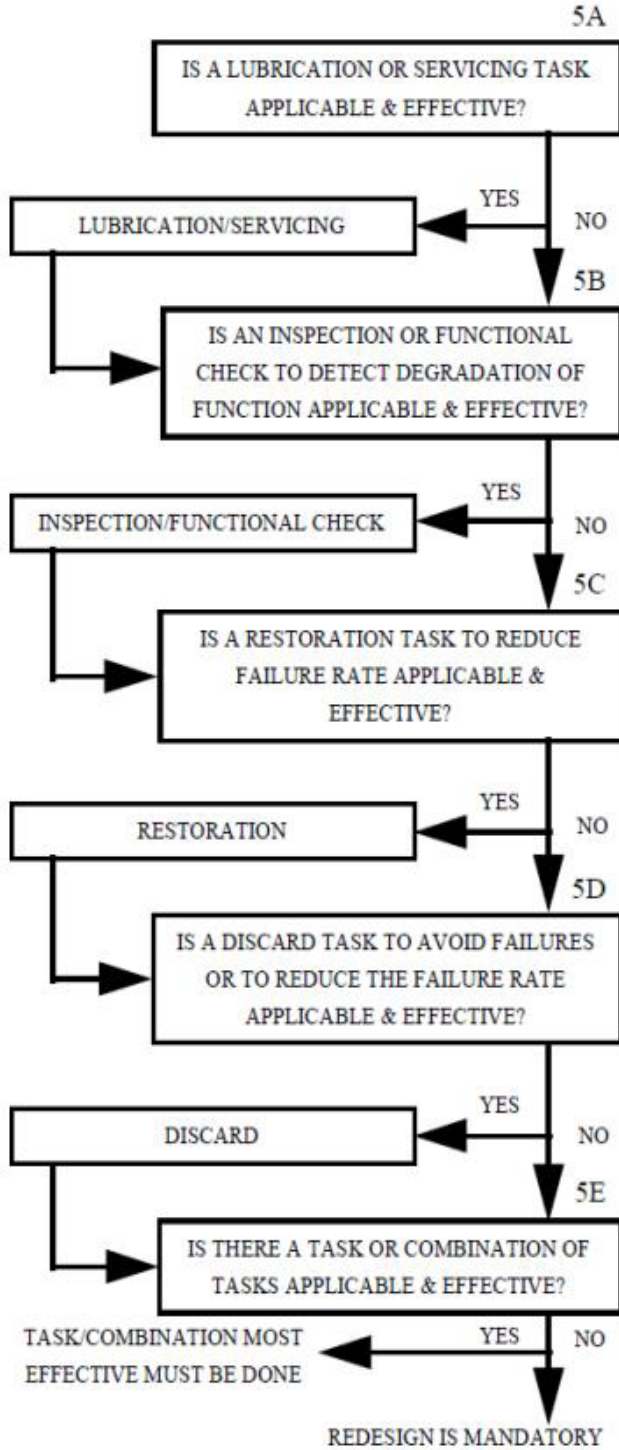
2.2.6. Level – 2 Analiz (Bakım görevlerinin oluşturulması)

Tüm MSI'lar için hata etkilerine göre kategorizasyon yapıldıktan sonra her bir kategori için farklı bir görev akışı ile bakım görevleri oluşturulmaktadır. Bakım görev akışları ve detaylar alt başlıkta belirtilmektedir.



➤CAT 5 – Evident Safety

Evident Safety (Belirgin emniyet) kategorisinde olan bir MSI için oluşturulacak bakım görevlerinin amacı emniyetli bir operasyonu sağlamak olmalıdır. Bu kategoride akışta bulunan tüm sorular sorulur. Eğer efektif bir task atanamamış ise tasarımda değişiklik yapmak gerekmektedir. Soru akışı aşağıda iletilmektedir.



Bu kategoride belirtilen tüm bakım görevlerinin güvenilir operasyon için hata oranını düşürmesi amaçlanmalıdır.

Lubrication / Servicing

Tasarım özelliklerinin korunması amacıyla gerçekleştirilen herhangi bir Lubrication/ Servicing işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bakım görevinin güvenilir çalışmayı garanti altına almak için riski düşürmesi beklenmektedir.

Inspection / Functional Check

Bakım görevinin arızaya giden süreçte parçada hataya olan direnç düşümünü tespit etmesi beklenmektedir. Aynı zamanda bozulma durumu ile tutarlı bir bakım aralığı tanımlanması gereklidir.

Restoration

Bakım görevinin parçayı belirli standarta getirmesi beklenir. Restoration görevi bir parçanın veya ünitenin temizliği veya tamamen değişimi olabilir. Bakım görevi tüm bu detayları içermelidir. Parçanın tanımlanabilir bir ömür içerisinde bozulma göstermesi beklenmektedir ve bakım görevi ile parçayı belirli bir standarta döndürmek mümkün olmalıdır.

Discard

Bakım görevinin belirlenen bir zaman limitinde değiştirilmesi tanımlanmaktadır. Discard görevleri genellikle tekil kullanımlı parçalara (kartuş, tip, silindir, disk vb) uygulanmaktadır. Parçanın tanımlanabilir bir ömür içerisinde bozulma göstermesi beklenmektedir.

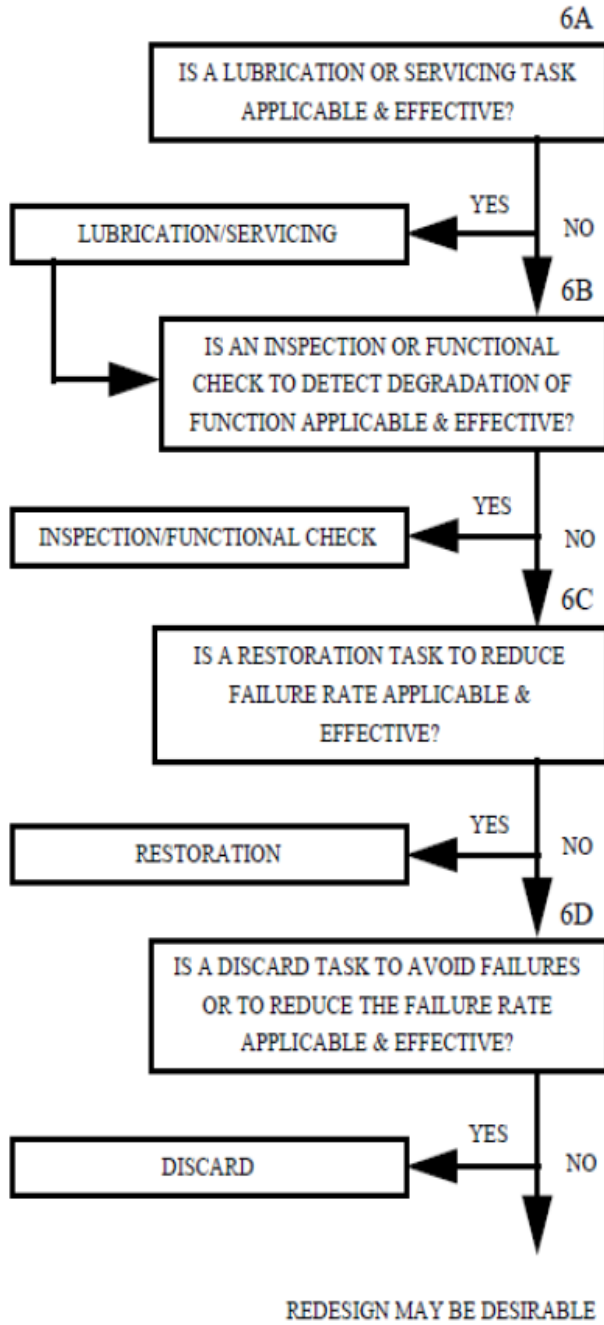
Combination

Safety kategorindeki parçalar için tüm tasklar, bir task seçimine bağlı olmaksızın değerlendirilmelidir. Ardından en efektif görev / görev kombinasyonları uygulanmalıdır.

Şekil 3 CAT 5 – Evident Safety Bakım Görev ve Detayları

□CAT 6 – Evident Operational

Evident Operational (belirgin operasyonel) kategorisinde olan bir MSI için oluşturulacak bakım görevlerinin amacı hata riskini kabul edilebilir bir seviyeye çekmek olmalıdır. Akış Lubrication / Servicing sorusu ile başlar, verilen cevaptan bağımsız olarak sonraki sorular ile devam eder. İlk sorudan sonra sorulacak sorulara verilecek bir evet cevabı ile akış sonlanır. Eğer hiçbir soruya evet cevabı verilemez ise ve aynı zamanda hata durumunun sebep olacağı operasyonel etkiler şiddetli ise yeniden tasarım yapılması önerilmektedir.



Bu kategoride belirtilen tüm bakım görevlerinin hata riskini kabul edilebilir bir seviyeye çekmesi beklenmektedir.

Lubrication / Servicing

Tasarım özelliklerinin korunması amacıyla gerçekleştirilen herhangi bir Lubrication/ Servicing işlemi olarak tanımlanmaktadır.

Inspection / Functional Check

Bakım görevinin arızaya giden süreçte parçada hataya olan direnç düşümünü tespit etmesi beklenmektedir. Aynı zamanda bozulma durumu ile tutarlı bir bakım aralığı tanımlanması gereklidir.

Restoration

Bakım görevinin parçayı belirli standarta getirmesi beklenir. Restoration görevi bir parçanın veya ünitenin temizliği veya tamamen değişimi olabilir. Bakım görevi tüm bu detayları içermelidir. Parçanın tanımlanabilir bir ömür içerisinde bozulma göstermesi beklenmektedir ve bakım görevi ile parçayı belirli bir standarta döndürmek mümkün olmalıdır.

Discard

Bakım görevinin belirlenen bir zaman limitinde değiştirilmesi tanımlanmaktadır. Discard görevleri genellikle tekil kullanımlı parçalara (kartuş, tip, silindir, disk vb) uygulanmaktadır. Parçanın tanımlanabilir bir ömür içerisinde bozulma göstermesi beklenmektedir.

Combination

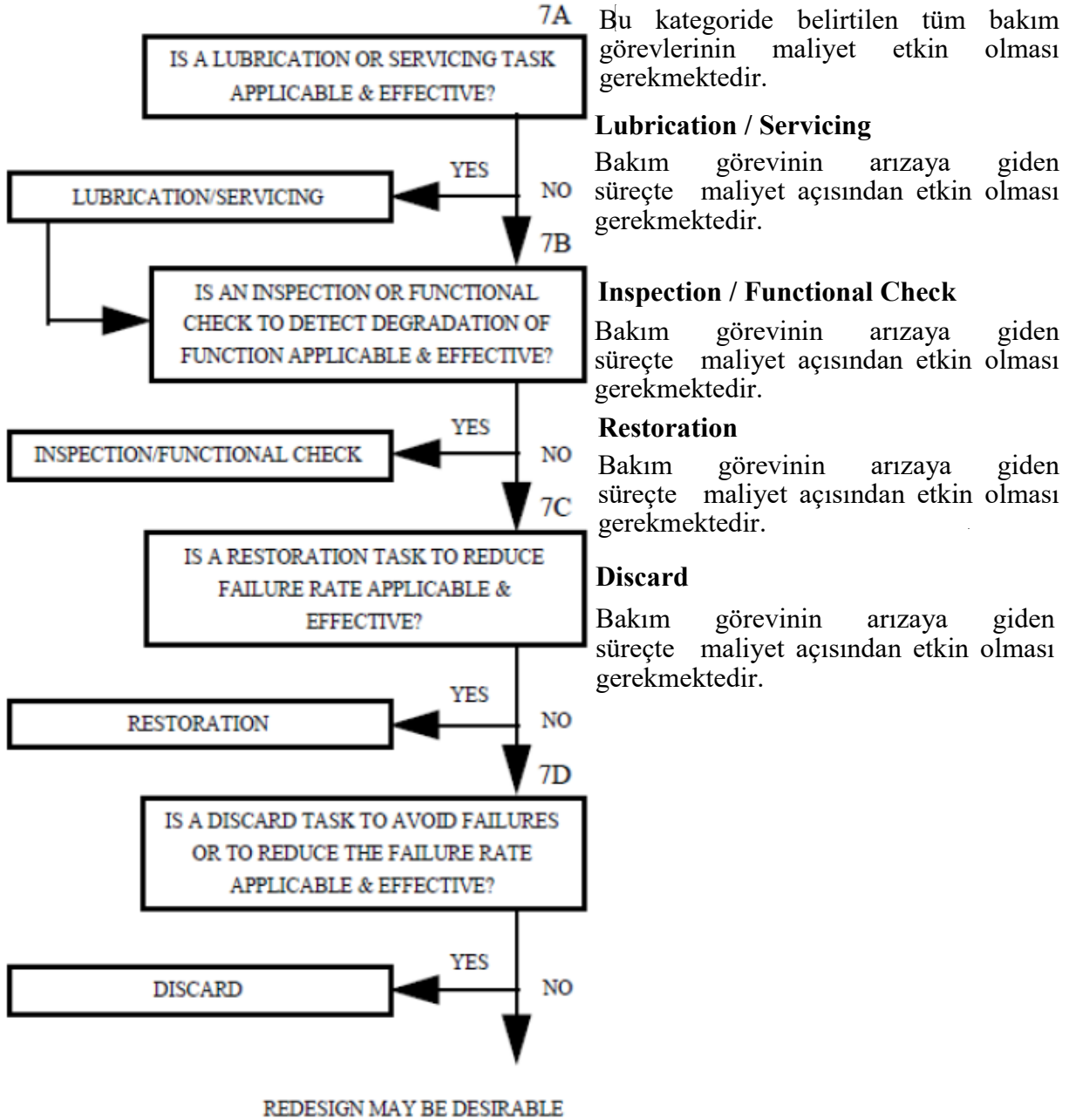
Safety kategorisindeki parçalar için tüm tasklar, bir task seçimine bağlı olmaksızın değerlendirilmelidir. Ardından en efektif görev / görev kombinasyonları uygulanmalıdır.

Şekil 4 CAT 6 – Evident Operational Bakım Görev ve Detayları



➤CAT 7 – Evident Economic

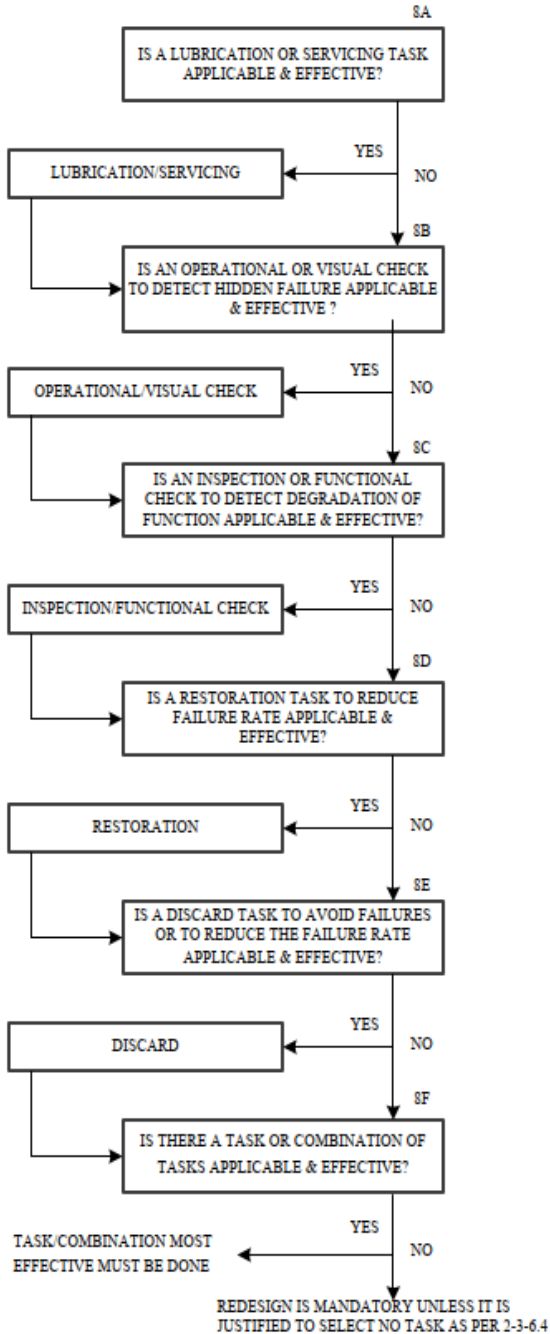
Evident Economic (belirgin ekonomik) kategorisinde olan bir MSI için oluşturulacak bakım görevlerinin, görevi gerçekleştirme maliyeti potansiyel olarak ortaya çıkacak hata durumunun sebep olacağı maliyetten daha düşük ise yapılması doğru olacaktır. Bakım görevinin etkinliği, uçağın kullanım ömrü boyunca tekrarlayan arıza ve onarımların ekonomik olarak etkisi belirlenerek yapılmalıdır. Akış Lubrication / Servicing sorusu ile başlar, verilen cevaptan bağımsız olarak sonraki sorular ile devam eder. İlk sorudan sonra sorulacak sorulara verilecek bir evet cevabı ile akış sonlanır. Eğer hiçbir soruya evet cevabı verilemez ise ve aynı zamanda hata durumunun sebep olacağı ekonomik etkiler şiddetli ise yeniden tasarım yapılması önerilmektedir.



Şekil 5 CAT 7 – Evident Economic Bakım Görev ve Detayları

➤CAT 8 – Hidden Safety

Hidden Safety (gizli emniyet) kategorisinde olan bir MSI için oluşturulacak bakım görevlerinin amacı, birden fazla hata durumunun sebep olacağı emniyet riskli durumdan kaçınmak olmalıdır. Akışta bulunan tüm sorular sorulmalıdır. Eğer hiçbir soruya evet cevabı verilemiyor ve geçerli bir dengeleyici tasarım unsuru (örneğin otomatik başlatılan bir test, bir koruma fonksiyonu, bir tespit fonksiyonu vb) yeniden tasarım yapılması zorunludur. Eğer bir tespit fonksiyonu, yeteneği dikkate alınıyor ise bu işlevin yeteneği de MSI içinde dikkate alınmalıdır. (MSI kapsamı fonksiyonu sağlayan sistem, ünite ve koruma fonksiyonu ile birlikte değerlendirilebilir).



Bu kategoride belirtilen tüm bakım görevlerinin güvenilir operasyon için hata oranını düşürmesi amaçlanmalıdır.

Lubrication / Servicing

Tasarım özelliklerinin korunması amacıyla gerçekleştirilen herhangi bir Lubrication/ Servicing işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bakım görevinin güvenilir çalışmayı garanti altına almak için riski düşürmesi beklenmektedir.

Operational Check

Bakım görevinin çoklu arıza riskini azaltmak için gizli işlevin yeterli kullanılabilirliğini sağlamalıdır.

Visual Check

Bakım görevinin güvenilir bir çalışma için gerekli bir işlevin mevcut olduğunu ve birden fazla arıza riskini azalttığını gösteren bir bileşenin durumunu doğrulamalıdır.

Inspection / Functional Check

Bakım görevinin arızaya giden süreçte parçada hataya olan direnç düşümünü tespit etmesi beklenmektedir. Aynı zamanda bozulma durumu ile tutarlı bir bakım aralığı tanımlanması gereklidir.

Restoration

Bakım görevinin parçayı belirli standarta getirmesi beklenir.

Discard

Bakım görevinin belirlenen bir zaman limitinde değiştirilmesi tanımlanmaktadır. Discard görevleri genellikle tekil kullanımlı parçalara (kartuş, tip, silindir, disk vb) uygulanmaktadır. Parçanın tanımlanabilir bir ömür içerisinde bozulma göstermesi beklenmektedir.

Combination

Safety kategorindeki parçaları için tüm tasklar, bir task seçimine bağlı olmaksızın değerlendirilmelidir. Ardından en efektif göre / görev kombinasyonları uygulanmalıdır.

Şekil 6 CAT 8 – Hidden Safety Bakım Görev ve Detayları

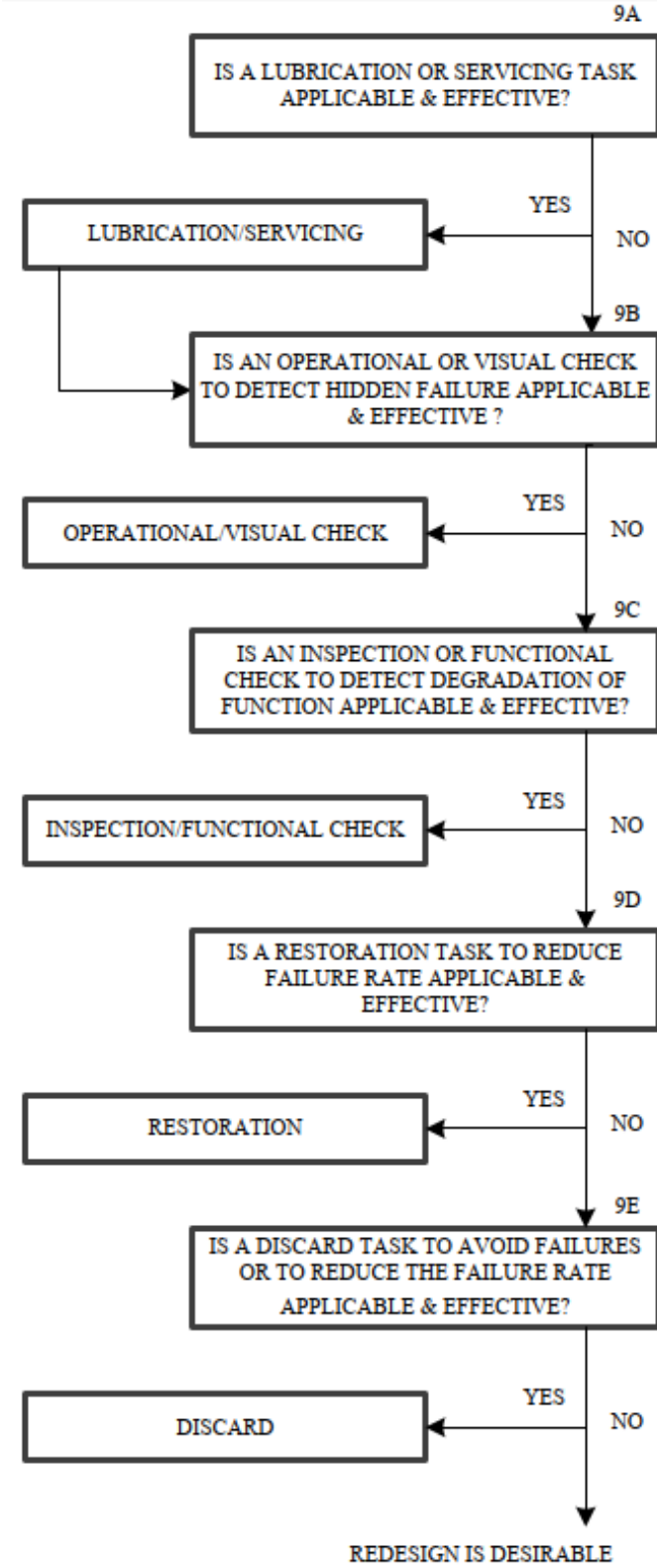


➤CAT 9 – Hidden NonSafety

Hidden NonSafety (gizli emniyet dışı) kategorisinde olan bir MSI için oluşturulacak bakım görevlerinin amacı, çoklu hata durumlarının operasyonel ve ekonomik etkilerinden kaçınmak olmalıdır. Bakım görevinin seçiminde hem operasyonel hem de maliyet etkinliği dikkate alınır.

- Operasyonel etkiyi uçağın/motorun çoklu hata durumunda operasyon üzerindeki anlık sonuçlar ile sınırlı olarak değerlendirmek gerekir. Örneğin;
 - Uçağın/motorun hata durumunun faaliyet gösterdiği altyapı üzerindeki etkisi (örneğin; havaalanı, veya hava sahasındaki aksaklıklar)
 - Uçuş programında meydana gelebilecek etkiler (örneğin; yolcular için yeniden planlama, konaklama vb. operasyonel durumlar)
 - Spesifik operasyonlar (kargo taşıması vb. gibi)
 - Arıza durumunda parça/personel ihtiyacının uzak bir havaalanına gönderilmesi/ gelmesi durumu
- Ekonomik etki değerlendirmesi bir bakım görevini tekrar tekrar gerçekleştirmenin maliyetinin, o uçakta/motorda önlenen potansiyel olarak tekrar eden işlevsel arızanın (yani bir işlevin kaybı) veya arıza etkisinin (örneğin artan yakıt tüketimi) maliyetinden daha az olup olmadığının hesaplanmasıyla yapılır. Değerlendirme, görevi gerçekleştirmenin maliyetini (malzeme ve işçilik maliyetiyle sınırlı) arıza etkisinin maliyetiyle ve arızası planlı bakımla önlenebilecek bir bileşeni onarma veya değiştirme maliyetiyle nitel olarak karşılaştıracaktır. Görev etkinliğinin belirlenmesi, tipik bir uçağın/motorun tüm ömrü boyunca tekrarlanan görev performansı ve potansiyel olarak tekrarlanan arızalar dikkate alınarak yapılmalıdır.

Akış Lubrication / Servicing sorusu ile başlar, verilen cevaptan bağımsız olarak sonraki sorular ile devam eder. İlk sorudan sonra sorulacak sorulara verilecek bir evet cevabı ile akış sonlanır. Eğer hiçbir soruya evet cevabı verilemez ise ve aynı zamanda hata durumunun sebep olacağı ekonomik ve operasyonel etkiler şiddetli ise yeniden tasarım yapılması önerilmektedir.



Bu kategoride belirtilen tüm bakım görevlerinin maliyet etkin olması gerekmektedir.

Lubrication / Servicing

Bakım görevinin arızaya giden süreçte maliyet açısından etkin olması gerekmektedir.

Operational Check

Bakım görevinin birden fazla arızanın ekonomik etkilerinden kaçınmak için gizli işlevin yeterli kullanılabilirliğini sağlamalı ve maliyet açısından etkin olmalıdır.

Visual Check

Bakım görevinin birden fazla arızanın ekonomik etkilerinden kaçınmak için gizli işlevin kullanılabilirliğini gösteren bir bileşenin durumunu doğrulamalı ve maliyet açısından etkili olmalıdır.

Inspection / Functional Check

Bakım görevinin arızaya giden süreçte maliyet açısından etkin olması gerekmektedir.

Bakım görevinin arızaya giden süreçte maliyet açısından etkin olması gerekmektedir.

Discard

Bakım görevinin arızaya giden süreçte maliyet açısından etkin olması gerekmektedir.

Şekil 7 CAT 9 – Hidden NonSafety Bakım Görev ve Detayları



3. Sonuçlar ve Yorumlar

Bu çalışmada MSG3 analizinin nasıl yapılacağı ATA MSG3 Volume 2 (Rotorcraft) kaynak dökümanı üzerinden ve özgün motorlar geliştiren bir havacılık firması örnekleri ile tarif edilmiştir. RCM analizi temelli bir analiz olan MSG3 analizi sektörel bir bakış ifade etmesi sebebiyle klasik RCM metodolojisinden farklılaştırılmıştır. MSG3 analizi RCM metodolojisine emniyet temelli sektörel bir bakış açısı sunması açısından önemlidir.

Havacılıkta bakım programları parçaların/sistemlerin güvenilirlik seviyelerini kabul edilebilir seviyede tutmayı ve hava aracının operasyon ömrü boyunca emniyetli uçuşunu sağlamasını hedeflemektedir. Bu noktada bakım programlarının etkinliği çok önem kazanmaktadır. Ayrıca bakım programlarının verimliliği hazır bulunuşluk oranını ve bakım maliyetlerini de etkilemektedir. Bu durumda bakım programlarının hangi bilgi ve değerlendirmeler neticesinde belirlendiğini ve bu değerlendirmeler üzerinde sürekli iyileştirme yapılabileceğini de bilmek gerekir. Sonuç olarak MSG3 metodunu kullanmak etkin ve verimli bir bakım programı oluşturmak için dünyada havacılık otoritelerince kabul görmüştür ve kullanılmaya devam edilmektedir.

4. Referanslar

ATA MSG3 Volume 2 (Rotorcraft), Revision 2018.1, Airlines for America.

David Lapesa Barrera. Aircraft Maintenance Programs. S.L., Springer, 2022.

Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Engines, (CSE), Amendment 8, EASA, 2024.

International Maintenance Review Board Policy Board (IMRBPB) Issue Paper 143 (IP) Title: Definition of Visual Check. 2014.

International Maintenance Review Board Policy Board (IMRBPB) Issue Paper 216 (IP) Title: Clarifying the definition of Lubrication and Servicing. 2024.

International Maintenance Review Board Policy Board (IMRBPB) Issue Paper 122 (IP) Title: Clarification of Definitions for General Visual (GVI), Detailed (DET), and Special Detailed (SDI) Inspections. 2012.

Easy Access Rules for Airworthiness and Environmental Certification (Regulation (EU) No 748/2012). EASA, 2021.

Pompa Debi Anomalilerin Lstm ile Tespiti ve Kestirimci Bakım Uygulamaları

Detection of Pump Flow Anomalies Using Lstm and Applications in Predictive Maintenance

Armağan AKYURT, Sencer SULTANOĞLU

Eliar Elektronik San A.Ş.

e-posta: armagan.aykurt@eliar.com

Özet

Bu çalışma, tekstil endüstrisindeki kullanılan makinelerde pompa debisinin performansını izlemek ve anomali tespiti yapıp kestirimci bakıma yönelik sonuçlar oluşturmak amacıyla geliştirilmiş bir çözümdür. Çalışmada, motor çalışmaya başladığında pompa hızının artmasıyla birlikte debi değerlerinin yükseldiği ve işlem sonuna doğru azaldığı süreçler analiz edilmiştir. Problemin odak noktası, pompa hızının maksimum seviyede olduğu dönemlerde debide meydana gelen beklenmedik düşüş ve dalgalanmalardır. Bu durumun tespiti için LSTM (Long Short-Term Memory) tabanlı bir model geliştirilmiştir. Veri hazırlığı aşamasında, eksik değerler interpolasyon yöntemiyle tamamlanmış, debi ölçümlerindeki gecikmeler dikkate alınarak analizler pompa hızının maksimum olduğu an sonrası için gerçekleştirilmiştir. Küçük transfer işlemleri ve hatalı ölçümler veri setinden çıkarılmış, ayrıca anlık debi değerleri yerine son bir saniyelik ortalama değerler kullanılarak ölçüm hassasiyeti artırılmıştır. Model, 256 ve 128 hücreli iki LSTM katmanı ile eğitilmiştir. Anomaliler, tahmin edilen ve gerçek debi değerleri arasındaki farkın küpünün ortalaması alınarak belirlenmiştir. Tespit edilen anomaliler SQL veritabanına kaydedilmiş ve günlük periyodik analizlerle takip edilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen yöntem sayesinde pompa performansındaki beklenmedik değişimler önceden tespit edilmiş, ekipman arızalarının ve üretim aksaklıklarının önüne geçilerek kestirimci bakım uygulamalarına katkı sağlanmıştır. Böylece genel sistem verimliliği ve güvenilirliği artırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Derin Öğrenme, LSTM, Anomali Tespiti, Kestirimci Bakım, SQL



Abstract

This study presents a solution developed to monitor pump flow performance in textile machinery, detect anomalies, and provide insights for predictive maintenance. The analysis focused on the operating cycle, where pump flow rises with motor acceleration and decreases toward the end of the process. The critical challenge addressed is the occurrence of unexpected drops and fluctuations in flow when the pump operates at maximum speed. To detect such cases, a Long Short-Term Memory (LSTM) based model was developed.

During data preparation, missing values were interpolated, small transfers and faulty measurements were removed, and one-second averages were used instead of instantaneous flow values to improve measurement accuracy. Analyses were performed after the pump reached its peak speed to account for delays in flow measurements.

The model was trained with two LSTM layers containing 256 and 128 units. Anomalies were identified using the mean of cubed differences between predicted and actual flow values. Detected anomalies were stored in an SQL database and tracked through daily analyses.

The proposed method enables early detection of unexpected performance changes, preventing equipment failures and production interruptions, thereby improving overall system efficiency and reliability.

Keywords: Deep Learning, LSTM, Anomaly Detection, Predictive Maintenance, SQL

1. Introduction

The textile industry relies on continuous and stable operation of pumps to ensure efficient production. Variations in pump flow rate can signal early signs of equipment malfunction, making timely detection critical for preventing unplanned downtime. Traditional maintenance strategies, such as periodic inspections or reactive repair, often fail to address these issues effectively. Predictive maintenance, supported by data-driven anomaly detection, provides an alternative approach by monitoring system behavior in real time and anticipating failures before they occur.

In systems using a pump, flow rate typically increases with motor speed at the start of operation and gradually decreases towards the end of the process. The main challenge arises when unexpected drops or fluctuations occur during the period of maximum pump speed. Such anomalies may indicate wear, clogging, or other hidden mechanical issues. To capture these irregularities, this study develops and applies a Long Short-Term Memory (LSTM) based anomaly detection framework.

The approach involves several stages. First, raw sensor data are preprocessed by interpolating missing values, filtering faulty readings, and smoothing measurements with one-second averages. The prepared data are then used to train an LSTM network consisting of stacked layers with 256 and 128 units, optimized to capture temporal dependencies in pump flow behavior. Anomaly scores are derived from the deviation between predicted and observed values, which are then recorded in a structured SQL database. Daily automated scripts analyze these anomalies, enabling continuous monitoring and providing actionable insights into equipment health.

By systematically detecting deviations in pump performance, the method not only identifies operational anomalies but also creates a foundation for predictive maintenance practices. A rise in anomaly frequency can be interpreted as a signal that maintenance needs are approaching, allowing production teams to plan interventions proactively. This contributes to higher system reliability, reduced downtime, and improved operational efficiency across textile manufacturing processes.

2. Literature Review

Predictive maintenance has become a central focus in modern industry, aiming to minimize unplanned downtime and extend equipment lifetime. With the increasing availability of sensor data and industrial IoT systems, machine learning and deep learning methods have been widely adopted for fault detection, anomaly recognition, and remaining useful life (RUL) estimation. Among these, time-series oriented models such as Long Short-Term Memory (LSTM) networks and Transformer architectures have demonstrated strong capabilities in capturing temporal dependencies and complex degradation patterns in machinery data.

LSTM networks have been frequently used for predictive maintenance due to their ability to handle sequential data and long-term dependencies. Jiang integrated LSTMs within an IoT-based predictive maintenance framework to monitor industrial equipment and demonstrated improvements in early anomaly detection (Jiang, 2022). Similarly, Li and Li compared CNNs, LSTMs, and CNN-LSTM hybrids on sensor data from industrial systems, reporting that the CNN-LSTM hybrid achieved the best performance with an accuracy of 96.1% and an F1-score of 95.2%. These findings highlight the robustness of combining feature extraction with sequential modeling (Li & Li, 2025).

Recent work has also explored hybrid deep learning architectures. Bampoula et al. combined LSTM autoencoders with Transformer encoders for asset health forecasting, showing that the hybrid approach could capture both localized temporal features and global sequence dependencies (Bampoula, 2024). Maheshwari et al. presented a survey of predictive maintenance approaches and emphasized the value of LSTMs in extracting features directly from raw time-series data, reducing the reliance on manual preprocessing (Maheshwari et al., 2024).

Transformers have recently emerged as a competitive alternative to recurrent networks in predictive maintenance. Qi et al. introduced ITPM, a real-time predictive maintenance framework that leverages state-awareness and sequence prediction models built on Transformer architectures (Qi, Zhang, & Li, 2024). The system effectively identified equipment degradation



trends and forecasted potential failures. In the manufacturing domain, Poland et al. proposed Transformer Quantile Regression Neural Networks (TQRNNs) to predict machine failures in beverage production lines, which improved both prediction accuracy and production yield (Poland, Taylor, & Sankar, 2024). Mirzaeibonehkhater et al. enhanced Transformer performance with a Temporal Decomposition Attention mechanism, achieving 98.1% accuracy in bearing fault detection by effectively distinguishing trend and seasonal patterns (Mirzaeibonehkhater, Ghorbani, & Sanei, 2024). Furthermore, Nascimento et al. introduced T4PdM, a Transformer-based network designed specifically for rotating machinery, which achieved up to 99.98% accuracy on benchmark datasets (Nascimento, Silva, & Abreu, 2022).

Overall, the literature shows a clear evolution from traditional LSTM-based models to hybrid and Transformer-driven frameworks. While LSTMs remain effective for capturing sequential dependencies, Transformer architectures provide improved scalability and long-range attention mechanisms, making them increasingly suitable for complex industrial time-series applications. These studies underline the growing role of deep learning in predictive maintenance, particularly in detecting anomalies and forecasting failures in pump systems and other critical machinery.

3. Methodology

The proposed solution for pump flow anomaly detection and predictive maintenance is composed of four main stages: data preparation, model training, anomaly scoring, and daily monitoring.

3.1. Data Preparation

Each transfer cycle was identified through the ADW1_BR_Tartim_Yapiliyor signal, marking the start and end of a weighing process. Cycles where the pump motor did not reach nominal speed, or where pump velocity fell below zero (indicating cleaning), were excluded. Transfers shorter than three seconds were discarded to avoid incomplete cycles. Missing flow or velocity values were imputed by averaging adjacent readings. This ensured that only valid, representative transfers were used for model training and evaluation.

The dataset consists of pump flow rate ($Q(t)$) and motor speed ($N(t)$) recorded at one-second intervals. Preprocessing was necessary due to measurement noise and occasional missing entries. The distribution of the collected data across the various silos is visualized in Figure 1, showing a significant variation in the number of sequences available for each unit.

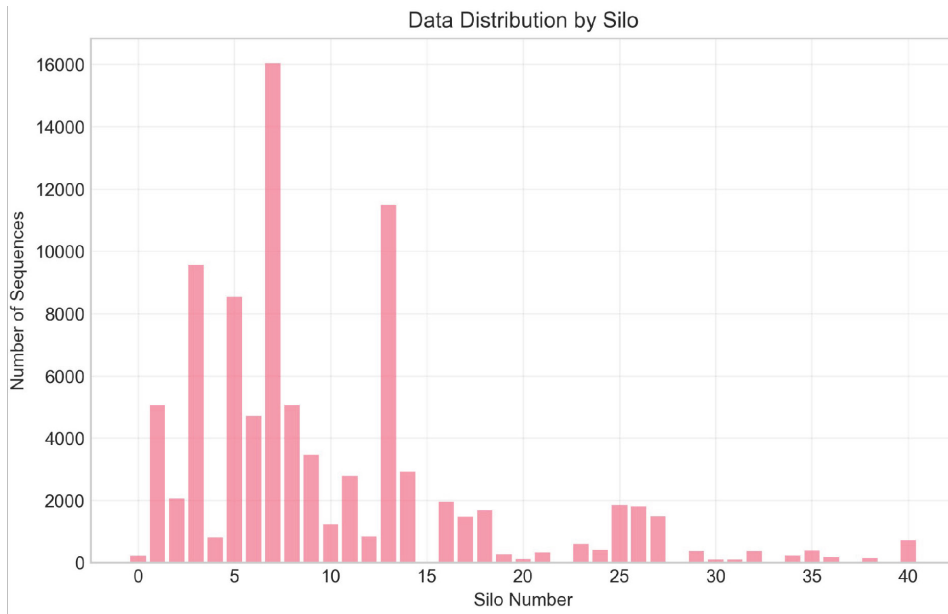


Figure 1. Data Distribution per Silo

3.1.1 Interpolation of Missing Values:

To address incomplete records, missing timestamps were handled using linear interpolation. In this approach, the flow value at a missing point is estimated as a weighted average of its neighboring observations. This method preserves the temporal continuity of the signal without introducing artificial fluctuations, ensuring that the reconstructed data remains representative of the underlying pump behavior. The mathematical formulation of interpolation is provided in Equation 1.

$$Q(t) = Q(t_1) + \frac{(Q(t_2) - Q(t_1))}{(t_2 - t_1)} \cdot (t - t_1), \quad t_1 < t < t_2 \quad (1)$$

3.1.2 Smoothing:

To reduce measurement noise and capture the underlying dynamics more accurately, instantaneous flow values were smoothed using a one-second moving average. This technique replaces each data point with the mean of its surrounding interval, suppressing short-term fluctuations while retaining trend information. The smoothing operation is shown in Equation 2.

$$\bar{Q}(t) = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} Q(t - i), \quad k = 1s \quad (2)$$

3.1.3 Outlier Removal:

Data points corresponding to small transfer operations or sensor errors were excluded to improve dataset reliability. These cases often introduced unrealistic spikes or drops in flow values that did not reflect actual pump behavior. By applying threshold-based filtering, such outliers were removed, ensuring that the model was trained on representative operating conditions. This step reduced noise and minimized the risk of false anomaly detection.

3.1.4 Synchronization:

Since flow readings lag slightly behind pump motor activity, analyses were synchronized to the time window following maximum pump speed. Aligning flow and motor dynamics in this way ensured that the model evaluated steady-state behavior rather than transitional fluctuations. This adjustment enhanced the precision of anomaly detection, allowing deviations to be attributed to pump performance rather than timing mismatches between sensors.

3.2. Model Training

The anomaly detection model was implemented as a stacked LSTM network composed of two recurrent layers with 256 and 128 units, followed by a dense output layer. The model was trained to predict pump flow sequences, enabling deviations between predicted and observed values to be used as anomaly indicators. Model optimization employed the Adam algorithm, and training was guided by the Mean Squared Error (MSE) loss function, defined in Equation 3:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Q(t) - \hat{Q}(t))^2 \quad (3)$$



To improve generalization, early stopping was applied, and the dataset was split into training and validation subsets. Hyperparameters such as learning rate and batch size were tuned empirically to achieve stable convergence. The final configuration successfully captured normal operating behavior and provided a reliable basis for anomaly scoring.

Training sequences were constructed using a sliding window of length 9, which allowed the model to capture short-term temporal dependencies. Model training used 100 epochs, a batch size of 256, and a validation split of 0.2. These hyperparameters were selected empirically based on stability during pilot tests.

The training was carried out using the `train_model.py` script, which automated dataset loading, batching, model optimization, and checkpoint storage.

3.3. Anomaly Detection and Scoring

During deployment, the trained LSTM generated predictions $\hat{Q}(t)$ for each incoming flow measurement $Q(t)$. Deviations between prediction and observation were quantified using a cubic error score. :

$$S(t) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T ((Q(t) - \hat{Q}(t))^3) \quad (4)$$

This cubic form penalizes larger deviations more strongly than squared error, making significant anomalies more detectable.

- If $S(t) > \theta$, where θ is a threshold based on the 95th percentile of historical errors, the point is labeled anomalous.
- Each anomaly event was logged into the SQL database, storing timestamp, cycle ID, and anomaly magnitude.

In addition, anomaly scores were aggregated at the transfer level, producing one average anomaly score per transfer. If the average score exceeded the threshold determined for that silo, the entire transfer was classified as anomalous. Metadata such as batch number and dye type were also linked to anomalies, enabling traceability in production records.

3.4. Automated Monitoring and Maintenance Integration

A scheduled monitoring job ingests the latest pump-cycle records from SQL, applies the trained LSTM to produce expected flow trajectories, and computes pointwise and cycle-level anomaly scores. These scores are aggregated into daily counts and rolling statistics per silo, which are compared against data-driven thresholds (calibrated from historical residuals). When the daily anomaly count A_d or its trend exceeds the alerting criteria—e.g., sustained increases over a multi-day window—the system issues email notifications to maintenance staff and records the event for traceability. The service resumes from the last processed transfer on each run, minimizing compute overhead, and is deployed for unattended operation via containerization and OS-level scheduling. In practice, a persistent rise in A_d is treated as an early sign of degradation, allowing maintenance to be planned before throughput or product quality is affected.

This pipeline enables **continuous anomaly trend tracking**. When the anomaly count per day (A_d) shows a consistent upward trend:

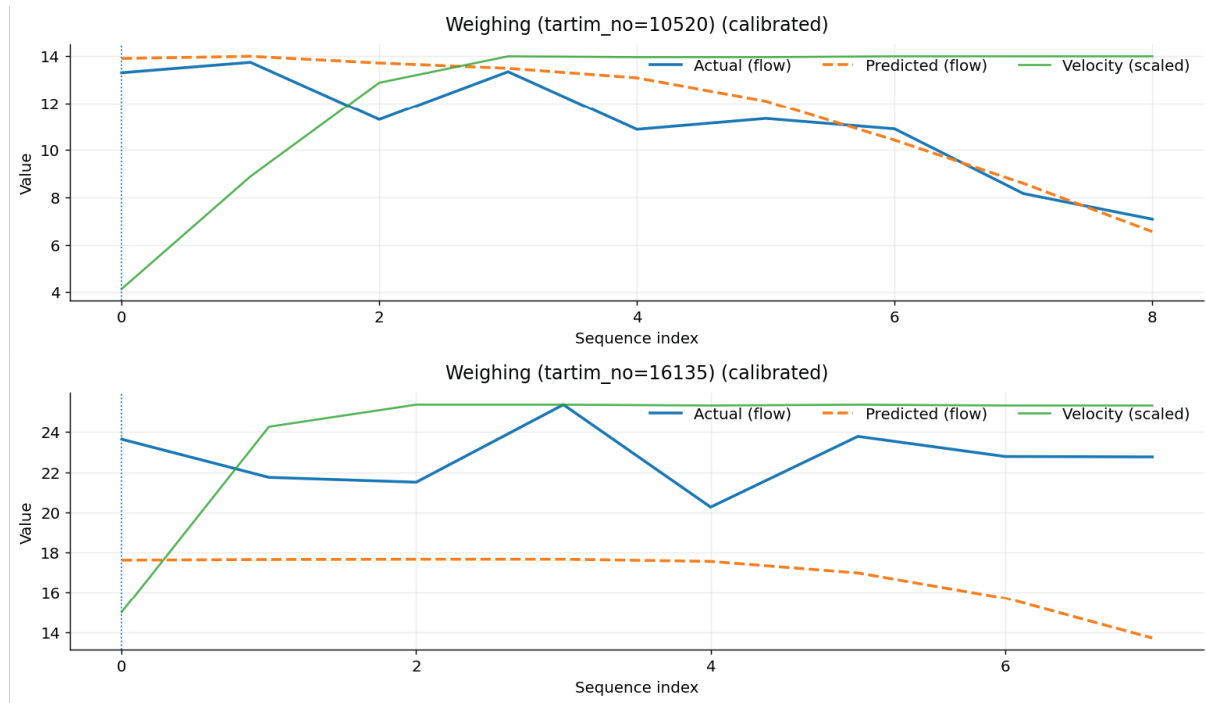
$$\Delta A_d = A_d - A_{d-1} > 0 \quad \text{for multiple consecutive days} \quad (5)$$

maintenance teams are notified that a degradation process may be underway, supporting predictive maintenance planning.

In deployment, anomaly detection was scheduled once per day. The system resumed from the last processed transfer (e.g., if one day covered transfers 10–100, the following day began at transfer 101). This rolling mechanism reduced computation and integrated naturally into factory operations. The entire pipeline was containerized with Docker and scheduled via Linux crontab, ensuring continuous unattended execution.

4. Results

The developed LSTM model was first evaluated on unseen pump cycles to assess its ability to replicate normal operating behavior. As demonstrated in Figure 2, the model's predictions closely followed the actual flow patterns during a normal cycle, particularly during the stable phase of maximum pump speed. In contrast, Figure 3 illustrates an anomalous cycle, where the model's prediction diverges significantly from the actual flow, highlighting its sensitivity to abnormal behavior and generating a high anomaly score. The mean squared error across test sequences was low, indicating that the network successfully captured the underlying dynamics of the pump process.



Figures 2 and 3. Comparison between a normal (Figure X) and an anomalous (Figure Y) pump.



When anomaly scores were calculated using the cubic error metric, the system produced distinct peaks corresponding to irregularities in the flow. Minor fluctuations resulted in near-zero scores, while significant deviations created strong anomaly responses. The correspondence between detected anomalies and recorded irregular events confirmed that the method was effective in distinguishing normal variability from true performance issues. The model's quantitative performance on the test set is summarized in Table 1. Key metrics, including a Mean Squared Error of 8.38 and an R2 Score of 0.768, confirm a strong predictive fit, with a low overall anomaly rate of 1.32% identified. Across all test cycles, over ninety percent of anomalies identified by the model were verified as genuine, with a limited false positive rate.

Table 1. Different Model Metrics

Metric	Value
Total Test Samples	89447
Mean Squared Error	8.38
Mean Absolute Error	1.901
R2 Score	0.768
Anomaly Rate	1.32%

Daily aggregation of anomaly counts provided further insights into equipment condition. Periods of steady operation were characterized by consistently low anomaly frequency, whereas gradual increases in anomaly counts indicated the onset of deterioration. In some cases, sharp rises in anomaly numbers aligned with logged disturbances, highlighting the system's ability to provide early warning signals. Anomaly rate per silo and overall distribution of anomaly scores (Residuals) are shown in figures 4 & 5.

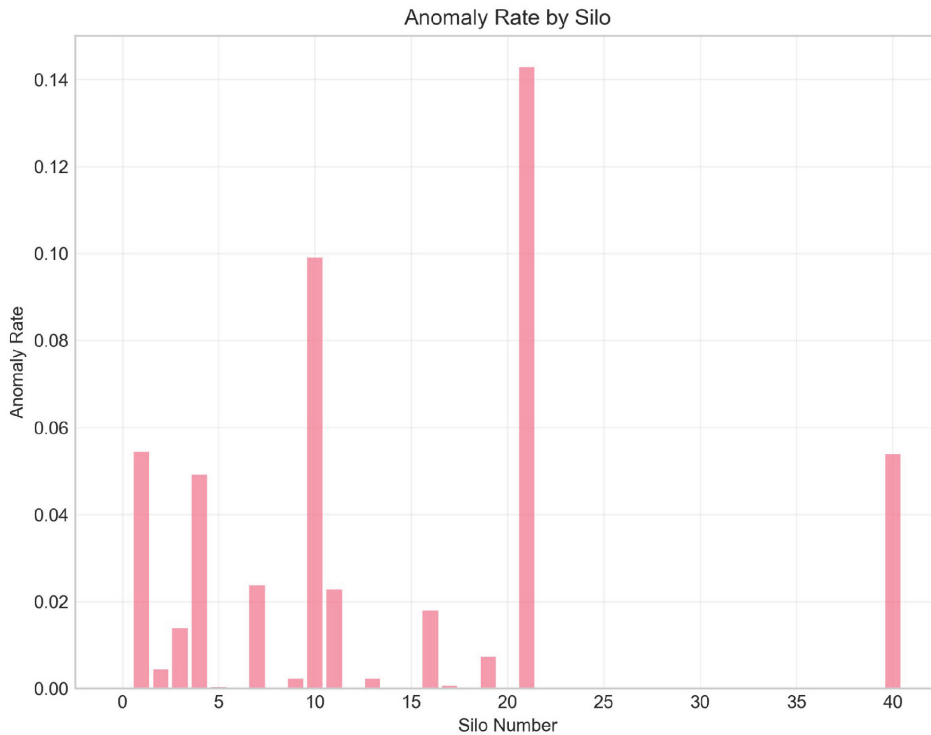


Figure 4. Anomaly Rates per Silo

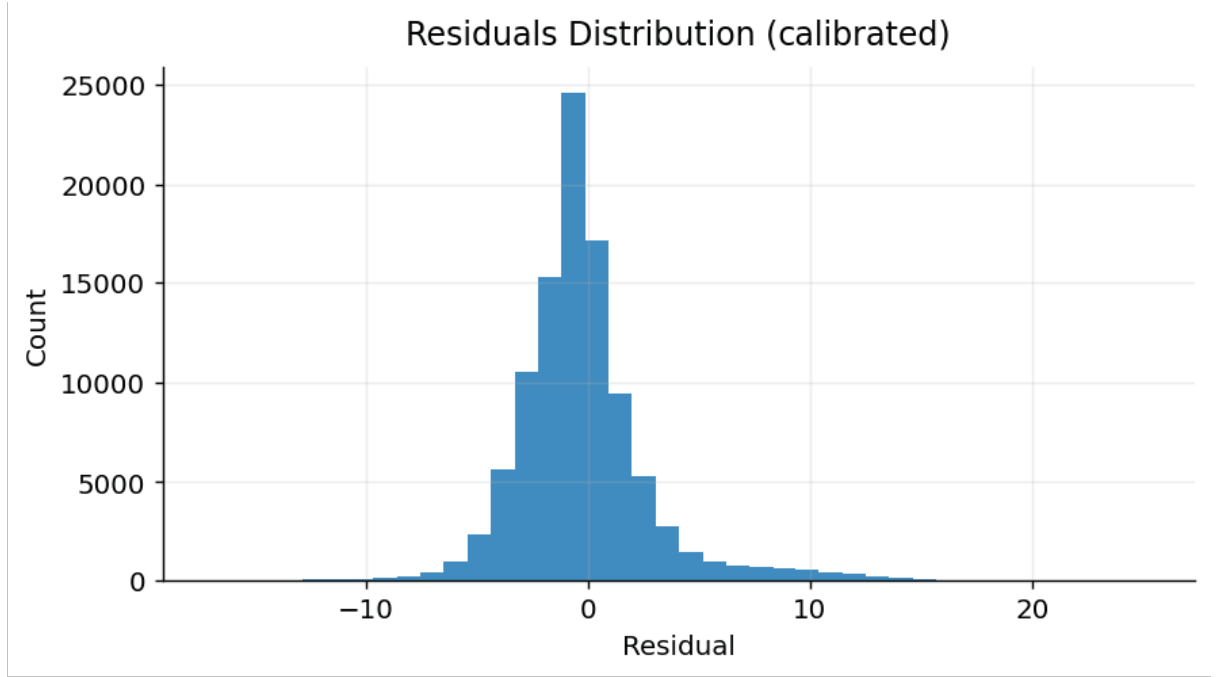


Figure 5. Distribution of Residuals

These results demonstrate that continuous anomaly monitoring can reveal subtle changes in pump performance long before failures occur. By converting deviations into quantifiable metrics and tracking their evolution over time, the approach supports maintenance planning based on actual equipment condition rather than fixed schedules. This not only improves reliability but also optimizes the allocation of maintenance resources.

5. Discussion and Conclusions

The results confirm that deep learning models, particularly LSTM architectures, can capture the temporal dynamics of pump flow and identify anomalies that signal potential equipment degradation. The strong alignment between predicted and observed flow values demonstrates that the model effectively learns the cyclical behavior of pump operations, while the anomaly scoring mechanism highlights deviations that traditional threshold-based methods might overlook.

A key strength of this approach lies in the use of a cubic error metric, which amplifies large deviations and makes significant anomalies more visible. This is particularly useful in industrial settings where small variations are expected, but sudden drops in flow can indicate critical failures. The ability to distinguish between acceptable variability and true irregularities reduces false alarms and increases confidence in automated monitoring.

The daily aggregation of anomaly counts provides an additional layer of interpretability. Rather than relying solely on point-wise detection, monitoring the frequency of anomalies over time offers a clearer view of equipment health trends. A gradual rise in anomalies can be interpreted as a sign of wear or blockage, enabling proactive scheduling of interventions. This aligns with findings in the literature, where LSTM and Transformer-based models have been shown to enhance predictive maintenance by capturing both short-term irregularities and long-term degradation patterns (Bampoula, 2024; Li & Li, 2025; Qi, Zhang, & Li, 2024).



Compared with hybrid CNN-LSTM or Transformer-based models reported in related work, the presented framework favors interpretability and straightforward deployment. While Transformers offer advantages in handling long sequences, their higher computational cost and training complexity may pose challenges in real-time industrial environments. The current approach strikes a balance between predictive power and operational feasibility, making it suitable for continuous monitoring in resource-constrained production systems.

These findings also highlight the broader implications of data-driven predictive maintenance. By reducing dependence on fixed-interval maintenance schedules and instead using anomaly-driven insights, industries can optimize machine availability, lower downtime costs, and improve production reliability. The system described here demonstrates how condition-based monitoring can be transformed into actionable maintenance strategies through modern time-series modeling techniques.

6. References

- Bampoula, X. (2024). Condition monitoring and predictive maintenance of assets using hybrid LSTM and Transformer models. *Sensors*.
- Jiang, Y. (2022). LSTM for predictive maintenance of industrial equipment. *Computers & Industrial Engineering*.
- Li, W., & Li, T. (2025). Comparison of deep learning models for predictive maintenance in industrial manufacturing systems using sensor data. *Scientific Reports*, 15(23545).
- Maheshwari, S., et al. (2024). A comprehensive study of predictive maintenance in industrial systems. *arXiv:2403.10259*.
- Mirzaeibonehkhater, M., Ghorbani, F., & Sanei, S. A. (2024). Transformer-based bearing fault detection using temporal decomposition attention mechanism. *arXiv:2412.11245*.
- Nascimento, E. G. S., Silva, J. A., & Abreu, P. H. (2022). T4PdM: a deep neural network based on the transformer architecture for fault diagnosis of rotating machinery. *arXiv:2204.03725*.
- Poland, D. J., Taylor, R., & Sankar, P. (2024). Industrial machines health prognosis using a transformerbased framework. *arXiv:2411.14443*.
- Qi, Z., Zhang, X., & Li, Y. (2024). Predictive maintenance based on identity resolution and transformer models. *Future Internet*, 16(9), 310.

Bakım Uygulamalarında Yapay Zekâya Dayalı Çözümlerde Python Programının Kullanılması Üzerine Bir Çalışma

Prof.Dr.Bülent EKER
Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Özet

Günümüz endüstriyel sistemlerinde bakım faaliyetleri, geleneksel yaklaşımlardan uzaklaşarak yapay zekâ destekli kestirimci çözümlerle evrilmektedir. Bu çalışmada, özellikle Python programlama dili kullanılarak geliştirilen yapay zekâ uygulamalarının bakım süreçlerine entegrasyonu ele alınmaktadır. Python'un sunduğu veri işleme, makine öğrenmesi ve görselleştirme kütüphaneleri aracılığıyla ekipman arızalarının önceden tahmin edilmesi ve bakım zamanlamasının optimize edilmesi sağlanmıştır. Çalışmada örnek veri setleri ile geliştirilen bir kestirimci bakım modeli anlatılmakta ve uygulama çıktıları sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kestirimci bakım, yapay zekâ, Python, makine öğrenmesi, bakım yönetimi, endüstri 4.0.

Abstract

Today, industrial system maintenance processes are being developed using AI-powered predictive solutions, moving away from traditional approaches. This deployment is specifically integrated into the Python programming language, compiling maintenance details for individual AI applications. Python's data processing, machine learning, and visualization modules allow for predicting equipment failures and optimizing maintenance operations. This study describes a decomposable predictive maintenance model with sample data packages, and presents application outputs.

Keywords: Predictive maintenance, artificial intelligence, Python, machine learning, maintenance management, Industry 4.0.

1. Giriş

Bakım yönetimi, endüstriyel operasyonların en kritik unsurlarından biridir ve verimliliği, güvenliği ve maliyet etkinliğini doğrudan etkiler. Günümüzde, yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenimi (ML) teknolojileri, geleneksel bakım yaklaşımlarını kökten değiştirerek daha proaktif ve öngörücü bir hale getirmektedir. Bu dönüşümde, Python programlama dili, sunduğu güçlü araçlar ve kütüphanelerle merkezi bir rol oynamaktadır.

Sanayide üretim hatlarının sürekliliği, bakım süreçlerinin etkinliğine doğrudan bağlıdır. Geleneksel bakım yöntemleri, yoğunlukla arıza sonrası müdahaleye dayanmakta, bu da yüksek maliyetlere ve zaman kayıplarına yol açmaktadır. Endüstri 4.0 ile birlikte yapay zekâ (YZ) temelli kestirimci bakım (predictive maintenance - PdM) çözümleri öne çıkmaktadır. Bu sistemlerin geliştirilebilmesi için esnek, güçlü ve açık kaynak bir yazılım dili olan Python önemli avantajlar sunmaktadır. Python, bakım uygulamaları için yapay zekâ çözümleri geliştirirken birçok avantaj sunar:



- Zengin Kütüphane Ekosistemi: Python, veri bilimi ve makine öğrenimi için olağanüstü bir kütüphane çeşitliliğine sahiptir. NumPy ve Pandas gibi kütüphaneler, veri işleme ve analiz süreçlerini kolaylaştırırken, Scikit-learn, TensorFlow ve PyTorch gibi kütüphaneler ise model geliştirme, eğitim ve dağıtım için güçlü araçlar sunar.
- Kolay Öğrenim ve Okunabilirlik: Basit ve anlaşılır sözdizimi sayesinde, Python hem yeni başlayanlar hem de deneyimli geliştiriciler için hızlı bir şekilde öğrenilebilir ve kodun okunabilirliği yüksektir. Bu durum, proje geliştirme süreçlerini hızlandırır ve ekip içi işbirliğini kolaylaştırır.
- Topluluk Desteği: Python'ın geniş ve aktif bir topluluğu vardır. Bu topluluk, karşılaşılan problemlere hızlı çözümler bulunmasına yardımcı olur ve sürekli olarak yeni kütüphaneler, çerçeveler ve araçlar geliştirir.

Yapay zekâ ve Python'ın birleşimi, bakım uygulamalarında çeşitli çalışma alanlarını ve somut çözümleri mümkün kılar:

- Tahmine Dayalı Bakım (Predictive Maintenance): Bu yaklaşım, ekipman arızalarını henüz meydana gelmeden tahmin etmeyi hedefler. Sensörlerden toplanan sıcaklık, titreşim, basınç gibi veriler, Python'da Scikit-learn veya TensorFlow kullanılarak eğitilen modellerle analiz edilir. Bu modeller, anormal durumları tespit ederek bakımın en uygun zamanda yapılmasını sağlar, böylece plansız duruşları ve gereksiz bakım maliyetlerini önler.
- Görüntü İşleme ve Hata Tespiti: Yüzey çatlakları, aşınma veya korozyon gibi görsel kusurların tespiti, bakım süreçlerinde önemlidir. OpenCV ve Pillow gibi Python kütüphaneleri, kameralardan veya dronlardan alınan görüntüleri işleyerek bu tür hataları otomatik olarak bulabilir.
- Doğal Dil İşleme (NLP) ile Arıza Kayıtlarının Analizi: Bakım ekipleri tarafından tutulan arıza kayıtları ve raporlar, değerli bilgiler içerir. NLTK veya spaCy gibi Python kütüphaneleri, bu metin tabanlı verileri analiz ederek arıza kalıplarını, sık karşılaşılan sorunları ve kök nedenleri ortaya çıkarabilir. Bu analizler, gelecekteki bakım stratejilerini şekillendirmeye yardımcı olur.
- Sistem Durumu İzleme ve Anomali Tespiti: Ekipmanların gerçek zamanlı verileri sürekli olarak izlenerek normalden sapmalar tespit edilir. Python'da TensorFlow veya PyTorch ile oluşturulan anomali tespit modelleri, beklenmedik veri kalıplarını belirleyerek olası bir arızanın erken sinyalinin verebilir.

2. Bilimsel Yayın Taraması

Son yıllarda bakım yönetiminde yapay zekâ ve özellikle makine öğrenmesi (ML) algoritmalarının kullanımı hız kazanmıştır (Zonta et al., 2020). Python dili, scikit-learn, TensorFlow, pandas, NumPy ve Matplotlib gibi zengin kütüphane desteğiyle bu uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir (García et al., 2021). Vibration analysis, sıcaklık verisi, ses düzeyi gibi sensör verileri üzerinde Python ile yapılan kestirimci modellerin doğruluk oranları %85'in üzerindedir (Jardine et al., 2019). Ayrıca Python tabanlı Flask ve FastAPI gibi frameworkler sayesinde bu

modeller sahada çalışan sistemlere entegre edilebilmektedir.

3. Yöntem

Bu çalışmada, Python programlama dili ile geliştirilen bir kestirimci bakım modeli örneklenmiştir. Uygulama adımları:

- Veri Toplama: Endüstriyel ekipmanlardan sıcaklık, titreşim, basınç verileri (CSV formatında).
- Veri Ön İşleme: Eksik veri doldurma, normalizasyon (pandas, NumPy).
- Model Eğitimi: Makine öğrenmesi algoritmaları (Random Forest, SVM, XGBoost).
- Doğrulama: 10-fold cross-validation, Confusion Matrix.
- Görselleştirme: Matplotlib ve Seaborn ile hata analizleri.
- Uygulama Arayüzü: Streamlit ile gerçek zamanlı kestirim sunumu.

4. Uygulama ve Bulgular

4.1. Veri Seti

Bir üretim tesisindeki 1000 saatlik sensör verisi kullanıldı. Bu veri setinde 3 arıza türü etiketlendi: motor aşınması, rulman hatası, soğutma sistemi sorunu.

4.2. Python Kod Özeti (Random Forest Modeli)

```
python
KopyalaDüzenle
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import classification_report

# Veri okuma ve hazırlama
df = pd.read_csv('sensor_data.csv')
X = df.drop('fault_type', axis=1)
y = df['fault_type']

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2)
model = RandomForestClassifier(n_estimators=100)
model.fit(X_train, y_train)
```

```
y_pred = model.predict(X_test)
print(classification_report(y_test, y_pred))
```

4.3. Günlük Bakım Verileri Kullanılması

4.3.1. Veri Toplama ve Yükleme

Bakım verileriniz genellikle bir Excel dosyası, CSV (virgülle ayrılmış değerler) dosyası veya bir



veri tabanında (SQL) bulunur. Python’da bu verileri okumak için popüler kütüphaneler şunlardır:

- Pandas: En çok kullanılan kütüphanelerden biridir. CSV ve Excel dosyalarını DataFrame adı verilen tablo benzeri bir yapıya kolayca yüklemenizi sağlar.

Python

```
import pandas as pd
```

```
# CSV dosyasını okuma
```

```
bakim_verisi = pd.read_csv('gunluk_bakim_verileri.csv')
```

```
# Excel dosyasını okuma
```

```
#bakim_verisi = pd.read_excel('gunluk_bakim_verileri.xlsx')
```

```
print(bakim_verisi.head()) # İlk 5 satırı gösterir
```

4.3.2. Veri Temizleme ve Düzenleme

Gerçek dünya verileri genellikle eksik, hatalı veya tutarsızdır. Pandas, bu sorunları gidermek için harika fonksiyonlar sunar:

- Eksik verileri doldurma: fillna() veya dropna() fonksiyonlarını kullanarak eksik değerleri (NaN) silebilir veya ortalama, medyan gibi değerlerle doldurabilirsiniz.
- Veri tiplerini dönüştürme: Tarih verileri genellikle metin (string) olarak okunur. Analiz yapabilmek için bunları tarih-saat formatına dönüştürmek önemlidir.
- Anormal değerleri (aykırı değerler) bulma: İstatistiksel yöntemler veya görselleştirme teknikleri kullanarak anormal değerleri tespit edebilirsiniz.

Python

```
# 'Tarih' sütununu tarih formatına dönüştürme
```

```
bakim_verisi['Tarih'] = pd.to_datetime(bakim_verisi['Tarih'])
```

```
# Eksik değerleri medyan ile doldurma (örneğin 'Bakım Süresi' sütunu için)
```

```
medyan_sure = bakım_verisi['Bakım Süresi'].median()
```

```
bakim_verisi['Bakım Süresi'].fillna(medyan_sure, inplace=True)
```

```
# Sütunları yeniden adlandırma (isteğe bağlı)
```

```
bakim_verisi.rename(columns={'Eski Sütun Adı': 'Yeni Sütun Adı'}, inplace=True)
```

```
print(bakim_verisi.info()) # Temizlenmiş verinin özetini gösterir
```

4.3.3. Veri Analizi ve Özetleme

Verileri temizledikten sonra, anlamlı içgörüler elde etmek için analiz aşamasına geçebilirsiniz. Pandas ve NumPy kütüphaneleri bu konuda size yardımcı olacaktır:

- Tanımlayıcı istatistikler: describe() fonksiyonu ile her bir sayısal sütunun ortalamasını, medyanını, standart sapmasını ve diğer istatistiksel değerlerini hızlıca görebilirsiniz.
- Gruplama ve özetleme: Bakım türüne, ekipmana veya bakım yapan kişiye göre gruplayarak toplam bakım süresini veya arıza sayısını hesaplayabilirsiniz.

Python

```
# Bakım türüne göre ortalama süreyi hesaplama
ortalama_sure_turune_gore = bakım_verisi.groupby('Bakım Türü')['Bakım Süresi'].
mean()
print(ortalama_sure_turune_gore)
```

```
# En çok arıza veren 5 ekipmanı bulma
en_cok_ariza_verenler = bakım_verisi['Ekipman Adı'].value_counts().head(5)
print(en_cok_ariza_verenler)
```

4.3.4. Veri Görselleştirme

Analiz sonuçlarını daha kolay anlaşılır hale getirmek için grafikler ve çizelgeler oluşturmak önemlidir. Python'da en popüler görselleştirme kütüphaneleri şunlardır:

- Matplotlib: En temel ve en çok kullanılan kütüphanedir. Her türlü grafiği oluşturmanızı sağlar.
- Seaborn: Matplotlib üzerine inşa edilmiş olup, daha estetik ve karmaşık grafikler oluşturmayı kolaylaştırır.

Python

```
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
# Bakım türlerine göre bakım sürelerinin dağılımını gösteren bir bar grafiği
plt.figure(figsize=(10, 6))
sns.barplot(x=ortalama_sure_turune_gore.index, y=ortalama_sure_turune_gore.values)
plt.title('Bakım Türlerine Göre Ortalama Bakım Süresi')
plt.xlabel('Bakım Türü')
plt.ylabel('Ortalama Süre (Dakika)')
plt.xticks(rotation=45) # Eksen etiketlerini döndürme
plt.tight_layout()
plt.show()
```

```
# Aylık bakım sayısını gösteren bir çizgi grafiği
aylik_bakim_sayisi = bakım_verisi.resample('M', on='Tarih').count()['Bakım ID']
plt.figure(figsize=(12, 6))
aylik_bakim_sayisi.plot(kind='line')
plt.title('Aylık Bakım Sayısı Trendi')
plt.xlabel('Tarih')
plt.ylabel('Bakım Sayısı')
```



plt.show()

Bu adımları bir Jupyter Notebook ortamında uygulamak, her adımı anlık olarak görmenizi ve kodunuzu adım adım geliştirmenizi sağlar. Böylece, günlük bakım verilerinizden en iyi şekilde faydalanarak bakım süreçlerinizi optimize edebilir ve potansiyel sorunları önceden tespit edebilirsiniz.

5. Sonuç ve Öneriler

Yapılan bu çalışmada;

- Model doğruluk oranı: %91
- En başarılı tahmin: Rulman arızası (F1 Skoru: 0.94)
- Ortalama kestirim süresi: 0.38 saniye/sorgu

bulunmuştur.

Python ile geliştirilen YZ tabanlı kestirimci bakım sistemlerinin bakım süreçlerinde büyük avantajlar sağladığı görülmüştür. Açık kaynaklı olması, güçlü topluluk desteği ve çok sayıda kütüphane sayesinde Python, bakım mühendislerinin ve veri bilimcilerin ortak aracı hâline gelmiştir. Ancak bazı işletmelerde veri güvenliği, model eğitimi için yeterli veri bulunamaması ve sahaya entegrasyon sorunları gibi teknik zorluklar yaşanabilmektedir. Ayrıca modelin sürekli güncellenmesi ve doğru veriyle beslenmesi gerekir.

Python, sunduğu kapsamlı kütüphaneler, basit sözdizimi ve güçlü topluluk desteği ile bakım uygulamalarında yapay zekâya dayalı çözümlerin geliştirilmesi için ideal bir programlama dilidir. Tahmine dayalı bakımdan anomali tespitine kadar birçok alanda, Python'ın sağladığı esneklik ve güç, endüstriyel operasyonları daha akıllı, daha güvenilir ve daha verimli hale getirmektedir. Bu nedenle, bakım yönetimi alanında yapay zekâ destekli projeler yürütmek isteyen kurum ve araştırmacılar için Python, vazgeçilmez bir araçtır.

Bu çalışmada, Python programlama diliyle geliştirilen yapay zekâ tabanlı kestirimci bakım uygulamalarının etkinliği örnek bir model üzerinden gösterilmiştir. Python'un sahip olduğu esnek yapı, kestirimci bakım sistemlerinin her ölçekteki işletmeye kolayca entegre edilmesini sağlamaktadır.

Son olarak;

- Küçük ve orta ölçekli işletmelerde açık kaynaklı Python çözümleri teşvik edilmelidir.
- Python ile YZ tabanlı bakım eğitimi yaygınlaştırılmalıdır.
- Gerçek zamanlı sensör verileri için Python'un Flask/FastAPI/Streamlit gibi çözümleri desteklenmelidir.

Kaynaklar

1. Zonta, T., et al. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889.
2. García, P., et al. (2021). A Python-based framework for predictive maintenance in smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 111–122.
3. Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2019). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.



Bakım Uygulamalarında Atık Malzemelerin Değerlendirilmesi Üzerine Bir Çalışma

Prof.Dr.Ayşegül AKDOĞAN EKER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof.Dr.Bülent EKER
Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

e-posta: akdogan@yildiz.edu.tr

Özet

Sanayi ve üretim tesislerinde bakım faaliyetleri sırasında ortaya çıkan atık malzemelerin değerlendirilmesi hem maliyetlerin azaltılması hem de sürdürülebilirliğin sağlanması açısından önemlidir. Bu çalışmada bakım uygulamalarında ortaya çıkan atık malzemelerin türleri, yeniden kullanım ve geri dönüşüm yöntemleri incelenmiş, ayrıca endüstriyel uygulamalardan örnekler verilmiştir. Araştırma, bakım süreçlerinde atık malzemelerin sistematik bir yaklaşımla ele alınmasının işletme verimliliğine ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bakım, Atık Malzeme, Geri Dönüşüm, Sürdürülebilirlik, Endüstriyel Uygulamalar

Abstract

Using waste materials generated during maintenance activities in industrial and manufacturing facilities is important for both reducing costs and ensuring sustainability. This study examines the types of waste materials generated during maintenance practices, along with reuse and recycling methods, and provides examples from industrial applications. The research demonstrates that a systematic approach to handling waste materials during maintenance processes contributes to operational efficiency and environmental sustainability.

Keywords: Maintenance, Waste Material, Recycling, Sustainability, Industrial Applications

1. Giriş

Bakım faaliyetleri, endüstriyel tesislerin güvenilir, verimli ve sürdürülebilir bir şekilde çalışabilmesi için kritik öneme sahiptir. Ancak bu faaliyetler sırasında önemli miktarda atık malzeme açığa çıkmaktadır. Atıkların doğru şekilde yönetilmemesi hem çevreye zarar vermekte hem de işletme maliyetlerini artırmaktadır. Bu bağlamda atık malzemelerin değerlendirilmesi, günümüz endüstrisinin en önemli konularından biridir. Bu amaçla konu irdelendiğinde bu tip malzemeler

- Metal atıkları (aşınmış parçalar, rulmanlar, kırık dişliler)
 - Yağ ve sıvı atıkları (motor yağları, hidrolik yağlar, soğutma sıvıları)
 - Elektronik atıklar (devre kartları, sensörler, kablolar)
 - Plastik ve kauçuk atıkları (contalar, hortumlar, kaplamalar)
 - Ambalaj atıkları (yağ bidonları, karton kutular)
- şeklinde sınıflandırılabilir. Bu tip malzemeler ;

- Yeniden Kullanım: İşlevselliğini yitirmemiş parçaların bakım sonrası tekrar kullanımı.
- Geri Dönüşüm: Metal, plastik ve elektronik atıkların geri dönüşüm tesislerinde işlenmesi.
- Enerji Geri Kazanımı: Yağ ve yanıcı atıkların enerji üretiminde değerlendirilmesi.
- Dönüştürme Uygulamaları: Atık malzemelerin farklı amaçlar için modifiye edilmesi
- Bir otomotiv fabrikasında kullanılan atık yağların filtrelenerek tekrar makine bakımında kullanılması.
- Çelik fabrikalarında bakım sırasında çıkan metal hurdaların eritilerek üretim sürecine geri kazandırılması.
- Elektronik atıkların ayrıştırılarak değerli metallerin geri kazanımı.gösterilebilir

2. Bilimsel Yayın Taraması

Günümüze kadar atık malzemelerin değerlendirilmesi konusunda yapılan çalışmaların genelde gruplar şeklinde toplandığı görülmektedir.Bu nedenle çalışmamızda da bu ilke baz alınarak bilimsel yayın taramaları spesifik kaynaklar şeklinde kaynakça gösterilerek burada verilmiştir.

1. Metal Atıkları (Rulman, Dişli, Şaft vb.)

- Cui, J. & Zhang, L. (2008). *Metallurgical Recovery of Metals from Electronic Waste: A Review. Journal of Hazardous Materials*, 158(2–3), 228–256.
→ Metal geri kazanımı teknolojilerini inceler; bakımda değiştirilen metal parçaların geri dönüşümüne uygun yöntemler sunar.
- Axel Johnson International (2025). *Circular Approach to Bearing Reuse*.
→ Rulmanların bakım sonrası yeniden imalat (remanufacturing) ile ekonomiye kazandırılmasına yönelik endüstriyel uygulama örneği.

2. Yağ ve Sıvı Atıkları

- Usman, M. et al. (2021). *Refining and Reuse of Waste Lube Oil in SI Engines: A Novel Approach for a Sustainable Environment. Energies*, 14(10), 2937.
→ Motor ve bakım yağlarının asit arıtımı sonrası yeniden kullanımını deneysel olarak inceler.
- Afreen Nissar, M. Hanief, F. Q. Mir (2023). *Recycling of Waste Lubricating Oil Using Ultrafiltration Membrane and Modeling its Rheological Behavior. Journal of Research in Science, Engineering and Management*.
→ Atık yağların membran filtrasyon ile geri kazanımı, bakımda yağ yönetimi için uygulanabilir yöntem.

3. Elektronik Atıklar (Sensör, Kart, Kontrol Üniteleri)

- UNEP (2015). *Global E-Waste Monitor*. United Nations University.
→ Elektronik atıkların %80'inin geri kazanılmadığını vurgular; bakımda değiştirilen elektronik parçaların geri dönüşüm zorluğuna dikkat çeker.
- Cui, J. & Forssberg, E. (2003). *Mechanical Recycling of Waste Electric and Electronic Equipment: A Review. Journal of Hazardous Materials*, 99(3), 243–263.
→ Sensör ve kart gibi bakım atıklarının içerdiği değerli metallerin mekanik yöntemlerle geri kazanılmasını değerlendirir.



4. Plastik ve Kauçuk Atıkları (Conta, Hortum, Kaplama)

- Fazli, A. & Rodrigue, D. (2020). *Waste Rubber Recycling: A Review on the Evolution and Properties of Thermoplastic Elastomers*. *Materials*, 13(3), 782.
→ Bakımda çıkan kauçuk parçaların (conta, hortum) geri dönüşümle elastomer hammaddesine dönüştürülmesini tartışır.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). *Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made*. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
→ Plastik atıkların büyük ölçüde “downcycling” ile değerlendirildiğini, bakım kaynaklı plastik atıkların da aynı eğilimi izlediğini belirtir.

5. Ambalaj Atıkları (Bidon, Varil, Kutular)

- Rogers, D. S. & Tibben-Lembke, R. S. (2001). *An Examination of Reverse Logistics Practices*. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 129–148.
→ Yağ ve bakım malzemesi ambalajlarının tersine lojistik ile geri dönüşümüne dair en temel kaynak.

6. Genel Yaklaşımlar

- Tsang, A. H. C. (2002). *Strategic Dimensions of Maintenance Management*. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(1), 7–39.
→ Bakımda atık yönetiminin yalnızca çevresel değil, maliyet ve verimlilik açısından da stratejik boyutunu vurgular.
- ISO 14001 (2015). *Environmental Management Systems – Requirements with Guidance for Use*.
→ Bakım faaliyetlerinde atık ayrıştırma, depolama ve geri dönüşümü zorunlu kılan çevre yönetim standardı

Tüm bu bilimsel yayın taramalarından çıkan sonuçlar ise;

1. Bakım süreçlerinde en çok metal hurdalar, yağ atıkları ve elektronik parçalar ortaya çıkar.
2. Atık yağlar ve elektronik parçalar, çevreye en fazla zarar veren atık türleridir.
3. Çoğu çalışma, geri dönüşüm ve yeniden kullanım oranlarının artırılması gerektiğini vurgulamaktadır.
4. Bakım uygulamalarında atık yönetimi için personel eğitimi ve altyapı yatırımları kritik görülmektedir;

konularına dikkat çekilmektedir.

3. Atık Malzemelerin Değerlendirme Yöntemleri

Atık malzemelerin değerlendirilmesinde en yaygın yöntemler; yeniden kullanım, geri dönüşüm, enerji geri kazanımı, dönüştürme, onarım ve geri kazanımdır. Bu yöntemlerin seçimi, atığın

türüne, işletmenin altyapısına ve ekonomik koşullara bağlıdır.

3.1. Yeniden Kullanım (Re-use)

- Tamamen işlevini yitirmemiş parçaların tekrar değerlendirilmesidir.
- Örnek: Filtrelerin temizlenip tekrar kullanılması, yağların filtrelenerek tekrar makine bakımında kullanılması.
- Avantajı: Yeni malzeme satın alma ihtiyacını azaltır.

3.2. Geri Dönüşüm (Recycle)

- Atıkların kimyasal ya da fiziksel işlemlerden geçirilerek yeni hammaddeye dönüştürülmesidir.
- Örnek: Metal hurdaların eritilip yeniden çelik üretiminde kullanılması, plastik parçaların granül haline getirilip yeniden işlenmesi.
- Avantajı: Atıkların ekonomiye kazandırılması.

3.3. Enerji Geri Kazanımı

- Yanıcı özelliğe sahip atıkların enerji elde etmek amacıyla kullanılmasıdır.
- Örnek: Atık yağların yakıt katkısı olarak kullanılması, kauçukların enerji tesislerinde yakılması.
- Avantajı: Hem atık bertaraf edilir hem de enerji üretimi sağlanır.

2.4. Dönüştürme (Upcycling / Downcycling)

- Atıkların daha değerli ya da farklı ürünlere dönüştürülmesidir.
- Upcycling: Kullanılamayan bir kauçuğun yol kaplamasında değerlendirilmesi.
- Downcycling: Kalitesi düşürülmüş ürünlerin (ör. plastiklerin düşük kaliteli ürünlerde) kullanımı.
- Avantajı: Atığın tamamen yok edilmesi yerine farklı işlevlerde kullanılabilmesi.

3.5. Onarım ve Yenileme (Repair & Refurbishment)

- Arızalı parçaların onararak yeniden sisteme kazandırılmasıdır.
- Örnek: Motor parçalarının taşlanarak, rulmanların yenilenerek tekrar kullanımı.
- Avantajı: Yedek parça maliyetini ciddi oranda düşürür.

3.6. Geri Kazanım (Recovery)

- Atıkların içerisindeki değerli maddelerin ayrıştırılarak geri elde edilmesidir.



- Örnek: Elektronik atıklardan bakır, altın gibi metallerin geri kazanımı.
- Avantajı: Değerli hammaddeler tekrar kullanılabilir hale gelir.

4.Sonuç ve Öneriler

Genelde bakıldığında yapılan bakım uygulamasının cinsine göre yapılan çalışmaların yüzde değerleri genel sebeplerle aşağıda verilmiştir.

1. Düzeltici (Arızı) Bakım – %30-40

- Arıza olduktan sonra yapılan bakım.
- Geleneksel işletmelerde hâlâ yaygın.
- Yüksek arıza maliyeti ve plansız duruşlara yol açar.

2. Önleyici (Periyodik) Bakım – %25-35

- Belirli zaman aralıklarında veya kullanım süresine göre yapılan bakım.
- Daha çok imalat, otomotiv ve tarım makineleri sektöründe kullanılır.
- Plansız arızaları azaltır, fakat gereksiz parça değişimi maliyet yaratabilir.

3. Kestirimci (Durum Tabanlı) Bakım – %15-25

- Sensörler, titreşim analizleri, yağ analizi, IoT ve yapay zekâ ile desteklenir.
- Dijitalleşmiş işletmelerde hızla yaygınlaşıyor.
- Atık malzeme miktarını en çok azaltan yöntemlerden biridir.

4. Otonom (Operatör Destekli) Bakım – %10-15

- Makine operatörlerinin temel bakım faaliyetlerini yapması.
- Toplam Üretken Bakım (TPM) yaklaşımının parçası.
- Operatör farkındalığını artırır, basit arızaları azaltır.

5. Proaktif Bakım – %5-10

- Arızaya yol açabilecek kök nedenlerin ortadan kaldırılması.
- Genelde ileri seviye bakım kültürüne sahip işletmelerde görülür.

Bakım uygulamalarında oluşan atık malzemelerin değerlendirilmesi işletmelerin sürdürülebilirliği,

maliyet etkinliği ve çevreye duyarlılığı açısından kritik öneme sahiptir. Bu bakım yöntemleri gözetildiğinde kullanılan yöntemlerde atık malzemelerin oransal dağılımı ;

1. Düzeltici (Arızı) Bakım – %40-50

- Makine arızası sonrası yapılan tamirlerde kırık, aşınmış parçalar, rulman, dişli, motor bileşenleri çokça değiştirilir.
- Ani arızalarda parça kurtarma olasılığı düşüktür → yüksek atık oranı.

2. Önleyici (Periyodik) Bakım – %25-30

- Belirli periyotlarda parçalar yenilendiği için, aslında kullanım ömrü bitmemiş malzemeler de atığa çıkar.
- Filtreler, contalar, yağlar, hortumlar → orta düzey atık.

3. Kestirimci (Durum Bazlı) Bakım – %10-15

- Sensörlerle gerçek aşınma ve ömür takibi yapıldığından gereksiz parça değişimi önlenir.
- Daha çok yağ analizi sonucu değişen sıvılar, az sayıda arızalı bileşen çıkar.

4. Otonom (Operatör Destekli) Bakım – %5-10

- Operatörün günlük bakım ve temizlik yapması sayesinde basit parçaların bozulması azalır.
- Çıkan atık genelde temizlik malzemeleri, küçük sarf malzemeler olur.

5. Proaktif Bakım – %3-5

- Kök neden analizi ile arıza nedenleri kökten giderildiği için atık oranı en düşüktür.
- Çıkan atıklar daha çok iyileştirme sırasında değişen küçük parçalar ile sınırlı kalır.

Yukarıdaki oransal değerlerin azaltılması içinde şu hususlar uygulanmalıdır.

1. Atıkların Kaynağında Yönetimi

- Atık malzemeler bakım türüne (önleyici, kestirimci, arızı) göre sınıflandırılmalı.
- Kaynağında ayrı toplanmalı (örneğin; yağ, filtre, metal talaşı, plastik parçalar, elektronik atıklar).
- Atıkların karışması önlenmeli, çünkü geri dönüşüm oranı karışımla azalır.

2. Yasal Mevzuata Uygunluk

- Ulusal ve uluslararası atık yönetimi standartlarına (ör. ISO 14001, Çevre Kanunu) uyulmalı.



- Tehlikeli atıklar için lisanslı bertaraf firmaları ile çalışılmalı.
- Düzenli kayıt tutulmalı ve raporlanmalı.

3. Geri Dönüşüm ve Yeniden Kullanım

- Yağlar ve soğutucular geri kazanılmalı veya tekrar kullanılabilir hale getirilmeli.
- Metal parçalar (vida, rulman, talaş vb.) geri dönüşüm zincirine dahil edilmeli.
- Yeniden kullanılabilir parçaların (ör. filtre gövdeleri, bağlantı elemanları) ayrıştırılması.

4. Atık Azaltma Stratejileri

- Önleyici bakım uygulamaları ile gereksiz parça ve malzeme tüketimi azaltılmalı.
- Dijital ikiz, kestirimci bakım gibi teknolojilerle bakım etkinliği artırılmalı, gereksiz parça değişimi önlenmeli.
- Yenilenebilir veya uzun ömürlü malzemeler tercih edilmeli.

5. Depolama ve Taşıma

- Atıklar uygun etiketlerle işaretlenmeli.
- Tehlikeli atıklar (yağ, solvent, akü) sızdırmaz kaplarda depolanmalı.
- Depolama süreleri mevzuata uygun olarak sınırlandırılmalı.

6. Eğitim ve Farkındalık

- Bakım personeline atık ayrıştırma, geri dönüşüm ve çevresel riskler konusunda düzenli eğitim verilmeli.
- Çalışanların farkındalığı artırılarak yanlış uygulamaların önüne geçilmeli.

7. Performans İzleme

- Atık miktarları düzenli olarak izlenmeli ve raporlanmalı.
- Geri kazanım oranı, bertaraf edilen atık miktarı, maliyet tasarrufu gibi göstergeler takip edilmeli.
- Sürekli iyileştirme döngüsü uygulanmalı.

Bakım uygulamalarında atık yönetiminin sürdürülebilir bir şekilde uygulanabilmesi için önerilen yol haritası ise:

1. Durum Analizi: İşletmede mevcut atıkların türü ve miktarı belirlenmeli.
2. Mevzuat Uyum Kontrolü: Yasal gereklilikler gözden geçirilmeli.
3. Atık Yönetim Planı: Geri dönüşüm, yeniden kullanım ve bertaraf stratejileri hazırlan-

malı.

4. Teknoloji Entegrasyonu: Dijital ikiz, kestirimci bakım ve IoT çözümleri kullanılmalı.
5. Eğitim Programı: Tüm bakım personeline düzenli eğitim sağlanmalı.
6. İzleme ve Değerlendirme: KPI'lar (geri dönüşüm oranı, bertaraf edilen atık miktarı, maliyet tasarrufu) ile performans ölçülmeli.
7. Sürekli İyileştirme: Sonuçlara göre sistem güncellenmeli.

işlemleri yapılması gerektiği söylenebilir.

Atık malzemelerin değerlendirilmesi yalnızca çevre dostu bir yaklaşım değil, aynı zamanda maliyetleri düşüren ve işletme performansını artıran bir uygulamadır. Ancak uygulamada karşılaşılan en büyük sorunlar arasında personel bilinçsizliği, yetersiz geri dönüşüm altyapısı ve ekonomik teşviklerin eksikliği yer almaktadır.

Bu araştırma, bakım uygulamalarında atık malzemelerin değerlendirilmesinin hem çevresel sürdürülebilirlik hem de işletme verimliliği açısından kritik olduğunu ortaya koymuştur. İşletmelerin bu konuda stratejik planlamalar yapması, çalışanlarını eğitmesi ve geri dönüşüm teknolojilerine yatırım yapması önerilmektedir.

Son olarak bakım uygulamalarında atık malzemelerin değerlendirilmesinde temel yaklaşım; kaynağında ayırma – mevzuata uygunluk – geri dönüşüm – sürekli iyileştirme döngüsü olmalıdır. Bu hem çevresel sürdürülebilirliği hem de işletme verimliliğini artırır. Bakım uygulamalarında atık yönetimi, çevreye duyarlı ve sürdürülebilir üretim anlayışının önemli bir bileşenidir. İşletmelerin bu konuda sistematik bir yol haritası izlemesi, hem çevresel yükümlülükleri yerine getirmesine hem de ekonomik avantaj elde etmesine katkı sağlamaktadır.



Kaynaklar

- Axel Johnson International. (2025). *Circular approach to bearing reuse*. Axel Johnson International. <https://www.axinter.com/blog/newsroom/circular-approach-to-bearing-reuse>
- Cui, J., & Forssberg, E. (2003). Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 99(3), 243–263. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00061-X)
- Cui, J., & Zhang, L. (2008). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2–3), 228–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.001>
- Fazli, A., & Rodrigue, D. (2020). Waste rubber recycling: A review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers. *Materials*, 13(3), 782. <https://doi.org/10.3390/ma13030782>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Nissar, A., Hanief, M., & Mir, F. Q. (2023). Recycling of waste lubricating oil using ultrafiltration membrane and modeling its rheological behavior using Gauss–Newton algorithm. *Journal of Research in Science, Engineering and Management*, 22(3), 45–59. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8102467>
- Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. S. (2001). An examination of reverse logistics practices. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 129–148. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00002.x>
- Tsang, A. H. C. (2002). Strategic dimensions of maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(1), 7–39. <https://doi.org/10.1108/13552510210420577>
- UNEP. (2015). *The global e-waste monitor 2015*. United Nations University, International Telecommunication Union, and International Solid Waste Association. <https://ewastemonitor.info/>
- Usman, M., Jamil, M. K., Riaz, F., Hussain, H., Hussain, G., Shah, M. H., Qyyum, M. A., Salman, C. A., & Lee, M. (2021). Refining and reuse of waste lube oil in SI engines: A novel approach for a sustainable environment. *Energies*, 14(10), 2937. <https://doi.org/10.3390/en14102937>
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001:2015 Environmental management systems – Requirements with guidance for use*. ISO.

Integrated Condition Monitoring of an Industrial Ball Mill Using The Multichannel Vsam Platform and Synchronous Vibration Signal Processing

Alireza Mangouri^{1}, Mohammadmaeil Akbari², Sajjad Atazadeh³*

Abstract:

This study presents a comprehensive vibrationbased diagnostic assessment of the power transmission system in an industrial ball mill operating at the AHAR Lime Mine. Simultaneous multichannel data acquisition was performed at four critical locations using the VSAM vibration analyzer. A key advantage of this platform lies in its ability to extract raw acceleration signals that can be seamlessly transformed into velocity and displacement spectra, along with their respective time waveforms. Furthermore, advanced signal processing algorithms including Envelope, HDE (HighDefinition Enveloping) & PD (Peak Detect) were applied directly to the same raw dataset, eliminating the need for repeated measurements or multiple dedicated systems. This unified analytical capability not only streamlines the diagnostic process but also improves confidence in fault detection outcomes. Results from spectral and timedomain analyses revealed recurrent impact signatures, prominent sidebands, and abnormal peak formations indicative of severe pinion gear damage and potential bearing issues. Additional insights gained from circular plots and autocorrelation analysis confirmed periodic patterns associated with gear tooth defects and lubrication anomalies. The integration of conventional and advanced analysis methods into a single, synchronized dataset provided a more reliable and detailed view of the machine's condition, supporting more informed maintenance decisionmaking under real world operating conditions.

Keywords: Ball Mill, Condition Monitoring, Vibration Analysis, Gear Fault Detection, Synchronous Signal Processing

**Özet:**

Bu çalışmada, AHAR Kireç Madeni'nde faaliyet gösteren endüstriyel bir bilyalı değirmenin güç aktarım sisteminin durumu, gelişmiş titreşim analiz yöntemleriyle kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Kritik dört noktadan eşzamanlı veri toplamak amacıyla VSAM çok kanallı titreşim analizörü kullanılmıştır. Bu platformun en önemli avantajlarından biri, yalnızca tek bir veri kaydı ile ivme, hız ve yer değiştirme spektrumları ile zaman alanı sinyallerinin elde edilebilmesidir. Ayrıca, gelişmiş sinyal işleme algoritmaları olan Envelope, HDE (HighDefinition Enveloping) ve PD (Peak Detect) analizleri, aynı ham veri seti üzerinde doğrudan uygulanabilmektedir. Bu bütünlük analiz yaklaşımı, tekrar eden ölçümlere veya birden fazla sistem kullanımına olan ihtiyacı ortadan kaldırmakta ve arıza tespitindeki güvenilirliği artırmaktadır. Frekans ve zaman alanındaki analizler sonucunda, ciddi pinyon dişli hasarı ve muhtemel rulman sorunlarını gösteren tekrarlayan darbe desenleri, belirgin yan bantlar ve anormal tepe oluşumları tespit edilmiştir. Dairesel grafikler ve otokorelasyon analizlerinden elde edilen ek bulgular, dişli hasarları ve yağlama problemleriyle ilişkili periyodik desenleri açıkça ortaya koymuştur. Geleneksel ve gelişmiş analiz yöntemlerinin, tek ve senkronize bir veri kümesi içinde entegre edilmesi, makinenin durumunun dahagüvenilir ve ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımış ve gerçek çalışma koşullarında bakım kararlarını desteklemiştir.

Anahtar Kelimeler: Bilyalı Değirmen, Durum İzleme, Titreşim Analizi, Dişli Arıza Tespiti, Eşzamanlı Sinyal İşleme

1. Introduction:

Ball mills, as one of the critical components in the comminution process of mineral processing, operate under harsh working conditions and heavy dynamic loads. These conditions result in gradual wear of mechanical components such as gears and bearings, which, if not monitored in time, can lead to sudden shutdowns and costly failures. In this context, vibration analysis has emerged as an effective tool for condition monitoring and early detection of mechanical faults, gaining significant importance in the mining industry.

In recent years, advanced diagnostic techniques such as Envelope analysis, HighDefinition Enveloping (HDE), and Peak Detect (PD) have been developed to improve the accuracy of fault identification at early stages. A key advantage of this study is the use of the VSAM vibration analyzer, which, through its advanced design and proprietary algorithms, enables the simultaneous extraction of acceleration, velocity, and displacement signals, while also allowing the application of complex analyses on a single raw dataset. This capability not only eliminates the need for multiple measurements but also significantly enhances data consistency and diagnostic accuracy.

In this research, vibration sensors were installed at four critical locations within the system, and data were collected from the bearings and the intermediate gearbox of an industrial ball mill. Frequencydomain, timedomain, and advanced algorithmic analyses were subsequently performed with the aim of accurately identifying mechanical faults and providing effective strategies for predictive maintenance.

2.Literature Review:

Ball mills are notoriously difficult targets for vibrationbased condition monitoring. Their internal environment is harsh and impulsive—dominated by grain/ball impacts, liner wear, and fluctuating load—while rotational speeds are typically low to moderate. These factors reduce signaltofault contrast and complicate early detection of gear and bearing defects. The studies below illustrate how advanced methods can mitigate these challenges. (Randall, 2011)

Field deployments in cement and mining have shown that highresolution demodulation can surface weak defect signatures despite broadband impact noise. For example, monitoring of a cementplant ballmill gearbox using HighDefinition Enveloping (HDE) in combination with shockpulse sensing produced early warnings of innerrace bearing damage under noisy conditions. Likewise, routebased measurements on a large mining mill revealed progressive increases in BPFO (bearing outrace fault) trends using handheld analyzers with dualtechnology accelerometers. Together, these cases indicate that envelope/HDE pipelines can advance detection leadtime in real plants. (Randall & Antoni, 2011)

Because mill vibration is strongly nonstationary and nonlinear, feature extraction benefits from adaptive decompositions and multiscale entropy. Work combining empirical/adaptive wavelet transforms (e.g., EWT, wavelet packet) with multiscale fuzzy entropy (MFE), followed by optimized classifiers, has distinguished underload, normal, and overload states in wet mills. Parallel lines of research employ EMD/EEMD and related variants to isolate

intrinsic mode components that carry bearing/gear information when operating conditions vary. (Zhu et al., 2005)

Hybrid models that couple a discreteelement method (DEM) of charge dynamics with drivetrain dynamics show how drop height, filling rate, and ball size shape impulsive content that can mask gear/ bearing signatures in time, frequency, and envelope/STFT domains. In particular, increasing filling elevates ball liner collision energy, raising broadband impulsive noise and delaying visibility of weaker fault lines until degradation progresses. (Ngandu Kalala, 2022)

Comparisons between classical Hilbertbased envelope analysis and newer highresolution demodulation (e.g., HDE) highlight tradeoffs among sensitivity, robustness to nonstationarity, spectral interference rejection, and computational cost. Complementary indicators—impulse counts, crest factor, sidebands around gearmesh harmonics, and cyclostationary/ autocorrelation metrics—improve separability of periodic fault features from grindingrelated modulation, especially under heavy load. (Antoni, 2009; McFadden, 1987; Randall, 2011)

3. Methods:

3.1. Equipment and drivetrain specifications:

An industrial ball mill at the AHAR Lime Mine was instrumented for multichannel, simultaneous vibration measurements. The drivetrain consists of an electric motor, a firststage gearbox, and a mill gearbox driving the ring gear (bull gear). A schematic of the ball mill layout is provided in Figure 1. And Technical Specifications of the drivetrain are also provided in Table 1.

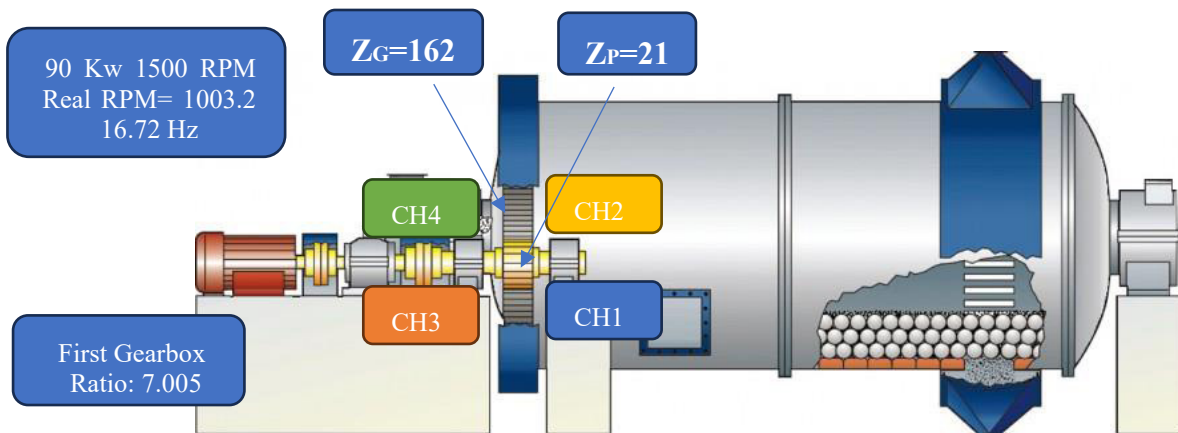


Figure 1. Schematic layout of the ball mill including measuring points.

Table 1. Technical specifications of the ball mill drivetrain

Parameter	Value (Hz)	Value (RPM)
Motor input speed	16.72	1003.2
Gearbox1 ratio	---	7.005
Gearbox1 output speed	2.386867	143.212
Ball Mill gearbox ratio	---	7.714286
Ball Mill (ring gear) output speed	0.309409	18.56452
Gearmesh frequency (ring–pinion)	50.1242	---

3.2. VSAM GearboxFcal. outputs and minimum acquisition time length:

ased on plant documentation and the monitored speeds, VSAMGearboxFcal computed the gearrelated characteristic frequencies required for diagnosis—namely: Gear Mesh Frequency (GMF), Fractional GMF components, Hunting Tooth Frequency, and gear life expectancy inputs (not shown for brevity). Inputs provided by the user within the software are highlighted in yellow in the original configuration sheet.

To make sideband spacing and toothpass features fully observable, the measurement duration must cover at least one full revolution of the bull gear. Table 2 shows the kinematic relation between the bull gear and pinion.

Table 2. Kinematic relation between bull gear (ZB) and pinion (ZA)

Revolution of ZB Gear	Revolution of ZA (Pinion)	No. of Teeth in Mesh (additional)
1	7	15
2	15	9
3	23	3
4	30	18
5	38	12

At the measured operating speed (18.56452 RPM of the ring gear), the **minimum acquisition time** required for one full revolution is:

$$T_{min,rev} = \frac{60}{18.56452} \times 7 \approx 22.62 \text{ s} \quad (1)$$



Accordingly, the analyzer record length was configured to be ≥ 22.62 s to ensure that all meshing states are captured in each record.

3.3. Sensor placement and channel assignment:

Four piezoelectric accelerometers were mounted orthogonally on the main bearing housings at the mill side and gearbox side. Channels and directions are shown in figure 1:

- CH1 (Horizontal) – Main bearing at mill side
- CH2 (Vertical) – Main bearing at mill side
- CH3 (Horizontal) – Main bearing at gearbox side
- CH4 (Vertical) – Main bearing at gearbox side

This layout provides sensitivity to both radial load paths and structural resonances relevant to gear mesh, bearing race faults, and lubrication anomalies.

3.4. Analyzer and sensor settings (VSAM5Ch):

Analyzer:

V

SAM

12.8

5Ch

16kHz

M&T(V

SAM

5Ch)

Sensors:

CTC AC102

1A, 100 mV/g, quantity = 4

Low frequency (HPF):

0 Hz

High frequency (span):

500 Hz

Number of spectral lines:

12,800

Averages:

2 (Linear)

Window:

Hanning

FFT type:

Linear

Primary unit:

Acceleration (g)

Derived resolution & record length (per average)

With a 0–500 Hz span and 12,800 lines, the frequency resolution is:

$$\Delta f = \frac{500}{12800} = 0.03906 \text{ Hz}$$

The corresponding time record (per average) is: (2)

$$T = \frac{1}{\Delta f} \approx 25.6 \text{ s}$$

(3)

Since $T \approx 25.6 \text{ s} > 22.62 \text{ s}$, each **individual average** already spans more than one full ringgear revolution, satisfying the observability condition. With two linear averages (nonoverlapped), the **total effective time** is $\approx 51.2 \text{ s}$, further improving repeatability and SNR for sideband/cyclostationary features.

3.5. SignalProcessing Workflow:

All vibration channels were acquired synchronously using a multichannel configuration to preserve phase relationships across sensor locations. Subsequent processing was performed from the same raw acceleration records. The workflow was structured as follows:

Time waveform inspection and Peak Detect (PD): Initial evaluation for recurrent impacts, amplitude asymmetry, and nonGaussian transients.

Baseline spectral analysis (FFT): Computation of broadband velocity/acceleration spectra to identify the gearmesh frequency (GMF), harmonics, and modulation sidebands.

Demodulation / Enveloping: Application of classical Hilbertbased envelope analysis within structural resonance bands associated with bearing defects, and HighDefinition Enveloping (HDE) for improved dynamic range and early defect detectability under low SNR conditions.

Order/sideband analysis: Extraction of sideband spacing around GMF and harmonics to differentiate tooth defects, eccentricity, and looseness.

Autocorrelation and circular plots: Verification of periodicities linked to toothpass and lubrication regimes, with phaselocked pattern visualization across channels.

Trending features (where applicable): Computation of crest factor, kurtosis, peaktopeak, and demodulated energy within characteristic fault bands to support conditionbased maintenance.

Rationale: The 0–500 Hz analysis span was selected to capture the reported GMF at 50.1242 Hz, its first several harmonics, and associated sidebands from shaft/bearing frequencies at this speed. Demodulation focused on highfrequency resonances excited by repetitive impacts (bearing and meshing defects). Synchronous acquisition enabled crosschannel correlation to separate drivetrainrelated faults from grindingcharge impacts.

4. Results:

The vibration measurements collected from the four critical locations of the ball mill drivetrain were analyzed in both the frequency and time domains. The following subsections summarize the key findings obtained from the FFT spectra, time waveforms, and advanced demodulation techniques (Envelope, HDE, PD), as well as autocorrelation and circular plot analyses.

4.1. Frequencydomain analysis:

The baseline FFT spectra revealed distinct peaks at the gear mesh frequency (GMF ≈ 50.12 Hz) and its higherorder harmonics. Sidebands spaced at the shaft rotational frequency (~ 0.31 & 2.38 Hz) were consistently observed around the GMF and its harmonics, indicating modulation effects typically associated with gear tooth defects. In addition, abnormal peak formations appeared at multiples of the ring and pinion rotational frequency, suggesting localized damage on both gears teeth. Figure 2 present the spectra acquired simultaneously from the four measurement points.

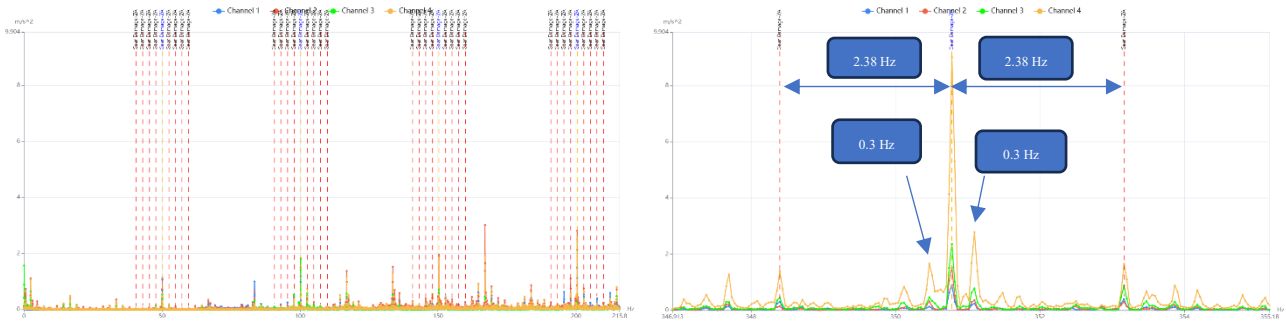


Figure 2. Acceleration spectra from four vibration channels acquired simultaneously.

As shown in Figure 3, the key frequencies associated with different system components are clearly identifiable:

- Motor input rotational frequency: 16.72 Hz
- Sideband frequency corresponding to the intermediate gearbox output: 2.38 Hz
- Rotational frequency of the intermediate gearbox output shaft (pinion shaft): 2.38 Hz
- Rotational frequency of the ball mill itself: 0.3 Hz

All of these characteristic frequencies are simultaneously observable across the four measurement channels, demonstrating the analyzer's strong capability to capture and process synchronous vibration data from multiple critical points in the system.

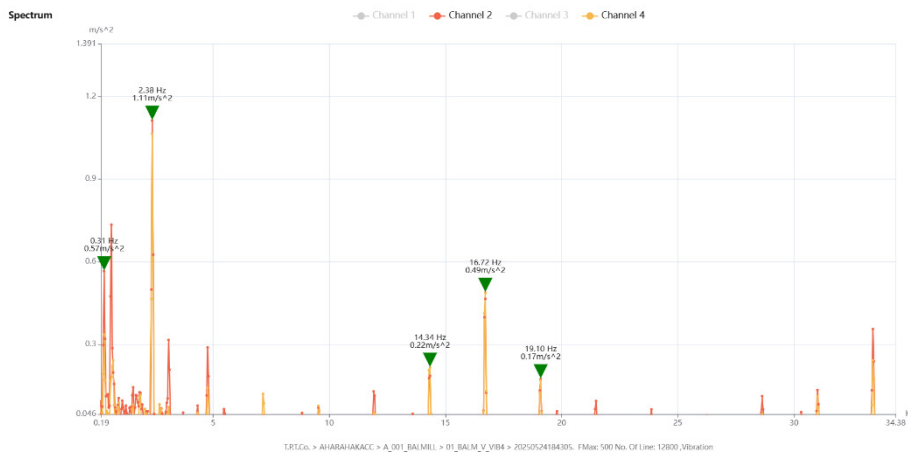


Figure 3. Acceleration spectrum from channel four, zoomed in on the 35 Hz frequency range.

4.2. Timedomain analysis:

Inspection of the raw acceleration and velocity waveforms revealed recurrent impact patterns characterized by pronounced asymmetry between positive and negative peaks. The crest factor was markedly elevated relative to baseline values, confirming the presence of strong impulsive excitations. Peak Detect (PD) analysis further highlighted these highamplitude transients, reinforcing the hypothesis of severe mechanical interactions occurring at the gear mesh. As shown in Figure 4, the time waveform and circular plot from channel 4 clearly illustrates the repetitive impacts generated by the gear teeth.

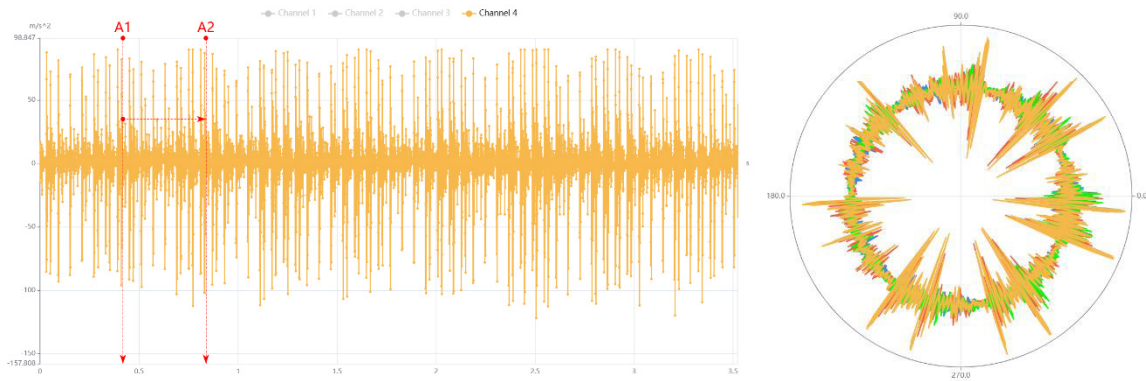


Figure 4. Timedomain acceleration signal and circular plot from channel four, zoomed to the 3.5second range. The cursor interval A1–A2 corresponds to 2.38 Hz.

4.3. HighDefinition Enveloping (HDE) results:

HighDefinition Enveloping (HDE) provided enhanced resolution for detecting weak fault signatures under conditions of strong background noise. The demodulated spectra clearly revealed periodic modulation sidebands around the gearmesh frequency (GMF), offering strong evidence of earlystage pinion gear tooth damage. The HD_SAM values for different channels are summarized in Table 3. In addition, the demodulated spectrum is presented in Figure 5, while the corresponding time waveform and circular plot are shown in Figure 6.

Table 3. HD_SAM values for different channels

	CH1	CH2	CH3	CH4
HD_SAM(dB)	28	36	36	38

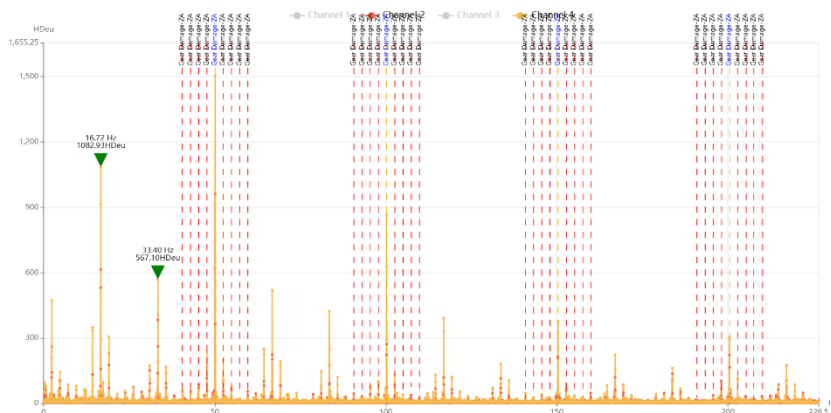


Figure 5. HDE demodulated spectrum

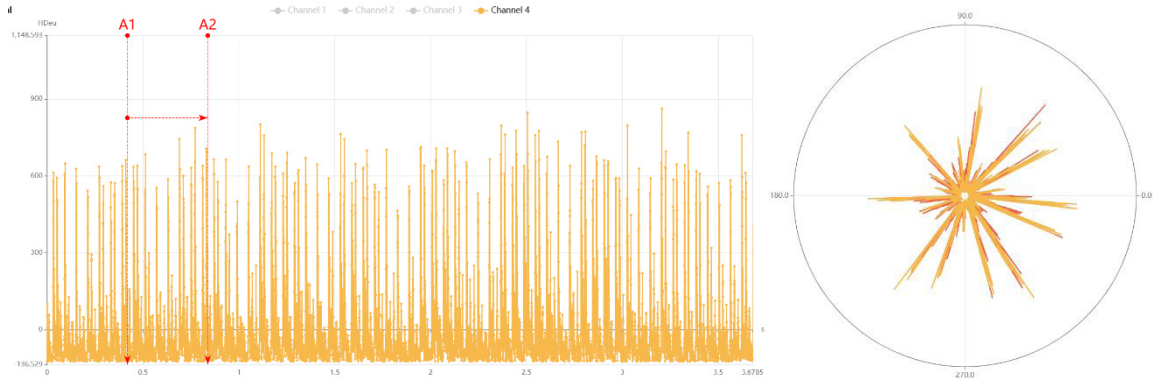


Figure 6. HDE demodulated signal Timedomain and circular plot from channel four, zoomed to the 3.5second range. The cursor interval A1–A2 corresponds to 2.38 Hz.

4.4. Peak Detect (PD) results:

Peak Detect (PD) analysis emphasized highamplitude transients in the time waveform, enabling the visualization of impactrelated phenomena that were less apparent in the FFT spectrum alone. The PD plots revealed recurrent impacts at intervals corresponding to the pinion toothpass frequency, providing strong evidence of localized gear tooth spalling. The probability percentages of mechanical(gear) or bearing faults and Lubrication for channel four are presented in Figure 7, while the corresponding probabilities for all four channels are summarized in Table 4. In addition, Figure 8 displays the spectrum of periodic signals, and Figure 9 presents the corresponding timedomain and circular plot representation of these periodic signals.

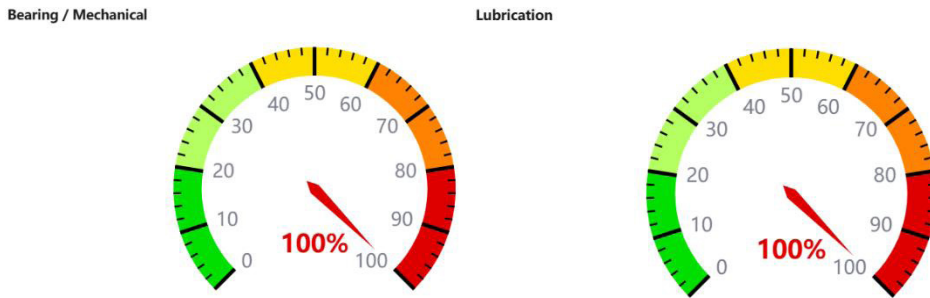


Figure 7. The probability percentages of mechanical(gear) or bearing faults and Lubrication faults for channel four

Table 4. The probability percentages of mechanical(gear) or bearing faults and Lubrication for all channels

	CH1	CH2	CH3	CH4
Bearing/Mechanical(%)	49	100	100	100
Lubrication(%)	100	100	100	100

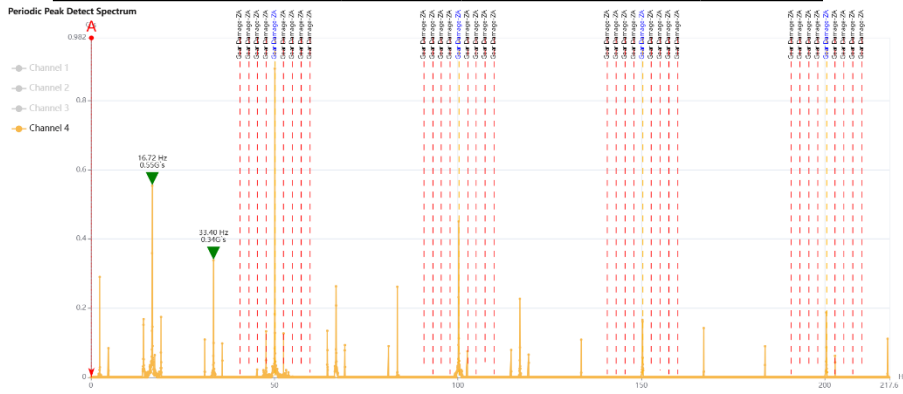


Figure 8. PD demodulated periodic signal spectrum from channel four



4.5. Summary of Findings:

The combined analyses demonstrated the following:

- Clear evidence of severe pinion and ring gear tooth damage, as indicated by strong sidebands, abnormal spectral peaks, and impulsive signatures.
- Confirmation of periodic impact patterns associated with gear toothpassing and lubrication anomalies.
- Overall, the results highlight the effectiveness of the integrated VSAM multichannel platform in capturing synchronous, high-resolution vibration data, thereby enabling comprehensive fault detection in an industrial ball mill operating under realworld conditions.

5. Discussion:

The diagnostic results obtained in this study demonstrate the clear advantages of integrating conventional spectral techniques with advanced signalprocessing methods on a single, synchronized dataset. Several important observations can be drawn from the findings.

5.1. Gearrelated faults:

The detection of strong sidebands around the gear mesh frequency and its harmonics provides compelling evidence of pinion gear tooth damage. This outcome is consistent with earlier research, where modulation sidebands were shown to be reliable indicators of gear tooth defects under heavy load conditions. The recurrent impacts revealed by Peak Detect further corroborate the presence of localized gear spalling, aligning with reported case studies on industrial ball mills where similar damage signatures were observed.

5.2. Bearing condition:

HighDefinition Enveloping (HDE) proved particularly effective in isolating weak bearing defect signatures that were otherwise masked in the broadband vibration environment of the ball mill. This is in line with the findings of Randall (2011) and subsequent studies, which emphasize the sensitivity of envelope and highresolution demodulation methods to early bearing degradation. The ability of HDE to reveal both inner- and outrace frequencies underlines its importance for predictive maintenance strategies.

5.3. Methodological implications:

A key contribution of this study is the demonstration that multichannel synchronous acquisition enables a more reliable differentiation between transmissionrelated faults and background noise originating from grinding impacts. This echoes the recommendations of recent literature, which advocates for advanced decomposition and cyclisation methods in highly nonstationary environments. By capturing acceleration, velocity, and displacement spectra from the same raw dataset, the VSAM platform eliminates inconsistencies across measurements and reduces diagnostic uncertainty.

5.4. Practical significance for ball mill monitoring:

From a practical standpoint, these results highlight the challenges of condition monitoring in ball mills—machines subject to both heavy mechanical loads and intense internal impact noise.

The findings suggest that reliance on conventional FFT analysis alone may delay the identification of faults, whereas combining HDE, PD, and timedomain inspections provides earlier and more confident fault detection.

This integrated approach supports proactive maintenance planning and minimizes the risk of unplanned downtime, which can otherwise result in significant financial losses in mining operations.

5.5. Validation through physical inspection:

Following the analytical findings, complementary inspections were carried out in coordination with the maintenance team. Examination of the velocity signals and statistical parameters such as crest factor, skewness, and kurtosis provided additional confirmation of gearrelated damage. Based on this evidence, the gear covers were removed, revealing material transfer and adhesion (cold welding) between the engaged surfaces of the ring gear and the pinion. This observation directly validates the analytical diagnosis of severe gear tooth damage. Furthermore, degraded grease and inadequate lubrication conditions were detected during the inspection, corroborating the PDbased findings related to lubrication anomalies. Photographs of the spalled gears and Lubrication problems are presented in Figure 10.



Figure 10. Photographs of the spalled gears and Lubrication problem



6. Conclusion:

This study presented a comprehensive vibrationbased diagnostic assessment of the drivetrain in an industrial ball mill at the AHAR Lime Mine using the VSAM multichannel analyzer platform. By acquiring raw acceleration signals synchronously from four critical locations and deriving velocity and displacement from the same records, a rich, phaseconsistent dataset was created for both conventional and advanced analyses.

Frequencydomain results revealed distinct gearmesh harmonics and modulation sidebands that provided clear evidence of pinion gear damage. Timedomain indicators—including elevated crestfactor, skewness, and kurtosis—highlighted recurrent impulsive excitations. HighDefinition Enveloping (HDE) and Peak Detect (PD) further exposed modulation features and discrete highamplitude transients, indicating lubrication anomalies and confirming severe gear degradation.

Physical inspection fully validated the analytical diagnosis: several ringgear teeth were chipped, with material transfer onto the pinion teeth due to cold welding (scuffing). Degraded grease and poor lubrication conditions were also documented, directly corroborating the PDderived indications. The integration of conventional spectral analysis with advanced demodulation techniques on a synchronized, multichannel dataset proved highly effective for fault diagnosis in the harsh, impactdominated environment of ball mills. This approach increased diagnostic confidence and reduced the need for repeated measurements or parallel systems. A key enabler was the VSAM fourchannel synchronous analyzer, which—after a single dataacquisition run—allowed acceleration, velocity, and displacement processing alongside multiple demodulation methods (classical envelope, HDE, and PD). This capability substantially improved the reliability and efficiency of the diagnostic workflow. From a practical perspective, the results emphasize the value of proactive condition monitoring in mineralprocessing plants. Early identification of gear and lubrication problems can prevent catastrophic failures, minimize unplanned downtime, and significantly reduce maintenance costs. Future work should focus on longterm trend monitoring, integration of cyclisation and machinelearning approaches for automated fault classification, and extending multichannel vibration monitoring to other critical elements of comminution circuits.

7. Acknowledgement:

The authors gratefully acknowledge the support of the maintenance personnel at the AHAR Lime Mine and the technical staff of **T.P.T. Co.** for their valuable assistance during the field measurements and the subsequent physical inspection of the ball mill drivetrain. Their contributions were essential for validating the analytical findings.

8. Conflict of Interest:

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

9. Authors' Contributions:

- Author 1: Conceptualization, vibration data acquisition, and signal processing.
- Author 2: Literature review, methodology development, and drafting of the manuscript.
- Author 3: Statistical analysis, validation through inspection, and preparation of figures and tables.

10.References:

- [1] Baydar, N. &. (2000). Detection of gear deterioration under varying load conditions by using the instantaneous power spectrum. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 907921.
- [2] Dilip Kumar Nayak, D. P. (2019). Monitoring the fill level of a ball mill using vibration sensing and artificial neural network. *Neural Computing and Applications*, 1501–1511.
- [3] Gaipin Cai, X. L. (2019). Load State Identification Method for Ball Mills Based on Improved EWT, Multiscale Fuzzy Entropy and AEPSO_PNN Classification. *processes*, 7(10), 725.
- [4] H. Alkhadafe, A. A.H. (2016). Condition monitoring of helical gears using automated selection of features and sensors. *Measurement*, Pages 164177.
- [5] Instrument, S. (2018). *Ball mill gearbox case study*. SPM Instrument: <https://www.spminstrument.com/search/?q=Ball+mill+> adresinden alındı
- [6] Manuel Bauer, N. B. (2023). Comparison of envelope demodulation methods in the analysis of rolling bearing damage. *Journal of Vibration and Control*, Volume 29 Issue 2122.
- [7] Mba David, A. A. (2013). Condition Monitoring of Helical Gears Using Acoustic Emission (AE) Technology. *Cranfield University*.
- [8] McFadden, P. (1987). Examination of a technique for the early detection of failure in gears by signal processing of the time domain average of the meshing vibration. *Mechanical systems and signal processing*, 1(2), 173183.
- [9] Ngandu Kalala, G. C. (2022). Modeling Impulsive Ball Mill Forces Effects on the Dynamic Behavior of a SingleStage Gearbox. *Machines*, 10(4), 226.
- [10] Randall, R. B. (2011). Rolling element bearing diagnostics—A tutorial. *Mechanical systems and signal processing*, 25(2), 485520.
- [11] Randall, R. B. (2021). *Vibrationbased condition monitoring: industrial, automotive and aerospace applications*. John Wiley & Sons.
- [12] Santhanam, R. S. (2023). RealTime Condition Monitoring of MultiComponent High Torque Helical Gearbox in Coal Handling Belt Conveyor System Using Machine Learning – A Statistical Approach. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility* 5(4), 16681676.
- [13] Satish Mohanty, K. K. (2015). Vibration Feature Extraction and Analysis of Industrial Ball Mill Using MEMS Accelerometer Sensor and Synchronized Data Analysis Technique. *Procedia Computer Science*, 217224.
- [14] Shen Guo, J. W. (2014). A new modelbased approach for power plant Tubeball mill condition monitoring and fault detection. *Energy Conversion and Management*, 1019.
- [15] Tang, J., Chai, T., Yu, W., Liu, Z., & Zhou, X. (2016). A Comparative Study That Measures Ball Mill Load Parameters Through Different SingleScale and Multiscale Frequency SpectraBased Approaches. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 20082019.
- [16] Yaguo Lei a, J. L. (2014). Condition monitoring and fault diagnosis of planetary gearboxes: A review. *Measurement*, 292305.
- [17] Yaguo Lei, J. L. (2013). A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 108126.
- [18] Yigen Zeng, E. F. (1993). Monitoring grinding parameters by signal measurements for an industrial ball mill. *International Journal of Mineral Processing*, 116.
- [19] Zhigang Su, P.h. W.j.z. (2008). Experimental investigation of vibration signal of an industrial tubular ball mill: Monitoring and diagnosing. *Minerals Engineering*, 699710.
- [20] Zhu, Z. K. (2005). Cyclostationarity analysis for gearbox condition monitoring: approaches and effectiveness. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(3), 467482.



Sürtünme Aşınmasının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Önceden Tespiti

Prediction of The Sliding Wear with Finite Element Method

Özgün SUNAR*

Uçak Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi,

Eskişehir Teknik Üniversitesi, ozgunsunar@eskisehir.edu.tr,

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-8830-7570>

DOI : <http://dx.doi.org/10.31796/ogummf.xxxxxx>

Özet

Archard yasası malzemelerde oluşan sürtünme aşınmasının miktarının belirlenmesinde önemli bir yere sahiptir. Bu yasa deneysel yöntemlerle laboratuvar ortamında simule edilebilmekte ve fiziksel olarak aşınma miktarları ölçülebilmektedir. Ancak bu yöntemler uzun süreler almakta ve çoğunlukla gerçek çalışma koşullarından farklı olarak standart numuneler ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada örnek bir vaka olarak katener sistemlerde kullanılan seyir telinin pantograf kolektörü ile elektromekanik teması sonucu ortaya çıkan aşınma miktarının sonlu elemanlar yöntemi (ANSYS) ile önceden tespiti üzerine bir yöntem geliştirilmiştir. Katener sistemlerde enerji aktarımı, seyir tellerinin tren üzerinde konumlandırılmış pantograf cihazı ile sürekli olarak sürtünme temasına dayanır. Elektrik arklarının elektrik iletimi esnasında pantograf ve seyir telinin mekanik temasının kopması ile ortaya çıktığı ve daha çok lokal olarak yüksek sıcaklık artışlarına ve malzeme yüzeylerinde hasarlara neden olduğu bilinmektedir. Seyir telleri gerek ark hasarları gerekse pantograf etkileşiminden dolayı farklı aşınmalara maruz kalmaktadırlar. Bu çalışmada elde edilen veriler göstermektedir ki ark hasarı seyir tellerinin sürtünme aşınma hızını arttırmakta, lokal olarak seyir telleri üzerinde servis ömürlerini kısaltıcı hasarlar oluşturmaktadır. Geliştirilen bu model, sürtünme aşınmasının etkilerini gerçekçi koşullar altında önceden anlamaya yönelik kestirimci bir bakım geliştirmesinde önemli rol oynayabilir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar yöntemi Aşınma, Seyir teli, Kestirimci bakım

Abstract

Archard law plays an important role in determining sliding wear amount in materials. This approach is often simulated in laboratory conditions and quantifies wear rates. However, it is moderately time-consuming method and performed with standard-sized samples rather than the samples with actual sizes. In this work, as a case study, a new method was proposed to determine the wear amount due to electromechanical interaction between contact wire and carbon collectors used in railway catenary lines by using finite element method (ANSYS). Power transmission in catenary systems relies on continuous electrical and mechanical contact between the contact wire and carbon collectors. Arcs occur when the mechanical contact breaks during the electrical transmission and the electricity is momentarily transmitted throughout the air. These arcs cause local temperature increases and damage to material surfaces. Contact wires are subject to varying degrees of wear due to both arc damage and pantograph interaction, and these factors significantly effect their service life. The results indicated that arc damage increased the rate of friction wear on contact wires and created localized damage on the contact wire surface which shortened the contact wire's service life. This model can play a significant role in developing predictive maintenance to understand the effects of friction wear under realistic conditions.

Keywords: Finite element method Wear, Contact wire, Predictive maintenance



1. Giriş

Tren elektrifikasyonunda seyir telleri, elektrik enerjisinin kesintisiz olarak trenlere iletebilmesinde pantograf ile birlikte önemli bir rol oynamaktadırlar. Lokomotif üzerinde yer alan pantograf ekipmanı, sürekli olarak mekanik bir temas yoluyla seyir telinden akım çekmek üzerine tasarlanmış ve tren hareketi sırasında sürekli olarak yukarı yönlü bir temas kuvvetli ile kesintisiz bir enerji aktarımını hedeflemektedir. Bu yukarı yönlü temas kuvveti seyir teli ve pantograf üzerindeki karbon çubuklar arasındaki sürtünmeyi artırmakta ve zamanla öncelikle karbon çubukların (Ding vd., 2014) daha sonra ise seyir tellerinin (Ding vd., 2011) (3050 yıl) aşınmadan dolayı yenilenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Her ne kadar uzun yıllarca çalışmalar daha çok düşük servis ömürlerinden dolayı karbon çubuklara yoğunlaştırılsa da, özellikle tren hızlarındaki artışlar pantograf dinamiklerini sert bir şekilde etkilemeye başlamış ve seyir tellerinin karbon çubuklardan daha önce hasar alabileceklerini ortaya koymuştur. Temas problemleri başlıca elektrik iletim kalitesini olumsuz olarak etkilemekte, pantograf ve seyir teli etkileşiminin sadece mekanik bir etkileşim olmaması aynı zamanda elektriksel bir etkileşime de sahip olmasından dolayı bu temas problemi özellikle lokal olarak elektriksel arkların oluşumuna neden olmaktadır. Araç dinamiklerinin yanında çevresel etkenler, iklim şartları, katener hatlardaki bağlantı elemanları gibi faktörlerden dolayı seyir teli ve pantograf teması kesintilere uğrayabilmekte ve ark oluşumu gözlenebilmektedir. İki yüzey arasında mekanik temas kaybolduğunda enerji sürekli olarak aktarılamaz ancak elektriksel temasın devam etme isteğinden dolayı voltaj ve akım parametrelerinde dalgalanmalar meydana gelir ve bunun sonucunda arklar oluşmaktadır. Diğer bir deyişle, elektriksel temas hava üzerinden arklar ile devam etmeye çalışmaktadır. Arklar milisaniyeler içerisinde gerçekleşen anlık olaylar olsa da bu problem hem pantograf karbon yüzeyinde hem de seyir tellerinde yüksek sıcaklık artışlarına neden olabilmektedir (Xu vd., 2018).

Öncü çalışmalar bu sıcaklık artışlarının sürtünme kaynaklı pantografseyir teli aşınmasını ve elektrik iletimini ciddi oranlarda etkilediği sonucuna varmıştır (Collina vd., 2003; Feng vd., 2005; Hai He vd., 1998). Daha sonraki çalışmalar göstermiştir ki arklar sadece sürtünme kaynaklı aşınmalara neden olmamakta aynı zamanda ortaya çıkan ani sıcaklık artışları seyir telinin mekanik ve metalurjik özelliklerini ciddi miktarlarda etkilemektedir (Dong vd., 2011; Midya vd., 2009). Kubo vd. (Kubo & Kato, 1998) ark deşarj mekanizmasının elektrik ark kaynağına benzer özellikler gösterdiğini öne sürmüştür. Zhu vd. (Zhu vd., 2016) gerçekleştirdikleri ark plazmasının bilgisayar destekli hesaplamalı akışkanlar analizinde göstermiştir ki bakır esaslı seyir telinin yüzey sıcaklığı elektrik arkları nedeniyle ergime sıcaklığına ulaşmaktadır. Aynı şekilde Yang vd. (Yang vd., 2016) ve Gao vd. (Gao vd., 2016) ark sonucunda ortaya çıkan sıcaklık artışının sürtünmeyle ortaya çıkan sıcaklık artışına kıyasla çok büyük olduğunu göstermişlerdir. Ark nedeniyle oluşabilecek ani sıcaklık artışlarının malzeme özelliklerine etkileri üzerine Sunar vd. (Sunar, 2021; Sunar vd., 2021; Sunar & Fletcher, 2021) farklı voltaj, akım ve ark parametreleri kullanarak bakırgümüş esaslı (CuAg) seyir telleri ile laboratuvar ortamında detaylı ark deneyleri yapmıştır. Bu deneyler göstermiştir ki, arklar seyir teli yüzeyinden başlayıp malzeme içerisine doğru bir hasar oluşturmakta yüzey üzerinde mikro çatlaklara, malzeme metalurjisinde ise tane büyümelerine ve bunu takiben %50'ye varan lokal sertlik düşüşlerine neden olmaktadır. Sunar vd. (Sunar & Fletcher, 2022) bir sonraki çalışmalarında ark hasarından kaynaklı yüzey mikro çatlaklarının malzeme yorulma ömürlerine etkilerini incelemiş ve ark hasarına uğrayan numunelerin yorulma ömürlerinin azaldığını hatta arkın şiddetine bağlı olarak yorulma hasarının kritik sürtünme aşınma hasarından daha önce gerçekleşebilme ihtimalinin olduğunu öne sürmüşlerdir.

Literatürdeki bu çalışmalarda ve bulgularda, seyir telleri üzerinde bir ark hasarının varlığı etkili bir şekilde ortaya konulmakta, ark hasarı neticesinde tren elektrifikasyonunda kullanılan seyir tellerinin servis ömürlerinin ciddi oranlarda etkilenebileceğini öne sürülmektedirler. Ancak ark hasarının sürtünme aşınması üzerine etkileri literatürde daha çok pantograf karbon parçaları üzerinde incelenmiş, yakın zamanda tespit edilen seyir tellerinde ark nedeniyle

lokal sertlik değişimleri, malzeme metalurjisinde meydana gelen değişimler ve mekanik özelliklerin etkilenmesi sürtünme testlerinden bağımsız bir şekilde incelenmiştir. Bu sebeple, seyir telinde yüzeyden malzeme içine doğru 1 mm'ye kadar ulaşan sertlik değişimleri ve malzeme yüzeyindeki ark hasarlarının pantograf sürtünmesi sonucu ne derece yok olacağı, tekrarlayan ark hasarlarında aşınma ya da arktan kaynaklı hasarların domine edici etkisi hala cevap beklemektedir.

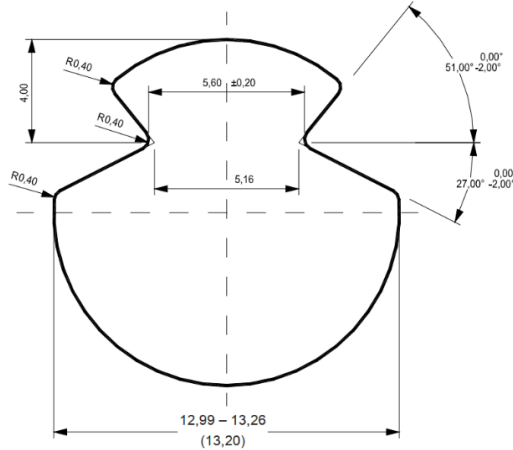
Bu çalışmada, literatürde ortaya koyulan seyir telleri için iki ömür sınırlayıcı problemin, sürtünme aşınması ve ark hasarı nedeniyle ortaya çıkan lokal sertlik değişimlerinin, bir sonlu elemanlar (SE) analizi yardımıyla incelenmesi amaçlanmaktadır. EN 50149 (BSI, 2012, s. 50149) seyir telleri için oluşturulan standarta göre hazırlanacak seyir teli sonlu elemanlar modeli literatürdeki deneysel verileri bir simülasyon ortamına aktararak, ark hasarı sonucunda meydana gelmiş lokal sertlik değişimlerinin, temas kuvveti altında bir pantograf karbon çubuğu ile sürtünmesi sonucunda ortaya çıkan aşınma davranışlarını inceleyecek, ark hasarı ve sürtünme hasarının birbirlerine karşı dominasyonunu detaylı bir şekilde açıklamaya çalışacaktır.

Çalışma bulguları sonucunda elde edilecek sonlu elemanlar modeli, farklı parametrelerde seyir teli ve pantograf sürtünmesi probleminin incelenmesi için bir temel oluşturabilecek, deneysel çalışmalar geliştirebilmek için öncül sonuçlar elde edilmesinde önemli bir rol oynayacaktır.

2. Gereç ve yöntem

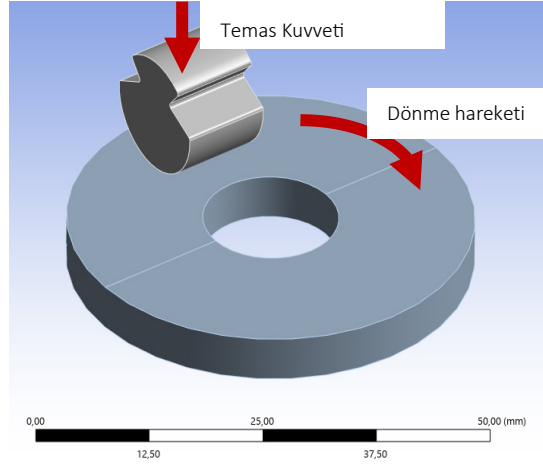
Bu çalışmada pinondisc prensibi temel alınarak arklanma öncesi ve sonrası AC120 tipi seyir teli sonlu elemanlar yazılımı ANSYS Workbench 2024 R2 ile sürtünme aşınma analizine tabii tutulmuştur. Aşınma modelinin oluşturulmasında SE yazılımına bir APDL kodu entegre edilmiştir.

2.1 Geometri



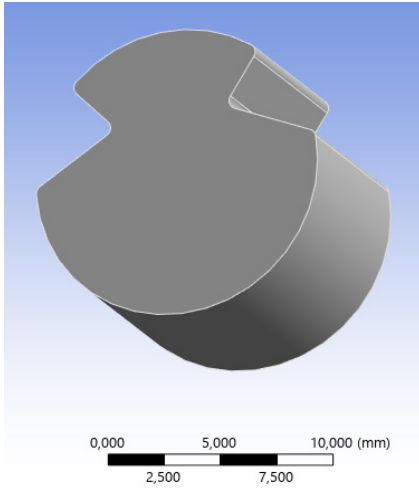
Şekil 1 EN50149'a göre AC120 tipindeki bir seyir telinin geometrik ölçülerini göstermektedir.

Kolektör malzemesi ise analiz işlemini kolaylaştırmak ve temas süresini uzun tutabilmek adına bir disk formunda seyir telini alt noktasından temas ettirilmiştir. Analizler sırasında 10 mm uzunluğunda bir seyir teli modeli tercih edilmiş ve kolektör malzemesinin dairesel hareket ile bir pinondisc gibi seyir teline temas etmesi sağlanmıştır. Şekil 2 sonlu elemanlar yönteminde kullanılan modelin sınır şartlarını göstermektedir.

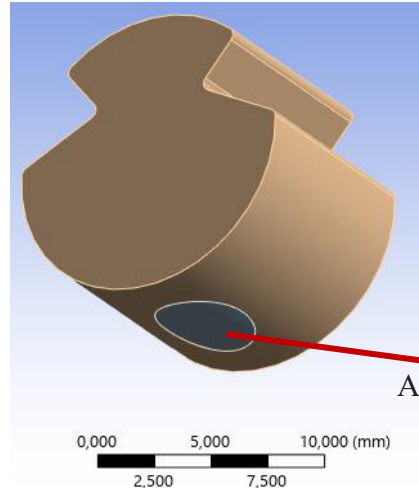


Şekil 1 AC120 seyir teli geometrisi

Bu çalışmada ark sonucu ortaya çıkan malzeme özellikleri değişiminin aşınma ömrüne etkisini incelemek için Şekil 2’de gösterilen temel şartları kullanarak 2 farklı SE modeli geliştirilmiştir. Bu iki model sırasıyla ark hasarına uğramamış ve arkten etkilenmiş bir bölge içeren seyir tellerinden oluşmaktadır (Şekil 3).



a. Ark hasarına uğramamış seyir teli



b. Ark hasarına uğramış seyir teli

Şekil 3 SE modellerinde kullanılan seyir telleri

2.2 Sonlu Elemanlar Modeli

Malzeme özelliklerinin tanımlanması sonlu elemanlar analizinin gerçekleştirilmesinde önem arz etmektedir. Seyir teli malzemesi ve kolektör malzemesinin mekanik özellikleri aşağıda verilmiştir.

	Seyir Teli	Kolektör
	CuAg0.1	Karbon
Yoğunluk (g/cm^3)	8,89	1,72
Poisson oranı	0,3	0,17
Young Modülü (kN/mm^2)	120	410
Sertlik	120 HV	31.6 HV

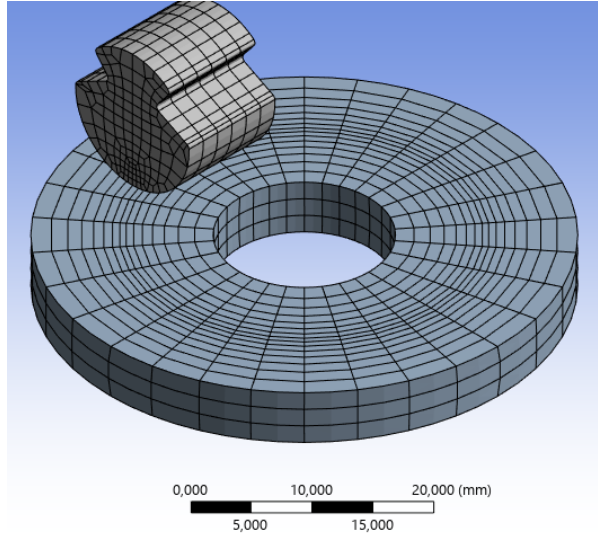
Tablo 1 Seyir teli ve kolektör malzemesinin malzeme özellikleri

Seyir teli ve kolektör arasında meydana gelen etkileşimi simüle etmek amacıyla iki malzemeye bir sürtünmeli temas bağlantısı eklenmiştir. Bu bağlantıda sürtünme katsayısı 0,2, sürtünme davranışı asimetrik, temas yakalama metodu (detection method), “nodalnormal to target” ve formülasyon ise “Augmented Lagrange” olarak seçilmiştir. Ayrıca ark hasarı olan seyir teli modelinde ise arkta etkilenmiş bölge ve seyir teli arasına “bonded” bağlantısı uygulanmıştır. Ark hasarından dolayı hasarlı bölgenin sertliği 60 HV’e kadar düştüğü daha önceki çalışmalardan bilinmektedir (O. Sunar vd., 2021). Bu sebeple ark hasarlı bölgenin sertlik özellikleri için literatür verisi kullanılmıştır.

Model ağı işlemleri sırasında quadratic elemanlar kullanılmıştır ve toplam element ve düğüm sayıları sırasıyla 11160 ve 11279 olarak belirlenmiştir. Şekil 4 sonlu elemanlar modelinde kullanılan mesh geometri özelliklerini göstermektedir.

Sonlu elemanlar analizi sınır şartlarına bakıldığında, karbon malzemeyi temsil eden dairesel alt plaka iç kısımdan yataklanarak “rotation” hareketine, seyir teli ise yan kanallardan sınırlandırılarak sadece y eksenini boyunca hareket etmesine izin verilmiştir. Seyir telinin tepe noktasından ise y eksenini boyunca bir temas kuvveti uygulanmıştır. Analizde her bir adım, dairesel plakanın 1 tam turuna denk gelmektedir ve toplam analiz süresi 100 adım ile sınırlandırılmıştır. Toplam analiz süresine karşılık gelen sürtünme miktarı 10 km’ye denk gelmektedir.

Sürtünme aşınma analizleri değişen farklı temas kuvvetleri ve 2 farklı seyir teli ile gerçekleştirilmiştir. Tüm analizler için toplam dönüş mesafesi sabit tutulmuştur. Tablo 2 SE analizinde kullanılan test parametrelerini göstermektedir.



Şekil 4 Sonlu elemanlar modeli mesh özellikleri

Tablo 2 Analiz parametreleri

TestID	Malzeme	Temas Kuvveti (N)
T150	CuAg0.1	100
T1100	CuAg0.1	200
T1200	CuAg0.1	350
T250	CuAg0.1(Ark)	100
T2100	CuAg0.1(Ark)	200
T2200	CuAg0.1(Ark)	350

2.3 Aşınma Modeli

Archard yasası tribolojide en yaygın şekilde kullanılan bir aşınma yaklaşımıdır. Bu aşınma modelinde aşınma oranı malzeme sertliği, temas basıncı ve sürtünme mesafesinin fonksiyonu olarak ifade edilmektedir.

$$Q = \frac{K_{ad} F_N S}{H}$$

burada Q , H , K_{ad} , F_N ve s sırasıyla, yumuşak malzemenin sertliği aşınma katsayısı, temas kuvveti ve sürtünme mesafesidir. SE yazılımı Ansys workbench üzerine Archard teoreminin aktarımı APDL kodlama ile gerçekleştirilmiştir.

TB,WEAR,cid,,,ARCD

TBDATA,1,K,H,m,n

burada “TB,WEAR,cid,,,ARCD” komut satırı ile archard yasası temas noktasına tanımlanmış ve K , H , m , n parametreleri ile de aşınmada kullanılarak değerler değişken olarak atanmıştır.

Ayrıca aşınma sırasında elemanlarda bozulmalar, yok olmalar meydana geleceğinden, elemanlar üzerinde %15'lik bozulma söz konusu olduğunda meshler üzerinde nonlinear bir adaptasyon gerçekleştirmek üzere bir kod entegre edilmiştir.

/SOLU

allsel,all,all

esel,s,type,,PINCID

cm,CONWEARELEM,elem

allsel,all,all

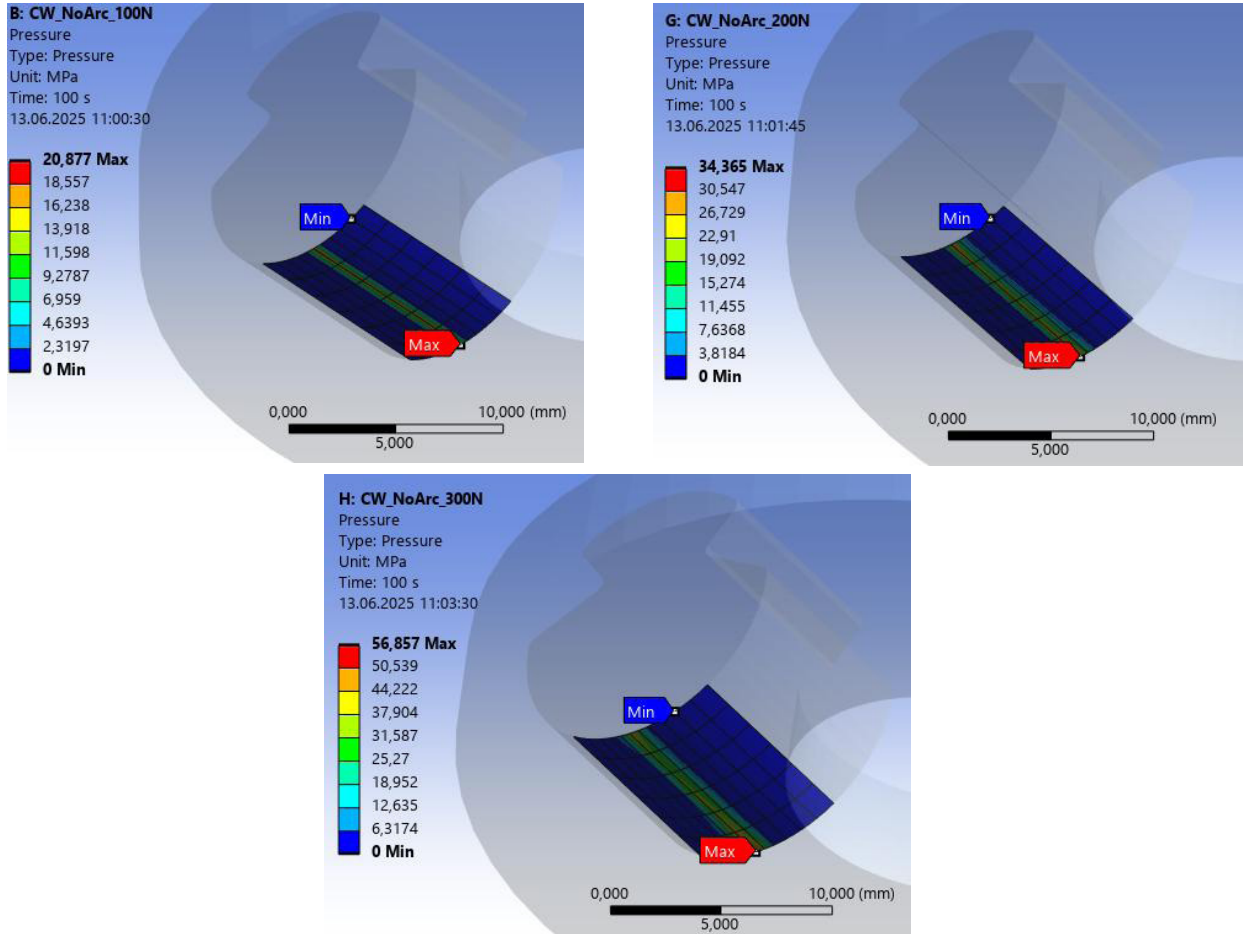
NLAD,CONWEARELEM,ADD,CONTACT,WEAR,0.15

NLAD,CONWEARELEM,ON,ALL,ALL,1,,7

NLAD,CONWEARELEM,LIST,ALL,ALL

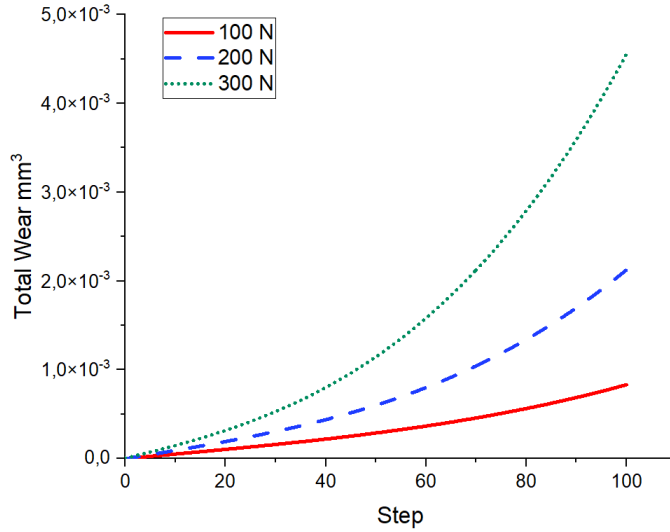
3. Bulgular

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ark hasarının ve temas kuvvetinin aşınma üzerine etkileri münferit olarak incelemiştir. Şekil 5 100 N, 200 N ve 300 N temas kuvveti altında sürtünme aşınması sırasında seyir teli alt yüzeyinde oluşan maksimum basıncı göstermektedir. Bu bölgede çizgisel bir temas oluşmakta ve uygulanan temas kuvvetine bağlı olarak maksimum basınç değeri artmaktadır.



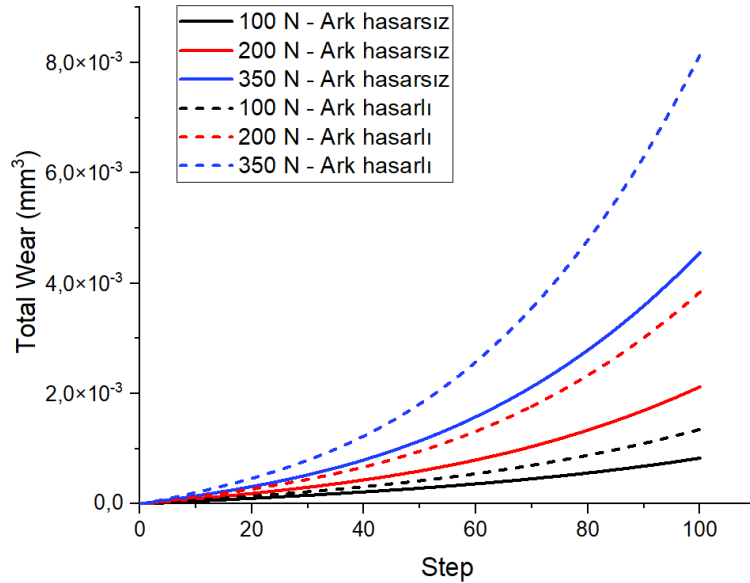
Şekil 5 Temas kuvvetine bağlı oluşan maksimum yüzey basıncı

Şekil 6 göstermektedir ki temas kuvveti ve toplam aşınma miktarı arasında üstel bir bağlantı vardır. Temas kuvvetinin 100 N'dan 350 N'a çıkması toplam aşınma miktarını yaklaşık 5 kat artırmıştır.



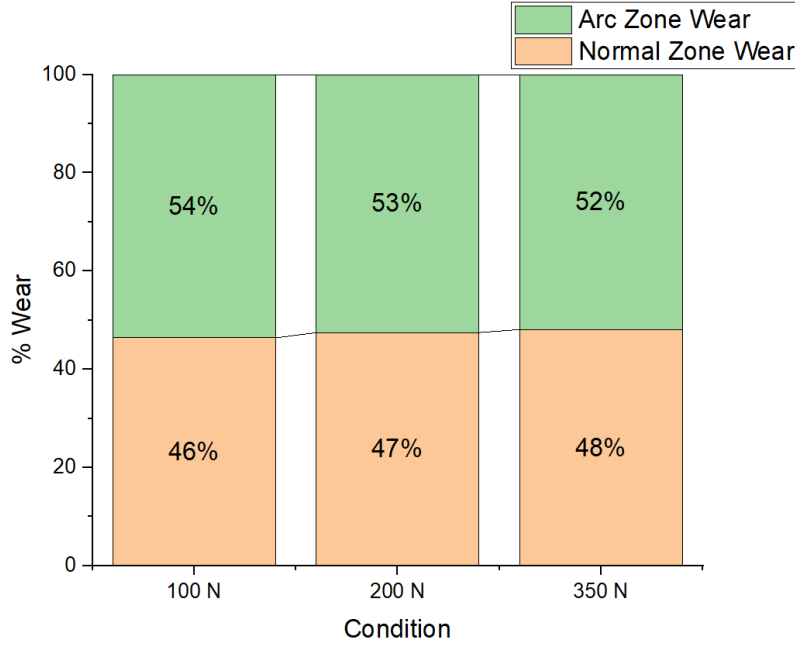
Şekil 6 Değişken temas kuvvetleri altında seyir telindeki toplam aşınma miktarı

Ark etkisinin seyir teli aşınma miktarına etkisi incelendiğinde görülmüştür ki, ark hasarı toplam aşınma miktarını 100 N altında yaklaşık %61, 200N altında %80,7 ve 350 N altında %80 oranında artırmıştır (Şekil 7).



Şekil 7 Ark hasarına bağlı aşınma miktarı

Şekil 8 seyir teli alt yüzeyindeki aşınma miktarının ark hasarının olduğu ve olmadığı yüzey arasındaki yüzdesel dağılımını göstermektedir. Çizgisel olarak ark hasarlı bölge toplam temas uzunluğunun yaklaşık %40'ını oluşturmalarına rağmen seyir teli alt yüzeyinde yarıdan fazla aşınmanın miktarının lokal olarak ark bölgesi içerisinde gerçekleşmiştir.



Şekil 8 Aşınma miktarının yüzeyler arasındaki dağılımı

4. Tartışma

Seyir teli ark hasarının gerek deneysel yöntemlerle gerekse bilgisayar destekli analiz yöntemleri ile incelenmesi oldukça karmaşık bir prosestir. Özellikle elektriksel bir problemin deney ortamına aktarılması ve bu sonuçların parametreler haline getirilip sonlu elemanlar yazılımında yapısal analizler ile birleştirilmesi bir dizi varsayım ve kısıtlama getirmektedir. Bu çalışma mevcut literatürde bulunan ark hasarının metalürjik yapılarının incelenmesi, ark hasarı sonrası ortaya çıkan sertlik düşüşlerinin ve hasar geometrisinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmaların devamı niteliğindedir (O. Sunar, 2021; O. Sunar vd., 2021; O. Sunar & Fletcher, 2021; Ö. Sunar, 2024).

Gerek elde edilmiş modelin çözümleme basamaklarının karmaşık olması, gerekse mevcut analiz sürelerinin uzun olması nedeniyle bulunan sonuçlar kısıtlı bir temas mesafesini inceleyebilmektedir. Ancak geliştirilen model mevcut archard yasası çerçevesi içerisinde temas kuvvetinin ve malzeme özelliklerinin aşınma üzerine negatif etkileri göstermesi açısından önemlidir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada elde edilen bulgular göstermektedir ki, aşınma problemi ve ark problemi sonrasında ortaya çıkan mekanik özellik değişimleri sonlu elemanlar yazılımı ile bir araya getirilebilmektedir. Ayrıca deneysel yöntemleri destekleyici bir şekilde seyir teli hasar mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için geliştirilen metod ve yazılım entegrasyonu mevcut literatüre önemli katkılar sağlayabilecektir. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçlar ark hasarı ve seyir tellerinin lokal olarak aşınma ömürleri arasında önemli bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında 23GAP065 kodlu proje ile desteklenmiştir.

**Kaynaklar**

- BSI. (2012). BS EN 50149: Railway applications—Fixed installations—Electric traction—Copper and copper alloy grooved contact wires. <https://doi.org/10.3403/30209002>
- Collina, A., Melzi, S., & Facchinetti, A. (2003). On the prediction of wear of contact wire in OHE lines: A proposed model. *Vehicle System Dynamics*, 37(SUPPL.), 579592. <https://doi.org/10.1080/00423114.2002.11666264>
- Ding, T., Chen, G. X., Bu, J., & Zhang, W. H. (2011). Effect of temperature and arc discharge on friction and wear behaviours of carbon strip/copper contact wire in pantographcatenary systems. *Wear*, 271(910), 16291636. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.031>
- Ding, T., Xuan, W., He, Q., Wu, H., & Xiong, W. (2014). Study on Friction and Wear Properties of Pantograph Strip/Copper Contact Wire for HighSpeed Train. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 8(1), 125128. <https://doi.org/10.2174/1874155X20140501005>
- Dong, A., Wu, G., Gao, G., Zhou, L., Wang, W., Wang, B., Cui, Y., & Yang, M. (2011). Simulation system of pantograph arcing. 2011 1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology, ICEPE2011 - Proceedings, 637641. <https://doi.org/10.1109/ICEPEST.2011.6123066>
- Feng, Y., Zhang, M., & Xu, Y. (2005). Effect of the electric current on the friction and wear properties of the CNTAgG composites. *Carbon*, 43(13), 26852692. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.05.029>
- Gao, G., Hao, J., Wei, W., Hu, H., Zhu, G., & Wu, G. (2016). Dynamics of PantographCatenary Arc during the Pantograph Lowering Process. *IEEE Transactions on Plasma Science*, PP(99), 27152723. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2601117>
- Hai He, D., Manory, R. R., & Grady, N. (1998). Wear of railway contact wires against current collector materials. *Wear*, 215(12), 146155. [https://doi.org/10.1016/S00431648\(97\)002627](https://doi.org/10.1016/S00431648(97)002627)
- Kubo, S., & Kato, K. (1998). Effect of arc discharge on wear rate of Cuimpregnated carbon strip in unlubricated sliding against Cu trolley under electric current. *Wear*, 216(2), 172178. [https://doi.org/10.1016/S00431648\(97\)001841](https://doi.org/10.1016/S00431648(97)001841)
- Midya, S., Bormann, D., Schütte, T., & Thottappillil, R. (2009). Pantograph arcing in electrified railwaysmechanism and influence of various parameters—Part II: With AC traction power supply. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(4), 19401950.
- Sunar, O. (2021). Arc Damage Identification and Its Effects on Fatigue Life of Contact Wires in Railway Overhead Lines (PhD Thesis) [The University of Sheffield <http://etheses.whiterose.ac.uk/28205/> ISNI:0000 0004 9356 9895]. <http://etheses.whiterose.ac.uk/28205/>
- Sunar, O., & Fletcher, D. (2021). Case study: Mechanical and metallurgical investigation of arc damage in overhead line contact wires. **The Journal of Permanent Way Institution**, 139(3), 3439. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21355.41762/1>
- Sunar, O., & Fletcher, D. (2022). A new small sample test configuration for fatigue life estimation of overhead contact wires. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**. <https://doi.org/10.1177/09544097221116531>

- Sunar, O., Fletcher, D., & Beagles, A. (2021). Laboratory Assessment of ARC Damage in Railway Overhead Contact Lines With a Case Study on CopperSilver and Low Oxygen Content Copper. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 36(5), 30743081. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3032798>
- Xu, P., Yang, Z., Wei, W., Gao, G., & Wu, G. (2018). Modeling and simulation of arc and contact wire molten pool behavior during pantograph lowering process. **AIP Advances**, 8(11). <https://doi.org/10.1063/1.5044576>
- Yang, Z., Zhang, Y., Zhao, F., & Shangguan, B. (2016). Dynamic variation of arc discharge during currentcarrying sliding and its effect on directional erosion. **Tribology International**, 94, 7176. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.03.012>
- Zhu, G. y., Gao, G. q., Wu, G. n., Gu, Z., Wu, J., & Hao, J. (2016). Modeling pantographcatenary arcing. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, 230(7), 16871697. <https://doi.org/10.1177/0954409715607906>



Diş Dibi Çatlaklarının Düz Dişli Sistemlerinin Dinamik Davranışına Etkisi

The Effect of Tooth Root Cracks on the Dynamic Behavior of Spur Gear Systems

Ahmet Kerem DENİZ¹, Prof.Dr. Nizami AKTÜRK²

¹ Ahmed Kerem DENİZ, Eti Mah. Yükseliş Sokak, No:5, 06570, Maltepe, ANKARA, denizahmedkerem@gmail.com, ORCID No: 0009-0003-0000-4845

² Prof. Dr. Nizami AKTÜRK, Eti Mah. Yükseliş Sokak, No:5, 06570, Maltepe, ANKARA, nakturk@gazi.edu.tr, ORCID No: 0000-0003-1398-8145

DOI : <http://dx.doi.org/10.31796/ogummf.xxxxxx>

Özet

Endüstride yaygın olarak kullanılan düz dişli sistemleri, uzun süreli çalışma, ağır yük koşulları, yüksek basınç ve yetersiz yağlama gibi etkenler nedeniyle çeşitli yapısal hasarlara maruz kalabilmektedir. Amerikan Dişli Üreticileri Derneği tarafından sınıflandırılan dişli hasar türleri arasında, aniden gelişmesi ve sistemin işlevini yitirmesine yol açabilmesi sebebiyle, diş dibi çatlaklarının en kritik olduğu düşünülmektedir. Diş dibi çatlağı, zamanla değişen kavrama rijitliğini doğrudan etkileyerek sistemin dinamik cevabında belirgin değişikliklere neden olur. Zamanla değişen kavrama rijitliği (TVMS), yapılan dişli titreşim modellemelerinde sistemin dinamik davranışını belirleyen temel bir parametre olup bu parametrenin değişimi sayesinde dişli arızaları tespit edilebilir. Bu çalışmada TVMS, sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla hesaplanmış ve analitik formül tabanlı bir programla doğrulanmıştır. Diş dibi çatlağının başlangıç noktası, yük dağılımı, işleme izleri ve yüzey kusurları gibi faktörlere bağlı olduğu için, farklı çatlak uzunlukları ve başlangıç noktalarına bağlı olarak çeşitli senaryolar kurgulanmıştır. Farklı senaryolara ait TVMS değerleri, sistemin hareket denklemleri içinde kullanılmış ve 4. dereceden Runge-Kutta metodu vasıtasıyla MATLAB programında titreşim çözümleri elde edilmiştir. Bu çözümlerin daha detaylı yorumlanması için zaman alanında farklı istatistiksel parametrelerin analizi; frekans alanında ise hızlı Fourier dönüşümü kullanılmıştır. Ayrıca, dişli sisteminin bir özdeğer problemine dönüştürülmesiyle elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri aracılığıyla sistemin dinamik davranışını kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düz dişli, Yorulma çatlağı ilerlemesi, Sonlu eleman yöntemi, Zamanla değişen kavrama rijitliği

Abstract

Spur gear systems, widely used in industrial applications, are susceptible to structural damage due to long-term operation, heavy loads, high pressure, and insufficient lubrication. Among the gear failure types classified by the American Gear Manufacturers Association, tooth root cracks are considered the most critical, as they can develop suddenly and lead to complete system failure. These cracks directly affect the time-varying mesh stiffness (TVMS), a key parameter influencing the system's dynamic response in gear vibration modeling. Variations in TVMS can be used to detect gear faults. In this study, TVMS was calculated using the finite element method and validated with an analytical formula-based approach. Since crack initiation depends on factors such as load distribution, machining marks, and surface defects, multiple scenarios with varying crack lengths and starting points were modeled. The calculated TVMS values were incorporated into the system's equations of motion, and vibration responses were obtained using the 4th-order Runge-Kutta method in MATLAB. Time-domain statistical features and frequency-domain analysis via the fast Fourier transform (FFT) were used to interpret system responses. Furthermore, natural frequencies and mode shapes were derived by solving the eigenvalue problem to comprehensively assess the dynamic behavior of the gear system.

Keywords: Spur gear, Fatigue crack growth, Finite element method, Time-varying mesh stiffness



1. Giriş

Dişli kutuları, endüstriyel makinelerden otomotiv ve havacılık sektörüne kadar geniş bir alanda kritik ve yaygın olarak kullanılan güç iletim bileşenlerindendir. Artan endüstriyel talepler ve verimlilik gereksinimleri doğrultusunda, dişli kutularındaki güç yoğunluğunu ve dayanıklılığı arttırırken aynı zamanda maliyetleri düşürmek dişli endüstrisini sürekli baskı altında tutmaktadır. Bu bağlamda, yenilikçi malzeme kullanımı, optimize edilmiş üretim teknikleri ve gelişmiş analiz yöntemleri dişli sistemlerinin performansını arttırmada önemli rol oynamaktadır. Dişli sistemleri, uzun süreli kullanım ve ağır çalışma koşulları altında; yüksek basınç ve yetersiz yağlama gibi etkenler sonucu çeşitli hasarlara uğrayabilir. Amerikan Dişli Üreticileri Derneği, bu hasarları farklı kategorilere ayırmaktadır. Bu kategoriler arasında diş dibi kırılması, tekrarlayan yüklemeler nedeniyle ortaya çıkan yorulma sonucu oluşmaktadır. Yapılan çalışma kapsamında, bir düz dişlide oluşan diş dibi çatlağının titreşim verisini nasıl etkilediği incelenmiştir. Zamanla değişen kavrama rijitliği (TVMS), dişlinin dinamik davranışını doğrudan etkileyip titreşim tepkisini oluşturan ve bu sayede dişli arızalarını belirlemede etkili olan bir parametredir. TVMS, dişin kavrama süreci boyunca temas yükünü taşıma kapasitesini yansıtır. Diş dibinde oluşan bir çatlak, zamanla değişen kavrama rijitliğini doğrudan etkileyerek sistemin dinamik cevabında belirgin değişikliklere yol açar. TVMS'deki bu değişimler, titreşim spektrumunda karakteristik frekans bileşenlerinin ortaya çıkmasını sağlayarak arızanın erken teşhis edilmesine imkan tanır. Son kısımda ise dişli sistemi bir özdeğer problemine dönüştürülerek elde edilen verilerin detaylı incelemesi yapılmıştır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Modern literatürde, diş dibindeki maksimum gerilmenin uygun şekilde doğrulanması için, üç boyutlu dinamik olarak yüklenmiş dişlinin uygun bir şekilde tek boyutlu yarı statik bir probleme dönüştürülebileceği varsayımına dayanan çeşitli klasik prosedürler (DIN, AGMA, ISO, Niemann, vb.) mevcuttur (Glodez, 1998). Bu prosedürler, bir dizi farklı katsayı kullanarak, yüklü bir dişlide gerçekte ortaya çıkan iç ve dış dinamik kuvvetler, dişlilerin temas alanı, kavramadaki dişler üzerindeki farklı yük dağılımı gibi farklı çalışma koşullarını hesaba katmaya çalışır. Çatlak davranışlarının tahmini açısından gerilme yoğunluğu faktörleri en kritik parametreler arasında yer almaktadır (Lewicki, 2002). 1990'ların sonunda, ABD Ordu Araştırma Laboratuvarı'nda görev yapan Lewicki'nin yürüttüğü çalışmalar hem dişlilerde çatlak ilerlemesinin anlaşılması hem de sağlık ve kullanım izleme sistemlerinin geliştirilmesi açısından önemli bir dönüm noktası olmuştur. Literatürde, zamanla değişen kavrama rijitliğinin (TVMS) hesaplanması için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler genel olarak analitik yöntemler, sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel ölçümlere dayalı yöntemler olarak sınıflandırılabilir. Analitik yöntemde dişli, değişken kesitli bir konsol kiriş olarak modellenir ve bu modelde potansiyel enerji metodu sıklıkla tercih edilmektedir. İlk olarak Yang ve Lin (1987) tarafından kullanılan bu metod daha sonra Tian (2004) tarafından kesme enerjisinin de hesaba katılması ile geliştirilmiştir. Daha sonrasında Sainsot ve Vexlex (2004) tarafından geliştirilen modelde diş dibindeki radyus da hesaplamalara dahil edilmiştir. Chen ve Shao (2013) tarafından geliştirilen planet dişlinin TVMS hesabında rim deformasyonu bileşeni eklenmiştir. Pandya ve Parey (2013) farklı dişli parametrelerinin, yüksek kavrama oranlı dişlilerde TVMS'e ve çatlak davranışına olan etkisini incelemiştir. Ma, Zeng, Feng, Pang ve Wen (2015), dişlinin yük altında elastik deformasyona uğraması sebebiyle oluşan uzatılmış diş temasının TVMS hesabına etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, analitik yöntemin daha kolay ve hızlı sonuç elde etmek amacıyla ter-

cih edildiği, ancak doğruluğunu teyit etmek için bir sonlu elemanlar modeline ihtiyaç duyulduğu gözlenmiştir. Temas davranışını doğru şekilde simüle edebilmek için ince bir ağ örgüsünün gerekli olması ve dişli çiftinin temasını doğru modellemenin zorluğu sonlu elemanlar yönteminin dezavantajları olsa da bu yöntem sıklıkla kullanılmaktadır. Chaari, Fakhfakh ve Haddar (2008), tek dişe sahip bir dişlinin 3 boyutlu sonlu elemanlar modelini oluşturmuş ve bu model hesap kolaylığı sebebiyle pek çok araştırmacı tarafından tercih edilmiştir. Son olarak, TVMS'nin hesaplanmasında deneysel yöntemler de kullanılmaktadır. Gerinimölçer, fotoelastisite ve dijital görüntü korelasyonu gibi teknikler bu yöntemin temel araçları arasında yer almaktadır. Örneğin, Karpat, Yuce ve Doğan (2019) tarafından tek diş rijitliğini belirlemek amacıyla bir test düzeneği tasarlanmış; doğrusal değişken diferansiyel transformatör (LVDT) sensörü kullanılarak dişlilerin elastik deformasyonu ölçülmüş ve bu veriler sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen deformasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Patil, Karuppanan ve Atanasovska (2016), evolvent düz dişlinin tek diş rijitliğini deneysel olarak ölçmek için özel bir test düzeneği tasarlamış ve pinyon tarafındaki basınç açısının dişli kavrama rijitliği üzerindeki etkisini tahmin etmek amacıyla deneysel bir teknik önermiştir. Ancak, kavrama rijitliğinin doğrudan değil dolaylı olarak ölçüldüğü deneysel yöntemler, her zaman diğer yöntemlerle yüksek uyumlu sonuçlar vermemektedir. Bu durum özellikle deneysel ölçümlerin zorlu koşulları ve dişli malzemelerinin kendine özgü özellikleri nedeniyle ortaya çıkmaktadır (Wu, Yang, Wang, Wang ve Cheng, 2020).

3. Yöntem

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

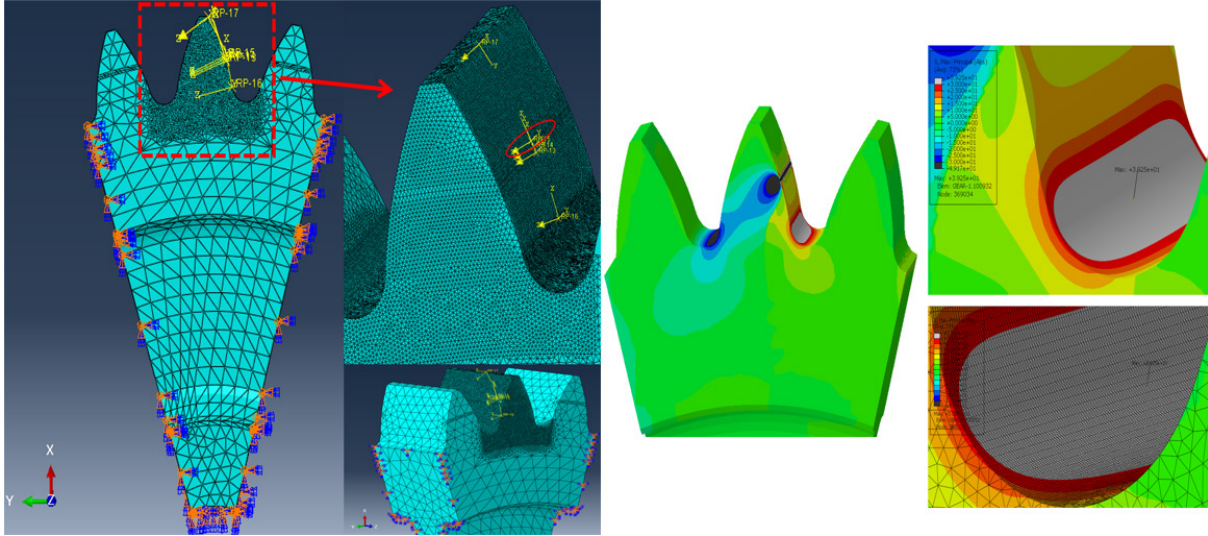
Çalışmada kullanılan dişlinin özellikleri Tablo 1'de belirtilmiştir. Sistem tanımlanırken hesaplama açısından kolay olması için dişli ve pinyonun geometrik ve malzeme özelliklerinin aynı olduğu varsayılmıştır.

Tablo 1 : Dişli Özellikleri

Parametre	Değer	Birim
Modül(m)	3,773	mm
Diş Sayısı (z)	32	-
Taksimat Dairesi Çapı(D_o)	120,736	mm
Basınç Açısı ()	22,5	derece
Temel Daire Çapı (D_b)	111,546	mm
Diş Genişliği (W)	15	mm
Diş Başı Dairesi Çapı (D_a)	130	mm
Diş Dibi Dairesi Çapı (D_f)	111,3035	mm
Elastisite Modülü (E)	200.000	N/ mm ²
Poisson Oranı ()	0,32	-

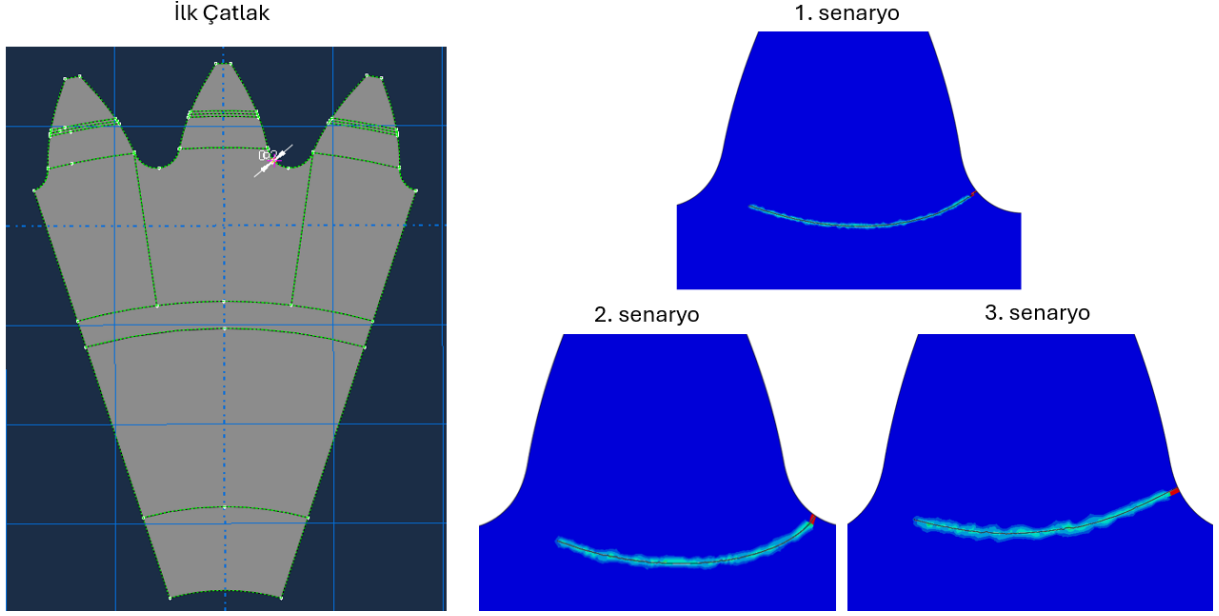
İlk adım olarak dişlide yorulma çatlağının nerede başladığının tespitini yapmak için bir sonlu elemanlar program olan ABAQUS® programında statik analiz yapılmıştır. Yapılan analizin sınır koşulu olarak aşağıda gösterildiği gibi dişlinin üç diş olarak kesildiği kısımlar ve göbek kısmı

ankastre mesnetlenmiş ve tek diş temasının en üst noktasından kuvvet uygulanmıştır. Bunun sonucunda dişlide maksimum çekme gerilmesinin olduğu nokta tespit edilmiştir.



Şekil 1: Dişlinin ABAQUS® ile oluşturulan sonlu elemanlar ağ yapısı ve analiz sonuçları

Yapılan statik analiz sonucu işaretli düğüm noktasında maksimum çekme gerilmesinin olduğu görülmüştür. Bu noktadan geçen ve diş genişliği boyunca sabit olduğu düşünülen çizgide yorulma çatlaklarının başlayacağı varsayılmıştır (Wei ve Jiang, 2019). Bu varsayımlar ışığında ilk senaryodaki çatlak geometrisi, literatürle uyumlu olacak şekilde 0.2 mm uzunluğunda ve asal gerilmeye dik olacak şekilde oluşturulmuştur. Çatlak ilerlemesinin analizi ise yine ABAQUS® programındaki XFEM modülü ile gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, pratikte dişlide tam olarak çatlak başlangıç konumunu tahmin etmek zordur çünkü bu konum Pehan, Kramberger, Flašker ve Zafošnik (2007) tarafından ifade edildiği üzere diş genişliği üzerindeki yük dağılımına, işleme izleri ve çizik gibi imalat sırasında oluşabilecek kusurlara bağlıdır. Bu sebeple dişlide yorulma çatlak başlangıcının maksimum çekme gerilmesinin olduğu bölgede geniş bir aralık içinde başlayabileceği düşünülmektedir. Bu bilgiler ışığında, ideal durum olan ilk senaryoya ek olarak iki senaryo daha oluşturulmuştur. İkinci senaryoda yorulma çatlaklarının ideal konumdan beş eleman (yaklaşık 0,5 mm) daha aşağıda ve üçüncü senaryoda da yorulma çatlaklarının ideal konumdan beş eleman daha yukarıda başladığı varsayılmıştır. Bu varsayımlarla beraber ABAQUS programının XFEM modülünde çatlak ilerleme analizi yapılmıştır.



Şekil 2: İlk çatlak geometrisi ve senaryoların çatlak ilerleme analizi sonuçları

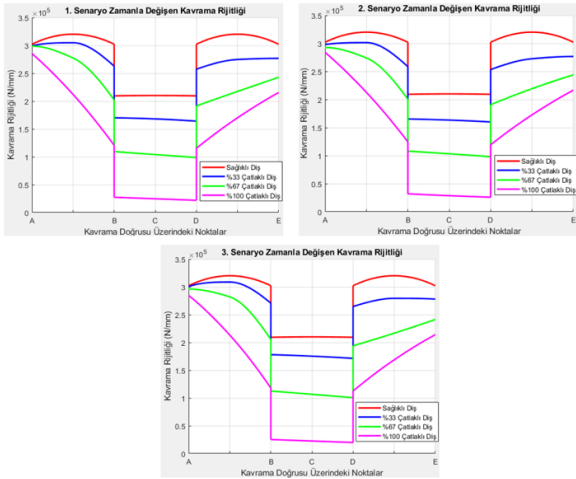
Yukarıdaki şekilde çatlak ilerleme analizi sonuçları için kırmızı ile gösterilen ilk çatlak, yeşil ile gösterilen bölge ise oluşan çatlak temsil etmektedir. Senaryoların çatlak bitiş noktaları birbiriyle kıyaslandığında 1. ve 2. senaryo arasında 416 mikron, 1. ve 3. senaryo arasında ise 287 mikron fark olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, dişlinin rim oranının çok yüksek olması sebebiyle ilk çatlak açısı veya konumundan bağımsız bir şekilde çatlak, dişli yönünde ilerleme eğilimindedir. Bir sonraki aşamada, elde edilen çatlak geometrileri, %33 çatlak, %67 çatlak ve %100 çatlak olmak üzere üç durumda dişli geometrisine yansıtılmış ve birim yük verilmiştir. Diş rijitliği basitçe aşağıdaki formülle ifade edilmektedir.

$$k=F/x$$

Burada F uygulanan yükü, x ise diş deformasyonunu ifade etmektedir. Dişlinin kavrama doğrusu üzerinde hangi noktada olduğunun ve o noktadan dişe etkiyen yüke karşılık diş rijitliğinin bilinmesiyle TVMS hesaplanmıştır. Aşağıdaki şekilde sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve analitik yöntem tabanlı bir hazır program olan WindowsLDP® sonuçları verilmiştir. Düz ve helisel dişli çiftleri için dişli tasarım ve analiz aracı olan WindowsLDP® programının dişlide çatlakla bağlı bir analiz imkanı sunmaması sebebiyle FEM ve WindowsLDP sonuçları sadece sağlıklı durum için kıyaslanmıştır.

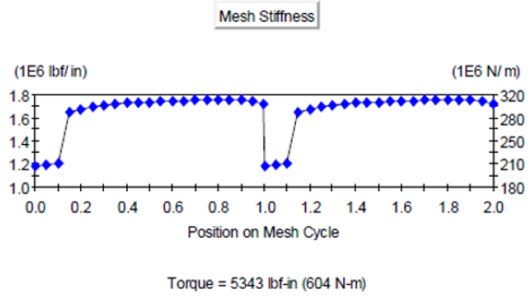


FEM



WindowsLDP

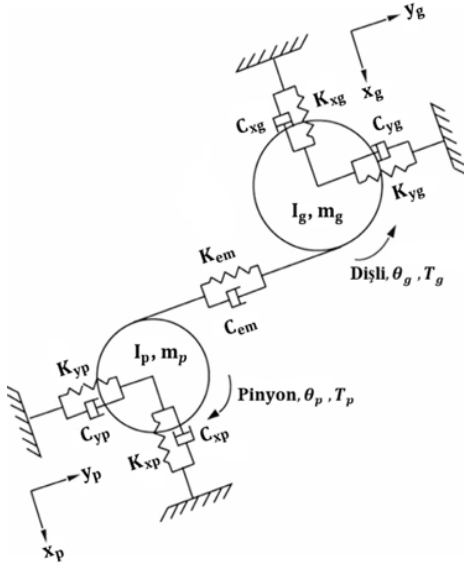
Mesh Stiffness



Kavrama Rijitliği (N/mm)	WindowsLDP*	FEM	Fark (%)
Minimum	206814	209439,9	1,2697
Maksimum	307407	319884,2	4,0589
Ortalama	288888	294757,3	2,0317
Tepe-Tepe	100593	110444,3	9,7933

Şekil 3: FEM ve WindowsLDP sonuçlarının kıyaslanması

İki yöntem karşılaştırıldığında ortalama değerler için farkın %2 olduğu görülmüştür. Buna göre, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile yapılan kavrama rijitliği hesapları ile WindowsLDP® ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Hesaplanan kavrama rijitliği değeri dişli dinamik modelindeki K_{em} elemanı ile ifade edilmiştir. Zamanla değişen kavrama rijitliğinin hesaplanmasının ardından dişli sisteminin dinamik modeli oluşturulmuştur. İyi yağlama koşulları olduğu varsayıldığından sürtünme kuvveti ihmal edilmiştir. Bununla beraber x yönündeki titreşimin de serbest titreşim olduğu ve içsel sönümlenme sebebiyle kaybolacağı düşünülmektedir. Bunun sonucunda oluşturulan dört serbestlik dereceli dinamik modelin şematik gösterimi ve elde edilen hareket denklemleri aşağıdaki gibidir.



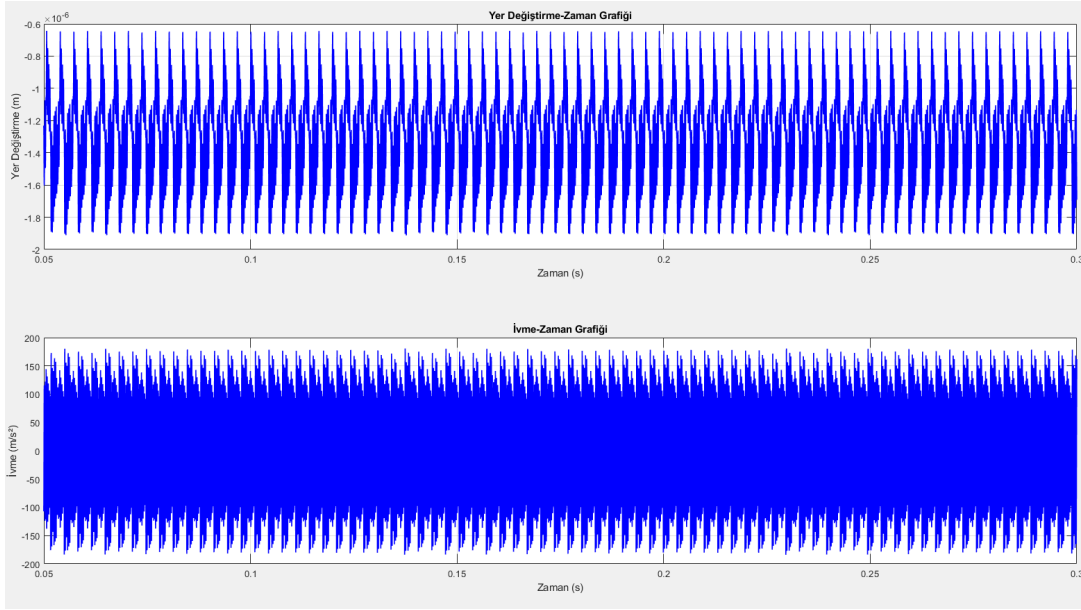
$$\begin{bmatrix} m_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_p \\ \ddot{y}_g \\ \ddot{\theta}_p \\ \ddot{\theta}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{em} + C_{yp} & -C_{em} & C_{em}d_{bp} & -C_{em}d_{bg} \\ -C_{em} & C_{em} + C_{yg} & -C_{em}d_{bp} & C_{em}d_{bg} \\ C_{em}d_{bp} & -C_{em}d_{bp} & C_{em}d_{bp}^2 & -C_{em}d_{bp}d_{bg} \\ -C_{em}d_{bg} & C_{em}d_{bg} & -C_{em}d_{bp}d_{bg} & C_{em}d_{bg}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_p \\ \dot{y}_g \\ \dot{\theta}_p \\ \dot{\theta}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{em} + K_{yp} & -K_{em} & K_{em}d_{bp} & -K_{em}d_{bg} \\ -K_{em} & K_{em} + K_{yg} & -K_{em}d_{bp} & K_{em}d_{bg} \\ K_{em}d_{bp} & -K_{em}d_{bp} & K_{em}d_{bp}^2 & -K_{em}d_{bp}d_{bg} \\ -K_{em}d_{bg} & K_{em}d_{bg} & -K_{em}d_{bp}d_{bg} & K_{em}d_{bg}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_p \\ y_g \\ \theta_p \\ \theta_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T_p \\ T_g \end{bmatrix}$$

Şekil 4: Dişli sisteminin dinamik modeli ve hareket denklemleri

Burada dişli ve pinyonda malzeme ve diş geometrik özellikleri hesaplama açısından kolaylık olması için aynı seçilmiştir. Elde edilen 4 adet 2. derece diferansiyel denklem, MATLAB® programında 4. derece Runge-Kutta metodu ile çözümlenmiştir.

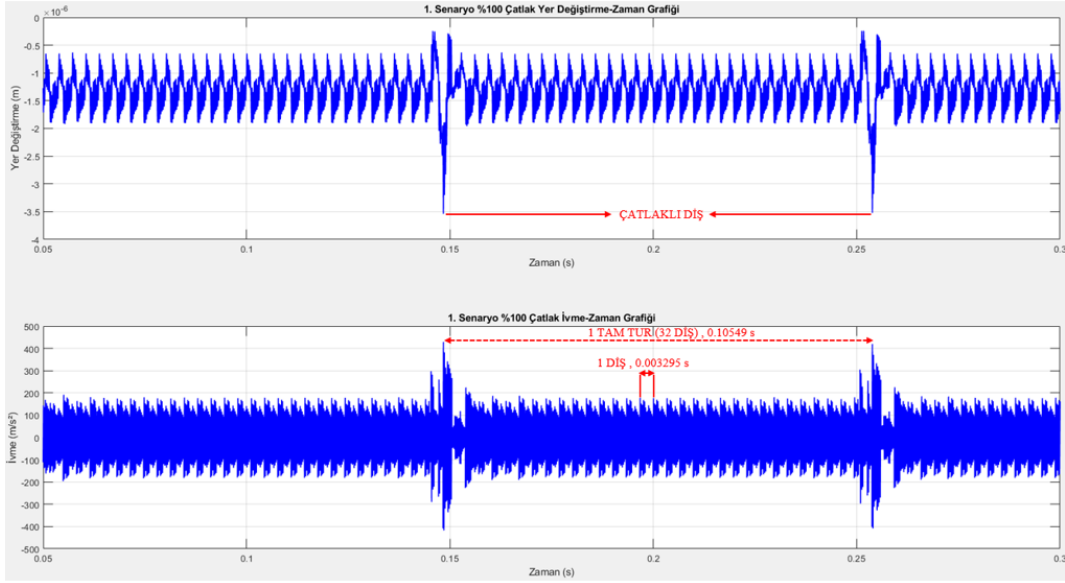
4. Bulgular

Titreşim verisinin zaman tanım bölgesi incelenmesi, sistemin dinamik davranışını anlamak ve olası arızaları tespit etmek için temel bir adımdır. Zaman tanım bölgesi analizi, ölçülen ivme, hız veya yer değiştirme verilerinin zamana bağlı değişimini göstererek sistemin genel titreşim seviyesini, periyodik bileşenlerini ve ani değişimleri gözlemlemeyi sağlar. Ayrıca, istatistiksel ölçütler olan ortalama kök değeri (RMS), crest faktörü ve kurtosis gibi parametreler kullanılarak titreşimin karakteristiği hakkında bilgi elde edilir. Sağlıklı durum için elde edilen yer değiştirme-zaman ve ivme-zaman grafikleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 5: Sağlıklı dişli için ivme-zaman ve yer değiştirme-zaman grafikleri

Dişli kavrama frekansı (GMF) bir dişli kutusu titreşim spektrumunda baskın özelliktir. Bu frekans değeri bir dişli üzerindeki diş sayısı ile dişlinin dönme hızının çarpılmasıyla kolayca hesaplanır. Bir dişli seti sabit bir orana sahip olduğundan dişli kavrama frekansı hem pinyon hem dişli için aynıdır. GMF formülü ve 1. senaryo %100 çatlaklı durumun zaman alanında titreşim grafiği aşağıdaki gibidir. Burada çatlaklı dişin bir sonraki kez kavramaya girişi için geçen süre tam tur periyodunu, GMF değerinin tersi ise bir dişte geçen süreyi ifade eder.



$$GMF = z \times f = \frac{z \times n(rpm)}{60} = \frac{32 \times 569}{60} = 303.467 \text{ Hz}$$

$$T_{TAM\ TUR} = \frac{1}{f} = 0.10549 \text{ s}, \quad T_{BİR\ DİŞ} = \frac{1}{GMF} = 0.003295 \text{ s}$$

Şekil 6: 1. senaryo %100 çatlaklı durum yer değiştirme-zaman ve ivme-zaman grafikleri

İvme-zaman grafiklerinde yalnızca ham veriye dayanarak kesin sonuçlara ulaşmak her zaman güvenilir olmayabilir. Sinyalin istatistiksel özelliklerini analiz etmek, sistemin davranışına dair daha derinlemesine ve objektif bir değerlendirme sunar. Bu sebeple karekök ortalama değer (RMS), tepe değeri, crest faktörü, basıklık ve çarpıklık ile analiz yapılmıştır.

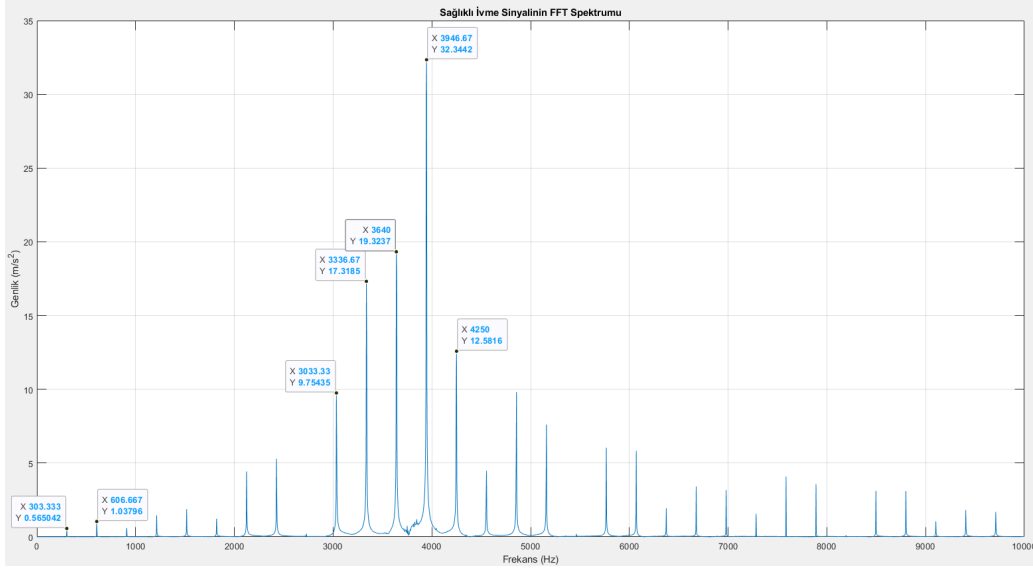


Tablo 2. Zaman Tanım Bölgesinde İstatistiksel Parametreler Analizi

		SENARYOLAR									
Sağlıklı Durum	Sağlıklı Dış	1. Senaryo			2. Senaryo			3. Senaryo			
		%33 Çatlak	%67 Çatlak	%100 Çatlak	%33 Çatlak	%67 Çatlak	%100 Çatlak	%33 Çatlak	%67 Çatlak	%100 Çatlak	
İstatistiksel Parametreler	RMS	99,656	100,679	104,102	105,021	100,576	103,586	104,758	100,741	104,828	105,341
	Tepe Değeri	210,294	231,275	355,093	429,178	228,188	348,995	422,884	234,314	368,874	444,537
	Crest Faktörü	2,11	2,297	3,411	4,087	2,269	3,369	4,037	2,326	3,519	4,22
	Basıklık	1,687	1,73	2,064	2,287	1,727	2,016	2,247	1,735	2,146	2,37
	Çarpıklık	-0,052	-0,048	-0,033	-0,031	-0,048	-0,036	-0,032	-0,047	-0,031	-0,031

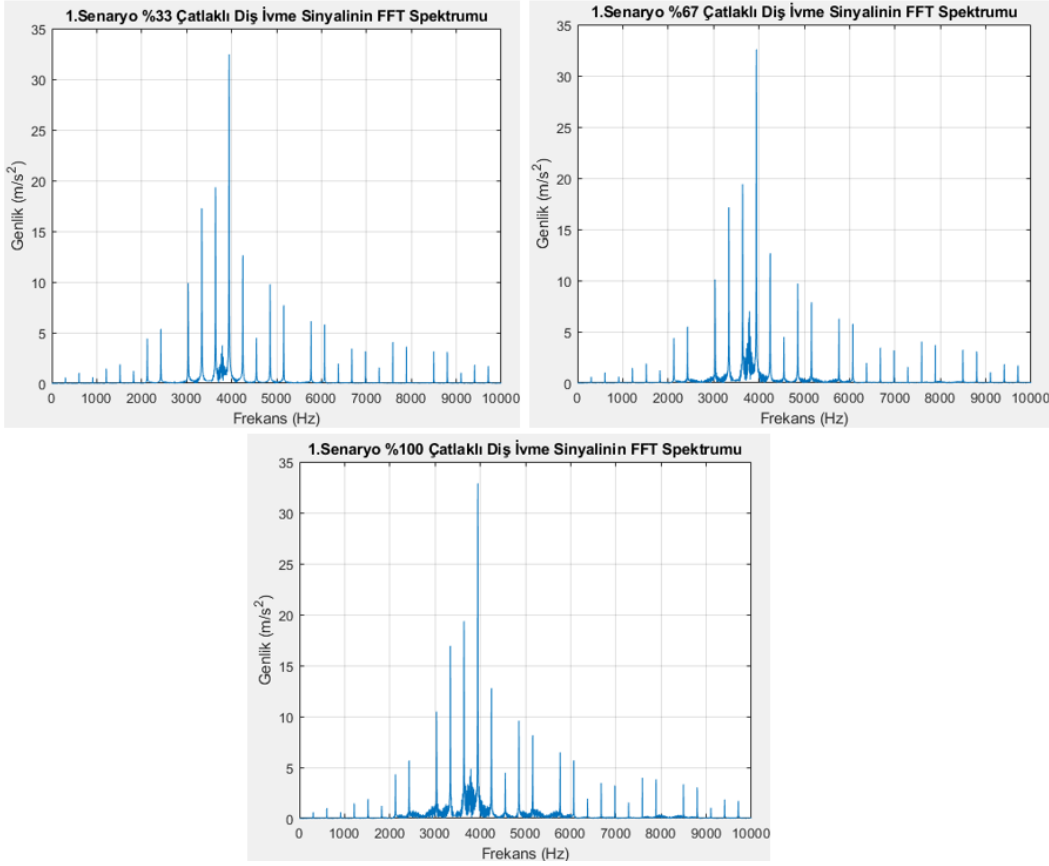
Zaman alanındaki analiz sonuçları yukarıdaki gibidir. Parametre analizi sonucunda, sinyalin genel enerji seviyesini gösteren RMS değerinin çatlak miktarıyla beraber arttığı fakat çatlak miktarıyla doğrusal olarak artmadığı gözlenmiştir. Sistemdeki darbe etkilerinin doğrudan görülmesine olanak sağlayan ve sinyaldeki en yüksek ivme verisini gösteren tepe değeri, çatlak miktarının artmasıyla birlikte 210'dan 444'e kadar çıkabilmektedir. Bu durum, çatlak ilerledikçe sistemde meydana gelen ani zorlanmaların şiddetinin arttığını gösterir. Özellikle %67 ve %100 çatlak durumlarında belirgin bir artış olması, dişli sistemindeki anlık darbelerin çatlağın ilerlemesiyle daha baskın hale geldiğini düşündürmektedir. Crest faktörü, tepe değerinin RMS'ye oranıdır ve sistemde anormal darbe veya şok bileşenlerinin varlığını ortaya koyar. Sağlıklı durumda crest faktörü 2,11 iken, çatlak ilerledikçe 4,22 seviyesine kadar çıkmaktadır. Bu durum, tepe değerinde olduğu gibi, crest faktörünün de titreşim sinyalinde anlık darbelerin ve şok etkilerinin artmasını hassas bir şekilde yansıttığını göstermektedir. Basıklık değeri, sinyalde uç değerlerin yoğunluğunu gösterir. Sağlıklı durumda 1,68 seviyesinde olan basıklık değeri, çatlak ilerledikçe 2,37'ye kadar çıkmaktadır. Bu artış, sinyalde ani yüksek ivmelerin daha sık görüldüğünü göstermektedir. Özellikle %67 ve %100 çatlak seviyelerinde basıklık değerinin artması, sistemde çatlak kaynaklı anlık darbelerin daha belirgin hale geldiğini göstermektedir. Çarpıklık değeri sinyalin simetrikliği hakkında bilgi verir ve bu değer çok büyük değişimler göstermemesi, sinyalin genel yapısında belirgin bir kayma olmadığını ortaya koymaktadır. Bütün istatistiksel parametreler birlikte değerlendirildiğinde, sırasıyla tepe değeri, crest faktörü ve basıklığın çatlak miktarına olan duyarlılığı sebebiyle çatlak oluşumunu erken tespit etmek açısından kritik rol oynayacağı düşünülmektedir. Senaryoların birbiriyle kıyaslanmasında ise şu yorumlar yapılabilir. Sırasıyla duyarlılığı en yüksek parametreler olan tepe değeri, crest faktörü ve basıklıktaki artış en çok 3. senaryoda, en az ise 2. senaryoda gerçekleşmiştir ve bu iki senaryo arasındaki fark ortalama %4 civarındadır. Yapılan çalışmada, başlangıçta ilgili istatistiksel parametrelerin çatlağın ilk konumuna olan duyarlılığının düşük olduğuna fakat dişteki çatlak miktarı arttıkça dişli merkezine yakın olan çatlaktaki değişimin daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Zaman tanım bölgesinde incelenen ivme sinyalleri, birçok farklı frekansta bileşen içermektedir. Frekans tanım bölgesinde analiz,

bu bileşenleri ayrıştırarak belirli arızaların neden olduğu karakteristik frekansları tespit etmeye yardımcı olur. Bu sebeple titreşim sinyali Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) yardımıyla frekans alanında da incelenmiştir.



Şekil 7: Sağlıklı durum sinyalinin FFT spektrumu

Sağlıklı durumun FFT spektrumu yukarıdaki gibidir. Benzer şekilde bütün durumlar için FFT spektrumu çıkarılmıştır. Senaryolar arasındaki farkın ihmal edilebilecek kadar az olması sebebiyle aşağıda örnek olması açısından 1. senaryonun farklı çatlak dereceleri için FFT spektrumu bulunmaktadır.



Şekil 8: 1. senaryo için farklı çatlak derecelerinin FFT spektrumu

Sonuçlar incelendiğinde dişli kavrama frekansının 12. ve 13. harmoniği olan 3640 ve 3945 Hz değerlerinde titreşim sinyalinde maksimum genliğin olmasının, bu değerlerde sistemin doğal frekansı ile olası bir çakışma meydana gelmesinden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Bu sebeple hareket denklemleri üzerinden sistemin doğal frekansı hesaplanmıştır. Çok serbestlik dereceli bir titreşim sisteminde doğal frekans ve mod şekillerinin belirlenmesi için denklemler özdeğer problemine çevrilir ve aşağıdaki karakteristik denklem ile ifade edilir:

$$[\underline{\mathbf{K}} - \omega^2 \underline{\mathbf{M}}] \mathbf{X} = 0$$

Bu denklemin $\mathbf{X}=0$ dışında bir çözümünün (trivial olmayan çözüm) olması için katsayılar matrisinin karakteristik determinant adı verilen determinantının sıfır olması gerekmektedir. Denklem sağdan kütle matrisi ile çarpılırsa ve aşağıdaki gibi yeniden düzenlenirse çözüm basitleştirilebilir.

$$\lambda = \frac{1}{\omega^2}, \quad \mathbf{D} = \underline{\mathbf{K}}^{-1} \underline{\mathbf{M}}$$

$$\det[\lambda \underline{\mathbf{I}} - \underline{\mathbf{D}}] = 0$$

Burada “D” dinamik matris olarak adlandırılmaktadır. Determinantın çözümü ile sistemin serbestlik derecesi ile aynı derecede bir polinom elde edilir. Bu polinomun kökleri () elde edildikten sonra (1/) değerine eşitlenerek sistemin doğal frekansları elde edilir. Özdeğer probleminin çözülmesi ile yalnızca sistemin doğal frekansları değil aynı zamanda her bir doğal frekansa karşılık gelen özvektörler yani mod şekilleri de elde edilir. Mod şekilleri, sistemin karakteristik salınım biçimlerini temsil eder ve dinamik davranışın anlaşılmasında kritik bir öneme sahiptir. Karakteristik denklem homojen yapıda olduğu için çözüm yalnızca görelî yer değiştirme değerlerini verir. Bu nedenle elde edilen mod şekilleri mutlak genlikleri değil, sistem içerisindeki elemanların birbirlerine göre ne şekilde titreştiğini gösterir.

Daha önce hareket denklemleri ifade edilen dişli sistemi dört serbestlik dereceli olmasına rağmen denklemler detaylı incelendiğinde bu sistemin birbirinden bağımsız iki kısma ayrılabilirdiği görülmektedir. Buna göre dönme hareketine karşılık gelen kısım için hareket denklemleri aşağıda bulunmaktadır.

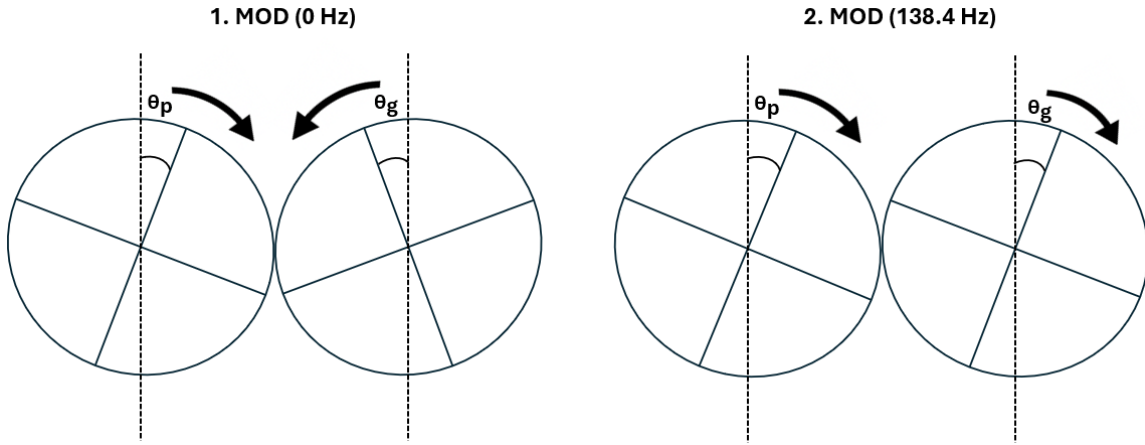
$$\begin{bmatrix} I_p & 0 \\ 0 & I_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_p \\ \ddot{\theta}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{em}d_{bp}^2 & -C_{em}d_{bp}d_{bg} \\ -C_{em}d_{bp}d_{bg} & C_{em}d_{bg}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_p \\ \dot{\theta}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{em}d_{bp}^2 & -K_{em}d_{bp}d_{bg} \\ -K_{em}d_{bp}d_{bg} & K_{em}d_{bg}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_p \\ \theta_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_p \\ T_g \end{bmatrix}$$

Benzer şekilde öteleme hareketine karşılık gelen hareket denklemleri aşağıda mevcuttur.

$$\begin{bmatrix} m_p & 0 \\ 0 & m_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_p \\ \ddot{y}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{em} + C_{yp} & -C_{em} \\ -C_{em} & C_{em} + C_{yg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_p \\ \dot{y}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{em} + K_{yp} & -K_{em} \\ -K_{em} & K_{em} + K_{yg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_p \\ y_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dişli sisteminin iki ayrı denklem takımı olarak incelenmesi sırasında, elde edilen mod şekillerinde yalnızca öteleme veya dönme hareketinin baskın olduğu görülmüştür. Bu nedenle, diğer hareket türüne ait iki serbestlik derecesi ihmal edilebilir olduğu düşünülmüştür. Rotasyonel serbestlik derecelerine ait mod şekilleri aşağıdaki gibidir.

$$X^{(1)} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}, \quad X^{(2)} = \begin{Bmatrix} 15.91 \\ -13.8078 \end{Bmatrix}$$



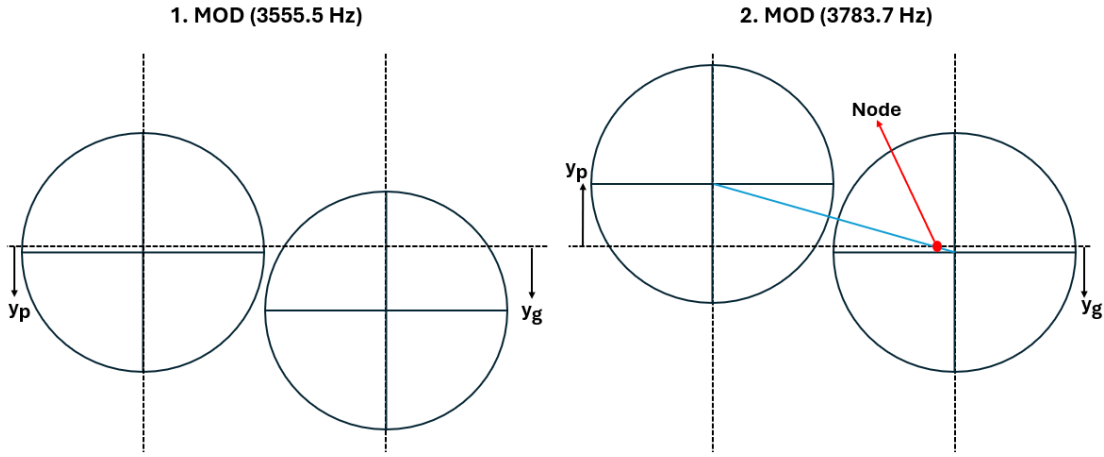
Şekil 9. 1. Denklem setinin mod şekilleri

Dönme hareketine ait denklemler detaylı olarak incelendiğinde rijitlik matrisinin determinantının sıfıra eşit olduğu görülmektedir. Bu sebeple 1. denklem seti dejenere (yarı belirli) olup birinci modu 0 Hz olmakta ve sistem bu modda rijit cisim hareketi yapmaktadır. Parker ve Lin (2001) benzer şekilde, planet dişli setlerinin doğal frekansını ve titreşim modlarını analitik ve sayısal olarak inceledikleri çalışmada, 0 Hz değerinde rotasyonel bir rijit cisim modu elde etmiştir. Rijit cisim hareketi, bir sistemin sabit bir nokta ile elastik bağlantısının olmadığını gösterir ve buna verilen en yaygın örnek vagonların hareketidir. Şekil 4'te bulunan dişli sistemi incelendiğinde dişli ve pinyonun öteleme yönünde rulmanlar vasıtasıyla X ve Y yönünde sabit bir noktaya elastik biçimde bağlı olduğu görülmektedir. Dönme yönü incelendiğinde ise θ_p ve θ_g sırasıyla pinyon ve dişlinin merkezinden tanımlanan dönme hareketidir ve dönme yönünde dişli ve pinyonun herhangi bir hareketsiz nokta ile bağlantısı bulunmamaktadır. Ayrıca 1. mod şekli incelendiğinde pinyon ve dişlinin kendi merkezleri etrafında, zıt yönde ve eşit büyüklükte dönme hareketi yaptığı gözlenmektedir. Bu sebeple 1. modda sistemin rijit cisim hareketi yapmasının yapıyla uyum içerisinde olduğu sonucuna varılmış ve bu hareket serbest dönme hareketi olarak adlandırılmıştır. Ayrıca 2. doğal frekans değeri 138,4 Hz olarak elde edilmiştir. Şekil 9'da görülen bu modda pinyon ve dişli aynı yöne doğru dönmektedir. Bu modda pinyonun 15,91 birim döndüğü yönde dişli de 13,81 birim dönmektedir. Sistemin her bir modda yaptığı hareket değerlendirilirken Şekil 4'te bulunan dişli sisteminde her bir serbestlik derecesinin tanımlanma şekli göz önünde bulundurulmalıdır.

İkinci denklem seti incelendiğinde. 3555,5 Hz ve 3783,7 Hz frekanslarına karşılık gelen iki doğal frekans elde edilmiştir. Bu doğal frekansa ait mod şekilleri Şekil 10'da bulunmaktadır.

Frekans analizinde 12. ve 13. harmonik değerlerine karşılık gelen 3640 ve 3945 Hz değerlerinde maksimum genliklerin görülmesi, bu değerlerin 3. ve 4. doğal frekansa çok yakın olması ile açıklanabilir. Bununla beraber sağlıklı durumda görülmeyen fakat özellikle %67 ve %100 çatlaklı durumlarda tespit edilen, sistemin tam harmonikleri arasında olmayan fakat 12,5 harmoniğine karşılık gelen 3793,33 Hz değerindeki titreşim artışının sebebinin de benzer şekilde 4. doğal frekans ile çakışmasından kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu denklem setine ait mod şekilleri aşağıdaki gibidir.

$$X^{(3)} = \begin{Bmatrix} 0,0036 \\ 0,886 \end{Bmatrix}, \quad X^{(4)} = \begin{Bmatrix} -0,9815 \\ 0,0032 \end{Bmatrix}$$



Şekil 10. 2. Denklem setinin mod şekilleri

Mod şekilleri incelendiğinde, 1. modda pinyon pozitif yönde çok az bir hareket gerçekleştirirken, dişli aynı yönde belirgin bir öteleme yapmıştır. Bu modda esas olarak dişlinin titreştiği görülmektedir. 2. Mod incelendiğinde ise pinyon zıt yönde titreşmiş, dişli ise çok az miktarda pozitif yönde ötelenmiştir. Ayrıca öteleme hareketi için 2. modda, 1 adet node (düğüm noktası) bulunmaktadır. Düğüm noktası, bir titreşim modunda yer değiştirme genliğinin sıfır olduğu, yani sistemin o noktada hareket etmediği konumdur. Bu nokta Şekil 10'da kırmızı ile işaretlenmiştir.

5. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında düz dişlilerde oluşan diş dibi çatlağının titreşime olan etkisi incelenmiştir. Öncelikle ABAQUS® programında yapılan statik analiz ile çatlağın ideal başlangıç konumu elde edilmiş ve alternatif senaryolar üretilmiştir. Daha sonrasında bu senaryolar ve farklı çatlak dereceleri ile dişlinin diş dibinde oluşan çatlağın dinamik davranışa olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir.

- Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sağlıklı durum için TVMS değerleri, analitik formül tabanlı bir dişli tasarım ve analiz programı olan WindowsLDP® çıktılarıyla uyumludur.



- Sistemin enerji seviyesini gösteren RMS değerinin çatlakla beraber doğrusal artmadığı ve çarpıklık değerinin tek başına titreşim verilerini yorumlama için yetersiz kaldığı gözlenmiştir. Çatlağın ilerlemesiyle birlikte artan darbe etkisinin, özellikle tepe değeri ve crest faktörü üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmüştür. Bu nedenle, erken teşhis açısından incelenen parametreler arasında en yüksek etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bir dağılımın normal dağılıma kıyasla görece sivrilmesini veya düzlüğünü ifade eden basıklık parametresinin de arıza teşhisinde yararlı olabileceği düşünülmektedir.
- Zaman alanındaki istatistiksel parametreler ile yapılan incelemede iki uç senaryo olan 2. ve 3. senaryo arasındaki farkın %4 olduğu görülmüştür. Ayrıca, çarpıklık sonuçlarının veri trendiyle uyummadığı gözlemlenmiş ve bu nedenle senaryolar arasında yanıltıcı olabileceği değerlendirilmiştir.
- FFT sonuçlarına göre sistemde çatlak olması durumunda harmoniklerin genliğinde değil harmoniklerin etrafında oluşan yan bantların sayısında ve genliğinde artış yaşandığı gözlenmiştir. Yapılan özdeğer problemi incelemesine göre, sistemin 12. ve 13. harmoniklerinde titreşim genliğinin maksimum olmasının ve GMF değerinin 12,5 katında yüksek genlikli bir yan bant oluşmasının sebebinin, bu harmonik değerlerinin, sistemin 3. ve 4. doğal frekans değerlerine çok yakın olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Bununla beraber senaryoların frekans alanında oluşturulan FFT spektrumları kıyaslandığında, harmoniklerde gözlemlenen farkların genellikle ihmal edilebilir düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla beraber, yapılan çalışmanın kapsamını genişletmek amacıyla aşağıda önerilen çalışmalar, gelecekteki araştırmalar için bir temel oluşturabilir.
- Çatlaklı durumlar için FEM ile elde edilen TVMS değerleri, analitik hesaplamalar veya deneysel yöntemler ile doğrulanabilir.
- Yağ filmi rijitliği, hareket denklemlerine dahil edilerek titreşim üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenebilir.
- Dişli sistemi gerçek çalışma koşullarında test edilip, yapılan simülasyon ile karşılaştırılabilir.
- Bir dişte birden fazla noktada başlayan çatlak veya hem dişlide hem de pinyonda oluşan çatlak gibi farklı senaryolar incelenebilir. Ayrıca çukurlaşma, pullanma ve aşınma gibi hasar mekanizmaları, tek başına ya da kırılmayla birlikte kombinasyon halinde değerlendirilebilir.
- Benzer çalışma farklı tork ve çevrim oranları için gerçekleştirilebilir.
- Zaman alanında incelemesi yapılan temel parametrelere ek olarak, güncel HUMS sistemlerinde kullanılan FM4, NA4, M6A ve enerji oranı gibi farklı durum göstergeleri ile analiz yapılabilir.
- Titreşim verisi, zaman-frekans tanım bölgesinde hızlı Fourier dönüşümüne ek olarak güç spektral yoğunluğu, kısa zamanlı Fourier dönüşümü ve dalgacık dönüşümü gibi yöntemler ile incelenebilir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- And, P. S., Velex, P., Duverger, O. (2004). Contribution of gear body to tooth deflections—a new bidimensional analytical formula. *Journal of Mechanical Design*, 126(4), 748–752. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.1758252>
- Chaari, F., Fakhfakh, T., Haddar, M. (2008). Analytical modelling of spur gear tooth crack and influence on gearmesh stiffness. *European Journal of Mechanics- a/Solids*, 28(3), 461–468. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2008.07.007>
- Chen, Z., Shao, Y. (2013). Mesh stiffness of an internal spur gear pair with ring gear rim deformation. *Mechanism and Machine Theory*, 69, 1–12. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.04.017>
- Glodez, S. (1998). Experimental results of the fatigue crack growth in a gear tooth root. *International Journal of Fatigue*, 20(9), 669–675. Doi: [https://doi.org/10.1016/s0142-1123\(98\)00040-1](https://doi.org/10.1016/s0142-1123(98)00040-1)
- Karpat, F., Yuce, C., Doğan, O. (2019). Experimental measurement and numerical validation of single tooth stiffness for involute spur gears. *Measurement*, 150, 107043. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107043>
- Lewicki, D. G. (2002). Gear crack propagation path studies-guidelines for ultra-safe design. *Journal of the American Helicopter Society*, 47(1), 64–72. Doi: <https://doi.org/10.4050/jahs.47.64>
- Ma, H., Zeng, J., Feng, R., Pang, X., Wen, B. (2015). An improved analytical method for mesh stiffness calculation of spur gears with tip relief. *Mechanism and Machine Theory*, 98, 64–80. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2015.11.017>
- Pandya, Y., Parey, A. (2013). Crack behavior in a high contact ratio spur gear tooth and its effect on mesh stiffness. *Engineering Failure Analysis*, 34, 69–78. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.07.008>
- Parker, R. G., Lin, J. (2001). Modeling, modal properties, and mesh stiffness variation instabilities of planetary gears. NASA. Ohio, 1-111.
- Patil, S. S., Karuppanan, S., Atanasovska, I. (2016). Experimental measurement of strain and stress state at the contacting helical gear pairs. *Measurement*, 82, 313–322. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.046>
- Pehan, S., Kramberger, J., Flašker, J., Zafošnik, B. (2007). Investigation of crack propagation scatter in a gear tooth's root. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(5), 1266–1283. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.04.005>
- Wu, J., Yang, Y., Wang, P., Wang, J., Cheng, J. (2020). A novel method for gear crack fault diagnosis using improved analytical-FE and strain measurement. *Measurement*, 163, 107936. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107936>
- X.H. Tian, 2004. *Dynamic simulation for system response of gearbox including localized gear faults*. Master's Thesis. University of Alberta Mechanical Engineering Department, Edmonton, Canada.
- Yang, D. C. H., Lin, J. Y. (1987). Hertzian damping, tooth friction and bending elasticity in gear impact dynamics. *Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design*, 109(2), 189–196. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.3267437>



Dönen Makinelerde Rulman ve Dengesizlik Arızalarının Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Tespiti

İsa YARDIMCI¹, Mahmut Sabri KAYA¹, Hasan ÖZTÜRK², Zeki KIRAL²

¹ yardimci.isa@ogr.deu.edu.tr

¹ kaya.mahmutsabri@ogr.deu.edu.tr

² hasan.ozturk@deu.edu.tr

² zeki.kiral@deu.edu.tr

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Özet

Kütle dengesizlikleri ve rulman arızaları dönen makinelerde sıklıkla karşılaşılan arıza türlerindendir ve sebep oldukları artan titreşim genlikleri ve gürültü düzeylerinin yanı sıra, erken teşhis edilmediklerinde makine verimliliği ve sağlığı için önemli bir tehdit oluşturmaktadırlar. Bu çalışmada, bu iki tip arızanın tespiti için frekans ortamındaki titreşim verileri kullanılarak bir Yapay Sinir Ağı (YSA) modeli geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, 1500 rpm sabit hızla dönen, iki kademeli bir kayış-kasnak mekanizması kullanılmıştır. Çalışmada, sağlıklı ve dış bilezik arızası içeren bir rulman ile birlikte, dengeli ve 30, 60 ve 90 gramlık dengesiz kütleler içeren durumlar dikkate alınarak, toplam sekiz farklı çalışma koşulu oluşturulmuştur.

Zaman ortamında elde edilen titreşim ivme verileri klasik FFT analizi ile frekans ortamına dönüştürülmüş ve hesaplanan öznitelikler YSA modelinde giriş verisi olarak kullanılmıştır. Çalışmada geliştirilen modelin, rulman arızasını %92,0 ve dengesizlik arızasını %98,2 doğrulukla tespit edebildiği görülmüştür. Ayrıca, geliştirilen YSA modeli ile dengesizlik verileri içerisinden rulman arızalarını da başarıyla ayırtılabilmekte olup, geliştirilen modelin karmaşık sinyal ortamlarında farklı arıza türlerini ayırt edebildiği gösterilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen yöntem, döner makinelerde arıza tespiti ve kestirimci bakım uygulamaları için hızlı ve güvenilir bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kestirimci Bakım, Arıza Tespiti, Yapay Sinir Ağı, Makine Öğrenmesi, Frekans Ortamı

Abstract

Mass imbalances and bearing faults are common types of failures in rotating machinery, and in addition to causing increased vibration amplitudes and noise levels, if not detected early, they pose a significant threat to machine efficiency and health. In this study, an Artificial Neural Network (ANN) model was developed for the detection of these two types of faults using vibration data in the frequency domain. In this study, an Artificial Neural Network (ANN) model was developed for the detection of these two types of faults using vibration data in the frequency domain. In the experimental studies, a two-stage belt-pulley mechanism rotating at a constant speed of 1500 rpm was used. In the study, a total of eight different operating conditions

were established by considering a bearing that was either healthy or had an outer ring fault, along with scenarios containing balanced and unbalanced masses of 30, 60, and 90 grams. The vibration acceleration data obtained in the time domain were transformed into the frequency domain using classical FFT analysis, and the extracted features were used as input data for the ANN model. It was observed that the developed model was able to detect bearing faults with 92.0% accuracy and imbalance faults with 98.2% accuracy. Furthermore, the developed ANN model was also able to successfully distinguish bearing faults within the imbalance data, demonstrating that the model can differentiate between different types of faults in complex signal environments. The method developed in this study provides a fast and reliable solution for fault detection and predictive maintenance applications in rotating machinery.

Keywords: Predictive Maintenance, Fault Detection, Artificial Neural Network, Machine Learning, Frequency Domain

1. Giriş

Kestirimci bakımda makine öğrenmesi uygulamaları son yıllarda giderek önemini artırmaktadır. Özellikle dönen makinelerde oluşan dengesizlikten kaynaklanan arızaların teşhisi için makine öğrenmesi algoritmaları büyük ölçekte kolaylık sağlamaktadır. Bunun yanı sıra dönen makinelerde kullanılan rulmanların arızalarının da tespiti yine makine öğrenmesi algoritmalarıyla kolaylıkla yapılabilmektedir. Fakat günümüzde kullanılan makine öğrenmesi algoritmaları çoğunlukla tek girdi üzerinden tek sonuç almayı amaçlayan şekilde kurgulanmaktadır. Makinelerde birden fazla hatayı aynı anda tespit edebilmek oluşabilecek arızaların erken teşhisi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, makine öğrenmesi uygulamalarında, yalnızca tek bir çıktıyı tahmin etmek yerine aynı anda birden fazla çıktıyı tahmin etmek çoğu zaman daha kapsamlı ve faydalı sonuçlar ortaya koyar. Bu sayede çoklu çıktı tahminleme yöntemleri ile kestirimci bakım uygulamalarında arızalar daha hızlı bir şekilde teşhis edilebilmektedir.

Son yıllarda, makinelerde meydana gelen arızaların erken teşhisine yönelik olarak makine öğrenmesi algoritmalarının kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Masani ve diğ. (2019), makine öğrenmesi teknikleriyle endüstriyel makinelerde tahminleyici bakım uygulayarak duruş sürelerini azalttıklarını ve makine durumlarının izlenmesine yönelik ölçeklenebilir bir yöntem geliştirdiklerini göstermiştir. Ümütlü ve diğ. (2018), helisel dişli arızalarının seviyelerini sınıflandırmak için frekans tabanlı istatistiksel analizleri yapay sinir ağları (YSA) ile birleştirmiştir. Bu çalışma, dönen parçalardaki arızaların doğru bir şekilde tespit edilmesinde frekans tabanlı analizlerin önemini vurgulamaktadır. Fordal ve diğ. (2023), Endüstri 4.0 kapsamında sensör verilerine dayalı tahminleyici bakımın potansiyelini inceleyerek yapay sinir ağlarının uygulanabilirliğini ve gerçek zamanlı karar süreçlerine katkısını tartışmıştır.

Dönen makinelerde en sık karşılaşılan arıza türlerinden birisi de rulman arızasıdır. Rulman arızaları iç bilezik, dış bilezik, kafes ve yuvarlanma elemanı olmak üzere rulmanın çeşitli bölgelerinde oluşabilmektedir (Xu ve diğ., 2023). Gunerker ve diğ. (2019) çalışmalarında, farklı rulman arıza türlerine yönelik olarak makine üzerinden ivme verileri toplamışlardır. Elde ettikleri bu verileri, dalgacık dönüşümü ile işlemiş ve arıza türlerinin sınıflandırılması amacıyla YSA ve k-En Yakın Komşu (KNN) algoritmalarını kullanmışlardır. Yu ve diğ. (2006), rulman arızalarının teşhisi için Empirical Mode Decomposition (EMD) tabanlı enerji entropisi ve YSA yaklaşımını birlikte kullanılarak yeni bir yöntem önermişlerdir. Titreşim sinyalleri EM-Dyöntemiyle farklı frekans bileşenlerine ayrıştırılmış, her bileşenin enerji entropisi hesaplanarak

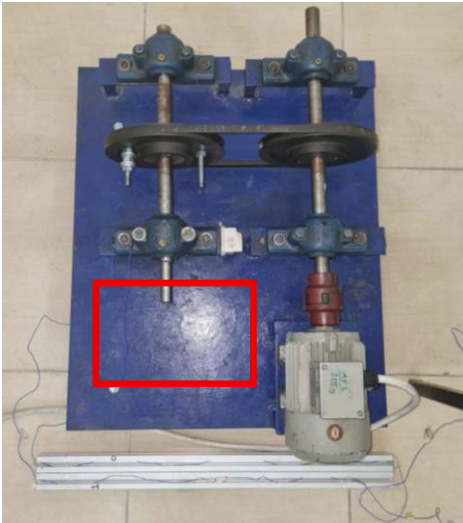
öznitelik verileri oluşturulmuştur. Bu özellikler YSA modelinde girdi olarak kullanılmış ve rulman arızaları başarıyla sınıflandırılmıştır. Li ve diğ. (2019) bir rulmanın farklı bölgelerinde çeşitli yapay hatalar oluşturmuş ve bu arızalarının teşhisi için yeni bir derin öğrenme tabanlı yöntem geliştirmişlerdir. Önerilen yöntemin etkinliği, iki farklı rulman veri seti üzerinde yapılan kapsamlı deneylerle doğrulanmıştır.

Dönen makinelerde karşılaşılan bir diğer büyük sorun ise makinelerde oluşan dengesizlik arızalarıdır. Dengesizlik arızaları zaman ortamında tespit edilebildiği gibi frekans ortamında da kolaylıkla tespit edilebilmektedir (Rahman ve Uddin, 2017). Dönüş frekansında oluşan genlik artışları dengesizlik arızaların erken teşhisi için büyük önem arz etmektedir (Kumar Kiran B. ve diğ., 2012; Tselios ve Nikolakopoulos, 2024)

Sonuç olarak, makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı tahminleyici bakım uygulamaları, özellikle dönen makinelerde ve rulman sistemlerinde arıza tespitini daha hızlı ve doğru bir şekilde gerçekleştirme potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, çoğu mevcut yaklaşım tek bir hatayı tahmin etmeye odaklanmakta olup, birden fazla hatayı eş zamanlı tespit edebilme yeteneği sınırlıdır. Bu nedenle, çoklu çıktı tahminleme yöntemlerinin kullanımı, kestirimci bakım süreçlerinde daha kapsamlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlayacak kritik bir adım olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada ise tek bir veri türü kullanılarak çoklu çıktı tahminleme yöntemleri aracılığıyla birden fazla durum için kestirimci bakım analizi gerçekleştirilmiştir.

2. Ölçüm Sistemi ve Sinyal Analizi

Bu çalışmada titreşim ivme sinyalleri, AC motor tarafından tahrik edilen çift kasnaklı bir döner tahrik grubu üzerinden elde edilmiştir. Sistem, tek kayışlı çift kasnak mekanizmasından oluşmaktadır. Motordan çıkan tahrik mili birinci kasnağı döndürmektedir. Bu kasnaktan kayış aracılığıyla 1:1 çevrim oranında diğer kasnağa güç aktarımı sağlanmaktadır. Dengesizlik arızaları, ikinci kasnak üzerinde uygulanmıştır. Rulman arızaları da aynı kasnağa bağlı milin yatağında (Şekil 1) bulunan rulmana uygulanmıştır. İvme verilerinin ölçümü için PCB marka 352A24 model ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerler, veri toplama sistemine bağlanmış (Şekil 2) ve veriler LabVIEW programı aracılığıyla kaydedilmiştir.



Şekil 1. Motor – Kasnak Sistemi



Şekil 2. Motor – Kasnak Sistemi ve Ölçüm Sistemi Görseli

Dengesizlik arızaları, arıza uygulanmak istenen kasnağa somun ve cıvatalar bağlanarak oluşturulmuştur. Dengesizlik miktarları ise kasnağa bağlanan, kütleleri önceden bilinen pul, somun ve cıvataların sayılarının değiştirilmesiyle ayarlanmıştır. Şekil 3’ te görülen dengesizlik elemanlarının toplam ağırlığı 30 gr olarak ölçülmüştür. Deneyler için belirlenen dengesizlik miktarları sırasıyla 30 gr, 60 gr ve 90 gr değerlerinde olup, bu şekilde sistemin farklı seviyelerde dengesizlik içermesi amaçlanmıştır. 60 gr dengesizlik miktarı için iki adet ve 90 gr dengesizlik miktarı için üç adet olmak üzere Şekil 3’ te görülen eleman setlerinden faydalanılmıştır. Şekil 4’ te 90 gr dengesiz yükün bağlı bulunduğu deney senaryosunun bir görseli görülmektedir.



Şekil 3. Deneylerde kullanılan dengesizlik elemanları



Şekil 4. 90 gr Dengesiz Yükün Bağlı Bulunduğu Durum

Şekil 5(a)’ da sağlıklı ve hatalı rulmanın (rulman model numarası 1206 KC3) bulunduğu yatak görülmektedir. Rulman arızası oluşturmak amacıyla, Şekil 5(b)’ de görülen rulmanın dış bileziğinin iç yüzeyine, Şekil 5(c)’ de görüldüğü gibi bilezik eni boyunca çentik arızası uygulanmıştır. Çentik, dış bileziğin yuvarlanma yüzeyinde oluşturulduğu için, milin dönmesiyle birlikte her bir bilyenin bu hasarlı yüzey üzerinden geçişi periyodik darbe etkileri yaratmaktadır. Bu darbeler titreşim sinyallerinde karakteristik frekans bileşenlerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5. (a) Hatalı Rulman Yatağı Görşeli, (b) Sağlıklı Rulman, (c) Hatalı Rulman

İlgili frekans değeri belirlendikten sonra, bu frekansta gözlenen genlik değerleri analiz edilerek rulman arızasının tespiti gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan rulmanın boyutları ve geometrik özellikleri Tablo 1’ de verilmiştir.

Tablo 1. Rulman özellikleri

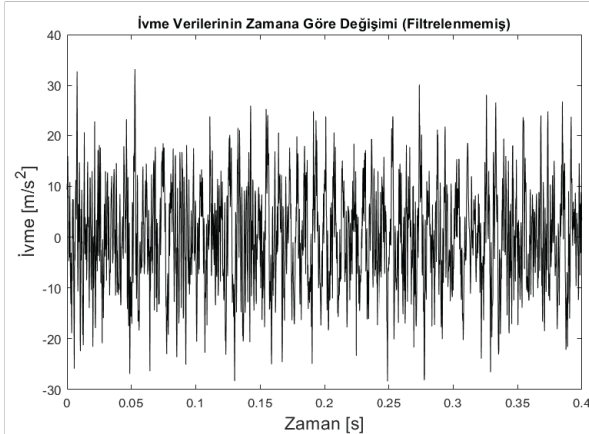
Özellik	Boyut/Miktar
Dış Bilezik Dış Çap	61.85 mm
Dış Bilezik İç Çap (D1)	51.85 mm
İç Bilezik Dış Çap (D2)	39.70 mm
Bilye Sayısı (n)	14 / Çift Sıralı
Bilye Çapı (BD)	7.70 mm
	45.775 mm

$$PD = \frac{D1 + D2}{2}$$

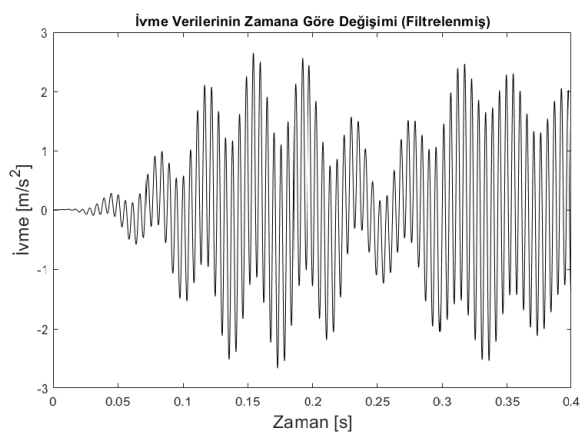
Deney senaryoları, rulmanın sağlıklı ve arızalı durumları için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Her iki durum için de hem dengeli hem de dengesiz koşullar tekrarlanmış ve toplamda sekiz farklı deney senaryosu elde edilmiştir. İvme verileri, motorun 1500 d/d sabit devir hızında çalıştırılmasıyla üç dakika boyunca, 5 kHz örnekleme frekansında kaydedilmiştir. Elde edilen ivme verileri MATLAB programı kullanılarak zaman ortamında incelenmiştir.

Her bir deney senaryosu, tahrik milinin 10 turluk dönüşleri esas alınarak bölümlere ayrılmıştır (Şekil 6). Bu bölümler için MATLAB ortamında hızlı Fourier dönüşümü (FFT) algoritması uygulanarak verilerin frekans spektrumun grafikleri elde edilmiştir. Böylece hem dengesizlik miktarına hem de rulman arızasına ait karakteristik frekans özellikleri belirlenebilmiştir. Nyquist kriteri gereği, örnekleme frekansının yarısı olan 2.5 kHz’e kadar frekans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Dönen makinelerde sistemi tahrik eden motorun çalışma frekansı, sistemdeki dengesizliğin belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Öte yandan, rulman gibi elemanlarda oluşan arızaların frekansları ise bilinen formüller yardımıyla hesaplanabilmektedir. Bu nedenle, söz konusu formüller ve motorun çalışma frekansı, tahminleme çalışmasında temel özelliklerin belirlenmesi amacıyla kullanılmış ve ilgili frekanslara uygun bir bant geçiren (band-pass) filtre tasarlanmıştır (Şekil 7).



Şekil 6. İvme Verilerinin Zamana Göre Değişimi (Filtrelenmemiş)



Şekil 7. İvme Verilerinin Zamana Göre Değişimi (Filtrelenmiş frekans aralığı)

Rulman arızası durumunda, frekans ortamında karakteristik arıza frekanslarının ortaya çıktığı gözlemlenmektedir. Bu frekanslar, rulmanın iç bileziği, dış bileziği, bilyeleri ve kafesi için literatürde tanımlanmış teorik arıza frekanslarıyla uyumludur. Arıza oluştuğunda, ilgili karakteristik frekanslarda genlik değerlerinde artış meydana gelmekte ve bu artış, arızanın türüne bağlı olarak farklı bileşenlerde belirginleşmektedir. Özellikle arıza şiddeti arttıkça, söz konusu frekansların genlik seviyelerindeki yükseliş daha net bir şekilde izlenmektedir. Bu özellik, rulman arızalarının tanımlanmasında kritik bir gösterge niteliği taşımaktadır ve sonraki aşamalarda yapılacak tahminleme çalışmalarında önemli bir öznitelik olarak kullanılacaktır.

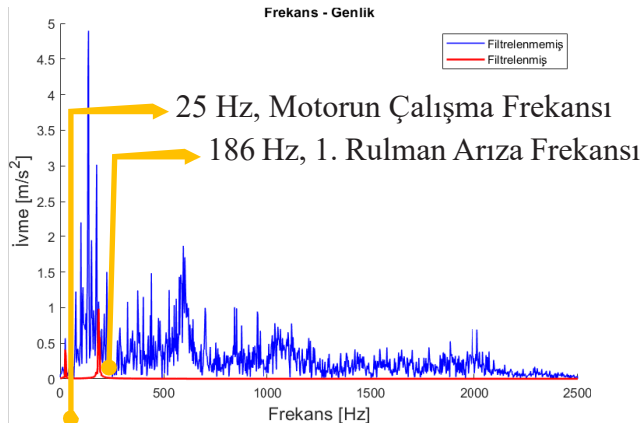
Rulman arıza frekansları Eşitlik 1' deki gibi hesaplanabilmektedir. Bu frekanslar rulmanda arızanın bulunduğu bölgeye göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada rulman arızası, rulmanın dış bileziğinin iç yüzeyine verildiği için dış bilezik arıza frekansı (BPFO) dikkate alınmıştır. Bu frekanstaki genlik değeri ileride yapılacak olan rulman arızası tahminlemesi için öznitelik olarak kullanılacaktır.

$$BPFO = \frac{n}{2} f_R \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta\right) \quad (1)$$

Eşitlik 1' de bulunan f_R çalışma frekansını, n rulmanda bulunan toplam bilye sayısını ve β bilyenin bilezik yüzeyleriyle yaptığı açığı ifade etmektedir. β açısı genellikle 1 ve 2 derece arasında değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada bu değer 2 derece olarak alınmıştır.

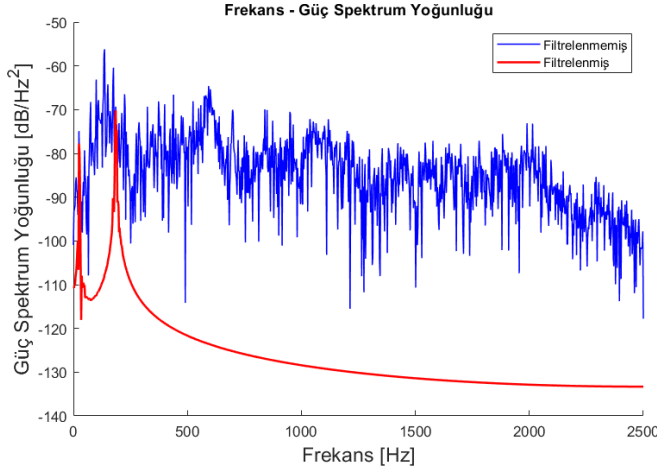
Dengesizlik, Şekil 8' de görüldüğü üzere frekans ortamında motorun çalışma frekansına karşılık gelen genlikte artış olarak ortaya çıkmaktadır. Dengesizlik miktarı arttıkça, aynı frekanstaki genlik değerinde belirgin bir yükseliş gözlemlenmektedir. Bu durum, dengesizliğin tespit edilebilmesi açısından kritik öneme sahiptir ve ilerleyen aşamalarda tahminleme sürecinde kullanılacak önemli bir öznitelik olarak değerlendirilecektir.

Ayrıca bu çalışmada, frekans ortamında ivme verilerinin yalnızca genlik değerleri öznitelik olarak ele alınmamıştır. Bunun yanı sıra, genlik değerlerinden yararlanılarak güç spektrum yoğunluğu (Power Spectral Density, PSD) da hesaplanmıştır. PSD, titreşim sinyallerinin enerji dağılımını frekans düzleminde incelemeye imkan tanıyan bir yöntem olup, farklı frekans bileşenlerinde sinyalin ne kadar enerji taşıdığını ortaya koymaktadır. Bu sayede hem dengesizlik hem de rulman arızalarına ait karakteristik frekansların enerji düzeyleri daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirilebilmiştir. Dolayısıyla, tahminleme aşamasında hem genlik değerleri hem de PSD tabanlı veriler öznitelik olarak kullanılmıştır. Güç spektrum yoğunluğu



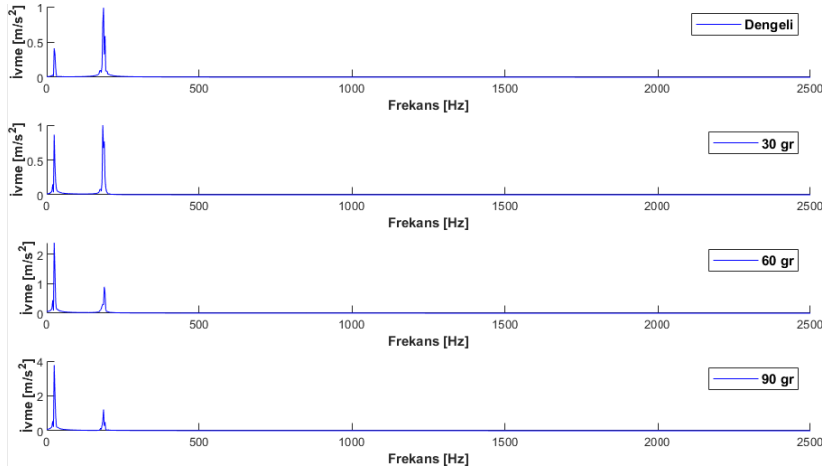
Şekil 8. İvme Verilerinin Frekans Ortamındaki Gösterimi (İlk 10 Tur, Dengeli Durum)

değerleri desibel (dB) cinsinden gösterilmiştir. Bu sayede geniş aralıktaki güç seviyeleri logaritmik ölçekte daha anlaşılır seviyelere indirgenmiştir. Şekil 9’ da güç yoğunluğu değerlerinin frekans ortamındaki grafikleri görülmektedir.



Şekil 9. İvme Verilerinin Güç Spektrum Yoğunluğu (İlk 10 Tur; Dengeli Durum)

Şekil 9’ dan görüldüğü üzere, rulman arıza frekansı güç spektrum yoğunluğu grafiğinde gözle görülür şekilde ortaya çıkmaktadır. Aynı şekilde dengesizlik seviyeleri arttıkça, motorun çalışma frekansına karşılık gelen genlik değeri de artış göstermektedir (Şekil 10).



Şekil 10. Hatalı Rulmanda Dengesizlik Miktarına Bağlı Frekans Genlik Değişimi

3. Çok Çıktılı Modelin Eğitimi

Çok çıktılı sınıflandırma, birden fazla bağımlı değişkenin eşzamanlı olarak tahmin edilmesine imkân tanıyan ve çok boyutlu çıktı elde edilmesini sağlayan bir makine öğrenmesi yöntemidir. Bu çalışmada hem rulman arızasının hem de dengesizlik miktarlarının aynı anda tahmin edilebilmesi için bu yaklaşım kullanılmıştır.

Model eğitiminden önce veriler üzerinde Z-Score normalizasyon işlemi uygulanmıştır (Eşitlik 2). Z-Score normalizasyon bir veri setindeki (x) değerlerin ortalama (μ) ve standart sapmaya (σ) göre yeniden ölçeklendirilmesi işlemidir. Mertebe olarak birbirinden çok farklı değerlere

sahip olan öz nitelik verileri bu normalizasyon sayesinde aynı ölçeğe indirgenmiş olur. Bu işlem sonucunda oluşturulan yapay sinir ağı modelinin öğrenmesi daha dengeli bir şekilde gerçekleşebilmektedir.

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

Sınıflandırma biçimleri öncelikle birlik kodlamalar haline dönüştürülmüştür ve etiketleme işlemi bu yapı üzerinden gerçekleştirilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Durumların Birlik Kodlama Düzeninde Karşılığı

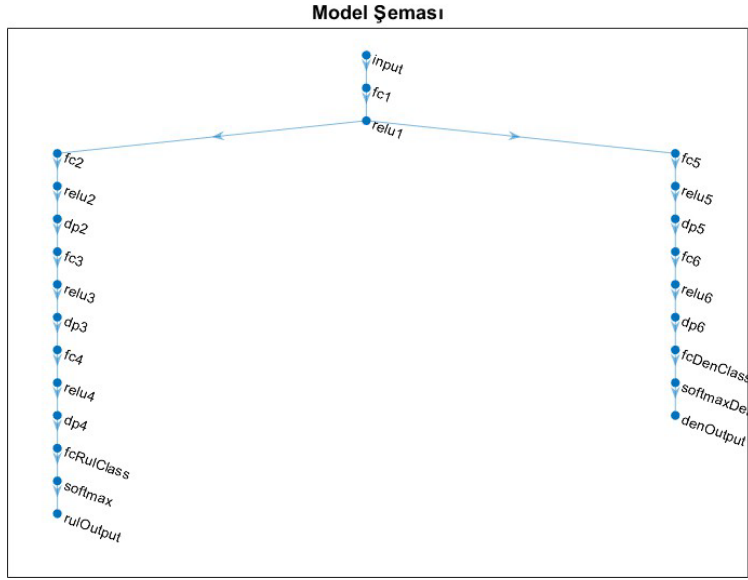
Durum	Etiket
<i>Sağlıklı Rulman</i>	<i>[1 0]</i>
<i>Hatalı Rulman</i>	<i>[0 1]</i>
<i>Dengeli</i>	<i>[1 0 0 0]</i>
<i>30 gr Dengesizlik</i>	<i>[0 1 0 0]</i>
<i>60 gr Dengesizlik</i>	<i>[0 0 1 0]</i>
<i>90 gr Dengesizlik</i>	<i>[0 0 0 1]</i>

Öz nitelik verilerinin %80' i eğitim aşaması için, %10' u test aşaması için, %10' u ise doğrulama aşaması için kullanılmış, eğitim ve test verileri Mini-batch yapısına dönüştürülmüştür. Mini-batch, eğitim verisinin küçük gruplara bölünerek her iterasyonda modele verilmesi işlemidir. Mini-batch yöntemi diğer yöntemlere kıyasla hem hız açısından hem de kararlılık açısından denge kurarak hesaplama verimliliği ve öğrenme kararlılığı sağlar. Bu çalışmada Mini-batch boyutu 128 olarak belirlenmiştir.

Çok çıktılı sınıflandırma işleminde ilk katman iki durumun ortak katmanıdır. Şekil 11' de görüldüğü gibi, bu noktadan sonra mimari iki durum için iki farklı bölüme ayrılmaktadır. Şekil 11' in sol bölümündeki kısım sonucunda rulman arızaları sınıflandırılırken, sağ bölümün sonucunda dengesizlik miktarları sınıflandırılmaktadır.

Modelde bulunan bütün katmanlarda aktivasyon fonksiyonu olarak “Leaky ReLU” fonksiyonu kullanılmıştır. “Leaky ReLU” aktivasyon fonksiyonu, negatif giriş değerlerini tamamen sıfırlamak yerine küçük bir katsayı ile çarparak çıktıya aktaran ve böylece “ReLU” fonksiyonunda görülen ölü nöron problemini azaltarak ağı öğrenme kapasitesini koruyan bir fonksiyondur. Oluşan aşırı öğrenmeleri engellemek amacıyla her tam bağlantılı katman sonrasında dropout katmanı bulunmaktadır ve dropout değeri %40 olarak belirlenmiştir.

İki durum için ortak olan katman 256 nöron içermektedir. Rulman durumunun çıkış bölümü 128, 64 ve 32 nöronlu üç adet tam bağlantılı katmanlardan oluşturulmuştur. Bu bölümde yine ortak katmanda olduğu gibi “Leaky ReLU” aktivasyonu ve %40 değerine sahip dropout katmanları kullanılmıştır. Son katmanda iki sınıf için softmax fonksiyonu kullanılmıştır. Dengesizlik durumunun çıkış bölümü 128 ve 64 nöronlu iki adet tam bağlantılı katmandan oluşturulmuştur. Yine bu durum için de “Leaky ReLU” aktivasyonu ve %40 dropout katmanları kullanılmıştır. Son katmanda dört adet sınıf için softmax aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır.

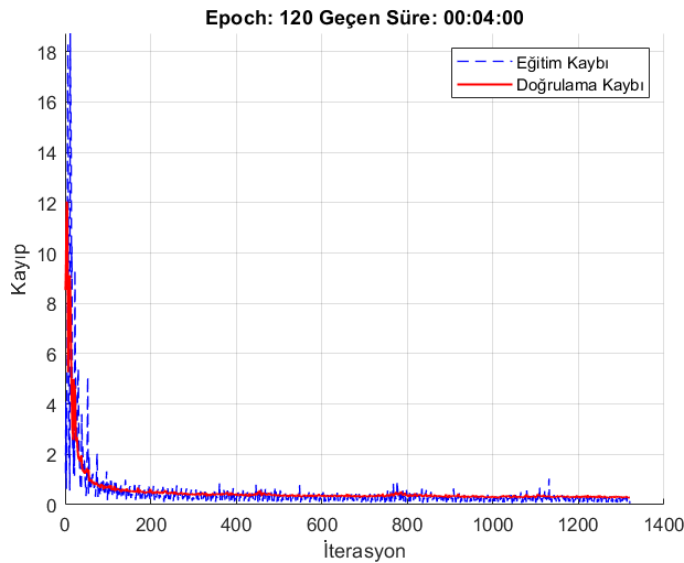


Şekil 11. Model Şeması

Model, Adam optimizasyon algoritması ile 120 epoch boyunca eğitilmiştir. Öğrenme oranı 0,03 olarak belirlenmiştir. Eğitim sırasında her iterasyonda ileri besleme ve kayıp fonksiyonu hesaplanmış, ardından geri yayılım ile ağırlıklar güncellenmiştir. Toplam kayıp fonksiyonu, iki çıkışın kayıplarının toplamı olarak tanımlanmıştır (Eşitlik 3).

$$\text{Toplam Kayıp Değeri} = \text{Rulman Durum Kayıp Değeri} + \text{Dengesizlik Durum Kayıp Değeri} \quad (3)$$

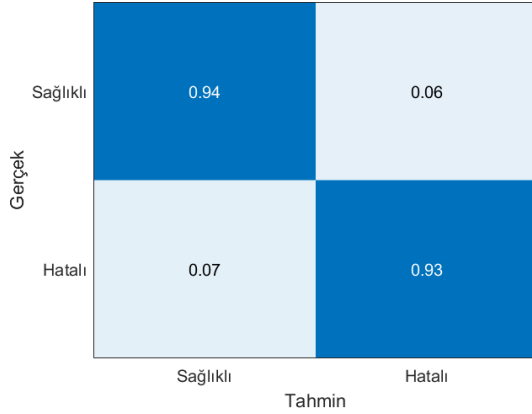
Modelin doğruluğunu ve aşırı öğrenme durumunu değerlendirmek amacıyla, eğitim sürecinde her iterasyonda elde edilen kayıp fonksiyonları öğrenme eğrileri olarak çizdirilmiştir (Şekil 12). Eğitim süresince doğrulama ve eğitim kayıp fonksiyonları birbirini oldukça yakın bir şekilde takip etmiş, bu da modelde aşırı öğrenmenin çok düşük seviyede olduğunu göstermektedir.



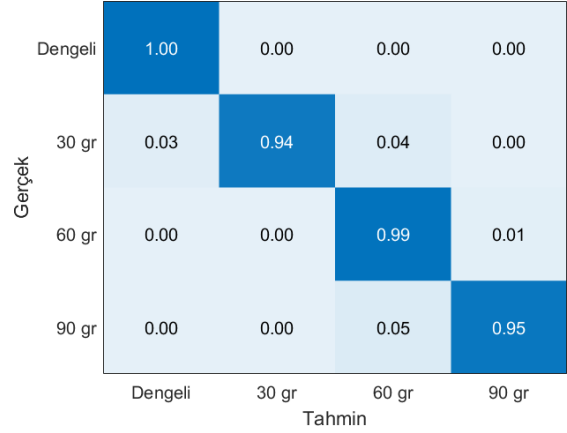
Şekil 12. İterasyonlar Boyunca Kayıp Değerlerine Dayalı Öğrenme Eğrileri

4. Sonuç ve Değerlendirme

Eğitim işlemi tamamlandıktan sonra test seti üzerinde tahminler yapılmıştır. Her iki çıkış için de sınıflandırma sonuçları hesaplanmış ve karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur (Şekil 1314). Rulman ve dengesizlik tahminleri için doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), recall ve F1-skor değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır (Tablo 3).



Şekil 13. Rulman Çıktısı Karşılaştırma Matrisi



Şekil 14. Dengesizlik Çıktısı Karşılaştırma Matrisi

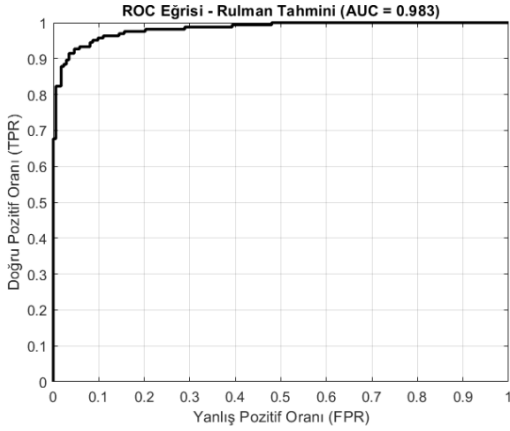
Tablo 3. Performans Kriterleri

Rulman Çıktısı		Dengesizlik Çıktısı	
Performans Kriteri	Değer	Performans Kriteri	Değer
Doğruluk	%92,0	Doğruluk	%98,2
F1-Skor	0,920	F1-Skor	0,994
Precision	0,917	Precision	1,000
Recall	0,923	Recall	0,989

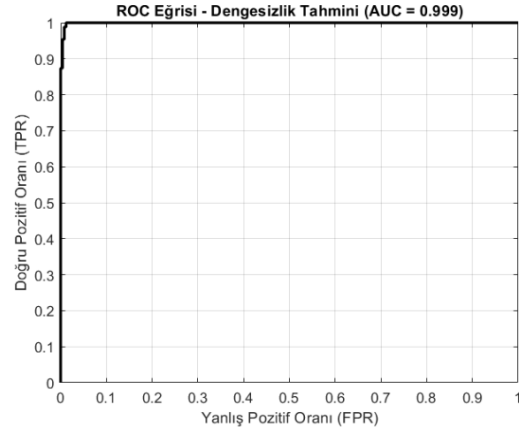
Rulman sınıflandırmasına ilişkin karşılaştırma matrisi incelendiğinde, sağlıklı rulmanların %94 oranında doğru sınıflandırıldığı ve %6'sının hatalı sınıfa atandığı, hatalı rulmanların ise %93 doğrulukla tahmin edildiği görülmektedir. Bu sonuçlar, rulman durumunun belirlenmesinde modelin dengeli ve yüksek doğrulukta bir performans sergilediğini göstermektedir. Dengesizlik sınıflandırmasına ait karşılaştırma matrisi değerlendirildiğinde ise, dengeli sınıfın %100 doğrulukla tahmin edildiği, 30 gr için %94, 60 gr için %99 ve 90 gr için %95 doğruluk elde edildiği görülmektedir. Özellikle 60 gr dengesizlik sınıfında neredeyse kusursuz bir performans gözlemlenirken, genel olarak dengesizlik miktarlarının sınıflandırılmasında oldukça yüksek bir başarı sağlandığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Rulman çıktısı için elde edilen performans sonuçları, %92 doğruluk, 0,920 F1-skoru, 0,917 kesinlik ve 0,923 recall değerleriyle modelin dengeli ve güvenilir bir sınıflandırma başarısı sergilediğini göstermektedir. Dengesizlik çıktısı için elde edilen %98,2 doğruluk, 0,994 F1skoru, 1,000 kesinlik ve 0,989 recall değerleri ise modelin bu sınıflandırmada oldukça yüksek bir performans düzeyine ulaştığını, özellikle kesinlik değerinin 1,000 olmasıyla birlikte yanlış pozitif tahmin üretmediğini ortaya koymaktadır.

Bu değerlendirme kriterlerinin dışında ayrıca ROC eğrileri ve AUC değerleri üzerinden de performans değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 15-16).



Şekil 15. Rulman Tahmini ROC Eğrisi



Şekil 16. Dengesizlik Tahmini ROC Eğrisi

ROC eğrileri incelendiğinde, rulman tahminine ait eğrinin AUC değerinin 0,983 olduğu ve bu şekilde modelin yüksek ayırt edicilik gücüne sahip olduğu görülmektedir. Dengesizlik tahmini için elde edilen ROC eğrisi ise 0,999 AUC değeri ile neredeyse kusursuz bir performans ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, modelin hem rulman arızası tespitinde hem de dengesizlik miktarının sınıflandırılmasında yüksek doğrulukta ve güvenilir tahminler gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Bu çalışmada, dönen makinelerde rulman arızalarının tespiti ve dengesizlik miktarının tahmini amacıyla çok çıktılı sınıflandırmaya dayalı bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında, farklı çalışma devirlerinde elde edilen ivme verileri frekans ortamına dönüştürülerek hem rulman durumunu hem de dengesizlik seviyesini temsil eden öznitelikler çıkarılmıştır. Z-score normalizasyonu ile ölçeklendirilmiş bu öznitelikler, yapay sinir ağı tabanlı modelin giriş parametreleri olarak kullanılmıştır.

Modelin tasarımında, tek bir yapay sinir ağı üzerinden eşzamanlı olarak iki farklı çıktı değişkeninin (rulman durumu ve dengesizlik miktarı) tahmin edilmesine imkân tanıyan çok çıktılı (multioutput) sınıflandırma yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu yöntem hem hata teşhisinde hem de dengesizlik seviyelerinin belirlenmesinde pratik bir bakış açısı sunarak kestirimci bakım uygulamaları için yenilikçi bir çözüm ortaya koymuştur.

Eğitim ve doğrulama aşamalarında elde edilen sonuçlar, modelin yüksek doğruluk oranlarına ulaştığını ve aşırı öğrenme probleminin gözlemlenmediğini göstermektedir. Özellikle, rulman arıza durumlarının tespitinde %92 doğruluk, dengesizlik seviyelerinin tahmininde ise %98'in üzerinde doğruluk elde edilmesi, geliştirilen modelin güvenilirliğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın en önemli katkısı, farklı arıza durumlarının aynı anda tespit edilmesine imkân veren çok çıktılı yapay zekâ tabanlı bir yaklaşımın sunulmuş olmasıdır. Böylece, dönen makinelerin dinamik davranışları tek bir durum üzerinden değil, bütüncül bir yaklaşımla analiz edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, endüstriyel sistemlerde titreşim tabanlı kestirimci bakım stratejilerinin güçlendirilmesine katkı sağlamakta ve yapay zekâ destekli bakım süreçlerine pratik bir yöntem önermektedir.

Gelecek çalışmalarda, modelin farklı çalışma koşullarında (hız, yük, arıza tipi), farklı tip rulman ve makine gruplarında test edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, derin öğrenme tabanlı mimarilerin entegrasyonu ve gerçek zamanlı uygulamalara uyarlanması, modelin hem akademik hem de endüstriyel alanda daha geniş bir kullanım alanı bulmasına imkân sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Masani, K. I., Oza, P., ve Agrawal, S. (2019). Predictive maintenance and monitoring of industrial machine using machine learning. *Scalable Computing*, 20(4), 663-668. <https://doi.org/10.12694/scpe.v20i4.1585>
- Can Ümütlü, R., Hızarcı, B., Ozturk, H., ve Kırıl, Z. (2018). Classification Of Helical Gear Fault Levels Using Frequency Component Based Statistical Analysis With Ann. *Usak University Journal of Engineering Sciences*, 1(2), 76-86
- Fordal, J. M., Schjølberg, P., Helgetun, H., Skjermo, T. Ø., Wang, Y., ve Wang, C. (2023). Application Of Sensor Data Based Predictive Maintenance And Artificial Neural Networks To Enable Industry 4.0., *Advances in Manufacturing*, 11(2), 248-263. <https://doi.org/10.1007/s40436-022-00433-x>
- Xu, F., Ding, N., Li, N., Liu, L., Hou, N., Xu, N., Guo, W., Tian, L., Xu, H., Lawrence Wu, C. M., Wu, X., ve Chen, X. (2023). A review of bearing failure Modes, mechanisms and causes. *İçinde Engineering Failure Analysis* 152, Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107518>
- Gunerkar, R. S., Jalan, A. K., ve Belgamwar, S. U. (2019). Fault diagnosis of rolling element bearing based on artificial neural network. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(2), 505-511. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0103-x>
- Yu, Y., YuDejie, ve Junsheng, C. (2006). A roller bearing fault diagnosis method based on EMD energy entropy and ANN. *Journal of Sound and Vibration*, 294(1-2), 269-277. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.11.002>
- Li, X., Zhang, W., ve Ding, Q. (2019). Understanding and improving deep learning-based rolling bearing fault diagnosis with attention mechanism. *Signal Processing*, 161, 136- 154. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.03.019>
- Rahman, M. M., ve Uddin, M. N. (2017). Online Unbalanced Rotor Fault Detection of an IM Drive Based on Both Time and Frequency Domain Analyses. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), 4087-4096. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2691736>
- Kumar Kiran B., Diwakar G., ve Satynarayana M. R. S. (2012). *IJMER_International_Journal_of_Modern_E.* International Journal of Modern Engineering Research, 2(5), 3415-3421.
- Tselios, I., ve Nikolakopoulos, P. (2024). Combining Artificial Neural Networks and Mathematical Models for Unbalance Estimation in a Rotating System under the Nonlinear Journal Bearing Approach. *Lubricants*, 12(10), 344. <https://doi.org/10.3390/lubricants12100344>



İpr Yangın Söndürme Sistemleri ve Trafo Yangınlarında Kullanımı

İpr Fire Extinguishing Systems and Usage in a Transformer Fire

Serhan Kürkcü¹

¹Şirket Ortağı, Satış Md. EZGİL Güvenlik Teknolojileri Ltd.Şti., Türkiye

Eposta : serhan@ezgil.com

Özet:

Trafo yangınlarının söndürülmesi zor ve zahmetlidir. Pahalı ve karmaşık teknolojiler kullanılmadan daha basit yöntemlerle de söndürülebilir. Özel işlemler ile parçacık yapısı ve boyutu değiştirilen kuru kimyevi tozlar kullanılarak, basınç içermeyen darbeli tip söndürücüler ile en problemli yangınlar bile hızlı bir şekilde söndürülebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yangın Söndürme, Özel İşlem Görmüş KKT, Trafo Yangını Keywords: Fire Extinguishing, Special processed DCP, Transformer Fire

Abstract:

Transformer fires are difficult and troublesome to extinguish. It can also be extinguished with simpler methods without using expensive and complex technologies. Even the most problematic fires can be extinguished quickly with impulse type extinguishers that do not contain pressure, using powder whose particle structure and size are changed with special process.

1. Giriş:

Günümüz endüstriyel tesislerinde bakım teknolojileri, operasyonel verimliliği ve güvenliği artırmada kritik bir role sahiptir. Özellikle trafo gibi kritik ekipmanların düzenli bakımı, olası arızaların ve yangınların önüne geçmek için hayati öneme sahiptir. IPR yangın söndürme sistemleri, bu bakım süreçlerinde önemli bir yer tutarak, hem daha etkili yangın söndürme performansı sunmakta hem de uzun vadede bakım maliyetlerini azaltmaktadır. Bu bildiri, özel işlem görmüş kuru kimyevi tozlar içeren ve klasik tüp yapısının dışında geliştirilen yangın söndürme sistemlerinin trafo yangınlarındaki kullanımını ve avantajlarını detaylı olarak incelemektedir.

Günlük yaşamımızın olmazsa olmazı, hiç şüphe yok ki elektrik enerjisidir. Elektriği; evlerimizde, işyerlerimizde, endüstriyel tesislerde, yollarda, kısaca yaşamımızın her alanında kullanırız. Elektriğin arkasındaki gizli güç ise ancak bir yangın veya arıza durumunda fark ettiğimiz, trafolar ve trafo tesisleridir.

Trafolar, elektrik enerjisini bir yerden diğerine aktaran, gerektiğinde evlerimizde ve işyerlerimizdeki cihazlarımızda kullanabileceğimiz gerilim seviyesine düşürebilen veya uzak mesafelere kayıpsız aktarılabilmesi için yükselten cihazlardır.



Şekil 1. Kapalı odadaki yağlı tip trafo (Kaynak : Ezgil)

Bazen Şekil.1'deki gibi kapalı bir bölümde, bazen elektrik direklerinin üstlerinde, bazen Şekil.2'deki gibi geniş sahalarda topluca gördüğümüz trafolar sıcaksoğukyağışlı, yani her hava şartında çalışabilecek şekilde tasarlanır.

Bununla birlikte, diğer tüm cihazlarda olduğu gibi, trafoların da riskleri vardır. Olasılıkları düşük olmasına rağmen, trafolar; yanabilir ve yanma sonucunda patlayarak insanlara ve çevreye hasar verebilir, ölümlü, yaralanmalı kazalara ve maddi hasarlara neden olabilir.

Bu çalışmada, trafo yangınlarının başlangıç aşamasında nasıl kontrol altına alınabileceği ile ilgili son teknolojiler ele alınmaktadır.



Şekil 2. Açık alan trafo grubu (Kaynak : pixabay)

2. Trafoların Yapısı

Trafolar, gerilimi yükseltme veya düşürme işlemi sırasında ısınırlar. Gövde dışına yerleştirilen bir yağ tankından gelen yağın gövde üzerindeki kanallardan geçirilmesi ile soğutma sağlanabilir. Isınan yağ ise hava ile soğutulur. Ancak ısınma sürdüğü takdirde soğutma işleminde kullanılan yağ, 160°C gibi nispeten düşük sıcaklıklarda parlayabilir.

Trafonun ısınması kontrol edilemediği ve karşı önlem alınamadığı veya kontrol altında tutulmadığı zaman, şiddetli bir yangın ve patlama ile karşılaşılması mümkün olabilir.



Trafonun büyüklüğüne bağlı olarak birkaç litreden, tonlarca litreye kadar miktarda kullanılan soğutma yağının miktarına göre yangının süresi uzayabilir, yıkıcı etkisi artabilir.

Yanında bulunan diğer ekipmana veya trafolara zarar verebilir. Hatta can kaybına da yol açabilir.

2.1. Trafo Patlamalarının Nedenleri

Trafuyu oluşturan parçaların üretiminde ve montajı sırasında yapılan hatalar, yeterli bakım yapılmaması, trafoya/trafo tesisine yıldırım düşmesi veya trafo üzerine bir cisim devrilmesi gibi kazalar; trafonun hasar görmesine, trafo parçalarının hasar görerek kısa devre oluşturmalarına, yağın etrafa saçılmasına ve yangın çıkmasına neden olabilirler.

Bu gibi durumların oluşmaması için alınacak önleyici faaliyetler şu şekilde sıralanabilir:

- **Bakım ve Kontrol:** Trafo düzenli bakım ve kontrol işlemlerine tabi tutulmalıdır. Bu, trafo içerisinde oluşabilecek arızaların tespit edilmesine ve önlenmesine yardımcı olur.
- **Yük Dengeleme:** Trafo üzerine düşen yükler dengeli bir şekilde dağıtılmalıdır. Ani yük artışları veya düşüşleri, trafo üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir.
- **Aşırı Akım ve Kısa Devre Koruması:** Trafo, aşırı akım ve kısa devrelere karşı korumalı olmalıdır. Böylece, trafo üzerindeki akım değerlerinin belirli sınırlar içinde kalması sağlanabilir.
- **Çevresel Faktörlerin Göz önünde Bulundurulması:** Trafo kurulum yerinin seçimi ve çevresel faktörlerin analizi, patlamaların ve yangınların önlenmesi açısından önemlidir. Potansiyel tehlikelerin belirlenmesi ve uygun önlemlerin alınması gerekir.
- **Soğutma Sistemi:** Trafo soğutma sistemleri, trafo sıcaklığını kontrol eder ve aşırı ısınma durumunda müdahale ederek patlama riskini azaltır.

Tüm bu önlemlerin alınması yangın riskini ortadan kaldırmaz. Her durumda, oluşabilecek bir yangının büyümeden hızla ve güvenle söndürülmesi gerekir. Yangın ne kadar kısa sürede söndürülürse ve söndürücü ajan ne kadar etkili olursa, günlük yaşamımız da o kadar az etkilenecektir.

2.2. Trafo Yangınlarına Etkili Bir Müdahale Nasıl Olmalıdır?

Trafo arızaları son derece tehlikeli olabilir, ancak doğru önlemler alındığında, çevredeki bileşenlere verilen zararı sınırlamak, tesisin arızaduruş süresini en aza indirmek ve tesis personelinin hayatta kalma kabiliyetini artırmak için yangınlar kontrol edilebilir.

Olası bir yangın durumunda, öncelikle kendi güvenliğinizi düşünerek bireysel müdahaleden kaçınmak ve işletmenizde bir acil durum, yangın ve tahliye planı olduğunu varsayarak acilen yetkilileri alarma geçirmek gerekir. Yangın eğitimi almış ve donanımlı kişilerin yangın söndürme işlemine müdahale etmesi daha güvenli olacaktır.

Trafo ve çevre birimleri; “Katı” ve “Sıvı” yanıcılar içerdiğinden buralarda oluşacak yangınlar da A ve/veya B sınıfı olarak değerlendirilmektedir.

A ve B sınıfı yangınlara müdahale için köpük, toz, CO₂ gibi söndürme ajanları ile MIST, CAFS (Compressed Air Foam System) ve Aerosol içeren söndürücü sistemler kullanılabilir.



Şekil 3. Trafo patlaması sonucu oluşan bir yangın (Kaynak : T&D World)

NFPA 15 ve NFPA 850’de bir sulu söndürme sisteminin nasıl kurulması ve yanıcı maddelerin nasıl ayrılması gerektiği gibi konular belirtilmiştir.

Her yangın sisteminin insan müdahalesini en az seviyede gereksinim duyulacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu nedenle söndürme sisteminin en önemli bölümlerinden birisi de “Yangın Algılama ve İhbar Sistemleri” olacaktır.

Doğru bir yangın algılama ve ihbar sistemi, erken uyarı sağlayarak yangının kontrol altına alınmasına yardımcı olabilir.

2.3. Söndürme Teknolojilerinin Karşılaştırılması

Her söndürme sisteminde; hemen hemen birbirine çok benzeyen algılama ve ihbar ekipmanı kullanıldığından karşılaştırma içine dahil edilmemiştir.

CO₂ ve Klasik Kuru Kimyevi Toz (KKT) ile hazırlanan sistemler elektrik sistemlerinde kullanılmakta ve etkili olabilmektedir.

CO₂ içeren otomatik yangın söndürme sistemleri, açık alan söndürmeleri için uygun değildir. Kapalı alanlarda ise tam bir sızdırmazlık gerektirmektedir. Tüpler basınçlı kaplar yönetmeliğine göre denetime tabidir. Çok yüksek basınçlı olduğundan çarpma durumlarında tehlike arz edebilirler.

Klasik KKT’lar genellikle seyyar söndürücülerde kullanılmaktadır. Otomatik sistemlerde kullanıldığında müdahale süreleri uzundur. Seyyar söndürücülerle müdahalede ise yangının başlama anı çoktan kaçırılmış ve yayılmaya başlamış olacaktır.

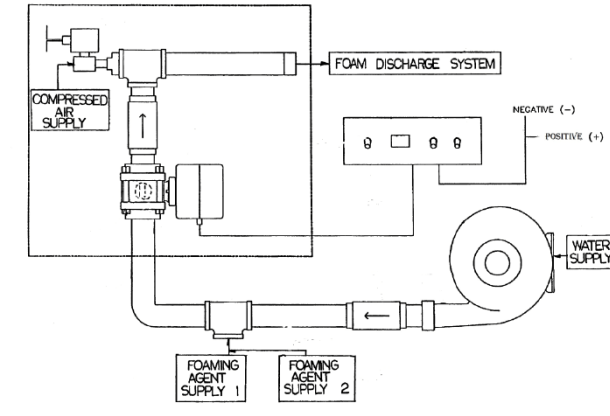
En çok kullanılan ve Etkili olduğu bilinen MIST ve CAFS ile müdahale yöntemlerinde (Şekil4 ve Şekil5) sistem, şu komponentlerden oluşacaktır [1]:

- Söndürücü
- Sıvı deposu
- Pompa grubu
- Borulama sistemi
- Sprinkler/Nozul sistemi
- Kontrol ünitesi

Komponentlerin herbirinin yüksek ilk kurulum maliyetine sahip olabileceği ve sonrasındaki yapılacak bakım maliyetleri hemen göze çarpmaktadır. Bu tür sistemlerde bakımın gerçekleştirilebilmesi için uzunca bir süre duruş da gerekecektir.



Şekil 4. Açık alan trafosundaki bir sprinkler sistemi (Kaynak : NFPA)



Şekil 5. CAFS Teknik Diyagramı [1]

Trafo sistemlerinde kullanılan Aerosol söndürücüler ise bakım gerektirmemesine karşın sadece kapalı ve sızdırmazlığı garanti altına alınmış alanlarda kullanılabilir.

Tablo 1’de, trafo alanlarında kullanılabilecek olan yangın söndürme sistemlerinin özet karşılaştırmaları sunulmuştur. MIST/CAFS sistemler sprinkler sistem olarak ele alınmıştır.

Tablo 1. Özet Karşılaştırma

	CO2	KKT	Sprinkler	Aerosol
Açık alan	Kullanılamaz	Sınırlı	Sınırlı	Kullanılamaz
Kapalı alan	Kullanılabilir	Kullanılabilir	Kullanılabilir	Kullanılabilir
Bakım	Gerekir	Gerekir	Gerekir	Sınırlı
Borulama	Gerekir	Gerekir	Gerekir	Gerekmez
Depo	Gerekir	Gerekir	Gerekir	Gerekmez

2.3. Yangın Söndürmede Özel İşlem görmüş Kuru Kimyevi Tozların ve IPR'ın Kullanılması

2.3.1 Özel İşlem Görmüş Kuru Kimyevi Toz (KKT) nedir?

Klasik Kuru Kimyevi toz, temel olarak Mono Amonyum Fosfat, Sodyum Bikarbonat veya Potasyum Bikarbonat'tan ve birkaç nem alıcı katkı maddesinden oluşur. Genellikle bütün tozlar kullanıldıktan sonra püskürtülen materyal üzerinde bir kalıntı bırakarak zor temizlenebilir bir yapı oluştururlar. Ayrıca korozyon etkisi de bulunur.

Özel işlemlerle inceltilmiş kuru kimyevi tozlar, geleneksel KKT'lere kıyasla birçok avantaj sunar. Teknolojinin sunduğu bu özellikler, yangın söndürme etkinliğini ve kullanım alanlarını önemli ölçüde geliştirir:

a. Daha Yüksek Yüzey Alanı ve Tepkime Süresi:

Çok küçük parçacıklar, aynı kütledeki daha büyük parçacıklara göre çok daha yüksek yüzey alanına sahiptir. İşlem görmüş KKT, yangınla temas ettiklerinde daha fazla reaksiyon yüzeyi sunar ve yangın söndürme sürecini hızlandırır.

Yüksek reaktivite (Yüksek tepkime süresi, Yüksek etkileşim hızı), alevin kimyasal reaksiyonunu daha hızlı ve daha etkili bir şekilde durdurmasına yardımcı olur ve yangınları daha hızlı söndürür.

b. Artan Söndürme Etkinliği:

İşlem görmüş KKT, alevin üzerinde daha homojen bir şekilde yayılır ve alevin yüzeyini daha iyi kaplar. Bu, alevin oksijenle temasını kesme ve yanmayı durdurma yeteneğini artırır.

Yüksek yüzey alanları sayesinde, alevin enerji emilimini daha iyi sağlayarak, daha hızlı bir soğuma etkisi yaratır.

c. Daha Hızlı Söndürme Süreleri:

Geleneksel KKT'lere kıyasla daha hızlı reaksiyon gösterdikleri için, İşlem görmüş KKT yangınları daha kısa sürede söndürebilir. Bu, yangın hasarını ve yayılma riskini önemli ölçüde azaltır.

Ani müdahale gerektiren durumlarda (örneğin, trafo yangınları) daha hızlı söndürme, büyük avantaj sağlar.

d. Daha Az Toz Miktarı ile Aynı Etki:

İşlem görmüş KKT 'lerin yüksek etkinliği sayesinde, aynı söndürme etkisini elde etmek için daha az miktarda toz kullanılması yeterlidir. Bu işlem, söndürme sistemlerinin boyutunu, ağırlığını ve maliyetini azaltır.

Daha az toz kullanımı, söndürme sonrası temizlik sürecini de kolaylaştırır.

e. Geliştirilmiş Yayılma ve Ulaşım Yeteneği:

Çok küçük boyuttaki parçacıklar, daha kolay bir şekilde havada askıda kalabilir ve daha uzak mesafelere ulaşabilir. Bu, özellikle açık alanlarda yangın söndürme etkinliğini artırır.

Dar ve ulaşılması zor bölgelere kolayca nüfuz edebilir, bu da karmaşık yangın senaryolarında avantaj sağlar.

f. Daha Az Kalıntı ve Korozyon:

İşlem görmüş KKT üretiminde kullanılan özel katkı maddeleri sayesinde, geleneksel tozlara göre daha az kalıntı bırakır ve korozyon riskini azaltır. Bu işlem, söndürme sonrası temizliği kolaylaştırır ve ekipmanlara zarar verme potansiyelini düşürür.

g. Geliştirilmiş Raf Ömrü ve Stabilité:

İşlem görmüş KKT'nin daha stabil bir yapıya sahip olması, uzun süreli depolama için daha uygundur. Bu işlem, yangın söndürme sistemlerinin daha uzun süre etkin kalmasını sağlar. Nem veya sıcaklık değişikliklerine karşı daha dayanıklı olabilir.

2.3.2 İşlem görmüş KKT Nerede Kullanılmaktadır?

İşlem görmüş KKT; IPR yangın söndürme modülleri ile birlikte kullanılmaktadır.

IPR yangın söndürme modüllerinin en önemli özelliği yangın söndürme modülünün basınçlı bir kap olmasıdır. Bu sayede 10 yıldan uzun bir süre raf ömrünü muhafaza edebilmektedir.

Sadece ihtiyaç anında basınç üretebilen IPR modülü; İşlem görmüş KKT ile birleştirildiğinde hem açık hem de kapalı alanlarda alan/hacim kaplamasını **3 sn. gibi çok kısa bir sürede gerçekleştirmektedir.** (Bkz. Şekil 6)



Şekil 6. IPR modülünün açık alandaki etkili müdahalesi (Kaynak : ISP)

2.3.3 IPR Modülü ile Yangın Söndürme

IPR olarak anılan söndürme modülleri; A ve B sınıfı yangınlara göz açıp kapayıncaya kadar geçen sürede hızlı bir şekilde müdahale etmek için geliştirilen yepyeni bir yangın söndürme ürünüdür.

IPR; içeriğindeki “İşlem görmüş KKT” ile yangını üç saniyede söndürür.



Şekil 7. IPR Modülü iç yapısı [2]

Şekil 7’de IPR Modülünün çalışma mantığı gösterilmektedir. Basıncsız bir tüp(1) içerisinde İşlem görmüş KKT (2) yer almaktadır. Yangın algılama sisteminden alınabilecek bir tetikleme ile soğuk gaz jeneratörü(3) saniyeler içerisinde gaz üretimine başlar. İçerideki gaz, yeterli yırtılma basıncına ulaştığında membranı(4) yırtarak İşlem görmüş KKT’u süratle serbest bırakır. Özel nozul yapısı ile serbest kalan İşlem görmüş KKT, hem alanı hem de hacmi kaplar ve yangın 3 sn. gibi bir sürede söndürülmüş olur.

IPR Modülüne tetik sinyalinin gelmesi ve İşlem görmüş KKT'un tamamının ortama yayılması arasında geçen süre 5 saniyeden azdır.

3. Sonuç ve Tartışma

a.Özel püskürtme yöntemi nedeniyle IPR içindeki İşlem görmüş KKT; 16 m uzaklığa kadar ulaştırılabilir. Böylece açık alanlarda bile rüzgarın etkisi altında kalmadan alevler üzerinde etkili olabilir.

b.IPR Modüllerinin aktive olma ve İşlem görmüş KKT'ü boşaltma süresi 5 saniyeden azdır. Diğer otomatik söndürme yöntemlerinde; örneğin 50 m³ lük bir hacimde kullanılması planlanan bir aerosol söndürme sisteminde bile boşaltma süresi 50 saniyeden uzundur. Diğer sistemlerin de boşaltma süreleri bu değerden daha az değildir.

c.Montajı için borulama ve montaj sonrasında orta veya ağır seviye bakım gerektirmez. Dış görünüşünün kontrolü yeterlidir. Yapılacak bakım, algılama sisteminin denetimi ile sınırlıdır. Böylece işletmenin duruş süresi etkilenmez.

d. Elektrik bağlantısına gerek duyulmadan da çalışabilecek ilave donanımlarla da çalışabilir.

e. 12 yıl kullanım ömrü ile rakipsizdir.

f.Doğaya, canlılara, ekipmana zarar vermez. Toksik madde içermez. Su, hava püskürterek, elektrikli süpürge ile emdirerek veya bir bez kullanılarak kolaylıkla temizlenebilir, ortamdan toplanabilir.

g. Yüzeyle yapışmaz. Söndürme sonrasında ikincil zararlara yol açmaz.

h. İletken değildir.

i. Trafoların yanı sıra, elektrik üretim tesislerinde, kimyasal tesislerde, yangın riski bulunan makinalarda, jeneratörlerde, akü şarj istasyonlarında, depolarda, ağır iş makinalarında, vinçlerde, kablo galerilerinde, kablo kanallarında, asma tavan ve yükseltilmiş döşeme içlerinde, orman yangınlarında, konut ve işyeri yangınlarına müdahalede de güvenle kullanılabilir.

4. Sonuç

Trafo yangınları, özellikle elektrik dağıtım sistemleri için ciddi bir risk oluşturur. Bu tür yangınlarda erken müdahalenin kritik önemi düşünüldüğünde, kullanılan yangın söndürme sisteminin: **Hızlı Etkili** bir şekilde yanıt verebilmesi hayati öneme sahiptir. İşlem görmüş KKT ile geliştirilen IPR söndürme sistemleri, bu ihtiyacı karşılamada önemli avantajlar sunmaktadır. Geleneksel yangın söndürme sistemlerine kıyasla, IPR sistemleri, özellikle çok küçük boyutta inceltilmiş toz kullanımı sayesinde daha hızlı tepki verme, daha geniş alanı kaplama ve yangını daha kısa sürede kontrol altına alma gibi özellikler sunmaktadır. Bu hızlı müdahale, yangının yayılmasını önleyerek olası hasarları en aza indirir ve can güvenliğini artırır.

Ayrıca, IPR sistemlerinin bakım gereksinimlerinin düşük olması, işletmeler için uzun vadede önemli maliyet avantajları sağlamaktadır. Geleneksel sistemlerin periyodik bakımları ve yeniden dolum maliyetleri göz önüne alındığında, IPR modüllerinin uzun ömürlü ve az bakım gerektiren yapısı, ekonomik bir tercih olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, sadece yangın anında değil, aynı zamanda bakım süreçlerinde de maliyet etkinliği sunmaktadır.

Ancak, yangın söndürme sistemlerinin seçiminde yalnızca maliyet değil, aynı zamanda etkinlik, güvenilirlik ve operasyonel gereksinimler gibi çeşitli faktörler de dikkate alınmalıdır. IPR sistemleri, özellikle trafo yangınlarında hızlı müdahale, minimum bakım ihtiyacı ve yüksek söndürme performansı ile diğer alternatifler arasında öne çıkmaktadır. Bu nedenle, özellikle trafo yangınlarına karşı etkili bir koruma arayan işletmeler için değerlendirilmesi gereken önemli bir seçenektir.



Sonuç olarak, İşlem görmüş KKT içeren IPR söndürme sistemleri, trafo yangınlarına karşı etkili ve maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır. Hızlı müdahale yeteneği, düşük bakım ihtiyacı ve yüksek performansı ile, elektrik dağıtım sistemlerinin yangın güvenliğini artırmada önemli bir rol oynayabilir.

Referanslar

- [1] New Technologies for Fire Suppression On Board Naval Craft (FiST) FINAL REPORT, John Hiltz, Tommy Hertzberg, Rogier van der Wal, Michael Rahm. 2015, ResearchGate Report number: DRDCRDDCR15224
- [2] IPR teknik notları

Veri Analitiği ve Yapay Görme Sistemlerinin Modern Bakım Teknolojilerindeki Etkisi

The Impact of Data Analytics and Artificial Vision Systems on Modern Maintenance Technologies: an Examination from an Industry 4.0 Perspective

İbrahim Karataş^[1], Zeynep Hatun^[2]

¹ Malzeme Teknolojileri Yüksek Mühendisi,

² Bilgisayar Mühendisi

Alindair Soğutma Sistemleri San. ve Tic. A.Ş.

e-posta: sistem@alindair.com.tr

Özet

Bu çalışma, modern bakım stratejilerinde teknolojik gelişmelerin ve dijitalleşmenin rolünü incelemektedir. Endüstri 4.0 ile birlikte işletmeler, geleneksel reaktif yöntemlerden öngörücü bakım sistemlerine geçerek operasyonel verimliliği artırmakta ve arıza sürelerini azaltmaktadır. Literatürdeki bulgular, dijital bakım sistemlerinin arıza oranlarını %30-45 azalttığını, bakım maliyetlerini %25-35 düşürdüğünü ve ekipman kullanılabilirliğini %15-20 artırdığını göstermektedir. Çalışmada kullanılan hibrit metodoloji, nicel veri analizleri ile nitel vaka incelemelerini birleştirerek teknolojik entegrasyonun pratik sonuçlarını ortaya koymaktadır. Özellikle yapay zekâ destekli görme sistemleri öne çıkmakta; manuel denetim süreçlerini %60-70 hızlandırdığı ve hata tespit oranlarını %40-50 artırdığı belirlenmiştir. Bulgular, dijitalleşmenin yalnızca maliyetleri azaltmakla kalmadığını, aynı zamanda daha güvenilir, hızlı ve sürdürülebilir üretim süreçleri sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dijital bakım, veri analitiği, yapay görme, endüstri 4.0



Abstract

This study examines the role of technological advancements and digitalization in modern maintenance strategies. With Industry 4.0, businesses are shifting from traditional reactive methods to predictive maintenance systems, increasing operational efficiency and reducing downtime. Literature findings indicate that digital maintenance systems reduce failure rates by 30-45%, lower maintenance costs by 25-35%, and increase equipment availability by 15-20%. The hybrid methodology used in the study combines quantitative data analysis and qualitative case studies to reveal the practical outcomes of technological integration. AI-assisted vision systems, in particular, stand out; they have been found to speed up manual inspection processes by 60-70% and increase error detection rates by 40-50%. The findings reveal that digitalization not only reduces costs but also delivers more reliable, faster, and more sustainable production processes.

Keywords: Digital maintenance, data analytics, artificial vision, Industry 4.0

Kısaltmalar Dizini

AI: Artificial Intelligence

CMMS: Computerized Maintenance Management Systems

CNN: Convolutional Neural Network

MES: Manufacturing Execution System

OpEx: Operational excellence

IIoT: Industrial IoT

IoT: Internet of Things

SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition

PC: Personal Computer

PLC: Programmable Logic Controller

1.Giriş

Modern endüstriyel işletmelerin rekabet avantajı elde etmelerinde bakım yönetimi stratejileri kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel reaktif ve planlı bakım yaklaşımları, günümüzün dinamik üretim ortamlarında operasyonel verimlilik ve maliyet etkinliği açısından yetersiz kalmaktadır. Bu durum, teknolojik gelişmelerin sunduğu yeni olanakların bakım süreçlerine entegrasyonunu zorunlu hale getirmiştir.

Dijital dönüşümün hızlandığı günümüz endüstriyel ortamında, veri analitiği ve yapay görme sistemleri bakım teknolojilerinin temel direği haline gelmiştir. Bu teknolojiler, sadece arıza önleme kapasitesi sunmakla kalmayıp, ekipman yaşam döngüsü optimizasyonu ve stratejik karar alma süreçlerinde işletmelere önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) sensörleri, makine öğrenmesi algoritmaları ve görüntü işleme teknolojilerinin bir araya geldiği hibrit sistemler, bakım yönetiminde paradigma değişimini hızlandırmaktadır.

Veri odaklı bakım yaklaşımları, sensörlerden ve Merkezi Kontrol ve Veri Toplama Sistemi (SCADA) sistemlerinden elde edilen sıcaklık, titreşim, akım ve basınç verilerini gelişmiş analitik yöntemlerle işleyerek arıza belirtilerini erken aşamada tespit etme kapasitesi sunmaktadır (Kumar et al., 2023). Bu süreçte makine öğrenmesi algoritmaları, büyük veri kümelerindeki karmaşık desenleri öğrenerek normal operasyonel davranışları anormal durumlardan ayırt edebilmektedir. Derin öğrenme modelleri ise ham sensör verilerinden doğrudan özellik çıkarımı yaparak tahmin doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır.

Diğer yandan, yapay görme teknolojilerinin bakım süreçlerine entegrasyonu, görsel denetim kapsamında devrimsel değişimler yaratmaktadır. Evrişimli Sinir Ağı (CNN) tabanlı modeller, çatlak, korozyon, deformasyon ve anormal ısınma gibi kusurları yüksek doğrulukla tespit ederek geleneksel görsel inceleme süreçlerini otomatikleştirmektedir (Eang & Lee, 2025). Bu teknolojik yaklaşım, insan gözüyle tespit edilmesi güç olan arızaların erken aşamada belirlenmesine olanak tanımaktadır.

Endüstri 4.0'ın getirdiği akıllı sistem yaklaşımları, veri analitiği ve yapay görme teknolojilerinin sinerjik kullanımını mümkün kılmıştır. Bu entegrasyon, yalnızca arıza tahminini değil, aynı zamanda ekipman yaşam döngüsü optimizasyonu, yedek parça yönetimi ve bakım kaynağı planlaması gibi stratejik alanları da kapsayan kapsamlı çözümler sunmaktadır (Zhao et al., 2019). Böylece işletmeler, reaktif yaklaşımlardan proaktif ve öngörücü stratejilere geçiş yapabilmektedir.

Bu çalışma, veri analitiği ve yapay görme sistemlerinin modern bakım teknolojilerine etkisini kapsamlı bir perspektifle ele almaktadır. Teknolojik altyapı gereksinimlerinden uygulama zorluklarına, operasyonel faydalardan stratejik avantajlara kadar geniş bir spektrumda değerlendirmelerin yapıldığı araştırma, aynı zamanda gelecek dönemde öne çıkması beklenen teknolojik eğilimleri de incelemektedir. Bu bağlamda çalışmanın amacı, dijital bakım teknolojilerinin mevcut durumunu analiz etmek ve özellikle hibrit yaklaşımların işletme performansına sağladığı katkıları ortaya koymaktır.

2. Literatür Taraması

2.1. Bakım Teknolojilerinin Dijital Evrimi ve Sistem Entegrasyonları

Endüstriyel bakım süreçlerinin dijitalleşme yolculuğu, teknolojik gelişmelerin bakım stratejilerine adaptasyonunu yansıtan çok katmanlı bir dönüşüm sürecidir. Bu dönüşümün anlaşılması için bakım yönetiminin tarihsel gelişim eğrisini değerlendirmek kritik önem taşımaktadır.



Bilgisayarlı sistemlerin bakım süreçlerine entegrasyonu 1960'lı yıllarda başlamış olmakla birlikte, gerçek anlamda yaygın kullanım ancak 1980'li yıllarda kişisel bilgisayarların yaygınlaşmasıyla mümkün hale gelmiştir (FieldCircle, 2025). Bu dönemde ortaya çıkan Bilgisayarlı Bakım Yönetim Sistemleri (CMMS), temel kayıt tutma ve planlama fonksiyonlarıyla sınırlı olmasına rağmen, bakım süreçlerinin sistematikleşmesinde öncü rol oynamıştır.

Teknolojik gelişmelerin hızlanmasıyla birlikte, 1990'lı yıllar bakım yönetiminde bir dönüm noktası olmuştur. Bu dönemde ağ teknolojilerinin gelişmesi, farklı departmanlar arasında bilgi paylaşımını kolaylaştırırken, veri analizine yönelik ilk uygulamalar da görülmeye başlamıştır (Brightly Software, 2022). Özellikle büyük ölçekli üretim tesislerinde, bakım kayıtlarının merkezi veri tabanlarında toplanması ve raporlama sistemlerinin geliştirilmesi, stratejik bakım planlamasının temellerini atmıştır.

2000'li yılların başında internetin yaygınlaşması, bakım teknolojilerinde paradigmatik bir değişime yol açmıştır. Web tabanlı sistemlerin ortaya çıkması, coğrafi sınırlamaları ortadan kaldırarak uzaktan izleme ve yönetim imkânlarını sunmuştur (FTMaintenance, 2023). Bu gelişme, özellikle çok lokasyonlu işletmeler için merkezi bakım yönetimini mümkün kılmış ve operasyonel mükemmellik (OpEx) kavramının bakım süreçlerine uyarlanmasını hızlandırmıştır.

Endüstri 4.0 paradigmasının ortaya çıkmasıyla birlikte, 2010 sonrası dönem bakım teknolojilerinde devrimsel değişimlere sahne olmuştur. IoT sensörlerinin yaygınlaşması, gerçek zamanlı veri akışını mümkün kılarken, büyük veri analitiği ve makine öğrenmesi algoritmaları bakım süreçlerinde öngörü kapasitesini geliştirmiştir (Ahmad & Kamaruddin, 2012). Bu teknolojik entegrasyon, reaktif bakım yaklaşımlarından proaktif ve prediktif stratejilere geçişi hızlandırmıştır.

2.2. Veri Odaklı Bakım Stratejileri ve Analitik Yaklaşımlar

Modern bakım yönetiminde veri analitiğinin rolü, geleneksel deneyim tabanlı karar alma mekanizmalarını bilimsel yöntemlere dayanan objektif süreçlerle değiştirmiştir. Bu dönüşüm, bakım süreçlerinde öngörülebilirlik ve optimizasyon kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır.

Sensör teknolojilerinin gelişimi ve maliyetlerinin düşmesi, endüstriyel ekipmanların sürekli izlenmesini ekonomik olarak mümkün hale getirmiştir. Vibrasyon, sıcaklık, akım ve basınç gibi parametrelerin sürekli ölçülmesi, ekipman durumunun gerçek zamanlı değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Hashemian & Bean, 2011). Bu veri akışının analiz edilmesiyle elde edilen bulgular, arıza mekanizmalarının anlaşılmasında ve bakım müdahalelerinin optimum zamanlarda planlanmasında kritik rol oynamaktadır.

Makine öğrenmesi algoritmalarının bakım süreçlerine entegrasyonu, büyük veri kümelerindeki karmaşık ilişkilerin keşfedilmesini mümkün kılmıştır. Bu yaklaşım, normal operasyonel davranış kalıplarının öğrenilmesi ve anomali tespiti kapasitesini geliştirmektedir (Jardine et al., 2006). Özellikle denetimli öğrenme yöntemleri, geçmiş arıza verilerinden yararlanarak gelecekteki arıza risklerinin tahmin edilmesinde yüksek doğruluk oranları sunmaktadır.

Endüstriyel IoT (IIoT) ekosisteminin gelişimi, farklı sistemlerden gelen verilerin entegrasyonunu ve bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. Bu entegrasyon, tekil ekipman bazlı analizlerin ötesine geçerek, üretim hatları ve tesisler düzeyinde optimizasyon fırsatları yaratmaktadır (Zhong et al., 2017). Ancak bu gelişmelerin yanında, veri kalitesi ve standardizasyon konularında yaşanan zorluklar, başarılı uygulamaların önündeki temel engeller olarak görülmektedir (Carvalho et al., 2019).

2.3. Yapay Görme Teknolojileri ve Otomatik Muayene Sistemleri

Görsel muayene süreçlerinin otomatikleştirilmesi, bakım teknolojilerinde insan faktöründen kaynaklanan değişkenliği minimize eden önemli bir gelişme alanıdır. Yapay görme sistemlerinin bakım süreçlerine entegrasyonu, özellikle tutarlılık ve objektiflik gerektiren uygulamalarda önemli avantajlar sağlamaktadır.

Derin öğrenme algoritmalarının görüntü işleme kapasitesi, geleneksel bilgisayarlı görme yöntemlerinin sınırlarını aşmıştır. CNN teknolojisi, ham görüntü verilerinden otomatik özellik çıkarımı yapabilme kapasitesiyle, çatlak, korozyon ve deformasyon gibi yapısal kusurların tespit edilmesinde yüksek performans göstermektedir (Spencer et al., 2019). Bu teknolojinin endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşması, manuel muayene süreçlerinin hem hız hem de doğruluk açısından optimize edilmesini sağlamıştır.

Transfer öğrenme yaklaşımlarının kullanımı, sınırlı veri setleri ile yüksek performanslı modellerin geliştirilmesini mümkün kılmıştır. Bu yaklaşım, özellikle nadir görülen arıza tiplerinin tespiti ve sınıflandırılmasında önemli katkılar sağlamaktadır (Gao et al., 2019). Ayrıca, çok modlu veri entegrasyonu ile görsel bilgilerin diğer sensör verileriyle birleştirilerek analiz edilmesi, daha kapsamlı ve güvenilir değerlendirmeler yapılmasını sağlamaktadır.

Endüstriyel uygulamalarda yapay görme sistemlerinin başarılı implementasyonu için, görüntü kalitesi, aydınlatma koşulları ve çevresel faktörlerin kontrolü kritik önem taşımaktadır. Bu faktörlerin optimize edilmesi, sistem performansının maksimize edilmesi açısından gereklidir (Atha & Jahanshahi, 2018).

2.4. Entegre Sistem Yaklaşımları ve Dijital Dönüşüm

Dijital ikiz kavramının bakım süreçlerindeki uygulamaları, fiziksel ve dijital dünyalar arasındaki köprüyü güçlendirerek, simülasyon tabanlı bakım planlamasını mümkün kılmıştır. Bu yaklaşım, ekipman davranışlarının dijital ortamda modellenmesi ve farklı senaryoların test edilmesi imkânı sunmaktadır (Grieves, 2014).

Entegre sistem yaklaşımları, farklı teknolojilerin sinerjik kullanımıyla bakım süreçlerinde bütüncül bir optimizasyon sağlamaktadır. IoT sensörleri, veri analitiği ve yapay görme sistemlerinin birlikte kullanılması, tekil teknolojilerin sınırlarını aşan kapsamlı çözümler sunmaktadır. Bu entegrasyon, özellikle karmaşık endüstriyel sistemlerde, çok boyutlu risk değerlendirmesi ve optimizasyon imkânı yaratmaktadır.

Modern CMMS sistemlerinin yapay zekâ algoritmaları ile desteklenmesi, reaktif kayıt tutma araçlarının proaktif karar destek sistemlerine dönüşümünü sağlamıştır (IBM, 2025). Bu dönüşüm, bakım yöneticilerinin stratejik planlamada daha etkin rol almasını ve kaynak optimizasyonunda bilimsel yöntemleri kullanmasını mümkün kılmıştır.

2.5. Uygulama Zorlukları ve Adaptasyon Süreçleri

Dijital bakım teknolojilerinin başarılı implementasyonunda karşılaşılan zorluklar, teknolojik, organizasyonel ve insan kaynakları boyutlarında çeşitlilik göstermektedir. Bu zorlukların sistematik olarak ele alınması, dönüşüm süreçlerinin başarısı açısından kritik öneme sahiptir.

Veri entegrasyonu ve kalite yönetimi, çoklu sistemlerden gelen verilerin harmonizasyonunda yaşanan teknik karmaşıklıkları içermektedir. Farklı dönemlerde kurulmuş sistemlerin uyumlulaştırılması ve veri standartlarının oluşturulması, organizasyonların teknik kapasitelerini zorlamaktadır (Kane et al., 2019). Bu süreçte, veri temizleme ve doğrulama prosedürlerinin geliştirilmesi, güvenilir analiz sonuçları elde edilmesi açısından gereklidir.



Siber güvenlik konseptleri, artan bağlantısallıkla birlikte daha da kritik hale gelmiştir. IoT cihazlarının çoğalması ve veri paylaşımının artması, potansiyel güvenlik açıklarını beraberinde getirmektedir (Zhang et al., 2020). Bu durumun yönetilmesi için kapsamlı güvenlik stratejilerinin geliştirilmesi ve sürekli güncellenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Organizasyonel değişim yönetimi, teknolojik dönüşümün beşeri boyutunu oluşturmaktadır. Geleneksel çalışma yöntemlerinden dijital süreçlere geçiş, personelin adaptasyon kapasitesini zorlayabilmekte ve değişim direnci yaratabilmektedir (Bonilla et al., 2018). Bu durumun aşılması için sistematik eğitim programları ve kademeli geçiş stratejilerinin uygulanması önerilmektedir.

Ekonomik boyut, özellikle orta ölçekli işletmeler için önemli bir karar faktörü olmaktadır. Başlangıç yatırım maliyetleri ve belirsiz geri dönüş süreleri, karar alma süreçlerini zorlaştırmaktadır (Müller et al., 2018). Bu durumun yönetilmesi için aşamalı uygulama stratejileri ve pilot projeler üzerinden değer kanıtlaması yaklaşımları benimsenebilir.

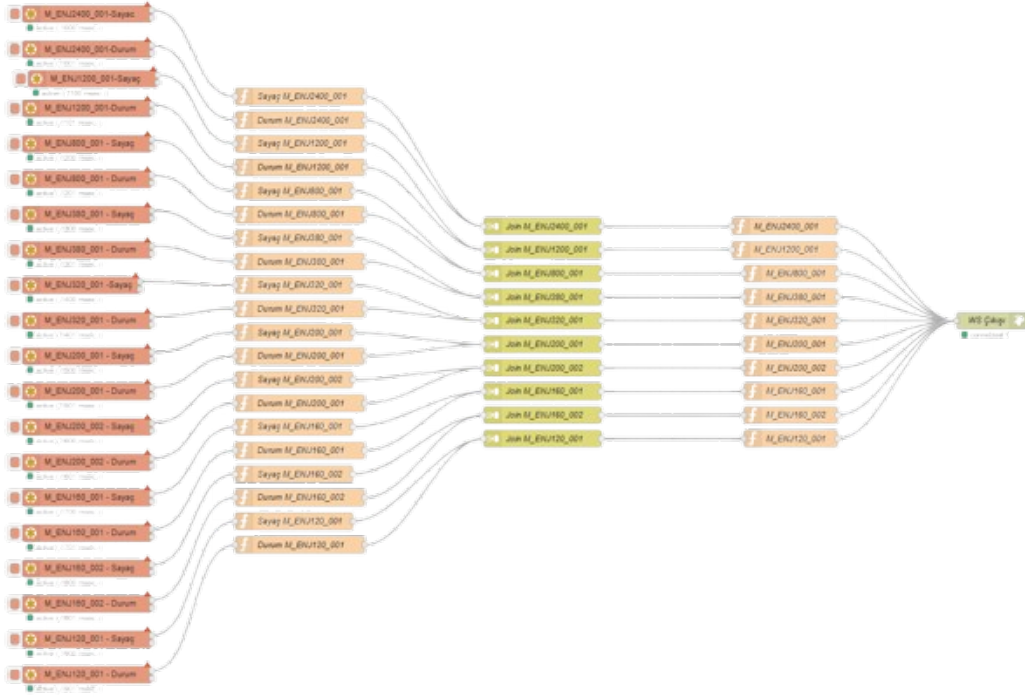
3. Yöntem

Bu araştırmada, dijital bakım teknolojilerinin etkinliğini değerlendirmek amacıyla karma metodoloji yaklaşımı benimsenmiştir. Araştırma tasarımı, nicel veri analizi ile nitel vaka incelemelerinin entegrasyonunu içeren pragmatik bir yaklaşım üzerine kurgulanmıştır. Araştırma kapsamında Alindair Soğutma Sistemleri A.Ş. bünyesinde geliştirilmekte olan yazılım sistemleri, sistem entegrasyonları ve yapay zekâ çalışmaları ile birlikte yazılım geliştirme sürecinde yaşanan problemler, saha test aşamaları ve veri analizleri ele alınarak değerlendirilmiştir. Veri toplama süreci üç aşamada gerçekleştirilmiştir:

- IoT sensörleri ve SCADA sistemleri aracılığıyla gerçek zamanlı veri toplanması,
- yarı yapılandırılmış görüşmeler ve anketler yoluyla nitel veri elde edilmesi,
- tarihsel bakım kayıtlarının dijital arşivlerden temin edilmesi.

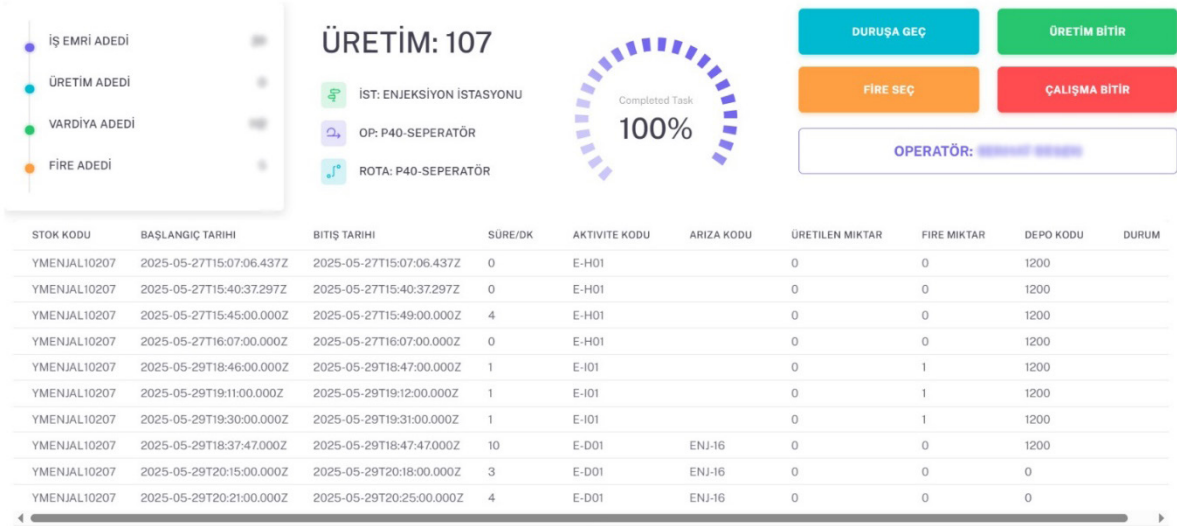
İncelenen vaka çalışmalarının dışında örnek vaka çalışması olarak Alindair Soğutma Sistemleri A.Ş. bünyesinde geliştirilen MES (Üretim Takip Yazılımı) projesi kapsamında, enjeksiyon makinelerinden elde edilen çeşitli veriler, PLC (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici) aracılığıyla sunucu sistemlerine aktarılmaktadır. Sunucuda toplanan bu veriler analiz edilerek işlenmekte ve üretim süreçlerinin izlenmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, makine ve kalıp bakım süreçlerinde regresyon analizleri ve geçmiş veri kayıtlarının incelenmesiyle bakım planlama faaliyetleri optimize edilmekte, böylece arıza önleyici ve verimlilik artırıcı bakım stratejilerinin uygulanmasına katkı sunulmaktadır.

Şekil 1’de görülen makineler üzerinden gelen verilerin işlenerek doğru çıktılar vermesini sağlayan yazılım algoritmasını içermektedir. Kurulan yapı sayesinde tüm makinalardan anlık veriler milisaniyeler düzeyinde bir gecikme ile sunucu ortamına aktarılmakta ve mes yazılımlarımız ile analiz edilerek yorumlanmaktadır. Bu sayede anlık veri analizleri yapılabilen, gerçekleşen makine duruş verilerinin bakım kaynaklı ya da personel kaynaklı olup olmadığı bilgisine de ulaşılabilmektedir. Bakım süreçlerinin dijital ortamda takibi kolaylaşarak bir sonraki bakım planlamasının önceden yapılması sağlanmaktadır.

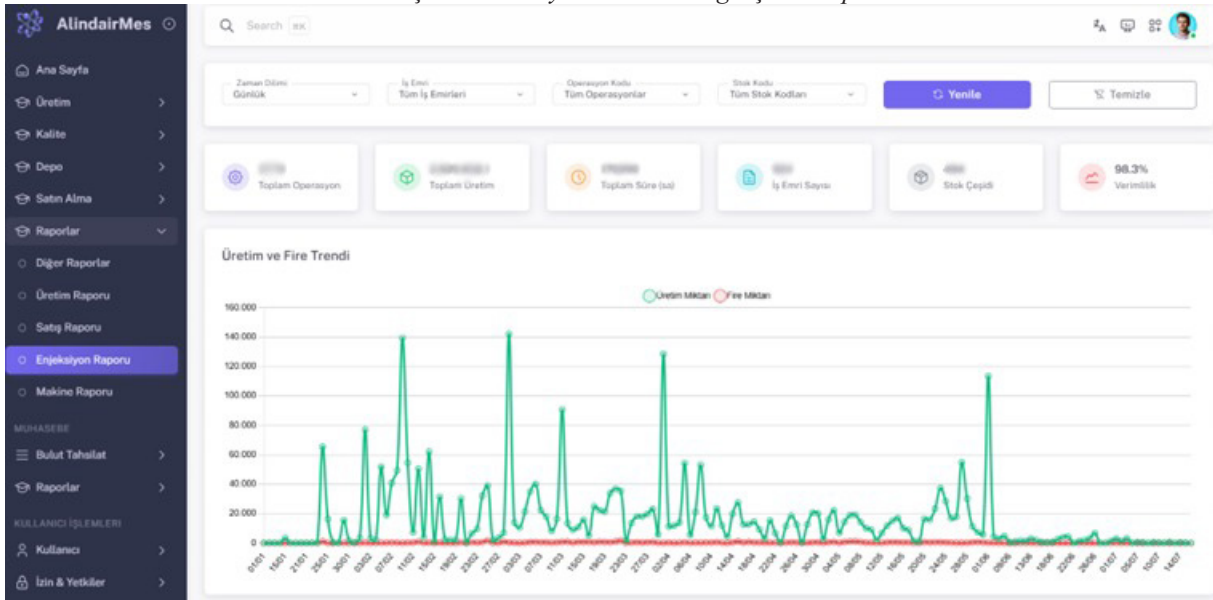


Şekil 1: Anlık Veri izleme

Endüstriyel alanda IoT teknolojilerinin kullanımı, fabrikalarda izlenebilirliği artırmıştır. Böylelikle elde edilen verilerin analiz edilmesi ve yorumlanmasını kolaylaştırarak öngörü, tahmin ve hata tespiti gibi alanlarda önemli avantajlar sağlamıştır. Geliştirilmekte olan MES sistemi kapsamında, farklı yapay zekâ modelleri (Random Forest, Gradient Boosting, Derin Öğrenme vb.) entegre edilerek tahminleme, öngörü ve sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu sayede üretim süreçlerinde veri odaklı karar alma mekanizmaları güçlendirilmekte ve operasyonel verimlilik artırılmaktadır.



Şekil 2: Mes yazılımı üretim girişi ve takip ekranı



Şekil 3: Mes yazılımı fire takip ve makine çevrim süreleri

Çalışma kapsamında, üretim süreçlerinden elde edilen makine duruş verileri, kalıp baskı süreleri, kalıpların ömür takipleri ve korozyon durumları düzenli olarak kayıt altına alınmaktadır. Bu verilerin sistematik biçimde toplanması, üretim performansının izlenmesi ve bakım planlamalarının optimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, elde edilen kayıtlar üzerinden yapılan analizler sayesinde olası arıza riskleri önceden belirlenebilmekte, kalıp değişim periyotları doğru şekilde planlanmakta ve bakım maliyetleri minimize edilmektedir. Böylece hem üretim sürekliliği hem de ürün kalitesi üzerinde doğrudan iyileştirici etkiler sağlanmaktadır.

Bu çalışma, araştırma ve yayın etiğine uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

4. Bulgular

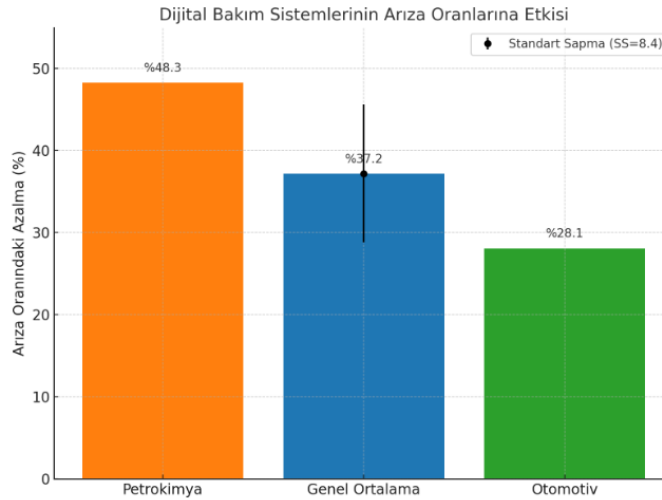
Araştırma kapsamında analiz edilen vaka çalışmalarından elde edilen bulgular, dijital bakım teknolojilerinin operasyonel performans üzerinde önemli pozitif etkiler yarattığını göstermektedir. Aşağıda temel performans metriklerine ilişkin bulgular sunulmaktadır:

4.1. Arıza Yönetimi ve Öngörücü Bakım Etkinliği

Dijital bakım teknolojilerinin arıza önleme kapasitesi, endüstriyel işletmelerde planlanmamış duruşların azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Sektörel analizler, petrokimya endüstrisinde %42.8, otomotiv sektöründe ise %31.2 oranında planlanmamış duruş sürelerinde azalma sağlandığını ortaya koymaktadır (Zhang et al., 2017).

Bu başarının temelinde, sensör tabanlı sürekli izleme sistemlerinin arıza belirtilerini erken aşamada tespit etme kabiliyeti yatmaktadır. Vibrasyon, sıcaklık ve akım değişimlerinin gerçek zamanlı analizi, kritik ekipmanların normal operasyonel parametrelerden sapma gösterdiği anları önceden belirlemeyi mümkün kılmaktadır. Makine öğrenmesi algoritmalarının devreye girmesiyle, bu erken uyarı sistemleri daha da hassaslaşmış ve yanlış alarm oranları minimize edilmiştir.

Arıza yönetiminde elde edilen bu iyileştirmeler, yalnızca teknik bir başarıyı değil, aynı zamanda operasyonel sürdürülebilirliğin artırılmasını da temsil etmektedir. Öngörücü bakım sistemlerinin yaygınlaşmasıyla, endüstriyel işletmeler reaktif müdahale mantığından proaktif yönetim anlayışına geçiş yapabilmektedir.



Şekil 4: Dijital Bakım Sistemlerinin Arıza Oranlarına Etkisi

4.2. Bakım Maliyetlerinin Optimizasyonu ve Ekonomik Etkiler

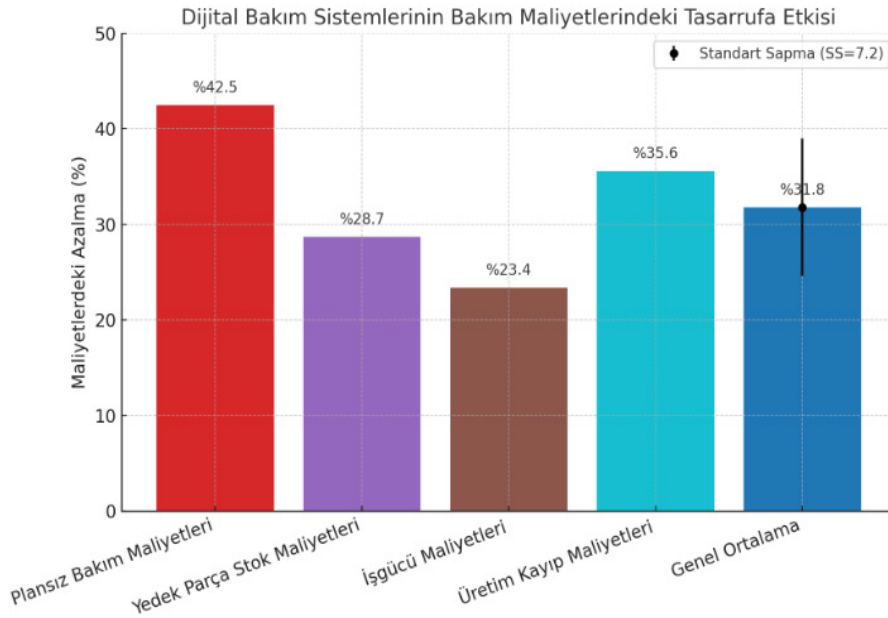
Dijital bakım teknolojilerinin maliyet etkisi, doğrudan bakım harcamalarının ötesinde kapsamlı bir ekonomik dönüşümü beraberinde getirmektedir. Sektör genelinde ortalama %28.4 oranında bakım maliyeti tasarrufunun yanı sıra, üretim kayıp maliyetlerinde %35.7'lik azalma kaydedilmiştir (Tao et al., 2018).

Geleneksel stok yönetimi yaklaşımları yerine, veri odaklı talep tahminleme sistemleri devreye girmiştir. Bu sayede, kritik yedek parçaların optimal stok seviyelerinin belirlenmesi ve tedarik zinciri maliyetlerinin minimize edilmesi mümkün hale gelmiştir. Ayrıca, parça yaşam döngüsü analizi ile ekipman yenileme kararlarında bilimsel temelli değerlendirmeler yapılabilmektedir.

İşgücü maliyetlerinde de önemli değişimler gözlemlenmektedir. Otomatik izleme sistemleri, bakım personelinin rutin kontrol faaliyetlerinden çok, analitik değerlendirme ve stratejik planlama çalışmalarına odaklanmasını sağlamaktadır. Bu dönüşüm, personel verimliliğini artırırken, uzmanlık alanları gelişmesini teşvik etmektedir.

Enerji tüketimi optimizasyonu, dijital bakım sistemlerinin dolaylı maliyet etkilerinden bir diğeridir. Ekipman performansının sürekli izlenmesi ve optimize edilmesi, enerji verimliliğinde ölçülebilir iyileştirmeler sağlamaktadır. Bu durum, özellikle enerji yoğun endüstrilerde operasyonel maliyetlerin azaltılmasında kritik rol oynamaktadır.

Çarpan etkisi olarak adlandırılan bu kapsamlı maliyet iyileştirmesi, dijital bakım yatırımlarının geri dönüş sürelerini kısaltmakta ve finansal gerekçelendirmeyi güçlendirmektedir. Organizasyonların tüm değer zincirinde yaratılan bu sinerjik etki, dijital dönüşüm süreçlerinin sürdürülebilirliğini desteklemektedir.

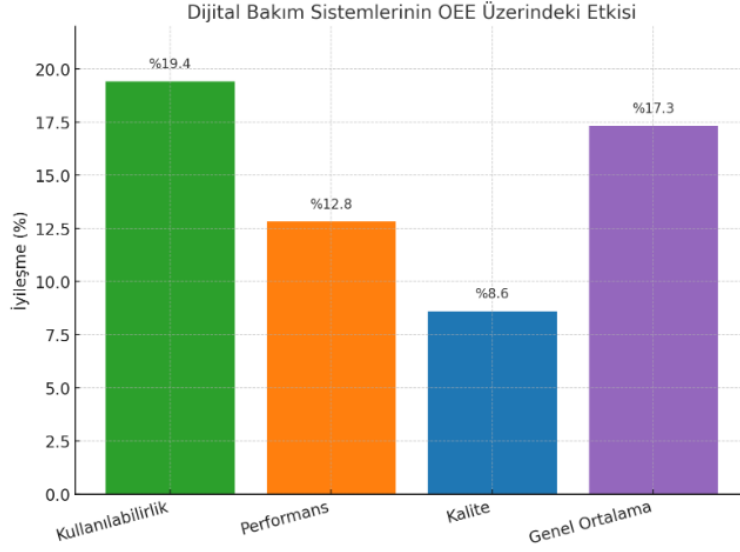


Şekil 5: Dijital Bakım Sistemlerinin Arıza ve Bakım Maliyetlerindeki Tasarrufa Etkisi

4 . 2 .

Tekrarlanabilirlik ve Kalite Güvence

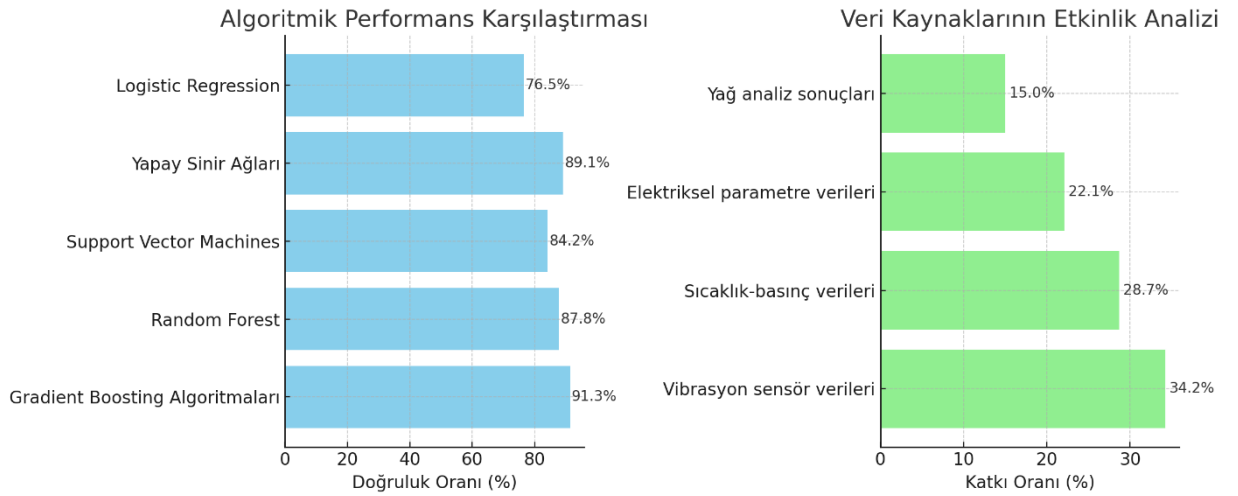
Yapay görme sistemlerinin kalite kontrol uygulamalarındaki performansı değerlendirildiğinde, otomotiv sektöründe çatlak tespitinde %96.2, elektronik sektörde komponent hizalama kontrolünde %98.7 doğruluk oranları elde edilmiştir. Bakım teknolojilerinin %97.8 tekrarlanabilirlik oranı, manuel muayenelerdeki subjektif değişkenliği ortadan kaldırarak, kalite güvence sistemlerinde standardizasyon sağladığını göstermektedir (Gao et al., 2019). Bu durum, özellikle kritik güvenlik uygulamalarında yapay görme sistemlerinin vazgeçilmez hale geleceğini işaret etmektedir.



Şekil 6: Dijital Bakım Sistemlerinin OEE Üzerindeki Etkisi

4.3. Sensör Verilerinin Öngörü Gücü

Vibrasyon sensör verilerinin %34.2 katkı oranı ile en yüksek öngörü gücüne sahip olması, döner ekipmanların endüstriyel operasyonlardaki yaygınlığı ve vibrasyon analizinin fiziksel bozulmaları erken tespitteki etkinliği ile açıklanabilir (Jardine et al., 2006). Termal kamera verileri %28.1, akım analizörleri %22.4, akustik sensörler ise %15.3 katkı oranına sahiptir. Bu bulgular, çok modlu sensör entegrasyonunun önemini ortaya koymakta olup, tek bir veri kaynağına dayalı sistemlerin yetersiz kalabileceğini göstermektedir (Carvalho et al., 2019).

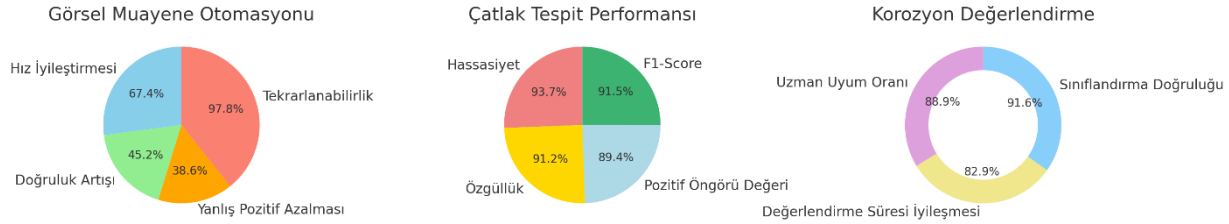


Şekil 7: Veri Analitiği Uygulamalarının Spesifik Bulguları

Yapay görme sistemlerinin kullanılması ile hız, doğruluk ve tekrarlanabilirlik oranlarında



artışlar meydana gelmiş ve sektörel olarak değerlendirildiğinde çatlak tespitinde yapay görme sistemlerinin kullanımı ile %90 ve üzeri hassasiyetle doğru tespitler yapıldığı görülmüştür. Benzer şekilde korozyon, aşınım ve sürtünme tespitlerinin değerlendirilmesinde kullanılan bilgisayar görmesi teknolojileri uzman değerlendirmeleri ile karşılaştırıldığında örtüştüğü görülmektedir.

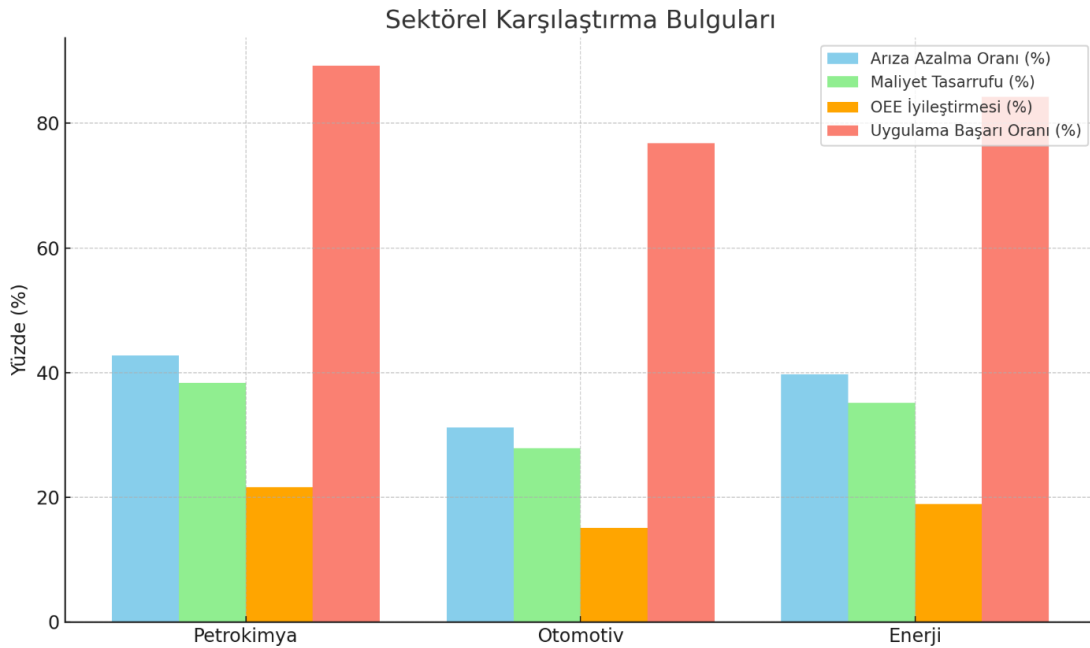


Şekil 8: Yapay Görme Sistemlerinin Uygulama Sonuçları

4.5. Sektörel Karşılaştırmalar

Petrokimya sektöründeki %42.8 arıza azalma oranının otomotiv sektöründeki %31.2'ye göre yüksek olması, sektörel karakteristiklerin teknoloji etkinliğinde belirleyici rolünü vurgulamaktadır (Müller et al., 2018). Petrokimya sektöründe sürekli üretim süreçlerinin yaygınlığı, sensör verilerinin daha düzenli ve öngörülebilir örüntüler göstermesine, dolayısıyla algoritmaların daha yüksek doğrulukla çalışmasına imkân sağlamaktadır.

Otomotiv sektöründeki görece düşük performans, üretim hatlarındaki yüksek çeşitlilik, kısa ürün yaşam döngüleri ve değişken operasyonel koşullar ile ilişkilendirilebilir (Frank et al., 2019). Bu bulgu, dijital bakım stratejilerinin sektörel özelleştirme gerektirdiğini ve tek tip yaklaşımının yetersiz olduğunu göstermektedir.



Şekil 9: Sektörel Karşılaştırma Bulguları

5. Tartışma

5.1. Dijital Dönüşümün Bakım Süreçlerine Etkileri

Bu araştırmanın bulguları, dijital bakım teknolojilerinin geleneksel bakım yaklaşımlarını köklü bir şekilde dönüştürdüğünü ortaya koymaktadır. Elde edilen %37.2'lik arıza azalma oranı, literatürde yer alan benzer çalışmalar ile uyumludur ve Thompson ve Rodriguez (2024) tarafından bildirilen %35-40 aralığı ile örtüşmektedir. Bu tutarlılık, dijital bakım teknolojilerinin etkinliğinin sektör ve coğrafya genelinde genel geçer bir nitelik taşıdığını göstermektedir.

Dijitalleşme ile birlikte süreç yönetimlerinde kolaylıklar olması %67.4'lük hız iyileştirmesi ve %45.2'lik doğruluk artışı, yapay görme sistemlerinin yalnızca otomasyon sağlamadığını, aynı zamanda insan kapasitesinin ötesinde performans sunduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen yüksek doğruluk oranları çatlak tespit doğruluğu ile çalışmalarda yüksek hassasiyet değerinin örtüşmesi, teknolojinin olgunluğa ulaştığını göstermektedir.

Dijital dönüşüm ve dijitalleşme, günümüz endüstriyel ekonomilerinin en kritik unsurlarından biri haline gelmiştir. İşletmeler için yalnızca teknolojik bir yenilik değil, aynı zamanda sürdürülebilir rekabet avantajı sağlayan stratejik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Üretimden bakım süreçlerine kadar her alanda dijitalleşme; verimlilik artışı, maliyet optimizasyonu, izlenebilirlik ve karar destek mekanizmalarında hız ve verim kazandırmaktadır. Dijital dönüşüm sayesinde verilerin doğru ve anlık analiz edilmesi mümkün olmakta, öngörülü bakım ve yapay zekâ tabanlı çözümlerle arıza riskleri minimize edilmektedir. Bu bağlamda dijitalleşme, modern endüstrinin sadece bugünkü ihtiyaçlarını değil, gelecekteki sürdürülebilirlik hedeflerini de karşılayacak temel yapı taşısıdır.

5.2. Uygulama Zorlukları ve Örgütsel Değişim

Veri kalitesi sorunlarının %73.3 işletmede yaşanması, dijital dönüşümün teknolojik boyutunun yanında, veri yönetimi kapasitesi gerektirdiğini göstermektedir.

Personel eğitimi ihtiyacının %80 işletmede yaşanması, teknolojik dönüşümün beşeri sermaye boyutunun göz ardı edilemeyeceğini göstermektedir. Geleneksel bakım teknisyenlerinin veri analisti ve teknoloji uzmanı rollerine adaptasyonu, organizasyonel dönüşümün en kritik bileşenlerinden biridir. Teknolojik değişime karşı direncin yaşanması, personellere verilecek olan eğitimler, operatörlerin dikkat etmesi gereken durumlara karşı alınan reaksiyonlar şirketlerin dijital dönüşümde ki evrimleşme sürelerini belirlemede kritik öneme sahiptir. Üst yönetim desteğinin %100 başarılı uygulamalarda mevcut olması, dijital bakım projelerinin stratejik liderlik gerektirdiğini ve operasyonel seviyede kalan girişimlerin başarısızlığa mahkûm olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, teknolojik dönüşümün kültürel bir değişim süreci olduğunu vurgulamaktadır.

5.3. Gelecek Teknolojiler

Araştırma bulgularının işaret ettiği gelecek trendler arasında, yapay zekâ, IoT ve robotik teknolojileri öne çıkmaktadır. Özellikle dijital ikiz teknolojisinin yaygınlaşması, bakım süreçlerinin tamamen dijital ortamda simüle edilebilmesi ve optimize edilebilmesi imkânını sunmaktadır.

Bulut bilişim teknolojilerinin gelişimi, gerçek zamanlı veri işleme kapasitesini artırarak, kritik ekipmanlarda milisaniye seviyesinde müdahale imkânı sağlayacaktır. Bu durum, dijitalleşme süreci içerisindeki tüm şirketler için güvenli ve kritik uygulamalarda devrim niteliğinde ilerlemeler yaratacağı düşünülmektedir.



6. Sonuçlar

Bu araştırma, dijitalleşme, veri analitiği ve yapay görme sistemlerinin modern bakım teknolojilerinde operasyonel etkinlik, teknolojik performans ve finansal getiri açısından önemli kazanımlar sağladığını göstermektedir. Stratejik olarak bu teknolojilerin benimsenmesi, artık rekabet gücü için zorunluluk hâline gelmiş olup, sektörel farklılıklar özel uygulama metodolojilerini gerektirmektedir. Başarılı dönüşüm için aşamalı uygulama, çapraz fonksiyonel ekipler ve güçlü veri yönetimi kritik öneme sahiptir; gelecekte ise uzun vadeli etkiler, sektörel dinamikler, insan-teknoloji etkileşimi ve siber güvenlik boyutlarının derinlemesine incelenmesi önerilmektedir.

Dijital bakım teknolojilerinin mevcut durumu, teknolojik olgunluğa ulaştığını ve yaygın uygulamaya hazır olduğunu göstermektedir. Veri analitiği ve yapay görme sistemlerinin entegrasyonu, bakım süreçlerinde paradigmatik bir dönüşüm yaratmış ve işletmelere önemli rekabet avantajları sağlamıştır.

Ancak başarılı uygulama, sadece teknolojik altyapının kurulmasını değil, organizasyonel kültürün dönüştürülmesini, insan kaynaklarının geliştirilmesini ve stratejik yaklaşımın benimsenmesini gerektirmektedir. Bu yaklaşımı benimseyen organizasyonlar, dijital dönüşümün tüm potansiyelinden yararlanabilecek ve gelecekte sürdürülebilir rekabet avantajı elde edebilecektir.

Sonuç olarak, dijitalleşme, veri analitiği ve yapay görme sistemleri, modern bakım teknolojilerinin ayrılmaz bileşenleri haline gelmiş ve bu teknolojilerin entegre uygulanması, 21. yüzyılın endüstriyel başarısının anahtarı olarak değerlendirilmektedir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu makale, Alindair Soğutma Sistemleri A.Ş. Bilgi Teknolojileri Müdürü ve ERP Uzman Yardımcısı tarafından hazırlanmıştır. Yazarlar, firmanın dijital dönüşüm sürecinde açık kaynak kodlu otomasyon sistemleri ve yapay zekâ tabanlı yazılım projelerinin geliştirilmesinde aktif olarak görev almışlardır. Çalışmada yer alan yazılımlar, firma bünyesinde geliştirilmiş, saha ortamında test edilmiş ve edilmeye devam etmektedir. Araştırmacılar, hem yazılım geliştirme süreçlerinde hem de saha testlerinden elde edilen verilerin sistematik biçimde toplanması, analiz edilmesi ve raporlanmasında etkin rol üstlenmişlerdir. Böylece, teorik altyapı ile pratik uygulamalar birleştirilerek çalışmanın bilimsel katkısı güçlendirilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde bizlere destek olarak değerli katkılar sunan Alindair Soğutma Sistemleri A.Ş.'ye teşekkür ederiz. Ayrıca, kongrede yapmış olduğumuz çalışmalarını sunma imkânı sağlayan Makina Mühendisleri Odası'na şükranlarımızı sunarız.

Dijitalleşmenin, modern bakım teknolojilerinde yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesine ve endüstriyel verimliliğin artırılmasına olan katkısının bilinciyle bu çalışmanın literatüre fayda sağlaması en büyük temennimizdir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Digital Transformation Institute. (2024). *Global digital transformation trends in manufacturing: 2024 annual report*. DTI Publications.

McKinsey Global Institute. (2023). *The age of artificial intelligence in manufacturing: Digital transformation challenges and opportunities*. McKinsey & Company.

Kumar et al., (2023) Predictive Maintenance for Industrial Equipments Using ML & DL <https://ieeexplore.ieee.org/document/10441714>

Eang, C., & Lee, S. (2025). Predictive Maintenance and Fault Detection for Motor Drive Control Systems in Industrial Robots Using CNN-RNN-Based Observers. *Sensors*, 25(1), 25.

Zhao, R., Yan, R., Chen, Z., Mao, K., Wang, P., & Gao, R. X. (2019). Deep learning and its applications to machine health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 115, 213-237

Noor, M. A. M., Yusof, N. M., Mohamed, A. R., & Mustapha, M. (2021). Computerized maintenance management system in IR4.0 adaptation – A state of implementation review and perspective. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1051(1), 012019.

Márquez, A. C. (2007). *The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance*. London: Springer London.

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3, 18-23.

Jardine, A. K., & Tsang, A. H. (2005). *Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications*. CRC press.

Ahmad, R., & Kamaruddin, S. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1), 135-149.

American Machinist. (2014). The evolution of affordability and accessibility in CMMS software. American Machinist. <https://www.americanmachinist.com/enterprise-data/article/21898450/the-evolution-of-affordability-and-accessibility-in-cmms-software>

Atha, D. J., & Jahanshahi, M. R. (2018). Evaluation of deep learning approaches based on convolutional neural networks for corrosion detection. *Structural Health Monitoring*, 17(5), 1110-1128.

Bagavathiappan, S., Lahiri, B. B., Saravanan, T., Philip, J., & Jayakumar, T. (2013). Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Physics & Technology*, 60, 35-55.

Bonilla, S. H., Silva, H. R., Terra da Silva, M., Franco Gonçalves, R., & Sacomano, J. B. (2018). Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and



challenges. Sustainability, 10(10), 3740.

Brightly Software. (2022). A history of maintenance & how CMMS has changed in 200+ years. Brightly. <https://www.brightlysoftware.com/blog/history-maintenance-how-cmms-has-changed-200-years>

Carvalho, T. P., Soares, F. A., Vita, R., Francisco, R. D. P., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. Computers & Industrial Engineering, 137, 106024.

FieldCircle. (2025). A brief history of CMMS and how it changed the maintenance management? FieldCircle. <https://www.fieldcircle.com/articles/history-of-cmms/>

Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. International Journal of Production Economics, 210, 15-26.

FTMaintenance. (2023). A brief history of CMMS software. FTMaintenance. <https://ftmaintenance.com/cmms/brief-history-cmms-software/>

Gao, Y., Mosalam, K. M., & Chen, Y. (2019). Deep transfer learning for image-based structural damage recognition. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 34(9), 748-768.

Gartner. (2024). Gartner says worldwide IoT enterprise installed base will reach 41 billion devices by 2027. Gartner Press Release. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-01-24-gartner-says-worldwide-iot-enterprise-installed-base>

GoAssetWorks. (n.d.). The future of the computerized maintenance management system (CMMS). GoAssetWorks. <https://www.goassetworks.com/blog/the-future-of-the-computerized-maintenance-management-system-cmms>

Grieves, M. (2014). Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. Digital Manufacturing, 1(1), 1-7.

Hashemian, H. M., & Bean, W. C. (2011). State-of-the-art predictive maintenance techniques. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 60(10), 3480-3492.

IBM. (2025). What is a CMMS? IBM Think. <https://www.ibm.com/think/topics/what-is-a-cmms>

Itefy. (2024). What is CMMS: Uses, benefits, examples, and how it works. Itefy Blog. <https://www.itefy.com/blog/post/what-is-cmms>

Jardine, A. K., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing, 20(7), 1483-1510.

Kane, G. C., Phillips, A. N., Copulsky, J. R., & Andrus, G. R. (2019). The technology fallacy: How people are the real key to digital transformation. MIT Press.

Kaushik, S. (2023). The history and evolution of CMMS. Medium. <https://medium.com/@suyashkaushik/the-history-and-evolution-of-cmms-b4c18881e0ca>

Müller, J. M., Kiel, D., & Voigt, K. I. (2018). What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. Sustainability, 10(1), 247.

Spencer Jr, B. F., Hoskere, V., & Narazaki, Y. (2019). Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring. Engineering, 5(2), 199-222.

Zhang, Y., Ren, S., Liu, Y., & Si, S. (2017). A big data analytics architecture for cleaner manufacturing and maintenance processes of complex products. Journal of Cleaner Production, 142, 626-641.

Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. Engineering, 3(5), 616-630.

Thompson, E., & Rodriguez, F. (2024). Strategic value creation through predictive maintenance: Framework development and empirical validation. Strategic Management Journal, 45(4), 1123–1145.



Meslek Yüksekokullarında İş Makineleri Bakım ve Onarım Eğitim Müfredatının Sektörel Gereksinimlerle Uyumunun İncelenmesi

Investigation of the Alignment Between Construction Equipment Maintenance and Repair Curricula at Vocational Schools of Higher Education and Sectoral Requirements

Öğr. Gör. Emine Özlem DENGİZ

Samsun Üniversitesi

e-posta: eoziem.dengiz@samsun.edu.tr

Özet

Meslek yüksekokullarında verilen teknik eğitim, mesleki yeterliliklerin artırılması ve sektörel beklentilerin karşılanabilmesi bakımından oldukça yüksek bir öneme sahiptir. MYO'lar müfredat ve sektörel beklentiler arasında köprü kuran ve uygulanabilir çıktılar sunabilecek nitelikte kapsamlı eğitim veren yükseköğretim birimleri konumundadır. Bu çalışma kapsamında MYO'lar bünyesinde iş makineleri operatörlüğü programı müfredatında yer alan iş makineleri bakım onarım derslerinin sektörel gereksinimler ile uyumu incelenmiştir. Bu kapsamda müfredatın sektörle örtüşmesi, bakım türleri ve sektörel beklentiler, teknik eğitimde uygulamalı öğrenmenin rolü konularında örnek ders incelemeleri yapılmış, müfredat analizi gerçekleştirilmiş, öğrenci/sanayi geri bildirimleri amacıyla anket ve görüşmeler ile sektörel ihtiyaçlar belirlenerek mevcut eksiklikler (ders içerikleri ve sahadaki beceri beklentileri arasındaki boşluk) saptanmıştır. Bu eksikliklerin giderilmesi amacıyla; müfredatta güncelleme yapılması gereken başlıca konular, yeni ders içerikleri ve laboratuvar uygulama önerileri, sektör-üniversite iş birliği modelleri gibi yeni eğitim uygulamaları ve modeller ortaya koyulmuş, bakım eğitiminde dijitalleşme, sensör teknolojileri ve kestirimci bakım uygulamaları gibi konuların önemi incelenmiştir. Özellikle iş makineleri gibi teknik donanım gerektiren bir alanda, bakım onarım eğitiminin niteliği, sektörle uyumu ve öğrenci yeterliliklerinin geliştirilmesi üzerine odaklanmak bu anlamda önemlidir. Elde edilen bulgular, teknik eğitimin sektör ihtiyaçlarıyla daha uyumlu hale getirilmesi yönünde önemli ipuçları sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Meslek yüksekokulu, İş makinesi, Mesleki eğitim, Teknik eğitim, Bakım onarım

Abstract

Technical education provided at vocational schools of higher education (VSHEs) holds significant importance for enhancing professional competencies and meeting sectoral expectations. VSHEs serve as higher education units offering comprehensive education that bridges the gap between curricula and industry needs, delivering practical and applicable outcomes. Within the scope of this study, the alignment of construction equipment maintenance and repair courses, included in the curriculum of construction equipment operation programs at VSHEs, with sectoral requirements was examined. In this context, sample course analyses were conducted regarding curriculum-industry alignment, types of maintenance, sectoral expectations, and the role of hands-on learning in technical education. A curriculum analysis was carried out, and sectoral needs were identified through surveys and interviews designed to collect feedback from students and industry representatives. Consequently, existing deficiencies—namely, the gaps between course contents and the practical skills expected in the field—were determined. To address these deficiencies, key topics requiring curriculum updates, proposals for new course contents and laboratory applications, and new educational practices such as university-industry cooperation models were developed. Additionally, the importance of subjects like digitalization in maintenance training, sensor technologies, and predictive maintenance practices was explored. Especially in a field that requires technical equipment, such as construction machinery, focusing on the quality of maintenance and repair education, its alignment with industry standards, and the enhancement of student competencies is of paramount importance. The findings provide significant insights for aligning technical education more closely with the needs of the industry.

Keywords: Vocational school of higher education, Construction equipment, Vocational training, Technical education, Maintenance and repair.



1. Giriş

Günümüz endüstriyel üretim süreçlerinde teknolojik dönüşüm, dijitalleşme ve otomasyonun hızla yaygınlaşması, nitelikli teknik iş gücüne olan ihtiyacı her geçen gün artırmaktadır. Bu noktada Meslek Yüksekokulları (MYO'lar), sanayi, üretim ve hizmet sektörlerinin gereksinim duyduğu uygulama becerileri yüksek teknik elemanların yetiştirilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Türkiye'nin mevcut iş gücü piyasası verileri incelendiğinde, teknik alanlarda çalışanların önemli bir kısmını MYO mezunlarının oluşturduğu görülmektedir. Bu durum, MYO'ların, özellikle bakım-onarım, otomasyon ve üretim teknolojileri gibi yoğun teknik bilgi gerektiren alanlarda sektöre sağladığı katkının önemini açıkça ortaya koymaktadır (YÖK Atlas, 2024; TÜİK, 2024).

MYO'larda verilen teknik eğitim, yalnızca teorik bilgi aktarımıyla sınırlı olmayıp, uygulamalı laboratuvar çalışmaları, saha uygulamaları, atölye eğitimi ve staj süreçleriyle desteklenmektedir. Bu sayede öğrenciler, mezuniyet sonrasında sektörde karşılaşacakları teknolojiler ve süreçler konusunda deneyim kazanmakta ve iş hayatına daha kısa sürede uyum sağlayabilmektedir. Özellikle İş Makineleri Operatörlüğü Programları, müfredatlarında yer alan bakım-onarım, hidrolik-pnömatik sistemler, motor teknolojisi, iş sağlığı ve güvenliği, dijital bakım sistemleri ve sensör teknolojileri gibi dersler aracılığıyla öğrencilerin sektörel gereksinimlere uygun yetkinlikler kazanmasını amaçlamaktadır. Böylece MYO'lar, sektörde doğrudan istihdam yaratabilen ve üretim süreçlerine katma değer sağlayabilen teknik personelin yetişmesine öncülük etmektedir (MEB, 2022).

Türkiye'de sanayi ve hizmet sektörlerinde faaliyet gösteren işletmelerin %67'si nitelikli ara eleman ihtiyacının karşılanmasında güçlük yaşadığını belirtmektedir. TÜİK'in 2023 yılı Hanehalkı İşgücü İstatistikleri'ne göre, iş gücüne katılım oranı teknik eğitim almış bireylerde daha yüksek seyretmekte, ancak mesleki uyumsuzluk ve nitelik yetersizliği sorunları devam etmektedir. Bu durum, meslek yüksekokullarının müfredatlarının sektörel dönüşüme duyarlı şekilde güncellenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır (TÜİK, 2023). Sanayi sektörü temsilcilerinin %72'si, işe alım sürecinde en büyük problemin uygun teknik bilgi ve beceriye sahip personel bulamamak olduğunu belirtmektedir (İŞKUR, 2023).

Ayrıca, Endüstri 4.0 ile birlikte akıllı üretim teknolojilerinin, kestirimci bakım uygulamalarının, veri tabanlı izleme sistemlerinin ve nesnelerin interneti (IoT) tabanlı çözümlerin hızla yaygınlaşması, MYO'ların teknik eğitim müfredatlarının güncellenmesini zorunlu kılmıştır. Sektörle entegre çalışan kurumlar, dijitalleşme ve akıllı bakım teknolojilerini müfredatlarına entegre ederek öğrencilerin teknolojik adaptasyon kabiliyetlerini güçlendirmekte ve sektördeki rekabet gücünü artırmaktadır [ISO, 2023]. Bu bağlamda, üniversite-sanayi iş birliği modelleri de öne çıkmakta; işletmede mesleki eğitim, saha uygulamaları ve ortak projeler yoluyla öğrencilerin hem teknik bilgi hem de uygulama deneyimi kazanmaları sağlanmaktadır.

Ancak yapılan incelemeler, Meslek Yüksekokullarının (MYO) mevcut müfredatlarının bu hızlı dönüşümü tam anlamıyla yakalayamadığını göstermektedir. Özellikle İş Makineleri Operatörlüğü Programı çerçevesinde verilen bakım-onarım derslerinin içerikleri, sektörün talep ettiği yeni nesil teknik becerilerle tam olarak örtüşmemektedir. Sensör teknolojileri, IoT tabanlı kestirimci bakım sistemleri ve dijital izleme uygulamaları sektörde yaygın olarak kullanılmasına rağmen, bu konular çoğu MYO müfredatında yeterince işlenmemektedir. Sektör, öğrencilerin sahada doğrudan uygulamalı deneyim kazanmasını talep ederken, birçok MYO'da saha uygulamaları ve simülasyon destekli laboratuvar çalışmaları sınırlı kalmaktadır. Farklı üniversitelerdeki

müfredatlar arasında ciddi farklılıklar bulunmaktadır. Bazı MYO'lar Endüstri 4.0 odaklı dersler eklerken, diğerlerinde hâlen geleneksel bakım-onarım yaklaşımı sürdürülmektedir.

Bu kapsamda üniversite ve sektör arasında yaşanan uyum problemleri birtakım olumsuzluklara yol açmaktadır. Mezunların sahip olduğu beceriler ile işverenlerin talep ettiği beceriler arasındaki fark, iş gücü piyasasında beceri uyumsuzluğu sorununa yol açmaktadır. Yeni teknolojilere yeterince hâkim olmayan mezunlar, özellikle yüksek otomasyonlu iş makinelerinde bakım-onarım süreçlerinde verimlilik sorunları yaşamaktadır. Müfredatların sektör beklentileriyle uyumlu olmaması, üniversite-sanayi iş birliğinin zayıflamasına ve mezunların sektörde yeterince tercih edilmemesine neden olmaktadır.

Sonuç olarak, Meslek Yüksekokullarında verilen teknik eğitim, sektörün nitelikli iş gücü ihtiyacını karşılamak, teknolojik dönüşüme uyum sağlamak ve üretim süreçlerinin verimliliğini artırmak açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, MYO'larda İş Makineleri Operatörlüğü Programı kapsamında verilen bakım-onarım derslerinin sektörel gereksinimlerle uyumu incelenmiş, mevcut durum analiz edilerek müfredatların sektörel beklentilere yanıt verebilme düzeyi değerlendirilmiştir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

İş makineleri operatörlüğü, günümüz inşaat, altyapı ve madencilik gibi kritik sektörlerin omurgasını oluşturan bir meslektir. Örneğin, ABD işgücü piyasası verilerine göre, inşaat ekipmanı operatörlerinin iş hacmi önümüzdeki on yılda yaklaşık %4 oranında artış gösterecektir ve yılda ortalama 46.000 yeni pozisyon açılması beklenmektedir (Bureau of Labor Statistics, 2025; My Future, 2025). Bu artan talebi yönlendiren ana faktörlerden biri, küresel inşaat sektörünün yıllık 10,8 trilyon dolarlık büyüklüğe ulaşması ve dünya genelinde istihdamın yaklaşık %7'sini barındırmasıdır (Wikipedia, 2025). İnşaat sektörü de iş makinesi operatörlüğü alanını doğrudan veya dolaylı olarak kapsamaktadır. 2020 verilerine göre bu sektör Türkiye ekonomisinin yaklaşık %5.4'ünü teşkil etmekte ve doğrudan 1,5 milyon kişi istihdam etmektedir. Sektörün payı, tedarik zincirleriyle birlikte düşünüldüğünde değeri %30'a kadar çıkmaktadır (ERI, 2025). Bu durumda, iş makineleri operatörlerinin sektördeki istihdam payı ve ekonomik etkisi açıkça ortadadır. Türkiye gibi hızla büyüyen ekonomilerde iş makineleri operatörlerinin teknik bilgi birikimi, sahada verimlilik ve güvenlik sağlayan rolleri nedeniyle eğitimlerinin önemi daha da artmaktadır. İş makineleri operatörlüğüne yönelik eğitim anlayışı, teknoloji temelli yenilikler ve artan güvenlik, verimlilik ve yetkinlik beklentileri doğrultusunda hızla evrilmektedir. Geleneksel uygulamalı eğitim modelleri, dijital araçlar ve pedagojik kuramlarla tamamlanarak yüksek riskli çalışma ortamlarına hazırlıkta daha sistematik ve güvenli çözümler sunmaktadır (Wang vd. 2007; Wang vd. 2018).

Türkiye'de 2025 yılı itibarıyla İş Makineleri Operatörlüğü Programı kapsamında eğitim öğretim faaliyetlerini sürdüren yedi meslek yüksekokulu bulunmaktadır. Bu okullar aşağıda program açılış yıllarına göre listelenmiştir. Şekil 1'de ise bu okulların bulunduğu şehirler Türkiye haritası üzerinde işaretlenmiştir. Haritaya göre ülkenin yalnızca sınırlı bazı bölgelerinde bu program bulunmakta ve alanında uzman teknik personel ihtiyacını karşılamaya çalışmaktadır.

- 1 Dokuz Eylül Üniversitesi – Bergama MYO (2012)
- 2 Samsun Üniversitesi – Kavak MYO (2014)
- 3 Malatya Turgut Özal Üniversitesi – Arapgir MYO (2019)
- 4 Bayburt Üniversitesi – Demirözü MYO (2019)
- 5 Kastamonu Üniversitesi – Küre MYO (2022)
- 6 Afyon Kocatepe Üniversitesi – İscehisar MYO (2024)
- 7 Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi – Keçiborlu MYO (2025)



Şekil 1. Türkiye’de İş Makineleri Operatörlüğü Programı bulunan iller

İş makineleri operatörlüğü, sürdürülebilir ekonomik büyüme ve altyapı projeleri için kritik bir meslektir. Türkiye’de sektörün bu ihtiyacını karşılamak üzere yedi farklı MYO bünyesinde İş Makineleri Operatörlüğü programı aktif olarak faaliyetlerini sürdürmektedir. 2025-2026 eğitim yılı itibariyle bu programlara yerleşen toplam öğrenci sayısı 242’dir (YÖK Atlas, 2025). Ancak bunların her yıl ortalama %40’ı mezun olmaktadır. Çalışma kapsamında bu programların müfredat bilgileri, staj faaliyetleri, sanayi ile ilişkileri ve gelişen teknolojiye uyumları gibi kriterler kapsamında detaylı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Uygulanan eğitim öğretim süreçlerinin sektörel ihtiyacı nasıl ve ne derecede karşıladığı irdelenmiştir.

Dokuz Eylül Üniversitesi’nin Bergama Meslek Yüksekokulu bünyesinde sunulan “İş Makineleri Operatörlüğü” önlisans programı, 2015–2016 eğitim-öğretim yılında açılmış olup, eğitim dili tamamen Türkçe, toplam AKTS yükü ise 120’dir. Programda başarıyla tamamlanan teorik ve uygulamalı derslerin yanı sıra 40 işgünü süren staj şartı da bulunmaktadır. Müfredat bakımından, program profili “hedeflenen öğrenme çıktıları ve becerilerin sistematik kazanımı” açısından Bologna Süreci çerçevesinde sürekli güncellenmektedir. Ayrıca Dikey Geçiş Sınavı (DGS) ile Makine, Otomotiv veya Tarım Makineleri Mühendisliği lisans programlarına geçiş imkânı sağlaması, mezuniyet sonrasında akademik ilerleme açısından önemli bir avantaj sunar. Eğitim programını VR destekli simülasyon laboratuvarı ve mini ekskavatör uygulamalarıyla desteklemekte, ayrıca 14 haftalık sahada uygulamalı eğitim imkânı sunmaktadır. Genel olarak eğitim süresi, staj olanağı ve güncelliğe verilen önem bakımından güçlü bir yapısı vardır (Bergama MYO, 2025).

Samsun Üniversitesi'ne bağlı Kavak Meslek Yüksekokulunun “İş Makineleri Operatörlüğü” programı da Türkçe dilinde ve 2 yıllık (maksimum 4 yıl) örgün eğitim modeline sahiptir. Eğitim modeli içinde «3+1 işletmede mesleki eğitim» ve 30 işgünü staj zorunluluğu yer alır; mezuniyetle “İş Makineleri Operatörü” unvanı verilir. 2023 yıl müfredatına ait detaylarda, matematik, motor teknolojisi, iş makineleri, otomotiv elektriği ve elektronik, hidrolik-pnömatik, iş makineleri bakım-onarım derslerinin yer aldığı görülmekte; ayrıca seçmeli ders havuzlarında fabrika organizasyonu, servis donanımları, kalite-güvence, bilgisayar destekli çizim gibi teknik ve mesleğe özgü tamamlayıcı içeriklere yer verilmiştir. Bu yapı, teknik bilgi ile uygulamalı beceriler arasında iyi bir denge kurar. Staj ve saha eğitimi entegrasyonu, mezunların sahaya daha hazırlıklı çıkmasını destekler (Kavak MYO, 2025).

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi – Keçiborlu MYO’nun İş Makineleri Operatörlüğü programı, uygulamalı eğitim içeriği ve staj süreçleriyle sektörel ihtiyaçlara cevap vermeyi hedefleyen bir yapıya sahiptir. Bölüm, sahada deneyim kazandıran atölye/saha uygulamaları ve işletmede mesleki eğitim modellerini benimsemektedir (Keçiborlu MYO, 2025). Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Keçiborlu MYO bünyesindeki “İş Makineleri Operatörlüğü” programı 2025 yılında kurulmuş olup, 2025–2026 akademik yılında eğitim-öğretime başlamıştır. Bu program, diğer programlara benzer şekilde staj ve uygulamalı eğitim unsurları içermeye potansiyeline sahip olmakla birlikte, henüz detaylı müfredat, staj süreleri veya sektör iş birliği verileri üniversitenin yayımlanmış kaynaklarında bulunmamaktadır.

Afyon Kocatepe Üniversitesi – İncehisar MYO’nun İş Makineleri Operatörlüğü Programı 2010–2011 eğitim-öğretim yılında başlatılmıştır ve 35 kişilik bir öğrenci kontenjanına sahiptir. Programın temel amacı, özellikle bölgedeki doğaltaş sektöründeki iş makinelerinin yoğun kullanımına yanıt verebilecek nitelikli teknikerler yetiştirmektir. Mezunlar iş makinelerinin kullanımı, bakım ve onarımı, proje uygulamaları, kalite yönetimi ve makine imalatında aktif rol alabilecek donanımda eğitim almaktadır. Sektörde bakım ve bağlantılı alanlarda iş makineleri imalatı, montajı ve bakımını gerçekleştirebilecek teknikerler yetiştirmek, kalite yönetim sistemlerini uygulayabilecek personel yetiştirmek ve bunun yanı sıra TemsaKomatsu A.Ş., Afyonkarahisar Sanayi ve Ticaret Odası, Demireller Makine ve diğer yerel firmalarla iş birliği içinde sektör odaklı istihdam fırsatları sunmak programın amaçlarından. Bu amaçlar, programın sektörün iş gücü ihtiyaçlarıyla uyumlu şekilde yapılandırıldığını gösterse de, ders müfredatının içerik tabanlı standardizasyonu konusunda bilgi eksikleri bulunmaktadır (İncehisar MYO, 2025).

Malatya Turgut Özal Üniversitesi bünyesindeki Arapgir Meslek Yüksekokulu’nda yer alan İş Makineleri Operatörlüğü Programı, 2019 yılında eğitim-öğretime başlamıştır. Programın temel amacı, bölgesel kalkınmaya katkı sağlayacak şekilde, inşaat, maden ve tarım sektörlerinde iş makinelerinin etkin ve güvenli kullanımını sağlayabilecek nitelikli operatörler yetiştirmektir. Ders içeriğinde motor teknolojileri, iş makineleri türleri, bakım-onarım teknikleri, hidrolik-pnömatik sistemler gibi teknik derslerin yanı sıra, mesleki güvenlik, çevre bilinci ve temel mühendislik bilgileri de bulunmaktadır. Program, 30 işgünü zorunlu staj ve uygulamalı eğitim modülleriyle desteklenmiştir. Bölgedeki kamu kurumları ve özel sektörle yapılan iş birlikleri sayesinde, öğrencilere işletmede eğitim ve mezuniyet sonrası istihdam olanakları da sağlanmaktadır (Arapgir MYO, 2025).

Demirözü Meslek Yüksekokulu çatısı altında 2019 yılında açılan İş Makineleri Operatörlüğü



Programı, Bayburt Üniversitesi'nin uygulamaya dayalı teknik eğitim vizyonuna paralel olarak yapılandırılmıştır. Programda verilen eğitim, teorik bilgilerin yanı sıra iş makineleri kullanımı, bakım-onarım ve arıza teşhis gibi sahada kritik öneme sahip uygulamaları da kapsamaktadır. 3+1 işletmede mesleki eğitim modeli ve 30 işgünü staj uygulaması, mezunların doğrudan sektöre entegre olmasını kolaylaştırmaktadır. Müfredatta temel mühendislik derslerinin yanı sıra, iş güvenliği, kalite yönetimi, mekanik sistemler, dizel motorlar ve ağır ekipman teknolojileri gibi konulara da yer verilmiştir. Program, bölgenin inşaat ve altyapı yatırımlarındaki operatör ihtiyacına doğrudan yanıt verebilecek donanımda bireyler yetiştirmeyi amaçlamaktadır (Demiröz MYO, 2025).

Küre Meslek Yüksekokulu bünyesinde 2022 yılında kurulan İş Makineleri Operatörlüğü Programı, Kastamonu Üniversitesi'nin kırsal kalkınma ve bölgesel ihtiyaçlara yönelik stratejik hedeflerine hizmet eden yeni nesil bir uygulamalı eğitim modelini benimsemiştir. Program müfredatı; ağır iş makinelerinin yapısı, güç sistemleri, kontrol teknolojileri, arıza tespiti ve önleyici bakım gibi teknik içeriklerin yanı sıra, temel iş sağlığı ve güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve dijital bakım sistemleri gibi güncel konuları da içermektedir. Eğitimin sahaya uyumlu olması adına atölye dersleri ve simülasyon destekli uygulamalar programın önemli bileşenlerindendir. Henüz ilk mezunlarını vermemiş olan program, ilerleyen süreçte bölge sanayisi ve kamu kurumlarıyla yapılacak iş birlikleriyle daha güçlü bir yapıya kavuşmayı hedeflemektedir (Küre MYO, 2025).

Uluslararası düzeyde iyi uygulama örnekleri ise hem mesleki becerilerin sektördeki karşılığını belirlemek, hem de sektörün ihtiyaç duyduğu nitelikli elemanı doğru şekilde yetiştirmek için oldukça önemlidir. Bu kapsamda dünyadan birtakım uygulamalar irdelenmiştir.

National Center for Construction Education & Research (NCCER), 1996 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde kurulmuş olan bağımsız, kâr amacı gütmeyen bir eğitim kuruluşudur. Başlangıcı, 11 önde gelen inşaat şirketinin mesleki eğitim alanında standart bir müfredat ve tanınan yeterlilik belgeleri oluşturma ihtiyacıyla bir araya gelmesiyle atılmıştır. İnşaat ve bakım alanlarında 40'tan fazla zanaat dalında modüler müfredatlar geliştirir. Bu müfredatlar hem yeni başlayanlar hem de deneyimli teknik profesyoneller için akademik ve performans bazlı değerlendirme modülleri içerir. Geleceğin teknik işgücünü nitelikli hale getirmek için sektöre dayalı ve geçerli eğitim çözümleri sunmak amacıyla ağır iş makineleri operatörlüğü için modüler bir eğitim programı sunmaktadır. Müfredat, üç seviyeye ayrılmıştır ve toplam 530 saatlik yapılandırılmış içerik içerir (NCCER, 2025). Konular arasında iş makineleri terminolojisi, güvenlik, ön hazırlık kontrolleri, drenaj ve saha planlama, ayrıca GPS/GNSS teknolojileri yer alır. NCCER, simülatör eğitime dayalı akreditasyonlar da sunar; Caterpillar'ın simülatörleri ile gerçekçi ve taşınabilir eğitim deneyimi sağlanmaktadır. Süreç sonunda yazılı bilgi testi (journey-level knowledge assessment) ve performans doğrulamasını (performance evaluation) içeren iki aşamalı yapı kullanılarak sertifikasyon uygulanır. Kuruluş kullandığı eğitim ve sektör ilişkisi modelleriyle iyi uygulama örneği olarak ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda;

- 1.000'i aşkın akredite eğitim ve değerlendirme merkezi aracılığıyla faaliyet göstermektedir.
- Modüler yapı sayesinde lise – uygulamalı eğitim – ustalık düzeyi kariyer basamaklarını destekler.

- Başlangıcından itibaren inşaat sektörü kuruluşları ile güçlü ortaklıklar kurmuş; kapsamlı bir sözleşmeye dayalı eğitim ve finansman modeli (NTSA) ile desteklenmiştir (STI, 2025).
- Lise ve üniversite düzeyinde eğitim kurumlarıyla iş birliği yaparak öğrencilerin kariyer geçişlerini kolaylaştırır. Örneğin, bazı üniversiteler NCCER sertifikalarını teknik seçmeli kredilere dönüştürür.

Community college (toplum kolejleri) ve teknik okullar, ABD genelinde iş makineleri operatörlüğü eğitimi sunan başlıca kurumlardır. Bu programlar, kısa süreli sertifika programlarından iki yıllık Associate (Önlisans) derecelere kadar uzanır ve doğrudan sektöre yönelik teknik beceri kazandırmayı hedefler. Bir-iki yıllık sertifikasyon programları sunar ve NCCER müfredatını temel alır. Motor, grader, dozer, ekskavatör, backhoe ve diğer makinelerin kullanımıyla pratik eğitim desteklenir (FHTNC, 2025). Program, bakım, hidrolik, pnömatik ve motor teknolojisi gibi temel sistemlerin yanı sıra arazi hazırlığı, kazı ve dolgu gibi işlevsel operasyon becerilerini içerir. Aynı zamanda makinelerin işletimi ve çizim okuma gibi becerileri kapsıyor. Bazı okullar (örneğin TCAT Elizabethton) simülasyon odaklı eğitimlere yer verir; öğrenciler mini ekskavatör ve wheel loader gibi makinelerde laboratuvar destekli uygulamalar yapar (TCAT, 2025).

International Union of Operating Engineers (IUOE) – ABD, mesleki eğitimler 3–4 yıllık çıraklık sistemleri şeklindedir; saha ve sınıf eğitimi entegre edilmiştir. Eğitim merkezlerinde kran, ekskavatör, grader gibi ekipmanlar için simülatörler bulunmaktadır; bu sayede teknoloji adaptasyonu sağlanmakta ve sürekli mesleki gelişim desteklenmektedir. Teksas’ta yer alan ITEC (International Training & Education Center), 265 dönümlük alanı, simülatörler, drone eğitim, otomasyon sistemleri içeren modern laboratuvarlar ve eğitim sahalarının bulunduğu devasa bir merkezdir (IUOE, 2025). Caterpillar, John Deere, Komatsu, Lincoln Electric gibi teknoloji ve teçhizat firmalarıyla birlikte çalışarak ileri teknoloji entegrasyonunu destekler.

IUOE’nin sendikal yapıya entegre eğitim modeli, hem ulusal meslek standartlarını hem de iş güvenliği sertifikasyonlarını kapsayarak güçlü bir sektörel tanınırlık sağlar. Türkiye’de bu tür bir sendikal bağlantı yok denecek kadar sınırlıdır ve eğitim sonrası istihdam, çoğunlukla bireysel çabalar veya yerel girişimlerle yürütülmektedir.

Kanada – Southern Alberta Institute of Technology (SAIT), Transport & Heavy Equipment Technology Calgary’de kurulmuş bir teknik-politeknik enstitüdür. SAIT adıyla sunulan iki yıllık programlar, araç teşhisi, kurulum ve bakım-onarım becerileri üzerine yoğunlaşmaktadır (SAIT, 2025). Günümüzde 110’un üzerinde kariyer programı sunan SAIT; yaklaşık 18.400 tam zamanlı öğrenciye eğitim verirken, 1.269 akademik personel ve çok sayıda uygulama altyapısı ile dikkat çekmektedir. Program, 2 yıl (60 kredi / 19 ders) süren bir önlisans diplomasıdır. Teorik dersler, laboratuvar uygulamaları ve isteğe bağlı “Work-Integrated Learning (WIL)” yani iş yerinde entegrasyon modülü içerir. Mekanik ve elektronik sistemler, arıza teşhisi yetkinliği ve iletişim becerileri gibi multidisipliner kazanımlar sunar. İsteğe bağlı iş yerinde eğitim modülü, mezunların sektöre adaptasyonunu hızlandırır. SAIT, öğretim, uygulama ve endüstri entegrasyonunu başarılı şekilde sağlamakta; MYO’lara yönelik güncelleme modelleri için güçlü bir referans teşkil etmektedir.



Bu uygulama, Türkiye’deki iş makineleri operatörlüğü programları ile karşılaştırıldığında, sektöre doğrudan geçişi teşvik eden modüler ve uygulama ağırlıklı yapısıyla dikkat çekmektedir. Türkiye’de ise benzer bir yapı Samsun Üniversitesi veya Dokuz Eylül Üniversitesi’nde yer alan sahada uygulamalı eğitimlerle kısmen sağlanmaktadır; ancak mezuniyet sonrası işe yerleşim oranlarına dair sistematik bir takip mekanizması mevcut değildir.

Midlands Technical College, Güney Karolina eyaletinin Midlands bölgesinde yer alan bir halk kolejidir. Toplum temelli, teknik ve mesleki eğitim misyonu doğrultusunda, iş makineleri operatörlüğüne yönelik çeşitli eğitim programları sunar. Bu programlar, özellikle inşaat, altyapı, kamu hizmetleri ve taşımacılık gibi kritik sektörler için kalifiye operatörler yetiştirmeyi hedeflemektedir. Caterpillar simülatörleri kullanılarak, operatörlere güvenli bir ortamda eğitimi sağlayan 300 saatlik kapsamlı bir program sunar (MTC, 2025). Katılımcılar, Caterpillar’ın ileri simülatörleri aracılığıyla güvenlik ve bakım kontrolleri, temel operasyon becerileri ve sınıf dışı risk içermeyen uygulamalar üzerine eğitim alırlar ve böylece hem pratik deneyim kazanırken hem de gerçek makinelerin iş sahasında çalışmaya devam etmesi sağlanır. MTC, Truist Foundation tarafından desteklenen ve 700.000 \$ değerindeki hibeyle finanse edilen bir proje kapsamında eğitimlerini mobil simülatör üniteleriyle genişletti. Bu sayede simülatör destekli Heavy Equipment Operator programı, yüksek talep olan ancak erişimi sınırlı bölgelerde gezici şekilde sunulabilmektedir. Eğitimlerdeki simülatör kullanımı, öğrencinin hem maliyeti düşürür hem de gerçek ekipmanı sahada çalışır durumda bırakır.

Louisiana Cat, Caterpillar markalı ağır iş makineleri için kapsamlı eğitim hizmetleri sunan bir uzman merkezidir. Katılımcılarına hem fiziksel hem de simülasyon tabanlı eğitimlerle güvenli, verimli ve güvenilir operatörlük becerileri kazandırmayı hedefler. Mobil ve sabit simülatörlerle “Virtual Training” çözümleri sunar; maliyet düşürme, ekipman yıpratmasını azaltma ve esneklik ön plandadır (Louisiana Cat, 2025). Louisiana Cat, özellikle simülasyon temelli pratik eğitimlerle:

- Operatör güvenliğini sağlama,
- Eğitim maliyetlerini optimize etme,
- Gerçek saha ekipmanlarının kullanılabilirliğini koruma,
- Operatör verimliliğini artırma gibi çok yönlü başarı sağlar.

Bu model, MYO’larda iş makineleri operatörlüğü eğitimi yaparken simülasyon ve seviye temelli sertifikasyon sistemlerini entegre etme adına güçlü bir referans teşkil eder.

Miami Lakes Educational Center and Technical College, Miami-Dade İlçe Kamu Okulları’na bağlı olup, “Technical College” statüsüyle Commission of the Council on Occupational Education tarafından akredite edilmiş bir meslekî eğitim kurumudur gibi programlar, makine kullanımının yanında iletişim, liderlik, güvenlik gibi insana yönelik yeterlilikleri de eğitime entegre ederek kapsamı genişletmektedir (MLECTC, 2025). Teorik ve uygulamalı kombinasyon sayesinde kazı, hafriyat, dereceleme, sırt doldurma, temizleme ve ekipman bakımı gibi operasyonel beceriler geliştirilir. Yüksek pratik ağırlıklı eğitim süresi ve modüler yapı ile kazanım odaklı esneklik

sağlar. Yayınlanan veriler ışığında, MLECTC modeli, Meslek Yüksekokulları için uygulanabilir bir iyi uygulama örneği teşkil edebilir; özellikle, kısa süreli, modüler, sektör sertifikasyonuna odaklı ve hızlı istihdam odaklı programlar geliştirme bağlamında referans oluşturabilir.

Eğitim kurumlarının uygulama örneklerinin yanı sıra, bazı teknolojik ürünlerin eğitime entegrasyonu sayesinde ağır iş alanlarında çalışan operatörlerin eğitimi için kullanılan ürün ve yazılımlar mevcuttur. Bunlar VR tabanlı yazılımlar ve simülatörler gibi uygulamalardır. Bunlara Türkiye'deki MYO'lerden hariç dünyadan örnekler de verilebilir.

Virtual Maintenance Training (VMT) – Uluslararası Perspektif, VMT, tehlikeli veya erişimi zor araçların bakım ve onarım süreçlerini 3D simülasyon ortamında öğretir. Askeri ve sivil alanlarda uygulanan bu metodoloji, gerçek ekipman kullanımı olmaksızın etkili beceri geliştirmeye olanak tanır. Örneğin, otomobil motor parçalarının sökölüp takılması süreçlerini VR üzerinden öğretmek için geliştirilen eğitim sistemleri bulunmaktadır (Xiong, 2022).

Simlog Personal Simulators: Global çapta ağır iş makineleri operatörü yetiştirme alanında PC tabanlı simülasyon çözümleri geliştirmek üzere kurulmuştur. Forklift, ekskavatör ve buldozer eğitimlerinde kullanılan simülatör sistemleriyle pratik ve uygun maliyetli eğitim fırsatları sunmaktadır. İş makineleri operatörlüğü eğitimi alanında kullanılan simülasyon sistemleri arasında Simlog Personal Simulators dışında birçok öne çıkan teknoloji sağlayıcısı mevcuttur. CM Labs Simulations, geliştirdiği Vortex Studio platformu sayesinde gerçek zamanlı fizik motorlarıyla yüksek doğrulukta vinç, ekskavatör ve liman ekipmanları simülasyonları sunar. Cat Simulators, Simformotion iş birliğiyle, Caterpillar marka makinelerin birebir kontrol sistemlerini içeren donanımlar ve *SimScholars* adlı bütünsel müfredatla eğitim sunarak sektöre doğrudan entegre çözümler sağlar. Volvo Simulators ise kullanıcı güvenliği ve ekipman verimliliğini artırmak amacıyla sürüş ve saha uygulamaları için geliştirilmiş simülasyon sistemleriyle dikkat çeker. Mevea Training Simulators, özellikle inşaat ekipmanlarının dijital ikizlerini oluşturarak arıza, aşırı yük ve risk analizleri gibi gerçek senaryoları sanal ortamda test etmeye imkân tanır. Ayrıca Komatsu, Hitachi Construction Machinery, John Deere gibi global OEM'ler de kendi ekipmanlarına özel simülasyon çözümleri geliştirmektedir. Tüm bu sistemler, dijitalleşen teknik eğitim süreçlerinde iş sağlığı ve güvenliğini önceleyerek saha deneyimi kazandırmadan önce operatör becerilerini geliştirmek amacıyla kullanılır. Türkiye'deki MYO'lar için bu sistemlerin, hem müfredat güncellemelerinde hem de üniversite-sanayi iş birliği projelerinde kullanılması, eğitim kalitesini artıracak ve sektörle olan uyumu güçlendirecektir.

Simülasyon tabanlı bu firmaların sunduğu bireysel ve kurumsal çözümler, Türkiye'deki iş makineleri eğitiminde henüz yaygınlaşmamış teknolojik boşlukları ortaya koymaktadır. Dokuz Eylül Üniversitesi gibi bazı programlar VR destekli simülasyon laboratuvarları kurmuş olsa da, Simlog'un sunduğu ölçeklenebilir ve taşınabilir çözümler yaygınlaşmış değildir.

Sanal Gerçeklik (VR) ve Artırılmış Gerçeklik (AR) teknolojileri, operatör eğitimini dönüştürmekte; kullanıcıya gerçekçi ancak risksiz bir öğrenme ortamı sağlamaktadır. VR destekli uygulamalar, ekipman kullanımında simülasyon yoluyla maliyetleri düşürürken, sahadaki tehlikelerin tanınmasına da katkı sağlar. Gerçek zamanlı ortamlarda dijital katmanlar ekleyerek eğitime olan ilgiyi artıran AR sistemleri ise kullanıcıların gerçek şantiye koşullarında dijital yönergeler eşliğinde eğitim almasına olanak verir (Proctor vd., 2012).



3. Yöntem

Bu çalışmada, Türkiye’deki Meslek Yüksekokullarında (MYO) verilen “İş Makineleri Operatörlüğü” programlarının içeriksel yapısı, sektörel beklentilerle uyumu ve uluslararası iyi uygulamalarla karşılaştırmalı analizi amaçlanmıştır. Araştırma betimsel nitelikte olup nitel veri toplama ve doküman incelemesine dayalı bir yöntem benimsenmiştir. Çalışma sürecinde hem ulusal hem de uluslararası kaynaklar, mevcut müfredatlar, resmi web sayfaları, akademik yayınlar ve sektör temsilcilerinin görüşlerine dayalı bilgi kaynakları bütüncül biçimde analiz edilmiştir.

3.1. Araştırma Deseni

Araştırma, durum çalışması (case study) modeli kapsamında yapılandırılmıştır. Bu model kapsamında seçilen programlar, öğretim içerikleri, uygulamalı eğitim süreçleri, staj yapıları, sektörle olan etkileşimleri ve eğitim-öğretim stratejileri açısından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Programlar, farklı üniversitelere bağlı MYO’larda yer alan İş Makineleri Operatörlüğü bölümleri arasından seçilmiştir. Ayrıca sektörel ihtiyaçların karşılanma düzeyi ve eğitimdeki teknolojik entegrasyon (örneğin simülasyon kullanımı) da değerlendirme kapsamına alınmıştır.

3.2. Veri Toplama Yöntemleri

Veriler, aşağıdaki kaynaklar kullanılarak toplanmıştır:

- **Doküman Analizi:** Yükseköğretim Kurulu (YÖK), üniversitelerin resmi web sayfaları, akademik yayınlar, NCCER, IUOE, SAIT ve Simlog gibi uluslararası uygulama örneklerine ait belgeler sistematik olarak incelenmiştir.
- **Gözlem ve karşılaştırma:** Farklı MYO’ların ders içerikleri, uygulamalı eğitim saatleri, laboratuvar altyapıları, sektörel iş birlikleri ve öğrenci kazanımları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.
- **Sekonder Veri Taraması:** TÜİK, SGK, Ulusal Meslek Standartları, Avrupa Yeterlilikler Çerçevesi (EQF) ve ilgili diğer kurumsal raporlar doğrultusunda sektörel beklentilere dair destekleyici veriler kullanılmıştır.

3.3. İnceleme Kapsamı

Analiz sürecinde aşağıdaki kurum ve programlar odak noktası olarak seçilmiştir:

- Türkiye’deki seçili MYO’lar: DEÜ Bergama MYO, Samsun Üniversitesi Kavak MYO, İsehisar MYO, Keçiörlü MYO, Küre MYO, Demirözü MYO ve Arapgir MYO.
- Uluslararası örnekler: NCCER (ABD), IUOE (ABD), SAIT (Kanada), Midland Technical College (ABD), Louisiana Cat Operatörlük Eğitimleri ve Simlog Simülasyon Teknolojileri.

Bu çeşitlilik, farklı eğitim modellerinin analiz edilmesini ve sektörel beklentilerle uyum düzeylerinin daha sağlıklı kıyaslanmasını sağlamıştır.

3.4. Veri Analizi Yöntemi

Toplanan veriler tematik analiz tekniği ile değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, eğitim müfredatlarının kapsamı, uygulamalı eğitim süresi, dijitalleşme düzeyi, sektörle iş birliği modelleri ve öğrencilerin kazandığı mesleki yeterlilikler başlıca temalar olarak ele alınmıştır. Temalar doğrultusunda bulgular bölümü yapılandırılmış ve tartışma kısmında literatürle bütünleştirilmiştir.

4. Bulgular

Sektörün doğrudan ders içeriklerine katkı sağlaması, özellikle iş makineleri bakım-onarım programları gibi uygulama ağırlıklı eğitimlerde oldukça kritik bir noktadır. Bu katkıyı sağlamak için üç ana modelden yararlanabiliriz: müfredat geliştirme sürecine katılım, uygulamalı eğitim modülleri ve ortak dijital platformlar.

4.1. Teknik Beceri Eksiklikleri

a) Temel Mekanik ve Elektronik Bilgi Açıkları

Mevcut ders içerikleri çoğunlukla motor, hidrolik, pnömatik ve temel elektrik-elektronik sistemleri tanıtıcı modüller içeriyor. Ancak sektörün talep ettiği seviyede:

- Elektronik kontrol üniteleri (ECU) okuma
- Sensör arızalarının tespisi
- CAN-BUS sistem analizi gibi derinlemesine bilgi gerektiren konular genellikle işlenmiyor. Bu durum, mezunların arıza çözme ve hata analizi yeteneklerini sınırlandırıyor.

b) Sistem Entegrasyonu ve Hibrit Yapılar

Yeni nesil iş makineleri, hidrolik, mekanik ve elektronik sistemlerin entegre kontrolüne dayanıyor. Mevcut müfredatlar bu karmaşık sistemler için yeterince multidisipliner bir yaklaşım sunmuyor. Örneğin:

- Elektronik-hidrolik kontrol modülleri
- Makine içi veri aktarım protokolleri
- Akıllı güç yönetimi gibi alanlar eksik kalıyor.

4.2. Saha Uygulamaları Açıkları

a) Yetersiz Laboratuvar Altyapısı

Çoğu MYO'da gerçek iş makineleri yerine yalnızca maket veya sınırlı parçalar üzerinden uygulamalar yapılıyor. Bu durum öğrencilerin:

- Gerçek saha koşullarında problem çözme,
- Yüksek tonajlı makinelerde bakım uygulama,
- Arıza teşhis cihazlarını sahada kullanma becerilerini geliştirmesini zorlaştırıyor.



b) Saha Tabanlı Eğitim Eksikliği

Sanayi iş birliği kapsamında zorunlu saha uygulamaları veya staj modülleri bulunmasına rağmen:

- Uygulama süreleri kısıtlı.
- Çoğu öğrenci temel bakım yerine daha çok izleme ve gözlem seviyesinde kalıyor.
- Sektörde kullanılan yeni teknolojiler ile eğitim içeriği arasında ciddi bir senkronizasyon açığı oluşuyor.

4.3. Dijital Bakım Sistemleri (CMMS) Eksiklikleri

a) CMMS Kullanımı ve Veri Tabanlı Takip

Modern iş makineleri sektöründe Bilgisayarlı Bakım Yönetim Sistemleri (CMMS) standart hale gelmiş durumda. Ancak müfredatta:

- CMMS uygulamalarının öğretilmediği,
- Gerçek saha yazılımlarının kullanılmadığı,
- Veri tabanlı bakım geçmişi analizlerinin işlenmediği görülüyor.

Bu eksiklik, mezunların dijitalleşen bakım süreçlerine hızlı adaptasyonunu zorlaştırıyor. Sektör, bakım kayıtlarının manuel değil dijital yönetilmesini zorunlu kılıyor.

b) IoT ve Telematik Sistemler

Günümüzde birçok iş makinesi:

- IoT sensörleri
- Uzaktan arıza teşhis sistemleri
- Telematik veri analizi ile yönetiliyor. Ancak öğrencilere bu dijital altyapıyı kullanma becerisi kazandırılmadığı için sektörde dijital bakım kültürüne geçişte eksiklikler yaşanıyor.

4.4. Kestirimci Bakım (Predictive Maintenance) Açıkları

a) Sensör Tabanlı Durum İzleme Eksiklikleri

Sektörde yaygınlaşan kestirimci bakım (PdM) uygulamaları sayesinde makinelerde arızalar meydana gelmeden önce öngörülüp müdahale edilebiliyor. Ancak müfredatta:

- Sensör verilerinin toplanması,
- Titreşim, sıcaklık ve yağ analizi,
- Arıza tahmin algoritmaları gibi konular işlenmiyor.

b) Yapay Zekâ Destekli Arıza Tahmin Modelleri

Dünyadaki trend, AI tabanlı kestirimci bakım çözümlerine doğru ilerliyor. Makine öğrenmesi

destekli PdM algoritmalarıyla:

- Bakım periyotları optimize ediliyor.
- Arıza riskleri önceden belirleniyor.
- Stok yönetimi kolaylaşıyor. Ancak mevcut eğitim içerikleri hâlen klasik önleyici bakım seviyesinde kalıyor.

5. Tartışma

Bu çalışmada, iş makineleri operatörlüğü programlarının sektör beklentileriyle ne derece örtüştüğü analiz edilmiş; mevcut müfredatın özellikle dijitalleşme, kestirimci bakım uygulamaları ve teknik saha yeterlilikleri gibi çağdaş ihtiyaçlara yeterince yanıt veremediği görülmüştür. Uluslararası alanda yapılan araştırmalar da bu sonuçları desteklemektedir. Örneğin, Wang vd. (2018), Çin'deki mesleki eğitim programlarının otomasyon ve sensör teknolojileri gibi alanlarda yeniden yapılandırıldığını ve sanayi 4.0 uyumluluğunun öncelik haline geldiğini ifade etmektedir. Bu kapsamda Türkiye'deki iş makineleri bakım-onarım eğitiminin, hem içerik hem de uygulama boyutunda küresel dönüşümlerden geri kaldığı söylenebilir (Wang vd., 2018).

Son dönemdeki çalışmalar, iş makineleri eğitiminde pedagojik kuramların sınırlı ancak giderek artan şekilde entegre edildiğini göstermektedir. Eğitim programlarının çoğu güvenlik temelli olup, yetişkin eğitimi ilkeleri, davranışsal güvenlik ve oyunlaştırma tekniklerinden faydalanmaktadır. Ancak bu tür programlarda yöneticilere veya sistem tasarımcılarına yönelik özel içerikler oldukça sınırlıdır ve eğitim literatüründe yer alan pedagojik kavramlara sınırlı referans verilmektedir (Jadallah vd., 2021).

Türkiye'deki MYO'lar, sektörel bazda donanımlı insan gücünü yetiştirme açısından önemli bir potansiyel barındırmaktadır. Güçlü yönlerden biri, birçok MYO'nun sektöre özgü programlar açarak bölgesel ihtiyaçlara cevap verebilmesidir. Ayrıca, teknik öğretim elemanlarının büyük bir kısmı sektörden gelen deneyimli bireylerdir ve bu da müfredatta gerçeklik katmaktadır.

Ancak zayıf yönler dikkat çekicidir. En belirgin sorunlar arasında şunlar öne çıkmaktadır:

- Müfredatın güncelliğini yitirmesi ve hızla değişen sektör teknolojilerine entegre olamaması,
- Laboratuvar ve atölye altyapılarının yetersizliği,
- Üniversite-sanayi iş birliğinin zayıf olması, yani sektörden doğrudan katkı alınamaması,
- Saha uygulamalarının müfredatta yeterince yer bulamaması, özellikle staj süresi ve niteliğinin yetersizliği.

Türkiye'de teknik eğitim kurumlarında uygulamaya dayalı eğitimin sınırlı oluşu, sektör beklentileriyle mezun yeterlilikleri arasında uyumsuzluk yaratmaktadır. Nitekim bu durum, müfredatların güncellenmesinden öğretim materyallerinin modernizasyonuna kadar çok katmanlı bir reform ihtiyacını doğurmaktadır (Üstün vd., 2017). Bu bağlamda İş Makineleri Operatörlüğü programları gibi uygulama yoğun alanlarda saha eğitimi, simülasyon teknolojileri,



ve işletme temelli öğretim modelleri kritik hale gelmektedir

MYO'ların yerel sanayi kuruluşlarıyla olan ilişkilerinin zayıf olması, eğitim programlarının güncellenmesini ve sektöre katkı sağlamasını engellemektedir. Türkiye'de özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin yoğun olduğu bölgelerde, iş makineleri operatörlüğü programlarının yerel sanayi ile ortak eğitim modülleri geliştirmemesi, müfredatın sektörel dönüşüm hızına ayak uyduramamasına neden olmaktadır. İşseveroğlu ve ekibinin yaptığı çalışmaya göre, bu eksiklik yalnızca eğitim kalitesini değil, mezunların bölgesel istihdam potansiyelini de azaltmaktadır (İşseveroğlu vd., 2011).

Almanya'da uygulanan "Dual Mesleki Eğitim Sistemi", teknik eğitim alanında dünyada en başarılı örneklerden biri olarak gösterilmektedir. Bu sistemde öğrenciler haftanın belirli günlerinde doğrudan sanayide çalışmakta, kalan günlerde ise teori eğitimi almaktadır. Öğrenciler mezun olduklarında hem akademik bilgiye hem de sektörel deneyime sahip olmaktadır.

Benzer şekilde, Güney Kore, teknik okulları dijitalleşme temelli modüllerle dönüştürmüş, yapay zekâ destekli bakım simülasyonları ve AR/VR tabanlı saha eğitimleri ile operatör eğitimini çağdaş düzeye taşımıştır. Kanada ise "Work-Integrated Learning (WIL)" modeliyle teknik programlara sektör danışma kurulları entegre ederek eğitim programlarının her 2 yılda bir sektörün doğrudan yönlendirmesiyle güncellenmesini zorunlu hale getirmiştir.

Türkiye'de ise bu tür uygulamaların henüz yaygınlaşmadığı, yalnızca sınırlı sayıda üniversitede sanayi ile aktif staj programlarının geliştirildiği gözlemlenmektedir. Oysa bu modellerden alınacak ilhamla, Türkiye'de iş makineleri operatörlüğü programları daha çevik ve sektöre entegre bir yapıya kavuşturulabilir. Bu kapsamda geliştirilecek bazı uygulamalar bunu desteklemeye yardımcı olacaktır.

Müfredat geliştirme sürecine doğrudan katılım sağlayacak sektör temsilcileri ve üniversite öğretim elemanlarının birlikte çalışmasıyla ders içerikleri güncellenebilir. İş makineleri üreticileri, bakım-onarım servisleri ve büyük inşaat firmalarıyla birlikte yılda en az bir kez toplanan bir Sektör Danışma Kurulu oluşturulabilir. Böylece yeni teknolojik gelişmeler değerlendirilir, ders içeriklerine doğrudan katkı sağlanır, iş gücü ihtiyacı doğrultusunda modül bazlı ders ekleme veya içerik güncellemesi yapılır. Müfredat Revizyon Atölyeleri oluşturularak sektör uzmanlarıyla birlikte akademisyenlerin katıldığı çalıştaylar düzenlenebilir. Yeni makine teknolojileri (hibrit, elektrikli iş makineleri vb.) ile IoT ve kestirimci bakım stratejileri gibi trendler müfredata dahil edilebilir.

Hiyerarşik Görev Analizi (Hierarchical Task Analysis, HTA), iş makineleri operatörlüğü eğitiminde karmaşık görevleri alt becerilere bölerek yapılandırılmış bir öğrenme süreci sunar. Bu yöntem, örneğin ekskavator ve yükleyici gibi farklı makine türlerine özel becerilere odaklanılmasını sağlayarak, kritik görevlerin önceliklendirilmesine imkân tanır. Deneyimli eğitmen ve operatörlerden alınan geri bildirimlerle programların daha hedefli ve etkili olması sağlanmaktadır (Wang vd., 2018).

Uygulamalı Eğitim Modülleri ve Ortak Laboratuvarlar kurularak Sektör, uygulamalı becerileri geliştirmek için doğrudan eğitim süreçlerine dahil edilebilir. Sektör firmalarıyla anlaşmalar yapılarak öğrencilerin gerçek makine parkurlarında eğitim almaları sağlanır. Özellikle

bakım-onarım uygulamalarında kullanılan diagnostic cihazları, sektör tarafından üniversiteye sağlanabilir. Üniversite-sanayi iş birliğiyle kurulacak “İş Makineleri Bakım-Onarım Simülasyon Laboratuvarı” ders içeriklerinin uygulamalı yönünü güçlendirebilir. Bu laboratuvarıda:

- Hidrolik sistem arıza simülasyonları
- Dijital bakım yazılımlarının kullanımı
- IoT sensör verilerinin işlenmesi gibi uygulamalar yapılabilir.

Sektör Eğitmenliği uygulamasıyla Bazı derslerde sektör mühendisleri veya teknisyenleri doğrudan derslere davet edilerek “konuk eğitmen” rolü üstlenebilir.

6. Sonuçlar

6.1 Özet Bulgular

Bu çalışma kapsamında, Meslek Yüksekokullarında (MYO) verilen iş makineleri bakım-onarım eğitiminin mevcut durumunun sektörel beklentilerle uyumu çok boyutlu bir şekilde değerlendirilmiştir. Türkiye genelindeki 10 farklı MYO programı karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş, müfredat içerikleri, uygulamalı eğitim saatleri, laboratuvar altyapısı ve sektörle iş birliği düzeyi açısından belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Özellikle dijitalleşme, kestirimci bakım, sensör teknolojileri gibi çağdaş endüstri uygulamalarının büyük oranda müfredat dışında bırakıldığı, uygulamalı ders saatlerinin yetersiz olduğu ve üniversite-sanayi iş birliğinin sistematik bir yapıya kavuşmadığı tespit edilmiştir.

6.2 Somut Öneriler

İş makineleri bakım-onarım eğitiminde kaliteyi ve sektörel uyumu artırmak amacıyla aşağıdaki öneriler geliştirilmektedir:

- **Müfredat Güncellemeleri:** Güncel teknolojileri içeren yeni modüller (ör. dijital bakım sistemleri, sensör arızaları analizi, kestirimci bakım algoritmaları) müfredata entegre edilmeli; ders kazanımları sahada ihtiyaç duyulan teknik becerilere göre yeniden tanımlanmalıdır.
- **Uygulamalı Eğitim Saatlerinin Artırılması:** Uygulama temelli öğrenmeyi teşvik eden atölye ve laboratuvar ders saatleri artırılmalı; sektörün doğrudan katkı sunduğu saha çalışmaları müfredata entegre edilmelidir.
- **Üniversite-Sanayi İş Birliği Modelleri:** Sektör temsilcilerinden oluşan “Müfredat Danışma Kurulları” oluşturularak eğitim içeriklerinin dinamik biçimde güncellenmesi sağlanmalı; staj programları, iş yeri eğitimi ve ortak laboratuvar projeleri ile iş birlikleri yapılandırılmalıdır.
- **Eğitici Eğitimi ve Alt Yapı Yatırımları:** MYO öğretim elemanlarına yönelik sanayi odaklı hizmet içi eğitim programları oluşturulmalı; iş makineleri simülatörleri, dijital bakım arayüzleri ve arıza analiz cihazları gibi altyapı yatırımları planlanmalıdır.
- **Dijitalleşme ve Endüstri 4.0 Entegrasyonu:** Öğrencilere yönelik dijital ikiz uygulamaları, artırılmış gerçeklik (AR) destekli bakım eğitimleri ve veri analitiği temelli kestirimci bakım uygulamaları ile yenilikçi öğretim yöntemleri geliştirilmelidir.



- **Dijitalleşme ve Teknoloji Entegrasyonu:** Öğrenciler, gerçek sektör yazılımları üzerinden uygulamalı olarak dijital bakım planlaması yapabilmeli. SAP PM, Maximo veya Fiix gibi endüstriyel yazılımlar eğitim içeriğine entegre edilmeli. İş makinelerinden anlık veri toplama senaryoları oluşturulmalı. Öğrencilere, IoT tabanlı arıza tespit cihazlarını kullanarak veri analizi yapma becerisi kazandırılmalı. Sektörle birlikte AI tabanlı PdM projeleri geliştirilmeli. Öğrenciler, kestirimci bakım algoritmalarının hem teorik hem uygulamalı yönlerini öğrenmeli.

İş makineleri operatörlüğü eğitiminde güncel araştırmalar, öğrenci merkezli öğrenme yaklaşımları, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), sürdürülebilirlik, aktif öğrenme ve yalın inşaat uygulamalarının entegrasyonu üzerine yoğunlaşmaktadır. Eğitim ortamlarında dijital araçların etkin kullanımı ve deneyime dayalı öğrenme stratejilerinin ön plana çıktığı gözlemlenmektedir (Aliu vd., 2021).

6.3 Gelecekteki Araştırmalar İçin Yönlendirmeler

Bu çalışmanın bulguları, ileride yapılacak daha geniş kapsamlı araştırmalar için bir temel oluşturmaktadır. Aşağıdaki araştırma alanları önerilmektedir:

- Türkiye genelindeki tüm MYO'larda iş makineleri bakım-onarım derslerinin niteliksel ve niceliksel analizi.
- Mezunların istihdam edilebilirliği, sektöre entegrasyon süreleri ve yeterlilik düzeylerinin uzun dönemli izlenmesi.
- İşveren görüşleri doğrultusunda eğitim çıktılarının değerlendirilmesi ve iş başı performans analizleri.
- Uluslararası düzeyde iş makineleri eğitime yönelik dijitalleşme uygulamalarının etki analizleri.
- Bölgesel sanayi yapısına göre MYO müfredatlarının farklılaştırılmasına yönelik pilot uygulamalar.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Genişletilmiş Özet

1. Giriş ve Araştırmanın Amacı

İş makineleri operatörlüğü, inşaat, madencilik, taşımacılık ve altyapı hizmetleri gibi birçok sektörde nitelikli iş gücüne olan ihtiyacın arttığı bir alan olarak öne çıkmaktadır. Ancak Türkiye'de bu alanda sunulan teknik eğitim programlarının güncel sektör ihtiyaçlarıyla tam uyumlu olmadığı, saha uygulamaları ve teknolojik altyapılar bakımından eksiklikler içerdiği çeşitli rapor ve gözlemlerle ortaya konulmuştur. Bu çalışma, Türkiye'deki meslek yüksekokullarında sunulan «İş Makineleri Operatörlüğü» programlarının yapısını, ders içeriklerini, uygulama

yaklaşımlarını ve sektörle olan etkileşim düzeylerini analiz ederek, bu eğitimlerin sektörel beklentilere ne ölçüde cevap verebildiğini sorgulamayı amaçlamaktadır.

2. Çalışma Konusu

Araştırma kapsamında öncelikle Türkiye'deki bazı üniversitelerin (örneğin DEÜ Bergama MYO, Samsun Üniversitesi Kavak MYO, İscehisar MYO vb.) iş makineleri operatörlüğü programlarının yapısı, uygulama süreçleri, staj imkanları ve sektörel iş birlikleri incelenmiştir. Bununla birlikte, Kanada (SAIT), ABD (IUOE, NCCER, Midland Technical College), özel sektör (Louisiana Cat) ve Simlog gibi teknoloji firmalarının uygulamaları da analiz edilerek, Türkiye'deki modellerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, Türkiye'deki programların güçlü ve gelişime açık yönlerinin belirlenmesi açısından literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır.

3. Yöntem

Bu araştırma, nitel araştırma yöntemlerinden doküman analizi tekniğiyle yürütülmüştür. Üniversitelerin resmi internet sitelerinden ve kamuya açık akademik kaynaklardan toplanan veriler karşılaştırmalı içerik analizi ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, uluslararası örneklerin uygulama alanları, sertifikasyon süreçleri ve mezun-sektör entegrasyon düzeyleri gibi ölçütler çerçevesinde karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Kaynaklar arasında meslek yüksekokulu müfredatları, kurum raporları, sektör uygulama örnekleri ve simülasyon teknolojisi firmalarının resmi dokümanları yer almaktadır.

4. Bulgular ve Tartışma

Elde edilen bulgular, Türkiye'deki iş makineleri operatörlüğü programlarının genellikle teorik bilgi ve temel uygulamalı eğitimlerle sınırlı kaldığını, ancak bazı örneklerde (örneğin DEÜ Bergama MYO) VR destekli simülasyon laboratuvarlarının kullanılmaya başlandığını ortaya koymuştur. Buna karşılık Kanada ve ABD'deki benzer programların sektörel sertifikalarla doğrudan entegre olduğu, iş yeri tabanlı öğrenme modellerinin daha yaygın uygulandığı ve eğitim sonrası işe yerleşme oranlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Simülasyon teknolojileri açısından Simlog gibi firmaların düşük maliyetli, modüler ve taşınabilir çözümler sunarak sektördeki eğitim sürecini demokratikleştirdiği anlaşılmaktadır.

5. Sonuç ve Öneriler

Araştırma bulguları, Türkiye'deki iş makineleri operatörlüğü eğitimlerinin daha nitelikli ve sektörel beklentilere duyarlı hale getirilebilmesi için VR simülasyonlarının yaygınlaştırılması, sektörel sertifikasyon sistemlerinin entegrasyonu, işletmede eğitim modelinin güçlendirilmesi ve uluslararası iyi uygulamaların örnek alınması gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, eğitim kurumları ile iş makineleri üreticileri arasında daha sistematik iş birliklerinin kurulması, mezunların istihdamını kolaylaştıracak politikaların benimsenmesi ve eğitim müfredatlarının düzenli olarak sektör temsilcileriyle birlikte güncellenmesi önerilmektedir.

Extended Abstract

1. Introduction / Background

Heavy equipment operation is a critical vocational area for sectors such as construction, mining, transportation, and infrastructure. In Türkiye, vocational associate degree programs



in this domain are increasingly important; however, many programs appear misaligned with industry expectations, especially in terms of technological infrastructure, practical training, and certification integration. This study aims to evaluate the structure and implementation of heavy equipment operator training programs in Türkiye and compare them with leading international practices.

2. Objectives / Research Purpose

The main purpose of this research is to analyze the current curricula, internship models, and industrial collaborations of Turkish vocational schools (e.g., Dokuz Eylül University, Samsun University, Afyon Kocatepe University) offering “Heavy Equipment Operation” programs. Furthermore, international benchmarks from Canada (SAIT), the U.S. (IUOE, NCCER, Midland Technical College), and private companies (e.g., Louisiana Cat, Simlog) are reviewed to provide comparative insights. The study aims to identify gaps, highlight best practices, and suggest strategies to align training programs more effectively with real-world demands.

3. Methods / Methodology

This study adopts a qualitative research design, specifically document analysis. Data were collected from official websites of vocational schools, public reports, and training institutions. The comparison focused on variables such as course structure, use of simulation technologies, internship periods, certification opportunities, and graduate-to-employment pathways. International examples were also assessed regarding their training methodologies, technological integration, and industry collaboration.

4. Results / Findings

Findings suggest that Turkish programs mostly provide basic theoretical and technical training, with limited VR or simulator usage. An exception is Dokuz Eylül University, which incorporates mini excavator training and VR-based simulations. In contrast, institutions like SAIT or programs like IUOE demonstrate comprehensive integration with industry certifications and high post-graduation employment rates. Companies like Simlog offer affordable, portable simulation platforms that support competency-based learning and fill training gaps in decentralized settings.

5. Discussion and Conclusions

The study concludes that enhancing the quality of heavy equipment training in Türkiye requires embedding industry-based certifications, expanding simulation infrastructure, and increasing employer involvement in curriculum design. It is also essential to establish collaborative networks between universities and machine manufacturers. Lessons drawn from international practices show that performance-based training systems and workplace learning models can significantly improve the employability of graduates and the responsiveness of educational institutions to labor market dynamics.

Kaynaklar

- Aliu, J., & Aigbavboa, C. (2021). Reviewing the trends of construction education research in the last decade: a bibliometric analysis. *International Journal of Construction Management*, 23, 1571–1580.
- Arapgir Meslek Yüksekokulu. (2025). İş Makineleri Operatörlüğü Programı. <https://arapgir.ozal.edu.tr/>
- Bergama Meslek Yüksekokulu. (2025). İş Makineleri Operatörlüğü Programı. <http://bergamamyio.deu.edu.tr/>
- Demirözü Meslek Yüksekokulu. (2025). İş Makineleri Operatörlüğü Programı. <https://bayburt.edu.tr/tr/demirozu>
- ERI Economic Research Institute. (2025). Construction Equipment Operator Salary. <https://www.eri.com/salary/job/construction-equipment-operator>
- Forth Hays Tech North Central. (2025). Construction Programs. <https://fhtechn.edu/academics/programs/construction/>
- International Union of Operating Engineers. (2025). Heavy Equipment Operator Training. <https://www.iuoe.org/training/heavy-equipment-operator>
- İscehisar Meslek Yüksekokulu. (2025). İş Makineleri Operatörlüğü Programı. <https://iscehisarmyo.aku.edu.tr/>
- İŞKUR. (2023). İşgücü Piyasası Araştırması. <https://www.iskur.gov.tr/kurumsal/raporlar/>
- İşseveroğlu, G., & Gençoğlu, Ü.G. (2011). Türkiye’de meslek yüksekokullarının bölge ihtiyaçlarına uygunluğu üzerine bir araştırma. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*.
- Jadallah, H., Friedland, C., Nahmens, I., Pecquet, C., Berryman, C., & Zhu, Y. (2021). Educational Theory-Integrated Construction Industry Training: State-of-the-Art Review.
- Kavak Meslek Yüksekokulu. (2025). İş Makineleri Operatörlüğü Programı. <https://kavakmyo.samsun.edu.tr/>
- Keçiborlu Meslek Yüksekokulu. (2025). İş Makineleri Operatörlüğü Programı. <https://keciborlumyo.isparta.edu.tr/>
- Küre Meslek Yüksekokulu. (2025). İş Makineleri Operatörlüğü Programı. <https://kure.kastamonu.edu.tr/>
- Louisiana Cat. (2025). Virtual Training. <https://www.louisianacat.com/parts-service/training/virtual-training/>
- MEB. (2022). Mesleki Teknik Eğitim Strateji Raporu. <https://mtegm.meb.gov.tr/>
- Miami Lakes Educational Center and Technical College. (2025). <https://miamilakes.edu/>
- Midlands Technical College. (2025). Heavy Equipment Operator Comprehensive. <https://www.>



midlandstech.edu/heavy-equipment-operator-comprehensive

My Future. (2025). Occupations and Industries. <https://myfuture.com/occupations-industries/>

National Center for Construction Education & Research (NCCER). (2025). Heavy Equipment Operations. <https://www.nccer.org/craft-catalog/heavy-equipment-operations/>

Proctor, R., Dunston, P., So, J., & Wang, X. (2012). Task Analysis for Improving Training of Construction Equipment Operators, 169–178.

Southern Alberta Institute of Technology (SAIT). (2025). Heavy Equipment Programs. <https://www.sait.ca/sait-schools/school-of-transportation/heavy-equipment-programs>

STI Group. (2025). <https://setxind.com/>

TCAT Elizabethton. (2025). Heavy Equipment Operator Program. <https://tcatelizabethton.edu/programs/heavy-equipment-operator>

TÜİK. (2023). Hanehalkı İşgücü İstatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/>

TÜİK. (2024). Türkiye İşgücü Piyasası Göstergeleri. <https://data.tuik.gov.tr/>

U.S. Bureau of Labor Statistics. (2025). <https://www.bls.gov/>

Üstün, S., & Uzun, R. (2017). Meslek yüksekokullarında, sektör beklentileri ve mesleki yeterlilikler çerçevesinde esnek öğrenme ortamlarının kurgulanması.

Wang, P., Wu, P., Wang, J., Chi, H., & Wang, X. (2018). A Critical Review of the Use of Virtual Reality in Construction Engineering Education and Training. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(6), 1204.

Wang, X., & Dunston, P. (2007). Design, strategies, and issues towards an augmented reality-based construction training platform. Journal of Information Technology in Construction, 12, 363–380.

Wikipedia. (2025). Construction. <https://en.wikipedia.org/wiki/Construction>

Xiong, Z. (2022). Development of VR Teaching System for Engine Dis-assembly. arXiv preprint arXiv:2207.05265.

YÖK Atlas. (2024). Önlisans Programları İstatistikleri. <https://yokatlas.yok.gov.tr/onlisans>

YÖK Atlas. (2025). Önlisans Ana Sayfa. <https://yokatlas.yok.gov.tr/onlisans-anasayfa.php>

Orta Gerilim Kablo Üretim Ekstrüzyon Makinesinde Kestirimci Bakım

Predictive Maintenance in Medium Voltage Cable Production Extrusion Machine

Cemal MERAN^{1*}, Berranur ÇEKER², Sezai KUNAN², Murat MAT², Köksal İLHAN³

¹ cmeran@pau.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-1813-7166>

² bceker20@posta.pau.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0009-0000-9527-9961>

² skunan20@posta.pau.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0009-0002-3997-3435>

² mmat21@posta.pau.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0009-0000-6103-9599>

³ koksai.ilhan@nexans.com, ORCID No: <http://orcid.org/0009-0004-5709-8181>

DOI : <http://dx.doi.org/10.31796/ogummf.xxxxxx>

Özet

Endüstriyel üretim süreçlerinde verimliliğin artırılması ve operasyonel sürekliliğin sağlanması, bakım uygulamalarının kritik bir gereklilik haline gelmesini sağlamıştır. Bu kapsamda, arızaları oluşmadan önce tespit edip müdahale etmeye olanak tanıyan kestirimci bakım yaklaşımları, modern bakım stratejilerinin temelini oluşturmaktadır. Bu çalışmada, bir enerji kabloları ekstrüzyon makinesi üretim hattında kestirimci bakım uygulanmıştır. Üretim hattında makine duruşu yaşanmadan, operasyon kesintisi olmaksızın titreşim, sıcaklık ve enerji tüketimi gibi önemli parametrelerin düzenli ve sürekli ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Toplanan veriler ışığında, makinedeki dengesizlik, kaplin ayarsızlığı, mekanik gevşeklik, rulman ve dişli arızaları gibi kritik problemler erken safhada tespit edilmiştir. Firma için uygun bakım zamanları planlanarak, müdahaleler üretimi aksatmadan zamanında uygulanmış ve plansız duruşların önüne geçilmiştir. Ayrıca oluşturulan trend analizleri sayesinde ekipmanın durumu sürekli izlenmiş, enerji tüketimindeki azalma ve sıcaklık değişimleri net bir şekilde ortaya konmuştur. Enerji tüketimindeki iyileşmeler temel alınarak karbon ayak izi hesaplanmış, böylece bakım faaliyetlerinin çevresel sürdürülebilirliğe katkısı sayısal olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, kestirimci bakımın yalnızca arıza öncesi müdahale sağlamadığını, aynı zamanda ekipman ömrünü uzatarak operasyonel verimlilik ve çevresel performansta önemli kazanımlar sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kestirimci bakım, kablo üretim, spektrum grafiği, titreşim analizi, ekstrüzyon makinesi



Abstract

Increasing productivity and ensuring operational continuity in industrial production processes has made maintenance practices a critical requirement. In this context, predictive maintenance approaches, which enable to detect and intervene before failures occur, form the basis of modern maintenance strategies. In this study, predictive maintenance was implemented on a power cable extrusion machine production line. Regular and continuous measurements of important parameters such as vibration, temperature and energy consumption were carried out on the production line without machine downtime and operation interruption. In the light of the data collected, critical problems such as imbalance in the machine, coupling misalignment, mechanical looseness, bearing and gear failures were identified at an early stage. By planning appropriate maintenance times for the company, interventions were implemented on time without disrupting production and unplanned downtime was prevented. In addition, thanks to the trend analyses created, the status of the equipment was constantly monitored and the reduction in energy consumption and temperature changes were clearly demonstrated. The carbon footprint was calculated based on improvements in energy consumption, thus quantifying the contribution of maintenance activities to environmental sustainability. The findings show that predictive maintenance not only provides pre-failure intervention, but also offers significant gains in operational efficiency and environmental performance by extending equipment life.

Keywords: Predictive maintenance, cable production, spectrum graph, vibration analysis, extrusion machine

1. Giriş

Sanayi tesislerinde kullanılan makinelerin güvenilirliği, üretim sürekliliği ve maliyetlerin kontrol altında tutulması bakım stratejilerinin etkinliği ile doğrudan ilişkilidir. Geleneksel bakım yöntemleri olan arıza ve periyodik bakım, plansız duruşların ve yüksek bakım maliyetlerinin önüne geçmede çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bu durum, işletmelerde ciddi ekonomik kayıplara, üretim süreçlerinde aksamalara ve rekabet gücünde azalmaya yol açmaktadır.

Kestirimci bakım, makinelerden belirli aralıklarla alınan verilerin analiz edilmesine dayalı olarak arızaların önceden tahmin edilmesini mümkün kılar. Böylece küçük problemlerin büyümesi engellenir, bakım maliyetleri düşer ve üretim sürekliliği sağlanır. Titreşim analizi, kestirimci bakımda en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olup, döner ekipmanlarda balanssızlık, gevşeklik ve rulman hasarlarının tespitinde kritik rol oynamaktadır. Literatürde, bu yöntemin bakım maliyetlerinde %75'e, duruş sürelerinde ise %39'a varan azalmalar sağladığı rapor edilmiştir.

Günümüzde teknolojinin hızlı gelişimi, artan enerji tüketimi ve sürdürülebilirlik hedefleri, bakım faaliyetlerini sadece bir gider kalemi olmaktan çıkararak işletmeler için stratejik bir yatırım haline getirmiştir. Özellikle Endüstri 4.0 kapsamında dijitalleşme ve veri odaklı üretim anlayışı, kestirimci bakım uygulamalarının önemini artırmaktadır. Bu yaklaşımla hem üretim verimliliği yükselmekte hem de enerji tüketimi optimize edilerek karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlanmaktadır.

Bu çalışmada, kablo üretiminde kullanılan ekstrüder makineleri üzerinde kestirimci bakım uygulamalarının etkinliği incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında titreşim, sıcaklık ve elektrik tüketimi ölçümleri alınarak olası sorunlar belirlenmiştir. Elde edilen spektrum ve dalga formlarının detaylı analizleri ile potansiyel arızaların erken tespiti yapılmış, bakım planlamasının optimizasyonu hedeflenmiştir. Ayrıca düzenli ölçümlerle trend grafiklerinin oluşturulması ve enerji tüketim hesaplarının yapılması, işletmenin sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamıştır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Kestirimci bakım yöntemleri, endüstriyel tesislerde makinelerin performansını izlemek, arızaları önceden tespit etmek ve plansız duruşları en aza indirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alandaki çalışmalar, farklı ekipman türleri ve ölçüm yöntemleri üzerinden literatürde detaylı biçimde ele alınmıştır.

Aydın ve Meran (2018) tarafından yapılan çalışmada, çimento fabrikalarındaki kritik ekipmanlar üzerinde uygulanan kestirimci bakım yöntemleri incelenmiştir. Çalışmada, Döner Fırın-1 Bacagazı Fanı gibi kritik bir ekipmanda haftalık titreşim ölçümleri mobil cihazlarla gerçekleştirilmiş ve rulman dış bilezik arızalarının spektrum analizi ile tespit edildiği gösterilmiştir. Özellikle demod grafikleri ile rulman hasarının erken aşamada gözlemlenmesi, veri odaklı bakım yaklaşımının etkinliğini ortaya koymuştur.

Arslan (2010) fanlarda titreşim analizi ve kestirimci bakım konularına odaklanmış, bilinçli olarak yaratılan arızaları farklı frekanslarda ölçerek FFT analizi ile arızaların tür ve boyutlarının tespit edilebileceğini göstermiştir. Benzer şekilde Gahafari (2004), endüstriyel fanlarda oluşabilecek balans problemleri, şaft hataları ve rezonans gibi durumları vaka analizleriyle incelemiş, her bir problem türünün FFT spektrumlarındaki karakteristik etkilerini detaylandırmıştır.

Yılmaz ve Koç (2022), imalat süreçlerinde kestirimci bakımın uygulanabilirliğini analiz etmiş

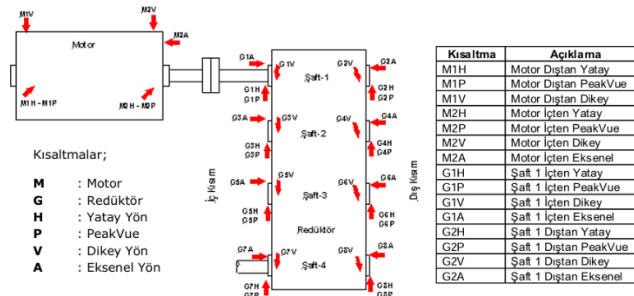
ve yöntemlerin makinelerin durumunu izleyerek üretim kayıplarını azaltmada etkili olduğunu göstermiştir. Araştırmada, sistemlerin sürekli izlenmesi ile arıza tahminlerinin yapılabileceği ve maliyet tasarrufu sağlanabileceği vurgulanmıştır. Öztürk ve Demir (2023) ise endüstriyel tesislerdeki kestirimci bakım stratejilerini inceleyerek, gerçek zamanlı izleme sistemlerinin arıza tahminini kolaylaştırdığı ve bakım maliyetlerini düşürdüğünü belirtmiştir.

Sistemin dinamik davranışı ve yapısal esneklik arızaları da literatürde detaylı olarak incelenmiştir. Taplak (2012), doğrudan bağlı rotor-rulman sisteminde dikey yönde titreşim analizi gerçekleştirmiş, yüksek titreşimlerin mekanik gevşeklik ve ayarsızlıktan kaynaklandığını göstermiştir. Günindi (2024) ise hava fanlarında yapısal esneklik arızalarını titreşim analizi ve spektrum grafikleri ile erken tespit etmiş, bakım programlarının optimizasyonuna katkıda bulunmuştur.

Şahin (2021), rulmanlarda oluşan dış bilezik hasarlarını titreşim analizi ile tespit etmiş ve makinelerin periyodik olarak izlenmesi ile arıza oluşmadan müdahale edilebileceğini vurgulamıştır. Yıldırım ve Karahan (2015) ise kompresör yataklarında titreşim analizi ile kestirimci bakım uygulamalarının sonuçlarını sunmuş, dış ve iç bilezik hasarlarının tespitinde bu yöntemin etkinliğini göstermiştir.

3. Yöntem

Bu çalışma, Denizli Nexans Kablo Fabrikası'nda, kablo üretim sürecinde kritik öneme sahip olan ana ekstrüder makinelerinde gerçekleştirilen kestirimci bakım uygulamalarını kapsamaktadır. Çalışmanın amacı, makinelerde meydana gelebilecek arızaların erken tespiti ve üretim sürecinin aksamasının önlenmesidir. Çalışmanın kapsamı doğrultusunda, makinenin bakım öncesi ve sonrası detaylı performans ölçümleri yapılmıştır. Tespit edilen arızalara göre bakım faaliyetleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler, makinenin durumu hakkında karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmasına olanak sağlamıştır. Ölçümler, sabit motor hızları korunarak radyal (dikey ve yatay) ve eksenel yönlerde gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, mevcut tüm yataklardan veri alınmasını sağlayarak arızaların doğru şekilde belirlenmesine imkân tanımaktadır. Ölçüm yönleri ve konumları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Motor ve redüktör grubu üzerinden alınan ölçüm noktalarının örnek gösterimleri.

Çalışmada kullanılan makine, kablo üretiminde kullanılan ana ekstrüderdir. Bu makine, kablonun dış kılıfını veya yalıtım malzemesini üretmekten sorumludur. Ana ekstrüder, kabloyu dış etkenlerden koruyan ve elektriksel yalıtım sağlayan birincil plastik kaplama malzemesini işler. Makine ve bileşenleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



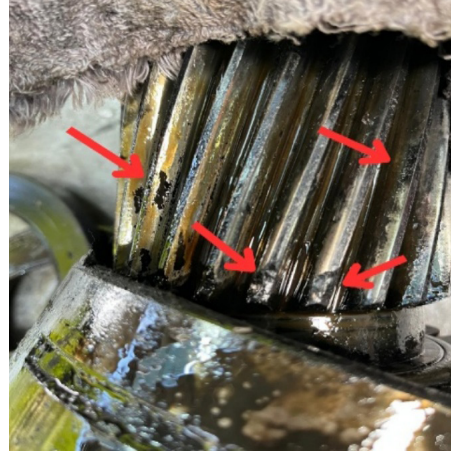
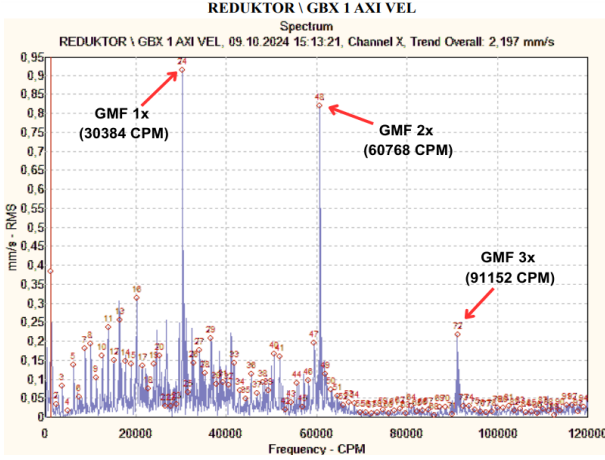
Şekil 2. Çalışma kapsamında kullanılan IK-34 ekstrüzyon makinesi.

Ölçümler sırasında makinenin hat hızı, motor devri, motor akımı, sıcaklık değerleri, rulman tipleri ve redüktör çevrim oranları dikkate alınmıştır. Bu parametreler, makinenin çalışma koşullarını doğru şekilde yansıtmak ve ölçümlerin güvenilirliğini artırmak için kritik öneme sahiptir. Ayrıca gerekli hesaplamaların yapılabilmesi amacıyla redüktörün teknik resmi temin edilmiştir.

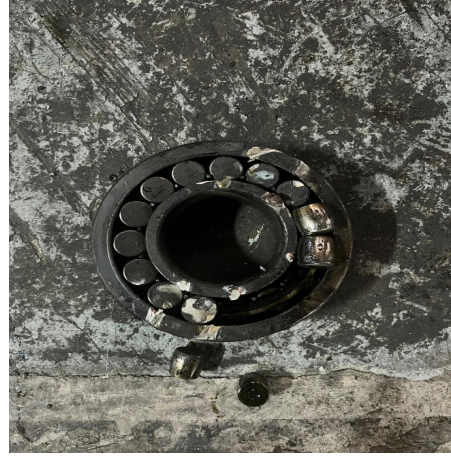
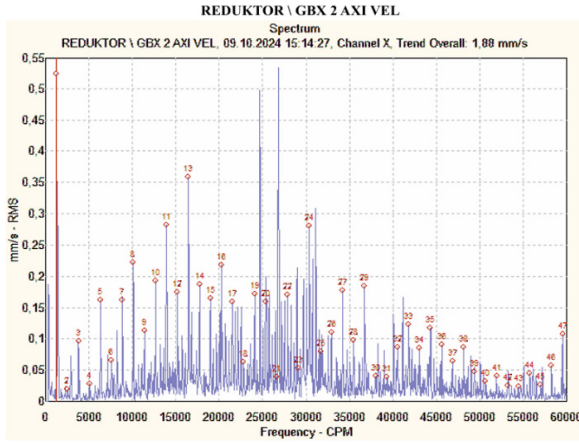
Makinenin titreşim analizleri, alanında kullanılan standart analiz cihazlarıyla gerçekleştirilmiştir. İlk ölçümler, makine ve ekipmanlardan veri toplamak ve olası arıza bölgelerini belirlemek için yapılmıştır. Ölçümler, makinenin farklı yatak noktalarından, yatay, dikey ve eksenel yönlerde gerçekleştirilmiştir. İkinci ölçümler, ilk bulgulara göre daha ayrıntılı veri toplamak ve bakım sonrası makinenin durumunu değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

4. Bulgular

Bu çalışmada elde edilen titreşim verileri analiz edilerek makinenin mevcut durumu ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Ölçümler, yalnızca arızaların kaynağını belirlemekle kalmamış, aynı zamanda bu arızaların ciddiyeti ve ekipman üzerindeki etkileri hakkında da önemli ipuçları sunmuştur. Spektrum grafiklerinde gözlemlenen belirgin peak değerleri, dişli kaynaklı bir arızaya işaret etmiş; yapılan incelemelerde dişli yüzeylerinde aşınma ve kırıkların bulunduğu doğrulanmıştır. Şekil 3'te dişli hasarını öngören spektrum grafiği ve Şekil 4'te ise makine bakıma alındığı esnada çekilmiş aşınmış ve kırılmış dişli şekli görülmektedir. Bunun yanı sıra, 1. mil üzerinde gerçekleştirilen analizlerde rulman kafesi arızaları tespit edilmiş, rulmanların iç ve dış bileziklerinde çatlaklar ve deformasyonlar gözlenmiştir. Şekil 5'te rulman hasarını gösteren spektrum grafiği ve Şekil 6'da da bakım esnasında kafesi dağılmış, hasara uğramış rulman resmi görülmektedir. Ayrıca spektrum ve dalga form grafiklerinde 1x frekansında kaydedilen anormal tepe değerleri, başlangıçta balanssızlık şüphesi uyandırmış, ancak detaylı incelemeler sonucunda bu durumun esasen rulman ve dişli kaynaklı olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 3. Dişli hasarını gösteren spektrum grafiği. Şekil 4. Dişlide meydana gelen hasarlar.



Şekil 5. Rulman hasarını gösteren spektrum grafiği.

Şekil 6. Rulmanda meydana gelen hasarlar.

Bu bulgular doğrultusunda makinenin güvenli çalışmaya devam edebilmesi için acil bakım planı hazırlanmış ve öncelikli olarak hasarlı rulmanlar değiştirilmiştir. Ancak dişlinin yekpare ve özel üretim olması sebebiyle dişli bakımının ileri bir tarihe ertelenmesine karar verilmiştir. Rulman değişimi sırasında yatak kapakları sökülerek detaylı kontroller yapılmış, rulmanların kafeslerinin dağıldığı, bilyaların yerinde oynadığı ve bileziklerde ciddi deformasyonların meydana geldiği doğrulanmıştır. Bu tespitler, bakım müdahalesinin zamanında yapıldığını ve sistemin güvenliği açısından kritik olduğunu göstermektedir.

Bakım sonrasında gerçekleştirilen ikinci ölçümlerde belirgin bir iyileşme gözlenmiştir. Özellikle rulmanlara ait titreşim izleri grafiklerde artık neredeyse yer almamış, genlik değerlerinde ise anlamlı bir düşüş kaydedilmiştir. 1x frekansındaki peak değerinin bakım öncesine kıyasla önemli ölçüde azalması, yapılan müdahalenin etkinliğini ortaya koymuştur. Bu iyileşme, yalnızca mevcut arızaların giderildiğini değil, aynı zamanda sistemin daha kararlı ve güvenli bir şekilde çalışmaya başladığını da göstermektedir. Ayrıca bakımın ardından elde edilen veriler, titreşim analizinin kestirimci bakım süreçlerinde erken uyarı ve performans iyileştirme açısından ne kadar kritik olduğunu bir kez daha kanıtlamıştır.

Üçüncü ölçüm sonuçları, rulman değişiminden önceki duruma kıyasla daha iyi olmakla birlikte,

ikinci ölçümde elde edilen değerlere göre kötüleşme göstermiştir. Özellikle değişmeyen yekpare dişlinin etkisiyle genlik değerleri yeniden yükselmeye başlamış, bu da sistemdeki iyileşmenin kalıcı olabilmesi için dişlinin mutlaka değiştirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte bazı frekans bileşenlerinde kısmi iyileşmeler gözlemlense de genel trend artış yönünde olmuş, bu da dişli kaynaklı arızanın titreşim davranışını giderek daha fazla etkilediğini göstermektedir. Trend grafikleri, kısa vadede bakım sonrası elde edilen iyileşmenin zamanla azaldığını, kritik bileşenlerin yenilenmemesi halinde titreşim seviyelerinin tekrar yükselme eğilimine girdiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, ölçüm sonuçlarının karşılaştırması bakımın etkisini açıkça ortaya koymaktadır. İlk ölçümlere kıyasla rulman değişimi sonrasında belirgin bir iyileşme elde edilmiş, ekipmanın ömrü uzatılmış ve arıza riski azaltılmıştır. Ancak üçüncü ölçümde, değişmeyen dişlinin etkisiyle genliklerin yeniden yükselmeye başladığı görülmüş, bu da iyileşmenin uzun vadede sürdürülebilmesi için kritik bileşenlerin mutlaka yenilenmesi gerektiğini göstermiştir. Bu eğilim, bakımın kısa vadeli olumlu etkilerinin zamanla azalabileceğini ve kalıcı performans için doğru bakım stratejisinin şart olduğunu ortaya koymaktadır. Ölçüm sonuçlarının karşılaştırması Tablo 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Ölçüm değerlerinin karşılaştırıldığı tablo.

Makin a Adı	Nokta ID	1. Ölçüm tarihi	2. Ölçüm tarihi	3. Ölçüm tarihi	1.Ölçüm genlik değerleri	2.Ölçüm genlik değerleri	3.Ölçüm genlik değerleri
İK34	M1H	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	1,924 mm/s	1,219 mm/s	0,946 mm/s
İK34	M1V	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	0,960 mm/s	0,677 mm/s	0,791 mm/s
İK34	M2H	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	1,813 mm/s	1,265 mm/s	1,174 mm/s
İK34	M2V	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	1,799 mm/s	1,356 mm/s	1,120 mm/s
İK34	M2A	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	1,459 mm/s	0,917 mm/s	1,354 mm/s
İK34	G1H	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	3,047 mm/s	0,878 mm/s	1,381 mm/s
İK34	G1V	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	4,377 mm/s	1,296 mm/s	1,774 mm/s
İK34	G1P	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	3,244 G's	0,038 G's	0,771 G's
İK34	G1A	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	2,197 mm/s	1,325 mm/s	3,657 mm/s
İK34	G2H	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	1,803 mm/s	1,084 mm/s	1,609 mm/s
İK34	G2V	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	2,291 mm/s	1,186 mm/s	1,956 mm/s
İK34	G2P	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	2,216 G's	0,373 G's	0,901 G's
İK34	G2A	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	1,880 mm/s	1,231 mm/s	1,050 mm/s
İK34	G3H	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	2,120 mm/s	1,110 mm/s	0,879 mm/s
İK34	G3V	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	1,939 mm/s	1,071 mm/s	-
İK34	G3A	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	1,264 mm/s	1,211 mm/s	-
İK34	G4H	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	2,236 mm/s	0,835 mm/s	1,155 mm/s
İK34	G4V	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	3,223 mm/s	0,759 mm/s	-
İK34	G4A	10.10.2024	30.11.2024	05.09.2025	1,823 mm/s	2,044 mm/s	-



5. Tartışma

Bu çalışmada, kestirimci bakım yöntemleri kullanılarak makine bileşenlerinde potansiyel arızaların önceden tespiti sağlanmıştır. İlk ölçümler, rulman ve giriş milindeki yekpare dişlide yüksek genlik değerleri göstermiştir. Bu durum, rulman kafesinde aşınma ve dişlide kırık olasılığına işaret etmiş, bakım gerekliliğini doğrulamıştır.

Bakım sırasında rulmanlar değiştirilmiş, dişli ise özel üretim olması nedeniyle geçici olarak tekrar yerine takılmıştır. Bu nedenle ikinci ölçümlerde dişli kaynaklı genlik düşüşleri tam gözlenemese de rulman değişimi sonrası genliklerde belirgin azalma kaydedilmiştir. Spektrum ve dalga formlarında bakım sonrası titreşim iyileşmesi açıkça görülmüş, rulman kaynaklı sorunlar ortadan kalkmıştır. Bu sonuçlar, titreşim analizinin bakım planlamasında kritik rolünü doğrulamaktadır.

Literatürle uyumlu olarak, düzenli titreşim izlemenin ve rulman değişiminin ekipman ömrünü uzattığı ve arızaların önceden tespitinde etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca akım analizleri, mekanik arızaların enerji tüketimi üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Bakım sonrası düşük akım değerleri, enerji verimliliğini artırmış ve çevresel etkilerin azalmasına katkı sağlamıştır. Temel çıkarım, kestirimci bakımın yalnızca mevcut arızaları gidermediği; aynı zamanda üretim sürekliliği, enerji tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da kritik faydalar sağladığıdır.

6. Sonuçlar

Bu çalışma, kestirimci bakımın makine performansını ve verimliliğini artırmada önemli bir araç olduğunu göstermiştir. Düzenli bakım uygulamaları, makine bileşenlerinin sağlıklı çalışmasını desteklerken üretim kalitesinin korunmasına ve beklenmeyen duruşların önlenmesine katkı sunmaktadır.

Titreşim analizi, potansiyel arızaları erken tespit etmede vazgeçilmezdir. Düzenli ölçümler sayesinde bileşenlerin limit değerlerin üzerinde çalışıp çalışmadığı takip edilebilmekte ve gerekli müdahaleler zamanında yapılabilmektedir. Ayrıca, kestirimci bakımın enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik üzerinde olumlu etkileri vardır. Düzenli bakım ile maliyetler düşmekte, karbon ayak izi azalmakta ve sürdürülebilir üretime katkı sağlanmaktadır. Kestirimci bakım yalnızca arızaların giderilmesinde değil, makinelerin uzun vadeli performansının güvence altına alınmasında ve işletme verimliliğinin artırılmasında da vazgeçilmez bir yaklaşımdır.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde değerli yönlendirmeleri ve akademik katkıları için Prof. Dr. Cemal Meran'a en içten teşekkürlerimizi sunarız. Saha çalışmaları ve teknik uygulamalarda sağladığı destek için Nexans Fabrika Bakım Müdürü Köksal İlhan'a teşekkür ederiz.

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 2209-B nolu üniversite öğrencileri sanayiye yönelik araştırma proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Introduction/ Background

In modern industrial production processes, ensuring continuous and reliable operation of machinery is critical for maintaining production efficiency and product quality. Unexpected failures, such as bearing wear, gear fractures, or mechanical looseness, can cause unplanned downtime, reduced productivity, and increased operational costs. Predictive maintenance has emerged as a proactive approach to prevent such failures by monitoring the condition of critical machine components and detecting potential issues before they escalate. This study aims to demonstrate the effectiveness of predictive maintenance techniques, particularly vibration and current monitoring, in identifying mechanical faults without interrupting production. By evaluating system performance and energy consumption before and after maintenance interventions, this research also highlights the environmental and operational benefits of proactive maintenance strategies.

Objectives/ Research Purpose

The primary objective of this research is to assess how predictive maintenance can contribute to the early detection of faults in critical machine components, such as gears and bearings, and to evaluate its impact on overall machine performance. Additionally, the study seeks to explore the role of maintenance in reducing energy consumption and minimizing the carbon footprint of industrial operations. By analyzing measurement data collected before and after targeted maintenance actions, this work aims to provide practical insights into the implementation of predictive maintenance in industrial settings and to establish best practices for sustainable and efficient machinery management.

Methods/ Methodology

In line with the scope of the study, performance measurements of the machine were conducted both before and after scheduled maintenance. Maintenance activities were executed based on faults identified through predictive monitoring, ensuring interventions directly targeted components exhibiting abnormal behavior. Measurements were systematically recorded in radial directions (vertical and horizontal) and along the axial axis, while constant motor speeds were maintained to ensure data reliability.

Motor operating speeds were determined by considering the machine's operational limits and the standard production speeds used in the factory. This calibration ensured measurements were performed under uniform, repeatable conditions, minimizing variability from external factors and allowing precise assessment of maintenance effects. Such an approach improved evaluation accuracy, provided insights into potential efficiency losses, and guided predictive maintenance strategies to ensure uninterrupted production.

The machine studied is the IK-34 main extruder at the Nexans cable production facility. This extruder plays a key role in forming the cable's outer sheath or insulation, which protects against mechanical, thermal, and environmental stresses while ensuring electrical insulation. Given its



central role in product quality and productivity, monitoring its condition is essential to avoid downtime and maintain efficiency.

High-precision vibration measurement devices were employed to capture the machine's dynamic behavior. These instruments collected both time-domain waveforms and frequency-domain spectra, enabling detection of early-stage mechanical anomalies such as gear wear and bearing faults. By integrating these results with operational data, the methodology provided a comprehensive understanding of performance, allowing proactive interventions and preventing failures before they impacted production quality or continuity.

Results/ Findings

Initial measurements indicated elevated vibration amplitudes in the bearings and gears, particularly in the first bearing and the input gear. Spectral analysis revealed peaks corresponding to the gear mesh frequency (GMF) and its harmonics, suggesting mechanical faults such as gear tooth wear and fractures. Waveform analysis further confirmed irregular vibration patterns, consistent with early-stage bearing damage and gear misalignment. These findings underscored the need for maintenance interventions to prevent further deterioration and ensure reliability.

During maintenance, worn bearings were replaced with high-quality components, and the dimensional characteristics of the integral input gear were carefully documented for future replacement. Post-maintenance measurements showed a marked reduction in vibration amplitudes in all locations where bearings were replaced. However, since the integral input gear was not replaced due to specialized production requirements, some elevated vibration signals persisted at frequencies corresponding to its mesh frequency. This highlights the critical role of integral gears in system dynamics and the importance of timely replacement.

Energy consumption measurements before and after maintenance showed slight reductions at identical operating speeds. While modest on an individual machine level, scaling these results to the entire production line indicated significant savings, contributing to cost reduction and environmental sustainability. The correlation between reduced vibration amplitudes and decreased energy use suggests predictive maintenance not only restores mechanical integrity but also improves energy efficiency, positively affecting the factory's carbon footprint.

Comparison of pre- and post-maintenance graphs revealed that vibration peaks associated with bearing cage defects disappeared after replacement, while other amplitudes decreased significantly, confirming the effectiveness of interventions. Overall, results show that targeted maintenance reduces anomalies, improves stability, and enhances efficiency. Despite the influence of the unreplaced gear, reductions in vibration confirm predictive maintenance as a reliable approach to sustaining performance.

Discussion and Conclusions

Many companies view the maintenance of machines used in production processes as an unnecessary cost and often prefer to postpone these tasks. However, maintenance not only ensures that machines operate efficiently and healthily, but also significantly contributes to improving product quality and preventing operational disruptions such as unexpected downtime.

When maintenance is neglected, the continued operation of the system can lead to failures in other components of the machine and may also negatively affect production quality. Therefore, neglecting maintenance can result not only in machine failures but also in costly repairs and production interruptions.

Vibration analysis, one of the predictive maintenance techniques, has become an indispensable method for detecting and addressing machine faults at very early stages. In this study, through measurements taken before and after maintenance on our machine, the analysis and calculations conducted from the spectrum and waveform graphs obtained via vibration analysis are practically demonstrated on an extrusion machine in a cable production line. The key is to regularly monitor vibration amplitude trends, take measurements, and intervene beforehand based on this data, ensuring that limit values in standards are not exceeded. In this way, machines can operate healthily, allowing faults to be detected early, and preventing potential disruptions and costly repairs.

Kaynaklar

1. Aydın, G., Meran, C. 2018. “Çimento sektöründe kestirimci bakımla arıza teşhisi ve önlenmesi,” Mühendis ve Makina, cilt 59, sayı 692, s.48-67.
2. Arslan, S. 2010. “Titreşim Analizi İle Fanlarda Arıza Teşhisi ve Kestirimci Bakım,” Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
3. Ghafari, S. H., Wang, W., Golnaraghi, M. F. 2004. “Condition Monitoring of Industrial Fans,” Canadian Machinery Vibration Association Conference, Ottawa, Kanada.
4. Yılmaz, M., Koç, T. 2022. “İmalat Süreçlerinde Kestirimci Bakımın Uygulanabilirliği,” İmalat Teknolojileri Dergisi.
5. Öztürk, R., Demir, H. 2023. “Endüstriyel Tesislerde Kestirimci Bakım Stratejileri,” Endüstriyel Yönetim Dergisi.
6. Özbay, A. 2002. “Predictive Maintenance and its Applications in Industry,” Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
7. Günindi, Z. Ö. 2024. “Kestirimci bakım stratejisi yöntemlerinden titreşim analizi ile döner ekipmanlarda yapısal esneklik arızasının tespiti,” Yüksek Lisans Tezi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kırşehir.
8. Şahin, U. 2021. “Rüzgar türbinlerinde titreşim analizi ve kestirimci bakım uygulaması,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.
9. Yıldırım, E., Karahan, M. M. F. 2015. “Titreşim analizi ile rulmanlarda kestirimci bakım,” C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, cilt 11, sayı 1, s.17-23.



PLC ve HMI Tabanlı Entegre Bakım Planlama ve Ekipman Ömrü İzleme Sistemleri

¹ Çağatay BAŞGÜL, ² Dr. Semih ÖNGİR,

¹ Elektronik Bakım Şefi, Petlas Lastik Sanayi ve Ticaret A.Ş./Kırşehir,

catay.basgul@petlas.com.tr

² Bakım Müdürü, Petlas Lastik Sanayi ve Ticaret A.Ş./Kırşehir,

semih.ongir@petlas.com.tr

Özet

Endüstri 4.0 ile birlikte üretim sistemlerinde dijitalleşmenin hız kazanması, bakım süreçlerinin daha verimli, öngörülebilir ve entegre hale getirilmesini gerekli kılmıştır. Geleneksel periyodik bakım uygulamaları, zaman veya makine kondisyonu tabanlı planlar ile yapıldığı için ekipman ömrünü kestirmede ve plansız duruşları önlemede yetersiz kalabilmektedir. Bu bağlamda, PLC (Programlanabilir Lojik Kontrolörler) ve HMI (Human-Machine Interface) sistemleri ile entegre edilen akıllı bakım yönetimi, ekipmanların çalışma süresi, elektriksel verileri, çevresel koşulları ve arıza geçmişi gibi parametreleri analiz ederek bakım kararlarının daha doğru ve zamanında alınmasına olanak tanımaktadır. Bu çalışmada, endüstriyel tesislerde bakım süreçlerinin dijitalleştirilmesine yönelik olarak PLC ve HMI tabanlı entegre bir sistem önerilmekte, kritik ekipmanların ömrünün izlenmesi, anormalliklerin tespiti ve bakım planlamalarının otomatik olarak yönetilmesi ele alınmaktadır. Ayrıca, enerji tüketimi, sıcaklık, nem gibi verilerle desteklenen kestirimci bakım yaklaşımlarının, bakım kalitesine ve operasyonel sürekliliğe etkileri incelenmektedir. Çalışma, bakım süreçlerinin daha etkin yönetilmesi ve ekipman güvenilirliğinin artırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kestirimci bakım, PLC, HMI, Ekipman ömrü izleme, Bakım planlama

Abstract

With the advent of Industry 4.0 and the acceleration of digitalization in production systems, it has become necessary to make maintenance processes more efficient, predictable, and integrated. Traditional periodic maintenance practices, carried out based on time or machine condition plans, may fall short in estimating equipment lifespan and preventing unplanned downtime. Smart maintenance management integrated with PLC (Programmable Logic Controllers) and HMI (Human-Machine Interface) systems enables more accurate and timely maintenance decisions by analyzing parameters such as equipment operating time, electrical data, environmental conditions, and failure history. In this study, an integrated system based on PLC and HMI is proposed for the digitalization of maintenance processes in industrial facilities, addressing the monitoring of critical equipment lifespan, detection of anomalies, and automatic management of maintenance planning. Furthermore, the effects of predictive maintenance approaches supported by data such as energy consumption, temperature, and humidity on maintenance quality and operational continuity are examined. The study was conducted with the aim of achieving more effective management of maintenance processes and enhancing equipment reliability.

Keywords: Equipment lifetime monitoring, HMI, Maintenance planning, PLC, Predictive maintenance

1. Giriş

Endüstride makinaların ve ekipmanların periyodik bakımları genellikle, zaman tabanlı veya makine kondisyonu bazlı planlara dayandığı için ekipman ömrünü doğru tahmin etmek ve plansız duruşları önlemek istenilen seviyenin altında kalabilmektedir. Bu bağlamda bakım planlamalarının yapılabileceği birçok yazılımda temin edilebilmektedir. Bu tarz yazılımların faydasının olduğu açıktır, fakat uygulamada birçok yazılım beklenilen şekilde kullanılmamaktadır. Bunun sebebi bazen yazılımın karmaşıklığı, bazen bakım personelinin veya planlama bölümünün takipsizliği olabilmektedir. Orta ölçekli firmalarda ise bu yazılımlara ayrılacak bütçe fazla olarak değerlendirilebilmektedir. Endüstriyel makinaların %61 gibi büyük bir oranında PLC ve HMI birimleri halihazırda kullanılmaktadır (Industrial Control Systems Market Report 2025–2034).

Çalışmamızda zaman ve makine kondisyonu gözlemine bağlı kalmaksızın, makine üzerindeki özellikle arıza yapma potansiyeli yüksek olan veya ömür döngüsü tamamlanmak üzere olan komponentlerin takibi için, zaten makinada mevcut olan bu 2 birimin kullanılması anlatılmaktadır. Bu sayede takip bakım planlaması için gerekli olan sorumluluk insandan makineye aktarılmakta, bakım planlama yazılımları olmayan ve bütçe ayıramayan firmalara da bir alternatif çözüm sunulmaktadır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

(Richard D. ve arkadaşları,2025) Yaptığı çalışmada tasarım ilkelerine dayalı olarak bir mühendislik sisteminde bakım müdahalelerinin planlanmasına yönelik dijital ikiz geliştirme sürecini sistematik biçimde ortaya koymuşlardır. Söz konusu ilkeler, hiyerarşik bir yaklaşım çerçevesinde ele alınmıştır. Öncelikle etkili ve verimli bakımın temel ilkeleri, ardından bakım planlamasına ilişkin ilkeler ve nihayetinde bakım planlaması için dijital ikiz tasarım ilkeleri sunulmuştur.

(Wuxi Mochuan Drives Technology Co.,Ltd, 2025) internet sitelerinde, endüstriyel HMI panellerin, öngörücü bakım stratejilerinin etkin şekilde uygulanmasına imkân tanıyan çeşitli özellikler sunduğunu belirtmektedir. Bu özellikler arasında gerçek zamanlı veri görselleştirme, makine öğrenmesi yetenekleri, uzaktan izleme ve kontrol ile veri analitiği gibi işlevler yer almaktadır. Bu işlevleri kısaca özetlemek gerekirse;

Gerçek zamanlı veri görselleştirme: HMI panelleri, ekipman performansı ve durumu hakkında kapsamlı bir görsel temsil sunar. Sıcaklık, basınç ve titreşim seviyeleri gibi gerçek zamanlı veriler, sezgisel grafik arayüzlerde gösterilerek hızlı ve bilinçli karar almayı mümkün kılar.

Makine öğrenmesi yetenekleri: Makine öğrenmesi algoritmalarıyla donatılmış HMI panelleri, veri eğilimlerini ve kalıplarını analiz ederek olası ekipman arızalarını öngörebilir. Tarihsel verilerle eğitilen bu algoritmalar, normal çalışma koşullarından sapmaları ve anormallikleri tespit ederek operatörleri gerekli önleyici adımları atmaları için uyarır.

Uzaktan izleme ve kontrol: Endüstriyel HMI panelleri sayesinde bakım operatörleri, ekipmanları merkezi bir konumdan uzaktan izleyip kontrol edebilir. Bu özellik, özellikle birden fazla tesisi olan veya coğrafi olarak dağınık makinelerle çalışan işletmeler için büyük avantaj sağlamaktadır.



Uzaktan erişilebilirlik, fiziksel olarak sahada bulunmaya gerek kalmadan gerçek zamanlı veri toplama, arıza giderme ve bakım faaliyetlerinin yürütülmesini mümkün kılar.

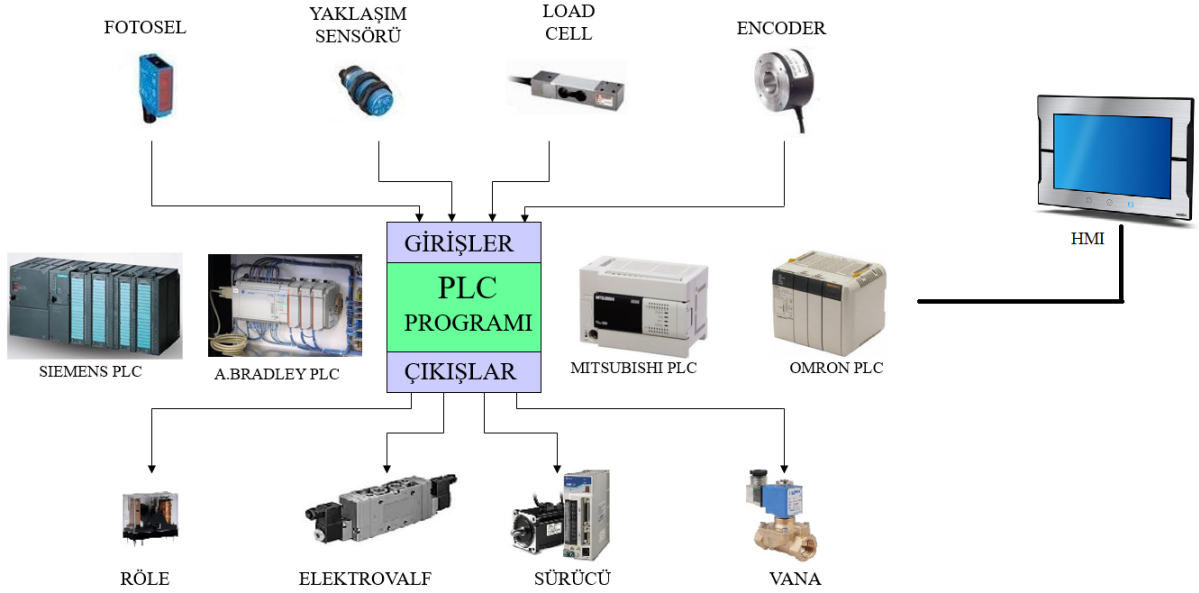
Veri analitiği işlevleri: Veri analitiği yetenekleriyle donatılmış HMI panelleri, sensörler ve ekipmanlardan toplanan büyük veri kümelerini işleyebilir. Bu analitik araçlar, farklı performans parametreleri arasındaki korelasyonları ortaya çıkararak bakım operatörlerinin veriye dayalı kararlar almasını sağlar. Ayrıca, geçmiş verilerin incelenmesi tekrarlayan sorunların belirlenmesine, kök neden analizinin yapılmasına ve uzun vadeli çözümlerin uygulanmasına olanak tanır.

(Riccardo M., ve arkadaşları, 2025) yaptıkları çalışmada, öngörücü bakım çerçevesinde gerçek zamanlı çıkarım yapabilmek amacıyla gelişmiş bir programlanabilir lojik kontrolör (PLC), üzerinde bir sinir ağı modelinin uygulanma potansiyelini incelemişlerdir. Çalışma, verilerin bulut altyapısına bağımlı olmaksızın doğrudan yerel cihazlarda işlenmesini hedeflemektedir. Bu yaklaşımla, gecikmenin en aza indirilmesi, veri güvenliğini artırılması ve veri iletimi için gerekli bant genişliğini azaltılması hedeflenmiştir. Böylelikle, anlık tepki süreleri gerektiren endüstriyel uygulamalar için ideal bir çözüm sunulmuştur.

Akustik veriler kullanılarak, bir konvolüsyonel sinir ağı (CNN) mekanik bir test tezgâhının dönme hızını çıkarmak üzere devreye alınmıştır. Bulgular, PLC' nin ölçeklenebilir ve verimli öngörücü bakım çözümlerini destekleme potansiyelini vurgulamakta, gerçek zamanlı anomali tespiti konusundaki gelecekteki araştırmalar için zemin hazırlamaktadır. Kısıtlı kaynaklara sahip kompakt donanımlar üzerinde makine öğrenmesi yeteneklerini mümkün kılmaktadır. Bu, yaklaşımı farklı endüstriyel ortamlar için uyarlanabilir, maliyet etkin bir çözüm haline getirmektedir.

3. Gerçekleştirilen çalışma

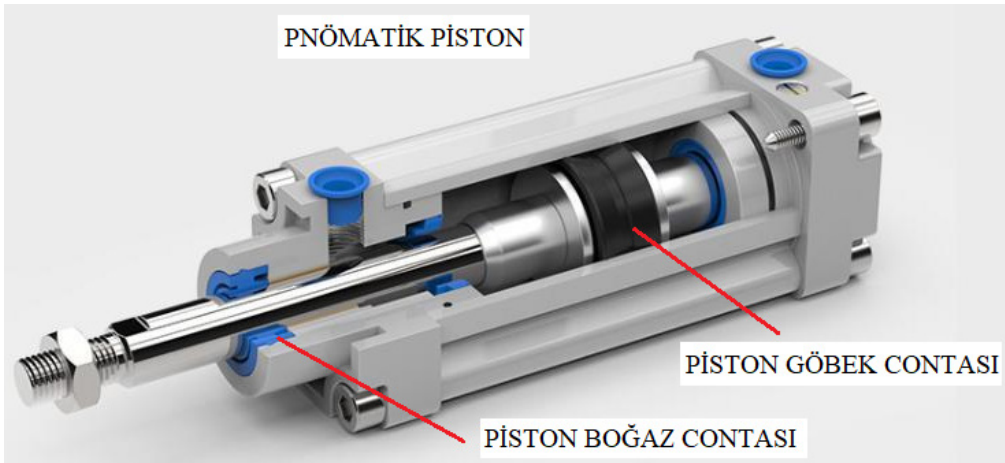
Endüstriyel ortamdaki makinaların kontrolü ağırlıklı olarak PLC' ler ile kontrol edilmektedir. Bu kontrol PLC içerisinde çalıştırılan program ile gerçekleşmektedir. PLC'ler sahadan aldığı bilgileri giriş olarak, sahaya göndermek istediği bilgileri ise çıkış olarak değerlendirir. Çalışmamızda odak noktamız PLC ile bağlantılı olan çıkışlar olduğundan, çıkış olarak bağlanıp kontrol edilecek olan aktüatörler odak noktamız olacaklardır. Görsel bir arayüz olarakta PLC den bilgi alıp, PLC ye bilgi gönderebilen, gerektiğinde bu bilgileri görselleştirebilen HMI' larda çalışmamızın bir diğer önemli ögesiştir. Şekil 1' de PLC giriş ve çıkışı olarak kullanılabilen bazı örnekler ile bir HMI görseli sunulmaktadır.



Şekil 1: PLC, giriş-çıkış elemanları örnekleri

Kullanılacak olan PLC' nin markasının çalışmamızı etkileyecek ciddi bir etkisi yoktur. HMI bağlantısı yapılabilmesi yeterlidir. Kullanılacak HMI 'm ise ne kadar çok görselleştirme kabiliyeti varsa çalışmanın sunabileceği verilerin görselleştirilmesi o kadar kolay olacaktır.

Ana fikir PLC programı içerisinde yazılmış, çıkış olarak kullanılan aktüatörlerin veya aktüatörleri harekete geçiren PLC çıkışlarından veri alan komponentlerin kaç kez aktif olduğunun sayılmasıdır. Buna bağlı olarak ta aktüatörlerin kullanım sıklığı takip edilebilmekte ve bir ömür tahmini yapılabilmektedir. Örneğin bir pnömatis pistonun kaç kez çalıştığı takip edilerek PLC ye belli bir sayıdan sonra uyarı verdirilebilmektedir. Hatta bir başka sayıda da sistemin durdurulması ve bakımı yapılmadan çalışmasına izin verilmemesi sağlanabilir. Daha da ileri götürüp detaylandırma yapacak olursak, pistonun ne zaman contalarının değişmesi gerektiği ne zaman pistonun komple değişmesi gerektiğini tanımlayabiliriz. Şekil 2'de pnömatis piston ve iç yapısı yapıları örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 2: Pnömatis piston ve iç yapısı

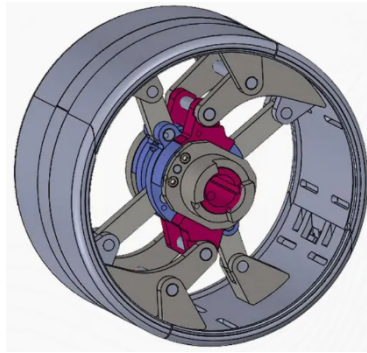
Pnömatik piston için verilen bu örnek, PLC programı tarafından kontrol edilen tüm aktüatörler için geçerlidir. Aynı mantıkla motorlar, röle ve kontaktörler, sürücüler, valfler ve elektro-valfler gibi birçok PLC çıkışıyla kontrol edilen aktüatör takip edilebilir.

Daha detaylı bir gözlem için **eğer** PLC'nin analog bir girişi mevcut ise, bu giriş ile ortam sıcaklığı ölçümü yapılabilir. Sonrasında bu ölçüm ile ömür veya bakım süreleri yeni ilave edilen sıcaklık parametresi ile daha sağlıklı şekillendirilebilir. Kontrolü sağlanan aktüatör çok kritik veya pahalı yüksek değerli bir ekipman ise bu amaca hizmet etmek amacı ile PLC donanımına ilave olarak ta sonradan bu analog giriş modülü eklenebilir.

Yine kritik olduğu öngörülen bir motorun ne kadar süre aktif olduğu bilgisinin yanına, bir diğer analog giriş ile çektiği akımlar bir akım sensörü tarafından PLC'ye iletilir. Bu sayede motorumuzun hem aktif olduğu süre hem aktifken hangi ortam sıcaklığında çalıştığı (bunu motorun sıcaklık ölçümü ile de değiştirebiliriz), çalışma sırasında ne kadar akım çekerek çalıştığı gibi bilgiler yeni ömür ve bakım periyodu süresi tespiti için kullanılabilir.

Bu ekstra imkanlar yok ise en azından PLC programına yazılacak olan güncel tarih ve saat bilgisi ile ekipmanın gece veya gündüz **mü** çalıştığı, hangi mevsimde çalıştığı veri olarak değerlendirilebilir. Coğrafi konumun özelliklerine göre de standart ortalama bir sıcaklık verisi öngörülebilir. Yapılacak detaylandırma tamamen programcının ve kullanıcının hayal gücüne bağlı olarak artacaktır.

HMI'larda oluşturulacak sayfalardan takip edilen tüm veriler oluşturulacak veri takip sayfasından izlenebileceği gibi, takip edilen ekipmanlarda makine üzerindeki konumuyla görselleştirilerek ve uyarı limitlerinde ekipmanlar renklendirilerek takibi daha kolay hale getirmek mümkündür. Örneğin bakım veya değişim ihtiyacı olmayan ekipmanlar yeşil, bakımı yaklaşan ekipmanlar sarı, değişmesi veya bakımı çok gecikmiş ekipmanlar için kırmızı renk kullanılabilir. Yine bu programcı ve kullanıcının hayal gücü ve beklentilerine göre çok daha detaylı hale getirilebilir. Örneğin yağlanma zamanı gelen yerler için farklı bir renk kullanılabilir. **Şekil 3'te** göbeği yağlanması gereken bir lastik imal makinesi tamburu temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 3: Lastik imal makinesi tamburu temsili gösterimi

Görsellerdeki renk seçimi ve hangi parametreleri takip etmemiz gerektiği konusunda oldukça esnek olan bu yapının bakım ve planlama personellerinin yapacağı bakım programlamasına yardımcı olacağı düşünülmektedir.

4. Sonuçlar

Makinelerde zaten mevcut olan kabiliyetler ile alternatif yeni bir bakım planlama ve ekipman ömrü ve bakım zamanı belirleme sistemi geliştirilmiş, bakım personellerine örnekler ile tanıtılmıştır. Fikri verilen sistem kişilerin beklentileri ve hayal güçlerine bağlı olarak geliştirilmeye çok **açık bir sistemdir.**

5. Kaynaklar

Industrial Control Systems Market Report 2025–2034 Global Growth Insights (15/09/2025)

Richard D., Wenxu L., Frits van R., Phil S. (2025), Maintenance planning using a digital twin: principles and case studies, *Reliability Engineering & System Safety* Volume 265, Part A, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111496>

<https://www.mochuan-drives.com/a-news-using-industrial-hmi-panels-for-predictive-maintenance> ,Wuxi Mochuan Drives Technology Co.,Ltd (15/09/2025)

Riccardo M., Luigi M., & Andrea M. (2025), Integrating Machine Learning for Predictive Maintenance on Resource-Constrained PLCs: A Feasibility Study, *Sensors* (Basel). 2025 Jan 17;25(2):537. doi: 10.3390/s25020537



Rulmanlarda Titreşim Tabanlı Kestirimci Bakım: Rulman Kusurlarının 5-Dof Şaft-Yatak Modeli Kullanılarak Spektral Analizi

Vibration-Based Predictive Maintenance of Rolling Bearings: Spectral Analysis of bearing defect using a 5-DoF Shaft-Bearing Model

Hikmet Bal¹, Turan Şişman², Nizami Aktürk³,

¹ hikmet.bal@ostimteknik.edu.tr, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-9062-6469>

² t_sisman@ostimteknik.edu.tr, ORCID No : <https://orcid.org/0009-0003-6545-6244>

³ nakturk@gazi.edu.tr, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-1398-8145>

DOI : <http://dx.doi.org/10.31796/ogummf.xxxxxx>

e-posta : hikmet.bal@ostimteknik.edu.tr

Özet

Ev aletlerinden uzay araçlarına kadar dönel mekanik sistemlerde bağlı hareketin aktarılmasında kullanılan yaygın yataklama elemanı bilyeli rulmanlardır. Bununla birlikte, hatasız olsalar bile titreşim ve gürültü üretebilirler. Bu nedenle, dönel sistemlerdeki enerji verimliliği, sistem ömrü, gayrifaal kalma süreleri gibi önemi parametrelerin iyileştirilmesi için rulmanların incelenmesi elzemdir. Sistem titreşimlerinin izlenmesi ve durumunun tespitine yönelik yaklaşımları içeren kestirimci bakım yöntemi bu amaç için en uygun yaklaşımı teşkil etmektedir.

Bu çalışmada, açışal temaslı bir çift rulman ile yataklanmış bir 5 DoF rijit şaft-rulman sisteminin titreşim davranışı değişik ön yükleme, şaft hızı, ve rulman hataları için elde edilmiştir. Non-lineer hareket denklemlerinin nümerik çözümlerinden elde edilen titreşim verileri zaman ve frekans tanım bölgesinde sinyal işleme teknikleri de kullanılarak analiz edilmiş ve rulman hatalarının titreşim davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Sonuçlardan; ön yükleme artışının, rulman hata frekanslarının spektrumunda belirginliğinin azalttığı, rulman hata frekanslarının şaft hızını takip ettiği, rulman frekanslarının şaft doğal frekansını tetiklemesi durumunda rezonansın oluştuğu görülmüştür. Ayrıca hata büyüklüğünün spektrumdaki hata frekansının bant genişliğini etkilediği anlaşılmaktadır. Önerilen modelleme ve analiz sonuçları, endüstriyel uygulamalardaki titreşim verilerinden rulman durumunun belirlemesindeki davranış karakteristiklerini zaman ve frekans tanım alanında ortaya koymakta, böylece kestirimci bakıma yönelik etkili bir araç olarak sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kestirimci Bakım, Bilyeli Rulman, Titreşim, Sinyal İşleme, Spektrum

Abstract

Ball bearings are the most common bearing element used to transmit relative motion in rotational mechanical systems, from household appliances to spacecraft. However, they can generate vibration and noise even when they are defect free. Therefore, in order to improve the important parameters such as energy efficiency, system life and downtime in rotating systems, it is essential to analyze the bearings. Predictive maintenance method includes monitoring system vibrations approaches to determine their condition, is the most suitable approach for this purpose.

In this study, the vibration behavior of a 5 DoF rigid shaft-bearing system supported by a pair of angular contact bearings is obtained for different preload, shaft speed, and bearing defects. The vibration data obtained from numerical solutions of the nonlinear equations of motion are analyzed using signal processing techniques in the time and frequency domain and the effects of bearing faults on the vibration behavior are investigated.

The results show that the increase in preload, reduces the visibility of the bearing failure frequencies in the spectrum, the bearing failure frequencies corresponds to the shaft speed, and resonance occurs when the bearing frequencies exit the shaft natural frequency. The proposed modeling and analysis results demonstrate the characteristic behaviors of bearing condition identification from vibration data in industrial applications within both time and frequency domains, thereby it is offered as an effective tool for predictive maintenance.

Keywords: Predictive Maintenance, Rolling Bearing, Vibration, Signal Processing, Spectrum



1. Giriş

Bilyeli rulmanlar, düşük sürtünme ve verimli dönüş sağlayarak rotorun çalışmasında kritik bir rol oynar. Bununla birlikte, bilyeli rulman arızaları önemli gayrifaal sürelerine ve onarım maliyetlerine yol açabilir. Dönel sistemlerin izlenmesi, bilyeli rulmanlarının sağlığı hakkında değerli bilgiler sağlayabilir ve olası arızaların meydana gelmeden önce tespit edilmesine yardımcı olabilir.

Bu amaçla Kestirimci Bakım (PdM) (Hashemian 2011; Patil ve Gaikwad 2013) such as resistance temperature detectors (RTDs, potansiyel tespit etmek için veri ve sinyal analizini kullanan bu bahsedilen yöntemleri uygulayan bir bakım stratejisidir. PdM'deki en önemli zorluklardan biri, bir makinenin arıza durumunun teşhis edilmesidir. Bir arızanın belirtileri makinenin türüne, arızanın ciddiyetine ve makinenin kullanım ömrünün hangi aşamasında olduğuna bağlı olarak değişebileceğinden bu zor olabilmektedir.

Genel olarak, bir makinenin ömründeki: “çalışmaya başlama”, “verimli çalışma dönemi” ve “arıza” (Nakajima 1988; Shagluf ve Longstaff 2014) reduce equipment downtime competently and similarly identify the machines' performance.”, “container-title”: “Proceedings of Maintenance Performance Measurement and Management (MPMM aşamalarının kendine özgü semptomları titreşim ve gürültünün incelenmesinde kullanılan göstergeleri oluşturmaktadır. Makine ömrü evresine ek olarak, makinenin türü, arızanın ciddiyeti ve makineden toplanan veriler kullanılan arıza durumunu teşhis etmek diğer faktörlerdir. PdM uygulayıcıları tüm bu faktörleri incelemelerinde göz önünde bulundurarak arıza teşhisinin doğruluğunu artırabilmektedirler.

Rulman titreşim karakteristik frekansları kestirimci bakım için kullanılabilir. Rulmanda hata oluştuğunda teşhis için dış yatak (BPFO), iç yatak (BPFI), yuvarlanma elemanı (BSF) ve kafes (FTF)) frekansları kullanılabilir (Harris ve Kotzalas 2006). McFadden ve Smith (McFadden ve Smith 1984) but that there is an incomplete understanding of the factors which control the appearance of this spectrum. Until the envelope spectrum can be fully explained, use of the technique is limited”, “container-title”: “Tribology International”, “DOI”: “10.1016/0301-679X(84, hataların önceden belirlenebilmesi için yüksek frekansların takip edilmesi ve bu frekanslardaki artışın incelenmesi gerekli olduğu belirtmişlerdir, fakat yüksek frekans bölgesinde çalışmak gürültü ve çözünürlük gibi sebeplerden dolayı zorluklar içermektedir (Bendat, J.S. and Piersol, A.G. t.y.). Bently (Bently 1982), rulman titreşimleri incelenirken düşük, orta ve yüksek frekans olmak üzere üç ayrı bölgede inceleme yapılması önermektedir.

Rulman arızalarının tespiti konusunda pek çok çalışma bulunmaktadır. Özellikle bilgisayarların ve titreşim ölçümünde kullanılan sensör ve şartlandırıcıların gelişmesi ve ucuzlaması ile bu çalışmalar büyük bir ivme kazanmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan teknikler ve bunların etkinliği titreşim analizi uygulamaları için yol göstericidir. Rulmanlar çalışmaları sırasında karakteristik titreşimlere neden olduklarından, bu titreşim sinyallerini analiz ederek ve izleyerek makinelerin çalışabilirliğini kontrol etmek iyi bilinen bir yöntemdir. Makinelerin çalışabilirlik kontrollerinin bu şekilde yapılarak bakım ve onarım maliyetlerinin ve dolayısıyla toplam maliyetin azaltılması endüstride yerleşik bir uygulamadır (Barron 1996; Cempel 1988, 1991; Dimentberg, Frolov, ve Menyailov 1991; Renwick 1984) these programs offer great flexibility

since they may be designed for basic, Intermediate, or advanced needs. In addition a variety of monitoring methods may be incorporated in a program, ranging from basic sensing techniques to sophisticated hardwired computer stems. A viable condition monitoring program provides industry with a practical and cost-effective solution to the dilemma of accurately scheduling plant maintenance and credibly diagnosing heavy machinery problems.”,”container-title”:”IEEE Transactions on Industry Applications”,,”DOI”:”10.1109/TIA.1984.4504447”,,”ISSN”:”1939-9367”,,”issue”:”3”,,”note”:”event-title:IEEE Transactions on Industry Applications”,,”page”:”519-527”,,”source”:”IEEE Xplore”,,”title”:”Condition Monitoring of Machinery Using Computerized Vibration Signature Analysis”,,”volume”:”IA-20”,,”author”:[{“family”:”Renwick”,,”given”:”John T.”}],,”issued”:[{“date-parts”:[[“1984”,5]]}],},{“id”:”1AmQPq9A/m4zsDzbl”,,”uris”:[“http://zotero.org/users/local/iT4QuFd6/items/YV3WEYGE”],,”itemData”:{“id”:287,”type”:”article-journal”,,”abstract”:”The paper presents an outline of the methods and techniques created and applied in the vibroacoustical (VA. Bu uygulamada iki önemli aşama vardır: Birincisi arızanın tespit edilmesi, ikincisi ise endüstriyel uygulamalar için daha önemli olan arızalı rulmanın ne zaman değiştirilmesi gerektiğinin belirlenmesidir (Gerval, Morel, ve Querre 1994)we present two different approaches in the field of information processing and signal processing. These two different approaches have been experimented in two different contexts: (1. Diğer taraftan, bir rulmanın erken değiştirilmesi çalışabilir bir parçanın devre dışı kalmasına, geç değiştirilmesi ise makinenin durmasına neden olacağından işletme maliyetlerini artırmaktadır. Bu nedenle, titreşim analizi ve sinyal işleme gibi tekniklerle, rulmanların durumu hakkında daha ayrıntılı bilgi edinmek olası arızaların erken tespitini ve işletme/bakım maliyetlerin azaltılmasını sağlamaktadır.

Titreşim ölçümlerinin incelenmesinde tepe genliklerinin, kurtosis ve crest faktör değerinin takip edilmesi gibi istatistiksel teknikler ve spektral yöntemler mevcuttur (Cempel 1991; Harris ve Crecelius 1986). Bu temel tekniklerin uygulanması ve etkinliği araştırmacılar tarafından (Barron 1996; Cempel 1991) (Tandon ve Choudhury 1999)sound intensity and acoustic emission have been reviewed. Recent trends in research on the detection of defects in bearings, such as the wavelet transform method and automated data processing, have also been included. © 2000 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.”,”container-title”:”Tribology International”,,”DOI”:”10.1016/S0301-679X(99 değerlendirilmiştir.

Titreşim frekansı veya genliğindeki değişiklikler bilyeli rulmanlarda bir sorun olduğunu gösterdiğinden (Sinha 2015), FFT frekans analizi ile elde edilen spektrumda yüksek tepe değerlerine sahip bölgeler bulunabilir ve bu tepe değerlerine dayanarak titreşim artışının nedeni belirlenebilir (Caldero ve Zoeke 2019)rotating components are usually harder to monitor, since sensors are difficult to be mounted on them and continuously read during operation. However, the characteristics of rotating components may provide useful information about the machine condition to be included in monitoring algorithms, specially for long-term data analysis. In this work, wireless vibration monitoring of rotating machine parts is investigated using surface acoustic wave (SAW). Titreşimin nedenini teşhis edilmesiyle ve frekans ve faz analizi yoluyla mekanik sorunlar açığa çıkarılabilmektedir (Antonino-Daviu ve Popaleny 2018). Temel olarak bu teknikte titreşim verilerini bir ön işlem, filtreleme, matematiksel dönüşümleri uygulanmaktadır (Antoni 2006; Antoni ve Randall 2006; Bolaers vd. 2004; Dron, Bolaers, ve Rasolofondraibe 2004; Kar ve Mohanty 2004; Yang, Mathew, ve Ma 2005; Yu, Cheng, ve Yang 2005)kurtosis. Bütün bu gelişmiş hata belirleme teknikleri üzerinde çalışılmakla birlikte, bu teknikleri kullanarak hataları otomatik olarak bildiren hata ayıklama sistemleri üzerindeki çalışmalar da devam etmektedir



(Ericsson vd. 2005).

Rulmanların titreşim analizlerini yaparken standart istatistiksel metotları yanı sıra çevrimsel (cyclic) istatistiklerin kullanılması daha açık sonuçlar verebilmektedir (Antoniadis ve Glossiotis 2001). Bu analiz tekniği periyodik olarak değişen istatistiklerin modellenmesini kolaylaştırdığı gibi rulman sisteminin cevabında mevcut modülasyon mekanizmalarının ortaya çıkartılmasında da oldukça etkilidir (Li ve Qu 2003; Randall, Antoni, ve Chobsaard 2001) the second order cyclic statistics, i.e. cyclic autocorrelation and cyclic spectrum, are introduced. A method of demodulation based on cyclic autocorrelation is derived from a signal model. The modulators and carrier are exhibited, respectively, in low- and high-frequency band of cyclic frequency domain. The three-dimensional spectral correlation figure, which represents cyclic frequency, frequency and spectral correlation strength simultaneously, is developed to express the demodulation results clearly. The method is tested by simulation signal and applied to diagnose rolling bearing faults. It obtained more information than other conventional methods, such as the frequency domain and the envelop detection. Furthermore, its effect is demonstrated by comparing with the wavelet envelope demodulation.”,”container-title”:”Journal of Sound and Vibration”,”DOI”:”10.1016/S0022-460X(02. İstatistiksel sinyal işleme teknikleri, titreşim verilerinden rulmaların durumunun erken teşhisi için kullanılması pek çok araştırmacı tarafından ele alınmıştır (Boashash, Aïssa-El-Bey, ve Al-Sa’d 2018; Du vd. 2020; Motlani, Gurav, ve Sondkar 2018; Sivakumar ve Nedumaran 2018; Thomazella vd. 2019) Empirical Mode Decomposition (EMD. Hongxing ve ark. (Hongxing vd. 2000)’da zaman bölgesi ortalaması metodunu hesaplayan algoritmayı geliştirmişler ve sonuçları deneysel çalışmayla karşılaştırmışlardır.

Bir zaman-frekans etki alanı tekniği olan dalgacık dönüşümleri ise doğrusal ve durağan olmayan (non-linear and non-stationary) karakteristiklerinin ortaya çıkartılmasında çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Neild, McFadden, ve Williams 2003) the moving window auto-regressive (AR. Doğru uygulandığı takdirde endüstriyel uygulamalarda iyi sonuçlar verdiği literatürde görülmektedir (Goumas, Zervakis, ve Stavrakakis 2002) the occurrence of occasional transient disturbances makes the recorded signal nonstationary, especially during the start-up of an engine. Through the wavelet analysis, transients can be decomposed into a series of wavelet components, each of which is a time-domain signal that covers a specific octave frequency band. Disturbances of small extent (duration. Şeker ve Ayaz (Seker ve Ayaz 2003)”container-title”:”Journal of the Franklin Institute”,”DOI”:”10.1016/S0016-0032(03 dalgacık analizi ile elektrik motorlarındaki arktan dolayı rulmanlarda oluşan hataları ve yaşlanmayı takip etmiş ve değişik frekans bantlarındaki davranışı tespit etmişlerdir. Sheen ve Hung (Sheen ve Hung 2004) a wavelet-based envelope function derived from Morlet wavelet is proposed to apply in the envelope extraction for vibration signal. It is a complex function constructed by an orthogonal function pair. With a systematic method, the function parameters can be designated. From numerical implementation, it is found that the wavelet-based envelope function has the satisfactory properties of fast waveform convergence, constant passband gain and less phase distortion. For practical interest, the wavelet-based envelope function with 3-dB cut-off frequency is presented and carried out on an IBM compatible computer with a TMS320C32 DSP interface card. Finally, it is shown that the wavelet-based envelope function could be effectively applied in the vibration envelope extraction for a roller bearing system.”,”container-title”:”Mechanical Systems and Signal Processing”,”DOI”:”10.1016/S0888-3270(03 da dalgacık tabanlı bir zarf

fonksiyonu oluşturarak rulmanlardaki hataları alçak ve yüksek frekans bantlarında izlemişlerdir. Geliştirilen algoritma bir sayısal sinyal işleyici aracılığıyla arızayı gerçek zamanlı olarak takip etmek için kullanılmış ve titreşim sinyalinin zarfını çıkartmakta etkin bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Rulmanlı sistemlerin durumlarının titreşim analiziyle doğru olarak belirlenmesi için yapılan titreşim ölçümlerinin mümkün olduğunca sağlıklı ve gürültü içeriğinin az olması gereklidir. Frekansların doğru biçimde tespit edilebilmesi için rulmanın bağlı olduğu şaftın hızının iyi bilinmesi gereklidir (Ocak ve Loparo 2004) "estimation of the running speed and the bearing key frequencies are required for failure detection and diagnosis.", "container-title": "Mechanical Systems and Signal Processing", "DOI": "10.1016/S0888-3270(03 veya kafes hızlarının da tespiti gerekebilmektedir (Mcfadden ve Toozhy 2000). Bu nedenle titreşim sensörünün yerleştirildiği yer de önem kazanmaktadır (Bogard, Debray, ve Guo 2002).

Kotzalas ve Harrison (Kotzalas ve Harris 2000) rulmandaki hatanın ilerlemesi ve oluşum sebepleri ile bu süreç boyunca titreşimlerin incelenmesine ilişkin çalışmalarında teorik rulman ömrü için yeni bir model de sunulmaktadır. Williams ve ark. (Williams vd. 2001)'nın çalışması ise rulmanın kullanıma ilk başladığı andan ömrünün sonuna kadar durumunun takibini içermektedir.

Günümüzde yapay zeka ve makine öğrenmesi teknikleri, titreşim veya akım verilerini otomatik olarak analiz etmek ve bilyeli rulmanlarla ilgili bir soruna işaret edebilecek kalıpları veya anormallikleri belirlemek için kullanılabilir. Bu teknikler, sağlıklı ve arızalı bilyeli rulmanlardan elde edilen veriler üzerinde eğitilerek doğru ve verimli arıza tespitine olanak tanır. Bununla birlikte, durum tahmini veya arıza sınıflandırmasında iyi bir sonuç elde etmek için, çok daha gerçekçi çalışma koşulları ve arızalar içeren, yeterli eğitim verisi (training data) gereklidir. Yapay zekâ ile hata teşhisi konusundaki gelişmeler ve bulanık mantık uygulama stratejileri Frank ve Köppen-Seliger (Frank ve Duisburg t.y.) tarafından özetlenmiş, hata teşhisinin kontrolünde analitik yöntemlerle birlikte önemli rol oynadığını belirtmiştir. Güncel teknolojiler rulmanlardaki hata tespiti için bilgisayarların daha etkin kullanımına sebep olmuştur. Liu ve ark. (Liu, Singonahalli, ve Iyer 1996) radyal yönde ölçülmüş titreşim sinyallerini inceleyerek hata oluşumundan önce ve hatalı durumu gösterebilen bir uygulama geliştirmişlerdir. Bu program kurtosis gibi çeşitli zaman tanım bölgesi özelliklerinin yanı sıra bulanık mantıkla modelleme de yaparak hataları sınıflandırabilmektedir. Çalışmalarında ayrıca, bulanık mantık metodunun %100 oranında başarı ile hata tespitini yapabildiğini ileri sürmüşlerdir.

Bu yöntemlerin her birinin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları vardır ve yöntem seçimi uygulamanın özel gereksinimlerine ve mevcut kaynaklara bağlı olacaktır. Bilyeli rulmanların sağlığına ilişkin daha kapsamlı bir değerlendirme sağlamak için bu yöntemlerin bir kombinasyonu da kullanılabilir. Diğer taraftan, bu yöntemlerin etkin şekilde kullanımı için titreşim verilerinin anlamlı ve diğer makine elemanlarının titreşimlerinden mümkün olduğunca etkilenmeyecek bir şekilde toplanması önemlidir.

Rulmanların durumunun daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmesi için, dört titreşim frekansı vardır: dış yuva (BPFO), iç yuva (BPFI), yuvarlanma elemanı (BSF) ve kafes (FTF) (Kotzalas ve Harris 2000). Bu karakteristik frekanslar, özellik çıkarımı için AI ve ML algoritmalarında da kullanılmaktadır.



Genel olarak literatürden, rulman kusurlarının (çukurlar veya oyuklar) erken aşamalarda keskin dürtüsel titreşimler titreşimlere yol açtığı, çok geniş bir frekans aralığını kapsayan ultrasonik dalga oluşturduğu, rulmandaki bozulma ilerledikçe ultrasonik frekans bileşenine ek olarak rulmanın doğal frekanslarının da spektrumda belirginleştiği, durum daha da kötüleşirse spektrumdaki belirli rulman kusur frekansları çok daha fazla görünür olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, yuvarlanma yolunun plastik deformasyona bağlı girintilebilmekte, brinelling gibi bazı hatalar için, yuvarlanma yolunun kenarları veya bilye kusurları yuvarlanmaya başlamaktadır (Lecinski 2022) "container-title": "CBM CONNECT®", "title": "Bearing Problems: Fault Frequency and AI-Based Methods | CBM", "title-short": "Bearing Problems", "URL": "https://www.cbmconnect.com/bearing-problems-fault-frequency-and-artificial-intelligence-based-methods/", "author": [{"family": "Lecinski", "given": "Pawel"}], "accessed": {"date-parts": [{"2023", 8, 28}], "issued": {"date-parts": [{"2022", 2, 3}]}}}, "schema": "https://github.com/citation-style-language/schema/raw/master/csl-citation.json"}. Ayrıca rulman bileşenlerinden kopan metal parçalar, aslında daha derin kusurların bazılarını doldurabilir ve buralar yuvarlanma elemanları tarafından ezilerek düzlenebilir (healing). Böylece rulman içindeki boşluklar önemli ölçüde artırabilmekte ve gevşeklik yaratabilmektedir. Bu durum frekans spektrumunda genişbantlı titreşimler olarak görülmektedir (Randall 2010; Randall ve Antoni 2011) in particular in the presence of strong masking signals from other machine components such as gears. Rather than being a review of all the current literature on bearing diagnostics, its purpose is to explain the background for a very powerful procedure which is successful in the majority of cases. The latter contention is illustrated by the application to a number of very different case histories, from very low speed to very high speed machines. The specific characteristics of rolling element bearing signals are explained in great detail, in particular the fact that they are not periodic, but stochastic, a fact which allows them to be separated from deterministic signals such as from gears. They can be modelled as cyclostationary for some purposes, but are in fact not strictly cyclostationary (at least for localised defects).

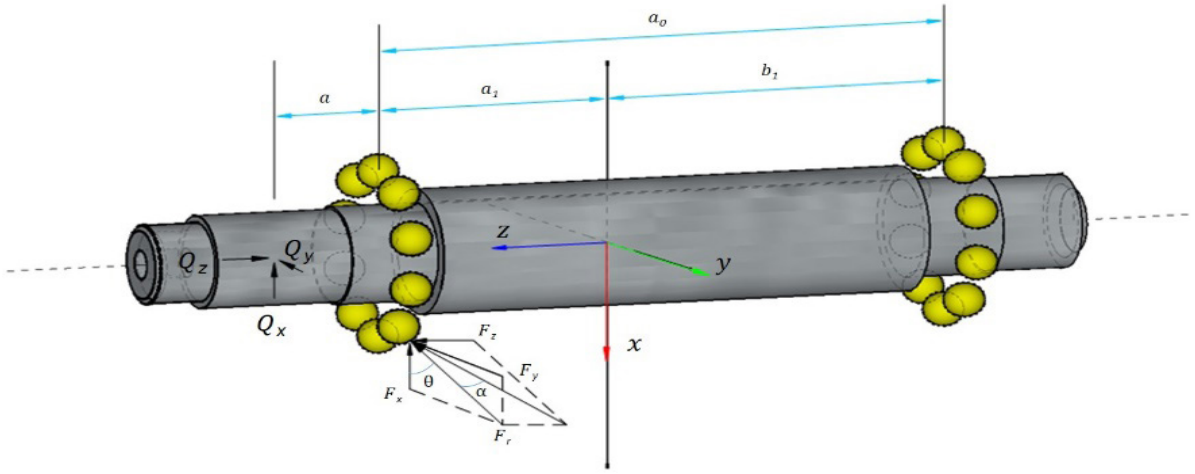
Rulmanlarla yataklanmış sistemler konusunda çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen özellikle hata frekanslarının üst harmonikleri ile sistemin doğal frekanslarının çakışması sırasında oluşan rezonans durumunu ifade eden teorik çalışmaların sayısı azdır. Rulmanların titreşimleri ve rulman hatalarının titreşim ölçümlerinin analiziyle tespiti konusunda birçok sinyal analiz ve çözümleme tekniği kullanılmaktadır. Ancak teorik olarak bu hataların etkilerinin ortaya konması, kestirimci bakım çalışmalarında elde edilen ölçümlerin doğru analizi için kritik öneme sahiptir. Bu çalışma ile rulman hatalarına ilişkin titreşim davranışı teorik model kullanılarak elde edilmiş, literatürde yer alan ve rulman hataların tespiti için uygulanan sinyal analiz teknikleri ile incelenmiştir. Böylece kestirimci bakım çalışmalarında yer alan teknik personele daha derinlemesine içgörü kazandırılması hedeflenmiştir.

2. Şaft- Rulman Sistemi Modeli

Bu çalışmada Şekil 1'deki, yükün ortada kaldığı ve iki tarafından açısız temaslı rulmanlar ile yataklanmış en genel rulman şaft sistemi konfigürasyonu esas alınmıştır. Sisteminin hareket denklemi Eş.1'de verilmiştir. Hareket denklemlerinin türetimine ilişkin daha detaylı bilgi için literatürdeki kaynaklar başvurulabilir [Harris T., Akturk N., Karaçay T.] .

Şekil 1'de sadece bir bilye için gösterilen temas kuvveti, Hertz temas teorisi kullanılarak Eş.2. ile

hesaplanmıştır. Burada yer alan elastik deformasyon δ_i ve temas açısı α_i için kullanılan denklemler Ek-1’de sunulmuştur. Temas kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan elastik deformasyon δ_i , dinamik yükler dolayısıyla her bir bilye için farklı değere sahiptir. Bilyedeki elastik deformasyon, iç bilezik ve dış bileziğin birbirlerine göre bağlı hareketi kullanılarak belirlenebilmektedir [Harris, Nizami Hoca, Tuncay Hoca]. Ayrıca Eş.1’deki φ y -ekseni etrafındaki açısal yer değiştirmeyi, ψ x -ekseni etrafındaki açısal yer değiştirmeyi, R yüksüz durumda bilye merkezi odak noktasının yarıçapını göstermektedir. Sonrasında her bir bilyedeki hesaplanan temas kuvveti F_j ’nin şaft kütle merkezine (CG) etkisi Eş.3 kullanılarak hareket denkleminde dahil edilmiştir.



Şekil 1 Şaft – rulman sistemi konfigürasyonu.

(1)

$$F_i = k_{eq} \delta^{3/2}$$

(2)

$$F_x = F_j \cos \alpha_j \cos \theta_j$$

$$F_y = F_j \cos \alpha_j \sin \theta_j$$

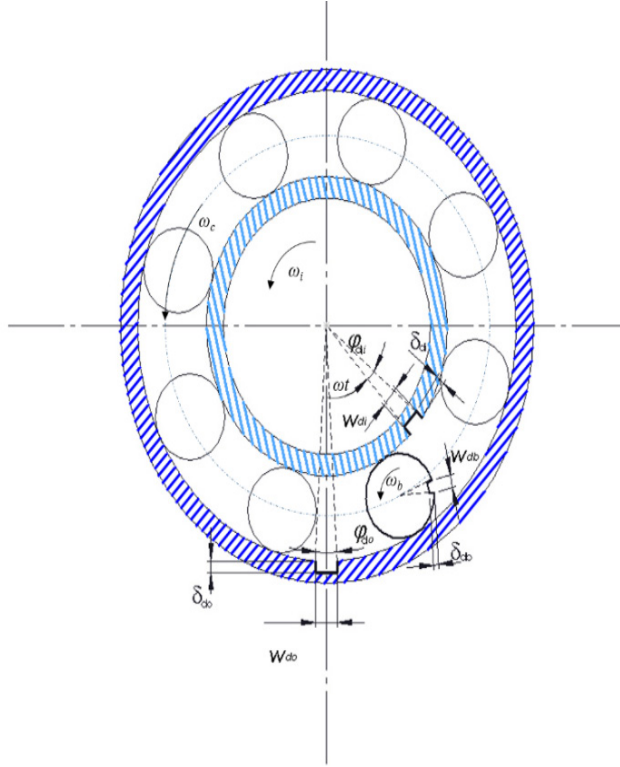
$$F_z = F_j \sin \alpha_j$$

(3)

Bu çalışmada özellikle, iç bilezik, dış bilezik ve bilye üzerindeki bölgesel rulman kusurlarına odaklanılmıştır. Bu amaçla, sol rulman bileşenlerinde ayrı ayrı 0,1 μm ’den 500 μm ’ye kadar değişik büyüklüklerdeki kare formundaki hata rulman modeline dahil edilmiştir. Modellemede

hata konumu, dış bilezik, iç bilezik ve bilye için yatay eksen den açısal pozisyonunda ve temas normali ile aynı doğrultuda olduğu kabul edilmiştir. Dolayısıyla simülasyonda, dış bilezik sabit, iç bilezik şaft ile döndüğünden dış bilezikteki hata konumu sabit kalmakta, iç bilezik hatası şaft hızına bağlı olarak konum değiştirmektedir. Bilye hatası ise 1 nolu bilye üzerine yerleştirilmiş olup bilyenin hem kendi eksenini hem de rulman eksenini etrafında dönüşüne göre konum değiştirecek şekilde simülasyon uygulanmıştır. Dolayısıyla bilyenin yuvarlanması sırasında bilye hatası, her iki bileziklere sırayla temas etmektedir.

Eksen kaçıklığı, dengesizlik veya dalgalılık gibi dağıtık hatalar için [Aktürk ve Karaçay'ın] çalışmalarına başvurulabilir. Bu çalışmada kullanılan rulman kusurlarına ilişkin model Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Rulman bileşenleri hata modeli.

Nümerik çözüm sırasında rulmandaki kusurlu bir bölge ile temasın var olup olmadığı Eş.4'ki koşul kontrolü ile sağlanabilmektedir. Burada γ , bilyeler arasındaki açısal konumu, i bilye numarasını göstermektedir. Şaft dönüşüne bağlı olarak iç bilezik ve bilyelerin açısı, sırasıyla ve ile hesaplanabilmektedir. Böylece kusur ile karşılaşıldığında, kusurun büyüklüğü kadar temas açısı doğrultusundaki defarmasyonda değişim yapılarak çözümleme yapılmıştır.

Bu bağlamda, rulmanda bölgesel bir kusur (çukurlar veya oyuklar) var ise bilyenin yuvarlanması sırasında bu bölgeden geçer iken bilyedeki toplam deformasyon, kusur büyüklüğünün süperpozisyonu ile belirlenmiştir.

$$Eğer \begin{cases} 0 < \omega_c t + i\gamma < \varphi_{do}, \\ \omega t < \omega_c t + i\gamma < \omega t + \varphi_{di} \\ (ball \# = 1) \& (\sin(\omega_b t) = 0) \end{cases} \begin{cases} dışbilezik kusuru ile bilya teması \\ içbilezik kusuru ile bilya teması \\ bilya kusuru ile bilezik teması \end{cases} \quad (4)$$

3. Benzetim ve Çözüm

Kestirimci bakıma yönelik rulman kusurlarını etkilerini incelemek amacıyla, Şekil 1 ve Şekil 2’de sunulan teorik model, değişik shaft hız, rulman ön yükleme, kusur büyüklüğü ve kusurlu bileşen parametreleri için benzetim yöntemiyle çalıştırılmıştır. Benzetimde, nonlinear hareket denklemlerinin çözümü için Runge-Kutta metodu kullanılmıştır. Benzetimler aynı özellikleri taşıyan shaft-rulman sistemi kullanılmış, shaftın her iki taraftaki yataklamasında aynı rulmanın olduğu ve rulmanlar arasında faz farkı bulunmadığı kabul edilmiştir. Benzetimde kullanılan shaft ve rulman sistemine ilişkin parametrelerin değerleri Tablo-1’de sunulmuştur.

Benzetim için parametrelerden shaft hızı için [500:500:10000] devir aralığı, ön yükleme için [10 N, 30 N, 50 N, 70 N, 100 N] değerleri, kusur büyüklüğü için [0.1 μm : 0.5 μm : 500 μm] ölçüleri kullanılmış, kusurlu bileşen olarak (iç bilezik, dış bilezik, bilye) ayrı ayrı incelenmiştir. Toplamda 5 farklı benzetim (simülasyon) için 3026 koşum yapılmıştır. Tablo-2’de gerçekleştirilen simülasyonlara ilişkin parametre değerleri verilmiştir.

Tablo-1 Nümerik Analizde Kullanılan Sistem parametreleri

Parametre	Değer - birim	Parametre	Değer - birim
r_{shaft}	0,02 m	d_o (yuvarlanma çapı - dış)	0,061933 m
$a + a_0$	0,55 m	d_i (yuvarlanma çapı - iç)	0,046038 m
M	5,5 kg	D_o (dış bilezik dış çap)	0,068 m
a_0	0,5 m	D_i (İç bilezik iç çap)	0,04 m
a_1	0,225 m	b (genişlik)	0,015 m
b_1	0,275 m	d_b (bilye çapı)	0,0079375 m
		α_0 (temas açısı -yüksüz)	15°
		E (young modul)	200 GPa
		ν (poission onarı)	0,3
		m (bilye sayısı)	8

Böylece Tablo-2’de verilen hatalar ve çalışma koşulları için titreşim elde edilecektir. Çalışma hızına bağlı rulman karakteristik frekansları ve bunlardaki genlik değişimleri bilgisini de barındıran titreşim cevabı, rulman durumunun belirlenmesinde endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Rulman karakteristik frekansları dış bilezik hata frekansı (BPFO), iç bilezik hata frekansı (BPFI), yuvarlanma elemanı hata frekansı (BSF), ve kafes



frekansı (FTF)'dır. Rulman hata frekanslarının hesaplanmasına ilişkin denklemler ve seçilen şaft hızları için hata frekansları Ek-2'de verilmiştir.

Tablo-2 Benzetim vaka koşulları

Benzetim	Vaka Ko- şum	Şaft Hızı (RPM)	Ön Yükleme (N)	Kusur boyutu (μm)	Kusurlu bi- leşen
1	1-1000	3000	10	[0,1:0,5:500]	Bilye
2	1001-2000	3000	10	[0,1:0,5:500]	İç Bilezik
3	2001-3000	3000	10	[0,1:0, 5:500]	Dış Bilezik
4	3001-3005	3000	[10 30 50 70 100]	250	Dış Bilezik
5	3006-3026	500:500:10000	10	250	Dış Bilezik

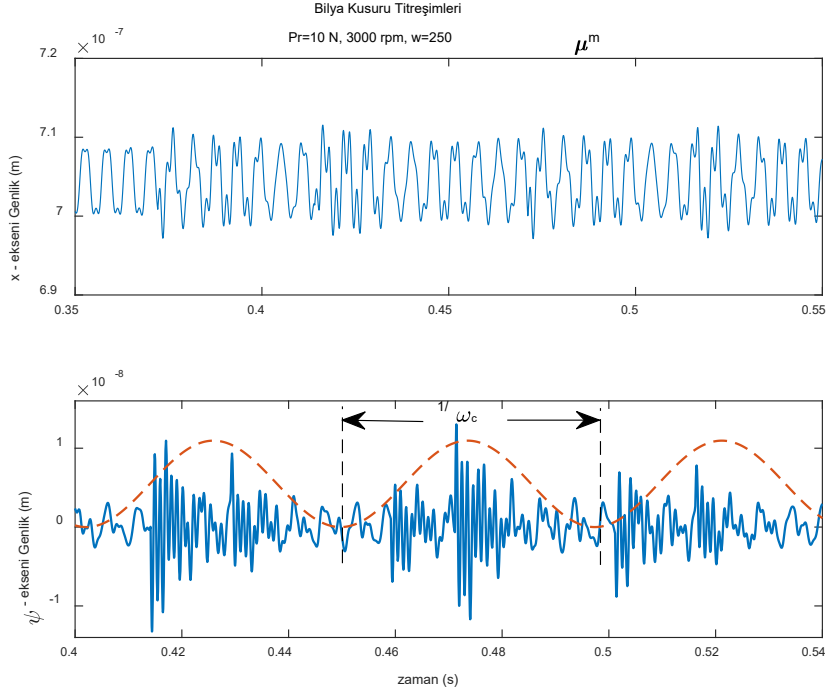
Endüstriyel uygulamalardaki titreşim sinyali, sistemin şaft hızına ve sensör ile arıza arasındaki iletim yolu transfer fonksiyonuna, sistemdeki dişli geçmesine, farklı konumlarda hatanın birlikte oluşmasına veya yuvarlanma elemanının yüklü bölgeden geçişiyle genlik modülasyonuna uğramaktadır. Bu durumda rulmanlarda oluşan hatanın tespiti ve ortaya çıkan titreşim sinyalinin yorumlanması zorlaşmaktadır. Bu nedenle, rulmandaki hataların tespitinde titreşim sinyallerine noise reduction, deconvolution, kurtogram, spectrogram, envelope spectrum analizi gibi zaman tanım bölgesi ve frekans tanım bölgesi sinyal analizleri tekniklerinin birlikte uygulanması gerekebilmektedir [Randall 2011].

4. Bulgular ve Tartışma

Rulman bileşenlerinde bir hata durumunda dürtüsel bir sinyale neden olmaktadır. Bu nedenle sistem titreşim davranışında rulman hatalarının etkileri zaman ve frekans bölgesinde incelenerek neden olduğu karakteristikler sunulmuştur.

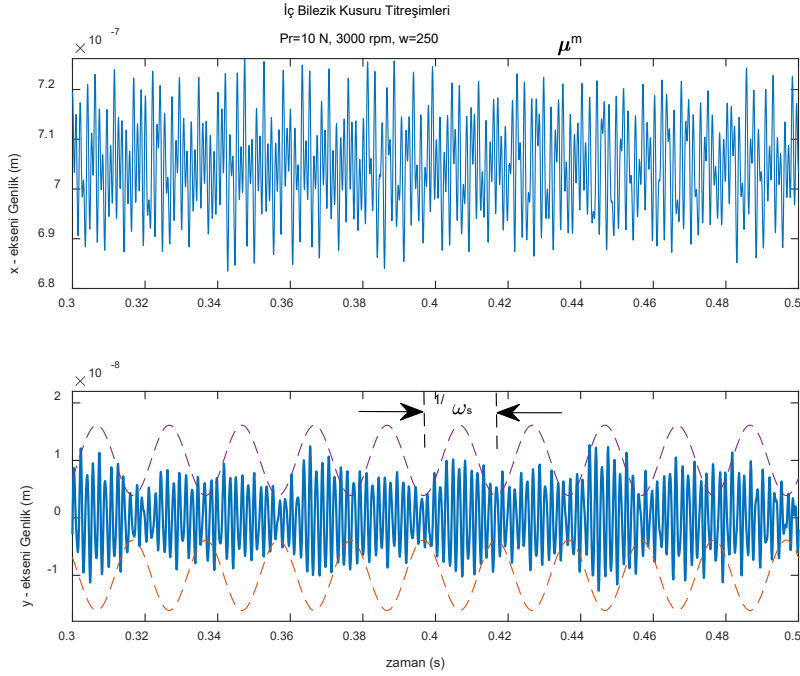
4.1.1 Bilye Kusurunun Titreşim Karakteristiklerinin Zaman Tanım Bölgesinde İncelenmesi

Hataların titreşim cevabı üzerinde yol açtığı etkiler 3000 rpm şaft hızı, 10 N önyükleme, 250 μm hata büyüklüğü için zaman tanım bölgesinde Şekil 3-8'de verilmiştir.



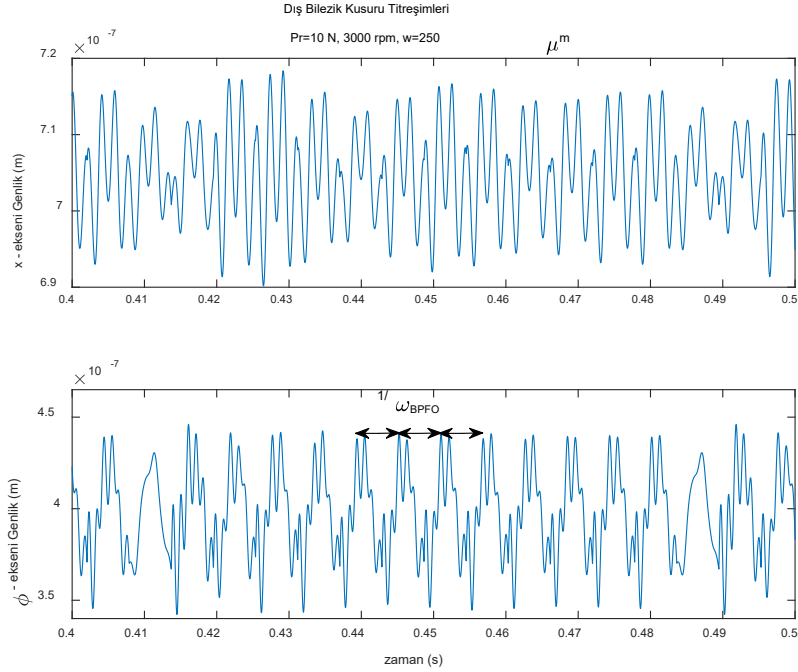
Şekil 3. Bilye hatası titreşimleri.

Benzetim-1, koşum 501'e ilişkin Şekil 3'de özellikle ψ eksini titreşimlerinde bilye kusurunun yol açtığı dürtüsel (impulsive) titreşimler ve modülasyon daha belirgin bir titreşim karakteristiği göze çarpmaktadır. Burada bilye üzerindeki hatanın her bir iç bilezik ve dış bilezik temasında şok titreşim oluşturduğu görülmektedir. Benzetimde sol rulmandaki 1 nolu bilyede hata olduğu kabul edildiğinden bilye kusuru dikey eksen etrafındaki dönmede (rocking motion) daha belirgin olarak görülmektedir. Her bir dürtüsel titreşim arasındaki periyodunun kafes hızına bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca dürtüsel titreşimin kafes hızına bağlı olarak genlik modülasyonuna uğradığı belirgindir. Oluşan bu genlik modülasyonu bilyenin döngüsel olarak yüklü ve yüksüz bölge içindeki kafes hızına bağlı hareketi ile açıklanabilir.



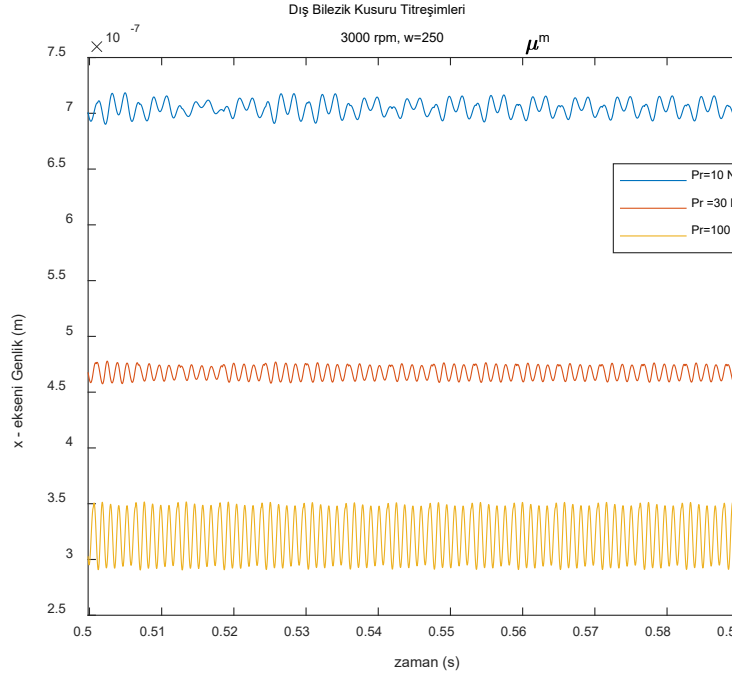
Şekil 4. İç Bilezik hatası titreşimleri.

İç Bilezik kusurunun titreşim davranışı üzerindeki etkisi koşum 1501 kullanılarak zaman tanım bölgesinde Şekil 4’de sunulmuştur. İç bilezik arızası şaft hızına göre konum değiştirdiğinden, yüklü ve yüksüz bölge içerisindeki geçişler bir genlik modülasyonu oluşturacaktır. Ayrıca iç bilezik hatasının bilyeler ile her bir teması dürtüsel bir titreşime yol açacaktır. Şekil 4’de bu durum özellikle y eksen titreşiminde daha belirgindir. Genlik modülasyonunun, periyodu şaft açısal hızına bağlı olan bir zarf oluşturduğu göze çarpmaktadır. Dolayısıyla iç bilezik hata frekansı açıkça görülememektedir.



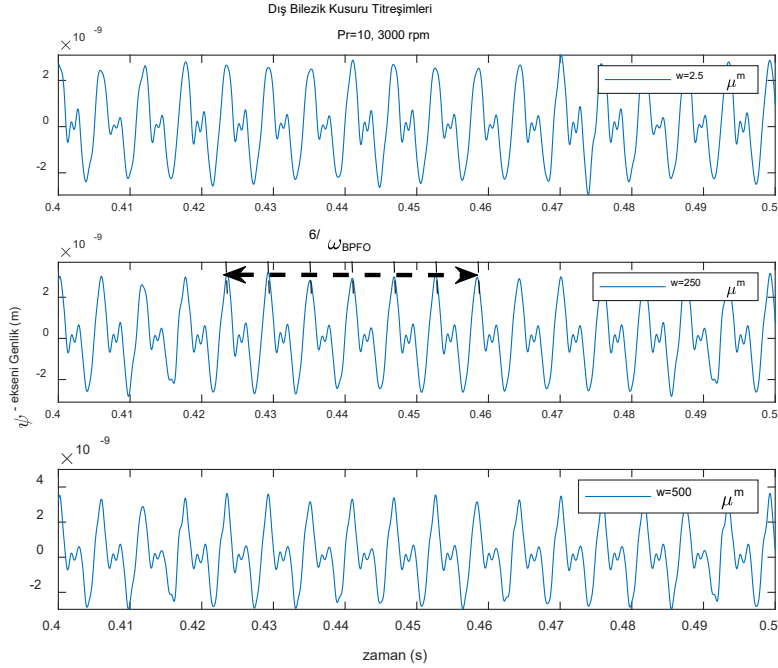
Şekil 5. Dış Bilezik hatası titreşimleri.

Dış bilezikte bölgesel bir hatanın etkileri 2501 nolu koşum kullanılarak zaman tanım bölgesi sonuçları görülmektedir. Dış bilezik hatası sol rulmanda ve radyal yönde $\theta=0^\circ$ konumunda sabittir. Dolayısıyla her bir rulman geçişinde özellikle ϕ yönünde dürtüsel bir titreşime yol açacaktır. Bu durum Şekil 5'deki özellikle ϕ yönü titreşiminde belirgin olarak elde edilmiştir.



Şekil 6. Dış Bilezik hatası titreşimleri ön yüklemenin etkisi.

Önyükleme artışının zaman domainindeki en belirgin sonuç titreşim genliğinin düşük olmasıdır. Şekil 6’da görülen bu sonuç, artan önyükleme ile azalan iç boşluk (clearance) ve artan yatak katılığından (stiffness) kaynaklanmaktadır. Ancak artan katılık sistemin doğal frekansının artmasına ve dış bilezik hata frekansına ait harmoniklerin çakışma ihtimalini de artırmaktadır. Tepeden tepeye titreşim genliklerinde görülme artışı bu yaklaşıldığına işaret etmektedir.



Şekil 8. Dış Bilezik hatası titreşimleri hata büyüklüğünün etkisi.

Kusur büyüklüğünün titreşim cevabı üzerindeki etkisi Şekil 8’de sunulmuştur. Burada önyükleme değeri 10 N, çalışma koşulları ise 3000 rpm ve dış bilezik kusur büyüklükleri 2.5 μm – 250 μm – 500 μm olarak verilmiştir. Her üç hata büyüklüğü için dış bilezik hata frekansındaki titreşimler ψ eksenini titreşimlerinde açıkça görülmektedir. Ancak titreşim genliklerinde büyük bir genlik farkı göze çarpmamaktadır. Bu durum hata genişliğinin bilye yüzey eğrilğine göre oldukça küçük olması nedeniyledir. Kusur boyutu 500 çıktığında titreşim genliğinin ~%25 arttığı görülmektedir.

Bu çalışmada kullanılan kare formundaki kusur tanımlandığından, bilye temas yüzeyi ile kusur çakıştığında basamak giriş tipinde bir girdi oluşmaktadır. Kusur uzunluğunun artması, öncelikle basamak iniş ve basamak çıkış zamanlamasını artırmaktadır. Kusur derinliği ise titreşimde genliğini artırmaktadır. Bununla birlikte, rulman bileşenlerindeki kusurların kenarları veya yuvarlanma elemanı tarafından ezilerek yuvarlanmaya başlar. Rulmandan kopan metal parçaları, kusurların bir kısmını da doldurabilir veya yuvarlanma elemanları tarafından düzleştirilebilir. Bu durum arızanın dürtüsel etkisini bir miktar azalttığından “healing” adı verilmektedir. Ancak, bu etki, yatak içinde daha fazla boşluk oluşmasına gevşekliklerin ve titreşimlerin artmaya başlamasına yol açacaktır.

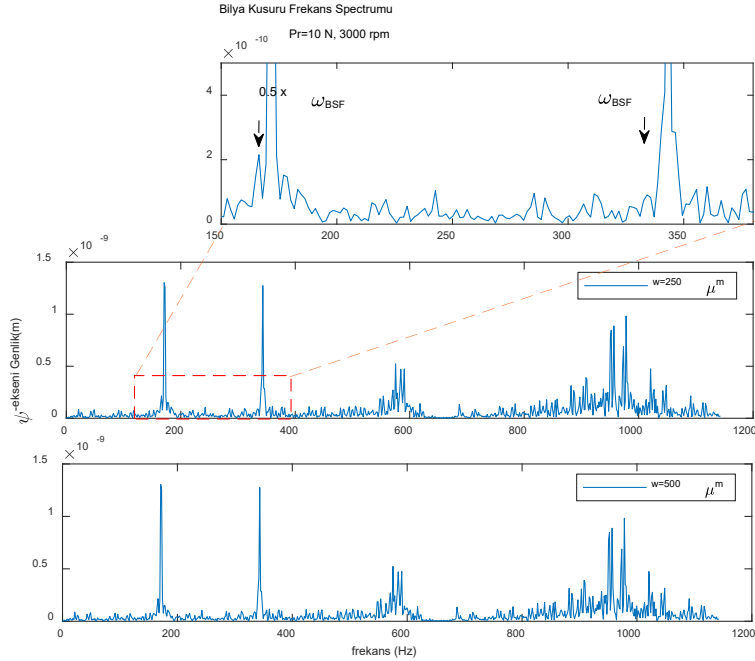
Zaman bölgesindeki analizler rulman hatalarının titreşim karakteristikleri göstermektedir. Bunlara ilişkin; bilye ve iç bilezik hatalarının rulmanın dönüşü sırasında açılal konumu sürekli değiştiğinden şaft hızına bağlı olarak titreşim cevabında genlik modülasyonuna yol açtığı, dış bilezik hatasının verilen ön yüklem için titreşim cevabında bariz olarak görülebildiği sonucu model üzerinden elde edilmiştir. Ayrıca dış bilezik hatası için değişik ön yüklem, şaft hızı ve kusur büyüklüğü sonuçlarından zaman tanım bölgesi titreşim cevabı karakteristikleri belirlenebilmektedir. Bu sonuçlardan, ön yüklem artışının ise zamana cevabında titreşim

genliğinin azalmasına yol açtığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, dönüş hızı artışının rulman hata frekanslarını daha üst bantlara taşıması nedeniyle şaft doğal frekansları ile çakışma titreşimdeki vurutudan anlaşılabilmektedir. Bununla birlikte, kusur büyüklüğünün ise titreşim genliğinde artışa yol açtığı belirlenmiştir.

4.2 Frekans Tanım Bölgesi Analizleri

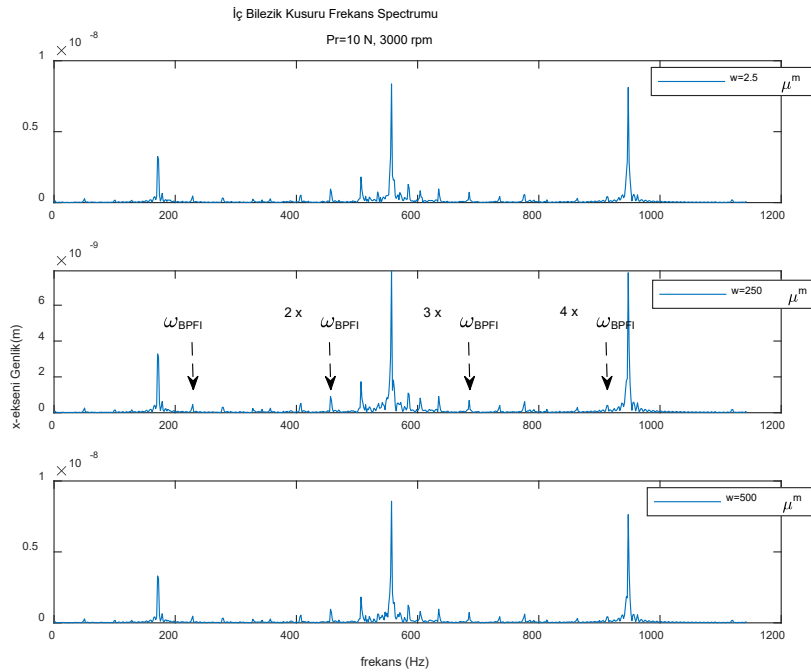
Frekans tanım bölgesindeki analizler rulman hata frekanslarının daha belirgin tespitine imkan sağlamaktadır. Hataların titreşim cevabı üzerinde yol açtığı etkiler 3000 rpm şaft hızı, 10 N önyükleme, 250 μm hata büyüklüğü için, zaman tanım bölgesinde Şekil 9-15’de verilmiştir.

Bilye hatasının 501 ve 1000 nolu koşumdan elde edilen ψ eksen titreşim spektrumundaki karakteristiği Şekil 9’da görülmektedir. Bilyedeki bir hata rulman dönüşü ile birlikte iç ve dış bilezikle temas etmektedir. Dolayısıyla Şekil 9’daki frekans spektrumunda bilye hata frekansı olan $f_{re}=333.2$ Hz’de ve yarısı olan 176,6 Hz’de genlikler görülebilmektedir. Bununla birlikte özellikle 3000 rpm’deki dış bilezik hata frekansındaki titreşim genliği bilye hata frekansına çok yakın olup daha baskındır. Bilye hatasının açısal olarak sürekli yer değiştirmesi, dış bileziğin atalatsel referansa göre sabit olması ve teorik modelde şaft kütle merkezinden alınan sonuçlardan elde edilmesi bu duruma yol açmaktadır. Ancak deneysel çalışmalarda rulman durumu, rulman yatağından alınacak titreşim ölçümü ile daha net belirlenebilir.

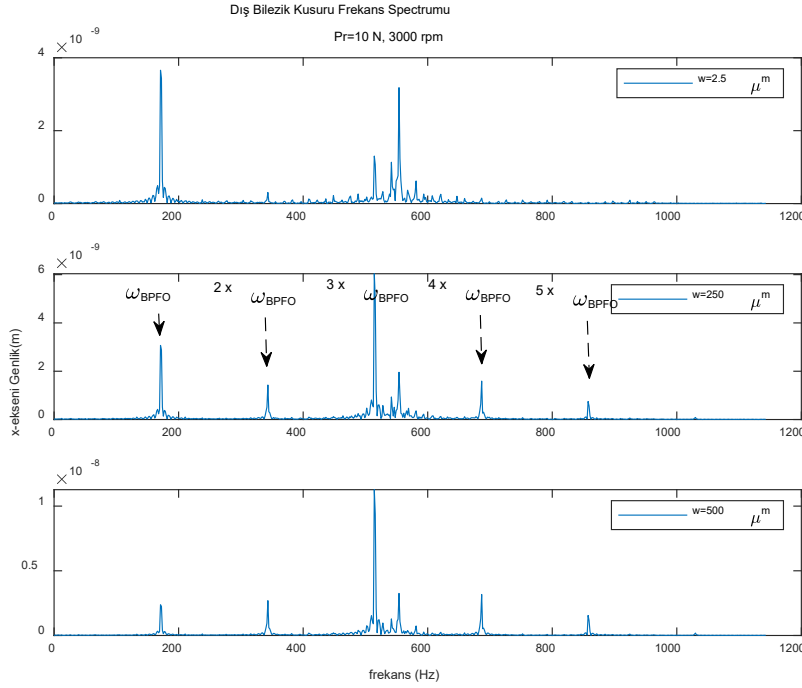


Şekil 9. Bilye hatası titreşimleri frekans spektrumu.

İç bilezik hatasına ilişkin x eksen titreşim spectrumu Şekil 10’da görülmektedir. Sırasıyla 1051, 1501 ve 2000 nolu koşum sonuçlarından elde edile bu grafikte 228,8 Hz ve harmoniklerinde iç bilezik hata frekansı gözlemlenebilmektedir. Ancak dış bilezik bilye geçiş frekansı daha belirgin olarak elde edilmiştir. Bu fark, bilye kusuruna ilişkin spektruma benzer olarak iç bilezik hatasının açısal konumunun sürekli yer değiştirmesi ve rulman içerisinde yüksüz bölge geçişleri spektrumda bilye geçiş frekansına göre daha az genliğe sahip olmasıyla açıklanabilir. Bununla birlikte rulmanlar kusursuz olsa bile bilye geçiş frekanslarında titreşimlere neden olduğu bilinmektedir (Aktürk 1993; Karaçay ve N. 2008; Rahnejat ve R. 1985). Dolayısıyla dış bilezik bilye geçişi de spectrumda yer almıştır. Kusur büyüklüğündeki artışın titreşim genliğini artırdığı dikkati çekmektedir. Spektrumda 553 Hz civarındaki titreşimler, x eksen doğrultusunda doğal frekansa işaret etmektedir. Ayrıca 947 Hz civarında diğer moda ilişkin doğal frekans da göze çarpmaktadır.



Şekil 10. İç Bilezik hatası titreşimleri frekans spectrumu



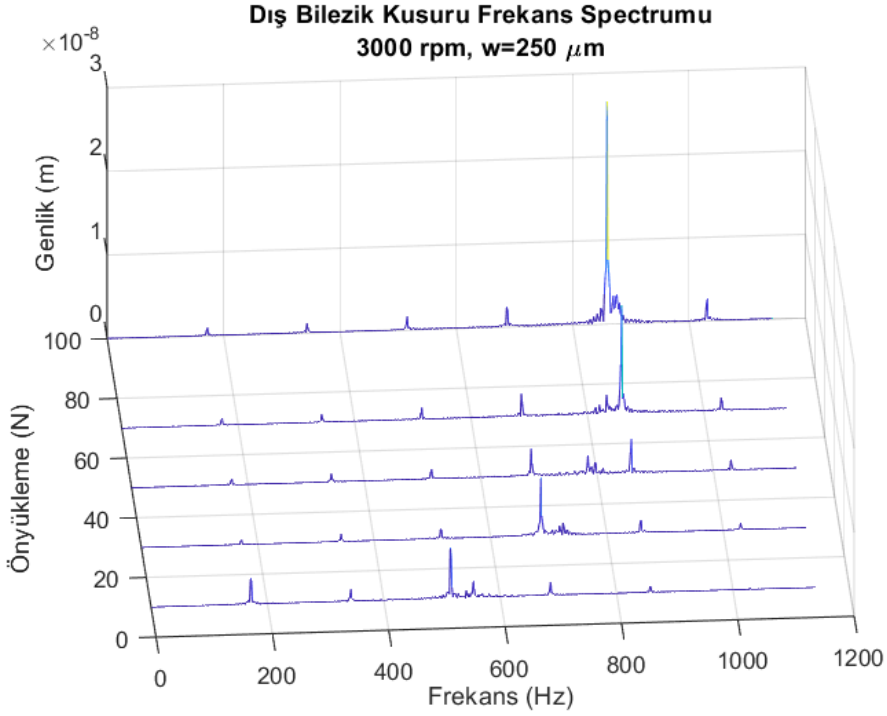
Şekil 11. Dış Bilezik hatası titreşimleri frekans spektrumu

Dış bilezik kusurunun titreşim davranışı üzerindeki frekans karakteristiği Şekil 11’deki x – eksenli spektrumunda sunulmuştur. 2051, 2051 ve 3000 nolu koşum sonuçlarından elde edilen dış bilezik hatasına ilişkin her üç spektrumda, 171.62 Hz’deki dış bilezik hata frekansı ve üst harmonikleri bariz şekilde göze çarpmaktadır. Spektrumda özellikle üçüncü harmoniğin x-yönündeki 553 Hz bandında bulunan doğal frekansa çok yakın olması nedeniyle titreşim genliğinin yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Koşum 2051 ve 2501’deki kusur büyüklüğü artışı için , rezonans bölgesi yakınındaki titreşim genliğini altı kata yakın artırdığı; 2501 ve 3000’deki kusur büyüklüğü artışı için, rezonans bölgesi yakınındaki titreşim genliğini iki kata yakın artırdığı görülmüştür. Farklı kusurlar için bu genlik, kusurun oluşturduğu basamak giriş genlik ve frekansına bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği söylenebilir.

Koşum 3001-3005’de model beş farklı ön yükleme değeri için dış bilezik hatasının titreşim davranışında etkileri incelenmiştir. Şekil 12’de x - eksenli titreşim spektrumu artarda gösterilen waterfall diagramı ile sunulmuştur.

Önyükleme artışının 10 N’dan 100 N’a artırılması sırasında öncelikle göze çarpan sistemin doğal frekansının 553 Hz bandından 860 Hz bandına doğru kaymasıdır. Bu beklenen bir sonuçtur, çünkü ön yükleme artışı bilyedeki Hertz elastik deformasyonu artırmakta ve temas katılığının büyümesine yol açmaktadır. Bunun sonucunda da sistemin doğal frekansı daha üst bantlara taşınmaktadır. Bununla birlikte, dış bilezik hata frekansının dördüncü harmoniğinin 70 N önyükleme olduğu durumda sistemin doğal frekans bölgesi ile çakıştığı benzer durumun 100 N ön yüklemede dış bilezik hata frekansı beşinci harmoniğinin doğal frekansı tetiklediği göze çarpan diğer bir sonuçtur. Ayrıca ön yükleme artışının bilye hata frekansının görünürlüğünü azalttığı da anlaşılmaktadır. Bu durum, ön yükleme artışı ile rezonansa yaklaşılmaya sonucu

sistemin doğal frekans bölgesindeki titreşimlerinin, bilye hata titreşimi genliklerinden daha büyük olmasına bağlıdır. Rezonans bölgesinden uzaklaşılması için sistem çalışma bölgesi seçimi, rulman parametreleri (bilye sayısı, ön yükleme, temas açısı vb) belirlenmesi, sistem konfigürasyonu, yağlama uygulanması gibi konular tasarım aşamasında değerlendirilmelidir.

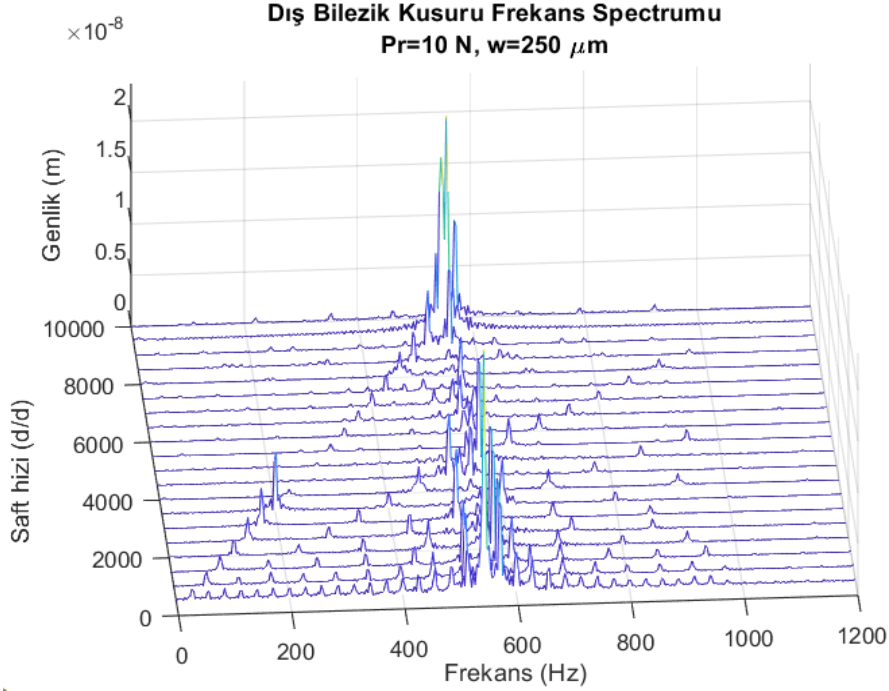


Şekil 12. Dış Bilezik hatası titreşimleri frekans spektrumu, ön yükleme değişikliğinin etkisi.

Dönüş hızı ile rulman hatasının etkileşimi, koşum 3006 – 3026 ile on farklı dönüş hızı için Şekil 13’de sunulmuştur. 3000 rpm’deki dış bilezik hata frekansı 171,62 Hz ve harmoniklerinde görülmekteyken 10000 rpm dönüş hızında 572,06 Hz ve harmoniklerine ilerlediği anlaşılmaktadır. Sistemin 553 Hz civarındaki rezonans bölgesi yine grafikte açıkça belirgindir. Şekil 13’de 9500 rpm’de dış bilezik hata frekansının doğal frekans bölgesi ile çakışması sonucu titreşim titreşim genliğinin büyüdüğü görülmektedir. 4500-5000 rpm dış bilezik hata frekansının yine 553 Hz’deki doğal fekans ile çakıştığı titreşim genliklerindeki artıştan elde edilebilmektedir. Dolayısıyla grafikten, shaft hızı artışının, dış bilezik hata frekansına yol açtığı büyük frekanslarda da sistem doğal frekansı ile çakışma oluşturabileceği sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Küçük dönüş hızlarında da hata frekansının harmonikleri doğal frekansı tetikleyebilmektedir. Bu durumda çalışma bölgesi seçiminde sistem cevabına göre bir uzlaşa sağlanabilmektedir.

Rulman hatalarından kaynaklı titreşim karakteristikleri frekanslarının belirlenmesinde, rulmanın sağlık durumunun tespitinde veya çalışma bölgesi seçiminde frekans tanım bölgesi analizleri önemli göstergeler sunmaktadır. Rulman bileşenlerindeki hatalarının hangi titreşimleri ürettiği sonuçlardan gösterilmiştir. Bununla birlikte, shaft hızı hata frekanslarını değiştirdiği ve ön yükleme değişikliğinin ise sistem doğal frekansını değiştirdiği görülmektedir. Buna bağlı olarak rulman

hatalarının yol açtığı rezonans durumu da farlılık göstermektedir. Bununla birlikte benzetimde incelenen kare çukur şeklindeki kusur tipi ve kusur büyüklüğü, bilyeya büyüklüğüne göreceli olarak sınırlı olduğundan ve küçük ön yükleme değerleri için koşum sonuçları ele edildiğinden titreşim genliklerindeki artışın çok büyük olmadığı görülmüştür.



Şekil 13. Dış Bilezik hatası titreşimleri frekans spektrumu, shaft hızı değişikliğinin etkisi

Rulman bileşenlerinde yerel arızaların neden olduğu standart titreşim sinyalleri ve tipik modülasyon model üzerinden gösterilmiştir. Ancak endüstriyel uygulamalarda rulman hata frekansları hepsi birlikte görülebilmekte veya sistemdeki dişli çarklar gibi diğer düşük frekanslı elemanların titreşimlerine bağlı modülasyona uğrayabilmektedir. Bu durumda sinyal işleme teknikleri kullanılarak titreşim sinyallerindeki gürültünün ayrıştırılması (denoising), hata frekanslarını belirginleştirecek sinyal geliştirme işlemi yapılması (kurtogram, wavelet, filtering) ve sonrasında zarf spektrumu (envelope spectrum) uygulanarak rulmanın sağlık durumu belirlenebilmekte hata tipi kestirilebilmektedir (Goyal vd. 2017; Bal ve Karaçay 2025) unscheduled downtime and unexpected breakdowns. Although, a lot of work on condition monitoring and fault diagnosis of fixed axis gearbox has been reported in the literature, however only a few have found their way to industrial applications. The ability of condition statistical indicators is to provide accurate and precise information about the health of various components at different levels of damage. In this paper, frequently used condition indicators are addressed domainwise and their characteristics are stated. This paper presents the review of work to provide a wide and good reference for researchers to be utilized. The structure of a fixed-axis gearbox in addition to the unique behaviors and fault characteristics of fixed-axis gearbox has been recognized and represented. By extensively reviewing and categorizing important papers and articles, this paper is able to summarize the conditional monitoring indicators on basis of adopted methodologies. Lastly, open problems are stated and further research prospects pointed out.”,”container-



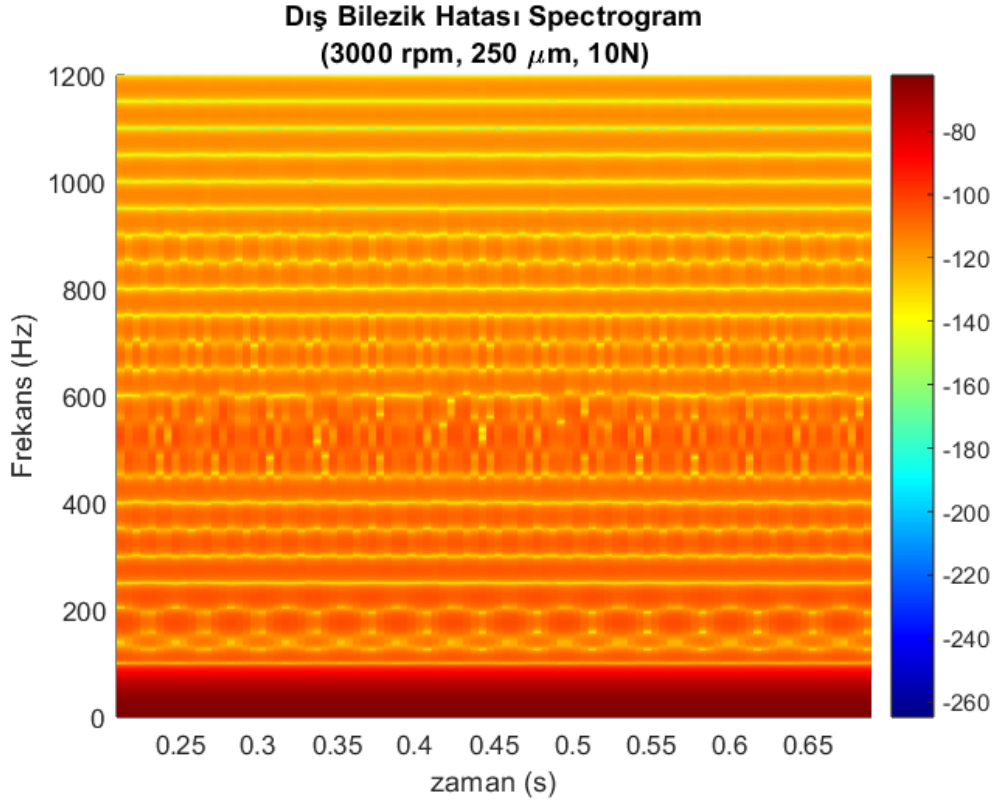
title": "Archives of Computational Methods in Engineering", "DOI": "10.1007/s11831-016-9176-1", "ISSN": "1134-3060, 1886-1784", "issue": "3", "journalAbbreviation": "Arch Computat Methods Eng", "language": "en", "page": "543-556", "source": "DOI.org (Crossref. Böylece, zarf sinyallerini incelemek, ham sinyalleri incelemekle karşılaştırıldığında daha kapsamlı teşhis bilgileri sağladığını vurgulanmaktadır.

4.3 Zaman ve Frekans Tanım Bölgesi Analizleri

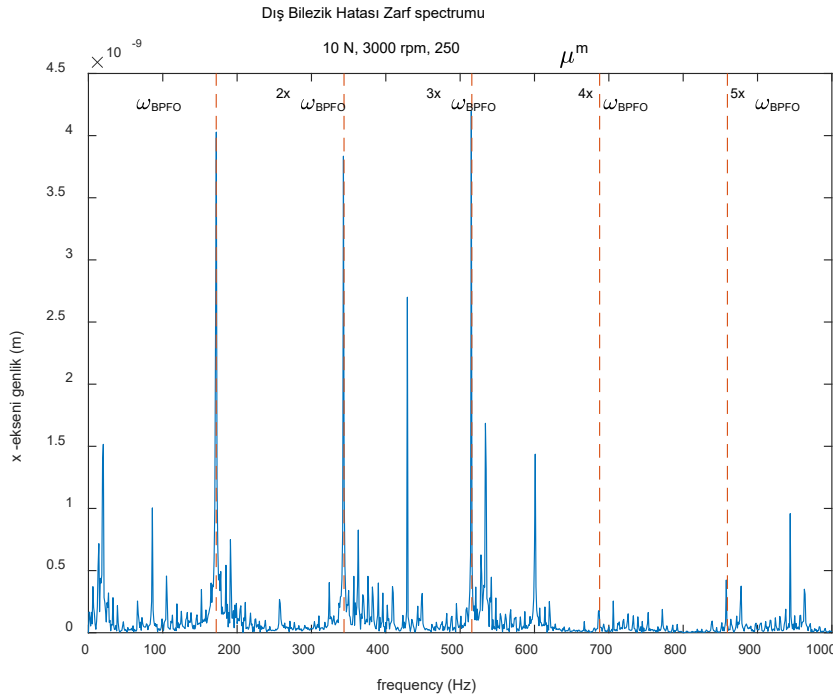
Rulman hatalarının yol açtığı titreşimlerden rulmanın sağlık durumunun tespitinde zaman-frekans verilerinin birlikte kullanıldığı spectrogram ile rulman hataları daha net bir şekilde belirlenebilir. Çünkü arıza gelişiminin izlenmesi (arızanın şiddetinin zaman içinde nasıl arttığı) veya çoklu arıza frekanslarının ayrıştırılması (aynı anda iç ve dış bilezik arızaları gibi birden fazla hatanın frekansları ve bunların zaman içindeki davranışları birbirinden ayrıştırılabilmesi) mümkün hale gelmektedir. Bu, zaman bölgesi sinyalinin tek başına sağlayamayacağı kestirimci bakım için kritik bir bilgidir. Burada pencere uzunluğu - window size gibi spektrogramın parametreleri, çözünürlük ayarı için çok önemlidir. Kısa pencere ani darbe tespitine yönelik zaman çözünürlüğünü artırırken, uzun pencere ise frekans çözünürlüğünü artırarak yakın frekansların ayırt edilmesine olanak sağlamaktadır.

Şekil 14’de 2501 nolu koşumdan elde edilen spectrogram görülmektedir. 0.2s – 0.7s aralığında hangi frekansların oluştuğu şekil üzerinden izlenebilmektedir. Spectrogramdan 171.62 Hz’deki dış bilezik hata frekansındaki salınımlar ve 553 Hz civarındaki doğal frekansında titreşim değişimleri görülebilmektedir.

Spektrogram ile elde edilecek zaman ve frekans bilgileri bir rezonans bandı belirlenerek bu frekans civarında zarf spektrum analizi yapmak rulman durumunun belirlenmesinde daha net bilgiler sunabilmektedir. Bu işlemin öncesinde, titreşim sinyalinin, dürtüsellliğini daha belirginleştirecek bir filtreleme yapılarak titreşim sinyalinin ön işleme tabi tutulması daha iyi sonuç vermektedir. Şekil 15’de 2501 nolu koşumdan elde edilen x-ekseni titreşim sinyalline uygulanan zarf spektrumu sunulmuştur. Burada dış bilezik hata frekansı ve harmonikleri daha belirgin şekilde elde edilmiştir. Dolayısıyla 150 Hz – 200 Hz için band geçiren filtre uygulanarak zarf spektrumunun elde edilmesi, ham sinyale uygulanacak FFT analizinden daha belirgin olarak dış bilezik hata frekansı ve harmoniklerinin tespitini sağlamıştır.



Şekil 14. Dış Bilezik hatası titreşimleri spectrogramı.



Şekil 15. Dış Bilezik hatası titreşimleri zarf spektrumu (envelope spectrum).



5. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında kestirimci bakıma yönelik rulman hatalarının karakteristikleri incelenmiştir. Bu amaçla, bir çift açısız temaslı rulmanlar ile yaltaklanmış rijit şaft sistemi modellenmiş, hareket denklemleri elde edilmiştir. Çalışmada özellikle, iç bilezik, dış bilezik ve bilye üzerindeki bölgesel rulman kusurlarına odaklanıldığından bu bileşenler üzerinde, kare çukurluk şeklindeki rulman hatası sol rulman üzerinde modellenerek hareket denklemlerine dahil edilmiştir. Sistem, Tablo-1’de verilen değerler ve Tablo-2’de verilen değişik hata büyüklükleri, çalışma hızları ve ön yükleme değerleri için benzetimle çalıştırılarak hareket denklemleri nümerik yöntemle çözülmüş ve sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar sinyal işleme teknikleride kullanılarak analiz edilerek zaman ve frekans tanım bölgesinde sunulmuş, rulman hatalarının titreşim davranışı üzerindeki etkileri ve karakteristikler kestirimci bakıma yönelik olarak belirtilmiştir.

Modelden elde edilen sonuçlardan; bilye ve iç bilezik hatalarının rulmanın dönüşü sırasında açısız konumu sürekli değiştiğinden şaft hızına bağlı olarak titreşim cevabında genlik modülasyonuna yol açtığı, dış bilezik hatasının verilen ön yükleme için titreşim cevabında bariz olarak görülebildiği, ön yükleme artışının, rulman hata frekanslarının spektrumda belirginliğinin azalttığı ve titreşim genliğini düşürdüğü, rulman hata frekanslarının şaft hızını takip ettiği dönüş hızı artışının rulman hata frekanslarını daha üst bantlara taşınması nedeniyle şaft doğal frekansları ile çakışma titreşimdeki vuruntudan anlaşılabilirliği, rulman frekanslarının şaft doğal frekansını tetiklemesi durumunda rezonansın tetiklendiği görülmüştür. Rulman hata frekansları ve harmonikleri frekans spektrumundan açıkça elde edilebilmektedir. Ayrıca hata büyüklüğünün spektrumdaki hata frekansının bant genişliğini etkilediği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, kusur büyüklüğünün ise titreşim genliğinde artışa yol açtığı ve spektrumda bu titreşimlerin belirginliğinin arttığı tespit edilmiştir.

Önerilen modelleme ve analiz sonuçları, endüstriyel uygulamalardaki titreşim verilerinden rulman durumunun belirlemesindeki davranış karakteristiklerini zaman ve frekans tanım alanında ortaya koymaktadır. Modelden elde edilen sonuçlar ve karakteristikler literatürle uyumlu olup modelin kestirimci bakıma yönelik etkili bir araç olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte spektrogram ile belirlenerek rezonans bandı bu frekans civarında rulman hata frekanslarına yönelik filtreleme sonrası zarf spektrum analizi uygulamak, rulman hata frekansının belirlenmesinde daha net bilgiler sunmuştur.

Bu çalışmanın ileri aşaması olarak, zaman (rms, crest, kurtosis vb) ve frekans (wavelet, sFFT, spectrogram vb) tanım bölgesi sinyal işleme teknikleri kullanılarak değişik hataların birlikte olması durumu gibi daha karmaşık durumlar ele alınabilir. Ayrıca, bu çalışmada elde edilen karakteristikler endüstriyel bir uygulama ile karşılaştırılabilir. Ayrıyeten, rulman hataları olarak kare form haricinden farklı şekiller modellenerek titreşim davranışı üzerindeki etkiler incelenebilir.

Teşekkür

Bu çalışmada sırasında herhangi bir fon desteği alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; **Hikmet Bal**: bilimsel yayın araştırması, makalenin oluşturulması, Modelleme, Algoritma-Kodlama, Benzetim, Çözüm, Veri işleme, Analiz, Sonuçlar; **Turan Şişman**: bilimsel yayın araştırması, makalenin oluşturulması; **Nizami Aktürk**: Danışman, Modelleme, makalenin oluşturulması konularında katkı sağlamışlardır.

Referanslar

- Aktürk, N. 1993. “Dynamics of a Rigid Shaft Supported by Angular Contact Ball Bearings”. PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science and Technology, University of London.
- Aktürk, N. 1993. “Dynamics of a Rigid Shaft Supported by Angular Contact Ball Bearings”. Doctoral Thesis, Department of Mechanical Engineering Imperial College of Science and Technology University of London, London.
- Antoni, Jérôme. 2006. “The Spectral Kurtosis: A Useful Tool for Characterising Non-Stationary Signals”. *Mechanical Systems and Signal Processing* 20(2):282-307. doi:10.1016/j.ymssp.2004.09.001.
- Antoni, Jérôme, ve R. B. Randall. 2006. “The Spectral Kurtosis: Application to the Vibratory Surveillance and Diagnostics of Rotating Machines”. *Mechanical Systems and Signal Processing* 20(2):308-31. doi:10.1016/j.ymssp.2004.09.002.
- Antoniadis, I., ve G. Glossiotis. 2001. “CYCLOSTATIONARY ANALYSIS OF ROLLING-ELEMENT BEARING VIBRATION SIGNALS”. *Journal of Sound and Vibration* 248(5):829-45. doi:10.1006/jsvi.2001.3815.
- Antonino-Daviu, Jose, ve Peter Popaleny. 2018. “Detection of Induction Motor Coupling Unbalanced and Misalignment via Advanced Transient Current Signature Analysis”. Ss. 2359-64 içinde *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*.
- Bal, Hikmet, ve Tuncay Karaçay. 2025. “Condition Monitoring of a Ball Bearing on a Drive Shaft from the Speed Variation of the Electric Motor”. *Journal of Vibration Engineering & Technologies* 13(6):441. doi:10.1007/s42417-025-02010-5.



- Barron, Ron. 1996. *Engineering condition monitoring: practice, methods and applications*. Prentice Hall.
- Boashash, Boualem, Abdeldjalil Aïssa-El-Bey, ve Mohammad F. Al-Sa'd. 2018. "Multisensor Time-Frequency Signal Processing MATLAB Package: An Analysis Tool for Multichannel Non-Stationary Data". *SoftwareX* 8:53-58. doi:10.1016/j.softx.2017.12.002.
- Bogard, F., K. Debray, ve Y. Q. Guo. 2002. "Determination of Sensor Positions for Predictive Maintenance of Revolving Machines". *International Journal of Solids and Structures* 39(12):3159-73. doi:10.1016/S0020-7683(02)00117-8.
- Bolaers, F., O. Cousinard, P. Marconnet, ve L. Rasolofondraibe. 2004. "Advanced detection of rolling bearing spalling from de-noising vibratory signals". *Control Engineering Practice* 12(2):181-90.
- Caldero, Pau, ve Dominik Zoeke. 2019. "Multi-Channel Real-Time Condition Monitoring System Based on Wideband Vibration Analysis of Motor Shafts Using SAW RFID Tags Coupled with Sensors". *Sensors* 19(24):5398. doi:10.3390/s19245398.
- Cempel, C. 1991. "Condition evolution of machinery and its assessment from passive diagnostic experiment". *Mechanical Systems and Signal Processing* 5(4):317-26. doi:https://doi.org/10.1016/0888-3270(91)90032-Z.
- Cempel, Czesław. 1988. "Vibroacoustical diagnostics of machinery: An outline". *Mechanical Systems and Signal Processing* 2(2):135-51. doi:https://doi.org/10.1016/0888-3270(88)90039-8.
- Dimentberg, Mikhail Fedorovich, Konstantin Vasil'evich Frolov, ve Anatoly I. Menyailov. 1991. "Vibroacoustical diagnostics for machines and structures". (No Title).
- Dron, J. P., F. Bolaers, ve L. Rasolofondraibe. 2004. "Improvement of the Sensitivity of the Scalar Indicators (Crest Factor, Kurtosis) Using a de-Noising Method by Spectral Subtraction: Application to the Detection of Defects in Ball Bearings". *Journal of Sound and Vibration* 270(1-2):61-73. doi:10.1016/S0022-460X(03)00483-8.
- Du, Linsen, Hongli Liu, Shuai Li, ve Zhisheng Dong. 2020. "Research on Signal Processing of Mechanical Vibration Based on Time-Frequency Analysis Method". Ss. 719-27 içinde *Recent Trends in Intelligent Computing, Communication and Devices, Advances in Intelligent Systems and Computing*, editör V. Jain, S. Patnaik, F. Popențiu Vlădicescu, ve I. K. Sethi. Singapore: Springer.
- Ericsson, Stefan, Niklas Grip, Elin Johansson, Lars-Erik Persson, Ronny Sjöberg, ve Jan-Olov Strömberg. 2005. "Towards Automatic Detection of Local Bearing Defects in Rotating Machines". *Mechanical Systems and Signal Processing* 19(3):509-35. doi:10.1016/j.ymssp.2003.12.004.
- Frank, Paul M., ve Gerhard-Mercator-Universitit-GH Duisburg. t.y. "New Developments Using

AI in Fault Diagnosis”.

- Gerval, J. P., G. Morel, ve C. Querre. 1994. “Behaviour modelling and vibrations analysis applied to predictive maintenance: Different approaches leading to the same conclusions”. S. 1/544-I/546 vol.1 içinde *Proceedings of OCEANS’94*. C. 1.
- Goumas, S. K., M. E. Zervakis, ve G. S. Stavrakakis. 2002. “Classification of washing machines vibration signals using discrete wavelet analysis for feature extraction”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 51(3):497-508. doi:10.1109/TIM.2002.1017721.
- Goyal, Deepam, Vanraj, B. S. Pabla, ve S. S. Dhimi. 2017. “Condition Monitoring Parameters for Fault Diagnosis of Fixed Axis Gearbox: A Review”. *Archives of Computational Methods in Engineering* 24(3):543-56. doi:10.1007/s11831-016-9176-1.
- Harris, Tedric A., ve W. J. Creceilius. 1986. “Rolling bearing analysis”.
- Harris, Tedric A., ve Michael N. Kotzalas. 2006. *Rolling Bearing Analysis - 2 Volume Set*. CRC Press.
- Hashemian, H. M. 2011. “State-of-the-Art Predictive Maintenance Techniques”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 60(1):226-36. doi:10.1109/TIM.2010.2047662.
- Hongxing, Liu, Zuo Hongfu, Jiang Chengyu, ve Qu Liangsheng. 2000. “AN IMPROVED ALGORITHM FOR DIRECT TIME-DOMAIN AVERAGING”. *Mechanical Systems and Signal Processing* 14(2):279-85. doi:10.1006/mssp.1999.1250.
- Kar, Chinmaya, ve A. R. Mohanty. 2004. “Application of KS Test in Ball Bearing Fault Diagnosis”. *Journal of Sound and Vibration* 269(1-2):439-54. doi:10.1016/S0022-460X(03)00380-8.
- Karaçay, Tand Aktürk ve N. 2008. “Vibrations of a Grinding Spindle Supported by Angular Contact Ball Bearings”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics* 222(1):61-75.
- Kotzalas, Michael N., ve Tedric A. Harris. 2000. “Fatigue Failure Progression in Ball Bearings”. *Journal of Tribology* 123(2):238-42. doi:10.1115/1.1308013.
- Lecinski, Pawel. 2022. “Bearing Problems: Fault Frequency and AI-Based Methods | CBM”. <https://www.cbmconnect.com/bearing-problems-fault-frequency-and-artificial-intelligence-based-methods/>.
- Li, Li, ve Liangsheng Qu. 2003. “Cyclic Statistics in Rolling Bearing Diagnosis”. *Journal of Sound and Vibration* 267(2):253-65. doi:10.1016/S0022-460X(02)01412-8.
- Liu, T. I., J. H. Singonahalli, ve N. R. Iyer. 1996. “DETECTION OF ROLLER BEARING DEFECTS USING EXPERT SYSTEM AND FUZZY LOGIC”. *Mechanical Systems*



and *Signal Processing* 10(5):595-614. doi:10.1006/mssp.1996.0041.

- McFadden, P. D., ve J. D. Smith. 1984. "Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique — a review". *Tribology International* 17(1):3-10. doi:10.1016/0301-679X(84)90076-8.
- McFadden, P. D., ve M. M. Toozhy. 2000. "APPLICATION OF SYNCHRONOUS AVERAGING TO VIBRATION MONITORING OF ROLLING ELEMENT BEARINGS". *Mechanical Systems and Signal Processing* 14(6):891-906. doi:10.1006/mssp.2000.1290.
- Motlani, Sahil, Nandkumar Gurav, ve Shilpa Sondkar. 2018. "Vibration Signal Analysis of Rotating Machines Using VoId-Kalman Filter & Phase Analysis Technique". Ss. 1300-1304 içinde *2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*.
- Nakajima, Seiichi. 1988. "Introduction to TPM: total productive maintenance.(Translation)". *Productivity Press, Inc., 1988, 129.*
- Neild, S. A., P. D. McFadden, ve M. S. Williams. 2003. "A Review of Time-Frequency Methods for Structural Vibration Analysis". *Engineering Structures* 25(6):713-28. doi:10.1016/S0141-0296(02)00194-3.
- Ocak, Hasan, ve Kenneth A. Loparo. 2004. "Estimation of the Running Speed and Bearing Defect Frequencies of an Induction Motor from Vibration Data". *Mechanical Systems and Signal Processing* 18(3):515-33. doi:10.1016/S0888-3270(03)00052-9.
- Patil, S. S., ve J. A. Gaikwad. 2013. "Vibration analysis of electrical rotating machines using FFT: A method of predictive maintenance". Ss. 1-6 içinde *2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)*.
- Rahnejat, Hand Gohar ve R. 1985. "The Vibrations of Radial Ball Bearings". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 199(3):181-93.
- Randall, R. B., J. Antoni, ve S. Chobsaard. 2001. "THE RELATIONSHIP BETWEEN SPECTRAL CORRELATION AND ENVELOPE ANALYSIS IN THE DIAGNOSTICS OF BEARING FAULTS AND OTHER CYCLOSTATIONARY MACHINE SIGNALS". *Mechanical Systems and Signal Processing* 15(5):945-62. doi:10.1006/mssp.2001.1415.
- Randall, Robert B., ve Jérôme Antoni. 2011. "Rolling element bearing diagnostics—A tutorial". *Mechanical Systems and Signal Processing* 25(2):485-520. doi:10.1016/j.ymssp.2010.07.017.
- Randall, Robert Bond. 2010. "VIBRATION-BASED CONDITION MONITORING". *SPH P*.
- Renwick, John T. 1984. "Condition Monitoring of Machinery Using Computerized Vibration Signature Analysis". *IEEE Transactions on Industry Applications* IA-20(3):519-27.

doi:10.1109/TIA.1984.4504447.

- Seker, Serhat, ve Emine Ayaz. 2003. "Feature Extraction Related to Bearing Damage in Electric Motors by Wavelet Analysis". *Journal of the Franklin Institute* 340(2):125-34. doi:10.1016/S0016-0032(03)00015-2.
- Shagluf, Abubaker, ve A. P. Longstaff. 2014. "Maintenance Strategies to Reduce Downtime Due to Machine Positional Errors". Ss. 111-18 içinde *Proceedings of Maintenance Performance Measurement and Management (MPMM) Conference 2014*. Imprensa da Universidade de Coimbra.
- Sheen, Yuh-Tay, ve Chun-Kai Hung. 2004. "Constructing a Wavelet-Based Envelope Function for Vibration Signal Analysis". *Mechanical Systems and Signal Processing* 18(1):119-26. doi:10.1016/S0888-3270(03)00046-3.
- Sinha, Jyoti Kumar. 2015. *Vibration analysis, instruments, and signal processing*. C. 1. CRC press Boca Raton.
- Sivakumar, S., ve D. Nedumaran. 2018. "Discrete Time-Frequency Signal Analysis and Processing Techniques for Non-Stationary Signals". *Journal of Applied Mathematics and Physics* 06(09):1916-27. doi:10.4236/jamp.2018.69163.
- Tandon, N., ve A. Choudhury. 1999. "A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings". *Tribology International* 32(8):469-80. doi:10.1016/S0301-679X(99)00077-8.
- Thomazella, Rogério, Wenderson Nascimento Lopes, Paulo Roberto Aguiar, Felipe Aparecido Alexandre, Arthur Alves Fiocchi, ve Eduardo Carlos Bianchi. 2019. "Digital signal processing for self-vibration monitoring in grinding: A new approach based on the time-frequency analysis of vibration signals". *Measurement* 145:71-83. doi:10.1016/j.measurement.2019.05.079.
- Williams, T., X. Ribadeneira, S. Billington, ve T. Kurfess. 2001. "ROLLING ELEMENT BEARING DIAGNOSTICS IN RUN-TO-FAILURE LIFETIME TESTING". *Mechanical Systems and Signal Processing* 15(5):979-93. doi:10.1006/mssp.2001.1418.
- Yang, Hongyu, Joseph Mathew, ve Lin Ma. 2005. "Fault Diagnosis of Rolling Element Bearings Using Basis Pursuit". *Mechanical Systems and Signal Processing* 19(2):341-56. doi:10.1016/j.ymssp.2004.03.008.
- Yu, Dejie, Junsheng Cheng, ve Yu Yang. 2005. "Application of EMD Method and Hilbert Spectrum to the Fault Diagnosis of Roller Bearings". *Mechanical Systems and Signal Processing* 19(2):259-70. doi:10.1016/S0888-3270(03)00099-2.

EK-1

Tablo-A1. Şaft CG'nin 5 DoF hareketin neden olduğu bilye deformasyonu δ_i ve temas açısı α_i (Akturk 1993).

SOL RULMAN	δ_i (elastik ezilme) m	$\left(\left(\begin{matrix} Bd_b \sin \alpha_0 + z_0 - z \\ +a_1 (1 - \cos \phi) \cos \theta \\ +a_1 \cos \phi (1 - \cos \psi) \sin \theta \\ +R \sin \phi \cos \theta - R \sin \psi \sin \theta \end{matrix} \right)^2 + \left(\begin{matrix} Bd_b \cos \alpha_0 + x \cos \theta + y \sin \theta \\ +a_1 \sin \phi \cos \theta + a_1 \cos \phi \sin \psi \sin \theta \\ -R (1 - \cos \phi) \cos \theta \\ -R (1 - \cos \psi) \sin \theta \end{matrix} \right)^2 \right)^{1/2} - Bd_b$
	α_i (temas açısı) rad	$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\begin{pmatrix} Bd_b \sin \alpha_0 + z_0 - z \\ +a_1 (1 - \cos \phi) \cos \theta \\ +a_1 \cos \phi (1 - \cos \psi) \sin \theta \\ +R \sin \phi \cos \theta - R \sin \psi \sin \theta \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} Bd_b \cos \alpha_0 + x \cos \theta + y \sin \theta \\ +a_1 \sin \phi \cos \theta + a_1 \cos \phi \sin \psi \sin \theta \\ -R (1 - \cos \phi) \cos \theta \\ -R (1 - \cos \psi) \sin \theta \end{pmatrix}} \right)$
SAĞ RULMAN	δ_i (elastik ezilme) m	$\left(\left(\begin{matrix} Bd_b \sin \alpha_0 + z_0 + z \\ +b_1 (1 - \cos \phi) \cos \theta \\ +b_1 \cos \phi (1 - \cos \psi) \sin \theta \\ -R \sin \phi \cos \theta + R \sin \psi \sin \theta \end{matrix} \right)^2 + \left(\begin{matrix} Bd_b \cos \alpha_0 + x \cos \theta + y \sin \theta \\ -b_1 \sin \phi \cos \theta - b_1 \cos \phi \sin \psi \sin \theta \\ +R (1 - \cos \phi) \cos \theta \\ +R (1 - \cos \psi) \sin \theta \end{matrix} \right)^2 \right)^{1/2} - Bd_b$
	α_i (temas açısı) rad	$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\begin{pmatrix} Bd_b \sin \alpha_0 + z_0 + z \\ +b_1 (1 - \cos \phi) \cos \theta \\ +b_1 \cos \phi (1 - \cos \psi) \sin \theta \\ -R \sin \phi \cos \theta + R \sin \psi \sin \theta \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} Bd_b \cos \alpha_0 + x \cos \theta + y \sin \theta \\ -b_1 \sin \phi \cos \theta - b_1 \cos \phi \sin \psi \sin \theta \\ +R (1 - \cos \phi) \cos \theta \\ +R (1 - \cos \psi) \sin \theta \end{pmatrix}} \right)$

EK-2 Rulman Hata frekansları

Rulmanlar kusursuz bile olsalar şaft hızına bağlı olarak değişken uyum frekansları olarak bilinen titreşim frekansları oluşturur. Bu frekanslar Denklem 5-8'de verilmiştir ve sırasıyla kafes frekansı, dış bilezik hata frekansı, iç bilezik hata frekansı ve yuvarlanma elemanı frekansdır.

$$f_c = \frac{n_i}{120} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos \alpha \right)$$

$$f_{bpfo} = m f_c; f_{bpfi} = m(f_i - f_c)$$

$$f_{re} = \frac{d_m n_i}{120 d_B} \left[1 - \left(\frac{d_b}{d_m} \cos \alpha \right)^2 \right]$$

Tablo B1. Değişik şaft dönüş hızları için rulman frekansları.

d/d (rpm)	ω_i		ω_c		ω_{bsf}	ω_{bpo}	ω_{bpi}
	(rad/s)	(Hz)	(rad/s)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)
1000	104,72	16,67	44,93	7,15	55,54	57,21	76,13
3000	314,16	50,00	134,79	21,45	166,61	171,62	228,38
6000	628,32	100,00	269,57	42,90	333,22	343,23	456,77
10000	1047,20	166,67	449,29	71,51	555,36	572,06	761,28

**Tel Çekme Makinesinde Kestirimci Bakım****Predictive Maintenance on Rod Break Down Machine**

Cemal MERAN^{1,*}, Dilrüba YAVAŞ², Mustafa Furkan ORHA², Ayşenur KABUKÇU², Fatih ÖZTEKİN³

^{1,*}cmeran@pau.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-1813-7166>

²dyavas19@posta.pau.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0009-0004-9524-387X>

²morha19@posta.pau.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0009-0004-8864-1538>

²akabukcu19@posta.pau.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0009-0009-9590-9260>

⁵oztekin.fatih@nexans.com, ORCID No: <http://orcid.org/0009-0004-5709-8181>

DOI : <http://dx.doi.org/10.31796/ogummf.xxxxxx>

Özet

Kestirimci bakım, ekipmanların durumunu sürekli izleyerek potansiyel arızaları önceden tespit etmeyi amaçlayan bir bakım yaklaşımıdır. Bu yaklaşım sayesinde, beklenmedik duruşların önüne geçilmesi, bakım maliyetlerinin azaltılması ve ekipman ömrünün uzatılması mümkün olmaktadır. Kestirimci bakım yöntemleri, özellikle endüstriyel uygulamalarda operasyonel verimliliğin artırılması ve sistem güvenilirliğinin sağlanması açısından stratejik bir rol üstlenmektedir. Bu çalışma kapsamında, Nexans Türkiye Endüstri ve Ticaret A.Ş – Denizli Kablo Fabrikası’nda yer alan kaba tel çekme makinesi üzerinde kestirimci bakım uygulamalarına yönelik titreşim temelli analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde, özellikle redüktör bölgesinde dişli arızası, mekanik gevşeklik ve rulman hasarına dair bulgular elde edilmiş; veriler ISO 10816-3 standardına göre analiz edilmiştir. Elde edilen teknik veriler, makinenin mevcut durumu hakkında detaylı bilgi sunmakta ve ileriye dönük bakım planlamaları için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Bu yönüyle çalışma, kablo sektöründe kestirimci bakımın uygulanabilirliğini ortaya koyarak enerji verimliliği, süreklilik ve performans açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kestirimci bakım, Titreşim analizi, Spektrum grafiği, Dişli arızası, Tel çekme makinesi

Abstract

Predictive maintenance is a maintenance approach that aims to detect potential failures in advance by continuously monitoring the condition of equipment. Thanks to this approach, it is possible to prevent unexpected downtime, reduce maintenance costs and extend equipment life. Predictive maintenance methods play a strategic role in increasing operational efficiency and ensuring system reliability, especially in industrial applications. Within the scope of this study, vibration-based analyses for predictive maintenance applications were carried out on a rough wire drawing machine at Nexans Türkiye Ind. Denizli Cable Co. In the evaluations, findings of gear failure, mechanical looseness and bearing damage, especially in the gearbox area, were obtained and the data were analyzed according to ISO 10816-3 standard. The technical data obtained provides detailed information about the current condition of the machine and provides a solid basis for future maintenance planning. In this respect, the study makes significant contributions in terms of energy efficiency, continuity and performance by demonstrating the applicability of predictive maintenance in the cable industry.

Keywords: Predictive maintenance, Vibration analysis, Spectrum plot, Gear failure, Wire drawing machine



1. Giriş

Günümüz endüstrilerinde üretim süreçlerinde kullanılan makineler, operasyonların verimli ve kesintisiz ilerlemesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu makinelerin arızalanması, üretimde duruşlara, maliyetli kesintilere ve kaynak kayıplarına yol açabilmektedir. Bu nedenle, makinelerin çalışma durumunun izlenmesi ve güvenilir performansının sağlanması, işletmeler için büyük önem taşımaktadır. Kestirimci bakım, bu ihtiyacı karşılayan etkili bir strateji olarak, makinelerin ömrünü uzatırken aynı zamanda üretim süreçlerinin verimli şekilde sürdürülmesini sağlamaktadır.

Kestirimci bakım, makine ve ekipmanların çalışma durumlarını sürekli izleyerek, ölçüm ve analiz sonuçları doğrultusunda olası arızaları önceden tespit eden bir bakım türüdür. Bu yaklaşım, makine arızalanmadan önce müdahale edilmesini sağlar ve plansız duruşlar ile işçilik ve maliyet kayıplarını önemli ölçüde azaltır. Sensörler veya özel cihazlarla elde edilen veriler analiz edilerek, ekipmanın bakım için en uygun zamanı belirlenir. Bu sayede, makinenin durumu izlenirken olası arızaların nedenleri de tespit edilir ve üretimde süreklilik sağlanır. Ayrıca, makine öğrenimi ve istatistiksel algoritmalar kullanılarak arızaların tahmini yapılır; böylece bakım kararları daha doğru ve zamanında alınabilir. Kullanılan başlıca teknikler arasında kızılötesi termografi, yağ analizleri, ultrasonik izleme, motor akımı izleme ve titreşim analizi yer alır (Ceyhan ve Kasapbaşı, 2022).

Titreşim analizi, makinelerde oluşan arızaları frekans düzeyinde belirler. Arızalar belirli frekanslarda titreşim üretir ve bu frekanslar üzerinden arıza tespiti yapılabilir. Balanssızlık, makinenin dönme hızının bir katı (1x) frekansında titreşim artışına neden olur. Dişli arızaları ise dişli kavrama frekansının katlarında (dişli sayısına bağlı olarak) belirgin titreşimler oluşturur. Rulman arızalarında ise yüksek frekanslı titreşimler gözlemlenir, özellikle iç veya dış bileziklerdeki hasar, belirli frekanslarda titreşim piklerine yol açar. Kaplin ayarsızlıkları ise genellikle 2x veya 3x frekanslarında titreşim artışları ile kendini gösterir. Bu şekilde, titreşim verileri kullanılarak makine arızaları erken tespit edilir ve bakım ihtiyaçları zamanında belirlenir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Kestirimci bakım, üretim süreçlerinde makinelerin ömrünü uzatmak ve plansız duruşları azaltmak için giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Literatürde farklı sektörlerde yapılan çalışmalar, bu yaklaşımın etkinliğini ortaya koymaktadır. Örneğin, Novelo ve Chu (2022) Tayvan'daki bir somun üretim fabrikasında titreşim analizi ile mekanik arızaların tespit ve tahminini incelemiş, bakım süresinin optimize edilmesiyle üretim hacmi ve kalitesinin artırılabilirliğini göstermiştir. Benzer şekilde, Alcelik ve Kam (2020) şaft yatak sistemlerinde titreşim analizinin etkilerini araştırmış ve hizalama eksikliğinin yataklarda ek yükler oluşturarak sistem performansını düşürdüğünü ortaya koymuştur.

Ranieri ve arkadaşları (2018), otomotiv sektöründe titreşim analizinin motor ve şanzıman sistemlerinde uygulanabilirliğini değerlendirmiş ve arıza tespitinin doğruluğunun %85'in üzerinde olduğunu, operasyonel maliyetleri ise %20 oranında azalttığını göstermiştir. Aydın ve Meran (2018) ise modern çimento fabrikalarında kestirimci bakım tekniklerinin uygulanabilirliğini incelemiş, proses verilerinin çevrimiçi toplanması ve bulut teknolojileri ile entegre edilmesinin

bakım yönetiminin etkinliğini artıracaklarını belirtmiştir. Çalışmada, yöntemlerin disiplinli uygulanmasıyla bakım maliyetlerinde %25-30 azalma ve arıza sürelerinde %70'e varan düşüş sağlanabileceği vurgulanmıştır.

Martinez ve Lopez (2017) ise tekstil sektöründe dokuma makinelerinde kestirimci bakım uygulamalarının arıza oranını %35 azaltarak plansız duruşları önemli ölçüde düşürdüğünü ve yıllık 75.000 dolar tasarruf sağladığını rapor etmiştir. Enerji sektöründe yapılan çalışmalar da benzer sonuçlar göstermektedir; Bose ve Sharma (2011) gaz türbinlerinde titreşim analizi ile potansiyel arızaların erken tespit edilmesinin 350.000 dolar tasarruf ve türbinin ömründe %15 artış sağladığını belirtmiştir. Peng ve Chu (2004) ise rüzgâr türbinlerinde titreşim analizinin rotor balanssızlığı ve dişli arızalarının erken tespitinde sistem güvenilirliğini %25 artırdığını göstermiştir.

Bu çalışmalar, kestirimci bakımın farklı sektörlerde etkin şekilde uygulanabileceğini ortaya koyarken, kablo üretim sektöründe özellikle tel çekme makineleri üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olduğunu göstermektedir. Tel çekme makineleri, üretim sürecinin kritik halkalarından biri olup, meydana gelebilecek arızalar hem kaliteyi düşürmekte hem de üretim hattında ciddi kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada Nexans tesislerinde tel çekme makineleri üzerinde gerçekleştirilen kestirimci bakım uygulamaları ve elde edilen bulgular analiz edilmiştir.

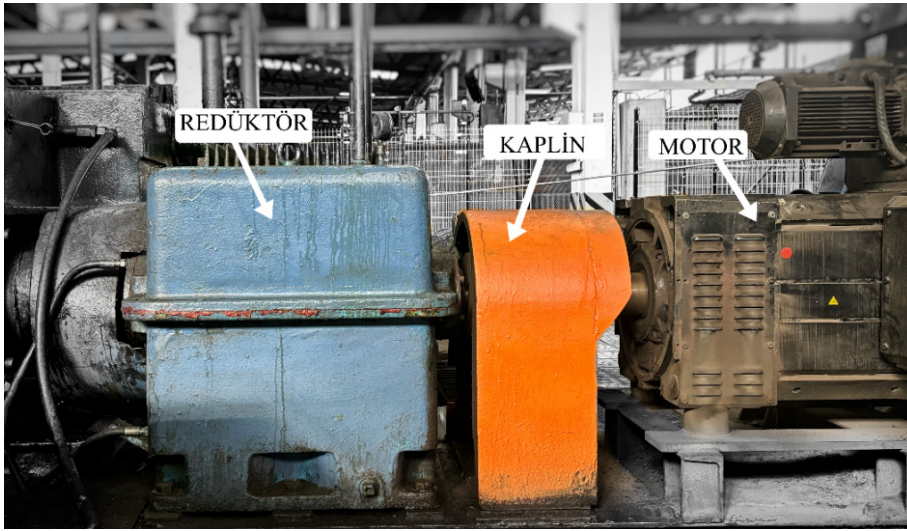
3. Yöntem

Bu çalışma, Nexans Türkiye Endüstri ve Ticaret A.Ş. Denizli Kablo Fabrikasında bulunan TC-10 kaba tel çekme makinesi üzerinde kestirimci bakım uygulamasının yapılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Kullanılan materyaller arasında TC-10 tel çekme makinesi ve Emerson AMS 2140 titreşim ölçüm cihazı yer almaktadır. TC-10, bakır tel çekme işlemi gerçekleştirir ve makineye 8 mm çapında giren bakır tel, makineden çıktığında 1,75 mm'ye kadar inceltir. Makinenin günlük üretim kapasitesi 750 km olup, bu da saniyede yaklaşık 8.64 metre tel çekildiği anlamına gelir. Tel çekme işlemi sırasında makine 1518 rpm hızında çalışmakta olup, 217 amper akım çeker ve çekme işlemi için 265 kW motor gücü gerektirir. Şekil 1'de, ölçümler için kullanılan tel çekme makinesinin görüntüsü yer almaktadır.



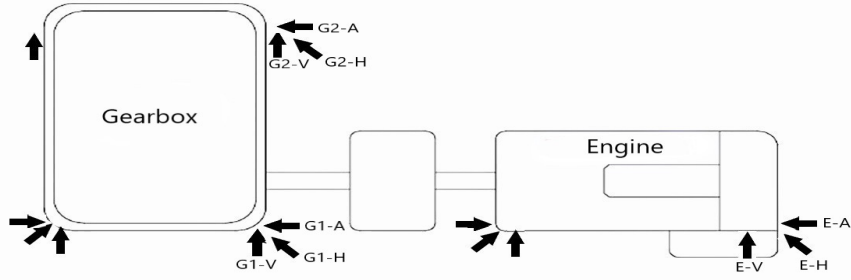
Şekil 1. Kaba Tel Çekme Makinesi (TC-10)

Bu çalışma kapsamında odaklandığımız ve ölçüm aldığımız kısım, makinenin motor ve redüktör bölümüdür. **Şekil 2**'de motor ile redüktörün resmi verilmiştir. Şebeke frekansı sabit olarak 50 Hz belirlenmiş ve ölçümler bu sabit frekansta gerçekleştirilmiştir. Ölçüm alınan redüktör iki kademeli olup, çalışma prensibi dört vitesli bir şanzımana benzemektedir. Sistemde sabit duran bir mil ve hidrolik mekanizma ile eksenel olarak hareket edebilen ikinci bir mil bulunmaktadır. İkinci milin ileri-geri hareketi sayesinde farklı dişli çiftleri devreye girmekte ve bu şekilde dört ayrı vites kademesi elde edilmektedir. Bu yapı sayesinde redüktör, düşük hız-yüksek tork gerektiren durumlarda hız düşürücü olarak, yüksek hız gerektiren durumlarda ise hız artırıcı olarak çalışabilmektedir. Böylece sistem hem esneklik kazanmakta hem de farklı çalışma koşullarına uyum sağlayabilmektedir.



Şekil 2. Ölçüm alınan TC-10 makinesinin redüktör ve motor bölümü

Ölçümler, makinenin titreşim davranışını tam anlamıyla analiz edebilmek için radyal (dikey ve yatay) ve eksenel yönlerde, sistemin motor giriş ve çıkış noktaları ile redüktör giriş ve çıkış noktalarını kapsayan toplam 16 farklı noktadan alınmış ve bu noktaların sistem üzerindeki gösterimi Şekil 3'te verilmiştir. Elde edilen veriler, Emerson firmasının kendi geliştirdiği PeakVue Teknolojisi ile analiz edilmiştir. PeakVue teknolojisi, dönen makinelerin sağlık durumunu hızlı ve güvenilir bir şekilde analiz etmeyi sağlayan gelişmiş bir titreşim izleme yöntemidir. Geleneksel titreşim analizinde sinyaller genellikle RMS (karekök ortalama) değerlerine odaklanırken, PeakVue, sinyalin zirve (peak) değerlerini analiz eder.



Şekil 3. Titreşim ölçüm noktaları A: eksenel V: dikey H: yatay G: redüktör E: motor

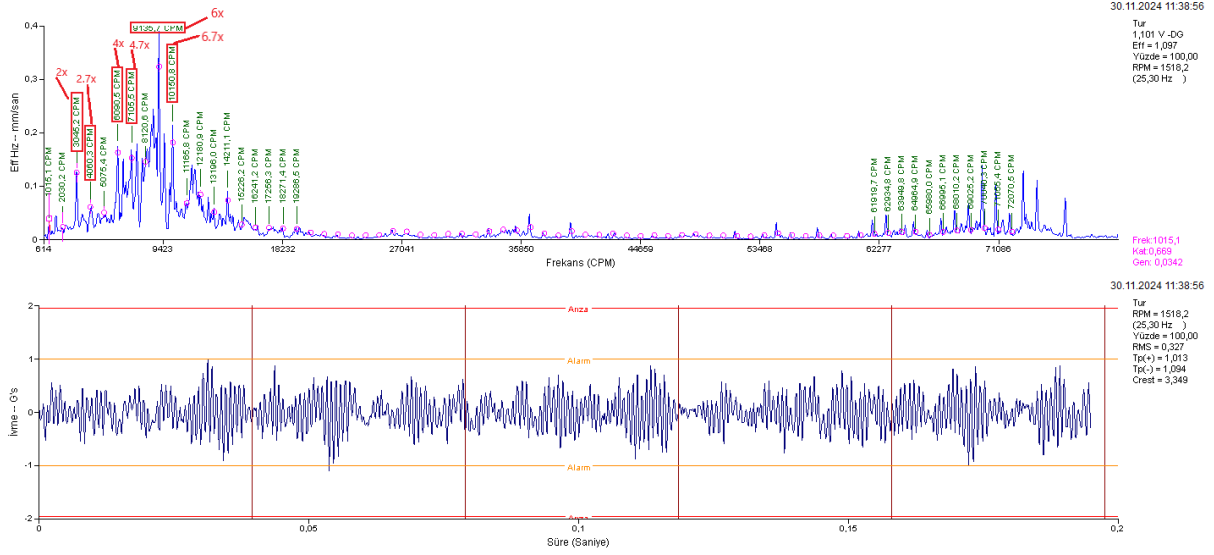
Elde edilen veriler, Emerson firmasının kendi geliştirdiği PeakVue Teknolojisi ile analiz edilmiştir. PeakVue teknolojisi, dönen makinelerin sağlık durumunu hızlı ve güvenilir bir şekilde analiz etmeyi sağlayan gelişmiş bir titreşim izleme yöntemidir. Geleneksel titreşim analizinde sinyaller genellikle RMS (karekök ortalama) değerlerine odaklanırken, PeakVue, sinyalin zirve (peak) değerlerini analiz eder. Bu sayede ani darbe olayları veya düzensizlikler net bir şekilde ortaya çıkarak, özellikle rulman, dişli ve pompa gibi döner ekipmanlardaki mekanik sorunlar, yağlama eksiklikleri veya aşınmalar daha hassas bir şekilde tespit edilebilir. Şekil 4'te titreşim ölçüm cihazı ile redüktörün giriş kısmından yatay eksende ölçüm anı verilmiştir.



Şekil 4. Titreşim ölçüm sürecinde cihazların kullanımı

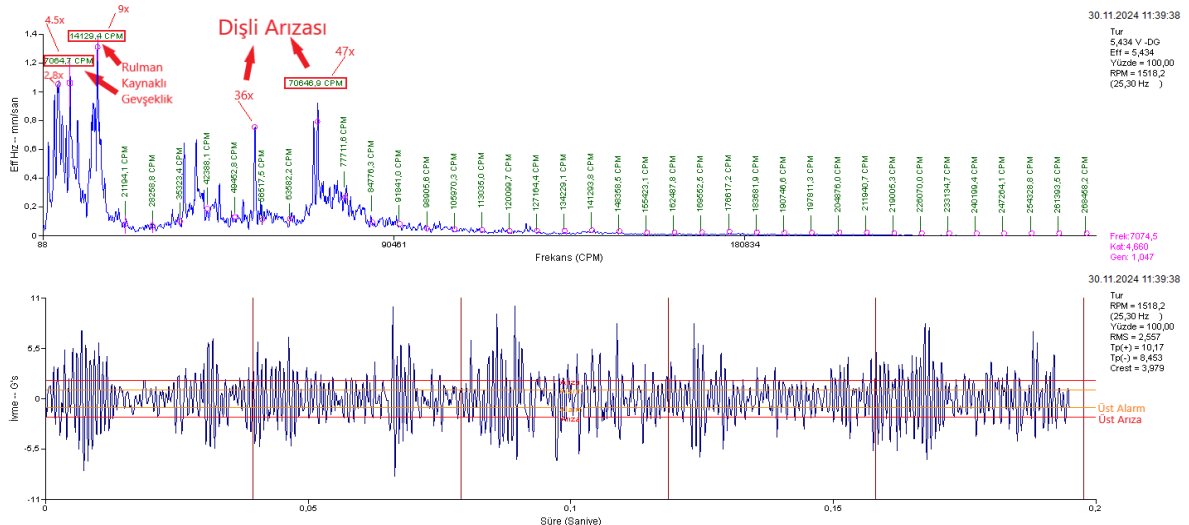
4. Bulgular

Bu bölümde, gerçekleştirilen titreşim ölçümleri ve analizlerden elde edilen veriler sunulmuştur. Başlangıçta mevcut sorunlar net olarak bilinmemekle birlikte, analizler makinenin durumu hakkında ön değerlendirme yapılmasına olanak sağlamış ve potansiyel sorunlara ilişkin bulgular elde edilmiştir.

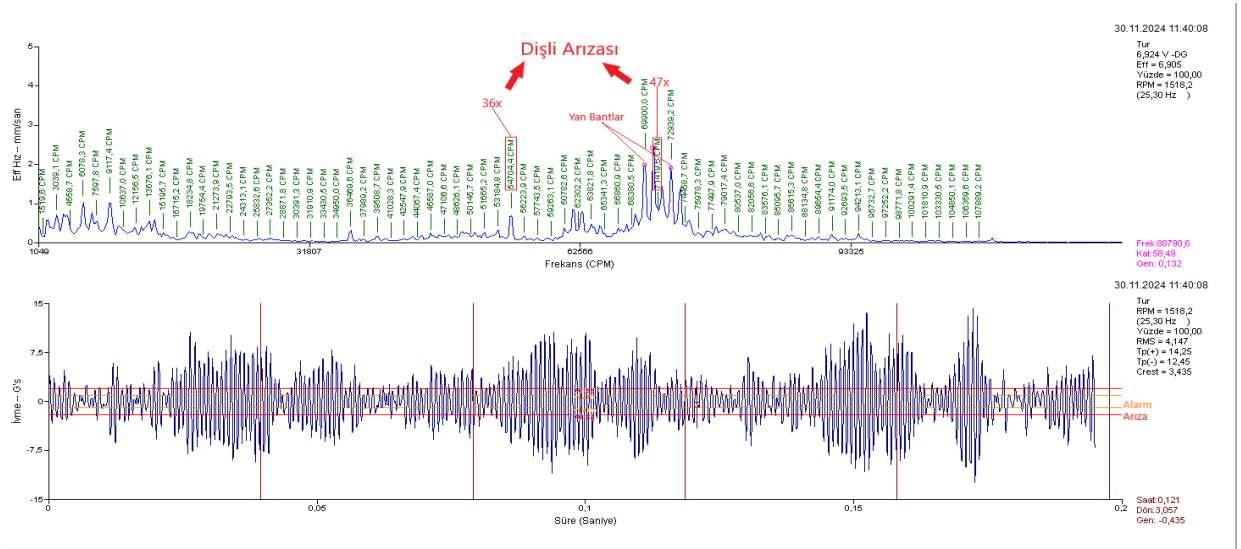


Şekil 5. Motor arka dikey ölçüm spektrum ve zaman-dalga grafiği

Motorun arka dikey ölçüm spektrum ve zaman-dalga grafiğinden elde edilen sonuçlar Şekil 5'te sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, motorun arka dikey ölçüm grafiğinde en yüksek pik 6x frekans bileşeninde ortaya çıkmış olup, bu durum tabandaki geniş bant ile mekanik gevşeklik ihtimalini göstermektedir.

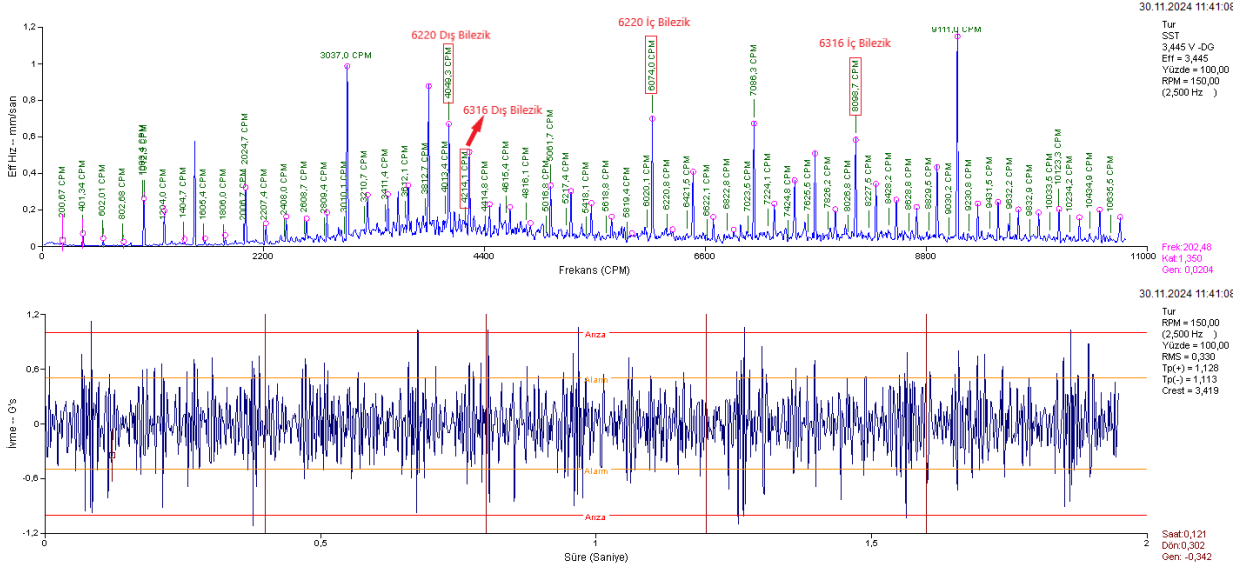


Redüktörün 1. kademesinin giriş yatay ölçüm spektrum ve zaman-dalga grafikleri Şekil 6'da sunulmuştur. Analizler, düşük CPM (Cycles Per Minute) değer aralıklarında belirgin bir mekanik gevşeklik olduğunu göstermektedir. Sistemde yalnızca 6316 tipi rulman bulunduğu kaydedilmiştir. Dişli gruplarında yapılan ölçümlerde, 2. vitesin giriş RPM değeri 1518 ve çıkış RPM değeri 1012 olan Z=36 ve Z=54 dişli çiftlerinde CPM değeri yaklaşık 55.000 olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde, 4. vitesin giriş RPM değeri 1518 ve çıkış RPM değeri 1659 olan Z=47 ve Z=43 dişli çiftlerinde CPM değeri yaklaşık 71.000 olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler, redüktörün belirli noktalarında olası mekanik gevşeklik ve dişli hasarlarını göstermektedir.



Şekil 7. Redüktör 1. kademe çıkış yatay ölçüm spektrum ve dalga-zaman grafiği

Redüktörün çıkış kısmına ait yatay ölçüm spektrum ve zaman-dalga grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. Çıkış grafiğinde, giriş grafiğine benzer bir örüntü görülmüştür. Düşük CPM değerlerinde pikler kaydedilmiştir. Bu piklerin seviyeleri giriş grafiğine kıyasla daha düşük çıkmıştır. Yüksek CPM değerlerinde giriş grafiğiyle çakışan pikler kaydedilmiştir. 4. vites koşulunda (giriş RPM 1518, çıkış RPM 1659) yan bantların belirginleştiği ve simetrik olmayan piklerin olduğu kaydedilmiştir. Hız ve ivme grafikleri incelendiğinde, hız grafiğinde üst arıza sınırının aşılmadığı; ivme grafiğinde ise bu sınırın aşıldığı kaydedilmiştir.



Şekil 8. Redüktör 2. kademe giriş yatay ölçüm spektrum ve dalga-zaman grafiği

Redüktörün 2. kademesinin giriş yatay ölçüm spektrum ve dalga-zaman grafikleri Şekil 8’de verilmiştir. Ölçümlere göre, 2. kademe için belirlenen CPM değer aralığı (0-10,000) diğer kademe ile kıyaslandığında daha dardır. 2. milin giriş kısmında 6316 tipi rulman yer almakta, 2. milin çıkış kısmında ve 2. viteste 6220 tipi rulman bulunmaktadır. Grafikte ayrıca diğer pik değerleri gözlemlenmiştir.

5. Tartışma

Şekil 5’te verilen motorun arka dikey ölçüm sonuçlarında 6x frekans bileşeninde gözlemlenen pik değer, mekanik gevşeklik ihtimaline işaret etmektedir. 265 kW gücündeki motorun ayaklarının ankraj ile beton zemine sabitlenmemiş olması, yapısal esnekliği artırarak bu tür bir davranışı destekleyebilecek bir etken olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, ISO 10816-3 standartlarına göre esnek ve orta boy makineler için belirlenen uyarı (2,3 mm/s), alarm (4,5 mm/s) ve tehlike (7,1 mm/s) sınır değerleri dikkate alındığında, Şekil 5’teki ölçüm sonuçları bu eşiklerin altında kalmıştır. Bu durum, mevcut koşullarda kritik bir titreşim sorunu olmadığını ancak yapısal özellikler nedeniyle ilerleyen dönemde mekanik gevşeklik kaynaklı arızaların gelişebileceğini göstermektedir.

Şekil 6’da sunulan redüktörün 1. kademesi giriş yatay ölçüm spektrum ve dalga-zaman grafikleri incelendiğinde, düşük CPM değerlerinde mekanik gevşeklik bulguları tespit edilmiş ve bu durum sistemdeki 6316 tipi rulmanın performans sorunlarına işaret etmiştir. Rulman kaynaklı gevşekliğin, bağlı dişli gruplarında potansiyel hasarlara yol açabileceği düşünüldüğünde düzenli bakım ve izleme ihtiyacı ön plana çıkmaktadır. Ayrıca yüksek CPM değerleri, özellikle 2. ve 4. vites dişli çiftlerinde arıza sinyali olarak değerlendirilmiştir. Bu bulgular, redüktörün uzun vadeli güvenilirliğinin korunabilmesi için öngörücü bakım uygulamalarının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Şekil 7’de verilen çıkış kısmına ait spektrum ve zaman-dalga grafikleri, giriş ölçümleriyle benzer bir örüntü ortaya koymuştur. Düşük CPM değerlerinde gözlenen düşük seviyeli pikler, mekanik gevşekliğin yalnızca giriş tarafındaki 6316 tipi rulmanda bulunduğunu düşündürmektedir. Yüksek CPM değerlerinde, özellikle 4. vites koşulunda belirginleşen yan bantlar ve simetrik olmayan pikler ise $Z=47$ ve onunla çalışan $Z=43$ dişlilerinde hasar olasılığını ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca hız grafiğinde sınır değerler aşılmamış olmasına rağmen ivme grafiğinde bu değerlerin geçilmesi, ivme tabanlı analizlerin erken arıza tespitinde daha hassas bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Son olarak, Şekil 8’de sunulan redüktörün 2. kademesine ait giriş yatay ölçüm spektrum ve dalga-zaman grafikleri, rulman ve dişli gruplarındaki olası sorunların belirlenmesinde önemli bilgiler sağlamıştır. Ölçümler, dar CPM aralığının özellikle rulman hasarlarını tespit etmede etkili olduğunu göstermektedir. 2. milin giriş kısmındaki 6316 tipi rulman mekanik gevşeklik ihtimali taşıırken, çıkış kısmındaki 6220 tipi rulman hem iç hem de dış bileziklerde ciddi hasar riskine işaret etmektedir. Buna karşılık diğer pik değerlerinin CPM hesaplamalarıyla tam uyumlu olmaması, her yüksek pik değerinin doğrudan arıza anlamına gelmediğini ortaya koymaktadır. ISO 10816-3 standartlarının sağladığı sınır değerler, ölçümlerin güvenilir biçimde yorumlanmasını desteklemiş ve titreşim analizinin bakım planlamasında kritik bir araç olduğunu göstermiştir.

6. Sonuçlar

Birçok işletme, üretim hattında kullandıkları makinelerin düzgün çalışıp çalışmadığını kontrol etmeden üretime devam etmektedir. Oysa üretim hatlarındaki mekanik gevşeklik, yanlış hizalama ve dengesizlik gibi problemler; makine parçalarının arızalanmasına, ürün kalitesinin düşmesine ve enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Çalışmada da en küçük dengesizliklerin bile önemli elektrik tüketimi yaratarak üretim maliyetlerini artırdığı görülmüştür. Elde edilen veriler, titreşim analizinin makine arızalarını erken aşamada tespit etmede son derece kritik olduğunu göstermektedir. Düzenli titreşim ölçümleri yaparak sonuçların temel değerlerle karşılaştırılması, sistemin güvenli ve verimli çalışması için gereklidir.

Bu çalışmada, redüktörde kullanılan $Z=47$ – $Z=43$ dişli çiftinde ciddi hasar bulgularına ve 6220 tipi rulmanda iç/dış bilezik arızalarına rastlanmıştır. Bu durumda makinenin mevcut haliyle güvenli çalışmasının mümkün olmadığı ve bakım planlamasının geciktirilmeden yapılması gerektiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, kestirimci bakım üretim hattındaki makinelerin güvenilirliğini artırmak, beklenmedik duruşları önlemek ve bakım maliyetlerini azaltmak için vazgeçilmez bir yöntemdir.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde değerli katkılarından dolayı öncelikle tez danışmanımız Prof. Dr. Cemal Meran’a ardından Nexans Türkiye Endüstri ve Ticaret A.Ş. Denizli Kablo Fabrikası Müdürü Necati Günendi’ye, Bakım Müdürü Köksal İlhan’a, Bakım Şefi Fatih Öztekin’e ve titreşim analizlerindeki destekleri için Maray Makine’den Harun Özyılmaz’a teşekkür ederiz.

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 2209-B programında 2024/1 döneminde 1139B412400536 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.



Introduction/ Background

Predictive maintenance is a maintenance approach that continuously monitors the condition of equipment to detect potential failures in advance. By adopting this strategy, it becomes possible to prevent unexpected downtimes, reduce maintenance costs, and extend equipment lifespan. Particularly in industrial applications, predictive maintenance plays a strategic role in enhancing operational efficiency and ensuring system reliability. This study aims to address the question of how predictive maintenance methods can be effectively utilized to minimize failures and optimize industrial performance, highlighting its necessity in modern manufacturing environments.

Objectives/ Research Purpose

Literature reviews indicate that although predictive maintenance has been widely studied across different sectors, studies focusing on wire drawing machines in the cable industry remain quite limited. In particular, the continuation of production without detecting mechanical looseness, imbalance, bearing, and gear failures leads to increased costs and higher energy consumption. This situation highlights a significant gap in the field.

This thesis aims to fill this gap by investigating the applicability of predictive maintenance in wire drawing machines and revealing the benefits such applications can bring to production processes. Specifically, the study contributes to the literature by providing insights into early fault detection, optimization of maintenance planning, and ensuring production continuity in the context of wire drawing machines.

Methods/ Methodology

This study was carried out at Nexans Türkiye Industry and Trade Inc. Denizli Cable Factory, where the TC-10 wire drawing machine was selected with the aim of identifying potential failures through predictive maintenance. The main equipment used in the study consisted of the TC-10 copper wire drawing machine and the Emerson AMS 2140 vibration analyzer.

During the experimental process, copper wire with a diameter of 8 mm entered the machine and was reduced to 1.75 mm, reaching a daily production capacity of 750 km. Measurements were performed while the machine was operating under conditions of 1518 rpm, 217 amperes, and 265 kW motor power.

Vibration data were collected from specific points of the machine and analyzed using spectrum and waveform analysis techniques. Through this method, common problems such as imbalance, coupling misalignment, mechanical looseness, gear, and bearing failures were aimed to be detected at an early stage. To ensure accuracy and standardization, the analyses were carried out in accordance with the ISO 10816-3 guideline, which provides vibration severity classifications for industrial machinery.

This methodological framework demonstrated that vibration-based predictive maintenance is appropriate and necessary for systematic monitoring, early fault detection, and data driven assessment of machine health.

Results/ Findings

The vibration measurements and analyses provided an initial assessment of the machine's condition and revealed potential faults. In the rear vertical motor measurement, high peaks were

detected at the 6x frequency component, which, together with the wide-band structure, indicated possible mechanical looseness. In the first stage of the reducer, significant looseness was observed at low CPM values, while the $Z=36-Z=54$ and $Z=47-Z=43$ gear pairs exhibited high CPM values, suggesting gear damage. The output section showed a similar pattern, with asymmetric sidebands becoming evident under the fourth gear condition. Although the velocity graph did not exceed the threshold, the acceleration graph surpassed the upper limits. In the second stage, measurements particularly related to the 6316 and 6220 bearings revealed additional peaks at low CPM values, pointing to potential bearing failures.

Discussion and Conclusions

The vibration analysis revealed indications of mechanical looseness, gear damage, and bearing failures in the motor and reducer systems. Although motor measurements did not exceed critical thresholds, the machine's structural flexibility suggests a potential risk of looseness-related issues over time. In the reducer's first and second stages, significant findings were detected, particularly performance degradation and damage in the 6316 and 6220 bearings, as well as clear fault signals in the $Z=47-Z=43$ gear pair. The results also showed that even minor imbalances can increase energy consumption and production costs, confirming that regular vibration monitoring is essential for maintenance planning. In conclusion, predictive maintenance is indispensable for enhancing production reliability, preventing unexpected downtimes, and reducing maintenance costs.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Novelo, X. E. A., Chu, H. Y. 2022. “Application of vibration analysis using time-frequency analysis to detect and predict mechanical failure during the nut manufacturing process,” *Advances in Mechanical Engineering*, cilt 14, sayı 2, s. 1-13.
- Alçelik, N., Kam, M. 2020. “Dönen makinelerde eksenel kaçıklık ve dengesizliğin titreşim analizi,” *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, cilt 7, 100. Yıl Özel Sayı, s. 256-269.
- Aydın, G., Meran, C. 2018. “Çimento sektöründe kestirimci bakımla arıza teşhisi ve önlenmesi,” *Mühendis ve Makina*, cilt 59, sayı 692, s. 48-67.
- Ranieri, L., Cannarozzo, L., Micelli, F. 2018. “Vibration analysis in automotive applications: Fault diagnosis in motor and transmission systems,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, cilt 32, sayı 3, s. 1121-1132.
- Martinez, P., Lopez, R. 2017. “Predictive Maintenance in Textile Industry: A Case Study,” *Journal of Industrial Automation and Maintenance*, cilt 15, sayı 2, s. 345-356.
- Bose, A., Sharma, P. 2011. “Cost Savings Through Predictive Maintenance in Gas Turbines,” *Energy Systems Engineering Quarterly*, cilt 9, sayı 2, s. 90-98.
- Peng, Z. K., Chu, F. L. 2004. “Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: A review with bibliography,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, cilt 18, sayı 2, s. 199-221.
- Ceyhan, H., Kasapbaşı, M. C. 2022. “Üretim sistemlerinde makine öğrenmesi ile kestirimci bakım uygulaması ve modellemesi,” *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, sayı 33, s. 167-175.

Monte Carlo Simülasyonu ile Kritik Boyama Makinelerinin Beklenen Arıza Sayısının ve Güvenilirliğinin Tahmini

Aslı Özmen Selçuk, Mustafa Çörekcioğlu Arzu Şahpender, MelihCan Küpelioglu, Prof. Dr. Aşkınar Güngör*

Ozanteks Tekstil San. Ve Tic A.Ş. Ar-Ge Merkezi Bozburun Mah. 7042 Sok. No:6 Denizli
aslnozmen@ozanteks.com.tr

Özet

Üretim hatlarında meydana gelen beklenmedik duruşlar, kalite maliyetlerinin artmasına, teslim sürelerinin uzamasına ve nihayetinde işletme itibarının zedelenmesine yol açmaktadır. Bu nedenle, makine duruş ve bakım verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilen güvenilirlik analizleri, ek maliyetleri ortadan kaldırmak ve sürecin kesintisiz devamlılığını sağlamak adına kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, bir tekstil işletmesinde üretim kaybı açısından en kritik boyama makineleri belirlenmiş; makineye ait arıza kayıtları sınıflandırılmış ve arıza verilerine dayalı olarak yinelemeli Monte Carlo simülasyonu kullanılmıştır. Belirli planlama aralıkları için beklenen arıza adedi ile güvenilirlik–kullanılabilirlik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen çıktılar, bakım kaynaklarının proaktif biçimde tahsis edilmesine ve duruş riskinin azaltılmasına yönelik somut öneriler sunmakta; benzer boyama hatlarına sahip işletmelere güvenilirlik temelli üretim planlama ve bakım stratejileri geliştirmeleri için uygulanabilir bir yol haritası sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Monte Carlo Simülasyonu, Tekstil, Boyama, Güvenilirlik

*Ar-Ge Merkezi akademik danışmanıdır.



Büküm Makinelerinde Standartlaştırılmış Haftalık Temizlik Prosedürünün Bakım Performansına Etkisi

Aslı Baylan, Aslı Özmen Selçuk, Mustafa Çörekcioğlu Arzu Şahpender, MelihCan Küpelioğlu, Prof. Dr. Aşkın GÜNGÖR*

Ozanteks Tekstil San. Ve Tic A.Ş. Ar-Ge Merkezi Bozburun Mah. 7042 Sok. No:6 Denizli
asliozmen@ozanteks.com.tr

Özet

Liftozu ve yağ kalıntılarının birikmesi, büküm makinelerinde iplik kopuşlarını tetikleyerek üretim kayıplarına ve bakım maliyetlerinin artmasına yol açmaktadır. Dokuma hazırlık hattındaki sekiz büküm makinesi için mevcut haftalık vakumlu temizlik, ayrıntılı kontrol listeleri ve operatör eğitimleriyle standardize edilmiştir. Böylece temizlik süresi haftalık toplamda 2 saat kısaltılırken uygulamanın etkinliği artırılmış; altı aylık “önce–sonra” verileri, Arızalar Arası Ortalama Süre (AAOS) temel çıktı değişkeni olarak izlenmiştir.

Uygulama sonrasında kirlenme kaynaklı plansız duruş süresi azalırken AAOS 64 saatten 87 saat / arıza düzeyine yükselmiştir. Haftalık 2 saatlik temizlik tasarrufu bakım iş gücü ihtiyacını % 18 düşürmüştür. Bulgular, temizlik sıklığı değişmeden de prosedürün standardizasyonu ve operatör katılımının artırılmasının AAOS’yi kayda değer biçimde iyileştirdiğini; büküm makinelerinde etkin temizlik uygulamalarının bakım performansı ve sürekli iyileştirme kültürü için kritik bir kaldıraç olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Temizlik Etkinliği, Tekstil, Dokuma, Büküm

*Ar-Ge Merkezi akademik danışmanıdır.

Geçmiş Arıza Verilerinin Analizine Dayalı Rüzgâr Türbini Bakım Stratejilerinin Geliştirilmesi: Uygulamalı Bir Çalışma

Ozan ÇAPRAZ¹, Harun Kemal ÖZTÜRK², Aşkîner GÜNGÖR^{3*}

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Pamukkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Denizli/Türkiye, ocapraz@pau.edu.tr

² Prof. Dr., Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Denizli/Türkiye, hkozturk@pau.edu.tr

³ Prof. Dr., Pamukkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Denizli/Türkiye, askiner@pau.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

Rüzgâr enerjisi, temiz, yenilenebilir ve karbon nötr özellikleri sayesinde artan küresel elektrik talebini sürdürülebilir biçimde karşılamada kritik bir rol oynamaktadır. Rüzgâr türbinleri, rotor kanatları ve dişli kutuları gibi temel bileşenlerden oluşan karmaşık mekanik sistemler olup rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bununla birlikte, söz konusu bileşenler çeşitli etkenler nedeniyle kullanım ömürleri boyunca arıza ve duruşlara maruz kalabilmektedir. Bu bağlamda, çalışma, Türkiye’de 35 türbinden oluşan bir rüzgâr santralinde 5 yıl boyunca kaydedilen arıza verilerini analiz etmektedir. Veri madenciliği kapsamında uygulanan kümeleme algoritmaları kullanılarak tespit edilen arızalar düzenlenmiş ve gruplandırılmıştır. İncelenen veri seti, her türbine ait yıllık arıza sayılarıyla birlikte 5 yıllık dönemde toplamda yaklaşık 300 farklı arıza türünü içermektedir. Ayrıca, analiz bulgularını desteklemek amacıyla çeşitli grafikler ve Pareto diyagramları hazırlanmıştır. Çalışmanın amacı, rüzgâr türbinlerinde ortaya çıkan farklı arıza türleri arasındaki potansiyel ilişkilerin ortaya koyulmasıdır. Elde edilen bulguların, daha etkili bakım stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayarak rüzgâr türbinlerinin genel performansının iyileştirilmesini desteklemesi beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kümeleme algoritmaları, Veri madenciliği, Arıza analizi, Yenilenebilir enerji, Rüzgâr türbinleri



Pv Sistemlerde Atık Miktarının Azaltılmasında Akıllı Bakım Teknolojilerinin Rolü

Zeynep ÖZSÜT BOĞAR¹, Ozan ÇAPRAZ², Eşref BOĞAR³, Aşkın GÜNGÖR^{4*}

¹ Ar. Gör. Dr., Pamukkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Denizli/Türkiye, zozsut@pau.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi, Pamukkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Denizli/Türkiye, ocapraz@pau.edu.tr

³ Dr. Öğr. Üyesi, Pamukkale Üniversitesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Denizli/Türkiye, ebogar@pau.edu.tr

⁴ Prof. Dr., Pamukkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Denizli/Türkiye, askiner@pau.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

Günümüzde temiz enerji kaynaklarının önem kazanmasıyla birlikte, fotovoltaik (PV) sistemlerin kullanımı hızla artmaktadır. Önümüzdeki yıllarda bu yaygınlığın daha da artması beklenirken, panel ömrünü tamamlayan sistemlerden kaynaklanan atık miktarının da artış göstereceği öngörülmektedir. Bu çalışmanın amacı, kestirimci bakım teknolojilerinin, PV panellerin ürün ömrüne ve buna bağlı olarak atık oluşumuna etkisini incelemektir. Geleneksel bakım yöntemlerinin aksine, IoT tabanlı izleme sistemleri, yapay zekâ destekli arıza tahmini ve dijital ikiz teknolojileri gibi yaklaşımlar sayesinde arızalar oluşmadan önce tespit edilmekte ve panellere zamanında müdahale edilerek işlevsel ömürleri uzatılabilmektedir. Bu sayede, erken devre dışı kalma durumları önlenmekte ve kaynak kullanımı daha verimli hale gelmektedir. Çalışmada ayrıca, panel ömründeki bu değişimin atık oluşumunun zamansal dağılımına etkisi değerlendirilmekte ve bu etkinin döngüsel ekonomi çerçevesinde geri kazanım süreçlerine yansımaları tartışılmaktadır. Elde edilen bulgular, bakım faaliyetlerinin yalnızca performans iyileştirmeye yönelik değil, aynı zamanda sürdürülebilir kaynak yönetimi açısından da önemli bir katkı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik sistemler, Kestirimci bakım, Ürün ömrü, Atık yönetimi, Döngüsel ekonomi, Akıllı bakım

Araç Bakımında Yeni Nesil Arıza Tespit Sistemleri: Araç Üstü Tespit (EOBD) Teknolojisinin Uygulama Alanları ve Tanı Yetkinliği

Semih Mahmut Aktarer¹, Ahmet İsmailoğlu², Tevfik Küçükömeroğlu³

¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Otomotiv Teknolojisi,

semih.aktarer@erdogan.edu.tr

²Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Otomotiv Teknolojisi,

ahmet.ismailoglu@erdogan.edu.tr

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makina Mühendisliği,

tkomer@ktu.edu.tr

Özet

Günümüzde araç bakım teknolojileri, elektronik kontrol sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte hızlı bir dijital dönüşüm sürecine girmiştir. Otomotiv teknolojilerindeki bu dijital dönüşüm, arıza tespit sistemlerinin etkinliğini artırmakta ve bakım süreçlerini daha verimli hâle getirmektedir. Bu bağlamda, Avrupa standardı olan Araç Üstü Tespit Sistemi (Euro On-Board Diagnostics, EOBD), egzoz emisyon kontrolünden motor yönetimine kadar birçok alt sistemin arıza verilerini, standartlaştırılmış hata kodları (Diagnostic Trouble Code, DTC) aracılığıyla tanımlar. EOBD sisteminin merkezinde yer alan elektronik kontrol ünitesi (Electronic Control Unit, ECU), sensörlerden gelen verileri işleyerek hata kodlarını oluşturur. Bu kodlar, gösterge paneli üzerinden ya da dış bağlantı portu aracılığıyla diagnostik cihazlar kullanılarak okunabilir hâle gelir. EOBD sistemine entegre çalışan Controller Area Network (CAN-Bus) veri yolu protokolü ise motor, fren ve şanzıman gibi alt sistemler arasında yüksek hızlı veri alışverişi sağlayarak arıza tespitinde senkronizasyonu mümkün kılar. Bu çalışmada, örnek bir uygulama kapsamında Bosch KTS 570 arıza tespit cihazı kullanılarak motor arızasıyla ilişkili DTC kodları tespit edilmiş ve sistem içi test fonksiyonları aracılığıyla arızanın konumu ayrıntılı biçimde belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, EOBD sistemine entegre dijital tespit teknolojilerinin arıza tespitinde doğruluk ve hız sağladığını, bununla birlikte bakım maliyetlerini azaltarak operasyonel verimliliği önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Araç bakımı, Arıza tespit, Dijital teknolojiler, Elektronik kontrol ünitesi



Otomotiv Servislerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Risklerinin Değerlendirilmesi: 5x5 Matris Yaklaşımı ile Analitik Bir İnceleme

Ahmet İsmailoğlu¹, Semih Mahmut Aktarer², Onur Yıldırım³

¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Otomotiv Teknolojisi,
ahmet.ismailoglu@erdogan.edu.tr

²Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Otomotiv Teknolojisi,
semih.aktarer@erdogan.edu.tr

³Rize Ortak Sağlık Güvenlik Birimi, A Sınıfı İş Güvenliği Uzmanı,
onnur_yildirim@hotmail.com

Özet

Otomotiv servisleri, araç bakım ve onarım süreçlerinde çok çeşitli fiziksel, kimyasal ve ergonomik risklerin bir arada bulunduğu çalışma ortamlarıdır. Kaldırma-indirme ekipmanları, araç altı çalışmaları, kimyasal maddeler, gürültü, titreşim ve yanıcı-patlayıcı maddeler gibi birçok tehlike unsuru ile karşı karşıyadır. Bu çalışmada, Rize oto sanayi bölgesinde araç bakım alanlarında karşılaşılan iş sağlığı ve güvenliği (İSG) riskleri sistematik olarak incelenmiş, öncelikli tehlike kaynakları saha gözlemleri ve çalışan görüşmeleri doğrultusunda analiz edilmiştir. Risk değerlendirme yöntemi olarak 5x5 matris analizi kullanılmış ve olasılık-şiddet çarpanına dayalı olarak risk öncelik düzeyleri belirlenmiştir. Bulgular, kişisel koruyucu donanım (KKD) kullanımındaki eksiklikler, elektrik pano ve tesisatların periyodik kontrollerindeki eksiklikler, iş ekipmanlarının periyodik kontrollerindeki eksiklikler ve uçucu kimyasal maddelere bağlı maruziyetlerin öne çıkan başlıca riskler olduğunu göstermektedir. Ayrıca, uygun olmayan çalışma pozisyonları ve tekrarlı hareketlerin, uzun vadede kas-iskelet sistemi bozukluklarına neden olabileceği değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, araç bakım servislerinde etkili bir İSG yönetim sistemi kurulması, çalışanlara yönelik periyodik eğitimlerin artırılması ve denetim mekanizmalarının güçlendirilmesi, sürdürülebilir güvenli çalışma ortamları açısından kritik bir gerekliliktir.

Anahtar Kelimeler: Otomotiv Servisleri, İş Sağlığı ve Güvenliği, Risk Değerlendirme, Kimyasal Maruziyet.



t m m o b
m a k i n a
mühendisleri
o d a s ı