MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RULMAN YAĞLAMA SİSTEMİ TEST OTOMASYONU VE ARAYÜZÜ GELİŞTİRİLMESİ

İSMAİL ATİZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik-Elektronik Mühendisliği (Türkçe) Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

İSTANBUL, 2024

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RULMAN YAĞLAMA SİSTEMİ TEST OTOMASYONU VE ARAYÜZÜ GELİŞTİRİLMESİ

İSMAİL ATİZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik-Elektronik Mühendisliği (Türkçe) Programı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

İSTANBUL, 2024

TEŞEKKÜR

Lisans eğitimimde ve yüksek lisans eğitimim boyunca vermiş olduğu değerli katkılarından dolayı danışman hocam Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ'a ve tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen Sanayi Danışmanım IDEALAB Genel Müdürü Edip SEVİNÇER'e, Teknik Müdürü Önder YILMAZ'a, Proje Yöneticisi Alperen ÇETİNKAYA'ya ve birlikte çalıştığım tüm IDEALAB ekip arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Beni yetiştirip bugünlere gelmemi sağlayan ve desteklerini sürekli yanımda hissettiğim sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim.

Haziran 2024 **İsmail ATİZ**

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT vi
SEMBOLLER viii
KISALTMALAR ix
ŞEKİLLER LİSTESİ xi
TABLO LİSTESİ xiii
1. GİRİŞ 1
1.1. Problem Tanımı 1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Hedefleri 2
1.3. Tezin Yapısı ve Bölümlerinin Tanıtımı 4
2. GENEL BİLGİLER 5
2.1. Triboloji Bilimi 7
2.1.1. Sürtünme (Friction) 7
2.1.2. Aşınma (Wear) 7
2.1.3. Yağlama (Lubrication) 8
2.1.4. Tribolojinin Uygulama Alanları 8
2.2. Otomatik Yağlama Sistemleri ve Çeşitleri 9
2.2.1. Merkezi Yağlama Sistemleri (Centralized Lubrication Systems) 10
2.2.2. Progresif Sistemler (Progressive Lubrication Systems) 11
2.2.3. Pompajlı Sistemler (Pump-to-Point Systems) 11
2.2.4. Havalandırmalı Sistemler (Air-Oil Lubrication Systems) 11
2.2.5. Otomatik Yağlama Sistemlerinin Uygulama Alanları 11
2.2.6. Otomatik Yağlama Sistemlerinin Tribolojik Önemi 12
2.3. Rulman Yağlama Çeşitleri 13
2.3.1. Yağ Püskürtmeli Yağlama (Oil Spray Lubrication) 14
2.3.2. Banyo Yağlaması (Oil Bath Lubrication) 14
2.3.3. Damlama Yağlaması (Drip Feed Lubrication) 14
2.3.4. Çember Yağlaması (Ring Lubrication) 15
2.3.5. Kapalı Sistem Yağlaması (Sealed-for-Life Bearing) 15
2.3.6. Dışarıdan Yağlama (External Grease Lubrication) 15
2.3.7. Katı Yağlayıcılar (Solid Lubricants) 15

2.3.8. Yağ-Hava Yağlaması (Oil-Air Lubrication) 15
2.3.9. Mıktanıslı Yağlama (Magnetic Lubrication) 15
3. BENZER ÇALIŞMALAR 16
4. RULMAN YAĞLAMA SİSTEMİNE YÖNELİK VERİ TOPLAMA SÜRECİ VE KONTROLCÜ TASARIMI 21
4.1. Tasarlanan Yağlama Sisteminin Bileşenleri ve İşleyişi 21
4.1.1. Yağlama Sistemi Kurulum ve Uygulama Adımları 25
4.2. PLC ve Veri Toplama Sistemi 25
4.2.1. PLC Ürün Grubu ve HMI Ekranı 25
4.2.2. Veri Toplama Ünitesi 27
4.2.3. Ethernet Switch Üzerinden Modbus ile Bağlantı 27
4.3. Ölçülen Fiziksel Büyüklükler 28
4.3.1. Basınç Sensörü ve Bağlantı Diyagramı 29
4.3.2. Sıcaklık Sensörü ve Bağlantı Diyagramı 32
4.3.3. Seviye Sensörü ve Bağlantı Diyagramı 34
4.3.4. Debimetre ve Bağlantı Diyagramı 36
4.3.5. Filtre Sensörü ve Bağlantı Diyagramı 38
4.4. Yağ Tankı Sıcaklık Kontrolcüsü Tasarımı 40
4.4.1. LabVIEW Ortamında Tank Yağı Isınma/Soğuma Davranışı Benzetimi . 42
4.5. Rulman Sıcaklık Kontrolcüsü Tasarımı 44
4.5.1. LabVIEW Ortamında Rulmanların Isınma/Soğuma Davranışı Benzetimi 46
4.6. Sirkülasyon Pompası Görev Değişimi 48
4.7. Kullanıcı Arayüzü Tasarımı 50
4.7.1. Yağlama Sistemi Lokal Arayüzü 51
4.7.2. Yağlama Sistemi Uzaktan Erişim (Remote) Arayüzü 51
4.8. Yağlama Sistemi Devreye Alma İşlemleri 53
5. DENEYLER ve TEST SONUÇLARI 55
5.1. Farklı Yağ Seviyelerinde Ön Isıtma Süresinin Değişimi 55
5.2. Rulman Sıcaklığının Kontrolsüz Değişimi 56
5.3. Rulman Hızına Göre Rulman Sıcaklığı ve Yağ Debisinin Kontrollü Değişimi 56
6. SONUÇ ve TARTIŞMA 58

KAYNAKLAR..... 59
ÖZGEÇMİŞ 65

ÖZET

RULMAN YAĞLAMA SİSTEMİ TEST OTOMASYONU VE ARAYÜZÜ GELİŞTİRİLMESİ

Enerji, havacılık ve otomotiv gibi yüksek güçlü döner ekipmanların kullanıldığı sektörlerde, basınç ve sıcaklık kontrol kabiliyetine sahip endüstriyel yağlama sistemleri kritik bir rol oynar. Enerji santrallerinde gaz ve buhar türbinlerinin güvenilirliği, özellikle rulman ve kontrol sistemi arızaları nedeniyle önemlidir. Bu arızalar genellikle yağlama problemlerinden kaynaklanır, bu nedenle türbin yağlama güvenilirliği prosedürleri bakım planlarının temel bir bileşeni olmalıdır. Havacılık sektöründe, uçak motorlarının rulmanları yüksek hız ve sıcaklık koşullarında çalıştığından yağlama sistemleri bu zorlu koşullarda bile etkili performans göstermelidir. Otomotiv sektöründe ise yağlama sistemleri motor ve transmisyon sistemlerinin verimli çalışmasını sağlar ve aşınmayı önler.

Bu çalışmada, ekipman arızalanma riskini azaltma, rulman ömrünü uzatma ve enerji verimliliğini artırma amacıyla tasarlanan bir basınçlı yağlama sistemi geliştirilmiştir. Sistemin tasarımı, elektriksel planlama, veri toplama ve kontrol & otomasyon işlevlerini kapsamaktadır. Siemens S7-1200 serisi PLC ve NI cDAQ ürünleri ile gerçek zamanlı kontrol sağlanmış ve PID kontrol algoritmaları uygulanmıştır. Basınç, sıcaklık ve debi sensörleri kullanılarak kritik parametreler sürekli izlenmiş ve kaydedilmiştir. Veri toplama işlemi NI cDAQ aracılığıyla yüksek çözünürlükte gerçekleştirilmiş ve LabVIEW yazılımı ile analiz edilmiştir. HMI paneli ile operatörlere pano üzerinden kullanım imkânı sunulmuş, uzaktan erişim ve gelişmiş analizler de sağlanmıştır.

Ana bulgular, tasarlanan sistemin ekipman arızalanma riskini azalttığını, rulman ömrünü uzattığını ve enerji verimliliğini artırdığını göstermektedir. Temiz ve sürekli yağ beslemesi sayesinde ekipman ömrü uzatılmış ve sistem kullanılabilirliği artırılmıştır. Rüzgâr türbinlerinde rulmanlar, tüm türbinin ömrü boyunca iletim verimliliği ve kararlılığı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Türbin yağlama güvenilirliği programı, her enerji santralinin bakım programının ayrılmaz bir parçası olmalıdır.

Bu sistem, yüksek güçlü döner ekipmanların arızalanmasını önleyerek güvenliği artırır ve bakım maliyetlerini düşürür. Siemens PLC ve NI cDAQ ürünleri ile sağlanan gerçek zamanlı kontrol, sistemin sürekli izlenmesini ve performansının optimize edilmesini sağlar. TDMS formatında yüksek çözünürlükte veri kaydı, sistem performansının detaylı analiz edilmesine ve uzun vadeli iyileştirmelere olanak tanır. Sistem, kontrol kaybı veya arıza durumlarında

otomatik olarak tepki vererek mekanik arızaların önüne geçer. Bu sayede, sistemin genel güvenilirliği artırılmış ve operasyonel kesintiler minimize edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar, yağlama sistemlerinin performansını optimize etmek için çeşitli stratejiler önermiş ve endüstriyel uygulamalardaki önemini vurgulamıştır. Bizim çalışmamız da aynı amaçla, en uygun ürünler ve tasarımla sistem optimizasyonuna odaklanmıştır. Ancak, mevcut çalışmalarda gerçek zamanlı kontrol ve veri kaydı yetenekleri genellikle yeterince ele alınmamıştır. Bizim çalışmamız, Siemens S7-1200 PLC ve NI cDAQ ürünleri kullanılarak geliştirilmiş olup, gerçek zamanlı kontrol ve yüksek çözünürlükte veri kaydı yetenekleriyle bu boşlukları doldurmayı hedeflemektedir.

Sonuç olarak, bu yağlama sistemi, döner ekipmanlar için ideal bir yağlama ve soğutma çözümü sunmaktadır. Gerçek zamanlı kontrol ve veri kaydı ile olası arızalar önceden tespit edilmiştir. Ayrıca, sistemin enerji verimliliği ve ekipman ömrünü uzatma gibi önemli avantajlar sunduğu belirlenmiştir. Gelecekte yapay zekâ ve makine öğrenimi tekniklerinin kullanılması ile sistem performansının daha da artırılması hedeflenmektedir.

ABSTRACT

TEST AUTOMATION AND INTERFACE DEVELOPMENT FOR BEARING LUBRICATION SYSTEM

In different areas such as energy, aviation, and automotive, where high-power rotating equipment is used, industrial lubrication systems with pressure and temperature control capabilities play a critical role. The reliability of gas and steam turbines in power plants is particularly crucial due to bearing and control system failures, often stemming from lubrication problems. Therefore, turbine lubrication reliability procedures should be a fundamental component of maintenance plans. In aviation applications, lubrication systems must perform effectively even under the challenging conditions of high speed and temperature, as the bearings in aircraft engines operate in such environments. In automotive sector, lubrication systems ensure the efficient operation of engines and transmission systems and prevent wear.

In this study, a pressurized lubrication system was developed to reduce the risk of equipment failure, extend bearing life, and improve energy efficiency. The system design includes electrical planning, data acquisition, control, automation and monitoring functions. Simulation based control of oil pressure and temperature was achieved using Siemens S7-1200 series PLC and NI cDAQ products, with PID control algorithms applied. Critical parameters such as pressure, temperature, and flow were continuously monitored and loged. Data acquisition was performed at high resolution through NI cDAQ and analyzed with LabVIEW software. The HMI panel provided operators with control via the panel, as well as remote access and advanced analysis capabilities.

The main findings indicate that the designed system reduces the risk of equipment failure, extends bearing life, and improves energy efficiency. Clean and continuous oil supply extends equipment life and increases system availability. Bearings in wind turbines significantly impact transmission efficiency and stability throughout the turbine's lifespan. Thus, turbine lubrication reliability programs should be an integral part of every power plant's maintenance schedule.

This system enhances safety and reduces maintenance costs by preventing failures in high-power rotating equipment. Real-time control provided by Siemens PLC and NI cDAQ products allows continuous monitoring and optimization of system performance. High-resolution data recording in TDMS format enables detailed analysis of system performance and long-term

improvements. The system responds automatically in the event of control loss or failure, preventing mechanical breakdowns. This increases the overall reliability of the system and minimizes operational interruptions.

Existing studies propose various strategies to optimize the performance of lubrication systems and emphasize their importance in industrial applications. Our study similarly focuses on system optimization with the most suitable products and design. However, existing studies often do not adequately address real-time control and data loging capabilities. Our study aims to fill these gaps by developing a system using Siemens S7-1200 PLC and NI cDAQ products with real-time control and high-resolution data loging capabilities.

In conclusion, this pressurized lubrication system offers an ideal lubrication and cooling solution for rotating equipment. Real-time control and data loging enable the early detection of potential failures. Furthermore, the system offers significant advantages such as improved energy efficiency and extended equipment life. In future works, it is aimed to include further enhancing system performance through the use of artificial intelligence and machine learning techniques.

SEMBOLLER

mA **:** Miliamper (Milliampere)

V **:** Volt

°C **:** Celcius

ml **:** Mililitre (Milliliter)

dk **:** Dakika (Minute)

l **:** Litre

kW **:** KiloWatt

Q : Isı Miktarı

m : Kütle

c : Özgül Isı Kapasitesi

ΔT : Sıcaklık Farkı

M : Tork

M_l : Eksenel Yüke Bağlı Tork

M_v : Hıza Bağlı Tork

D_{pw} : Rulman Yuvarlanma Dairesi

F_a : Rulman Eksenel Yük

n_i : Şaft Devir Hızı

Z_b : Yağın Mutlak Viskozitesi

Q : Yağın Akış Debisi

ω : Açısal Hız

R^2 :Regresyon Katsayısı

KISALTMALAR

PLC : Programlanabilir Mantıksal Denetleyici (Programmable Logic Controller)

NI : National Instruments

CDAQ : Compact Data Acquisition

PID : Oransal İntegral Türev (Proportional Integral Derivative)

TDMS : Technical Data Management Streaming

LabVIEW : Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench

HMI : İnsan-Makine Arayüzü (Human-Machine Interface)

API : American Petroleum Institute

3D : Üç Boyutlu (Three Dimensional)

ALS : Automated Lubrication System

OEM : Operation Engineering Manual

AC : Alternatif Akım (Alternating Current)

OLMA : Çevrimiçi İzleme ve Analiz (Online Monitoring and Analysis)

P&ID : Borulama ve Enstrümantasyon Diyagramı (Piping&Instrumentation Diagram)

T : Sıcaklık Sensörü (Temperature Sensor)

P : Basınç Sensörü (Pressure Sensor)

V : Vana (Valve)

LS : Seviye Sensörü (Level Sensor)

F : Filtre (Filter)

CV : Çekvalf (Checkvalve)

SV : Selenoid Vanası (Solenoid Valve)

RV : Emniyet Vanası (Relief Valve)

MCD : Manyetik Çip Dedektörü (Magnetic Chip Detector)

HF : Hava Filtresi (Air Filter)

AOS : Hava-Yağ Ayırıcı (Air-Oil Separator)

CPU : Ana İşlem Birimi (Central Processing Unit)

TCP/IP : Transmission Control Protocol/Internet Protocol

UJBTR : Universal Journal Bearing Test Rig

DC : Doğru Akım (Direct Current)

RTD : Direnç Sıcaklık Dedektörü (Resistance Temperature Detector)

ATEX : Atmospheres Explosives

LCD : Sıvı Kristal Ekran (Liquid Crystal Display)

DI : Dijital Giriş (Digital Input)

DO : Dijital Çıkış (Digital Output)

AI : Analog Giriş (Analog Input)

AO : Analog Çıkış (Analog Output)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Rulman Yağlama Sistemi 3D Tasarımı 6

Şekil 2 Otomatik Yağlama Sistemi Blok Şeması 9

Şekil 3. Rulman Yağlama Sistemi P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) Diyagramı. 22

Şekil 4. Yağlama Sisteminde PLC, HMI ve cDAQ Modüllerinin TCP/IP Üzerinden Ethernet Bağlantı Şeması[45], [46], [48], [50] 28

Şekil 5. 4-20mA Seri Bağlantı Gösterimi [51] 29

Şekil 6. Yağlama Sistemi Basınç Sensörü[52] 29

Şekil 7. Basınç Sensörü İndikatörü[53] 30

Şekil 8. Basınç Sensörü Bağlantı Diyagramı[54] 31

Şekil 9. Yağlama Sistemi Sıcaklık Sensörü[55] 32

Şekil 10. Sıcaklık Sensörleri Bağlantı Diyagramı 33

Şekil 11. Tank Yağı Seviye Sensörü ve Kontrolörünün Bağlantı Şeması[56] 35

Şekil 12. Seviye Sensörü ve Kontrolörünün Bağlantı Diyagramı 36

Şekil 13. KRACHT Marka VC 0.2 Model Debimetre Bağlantı Diyagramı 38

Şekil 14. Filtre Sensörü Bağlantı Diyagramı 39

Şekil 15. Yağ Tankı Sıcaklık Kontrolü Akış Diyagramı 40

Şekil 16. Yağ Tankı Sıcaklık Kontrolü Blok Diyagramı 42

Şekil 17. Sesino M18-40 Isı Değiştirici Performans Diyagramı [62] 43

Şekil 18. Tank Yağı Isınma/Soğuma Davranışının LabVIEW Blok Diyagramında Sistem Benzetimi 44

Şekil 19. Rulman Sıcaklık Kontrolü Akış Şeması 45

Şekil 20. Rulman Sıcaklık Kontrolü Blok Diyagramı 46

Şekil 21. Rulman Isınma/Soğuma Davranışının ve Sıcaklık Kontrolcüsünün LabVIEW Blok Diyagramında Sistem Benzetimi 48

Şekil 22. Sirkülasyon Pompası Görev Değişimi Akış Şeması 49

Şekil 23. Sirkülasyon Pompası Besleme Hattı Görev Değişimi Blok Diyagramı 50

Şekil 24. Sirkülasyon Pompası Sirkülasyon Hattı Görev Değişimi Blok Diyagramı 50

Şekil 25. Lokal Kontrol Paneli 51

Şekil 26. Uzaktan Erişim ve İzleme Paneli 52

Şekil 27. Yağ ve Rulman Parametreleri Giriş Ekranı 52

Şekil 28. Tank Yağının 40°C Ulaşması için Ön Isıtma Süreleri 55

Şekil 29. Rulman Sıcaklığının Kontrolsüz Değişimi 56

Şekil 30. Belirli Bir Eğime Göre Rulman Hızlanmasında Rulman Sıcaklığı ve Yağ Debisinin Değişimi 57

Şekil 31. Basamak Şeklinde Uygulanan Rulman Hızının Ani Değişimlerine Göre Rulman Sıcaklığı ve Yağ Debisinin Değişimi 57

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Sistemde Kullanılan PLC Modülleri ve HMI Özellikleri 26

Tablo 2. Sistemde Kullanılan NI Veri Toplama Grubu Özellikleri 27

Tablo 3 :Wika Model A-10 Basınç Sensörü Teknik Özellikleri 30

Tablo 4. Basınç Sensörleri Analog Giriş Kanalları 32

Tablo 5. Wika TR12-B Kodlu RTD Sıcaklık Sensörü Teknik Özellikleri.....33

Tablo 6. Sıcaklık Sensörleri Analog Giriş Kanalları.....34

Tablo 7. LS30 Seviye Kontrolörü Özellikleri 35

Tablo 8. Seviye Sensörleri Analog Giriş Kanalları 36

Tablo 9. KRACHT Marka VC 0.2 Model Debimetre Teknik Özellikleri.....37

Tablo 10. Kracht Marka SD1 Display Ürününün Teknik Özellikleri 37

Tablo 11. Debimetre Analog Giriş Kanalları 38

Tablo 12. Gill Marka 4212 Model Filtre Sensörü Özellikleri 39

Tablo 13. Filtre Sensörü Analog Giriş Kanalı.....40

1. GİRİŞ

Enerji ve havacılık sektörleri, yüksek performans ve güvenilirlik gerektiren kritik alanlardır ve bu sektörlerde kullanılan türbin teknolojileri, verimlilik ve güvenilirlik sağlama açısından büyük öneme sahiptir [1]. Özellikle rüzgâr enerjisinin artan kullanımıyla birlikte türbin teknolojilerinin önemi daha da artmıştır. Rüzgâr enerjisi, temiz, yenilenebilir ve büyük depolama kapasitesine sahip olması nedeniyle enerji sektöründe dikkat çekmektedir [2]. Türbinlerin verimli ve güvenilir çalışabilmesi için düzgün bir yağlama sistemi gereklidir. Diğer taraftan hava taşıtlarında bulunan döner ekipmanların da güvenli ve arızasız bir şekilde çalışabilmesi için yine yağlama sistemleri önemlidir. Yağlama sistemleri, mekanik bileşenler arasındaki sürtünmeyi azaltarak ve ısıyı dağıtarak bu bileşenlerin soğutulmasına yardımcı olur, bu da türbinlerin performansını ve ömrünü doğrudan etkiler. Yüksek hızlarda dönen ve büyük yükler taşıyan rulmanlar, düzgün yağlanmadığında hızla aşınabilir veya arızalanabilir, bu da türbinlerin durmasına veya verimliliğinin düşmesine yol açar. Güvenilir bir yağlama sistemi, bakım maliyetlerini düşürerek ve sistem güvenilirliğini artırarak operasyonel verimliliği büyük ölçüde artırır. Ayrıca, daha az arıza ve duruş süresi, enerji santrallerinin ve uçak motorlarının daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu bağlamda, rulman yağlama test sistemlerinin geliştirilmesi ve optimize edilmesi, türbinlerin performansını ve güvenilirliğini artırmak için büyük bir potansiyele sahiptir. Bu tez çalışması kapmasında geliştirilen rulman yağlama sistemine yönelik test ve kontrol otomasyonu, enerji ve havacılık sektörlerinde kullanılan türbinlerin performansını ve güvenilirliğini artırmayı hedeflemektedir. Bu otomasyon, farklı yağlama yöntemlerini ve yağ türlerini test etmeye olanak tanıyarak en uygun yağlama stratejilerini belirlemeye yardımcı olabilecek ve söz konusu sektörlerde önemli bir yenilik sağlayabilecek potansiyele sahiptir.

1.1. Problem Tanımı

Mevcut yağlama sistemleri, enerji sektörü (rüzgâr veya nükleer) ve diğer endüstriyel uygulamalarda (örneğin hava taşıtlarında) çeşitli dezavantajlarla karşı karşıya kalabilmektedir. Bu dezavantajlar arasında düşük verimlilik, yüksek enerji tüketimi, yeterli soğutma sağlayamama ve arızalanma durumunda ise gerekli tepkiyi hızlı bir şekilde verememe gibi sorunlar sayılabilir. Bu problemler, enerji üretiminde güvenilirliği azaltmakta ve operasyonel maliyetleri artırmaktadır. Yağlama sistemleri, enerji sektöründe türbinlerin verimli ve güvenilir çalışması için kritik öneme sahiptir. Yağlama sistemleri basınç ve sıcaklık kontrolünü

sağlamakta yetersiz kalırsa rulmanların ve dişlilerin erken aşınmasına, mekanik dayanıklılığın azalmasına ve nihayetinde sistemin performansının düşmesine neden olmaktadır. Bu durum, sadece bileşenlerin ömrünü kısaltmakla kalmaz, aynı zamanda sistemde daha sık ve maliyetli bakım gereksinimlerine de yol açabilmektedir.

Yağlama sisteminde oluşabilecek bir kontrol kaybı durumunda, sistem otomatik olarak hızlı ve etkili bir şekilde tepki veremez ise geri dönülemez mekanik arızalara ve yüksek bakım maliyetlerine neden olabilir.

Rulmanlar çeşitli çalışma koşulları altında aşırı sıcaklık seviyelerine ulaşabilmekte ve buda rulmanların zarar görmesine neden olabilmektedir. İstenmeyen bu durumun başlıca sebeplerinden biri optimal yağlamanın yapılamamasıdır [3].

Bu tez kapsamında ele alınan problem, yağlama sistemlerinin bu yetersizliklerinin üstesinden gelecek yeni bir otomasyon tasarlanması ve geliştirilmesidir. Geliştirilecek yeni yağlama otomasyonu, basınç ve sıcaklık kontrolü sağlayarak rulmanların ve dişlilerin performansını artırmayı hedeflemektedir. Aynı zamanda, enerji verimliliğini artırarak ve arıza durumlarında hızlı tepki vererek, sistemin genel güvenilirliğini ve sürdürülebilirliğini sağlamayı amaçlamaktadır. Bu yeni otomasyon, sadece mevcut problemlerin çözülmesine katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda enerji sektörü, nükleer santraller ve hava taşıtları gibi farklı uygulamalarda önemli bir katkı sunacaktır.

Bu konuda daha fazla bilgi edinmek için UE Systems tarafından sunulan "The 100 Failure Modes of Lubrication and Lubrication Programs" raporuna bakılabilir. Bu rapor, yağlama sistemlerinde sıcaklık ve basınç kontrolü yetersizlikleri gibi çeşitli arıza modlarını ve bu modların nasıl önlenebileceğini detaylı bir şekilde ele almaktadır [4].

1.2. Çalışmanın Amacı ve Hedefleri

Bu tez çalışmasının temel amacı, yüksek güçlü döner ekipmanlar için basınç ve sıcaklık kontrol kabiliyetine sahip, güvenilir ve verimli bir endüstriyel yağlama otomasyonu tasarlamak ve geliştirmektir. Bu test otomasyonu ve arayüzü, Siemens S7-1200 serisi PLC ve NI cDAQ ürünleri kullanılarak gerçek zamanlı kontrol ve veri kaydı sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

Tasarlanan yağlama sistemi ve otomasyonunun başlıca hedefleri şunlardır:

- Ekipman Arızalanma Riskini Azaltma: Döner ekipmanlarda arızalanma riskini minimize ederek operasyonel sürekliliği sağlamak.
- Rulman Ömrünü Uzatma: Temiz ve sürekli yağ beslemesi sağlayarak rulmanların ömrünü uzatmak.
- Enerji Verimliliğini Artırma: Enerji tüketimini optimize ederek işletme maliyetlerini düşürmek.
- Optimum Sıcaklık Kontrolü: Rulmanların optimum sıcaklıkta çalışmasını sağlayarak performans ve güvenilirliği artırmak.
- Kullanıcı Dostu Arayüz: Operatörlere kolay ve etkili bir şekilde sistemi izleme ve kontrol etme imkanı sunan bir arayüz geliştirmek.
- Hızlı ve Etkili Arıza Tepkisi: Arıza durumlarında hızlı ve etkili bir şekilde tepki verebilme yeteneğine sahip olmak.

Yağlama sistemlerinde en önemli etken yağın kontrollü ve en uygun şekilde verilebilmesidir. Yağın yetersiz veya aşırı bir seviyede olması istenmeyen bir durum olup yağ besleme seviyesinin ise dönüş hızı ile orantılı olarak değiştiğini düşündüğümüzde yağ ve rulman ikilisinin çalışma esnasındaki tepki ve durumlarını iyi anlamak gerekmektedir [5]. Yetersiz yağlama, artan sürtünmeye ve aşırı ısı oluşumuna neden olabilir ve böylelikle ekipmanlarda aşınma ve arızalanmaya yol açabilir [6]. Aşırı bir yağ beslemesi durumunda ise akışkan viskoz sürtünmesi oluşabilmektedir. Viskozite yağlayıcının önemli fiziksel özelliklerinden biridir ve rulmanın verimlilik ve performansının artırılmasında kilit rol oynamaktadır [7].

Yağlayıcı madde, yuvarlanma elemanları ve yuvarlanma yolları arasında bir yağ filmi tabakası oluşturarak yataklara verilen zarar azaltmaktadır [2].

Bu tez kapsamında ayrıca, sistemin performansını izlemek ve analiz etmek için LabVIEW yazılımı kullanılarak TDMS formatında veri kaydı da yapılabilmektedir. Bu sayede, çalıştırma sonrası takip ve analiz işlemleri kolaylaştırılarak, sistemin verimliliği ve güvenilirliği hakkında detaylı bilgiler elde edilebilecektir. TDMS formatı, büyük veri setlerinin etkin bir şekilde yönetilmesini ve analiz edilmesini sağlayarak, mühendislerin ve operatörlerin sistemin durumunu ve performansını gerçek zamanlı olarak izlemelerine olanak tanır. Bu veri kayıt ve analiz süreci, sistemin optimize edilmesi ve potansiyel sorunların önceden tespit edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

1.3. Tezin Yapısı ve Bölümlerinin Tanıtımı

Birinci bölüm olan Giriş ve Amaç bölümü, çalışmanın önemi, ele alınan problemin tanımı, çalışmanın amaç ve hedefleri ile tezin yapısının tanıtımını içerir. Bu bölümde enerji sektörü ve türbin teknolojileri hakkında genel bilgiler verilmiş olup; mevcut yağlama sistemlerinin dezavantajlarına değinilmiştir. Ayrıca yeni yağlama sisteminin geliştirme amacı ve hedefleri de açıklanmıştır.

Genel Bilgiler (2. Bölüm) bölümünde, yağlama sistemlerinin temel bileşenleri, işleyiş prensipleri ve kullanılan teknikler hakkında bilgi verilir.

Benzer Çalışmalar (3. Bölüm) bölümü, literatürde mevcut olan ve bu çalışmaya benzer nitelikteki çalışmaların incelendiği bölümdür.

Rulman Yağlama Sistemine Yönelik Veri Toplama Süreci ve Kontrolcü Tasarımı (4. Bölüm) bölümündede, kullanılan PLC ve veri toplama sisteminin teknik özellikleri ve işleyişi detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Siemens S7-1200 serisi PLC ve NI cDAQ ürünlerinin entegrasyonu ve bu sistemlerin nasıl çalıştığına dair bilgiler verilmiştir. Ayrıca, kontrol algoritmalarının kullanımı da bu bölümde detaylandırılmıştır. Bu bölümde sistemin tasarım aşamaları, bileşenlerin seçimi ve entegrasyonu, kontrol algoritmalarının geliştirilmesi ve sistemin genel çalışma prensipleri açıklanmaktadır.

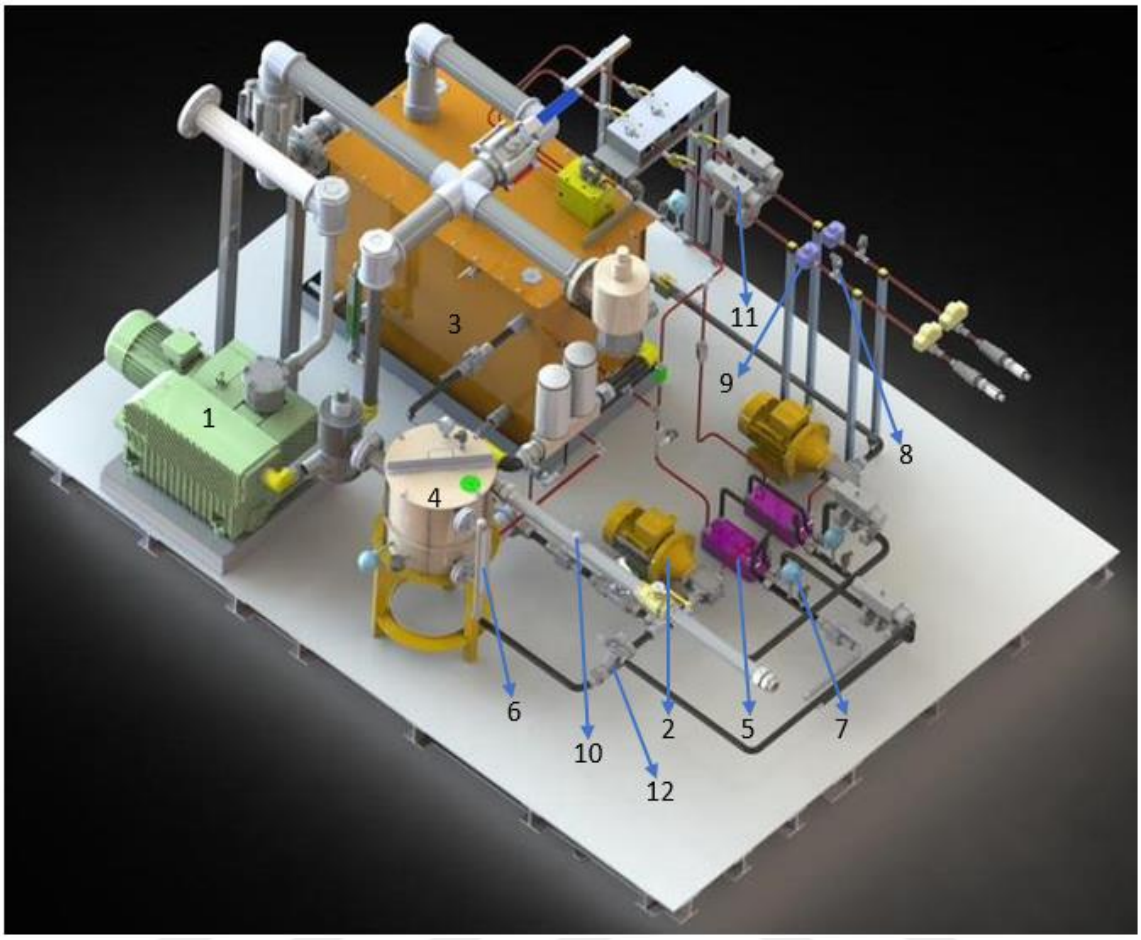
Deneyler ve Test Sonuçları bölümünde (5. Bölüm) tasarlanan sistemin performansının test edildiği deneyler ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Sistem performansının optimize edilmesi ve elde edilen verilerin analizi detaylandırılmıştır. Bu bölümde yapılan deneylerin tasarımı, uygulama süreçleri ve sonuçları ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Bu yapı ile sunulan tez, yağlama sistemlerinin nelerden oluştuğunu ve nasıl çözümler sunduğunu ele almaktadır. Çalışma, enerji ve havacılık sektörü başta olmak üzere farklı endüstriyel uygulamalar için önemli bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır ve gelecekteki araştırmalara ve uygulamalara yön verecek niteliktedir.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde, yağlama sisteminin temel bileşenleri, amaçları ve American Petroleum Institute (API) 614, Dördüncü Baskı, Bölüm 3 (1999) gereksinimleri ile birlikte uygulama detayları ve bakım hususları değerlendirilmektedir. Şekil 1'de tasarlanan yağlama sisteminin 3 Boyutlu tasarımı yer almaktadır.

Sistemde bulunan yağ pompasının amacı, yağı sistemde dolaştırmak olup, API 614 gereksinimleri doğrultusunda yeterli kapasite ve basınç sağlaması gerekir. Bu durumda, çift pompa düzenlemesi uygulamada yedeklik sağlar ve düzenli kontrollerle gerektiğinde pompa elemanlarının değiştirilmesi önemlidir. Filtreler yağı partiküllerden temizlemek amacıyla kullanılır ve belirli bir mikron derecesine kadar filtrasyon sağlar. Basınç regülatörleri, sistemdeki yağın ve havanın basınç değerlerini kontrol etmek için kullanılır ve bu regülatörlerin ayarlanabilir olması uygulamada avantaj sağlar. Yağ soğutucuları ise yağın sıcaklığını düşürmek için kullanılır ve yeterli soğutma kapasitesi sağlamalıdır. Bu soğutucuların hava veya su soğutmalı olabileceği uygulamada dikkate alınırken, soğutma yüzeylerinin temizliği ve soğutucu akışkan seviyesinin kontrolü bakım açısından önemlidir. Seviye ve basınç göstergeleri, yağ seviyesini ve basıncını izlemek amacıyla kullanılır ve API 614 gereksinimlerine göre doğru ve güvenilir ölçüm sağlamalıdır. Son olarak, valfler yağın akışını kontrol etmek için kullanılır ve bu valfler güvenilir ve sızdırmaz olmalıdır. Uygulamada manuel veya otomatik valfler kullanılabilirken, valflerin işlevselliğinin periyodik olarak test edilmesi de bakım hususları arasında yer alır [8].



Şekil 1. Rulman Yağlama Sistemi 3D Tasarımı

Şekil 1'de gösterilmekte olan rulman yağlama sistemi ekipmanları:

1-Vakum Pompası

2-Yağ Pompası

3-Ana Yağ Tankı

4-Dikey Yağ Tankı

5-Isı Değiştirici

6-Seviye Sensörü

7-Sıcaklık Sensörü

8-Basınç Sensörü

9-Debimetre

10-Filtre Sensörü

11- Kontrol Valfi

12- Solenoid Valfi olarak numaralandırılmıştır.

Makine ve ekipmanların uzun ömürlü, verimli ve düşük maliyetli çalışması, endüstriyel işletmeler için hayati öneme sahiptir. Bu bağlamda, otomatik yağlama sistemleri ve triboloji bilimi, makine performansını optimize etmek ve sürtünme ile aşınmayı azaltmak için kritik rol oynamaktadır. Bu tez çalışması, otomatik yağlama sistemlerinin detaylı incelemesini ve triboloji biliminin temel prensiplerini mantıklı bir akış içinde ele alarak, bu iki alanın birbirleriyle nasıl etkileşim içinde olduğunu gösteren süreçleri içermektedir.

2.1. Triboloji Bilimi

Triboloji bilimi, sürtünme, aşınma ve yağlama (triboloji) konularını inceleyen bir mühendislik dalıdır. Tribolojinin temel amacı, makine parçalarının birbirleriyle etkileşimleri sırasında oluşan sürtünme ve aşınmayı anlamak ve kontrol etmektir. Bu amaçla triboloji, rulmanlar gibi hareketli parçaların performansını ve ömrünü artırmada önemli bir rol oynamaktadır.

2.1.1. Sürtünme (Friction)

Sürtünme, iki yüzey arasındaki hareket sırasında oluşan direnç kuvvetidir ve enerji kaybına neden olmakla birlikte yüzeylerin aşınmasını hızlandırabilir. Sürtünmenin azaltılması, enerji verimliliğini artırarak sistemlerin performansını iyileştirmektedir [9].

Kuru Sürtünme (Dry Friction): İki yüzey arasında sıvı film, gaz veya diğer kirleticilerin bulunmadığı sürtünmedir [10].

Sıvı Sürtünme (Fluid Friction): İki yüzey arasında, sürtünme ve aşınmayı en aza indirmek için bir sıvı veya gaz tabakası bulunmaktadır [10].

2.1.2. Aşınma (Wear)

Aşınma, dış etkiler nedeniyle bir malzeme yüzeyinin şekil ve özelliklerinde istenmeyen bir değişikliktir [10].

Yapışma Aşınması (Adhesive Wear): Yapışma aşınması, sürtünme etkisiyle temas halindeki iki katı yüzey arasında malzeme transferi meydana geldiğinde ortaya çıkar. [11].

Aşındırıcı Aşınma (Abrasive Wear): Birbirine temas eden iki yüzeyden, pürüzlü olan yüzeyin diğer yüzey üzerinde kırılma veya çizilme oluşturmasıdır [12].

Korozyon Aşınması (Corrosive Wear): Kimyasal veya elektro-kimyasal reaksiyonlar sonucu yüzeyde meydana gelen malzeme kaybıdır. Bu tür bir aşınma, genellikle oksidasyon veya diğer kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşmaktadır [13].

Yorulma Aşınması (Fatigue Wear): Yorulma aşınması, belirli sayıda çevrim boyunca yüzeyde oluşan gerilme nedeniyle meydana gelen bir aşınma türüdür [14].

2.1.3. Yağlama (Lubrication)

İki yüzey arasına bir yağlayıcı madde yerleştirilerek sürtünme ve aşınmanın azaltılmasıdır. Yağlayıcılar, yüzeyler arasında bir film tabakası oluşturarak doğrudan temasını engeller ve sürtünmeyi azaltır.

Hidrodinamik Yağlama (Hydrodynamic Lubrication): İki yüzey arasındaki yağlayıcının kalın bir film tabakası oluşturduğu ve yüzeylerin tamamen ayrıldığı durumdur [15].

Elastohidrodinamik Yağlama (Elastohydrodynamic Lubrication): Temas noktalarında oluşan yüksek basınçlar sebebiyle, elastik deformasyon ve yağ viskozitesinde artışların meydana geldiği, bir sıvı film yağlamasıdır [16].

2.1.4. Tribolojinin Uygulama Alanları

Makine Mühendisliği: Triboloji, makine elemanlarının (rulmanlar, dişliler, contalar ve diğer mekanik bileşenlerin) performansını optimize etmek için kullanılmaktadır.

Otomotiv Endüstrisi: Motor yağlaması, fren sistemleri ve lastik-yol etkileşimi gibi alanlarda tribolojinin prensipleri uygulanmaktadır.

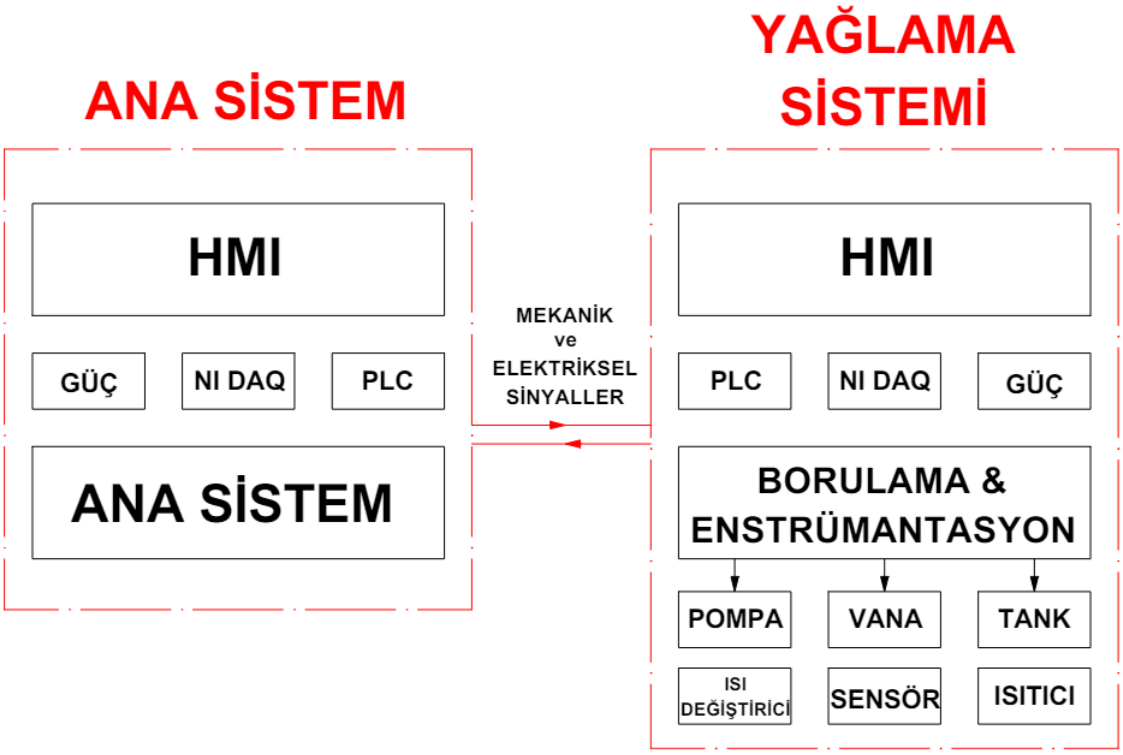
Biyomedikal Mühendislik: Eklem protezleri, diş implantları ve diğer biyomedikal cihazların tasarımında triboloji bilgisi kullanılmaktadır.

Enerji Üretimi: Rüzgâr türbinleri, hidroelektrik santraller ve diğer enerji üretim ekipmanlarının yağlama ve aşınma kontrolü için triboloji yöntemleri uygulanmaktadır.

Havacılık ve Uzay Mühendisliği: Uçak motorları, roketler ve uzay araçlarının hareketli parçalarının performansını artırmak için triboloji bilimini kullanmaktadır.

2.2. Otomatik Yağlama Sistemleri ve Çeşitleri

Otomatik yağlama sistemleri, makinelerin çeşitli noktalarına belirli aralıklarla ve doğru miktarda yağlayıcı madde sağlayarak sürtünme ve aşınmayı azaltır. Yağlama sistemleri, kendi kontrol ve veri toplama ünitesine sahip olan bir ana sisteme bağlı olarak çalışabilen alt sistemlerdir ve bu doğrultuda ana sistem isterlerine göre gerekli miktar ve koşuldaki yağı sağlamakla görevlidir. Bu sistemler, genellikle Şekil 2'de yer alan bileşenlerden oluşur:



Şekil 2 Otomatik Yağlama Sistemi Blok Şeması

1- Pompa: Yağlayıcıyı rezervuardan alarak sisteme dağıtan bileşendir.

2- Dağıtım Bloğu: Yağlayıcıyı doğru miktarda ve doğru noktalara dağıtan bileşendir.

3- Kontrol Ünitesi: Sistemin yağlama aralıklarını ve miktarını ayarlayan elektronik birimdir.

4- Yağlayıcı Tankı: Yağlayıcı maddenin depolandığı haznedir ve yağlayıcının kirlenmesini önlemek için genellikle kapalı ve basınçlı bir yapıya sahiptir.

5- Boru Hatları ve Hortumlar: Yağlayıcıyı pompadan dağıtım bloğuna ve oradan da yağlama noktalarına taşıyan bileşenlerdir.

Otomatik yağlama sistemleri, parçaları düzenli ve kesintisiz yağlaması sayesinde manuel yağlamaya kıyasla birçok avantaj sunar. Böylelikle makine parçalarının sürekli olarak optimal yağlama koşullarında çalışması sağlanmış olur.

Ayrıca, otomatik yağlama sistemleri, arıza riskini azaltır ve uzun vadede bakım maliyetlerini düşürerek, beklenmedik arızaların önüne geçebilmektedir.

Otomatik yağlama sistemleri, manuel yağlamanın gerektirdiği iş gücü ve zaman maliyetini de ortadan kaldırır. Bu, işletmelerin daha verimli çalışmasını sağlar ve iş gücü maliyetlerini düşürmektedir [17].

Otomatik yağlama sistemleri, modern endüstriyel uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. Bu sistemler, makinelerin ve ekipmanların daha verimli çalışmasını sağlayarak bakım maliyetlerini düşürür, arıza sürelerini minimize eder ve genel üretkenliği artırır. Otomatik yağlama sistemlerinin çeşitli türleri vardır ve her biri farklı ihtiyaçlara ve uygulama alanlarına hitap etmektedir. Bu bölümde, otomatik yağlama sistemlerinin başlıca türleri incelenmekte olup özellikle merkezi yağlama sistemleri üzerinde durulacaktır. Tasarım ve işleyiş açısından tasarımını yapmış olduğumuz yağlama sistemi de merkezi yağlama sistemi kategorisine girmektedir. Bu sistemler, birçok makine ve ekipmanın yağlama gereksinimlerini tek bir merkezi noktadan yöneten ve verimli yağlama sağlayarak ekipman ömrünü uzatan sistemlerdir.

2.2.1. Merkezi Yağlama Sistemleri (Centralized Lubrication Systems)

Merkezi yağlama sistemleri, birçok makine ve ekipmanın yağlama gereksinimlerini tek bir merkezi noktadan yöneten sistemlerdir. Bu sistemler, verimli ve tutarlı yağlama sağlayarak ekipman ömrünü uzatır, bakım maliyetlerini düşürür ve üretkenliği artırır. Merkezi yağlama sistemleri, özellikle büyük ve kompleks makinelerde kullanılır ve birçok avantaja sahiptir.

Tek Hatlı (Single-Line) Yağlama Sistemleri: Tek hatlı yağlama sistemlerinde, yağ veya gres tek bir hat üzerinden dağıtılır. Bu sistemler genellikle düşük basınçlı uygulamalarda tercih edilir.

Tek hatlı sistemlerde, merkezi bir pompa, yağ veya gresi bir ana hat üzerinden dağıtır. Ana hat üzerindeki her bir dağıtıcı belirli bir miktar yağ veya gres salınımı yapar. Bu işlem, pompa her çalıştırıldığında tekrar eder.

Tek hatlı sistemler, genellikle küçük ve orta ölçekli makinelerde ve ekipmanlarda kullanılır.

Çift Hatlı (Dual-Line) Yağlama Sistemleri: Çift hatlı yağlama sistemlerinde, yağ veya gres iki paralel hat üzerinden dağıtılır. Bu sistemler, yüksek basınçlı uygulamalarda ve büyük endüstriyel makinelerde kullanılmaktadır.

Çift hatlı sistemlerde, merkezi bir pompa iki paralel ana hat üzerinden yağ veya gres dağıtımı yapar. Her iki hattın da beslenmesi sırasında dağıtıcılar, yağ veya gresi yağlama noktalarına iletir. Bu sistemde, hattın birinden yağlama yapılırken diğer hat basınçsız kalmaktadır ve bu şekilde, sistemin kontrolü ve yağlama işlemi daha hassas bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

Çift hatlı sistemler, özellikle büyük endüstriyel makinelerde, madencilik ekipmanlarında, çelik fabrikalarında ve kağıt fabrikalarında kullanılmaktadır. Bu sistemler, geniş alanlarda ve çok sayıda yağlama noktası olan ortamlarda etkin bir çözüm sunmaktadır [18].

2.2.2. Progresif Sistemler (Progressive Lubrication Systems)

Progresif sistemler, merkezi bir pompa ve progresif dağıtıcılar kullanarak yağlama noktalarına yağ veya gres dağıtımı yapmaktadır ve her dağıtıcı, bir sonraki dağıtıcının yağlanmasını tetiklemektedir. Bu sistemler, yağlama noktalarının durumunu izlemek için de kullanılabilir ve genellikle küçük ve orta ölçekli makineler için uygundur. Progresif sistemler, yağlama noktalarının durumu hakkında geri bildirim sağlayarak sistemin etkinliğini artırmaktadır [19].

2.2.3. Pompajlı Sistemler (Pump-to-Point Systems)

Pompajlı sistemler, her bir yağlama noktası için ayrı bir pompa kullanarak doğrudan yağ veya gres dağıtımı yapar. Bu sistemler, özellikle küçük ve orta ölçekli makineler için uygundur. Pompajlı sistemlerin en büyük avantajı, her bir yağlama noktasına doğru miktarda yağ veya gres sağlanabilmesidir [20].

2.2.4. Havalandırmalı Sistemler (Air-Oil Lubrication Systems)

Yüksek hızlı çalışma koşullarında oluşan sürtünme ısısı, rulman sıcaklığını yükselterek yağ viskozitesinde ve yüzeyler arası yağ filmi kalınlığında azalma gerçekleştirmektedir. Havalandırmalı sistemler, bu kayıpların önüne geçebilmek için yağ ve havayı karıştırarak yüzeyler arasında stabil bir bir yağ filmi oluşturur [21]. Yağ-Hava yağlaması yüksek hız koşullarında uygun bir yağlama yöntemi olarak görülmektedir [22].

2.2.5. Otomatik Yağlama Sistemlerinin Uygulama Alanları

Otomatik Yağlama Sistemleri ise enerji sektöründe, rüzgar türbinleri, hidroelektrik santraller ve diğer enerji üretim ekipmanlarının sürekli ve güvenilir çalışması için otomatik yağlama

sistemleri gereklidir. Otomotiv endüstrisinde, üretim hatlarındaki robotik sistemlerin ve montaj makinelerinin yağlanmasında kullanılarak, üretim süreçlerinin verimli ve kesintisiz olmasını sağlamaktadır. Tarım makinelerinde, traktörler, biçerdöverler ve diğer tarım ekipmanlarının performansını artırarak, zorlu çalışma koşullarında uzun süreli performans sağlamaktadır. Gemi ve denizcilik endüstrisinde, gemilerin motorları, pervaneleri ve diğer hareketli parçalarının yağlanmasında kullanılarak gemilerin güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

Havacılık endüstrisinde de otomatik yağlama sistemleri, uçakların motorları, iniş takımları ve diğer hareketli parçalarının performansını ve güvenilirliğini artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Lališ ve Arkadaşları (2020) [23] yaptığı çalışmada turboprob bir motorun yağlama sistemi üzerine belirli güvenlik analizleri gerçekleştirerek yağlama sistemleri ve güvenlik analizinin önemini vurgulamıştır [23].

Bu çeşitli uygulama alanları, otomatik yağlama sistemlerinin endüstriyel ekipmanların verimliliğini ve ömrünü artırmada ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

2.2.6. Otomatik Yağlama Sistemlerinin Tribolojik Önemi

Otomatik yağlama sistemleri, tribolojinin temel prensiplerini pratikte uygulayarak makine performansını optimize eder. Bu sistemlerin tribolojik açıdan önemi, sürtünme ve aşınmayı minimize etmeleri, enerji verimliliğini artırmaları ve ön bakım maliyetlerini azaltmalarıyla ortaya çıkar.

Yağlayıcı madde, çalışma esnasında birçok makine bileşeni ile temas eder ve rulmanın veya dişlilerin oluşturduğu sürtünme ısısını soğutma görevini de yerine getirir [24]. Otomatik yağlama sistemlerinin sağladığı düzenli ve kontrollü yağlama bu görevi sürdürülebilir olarak mümkün kılmaktadır.

Otomatik yağlama sistemleri, manuel yağlamanın gerektirdiği iş gücü ve zaman maliyetini ortadan kaldırmaktadır. Bu sistemler, düzenli bakım gerektirmez ve arıza riskini azaltır, bu da uzun vadede bakım maliyetlerinin düşmesini sağlamaktadır. Otomatik yağlama sistemleri, bakım personelinin yağlama işlemi için harcadığı zamanı azaltır ve beklenmedik arızaların önüne geçer. Örneğin, otomotiv üretim hatlarında kullanılan otomatik yağlama sistemleri, montaj makinelerinin kesintisiz ve verimli çalışmasını sağlamaktadır.

Otomatik yağlama sistemleri, yağlama aralıklarını ve miktarını optimize ederek yağlayıcı tüketimini azaltır ve çevresel etkileri minimize eder. Bu sistemler, her yağlama

noktasına doğru miktarda yağlayıcı sağlayarak, aşırı yağlama veya yetersiz yağlama sorunlarını ortadan kaldırmaktadır.

Otomatik yağlama sistemleri, endüstriyel ekipmanların verimliliğini ve ömrünü artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Merkezi yağlama sistemleri, progresif sistemler, pompajlı sistemler ve havalandırmalı sistemler gibi çeşitli otomatik yağlama sistemleri, farklı uygulama alanlarına ve ihtiyaçlara göre tercih edilmektedir. Bu sistemler, bakım maliyetlerini düşürmek, ekipman ömrünü uzatmak ve üretkenliği artırmak için etkili çözümler sunmaktadır. Otomatik yağlama sistemleri ve triboloji bilimi, makine ve ekipmanların performansını, ömrünü ve verimliliğini optimize etmek için birbirini tamamlayan iki önemli alandır. Tribolojinin temel prensipleri, sürtünme ve aşınmayı anlamak ve kontrol altına almak için gerekli bilgileri sağlar. Otomatik yağlama sistemleri ise bu bilgileri pratikte uygulayarak, makinelerin düzenli ve kesintisiz olarak optimal yağlama koşullarında çalışmasını sağlar. Bu sistemler, endüstriyel işletmelerde ekonomik avantajlar ve çevresel faydalar sunar. Otomatik yağlama sistemleri, endüstriyel makineler ve ekipmanların düzenli olarak yağlanmasını sağlamak amacıyla tasarlanmış sistemlerdir. Bu sistemler, ekipmanın verimliliğini artırarak, aşınmayı ve yıpranmayı azaltır ve bakım maliyetlerini düşürür. Otomatik yağlama sistemlerinin kullanımı, manuel yağlamaya göre birçok avantaj sağlar ve bu sistemler çeşitli tiplerde bulunmaktadır.

2.3. Rulman Yağlama Çeşitleri

Rulmanların uzun ömürlü ve verimli çalışmasını sağlamak için uygun yağlama yöntemlerinin seçilmesi kritik öneme sahiptir. Rulman yağlama yöntemleri, kullanılan yağlayıcı türüne ve uygulama alanına göre farklılık gösterir. Bu bağlamda, yağ ve gres yağlama yöntemleri yaygın olarak kullanılırken, bazı özel durumlarda hava yağlama teknikleri de tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında tasarlanan rulman yağlama sisteminde ‘yağ püskürtme (oil spray lubrication)’ yöntemi kullanılmaktadır. Püskürtmeli Yağlama yöntemi, yağ tüketimini azaltma, kolay kontrol ve mükemmel yağlama etkileri gibi avantajlara sahiptir ve yüksek hızlı rulmanların yağlanmasında kullanılır. Bu yöntemde, belirli bir basınç altında gerekli miktarda yağ rulmanlara püskürtülerek etkili bir yağlama sağlanır. Yağ püskürtme yöntemi, yüksek hız ve düşük yağ tüketimi avantajları sunarak rulmanların verimli ve uzun ömürlü çalışmasını sağlar [25].

2.3.1. Yağ Püskürtmeli Yağlama (Oil Spray Lubrication)

Yağ püskürtme (oil spray lubrication), endüstriyel makinelerin ve ekipmanların rulman, dişli ve diğer hareketli parçalarının verimli ve sürekli bir şekilde yağlanmasını sağlamak amacıyla kullanılan bir yöntemdir.

Havacılık sekötründe yüksek hızlı dişlilerinin yağlaması genellikle yağ püskürtmeli yağlama ile gerçekleşmetkedir. Bu yöntemde yağ, bir nozul aracılığıyla püskürtülür ve dişli yüzeyine yayılır [26]. Yağ püskürtme sistemi, yağın ince bir film tabakası oluşturmasını sağlayarak sürtünmeyi ve aşınmayı minimize eder. Ayrıca, yağın belirli aralıklarla ve doğru miktarda uygulanması, aşırı yağlamanın ve yağ israfının önüne geçer. Ayrıca, yağ püskürtme sistemi, ısının daha iyi dağılmasını sağlayarak aşırı ısınmayı engeller ve ekipmanın verimli çalışmasını sağlar. Yağ püskürtmeli yağlama, çeşitli dönen makine sistemlerinin yuvarlanan yatak bileşenlerinde yaygın olarak kullanılır [27]. Püskürtmeli yağlama, yüksek hızlı dişlilerin ısı dağılımında önemli bir etkiye sahiptir ve yağlama sistemindeki herhangi bir arıza, diş yüzeyinde aşırı ısınma, çukurlaşma ve sürtünme arızasına neden olabilir [28].

Yağ püskürtmeli soğutma sistemleri, bir soğutucu, tank, pompa, nozullar ve soğutma sıcaklık ünitesi içeren karmaşık bir yapıya sahip kapalı devre bir sistemdir [29]. Yağ pompası, sisteme gerekli basıncı sağlayarak yağın nozuldan püskürtülmesini sağlar. Nozul, yağı ince bir püskürtme şeklinde uygulayan uç kısımdır ve farklı tip ve boyutlarda olabilir. Kontrol ünitesi, yağın püskürtme sıklığını ve miktarını ayarlayan elektronik veya mekanik bir ünitedir. Yağ deposu ise yağın depolandığı ve sistemin sürekli olarak beslenmesini sağlayan tanktır.

Sonuç olarak, yağ püskürtme sistemleri, endüstriyel makinelerin uzun ömürlü ve verimli çalışmasını sağlayan önemli bir yağlama yöntemidir. Yukarıda belirtilen çalışmalar, yağ püskürtme sistemlerinin etkinliği ve avantajları hakkında detaylı bilgiler sunmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda doğru yağlama tekniklerinin kullanılması, maliyet tasarrufu ve ekipman performansı açısından büyük önem taşımaktadır.

2.3.2. Banyo Yağlaması (Oil Bath Lubrication)

Bu yöntemde rulmanlar bir yağ banyosuna batırılır. Dönme hareketiyle yağ rulmanlara taşınarak rulmanların sürekli yağlanmasını sağlar.

2.3.3. Damlama Yağlaması (Drip Feed Lubrication)

Yağ damlama yöntemiyle sürekli olarak rulmanlara iletilmektedir.

2.3.4. Çember Yağlaması (Ring Lubrication)

Rulman bir çember vasıtasıyla sürekli olarak yağlanmakta olup çember döndükçe yağı alarak rulmanlara taşımaktadır.

2.3.5. Kapalı Sistem Yağlaması (Sealed-for-Life Bearing)

Rulmanlar üretim esnasında gresle doldurulur ve kullanım ömrü boyunca tekrar yağlama gerektirmez.

2.3.6. Dışarıdan Yağlama (External Grease Lubrication)

Rulmanların yağlama nipelleri vasıtasıyla belirli aralıklarla gresle yağlanması ile olmaktadır ve yüksek yük taşıma kapasitesine sahiptir.

2.3.7. Katı Yağlayıcılar (Solid Lubricants)

Grafit ve molibden disülfür gibi katı yağlayıcılar kullanılır. Bu yöntem, özellikle yüksek sıcaklık ve vakum ortamları için uygundur.

2.3.8. Yağ-Hava Yağlaması (Oil-Air Lubrication)

Yağ ve hava karışımı rulmanlara taşınmaktadır ve bu yöntem, yüksek hız ve düşük yağ tüketimi gerektiren uygulamalarda kullanılır. Yağ/hava yağlamasının çalışma prensibi, bir sıvı damlasının hava akışı tarafından bölünmesi, çizgiler halinde dağıtılması ve hava akışı yönünde taşınmasıdır [30].

2.3.9. Mıktanıslı Yağlama (Magnetic Lubrication)

Yağın rulman yüzeylerinde tutulması için manyetik alan kullanılmaktadır ve bu yöntem, spesifik endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir.

3. BENZER ÇALIŞMALAR

Literatürde, yağlama sistemleri üzerine yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, yağlama sistemlerinin genel yapısını, bileşenlerini ve performanslarını incelemiş ve farklı uygulamalarda çeşitli sonuçlar elde etmişlerdir.

Otomatik yağlama sistemleri (ALS), makine çalışırken sürekli olarak yağlama yaparak verimliliği artırmaktadır. Bu sistemler, makinelerin durdurulmasına gerek kalmadan yağlama yaparak operasyonel verimliliği artırır ve rulmanlar dönerken yağlayıcının daha iyi dağıtılmasını sağlar. Özellikle zorlu çalışma ortamlarında, az miktarda gres akışı devam eder ve kirlenmeyi önler. Akıllı sensörler ve izleme cihazlarının yağlama sistemlerine entegrasyonu, büyük verilerin faydalarını sunar. Bu cihazlar, yağlama sürecini kaydederek operatörlerin makine arızalarını erken tespit etmelerini ve önleyici tedbirler almalarını sağlar. Merkezi otomatik yağlama sistemleri, sınırlı insan yeteneklerine olan bağımlılığı azaltırken makinenin kullanılabilirliğini artırmanın etkili bir yoludur. Doğru aralıklarla uygun yağlama miktarını sağlayarak sürtünmeyi ve aşınmayı en aza indirir, bu sayede rulman ve makine servis ömrünü optimize eder. Bu sistemler, bireysel makineleri veya komple tesisleri yağlamak için tasarlanmıştır ve gerekli tüm noktalara doğru, hassas yağlayıcı takviyesi sağlayarak birçok avantaj sunmaktadır.

Marey ve Arkadaşları(2023), Denizcilik uygulamalarına odaklı bir Kaymalı Rulman Test Cihazı (Universal Journal Bearing Test Rig - UJBTR) için yeni bir ölçüm ve kontrol sisteminin geliştirilmesini ve uygulanmasını anlatan çalışmasında, özellikle değişen denizcilik çalışma koşulları altında kaymalı yatak performansını değerlendirmede gelişmiş ölçüm ve kontrol sistemlerine olan ihtiyacı vurgulamaktadır. UJBTR, yatak hazneleri içindeki yağlama yağı filmlerinin kaymalı yatak performansını etkileyen kritik çalışma faktörlerini araştırmak için tasarlanmıştır. Sistem, Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama (SCADA) sistemi aracılığıyla kapsamlı kontrol, izleme ve denetim sağlayan üç kontrol panelinden oluşmaktadır: Güç Paneli, PLC ve Data Logger'ların tutulduğu ve enstrümantasyonların bulunduğu Kullanıcı Arayüzü ve Kumanda Paneli. Denetleyici olarak Siemens SIMATIC S7-300 serisi PLC'nin kullanıldığı belirtilmiş olup, veri toplama ve denetleyici kontrol, WinCC Explorer kullanılarak yönetilen SCADA sistemi aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu sistem, gerçek zamanlı verileri izleme, görselleştirme ve analiz etme için kapsamlı bir çözüm sunar. Yapılan deneylerde, yağ viskozite derecesinin, yatak mili hızının ve uygulanan yükün çevresel yivli yataklar içindeki yağ film

basıncı ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma, test sistemi yoluyla yağ film basıncı ve sıcaklık gibi değişkenleri doğru bir şekilde ölçme ve kontrol etme yeteneğinin doğruluğunu kanıtlamıştır. Sonuçlar, test platformunun güvenilirliğini ve hidrodinamik yağlama ile ilgili daha kapsamlı araştırmalar için potansiyelini doğrulamaktadır. Bu makale, yeni geliştirilen kontrol ve ölçüm sisteminin PLC ve SCADA ile etkinliğini vurgulamakta ve denizcilik endüstrisi için kaymalı yatak performansının daha iyi anlaşılmasını ve optimize edilmesini sağlayarak verimliliği artırıcı sistematik çalışmaların önemini belirtmektedir [31].

Gunawan ve diğerleri (2017) tarafından yürütülen araştırma, bir buhar türbininin Yağlama Yağı Sistemi ve Gland Buhar Kondansatörü Sisteminin daha iyi yönetilmesi için bir Programlanabilir Lojik Denetleyici (PLC) tabanlı kontrol sisteminin geliştirilmesi ve uygulanmasını ele almakla birlikte operasyonel güvenilirliği ve verimliliği artırmak için kontrol sistemlerinin endüstriyel süreçlere entegrasyonunun önemini vurgulamaktadır. Sistem, Simatic S7-300 CPU 315-2 PN/DP PLC ve 7,2 SCADA kullanarak zorlu endüstriyel ortamlarda sağlam performans gösterebilmetkedir. PLC, yağ basıncı, sıcaklık ve türbin hızı gibi kritik değişkenleri yönetmek üzere yapılandırılmıştır. Yağlama Sisteminde uygulanan kontrol mantığı, türbinin düzgün ve optimum şekilde yağlanmasını ve termal düzenlemesini sağlamaktadır [32].

Merkezi ve otomatik yağlama sistemlerinin faydaları arasında daha az durma süresi ile artan verimlilik, tehlikeli makinelere daha az maruz kalma, makine ömrünün uzaması ve makinelere daha az kirlenme girmesi yer almaktadır [33].

Madeni Yağ Konsolları, çeşitli tipteki endüstriyel döner ekipmanlara basınçlı yağlama yağı sağlamak üzere tasarlanmıştır. Tipik olarak bu yağlama yağı sistemleri pompaları, ısı eşanjörlerini, filtreleri, kontrolleri ve enstrümantasyonu içerir. Bu "modüler" konsept, sahadaki başlatma süresini ve maliyetleri azaltarak son kullanıcının sabit maliyetlerden yararlanmasına olanak tanır [34].

Santrifüj kompresörlerin API 614'e göre tasarlanmış yağlama sistemleri; yağ haznesi, pompalar, filtre, soğutucu ve yağ hatlarından oluşur. PLC, yardımcı AC güç tahrikli yağlama pompasını başlatarak yağ başlığındaki basıncın sürücüyü çalıştırmasını sağlar. Başlık basıncı düşük olduğunda, yedek yağ pompası devreye girerek yağlanan parçalara yağ pompalar ve çalışma sırasında olması istenen yağ basıncını korumaktadır [35].

Dönen ekipmanların uzun vadeli güvenilirliğini ve uygun maliyetli çalışmasını sağlamak amacıyla, rulmanlara uygun akış hızı, basınç ve sıcaklıkta temiz filtrelenmiş yağlama yağı

sağlayan, yağlama sistemleri: belirtilen akış hızında rulmanlara yağ iletecek yüksek ve düşük basınç pompa/motorları, yağ tankı, dijital sıcaklık kontrol cihazı, yağ ısıtıcısı, yüksek verimli filtrasyon ekipmanları, yağ soğutucusu ve uzaktan izleme özelliğine sahip kontrol paneli içermektedir [36].

Yağlama sistemi, değişken motor hızlarından kaynaklanan sistem basıncı dalgalanmalarını yöneten basınç tahliye mekanizmasına sahip olmalıdır. Basınç, motor taleplerine göre değiştiğinden, basınç tahliye valfi ve basınç anahtarları sabit basıncı koruyacak şekilde hareket ederek hem bileşenlerin optimum basınçta yağlanmasını hem de türbin sistemi içindeki yağ sıcaklığının düzenlenmesini sağlayarak performans kaybına karşı sistemi korur [37].

Nicholas ve Arkadaşları (2021), yağ pompasının, türbin şaft hızı ile doğru orantılı olarak çalıştığını söylemiştir. Yani şaft hızı yüksek olduğunda daha fazla yağ pompalanır ve tam tersi durumda daha az yağ pompalanır [38].

Yi ve Arkadaşları (2014), geliştirdikleri yağlama sisteminin performansını test etmek için bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, yağın pompa aracılığıyla tanktan çıkış borularına pompalanması ve yağ basıncının oransal çalışan bir valf ile kontrol edilmesi üzerine çalışılmıştır [39].

Brun ve Arkadaşları (2016), yaptıkları çalışmada soğuk hava koşullarında elektrikli bir ısıtıcı kullanılarak yağlama yağının sıcaklığı uygun seviyeye getirilebileceğini belirtmiştir. Ayrıca, yağlama yağının filtrelenmesinin önemine vurgu yapılmış ve doğru filtrelenmediği takdirde, parçacıkların yağ akışındaki kirlenmenin bakım maliyetlerini artırabileceği ve ekipman hizmet ömrünü kısaltabileceği belirtilmiştir [40].

Shangguan ve Xu (2023), rüzgar türbinlerinde kullanılan merkezi yağlama ve atık yağ geri kazanım sistemlerini incelemiş ve bu sistemlerin performansını artırmanın yollarını araştırmıştır. Çalışma kapsamında, merkezi yağlama sistemlerinin verimliliğini artırmak ve atık yağın geri kazanımını optimize etmek için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Araştırmanın sonucunda, merkezi yağlama sistemlerinin rüzgar türbinlerinde yüksek performans sağladığı ve bakım maliyetlerini düşürdüğü tespit edilmiştir [41].

OLMA (Online Monitoring and Analysis) yöntemi, yağlayıcı yağların izlenmesinde önemli katkılar sağlamıştır. Bu yöntemi kullanarak yapılan deneylerde, ISOAJD prosedürü benimsenmektedir:

1. Yağlayıcı yağı deneysel test platformuna girmek.

2. Deneysel test platformunu başlatmak ve durdurmadan belirli bir süre çalıştırmak.

3. Çeşitli fiziksel sensörler kullanarak yağın fiziksel özelliklerini çevrimiçi olarak örneklemek ve ölçmek. Aşağıdaki iki tür çevrimiçi ölçüm gerçekleştirilir: yağ performansını analiz etmek için yağlama ölçümü ve aşındırıcı taneleri analiz etmek için aşınma ölçümü.

4. Elde edilen verileri, önerilen izleme ve tahmin modelleriyle gerçek zamanlı olarak analiz etmek.

5. Yağ durumunu değerlendirmek ve değerlendirme sonuçlarını görüntülemek. Adım 4'teki analiz sonuçlarına göre, yağ durumu üç duruma ayrılabilir: "Normal", "Anormal" ve "Kapatma uyarısı". "Anormal" durumlar ise "Dikkat sinyali" ve "Uyarı sinyali" olarak daha da ayrılabilir. Tüm değerlendirme sonuçları ekranda görüntülenir.

6. Karar seçenekleri. İki nihai karar seçeneğimiz vardır: "Onarım" ve "Bakım"; bu seçenekler, yağlayıcı yağ koşullarının analiz sonuçlarının kabul edilebilir olup olmadığına bağlıdır [42].

OLMA yönteminde, yağlayıcı yağların gerçek zamanlı izlenmesi ve analiz edilmesi konusunda önemli yenilikler sunulmaktadır. OLMA yöntemi, yağ performansını ve aşınma belirtilerini sürekli olarak izleyerek, erken uyarı ve bakım planlaması yapma imkanı sağlar.

Steimes ve Arkadaşlarının (2013), çalışmasında vakum pompaları, yağı yatak bölmelerinden geri toplayarak filtreleme işlemi uyguladıktan sonra yağ tankına geri yollamaktadır. Buda yağ tüketiminde tasarruf sağlar [43].

Sedlář, M. & Abrahámek, P. (2023), yaptıkları çalışmada su soğutmalı sistemlerin kullanımıyla yağın nasıl etkin bir şekilde soğutulabileceğini göstermektedir ve bu sayede yağın sıcaklığını güvenli seviyelerde tutmanın, rulman ömrünü uzatmak için kritik olduğu vurgulanmaktadır [44].

Bu çalışmalar, yağlama sistemlerinin tasarımı ve performansı üzerine çeşitli bulgular ortaya koymuştur. Yi ve arkadaşları (2014) [39], yağlama sistemlerinin bileşenlerine ve düzenli bakımının önemine vurgu yaparken, Brun ve arkadaşları (2016) [40], yağ sıcaklığının ve filtrelemenin önemini anlatmıştır. Shangguan ve Xu (2023) [41] ise, merkezi yağlama sistemlerinin etkinliğini ve atık yağ geri kazanımının önemini vurgulamışlardır. OLMA yöntemi ise, yağlayıcı yağların gerçek zamanlı izlenmesi ve analizi konusunda yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

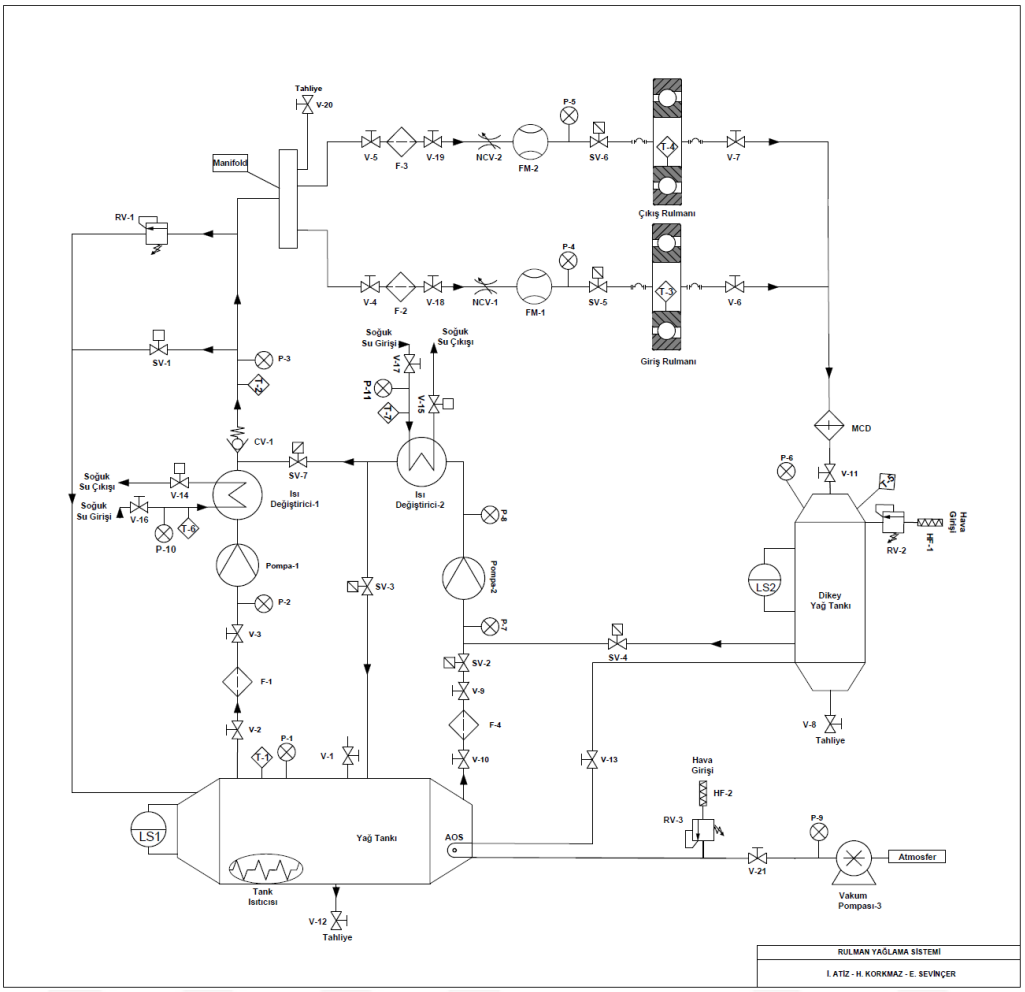
Literatürdeki bu çalışmalar, yağlama sistemlerinin performansını optimize etmek için çeşitli stratejiler önermiş ve bu sistemlerin endüstriyel uygulamalardaki önemini ortaya koymuştur. Bizim çalışmamızda aynı amaçlar doğrultusunda sistem optimizasyonunu sağlamak için sistem uygulanabilirliğine en uygun ürünler ve tasarım ile devam etmiştir. Ancak, mevcut çalışmaların çoğunda gerçek zamanlı kontrol ve veri kaydı yetenekleri yeterince ele alınamamaktadır. Bizim çalışmamız ise Siemens S7-1200 PLC ve NI cDAQ ürünleri kullanılarak geliştirilen yağlama sistemi olup, gerçek zamanlı kontrol ve yüksek çözünürlükte veri kaydı yetenekleri ile mevcut literatürdeki bu boşlukları doldurmayı hedeflemektedir.

4. RULMAN YAĞLAMA SİSTEMİNE YÖNELİK VERİ TOPLAMA SÜRECİ VE KONTROLCÜ TASARIMI

Rulman yağlama sistemlerinin verimli çalışabilmesi, sistem bileşenlerinin doğru bir şekilde tasarlanması ve entegrasyonunun sağlanması ile mümkündür. Bu bağlamda, veri toplama süreci ve kontrolcü tasarımı, sistemin performansını doğrudan etkileyen kritik unsurlar arasında yer almaktadır. Yağlama sistemlerinin bileşenleri ve işleyişi, hem sistemin dayanıklılığını artırmakta hem de bakım maliyetlerini azaltarak uzun vadeli verimlilik sağlamaktadır. Bu bölümde, rulman yağlama sistemine yönelik veri toplama süreci ve kontrolcü tasarımının detayları ele alınmaktadır.

4.1. Tasarlanan Yağlama Sisteminin Bileşenleri ve İşleyişi

Yağlama sistemi genel çalıştırılmasında, yağ ana pompa tarafından test/yağlaması yapılacak üniteye pompalanır. Ünitede kullanılan ve ısınan yağ hava ile beraber vakum pompası yardımıyla çekilerek, ısı değiştirici ile sıcaklığı düşürülmektedir. Sonrasında ise tekrardan sisteme yağ basılmaktadır. Döner makinelerde kritik öneme sahip olan yağlama sistemleri için örnek P&ID diyagramına Şekil 3'de yer verilmiştir.



Şekil 3. Rulman Yağlama Sistemi P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) Diyagramı

Bu tez çalışmasında ele alınan Yağlama sistemi ana olarak aşağıda sıralanan bileşenlerden oluşmaktadır:

- Ana yağ tankı ve dikey yağ tankı
- Yağ pompaları ve vakum pompası
- Isı değiştiriciler
- Valfler, filtreler, akış ölçerler, sensörler, manyetik çip yakalayıcı vs. P&ID'de belirtilmektedir.

Ana tank içerisinde, sıcaklık (T-1), basınç (P-1) ve seviye (LS1) sensörü bulunmaktadır. V-1 kodlu valf ise tankta vakum istenmediği zaman açılan bir manuel on-off izolasyon valfidir. Tank içerisinde bulunan ısıtıcı ise soğuk havalarda tank içerisindeki yağı, uygun test sıcaklığına çıkartmak için bulunmaktadır.

P&ID'de Pompa-1 olarak belirtilen ana pompa, yağı ana tanktan alarak sisteme basmaktadır. Pompa girişinde ise temiz bir yağ beslemesi yapabilmek için F-1 filtresi bulunmaktadır. P-2 kodlu basınç sensörü ise ana pompa giriş basıncını ölçmektedir.

Ana pompa çıkışında ise Isı Değiştirici-1 bulunmaktadır. Isı Değiştiriciye, soğuk su girişi V-16 manuel izolasyon valfi ile başlamaktadır ve basınç (P-10), sıcaklık (T-6) sensörleri ile soğutma suyu takip edilir. Isı değiştiricinin su çıkışında ise soğutma suyunun debisinin ayarlandığı bir kontrol vanası (V-14) bulunmaktadır. Hattın devamında yer alan sıcaklık sensöründen (T-2) yağ sıcaklık bilgisi alınarak, V-14 valfin açıklık oranı PLC kontrolcüsü içerine yazılan PID algoritması ile ayarlanmaktadır. Bu sayede rulmanlara gönderilen yağın sıcaklığı istenilen makul seviyelerde tutulmaktadır.

Ana pompanın çıkışında yer alan yağ soğutucunun devamında ise yağın ters basınçla geri akmaması için CV-1 kodlu çek valf bulunmaktadır. Hattın devamında ise P-3 kodlu basınç sensörü ve T-2 kodlu sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Rulmanlara yağ gitmesi istenmediği zamanlarda SV-1 izolasyon valfi devreye alınarak sistem by-pass edilecektir. RV-1 basınç emniyet valfi ise rulmanlara gidecek yağın basıncını ayarlayarak istenen basınç seviyesinin üstünü tanka geri çevirecektir. Rulman hatlarına dağıtılacak olan yağ ise manifold üzerinden geçmektedir.

Manifolddan sonra hat 2'ye ayrılmaktadır. Bu hatlar rulman/herhangi bir döner ekipman test noktasında gitmektedir. Giriş Rulmanına giden hattın başlangıcı V-4 manuel on-off valf ile başlamaktadır. Yağ hattı, filtreden (F-2) sonra V-18 manuel on-off valfi ile devam etmektedir ve filtrenin iki adet manuel on-off valfin arasında yer almasının amacı, filtre bakımının daha rahat yapılabilmesidir. NCV-1 oransal kontrol valfi ise rulmana giden yağın debisini kontrol etmektedir ve debinin takibi FM-1 debimetresi ile yapılmaktadır. P-4 kodlu basınç sensörü de Giriş Rulmanına giden yağın basıncını ölçmektedir. SV-5 on-off valf ise rulmana giden yağı kesmektedir. İkinci hat ise Çıkış Rulmanına giden hattır ve Giriş Rulmanı hattına benzerdir. Hattın başlangıcı V-5 manuel on-off valf ile başlamaktadır. Yağ hattı filtreden (F-3) sonra, V-19 manuel on-off valfi ile devam etmektedir. NCV-2 oransal kontrol valfi ise rulmana giden yağın debisini kontrol etmektedir ve debinin takibi FM-2 debimetresi ile yapılmaktadır. P-5 kodlu basınç sensörü de Çıkış Rulmanına giden yağın basıncını ölçmektedir. SV-6 kodlu on-off valf ise rulmana giden yağı kesmektedir.

Yağın geri dönüşü ise vakum pompasının oluşturduğu negatif basınç ile sağlanmaktadır. Yağın Giriş Rulmanı dönüş hattında V-6 kodlu manuel on-off izolasyon valfi bulunmaktadır. Aynı şekilde, Yağın Çıkış Rulmanı dönüş hattında V-7 kodlu manuel on-off izolasyon valfi bulunmaktadır. Rulmanlardan dönen bu iki hat birleştikten sonra, dikey yağ tankına girmeden önce MCD kodlu manyetik çip detektörden geçmektedir.

Dikey yağ tankı, vakum pompasının oluşturduğu vakumu kullanarak rulmanlardan dönen yağı toplayacak tanktır. Tankın sabit vakum altında kalması için önceden belirlenmiş bir değerde set edilmiş basınç emniyet valfi (RV-2) vardır ve bu valfin girişinde kirli havanın sisteme karışmasını engellemek için hava filtresi (HF-1) bulunmaktadır. Dikey Yağ Tankı içerisinde, tank basıncını ölçmek için basınç sensörü (P-6), tankın sıcaklığını ölçmek için sıcaklık sensörü (T-5) ve tank seviyesini ölçmek için seviye sensörü (LS2) bulunmaktadır. Dikey yağ tankından boşaltılan bu yağ bir yağ-hava separatöründen (AOS) geçerek tanka geçmektedir.

Pompa-2'nin ise sistemde üç görevi vardır. Birinci görevi ana tanktaki yağı sirküle etmek, ikinci görevi dikey yağ tankında biriken fazla yağı emmek olup üçüncü görevi ise, ana yağ pompası olan Pompa-1'in yedeği olmasıdır.

Pompa-2'nin girişinde F-4 kodlu filtre ve filtre bakımlarının rahat yapılabilmesi için V-9 ve V-10 kodlu manuel on-off izolasyon valfi bulunmaktadır. P-7 kodlu basınç sensörü pompa girişindeki basıncı, P-8 kodlu sensör ise pompa çıkışındaki basıncı ölçmektedir. Isı Değiştirici-2 ise Isı Değiştirici-1 ile aynı mantıkta çalışmakta olup Pompa-2 nin sirküle ettiği yağı soğutma görevi görmektedir.

Rulmanlardan yağı negatif basınçlı vakum ortamında süpürebilecek vakumu oluşturacak, vakum pompası P&ID'de Vakum Pompası-3 olarak belirtilmiştir. Yağ-hava separatörü yardımıyla, birbirinden ayrılan yağ hava karışımının yağ kısmı tanka geri döndürülerek, hava kısmı ise vakum pompası yardımıyla atmosfere tahliye edilecektir. RV-3 basınç emniyet valfi, vakum pompasının emişindeki basıncı sabitlemek için sistemde kullanılmaktadır ve ana tankın da belirli bir vakum noktasında kalmasını sağlayacaktır. HF-2 kodlu ekipman ise, vakum pompası girişinde kirli hava olmaması için koyulan basınç emniyet valfinin hava emiş filtresidir. P-9 sensörü ile vakum pompasındaki emiş hattının basıncı ölçülmektedir.

4.1.1. Yağlama Sistemi Kurulum ve Uygulama Adımları

Sistemin kurulum ve uygulama adımları şu şekildedir:

Adım 1- Mekanik Bağlantılar: Boruların ve ekipmanların fiziksel montajları yapılır.

Adım 2-Sensörlerin Yerleştirilmesi: Basınç, sıcaklık ve seviye sensörleri uygun noktalara yerleştirilir.

Adım 3- Elektrik Bağlantıları: PLC, Veri Toplama Kartları ve HMI paneli gibi kontrol ve otomasyon ekipmanlarının elektrik bağlantıları yapılır.

Adım 4-Yazılım Kurulumu: PLC programlama ve LabVIEW yazılımı yüklenir ve yapılandırılır.

Adım 5-Sistem Testleri: Sistem çalıştırılır ve tüm bileşenlerin doğru şekilde çalıştığı test edilir.

4.2. PLC ve Veri Toplama Sistemi

Rulman yağlama sistemlerinin etkin bir şekilde çalışabilmesi için kullanılan PLC (Programmable Logic Controller) ve veri toplama sistemleri, sistemin beyni olarak nitelendirilebilir. Bu sistemler, sıcaklık ve basınç sensörlerinden gelen verileri toplayarak, analiz eder ve kontrol mekanizmalarını yönetir. Doğru bir PLC ve veri toplama sistemi tasarımı, sistem performansının optimize edilmesinde ve potansiyel arızaların önceden tespit edilmesinde kritik rol oynar. Bu bölümde, kullanılan PLC ürün grubu ve HMI (Human-Machine Interface) ekranı gibi önemli bileşenlerin detaylı bir şekilde incelenmesi yer almaktadır.

4.2.1. PLC Ürün Grubu ve HMI Ekranı

Tasarlanan yağlama sisteminde Siemens S7-1200 serisi PLC kullanılmıştır. Bu sistem, endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamaları için tasarlanmış kompakt ve güçlü bir kontrol birimidir. Sistemde kullanılan Siemens PLC grubu modülleri ve HMI özellikleri Tablo 1’de verilmiştir [45] [46].

Tablo 1. Sistemde Kullanılan PLC Modülleri ve HMI Özellikleri

Modül Adı	Özellikler
S7-1200 CPU 1215C	Entegre Ethernet portu -125 KB çalışma belleği - 24V DC güç beslemesi
S7-1200 DI/DO X 16 24V DC 0.5A SM 1223	16 dijital giriş/çıkış - 24V DC çalışma gerilimi - 0.5A akım kapasitesi
S7-1200 AI X 8 13-BIT SM 1231	8 analog giriş - 13bit çözünürlük
S7-1200 AQ X 4 14-BIT SM 1232	4 analog çıkış - 14bit çözünürlük
Beijer X2 Pro 21 – B2 HMI	21 inç geniş ekran - Yüksek çözünürlüklü dokunmatik ekran Çoklu dil desteği Ethernet, USB ve seri port bağlantıları

Sistem bileşenlerinin entegrasyonu, Siemens S7-1200 serisi PLC'nin modüler yapısı sayesinde kolayca gerçekleştirilebilir. CPU modülü, sistemin beyni olarak tüm kontrol işlemlerini yönetir. Dijital giriş/çıkış modülleri, sistemdeki dijital sinyalleri alır ve işleyerek gerekli kontrol sinyallerini oluşturur. Analog giriş modülleri, sensörlerden gelen analog verileri yüksek çözünürlükte okuyarak CPU'ya iletir. Analog çıkış modülleri ise CPU'dan gelen kontrol sinyallerini analog kontrol cihazlarına gönderir. PLC analog kontrol modülünün kullanımı, sadece proses kontrolünü değil, aynı zamanda enstrüman izlemeyi de gerçekleştirebilir [47].

Sistemde, operatörlerin sistemi kolayca izleyip kontrol edebilmeleri için Beijer X2 Pro 21 - B2 HMI kullanılmıştır. Bu HMI (Human-Machine Interface), kullanıcı dostu bir arayüz sunar ve sistemin genel durumu hakkında anlık bilgi sağlar. HMI paneli, PLC ile entegre çalışarak operatörlerin sistem üzerinde değişiklikler yapmasına ve çeşitli parametreleri ayarlamasına olanak tanır. HMI'lar, endüstriyel otomasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılır ve operatörlere sistem kontrolü ve izleme işlevleri sunar. Örneğin, yağlama sistemlerinde sıcaklık, basınç ve seviye sensörlerinden alınan veriler HMI ekranında görselleştirilir ve operatörlerin hızlı müdahale etmesine olanak tanır.

4.2.2. Veri Toplama Ünitesi

Sistemde veri toplama ünitesi olarak kullanılan NI cDAQ (National Instruments CompactDAQ), zamana bağlı olarak sürekli yüksek çözünürlükte veri kaydı gerçekleştirir. Bu veriler, sistemin performans ve genel analizlerinin yapılmasına imkân sağlar. Sistemimizde kullanılan NI cDAQ modülleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Sistemde Kullanılan NI Veri Toplama Grubu Özellikleri

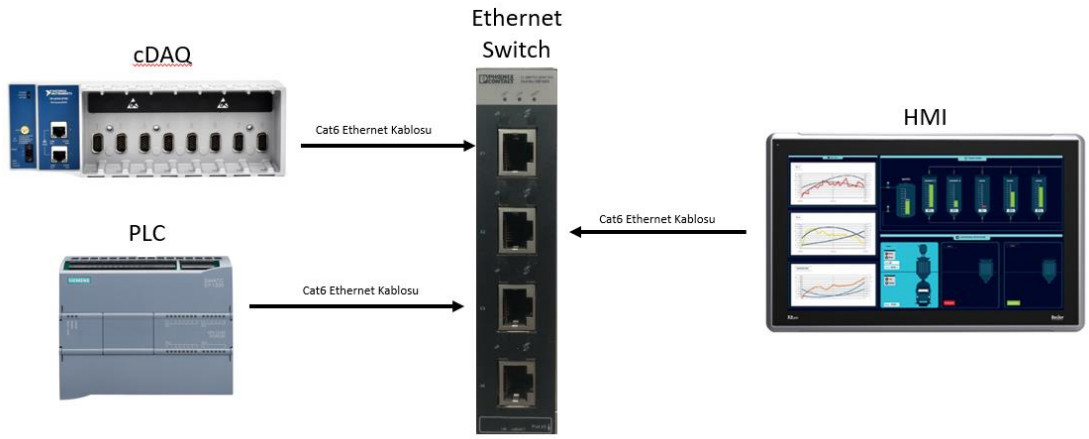
Modül Adı	Özellikler
NI 9189 cDAQ	8 Modül yuvası - Ethernet üzerinden veri aktarımı - 1 MS/s veri toplama hızı
NI 9208 AI	16 analog giriş - 24-bit çözünürlük - 500 S/s kanal başına örnekleme hızı
NI 9266 AO	8 analog çıkış - 16-bit çözünürlük - 100 kS/s kanal başına örnekleme hızı
NI 9375 DI-DO	32 Dijital giriş/çıkış - 24V DC çalışma gerilimi - 0.5A akım kapasitesi

Analog ve dijital giriş çıkış modülleri, NI 9189 cDAQ şasisine yerleştirilerek veri toplama ve kontrol görevlerini yerine getirir [48]. Analog giriş modülleri, sistemdeki sensörlerden gelen verileri yüksek çözünürlükte toplar. Analog çıkış modülleri, kontrol cihazlarına hassas sinyaller gönderir. Dijital giriş/çıkış modülleri ise dijital sinyallerin yönetimini sağlar [49].

4.2.3. Ethernet Switch Üzerinden Modbus ile Bağlantı

Sistemin verimli çalışabilmesi için Şekil 4'te de görüldüğü gibi Siemens S7-1200 CPU, HMI (Beijer X2 Pro 21 - B2) ve NI cDAQ modülleri bir Ethernet switch üzerinden Modbus TCP/IP protokolü ile birbirine bağlanmıştır. Modbus TCP/IP, endüstriyel otomasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir protokoldür ve cihazlar arasında güvenilir ve hızlı veri transferi sağlar. Bu bağlantı yöntemi, sistem bileşenlerinin senkronize bir şekilde çalışmasını ve verilerin merkezi bir noktadan izlenip kontrol edilmesini mümkün kılar.

PLC, HMI ve cDAQ cihazları arasında Ethernet switch aracılığıyla gerçekleştirilen bu bağlantı, operatörlerin HMI üzerinden PLC'yi kontrol etmesine ve cDAQ modülleri aracılığıyla toplanan verilerin anlık olarak izlenmesine olanak tanır. Şekil 4'te gösterilen bu yapı, sistemin genel performansını artırır ve olası arızaların hızlı bir şekilde tespit edilip müdahale edilmesini sağlar.

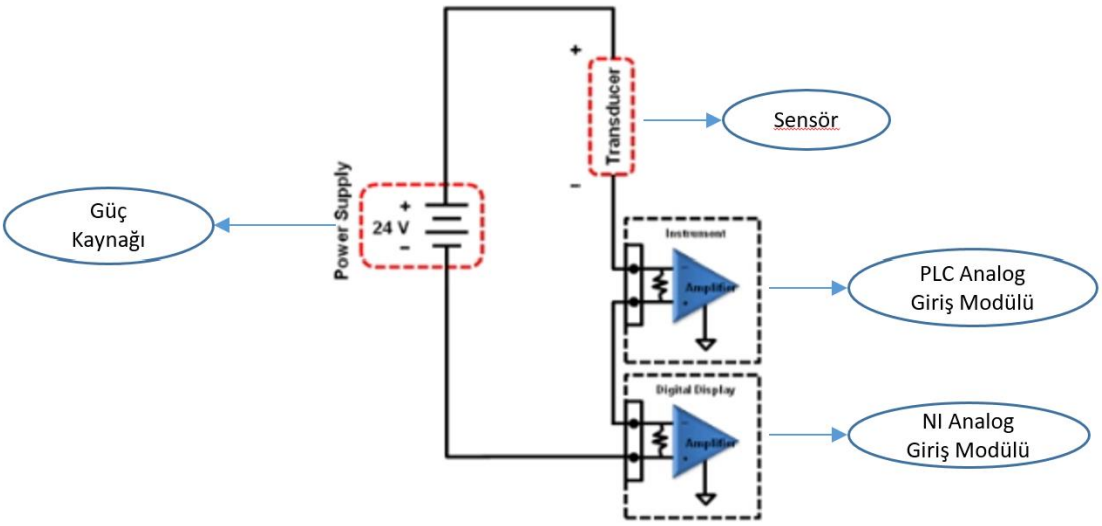


Şekil 4. Yağlama Sisteminde PLC, HMI ve cDAQ Modüllerinin TCP/IP Üzerinden Ethernet Bağlantı Şeması[45], [46], [48], [50]

4.3. Ölçülen Fiziksel Büyüklükler

Yağlama sisteminde kullanılan sensörlerin tümü 4-20mA çıkış verebilecek şekilde seçilmiştir. 4-20mA akım döngüsü, endüstriyel ortamlarda analog sinyallerin uzun mesafelerde iletilmesi için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu akım döngüsü, basitliği ve güvenilirliği nedeniyle değerlidir. 4mA, ölçüm aralığının minimum, 20mA ise maksümum değerine karşılık gelmektedir.

4-20mA akım döngüsü, sensörlerin (sıcaklık, basınç, seviye ve debi) fiziksel büyüklükleri 4mA ile 20mA arasında bir akım sinyaline dönüştürmesiyle başlar. Döngüde bulunan 24V DC güç kaynağı, akımın döngü boyunca akmasını sağlamak için gerekli voltajı sağlar. Döngüdeki PLC ve NI analog giriş modülleri seri olarak bağlanmıştır, bu da her iki analog giriş modülünden aynı akımın akmasını sağlayarak PLC'nin yağlama sistemini kontrol etmesini ve NI veri toplama sisteminin yüksek hızlı veri kaydı yapmasına olanak tanır. Sinyal iletiminin devamlılığı için döngü üzerinde herhangi bir kopma olmaması gerekmektedir. Şekil 5'te sistem algılayıcılarının uygulamalarda iki analog input modülüne nasıl bağlanabileceğinin temeli gösterilmektedir [51]. Yağlama sisteminde bulunan tüm sensörlerde bu bağlantı yapısı tekrarlanmaktadır.



Şekil 5. 4-20mA Seri Bağlantı Gösterimi [51]

4.3.1. Basınç Sensörü ve Bağlantı Diyagramı

Basınç sensörleri, yağ basıncını ölçmek ve PID kontrolör tarafından yağ akışını optimize etmek amacıyla kullanılır. Şekil 6'da gösterilen Wika Model A-10 basınç sensörü kullanılmaktadır.



Şekil 6. Yağlama Sistemi Basınç Sensörü[52]

Wika Model A-10 basınç sensörü, genel endüstriyel uygulamalar için kompakt tasarımıyla dikkat çekerken bu tez çalışmasında da hassasiyeti ve pratik uygulanabilirliği açısından tercih edilmiştir. Sensorun teknik ayrıntıları Tablo 3'te yer almaktadır. [52]

Tablo 3 :Wika Model A-10 Basınç Sensörü Teknik Özellikleri

Özellik	Açıklama
Ölçüm Aralığı	0 … 40 bar
Çıkış Sinyali	4 … 20 mA, 2-kablo
Güç Bağlantısı	8 … 30 V DC
Doğrusallık Dışı Oranı	0.5% BFSL
Oda Sıcaklığında Hassasiyet	≤ ±1.0%
Sıfır Sinyalinin Sapmasını Ölçme	≤ ±0.3%
Ortam Çalışma Sıcaklığı	0 … +80 °C
Bağlantı Standartı	G ¼ A DIN EN ISO 1179-2
Bağlantı Tipi	M12x1, 4 - Pin

Yağlama sisteminde, hat üzerinden basınç okuması yapılabilmesi adına ek olarak Şekil 7'de verilen hat üstü indikatör dahil edilmiştir.

Wika Typ A-IAI-1, takılabilir bir dijital göstergedir. Bu cihaz, mevcut sensöre kolayca eklenerek yerel okuma sağlar ve aynı zamanda 4-20 mA sinyal iletimine olanak tanır.

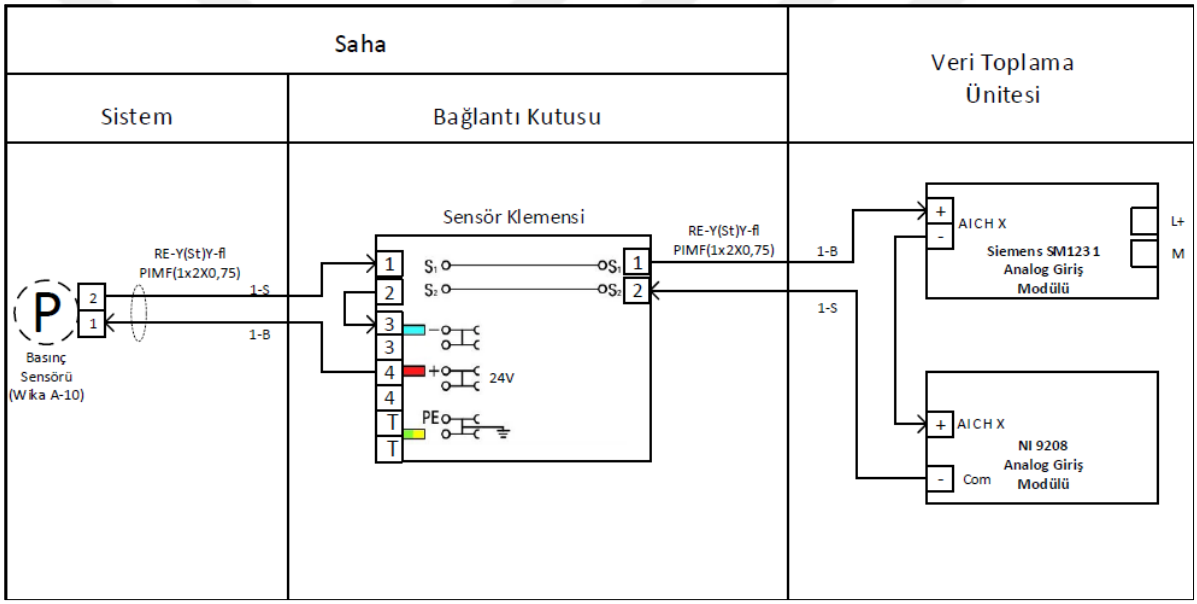


Şekil 7. Basınç Sensörü İndikatörü[53]

Wika Typ A-IAI-1, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır ve basınç, sıcaklık ve diğer ölçüm cihazlarıyla birlikte çalışabilir. Özellikle petrol ve gaz, kimya, su arıtma ve güç üretim tesislerinde kullanımı idealdir [53].

Yağlama sisteminde 2 adet tank basıncı, 2 adet rulman yağ basıncı, 2 adet soğutma suyu basıncı, 2 adet pompa giriş basıncı, 2 adet pompa çıkış basıncı ve 1 adet vakum pompası giriş basıncı olmak üzere toplam 11 adet basınç sensörü kullanılmıştır ve her bir basınç sensörünün bağlantı

diyagramı Şekil 8'de verilmiştir. Bu basınç sensörleri Tablo 4'te belirtilen analog giriş kanallarına bağlanmıştır. Bu diyagramda sensör klemensinin +24V bağlantı pini, sensörün 1 numaralı pinine 1-B (1 Numaralı Beyaz) kablo damarı ile bağlanmış olup sensörün temel enerjisini sağlamaktadır. Sensörün 2. Pininden ise 1-S (1 Numaralı Siyah) kablo ile akımın seri olarak devreyi tamamlaması göz önüne alınmış olup sensör klemensi üzerinden Siemens Sm1231 analog giriş modülünün '+' pinine bağlanmıştır. Bu kanalın '-' pini ise yine seri bağlantı olması adına NI 9208 analog giriş modülünde ilgili '+' kanalına girerek ardından bu modülün genel '-' pini Sensör klemensinde bulunan ortak '-' pinine bağlanmıştır. Bu doğrultuda beslemesi yapılan sensör, ölçümünü yaptığı basınç değerini 4-20mA sinyal olarak önce PLC'nin daha sonra NI'ın analog giriş modüllerine girerek hem kontrolcü üzerindeki hem de veri toplama ünitesi üzerindeki okunma işlemlerini tamamlamaktadır.



Şekil 8. Basınç Sensörü Bağlantı Diyagramı[54]

Yağlama sisteminde ölçümü gerçekleştirilen basınç sensörlerinin NI ve PLC analog giriş modülleri üzerindeki modül ve kanal numarası Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Basınç Sensörleri Analog Giriş Kanalları

Sensör Adı	NI 9208 Analog Giriş Modül ve Kanal Numarası	Siemens SM1231 Analog Giriş Modül ve Kanal Numarası
P-1	AI Modül 1 - CH0	AI Modül 1 - CH0
P-2	AI Modül 1 – CH1	AI Modül 1 – CH1
P-3	AI Modül 1 – CH2	AI Modül 1 – CH2
P-4	AI Modül 1 – CH3	AI Modül 1 – CH3
P-5	AI Modül 1 – CH4	AI Modül 1 – CH4
P-6	AI Modül 1 – CH5	AI Modül 1 – CH5
P-7	AI Modül 1 – CH6	AI Modül 1 – CH6
P-8	AI Modül 1 – CH7	AI Modül 1 – CH7
P-9	AI Modül 1 – CH8	AI Modül 2 - CH0
P-10	AI Modül 1 – CH9	AI Modül 2 – CH1
P-11	AI Modül 1 – CH10	AI Modül 2 – CH2

4.3.2. Sıcaklık Sensörü ve Bağlantı Diyagramı

Şekil 9'da gösterildiği gibi sistemde yağın ve soğutma suyunun sıcaklığını ölçmek için Wika TR12-B kodlu bir termometre bağlantı kafası ile donatılmış olan bir RTD (Resistance Temperature Detector) sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Tablo 5'te özellikleri verilen bu sensör endüstriyel uygulamalar için tasarlanmış olup, kimya, enerji santralleri, güç santralleri, gıda, içecek, petrol ve gaz gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [55].

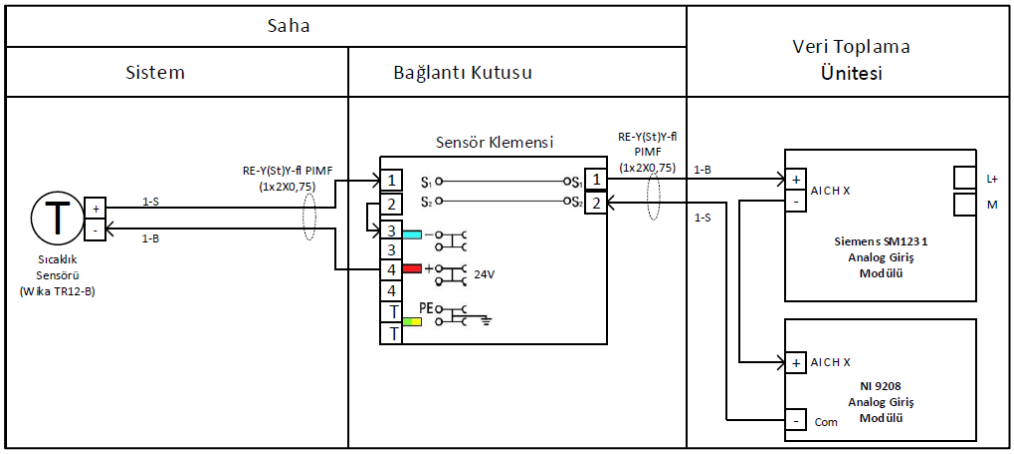


Şekil 9. Yağlama Sistemi Sıcaklık Sensörü[55]

Tablo 5. Wika TR12-B Kodlu RTD Sıcaklık Sensörü Teknik Özellikleri

Özellik	Açıklama
Yapı ve Malzeme	Yüksek kaliteli malzemelerden üretilmiş, IP65 koruma sınıfında bağlantı kafası
Ölçüm Aralığı	-196°C ile +600°C arasında
RTD Elemanı	PT100 tipi RTD
Bağlantı Tipi	2, 3 veya 4 telli bağlantı konfigürasyonları

Yağlama sisteminde 2 adet tank içi yağ sıcaklığı, 2 adet soğutma suyu sıcaklığı, 2 adet rulman sıcaklığı ve 1 adet pompa çıkış sıcaklığı ölçümü için toplam 7 adet RTD tipi sıcaklık sensörü kullanılmıştır ve her bir sıcaklık sensörünün bağlantı diyagramı Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu sıcaklık sensörleri Tablo 6'da belirtilen analog giriş kanallarına bağlanmıştır. Sensör bağlantı diyagramında sensör klemensinin +24V bağlantı pini sensörün 1 numaralı pinine bağlanmış olup sensörün temel enerjisini sağlamaktadır. Sensörün 2. Pininden ise akımın seri olarak devreyi tamamlaması göz önüne alınmış olup sensör klemensi üzerinden Siemens Sm1231 Analog giriş modülünün '+' pinine bağlanmıştır. Bu kanalın '-' pini ise NI 9208 Analog Input modülünde ilgili kanala girerek seri bağlanmıştır. Seri bağlantı döngüsünü tamamlamak için NI 9208 modülünün genel '-' pini (com) sensör klemensinde bulunan '-' pinine bağlanmıştır. Böylelikle ölçümü gerçekleştirilen sıcaklık değeri, 4-20mA sinyal aralığında bir değer olacak şekilde ilk olarak PLC'nin daha sonra NI'ın analog giriş modülüne girerek hem kontrolcü üzerindeki hem de veri toplama ünitesi üzerindeki okunma işlemlerini tamamlamaktadır.



Şekil 10. Sıcaklık Sensörleri Bağlantı Diyagramı

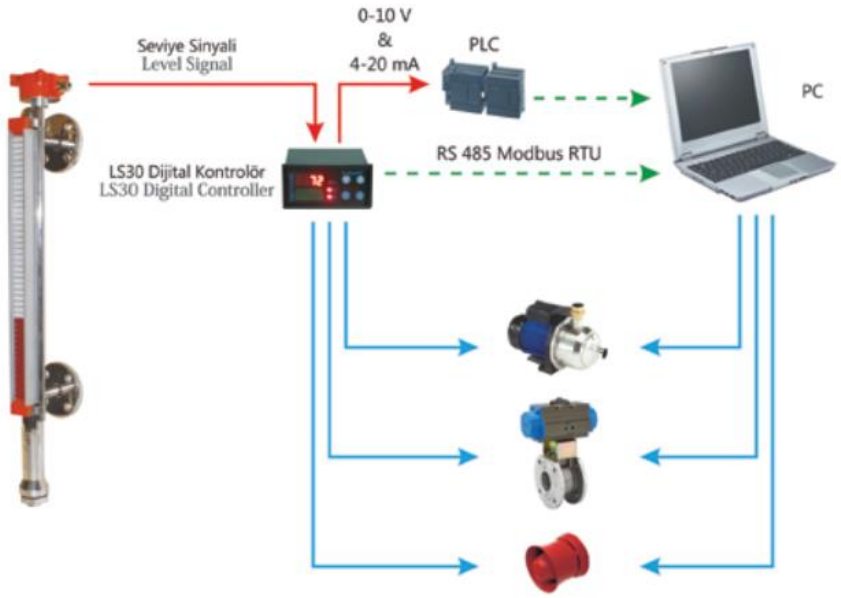
Yağlama sisteminde ölçümü gerçekleştirilen sıcaklık sensörlerinin NI ve PLC analog giriş modülleri üzerindeki modül ve kanal numarası Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Sıcaklık Sensörleri Analog Giriş Kanalları

Sensör Adı	NI 9208 Analog Giriş Modül ve Kanal Numarası	Siemens SM1231 Analog Giriş Modül ve Kanal Numarası
T-1	AI Modül 2 - CH0	AI Modül 2 – CH3
T-2	AI Modül 2 – CH1	AI Modül 2 – CH4
T-3	AI Modül 2 – CH2	AI Modül 2 – CH5
T-4	AI Modül 2 – CH3	AI Modül 2 – CH6
T-5	AI Modül 2 – CH4	AI Modül 2 – CH7
T-6	AI Modül 2 – CH5	AI Modül 3 – CH0
T-7	AI Modül 2 – CH6	AI Modül 3 – CH1

4.3.3. Seviye Sensörü ve Bağlantı Diyagramı

Sistemde Şekil 11'den de görüldüğü gibi tank yağı seviye ölçümü için KAYSE marka MLG30 kodlu seviye sensörü kullanılmıştır. özellikle ex-proof (patlama korumalı) koşulların gerektiği uygulamalar için tasarlanmış bir seviye kontrol cihazıdır. Bu cihaz, manyetik tip seviye göstergesi kullanarak akışkan seviyesini ölçer ve 0-10V veya 4-20mA analog çıkış sinyalleri üretir. Bu sayede, seviye bilgisi doğrudan otomasyon sistemlerine entegre edilebilir. Ancak bu tez çalışmasında sensörün bağlantısı, LS30 kontrolör üzerinden yapılmıştır. Endüstriyel tesislerde, özellikle tehlikeli ortamlarda sıvı seviyesinin izlenmesi ve kontrolü için ideal bir seviye ölçerdir. Cihaz, yüksek basınç ve sıcaklık uygulamalarında güvenilir performans sunar ve otomasyon sistemlerine kolayca entegre edilebilir. Ayrıca, motor, pompa, vana veya ışıklı-sesli alarm gibi cihazların çalıştırılması için üç farklı röle çıkışı bulunmaktadır. Şekil 11'de ayrıntılı bağlantı şeması bulunmaktadır. Tablo 7'de ise LS30 seviye kontrolörünün özellikleri yer almaktadır [56], [57].



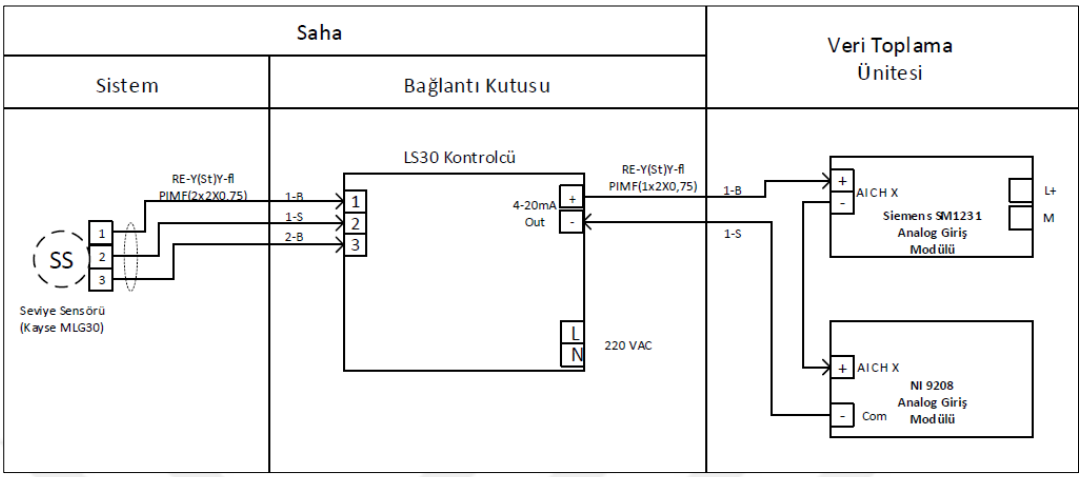
Şekil 11. Tank Yağı Seviye Sensörü ve Kontrolörünün Bağlantı Şeması[56]

Tablo 7. LS30 Seviye Kontrolörü Özellikleri

Özellik	Açıklama
Analog Çıkışlar	0-10V ve 4-20mA analog çıkışlar, PLC ve diğer otomasyon sistemleri arayüzleri
Röle Çıkışları	Üç röle çıkışı, harici cihazları kontrol etmek için kullanılır
Ölçüm Yeteneği	Seviye değişimlerini yüzde, hacim, kütle veya mesafe birimlerinde izleyebilir
İletişim	RS485 Modbus iletişimini destekler, geniş otomasyon ağları ile entegrasyon sağlar
Ex-Proof Versiyonu	ATEX standartlarına uygun, tehlikeli ortamlar için Ex-proof versiyonu

Yağlama sisteminde 1 adet ana tank yağ seviyesi ve 1 adet dikey tank yağ seviyesi ölçümü için toplam 2 adet seviye sensörü kullanılmıştır ve her iki seviye sensöründe bağlantı diyagramı Şekil 12'de verilmiştir. Bu seviye sensörleri Tablo 8'de belirtilen analog giriş kanallarına bağlanmıştır. Bu diyagramda sensör üzerindeki 1,2, ve 3 numaralı pinler, üretici önerisi ile dahil edilen sensör kontrolöründeki 1,2 ve 3 numaralı pinlere girilmektedir. Kontrolör seviye sensörünün uygunlaştırma işlemlerini otomatik olarak kendi içerisinde yapmakta ve analog giriş modüllerinden okuyabilmemiz için 4-20mA şeklinde çıkış vermektedir. Bu mA çıkışının seri olarak hem PLC hemde NI'da okunabilmesi için '+' ucu, Siemens Sm1231 analog giriş modülünün '+' pinine bağlanmıştır. Bu kanalın '-' pini ise yine seri bağlantı olması adına NI 9208 analog giriş modülünde uygun kanala girerek ardından bu modülün genel '-' pini Kontrolörün mA çıkışının '-' pinine bağlanmıştır. Sensör ölçümünü yaptığı tank seviyesi

değerini 4-20mA sinyal olarak önce PLC'nin daha sonra NI'ın analog giriş modüllerine girerek hem kontrolcü üzerindeki hem de veri toplama ünitesi üzerindeki okunma işlemlerini tamamlamaktadır.



Şekil 12. Seviye Sensörü ve Kontrolörünün Bağlantı Diyagramı

Yağlama sisteminde ölçümü gerçekleştirilen seviye sensörlerinin NI ve PLC analog giriş modülleri üzerindeki modül ve kanal numarası Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Seviye Sensörleri Analog Giriş Kanalları

Sensör Adı	NI 9208 Analog Giriş Modül ve Kanal Numarası	Siemens SM1231 Analog Giriş Modül ve Kanal Numarası
LS-1	AI Modül 2 – CH9	AI Modül 3 – CH4
LS-2	AI Modül 2 – CH10	AI Modül 3 – CH5

4.3.4. Debimetre ve Bağlantı Diyagramı

Yağlama sisteminde rulmanları besleyen yağın debisini ölçmek için KRACHT marka VC 0.2 model debimetre kullanılmıştır. Bu debimetre dişli tip akış ölçer kategorisinde yer alan ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan yüksek hassasiyetli bir cihazdır. Tablo 9'da debimetre teknik özellikleri gösterilmektedir. 4-20mA çıkış veren bu debimetre DISPLAY SD1 üzerinden analog giriş terminallerine bağlanmıştır. Böylelikle debi bilgisi sahada bulunan sistem üzerinden de gözlemlenebilmektedir. KRACHT marka VC 0.2 model debimetre, çok küçük hacim akışlarını doğru bir şekilde ölçebilir ve özellikle yakıt enjektör test tezgâhlarında ve mikrodosing süreçlerinin izlenmesinde kullanılır [58].

Tablo 9. KRACHT Marka VC 0.2 Model Debimetre Teknik Özellikleri

Özellik	Değer
Ölçüm aralığı	0.16 L/dk ile 16 L/dk
Maksimum Çalışma Basınç	400 bar
Ortam Sıcaklığı	-20°C ile 100°C
Bağlantı Tipi	Plaka montajı veya boru bağlantısı
Çözünürlük	4081.63 lmp/l
Çalışma Basıncı	Maksimum 400 bar
Her Yönde Akış	Akış yönü fark etmeksizin çalışabilir
Yüksek Çalışma Güvenilirliği	Elektronik bileşenlerin yüksek güvenilirlikle çalışması
Viskozite Bağımsız Ölçüm	Belirli viskozite aralıklarında bağımsız ölçüm

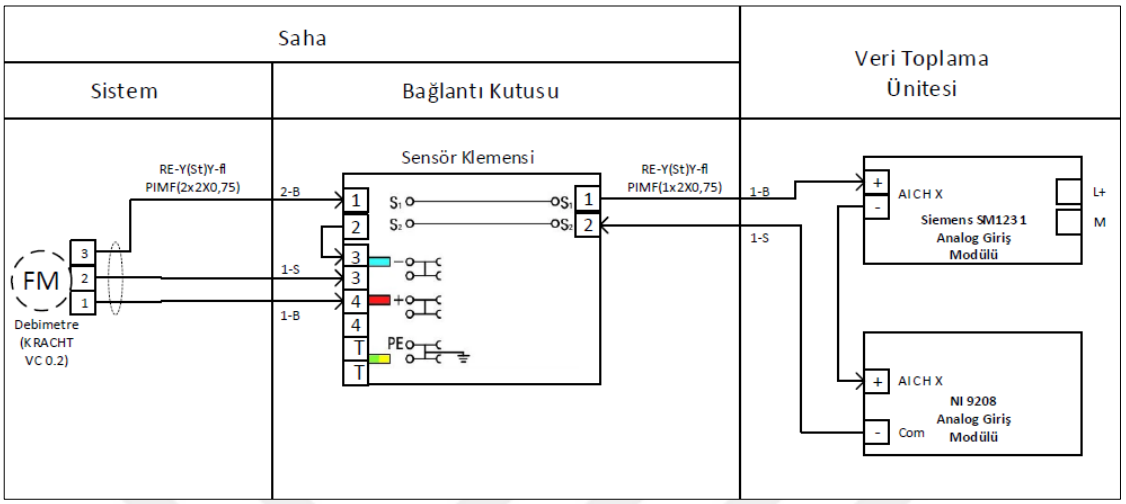
Tablo 10'da ise hat üzerinden debimetre değerinin okuyabilmemiz için sisteme dahil edilen DISPLAY SD1 ürününün teknik özellikleri gösterilmektedir. Display debimetrelerden gelen verilerin görüntülenmesi ve izlenmesi için kullanılan bir dijital gösterge cihazıdır [59].

Tablo 10. Kracht Marka SD1 Display Ürününün Teknik Özellikleri

Özellik	Değer
LCD Ekran	Kolay okunabilir ve programlanabilir ekran
4-20 mA Çıkış	Debimetreden gelen analog sinyaller ve görüntüleri
IP65 Koruma	Su ve toza karşı dayanıklı yapı
Kolay Montaj	Mevcut sistemlere kolayca eklenebilir ve monte edilebilir
Kendine Teşhis	Sürekli kendini teşhis sistemi ile hata tespiti ve uyarı mesajları sağlar

Yağlama sisteminde 1 adet Giriş Rulmanını besleyen hat üzerinde ve 1 adet te Çıkış Rulmanını besleyen hat üzerinde olmak üzere toplam 2 adet debimetre kullanılmıştır. Kullanılan debimetrelerin bağlantı diyagramı Şekil 13'de verilmiştir. Bu debimetreler Tablo 11'de belirtilen analog giriş kanallarına bağlanmıştır. Bu diyagramda sensör klemensinin +24 bağlantı pini sensörün 1 numaralı pinine '-' bağlantı pini ise sensörün 2 numaralı pinine bağlanmış olup sensörün temel enerjisini sağlamaktadır. Sensörün 3. Pininden ise akımın seri olarak devreye tamamlanması göz önüne alınmış olup sensör klemensi üzerinden Siemens Sm1231 analog giriş modülünün '+' pinine bağlanmıştır. Bu kanalın '-' pini ise yine seri bağlantı olması adına NI 9208 analog giriş modülünde uygun kanala girerek ardından bu modülün genel '-' pini Sensör klemensinde bulunan ortak '-' pinine bağlanmıştır. Bu

doğrultuda beslemesi yapılan sensör ölçümünü yaptığı debi değerini 4-20mA sinyal cinsinden seri bir şekilde önce PLC'nin daha sonra NI'ın analog input modüllerine girerek hem kontrolcü üzerindeki hem de veri toplama ünitesi üzerindeki okunma işlemlerini tamamlamaktadır.



Şekil 13. KRACHT Marka VC 0.2 Model Debimetre Bağlantı Diyagramı

Yağlama sisteminde ölçümü gerçekleştirilen seviye sensörlerinin NI ve PLC analog giriş modülleri üzerindeki modül ve kanal numarası Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Debimetre Analog Giriş Kanalları

Sensör Adı	NI 9208 Analog Giriş Modül ve Kanal Numarası	Siemens SM1231 Analog Giriş Modül ve Kanal Numarası
FM-1	AI Modül 2 – CH7	AI Modül 3 – CH2
FM-2	AI Modül 2 – CH8	AI Modül 3 – CH3

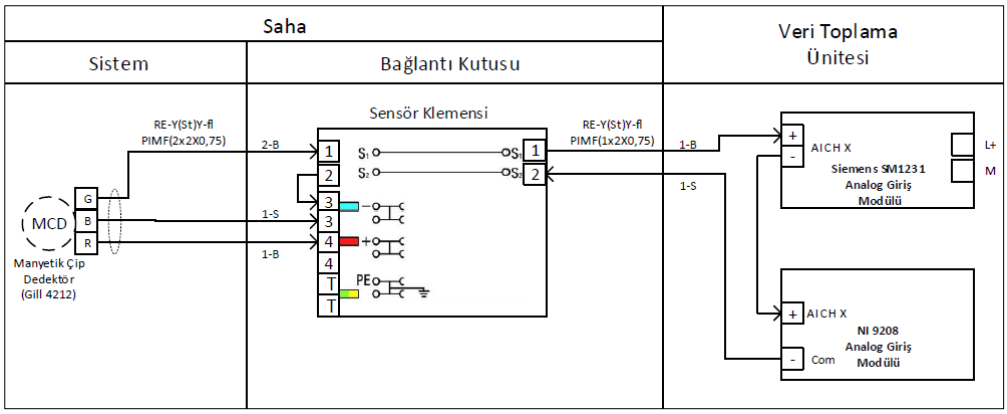
4.3.5. Filtre Sensörü ve Bağlantı Diyagramı

Manyetik Çip Dedektörleri, metalik aşınma parçacıklarını ve diğer yabancı cisimleri tespit etmek için tasarlanmıştır. Bu dedektörler genellikle havacılık, denizcilik ve endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Çip dedektörleri, yağlama sistemlerinde veya hidrolik sistemlerde metalik parçacıkların varlığını izleyerek erken aşınma ve arıza tespitine olanak sağlar. 4212-PK-048-D manyetik çip detektörü, özellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir cihazdır. Bu tür cihazlar, özellikle yağlama sistemlerinde ve makine bileşenlerinde, metal parçacıklarının tespiti için kullanılır. Tablo 12'da Manyetik Çip Dedektörünün özellikleri verilmektedir [60].

Tablo 12. Gill Marka 4212 Model Filtre Sensörü Özellikleri

Özellik	Açıklama
Manyetik Algılama	0-10V ve 4-20mA analog çıkışlar, PLC ve diğer otomasyon sistemleri arayüzleri
Yüksek Hassasiyet	Küçük boyutlı metal parçacıkları bile yüksek hassasiyetle tespit eder
Dayanıklılık	Zorlu endüstriyel koşullara dayanıklıdır.
Kolay Entegrasyon	Çeşitli kontrol sistemleri ve veri toplama cihazları ile kolayca entegre edilebilir
Aşınma Takibi	Makine bileşenlerinde oluşan aşınmanın takibini yaparak erken müdahale imkânı sağlar
Kritik Uyarılar	Tespit edilen metal parçacıklar, sistem operatörlerine uyarılar gönderir.
Veri Toplama ve Analiz	Toplanan veriler, uzun vadeli bakım stratejileri oluşturmak ve makine performansını izlemek için analiz edilebilir

Yağlama sisteminde kullanılan filtre sensörünün bağlantı diyagramı Şekil 14'de verilmiştir. Filtre sensörü Tablo 13'de belirtilen analog giriş kanallarına bağlanmıştır. Bu diyagramda sensör klemensinin +24 bağlantı pini sensörün 'Red' olarak adlandırılan pinine, '-' bağlantı pinini ise sensörün 'Black' olarak adlandırılan pinine bağlanmış olup sensörün temel enerjisini sağlamaktadır. Sensörün 'Green' olarak adlandırılan pininden ise akımın seri olarak devreyi tamamlanması göz önüne alınmış olup sensör klemensi üzerinden Siemens Sm1231 analog giriş modülünde ayrılan kanalın '+' pinine bağlanmıştır. Bu kanalın '-' pini ise yine seri bağlantı olması adına NI 9208 analog giriş modülünde uygun kanala girerek ardından bu modülün genel '-' pini Sensör klemensinde bulunan ortak '-' pinine bağlanmıştır. Bu doğrultuda beslemesi yapılan sensör ölçümünü yaptığı kirlilik değerini 4-20mA sinyal cinsinden seri bir şekilde önce PLC'nin daha sonra NI'ın analog giriş modüllerine girerek hem kontrolcüde üzerindeki hem de veri toplama ünitesi üzerindeki okunma işlemlerini tamamlamaktadır.



Şekil 14. Filtre Sensörü Bağlantı Diyagramı

Yağlama sisteminde ölçümü gerçekleştirilen filtre sensörünün NI ve PLC analog giriş modülleri üzerindeki modül ve kanal numarası Tablo 13'de verilmiştir.

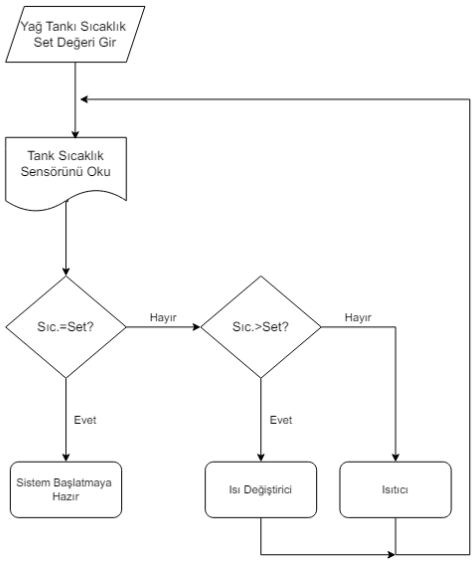
Tablo 13. Filtre Sensörü Analog Giriş Kanalı

Sensör Adı	NI 9208 Analog Giriş Modül ve Kanal Numarası	Siemens SM1231 Analog Giriş Modül ve Kanal Numarası
MCD	AI Modül 2 – CH11	AI Modül 3 – CH6

4.4. Yağ Tankı Sıcaklık Kontrolcüsü Tasarımı

Endüstriyel yağlama sistemlerinin tasarımında, yağ sıcaklığının belirli bir aralıkta tutulması, ekipmanın optimal performansı ve uzun ömürlü olması açısından hayati önem taşır. Özellikle yüksek hızlı rulmanların yağlanmasında, viskozite yağın akışkanlık direncini belirlemekte ve rulmanlar arasındaki sürtünmeyi en aza indirmektedir.

Yağlama sistemi içerisinde, yağ sıcaklığının kontrolünün etkili bir şekilde yapılabilmesi için birer adet ısıtıcı ve ısı değiştirici bulunmaktadır. Yağ sıcaklık kontrolüne ait temel kontrol blok diyagramı Şekil 15'de gösterilmektedir.



Şekil 15. Yağ Tankı Sıcaklık Kontrolü Akış Diyagramı

Kontrol Diyagramı İşleyiş adımları şu şekildedir:

1. Set Değerinin Girilmesi: Yağ tankı için istenen sıcaklık değeri girilmektedir. Set değeri, yağın optimal viskoziteye sahip olduğu sıcaklık aralığına göre belirlenmektedir.

2. Tank Sıcaklığın Ölçülmesi: Yağ tankının içerisindeki sıcaklık transmitter'i yağ sıcaklığını kontrol ünitesine ileterek sürekli bir geri bildirim sağlamaktadır.

3. Karar Verme:

Yağ Sıcaklığı Set Değerinin Altında: Yağ sıcaklığı set değerinin altına düşerse, kontrol sisteminin ısıtıcıyı devreye alması ile birlikte yağın sıcaklığı istenilen seviyeye kadar yükseltilmektedir. Isıtıcı, elektriksel rezistanslar kullanarak yağı ısıtmaktadır. Bu işlem, yağın viskozitesini düşürerek, yağlama verimliliğini artırmakta ve ekipmanın aşınmasını önlemektedir.

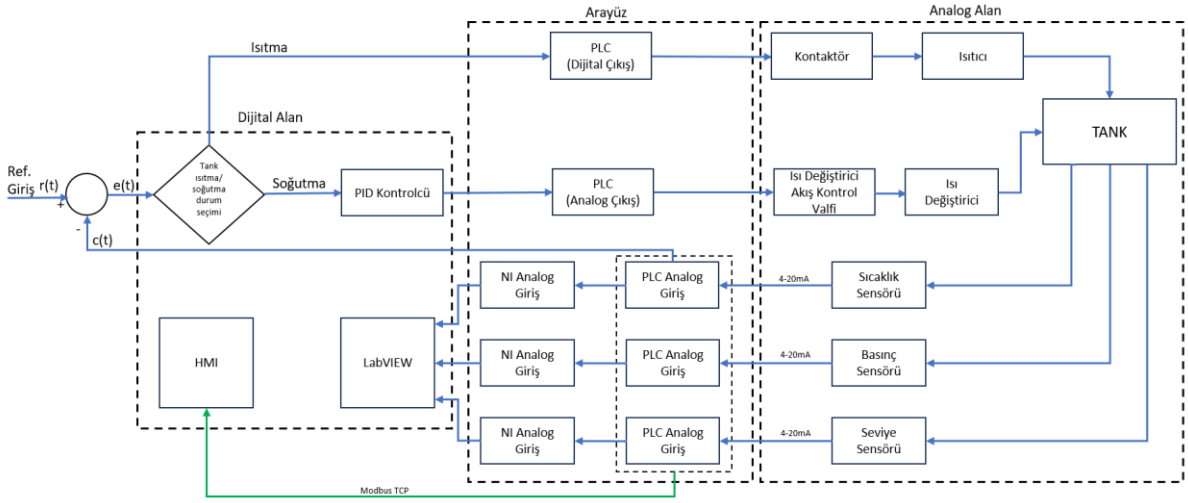
Yağ Sıcaklığı Set Değerinin Üstünde: Yağ sıcaklığı set değerini aşarsa, kontrol sisteminin ısı değiştiriciyi devreye almaktadır. Isı değiştirici, yağın fazla ısısını başka bir soğutma akışkanına aktararak yağın aşırı ısınmasını, yağın bozulmasını ve sistemin zarar görmesini engellemektedir.

4. Sistem Başlatmaya Hazır: Yağ sıcaklığı istenen değer aralığında ise, sistem başlatmaya hazır durumuna gelmektedir.

Yağlama sisteminin sahip olduğu çift yönlü ısıtma ve soğutma yaklaşımı, yağ sıcaklığının stabil ve belirlenen sınırlar içinde kalmasını sağlamaktadır, böylece yağlama sisteminin güvenilirliği ve verimliliği korunmaktadır. Bu sıcaklık kontrol mekanizmasının entegrasyonu, endüstriyel ekipmanın kesintisiz çalışması, arıza süresinin en aza indirilmesi ve makinelerin hizmet ömrünün uzatılması açısından kritik öneme sahiptir.

Yağ tankı sıcaklık kontrol sistemi, yağın sıcaklık, basınç ve seviyesini optimal aralıklarda tutarak ekipmanların verimli çalışmasını ve uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. Sistem, dijital kontrolcüler (PLC) ve LabVIEW tabanlı PID kontrolü ile yönetilmektedir. Yağın sıcaklığı, belirlenen referans değerin altına düştüğünde ısıtma elemanları devreye girmekte, üstüne çıktığında ise soğutma elemanları çalıştırılmaktadır. Sensörler aracılığıyla toplanan sıcaklık, basınç ve seviye verileri, NI ve PLC analog giriş modülleriyle sürekli izlenmektedir. HMI aracılığıyla kullanıcılar, sistemi izleyebilir ve gerekli ayarları yapabilirken, LabVIEW tabanlı veri kayıt sistemi, uzun dönemli analizler için verileri kayıt altına almaktadır. HMI ve veri kayıt sistemi arasındaki iletişim ise Modbus TCP protokolü üzerinden sağlanmaktadır. Kontrol sinyalleri, PLC çıkışları üzerinden ilgili ısıtma ve soğutma elemanlarına iletilmektedir.

Şekil 16'da bulunan diyagramda görüldüğü üzere çeşitli ekipmanların entegre edilmesi ile tasarlanmış olan bu kontrol sistemi yağ tankının sıcaklık kontrolünü sağlayarak işletim güvenliği ve verimliliği artırmakla birlikte, kullanıcıların sistemi etkin bir şekilde yönetmesine imkan tanımaktadır.



Şekil 16. Yağ Tankı Sıcaklık Kontrolü Blok Diyagramı

4.4.1. LabVIEW Ortamında Tank Yağı Isınma/Soğuma Davranışı Benzetimi

Yağ sıcaklık kontrol algoritmasının gerçek zamanlı çalışmasını test etmek için LabVIEW grafiksel geliştirme platformunda basit bir sistem benzetimi oluşturulmuştur. Bu benzetim, ısıtıcı, ısı değiştirici, sirkülasyon pompası, vakum pompası, dikey yağ tankı, ana yağ tankı, rulmanlar, valfler ve sensörleri (sıcaklık, basınç, seviye) içermektedir. Sistem benzetiminde temel termodinamik kanunları baz alınmıştır. Hesaplamalarda ısıtıcı, ısı değiştirici ve rulmanlardan gelen ısı hareketleri haricindeki bozucu etkiler ihmal edilmiştir.

Yağ tankı sıcaklık kontrolü on/off çalışmaktadır. Eğer tank içi yağ sıcaklığı arayüz üzerinden girilen sıcaklık değerinden (set değeri) daha düşük ise ısıtıcı devreye girerek sisteme 5kW'lık bir sabit ısı aktarmaktadır. Isıtıcı modelinin matematiksel hesabında Denklem 4.1'deki ısı sığası formülünden yararlanılmıştır[61].

$$Q = m.c.\Delta T \tag{4.1}$$

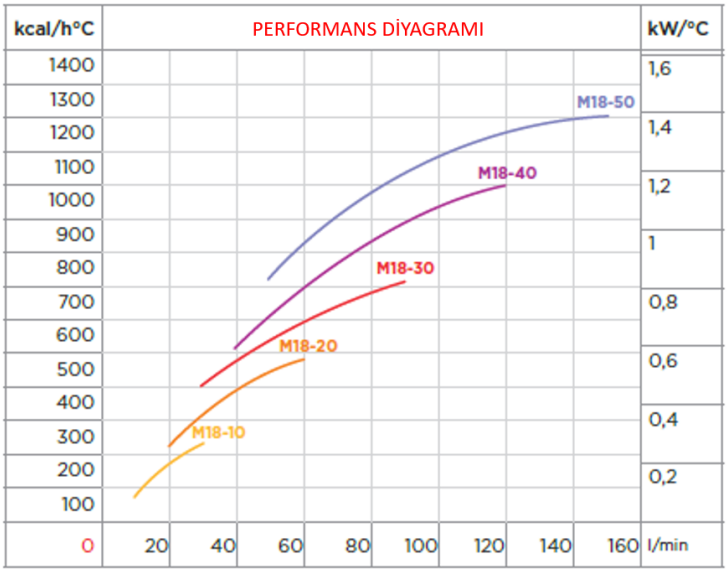
Denklem 4.1 ile yağ sıcaklığının saniyede kaç derece arttığı hesaplanmaktadır.

Tank içi yağ sıcaklığı set edilen değerin üstünde ise PID kontrol ile ısı değiştirici (Heat Exchanger, Hex) devreye girer ve içerisinden geçen soğutma suyu miktarını ayarlayarak soğutulan yağı ana tanka gönderir. Bu sayede tank içi yağ sıcaklığının set edilen değerde sabit kalması sağlanmaktadır.

Sistemde kullanılan ısı değiştiricinin matematiksel modeli için Sesino marka M18-40 model ısı değiştiricinin Şekil 17'de gösterilen performans grafiği verilerinden yararlanılmıştır. Eğri uydurma metodu ile ikinci dereceden bir polinom elde edilmiştir (R^2=0,9992). Elde edilen polinom Denklem 4.2' de gösterilmektedir [62].

$$y = -0{,}0631x^2 + 17{,}001x + 10{,}839 \quad (4.2)$$

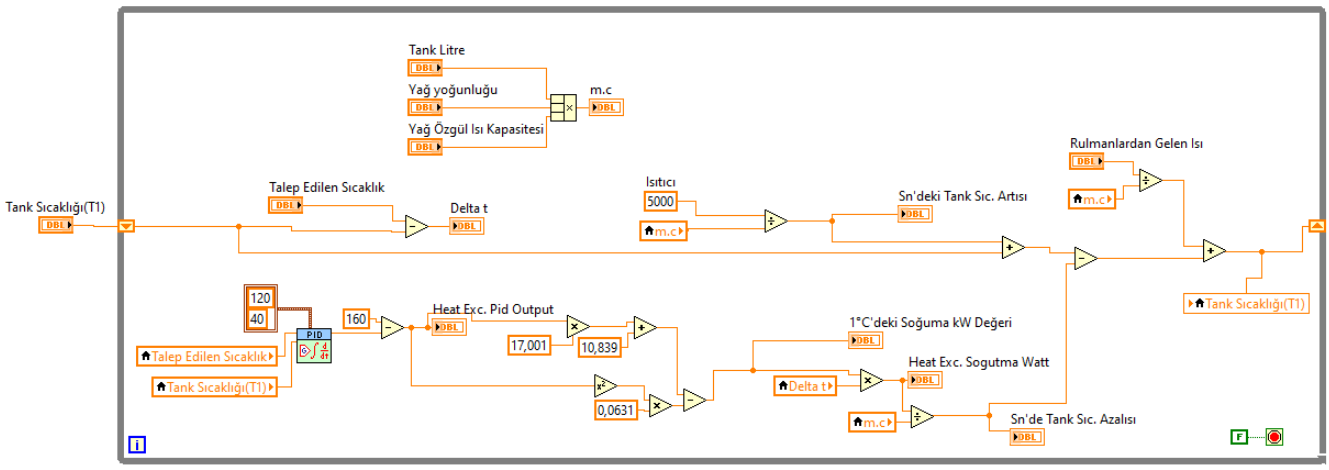
Burada x, soğutma suyu debisini (L/dk) ve y ise 1°C'lik sıcaklık farkına karşılık gelen soğutma kapasitesini (W/°C) ifade etmektedir.



Şekil 17. Sesino M18-40 Isı Değiştirici Performans Diyagramı [62]

PID algoritması yağı soğutmak için debiyi 40L/dk ile 120L/dk arasında ayarlamaktadır. Sıcaklık farkına (ΔT) göre ayarlanan debi Denklem 4.2'ye göre hesaplanmaktadır. Daha sonra bu hesaplanan miktar ΔT ile çarpılarak toplam soğutma kapasitesi (Watt) hesaplanmış olur. Denklem 4.1 ile de yağın saniyede kaç derece soğutulduğu hesaplanır. Rulmanların çalışma esnasında oluşturduğu ısı da, Denklem 4.1'den elde edilen ısı kapasitesine dolaylı olarak ta yağ tank sıcaklığına eklenerek artışına sebep olur.

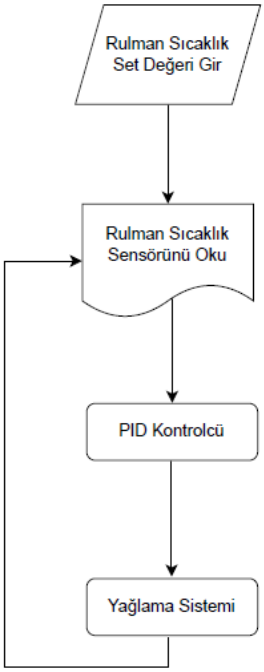
Oluşturulan benzetime ait LabVIEW blok diyagramı Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18. Tank Yağı Isınma/Soğuma Davranışının LabVIEW Blok Diyagramında Sistem Benzetimi

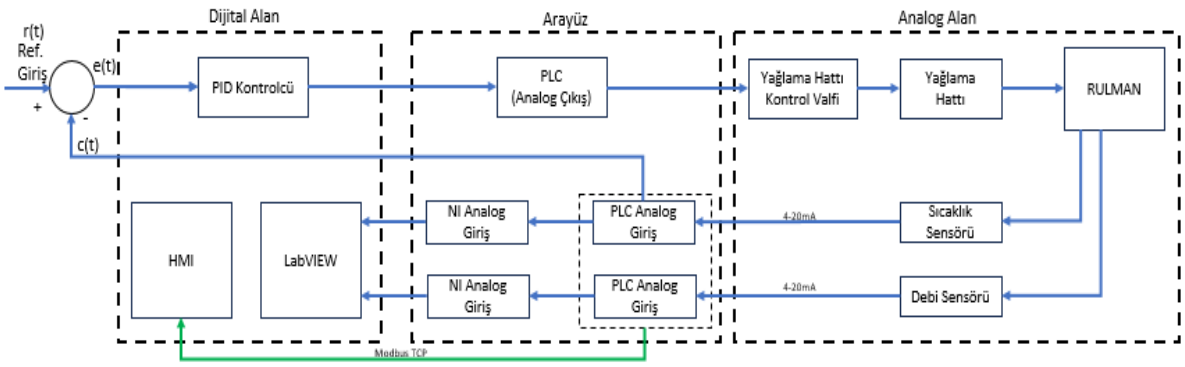
4.5. Rulman Sıcaklık Kontrolcüsü Tasarımı

Şekil 19, rulman sıcaklık kontrol sisteminin akış diyagramını göstermektedir. Bu diyagram, rulman sıcaklığının belirlenen set değerinde nasıl sabit tutmaya çalıştığını ve PID kontrolcüsünün bu sürece nasıl dahil olduğunu açıklamaktadır. Öncelikle kullanıcı, hedeflenen rulman sıcaklık set değerini arayüz üzerinden girer. Sistem, rulman sıcaklık sensöründen anlık sıcaklık değerini okur ve bu değeri set değeri ile karşılaştırır. Okunan sıcaklık değeri set değerinden büyükse, PID kontrolcüsü devreye girer ve akan yağın debisini arttırır. Böylece sistem soğutma işlemlerini devreye sokarak sıcaklığı düşürmeye çalışır. Eğer okunan sıcaklık değeri set değerinden küçükse, PID kontrolcüsü çıkış sinyalini düşürür ve sistem ısıtma işlemlerini devreye sokarak sıcaklığı artırmaya çalışır. PID kontrolcü tarafından yapılan ayarlamalar sonucunda sıcaklık değeri set değerine ulaştığında, süreç tamamlanır ve sistem durur. Bu kontrol mekanizması sayesinde, rulman sıcaklığı sürekli olarak istenen aralıkta tutulur ve sistemin optimal performansı sağlanır.



Şekil 19. Rulman Sıcaklık Kontrolü Akış Şeması

Yağlama Sistemi, rulman yağ sıcaklığı ve besleme yağı debisi gibi kritik parametrelerini belirli aralıklarda tutarak optimal çalışma koşullarını sağlamakla görevlidir. Dijital kontrolcüler (PLC ve LabVIEW tabanlı) tarafından yönetilen PID kontrolü ise sistemin anlık durumuna göre uygun kontrol işlemlerini gerçekleştirmektedir. Sensörlerden alınan veriler, NI ve PLC analog giriş modülleri aracılığıyla sürekli olarak izlenmekte ve gerektiğinde müdahale edilmektedir. Yağlama sistemi kontrol panosunda bulunan HMI ise kullanıcıya sistemin durumunu izleme ve gerekli ayarları yapma imkânı sağlamaktadır. LabVIEW tabanlı veri kayıt sistemi ise uzun dönemli analizler için verilerin saklanmasını sağlar. PLC analog giriş ve çıkış modülleriyle sensörlerden gelen veriler işlenir ve kontrol sinyalleri yönetilir. NI analog giriş modülleri, sensörlerden gelen verileri toplar ve sürekli izler. Analog domain bölümünde ise yağlama hattı kontrol valfi, sıcaklık ve debi transmitterleri bulunmaktadır. Yağlama hattı kontrol valfi, rulmanın optimal sıcaklıkta çalışmasını sağlamak için yağ akışını düzenlemektedir. Sıcaklık ve debi transmitterleri, sistemin performansını sürekli izler ve elde edilen verileri dijital domain ile arayüz aracılığıyla paylaşır. Bu entegre sistem, rulmanın sıcaklığını ve debisini etkin bir şekilde kontrol ederek, rulmanın uzun ömürlü ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar. Hem PLC hem de NI tabanlı bileşenlerin kullanımı, sistemin esnekliğini ve performansını artırarak kullanıcıya güvenilir ve hassas bir kontrol imkânı sunmaktadır. Şekil 20'de ayrıntılı diyagram yer almaktadır.



Şekil 20. Rulman Sıcaklık Kontrolü Blok Diyagramı

4.5.1. LabVIEW Ortamında Rulmanların Isınma/Soğuma Davranışı Benzetimi

Rulmanların çalışması oldukça kaotik olduğu için çalışırken oluşturduğu ısı kaybının matematiksel modellenmesi oldukça zordur. Bu tarz karmaşık sistemlerde hesaplama zorluklarını yönetmek için deneysel verilere dayalı vekil modeller yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, ayrıntılı modellemeye ihtiyaç duymadan karmaşık simülasyonların yerini alabilir, böylece mühendislik problemlerinin verimli bir şekilde optimize edilmesini ve analiz edilmesini sağlar [63].

Sistemde rulmanların oluşturduğu ısının benzetiminde NSK firmasının paylaşmış olduğu 'Technical Report' içerisinde bulunan ampirik formüller kullanılmıştır [64].

Rulmanların çalışma esnasında oluşturduğu tork M, eksenel yüke bağlı tork M_l ve hıza bağlı tork M_v'nin toplamıdır ve Denklem 4.3'de ifade edilmiştir.

$$M = M_l + M_v \tag{4.3}$$

Eksenel yüke bağlı tork M_l, hız veya sıvı sürtünmesi ile ilişkisi olmayan sürtünme terimidir ve deneylere dayalı olarak Denklem 4.4 ile ifade edilir.

$$M_l = 0{,}672.10^{-3}.{D_{pw}}^{0{,}7}.{F_a}^{1{,}2} \tag{4.4}$$

Hıza bağlı tork M_v, açısal hıza bağlı olan sıvı sürtünmesi terimidir ve Denklem 4.5 ile ifade edilir.

$$M_v = 3{,}47.10^{-10}.{D_{pw}}^{3}.{n_i}^{1{,}4}.{Z_b}^{a}.Q^{b} \tag{4.5}$$

Yağ viskozitesi ve akış hızı faktörlerini etkileyen a ve b, yalnızca açısal hıza bağlıdır ve sırasıyla Denklem 4.6 ve 4.7 ile tanımlanır.

$$a = 24.{n_i}^{-0,37} \quad (4.6)$$

$$b = 4.10^{-9}.{n_i}^{1,6} + 0,03 \quad (4.7)$$

Açısal hız (ω) Denklem 4.8 ile hesaplanır.

$$\omega = n_i.2.\pi/60 \quad (4.8)$$

Son olarak elde edilen verilerden rulmanın ürettiği ısı gücü, Denklem 4.9 ile hesaplanır

$$W = 1.M.\frac{\omega}{1000} \quad (4.9)$$

Burada

M, Tork

M_l, Eksenel yüke bağlı tork

M_v, Hıza bağlı tork

D_{pw} , Rulman yuvarlanma dairesi

F_a , Rulman eksenel yük

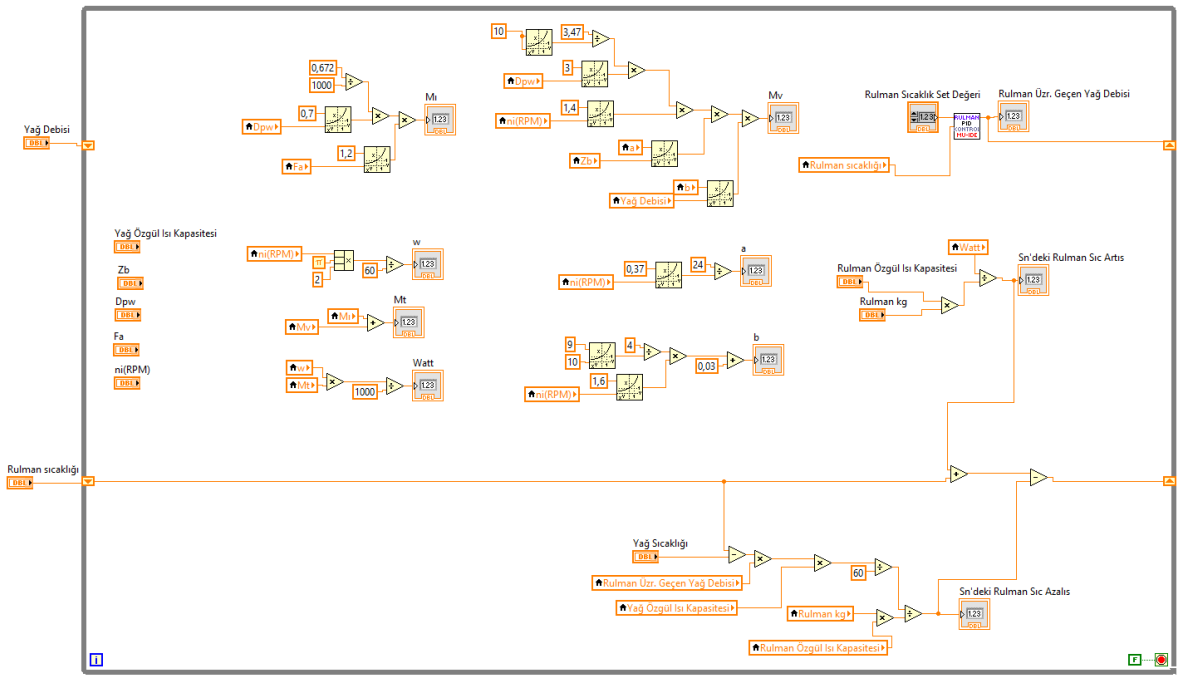
n_i , Şaft devir hızı

Z_b ,Yağın mutlak viskozitesi

Q , Yağın akış debisi

ω ,Açısal hız ifade etmektedir.

Oluşturulan benzetime ve PID kontrolcüye ait LabVIEW blok diyagramı Şekil 21'de gösterilmiştir.



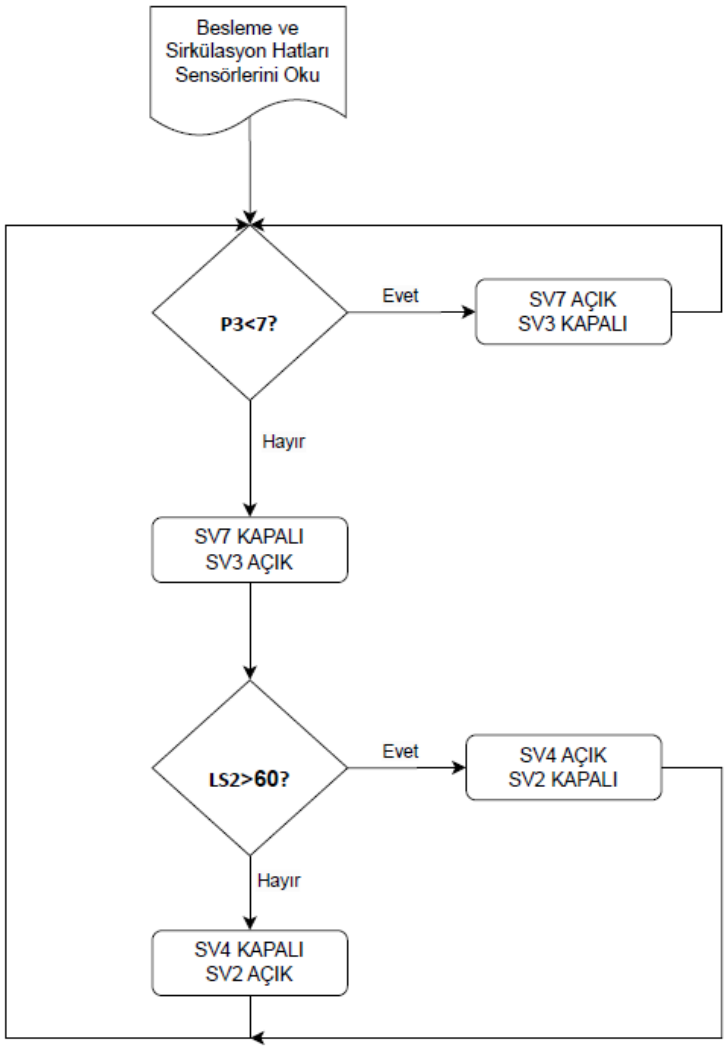
Şekil 21. Rulman Isınma/Soğuma Davranışının ve Sıcaklık Kontrolcüsünün LabVIEW Blok Diyagramında Sistem Benzetimi

Oluşturduğu ısı miktarı hesaplanarak benzetimi yapılan rulmanın, PID kontrolcünün çıkışında elde edilen işaret ile üzerinden geçirilecek yağ debisi ayarlanarak soğutma işlemi gerçekleştirilmektedir. Daha öncede ifade edildiği gibi rulman sıcaklığı ile rulman besleme yağı sıcaklığı arasındaki farktan Denklem 4.1 ile soğutma gücü hesaplanmaktadır. Hesaplamalarda rulmanların oluşturduğu ısı haricindeki bozucu etkiler ihmal edilmiştir.

4.6. Sirkülasyon Pompası Görev Değişimi

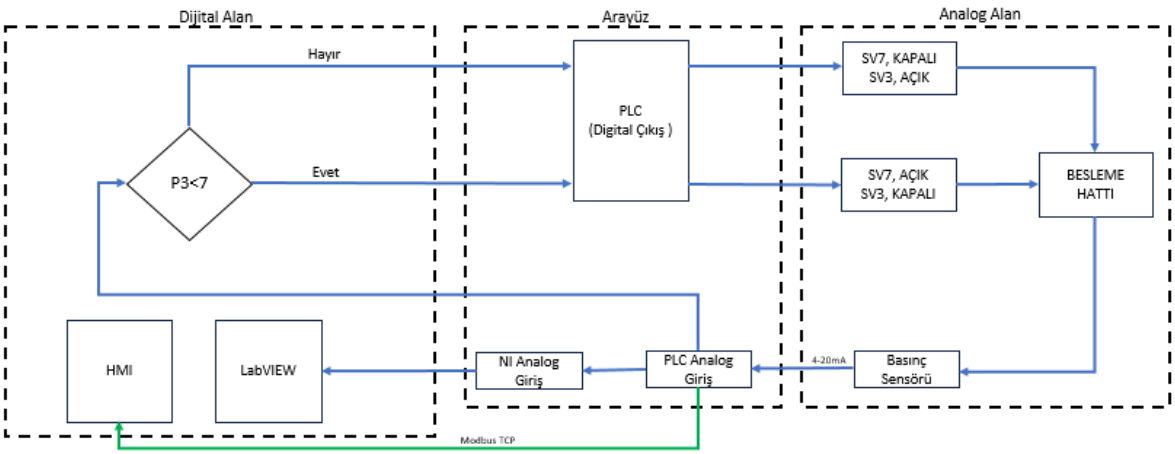
Şekil 22, sirkülasyon pompasının görev değişiminin nasıl yapıldığını gösteren akış diyagramını içermektedir. Bu diyagram, sistemdeki basınç ve seviye sensörlerinden gelen verilere göre pompa ve valflerin nasıl kontrol edildiğini ayrıntılı bir şekilde açıklamaktadır. Sistem, basınç ve seviye değerlerine bağlı olarak pompa ve valflerin durumunu dinamik olarak ayarlayarak, sıvı akışını ve basıncını optimal seviyelerde tutar. Örneğin, yağlama sistemi ana pompasının filtrelerinin tıkanması durumunda besleme hattı yeterli basınca ulaşamayacaktır ve bu basınç değeri 7 barın altına düştüğünde (P3<7 Bar) SV7 valfi açık pozisyonuna geçerken SV3 valfi ise kapalı pozisyonuna geçerek sirkülasyon pompası sistemin istenen basınçta çalışmasını sağlayacaktır. İkincil bir örnekte ise dikey yağ tankında oluşabilecek tehlikeli bir yağ birikimi (LS2>60) seviyesinde SV4 valfi açık pozisyonuna geçerken SV2 valfide kapalı pozisyonuna

geçerek sirkülasyon pompasının emiş hattını ana tank değilde dikey yağ tankı olarak ayarlayıp dikey yağ tankının boşaltılmasını sağlayacaktır. Sirkülasyon pompasının istenmeyen durumlara göre kullanım şeklinin değiştirilebilmesi sayesinde endüstriyel uygulamalarda verimlilik ve güvenilirlik artırılır.



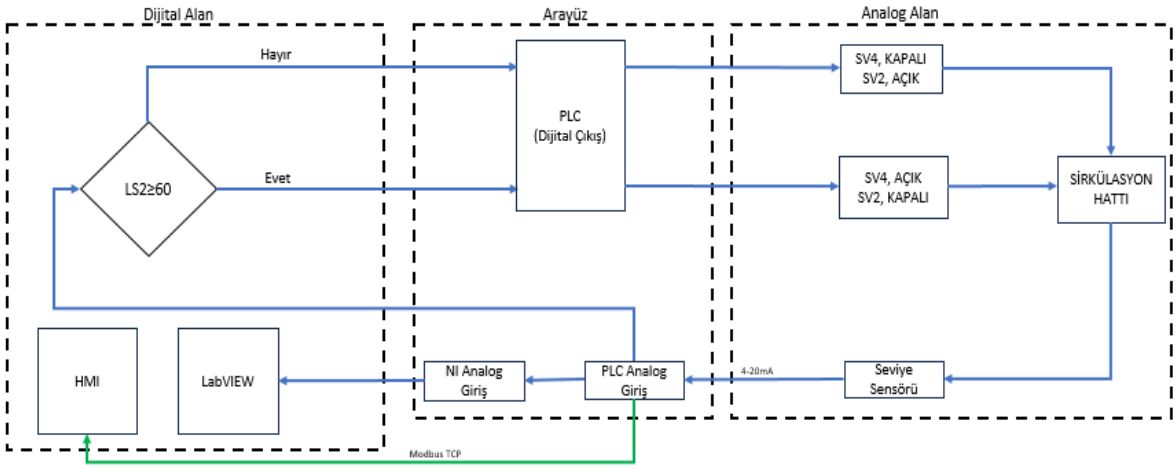
Şekil 22. Sirkülasyon Pompası Görev Değişimi Akış Şeması

Şekil 23, sirkülasyon pompasının besleme hattındaki görev değişimini anlatan blok diyagramlardır. Her iki diyagram da sistemin dijital ve analog bileşenlerinin birlikte nasıl çalıştığını gösterir ve görev değişiminin nasıl gerçekleştiğini açıklar. Bu kontrol mekanizması, besleme hattındaki basıncı istenen seviyede tutarak, sirkülasyon pompasının ve valflerin doğru bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu durum, endüstriyel sistemlerde verimliliği ve güvenilirliği artırır.



Şekil 23. Sirkülasyon Pompası Besleme Hattı Görev Değişimi Blok Diyagramı

Şekil 24, sirkülasyon pompasının sirkülasyon hattındaki görev değişimini anlatan blok diyagramlardır. Her iki diyagram da sistemin dijital ve analog bileşenlerinin birlikte nasıl çalıştığını gösterir ve görev değişiminin nasıl gerçekleştiğini açıklar. Bu kontrol mekanizması, sirkülasyon hattındaki sıvı seviyesini istenen seviyede tutarak, sirkülasyon pompasının ve valflerin doğru bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu durum, endüstriyel sistemlerde verimliliği ve güvenilirliği artırır.



Şekil 24. Sirkülasyon Pompası Sirkülasyon Hattı Görev Değişimi Blok Diyagramı

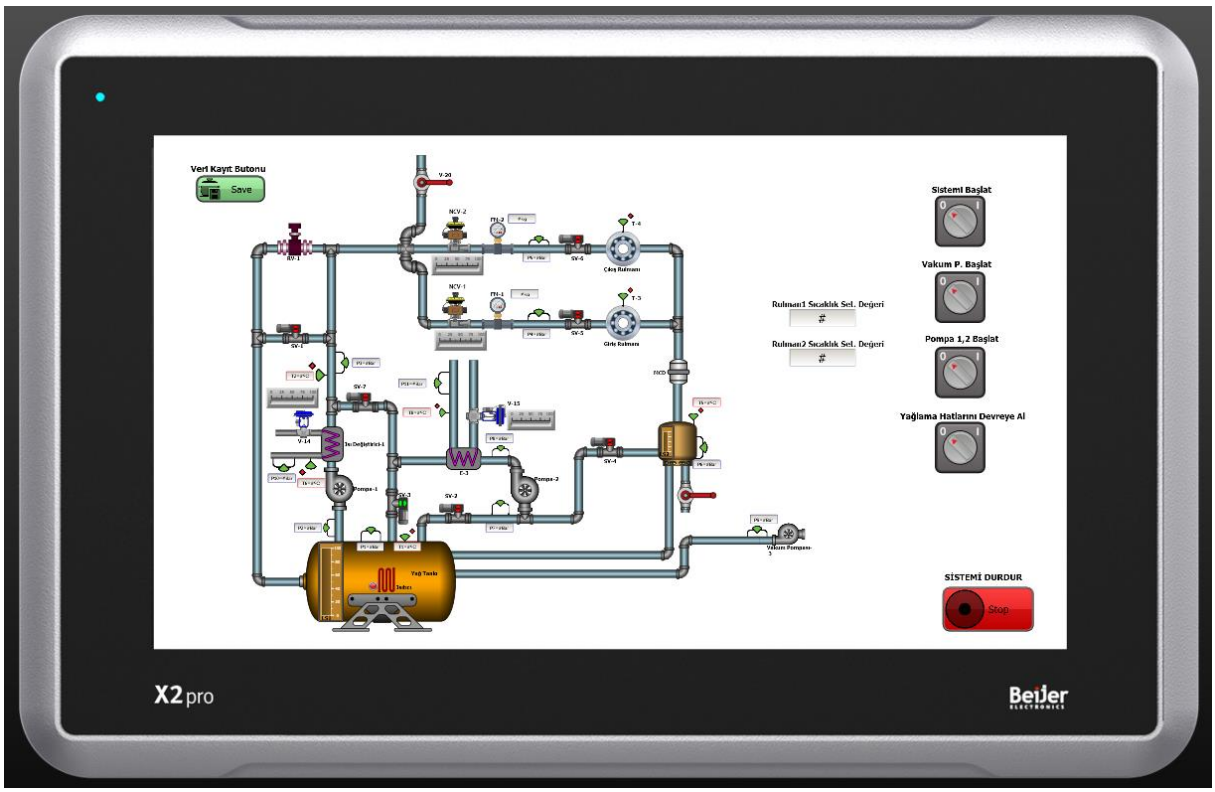
4.7. Kullanıcı Arayüzü Tasarımı

Kullanıcı arayüzü, operatörlerin sistemi kolayca yönetmelerini ve optimum performans elde etmelerini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. HMI paneli, operatörlere yerel erişim imkanı sunarken, uzaktan erişim ve gelişmiş analizler LabVIEW yazılımı aracılığıyla

gerçekleştirilebilir. Sistemin kullanıcı dostu arayüzü, operatörlerin eğitim süresini kısaltır ve sistemin güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar.

4.7.1. Yağlama Sistemi Lokal Arayüzü

Yağlama Sistemi lokal kontrolü için sistem kontrol paneli üzerine 21” lik bir adet Beijer marka X2 pro modeli HMI yerleştirilmiştir ve bu panelin programlama ve tasarım işlemleri Beijer iX yazılımı ile geliştirilmiştir [65]. Şekil 25 ‘de gösterilmekte olan arayüz sistemin lokal kullanımda operatöre kolay kullanım ve takip edilebilir bir test süreci sunmaktadır.

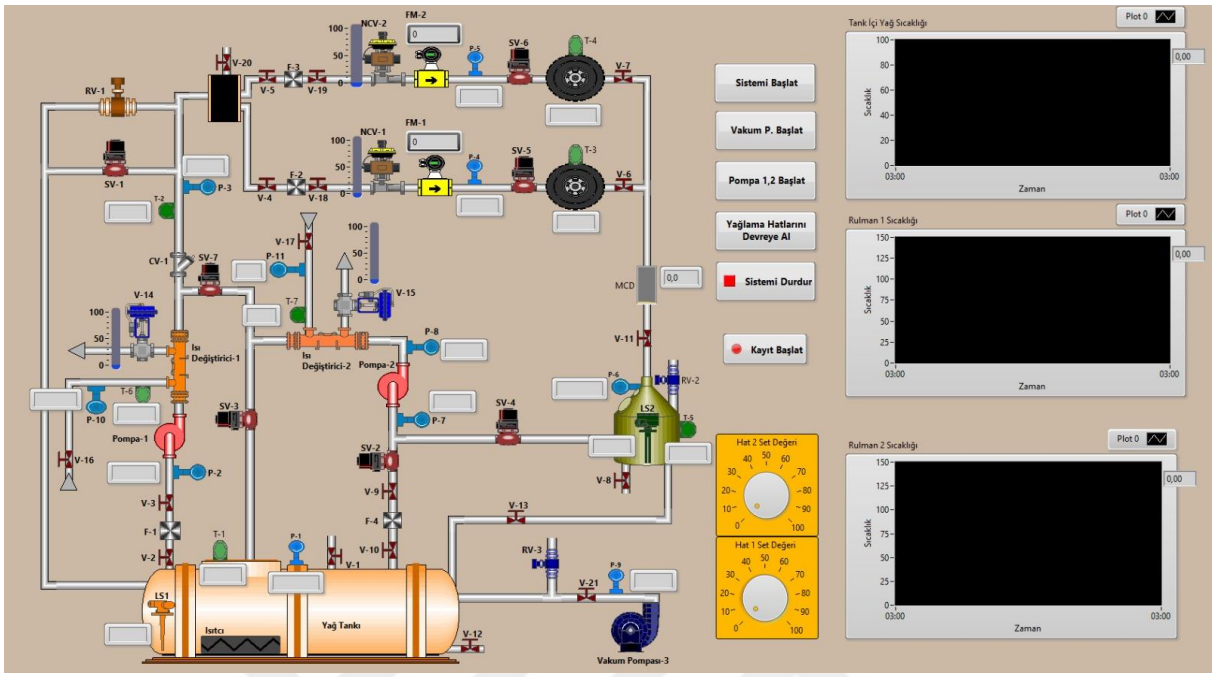


Şekil 25. Lokal Kontrol Paneli

4.7.2. Yağlama Sistemi Uzaktan Erişim (Remote) Arayüzü

Yağlama sistemi uzaktan kontrolü, Şekil 26’da gösterilmekte olan ve veri kayıt işlemlerini yürüten LabVIEW arayüzü üzerinden uygulanmaktadır. Bu arayüz gelişmiş analiz ve dizayn kabiliyetleri sayesinde kullanıcıya çeşitli grafikler ve çıktılar üretebilmektedir. Geliştirilen uzaktan erişim arayüzü üzerinden Modbus TCP/IP protokolü ile PLC’ye komut

gönderilmektedir. Ethernet haberleşmesi üzerinden de veri toplama ünitesinden gelen sensör değerleri ekrana yansıtılmaktadır.



Şekil 26. Uzaktan Erişim ve İzleme Paneli

Mevcut sistemin viskozite veya yoğunluk değeri farklı yağlar ve çalışma koşulları farklı rulmanlar kullanıldığında da çalıştırılabilmesi için Şekil 27'de görüldüğü gibi ilgili değerlerin girilebileceği bir arayüz tasarlanmıştır. Böylelikle sistem daha esnek bir hale getirilmiştir.



Şekil 27. Yağ ve Rulman Parametreleri Giriş Ekranı

4.8. Yağlama Sistemi Devreye Alma İşlemleri

Geliştirilen endüstriyel yağlama sisteminin devreye alma işlemleri, sistemin sorunsuz ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için belirli adımlar içerir. Bu adımlar, sistemin başlatılma prosedüründen durdurulma prosedürüne kadar olan süreci kapsar.

Yağlama Sistemi T(0) Anı Standart Durumu

Yağlama sisteminin başlangıçtaki (T0) durumu aşağıdaki gibidir;

- Pompalar kapalı durumda,
- Bütün valfler kapalı durumda veya enerjisiz durumda,
- RV-1, RV-2, RV-3 basınç emniyet valfleri set edilmiş durumda,
- V-14 ve V-15 su çıkış kontrol valfleri için yağ sıcaklığı set edilmiş durumda,
- Tanktaki yağ sıcaklığı set edilmiş durumdadır.

Yağlama Sistemi Başlatma Prosedürü

- Yağ tank seviyesini kontrol edilir
- Vakum pompasını çalıştır
- Dikey yağ tankındaki ve vakum pompasının girişindeki vakum basıncını kontrol et.
- SV-1 valfini aç
- Pompa-1 çalıştır
- SV-1 valfini kapat, bu noktada RV-1 valfi hat basıncını set edilen değere ayarlar.
- Pompa-2 çalıştır.
- SV-5, SV-6 valflerini aç.
- NCV-1, NCV-2 kontrol vanalarının PID kontrolörleri ve önceden tanımlanmış set değerleri vardır ve bu doğrultuda yağ akışı gerçekleşir.

Yağlama Sistemi Durdurma Prosedürü

Testler sona erdiğinde yağlama sistemi aşağıdaki prosedürlere uygun olarak durdurulacaktır.

- NCV-1, NCV-2 valflerini kapat.
- SV-5, SV-6 valflerini kapat.
- Pompa-1 ve Pompa-2'yi kapat.
- SV-1 valfini aç
- Yağın rulmanlardan ve hatlardan tamamen emilene edilene kadar bekle, sonrasında vakum pompasını kapat.

- Ana güç şalterini kapat.

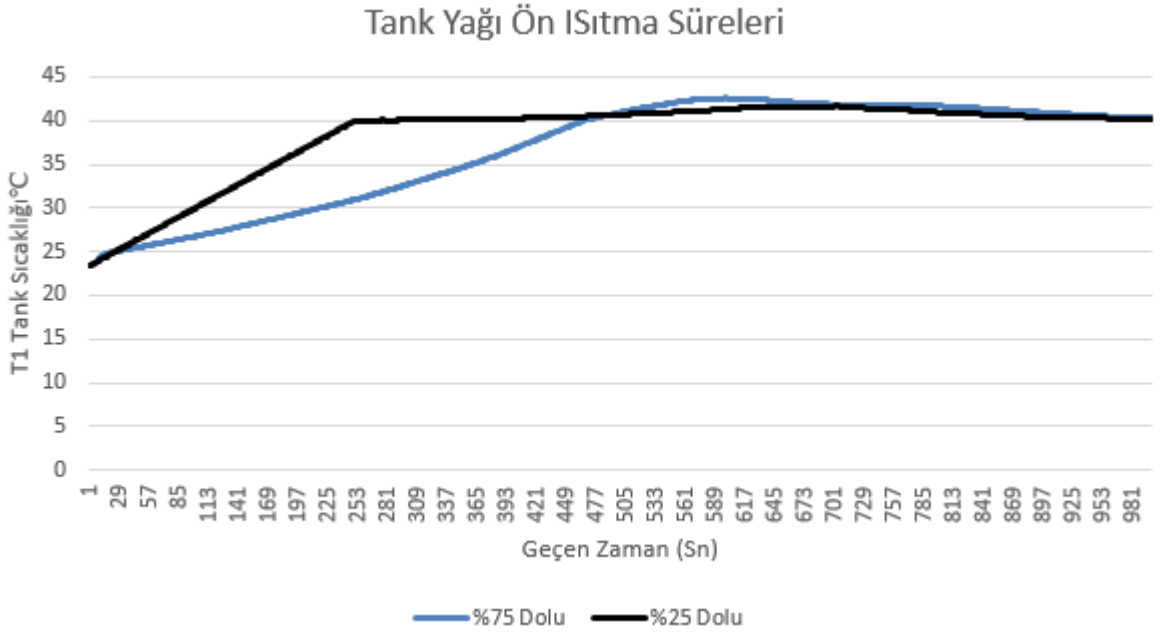
5. DENEYLER ve TEST SONUÇLARI

Bu bölümde yağlama sistemi ile ilgili yapılmış testler ve bu testler sonucunda ne gibi çıkarımlara varıldığı anlatılmaktadır.

5.1. Farklı Yağ Seviyelerinde Ön Isıtma Süresinin Değişimi

Yağlama sistemlerinde kullanılmakta olan yağlar, belirli isterlere göre seçilmektedir. Kullanılacak sisteme göre bir yağ seçiminin ardından, bu yağın sistem başlangıcında uygun viskozite değerlerinde kalabilmesi için belirli bir sıcaklığa ulaşması gerekmektedir. Viskozite, yağın akışkanlık özelliğini belirleyen en önemli parametrelerden biridir ve sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, yağın uygun viskozite seviyelerinde kalabilmesi için belirli bir sıcaklığa ulaşması ve bu sıcaklıkta tutulması kritik öneme sahiptir.

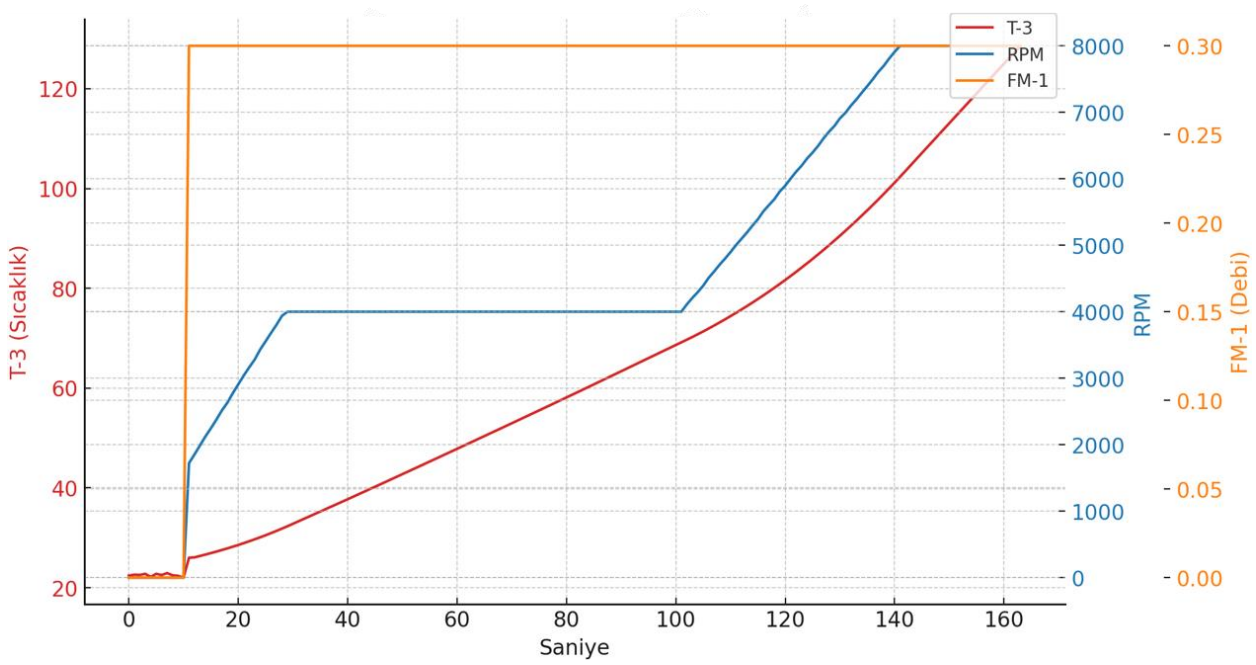
Bu tezde tasarlanan sistemde, yağın ön ısıtma süresi, kullanılan yağın seviyesi ve ısıtıcı gücü ile doğrudan ilişkilidir. Sistemde kullanılan 5 kW'lık bir ısıtıcı, yağın 40°C seviyesine gelmesini hızlı ve etkin bir şekilde sağlar. Fakat, tanktaki yağ seviyesi değiştikçe ısıtma süresi de doğru orantılı olarak değişir. Sonuç olarak Şekil 28 ‘de görüldüğü gibi düşük yağ seviyelerinde ısıtma süresi daha kısa olurken, yüksek yağ seviyelerinde bu süre uzamaktadır.



Şekil 28. Tank Yağının 40°C Ulaşması için Ön Isıtma Süreleri

5.2. Rulman Sıcaklığının Kontrolsüz Değişimi

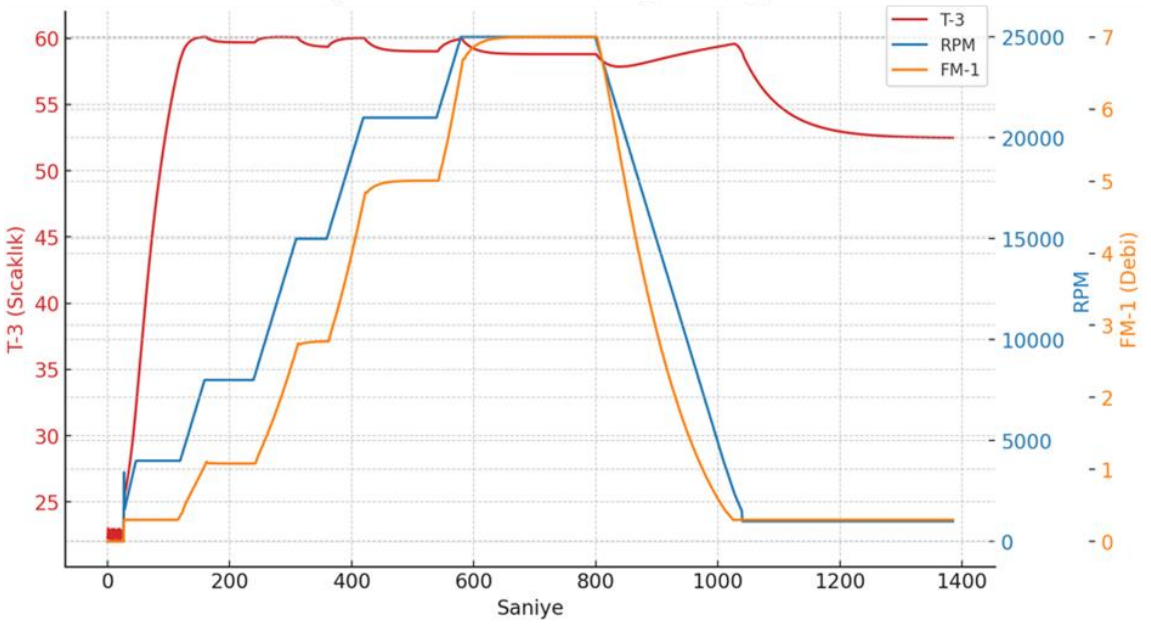
Kontrolsüz yağlama durumunda yağ debisi anlık parametre değişimlerine göre ayarlanmayıp; asgari koşulları sağlayabilecek sabit bir debi ile gerçekleşmektedir. Şekil 29'da verilen grafikte istenen rulman sıcaklığı arayüz üzerinden 60°C olarak girildiğinde sabit yağ debisi altında rulman yağlanmakta olup, Test kondisyonu olan 25000 RPM'e çıkamadan aşırı ısınma gerçekleşmiştir. Bu grafikte T-3, rulman sıcaklık değeri(°C), RPM, rulman dönüş hızı, FM – 1 ise rulmandan geçen yağ miktarını (kg/dak) ifade etmektedir.



Şekil 29. Rulman Sıcaklığının Kontrolsüz Değişimi

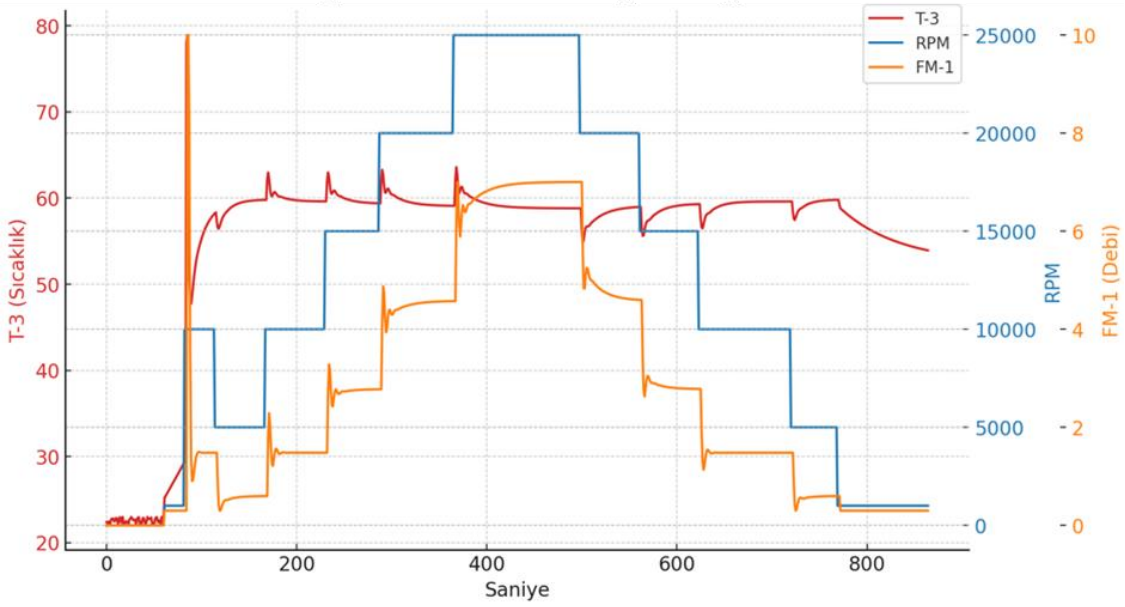
5.3. Rulman Hızına Göre Rulman Sıcaklığı ve Yağ Debisinin Kontrollü Değişimi

Rulman sıcaklığının, rulman hızının artışına bağlı olarak nasıl değiştiği ve soğutma yağının debisinin bu değişimlere nasıl tepki verdiğini incelemek üzere yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar Şekil 30'da gösterilmiştir. Yapılan deneyler sırasında rulman sıcaklığı T-3≤60°C olacak şekilde set edilmiştir. Rulman, 1000 RPM'den başlayarak 25000 RPM'e kadar yavaş hızlandılarak döndürülmüştür. Bu sırada FM-1'den alınan debi ölçümleride kaydedilmiştir. 800. Saniyede ise rulman hızı 1000 girilerek sistem neredeyse durdurulmuştur. Rulman hızına bağlı olarak soğutma yağı debisinin değişimi ile rulman sıcaklığının dengede tutulduğu görülmektedir. Test bitişinde gözlemlenen düşüş rulmanın durmasına yakın olduğu halde yağlama sisteminin kapanışına işaret etmektedir.



Şekil 30. Belirli Bir Eğime Göre Rulman Hızlanmasında Rulman Sıcaklığı ve Yağ Debisinin Değişimi

Bu deneyde ise rulman, 1000 RPM'den başlayarak 25000 RPM'e kadar ani hızlandılarak veya yavaşlatılarak döndürülmüştür. Bu koşullar altında bile sistemin etkili bir şekilde kontrol edilebildiği Şekil 31'de gösterilmektedir. Şekil 30 ve Şekil 31'deki grafiklerde T-3, rulman sıcaklık değeri(°C); RPM, rulman dönüş hızı; FM – 1 ise rulmandan geçen yağ miktarını (kg/dak) ifade etmektedir.



Şekil 31. Basamak Şeklinde Uygulanan Rulman Hızının Ani Değişimlerine Göre Rulman Sıcaklığı ve Yağ Debisinin Değişimi

6. SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, yüksek güçlü döner ekipmanlar için geliştirilen basınçlı yağlama sisteminin test ve analizine yönelik bir arayüz tasarlanmıştır. Siemens S7-1200 serisi PLC ve NI cDAQ ürünleri ile sağlanan gerçek zamanlı kontrol ve yüksek çözünürlükte veri kaydı, sistemin sürekli izlenmesine ve performansının optimize edilmesine olanak tanımıştır. Tasarlanılan yağlama sisteminde Sesino M18-40 Heat Exchanger bulunmaktadır ve sistemin soğutma kapasitesi yağ tankı sıcaklığı ile soğutma suyu sıcaklığı arasındaki 1°C'lik fark ($\Delta T=1°C$) için 0.6 kW ile 1.17kW arasında değişmektedir. Testini yaptığımız sistem benzetiminde soğutma suyu ile yağ tankı sıcaklığı farkı 15°C baz alındığı için bu sistemin soğutma kapasitesi 18kW'a kadar çıkmaktadır. Diğer taraftan geliştirilen esnek arayüz, farklı yağlar ve farklı parametrelere sahip döner ekipmanların yağlanmasına yönelik test ve ölçüm uygulamalarına da müsaade etmektedir. Böylelikle geliştirilen test otomasyon ve arayüzü, soğutma kapasitesini aşmayacak şekilde çeşitli döner ekipmanlı sistemleri yağlayabilmek ve soğutabilmek için kullanışlıdır.

Elde edilen sonuçlar, sistemin ekipman arızalanma riskini önemli ölçüde azalttığını, rulman ömrünü uzattığını ve enerji verimliliğini artırdığını göstermektedir. Temiz ve sürekli yağ beslemesi sayesinde ekipmanların aşınması ve yıpranması minimize edilerek bakım maliyetleri düşürülmüş ve operasyonel süreklilik sağlanmıştır. Kritik parametrelerin sürekli olarak izlenmesi ve kaydedilmesi sayesinde arızaların önceden tespit edilmesine olanak tanıyan basınçlı yağlama sistemi, ekipman güvenilirliğini artırmakta ve operasyonel sürekliliği sağlamaktadır. Literatürde de belirtildiği gibi, uygun yağlama sistemleri ekipman arızalarının önlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Rulman ömrünü uzatarak bakım maliyetlerini düşüren sistem, enerji verimliliğini optimize ederek işletme maliyetlerini azaltmış ve çevresel etkiyi minimize etmiştir. Gerçek zamanlı kontrol ve yüksek çözünürlükte veri kaydı ile sistem performansının detaylı analiz edilmesi, uzun vadeli performans iyileştirmelerine olanak tanımıştır. Bu çalışma, endüstriyel yağlama sistemleri alanında önemli bir katkı sağlamış ve ileriye dönük araştırmalara ışık tutmuştur.

Bu bulgular, mevcut literatürle uyumlu olup, geliştirilen sistemin endüstriyel uygulamalarda güvenilir ve verimli bir yağlama ve soğutma çözümü sunduğunu göstermektedir. Gelecek çalışmalarda yapay zekâ ve makine öğrenimi tekniklerinin kullanımı ile kestirimci bakım uygulamaları ile sistem performansının daha da artırılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Belopukhov, V., Blinov, A., Borovik, S., Luchsheva, M., Muhutdinov, F., Podlipnov, P., ... & Sekisov, Y. (2022). Monitoring metal wear particles of friction pairs in the oil systems of gas turbine power plants. *Energies*, 15(13), 4896.

[2] Peng, H., Zhao, D., Shangguan, L., Li, S., & Cheng, R. (2023). Review of Wind Power Bearing Wear Analysis and Intelligent Lubrication Method Research. *Coatings*, 14(1), 30.

[3] McCloskey, T. H. (1995). Troubleshooting Bearing And Lube Oil System Problems. In *Proceedings of the 24th Turbomachinery Symposium*. Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories.

[4] UE Systems. *The 100 failure modes of lubrication and lubrication programs – Pt 1. UE Systems.* https://www.uesystems.com/the-100-failure-modes-of-lubrication-and-lubrication-programs-pt-1/ June 9, 2024

[5] Lyu, Y., Li, Y., Li, C., Jiang, L., & Liu, Z. (2024). Oil-Air Distribution Prediction Inside Ball Bearing with Under-Race Lubrication Based on Numerical Simulation. Applied Sciences, 14(9), 3770.

[6] Invex Oil. *Lubrication failure*. https://invexoil.com/lubrication-failure/ / June 9, 2024

[7] GAOa, W., NELIAS, D., BOISSON, N., & LYUb, Y. (2018). Model formulation of churning losses in cylindrical roller bearings based on numerical simulation.

[8] Patel, V. P., & Coppins, D. G. (2001). Selection Of API 614, Chapter 3, General Purpose Lube Oil System Components For Rotating Process Equipment. In Proceedings of the 18th International Pump Users Symposium. Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories.

[9] Bowden, F. P., & Tabor, D. (2001). The friction and lubrication of solids (Vol. 1). Oxford university press.

[10] ADDINOL *Tribology*. https://addinol.de/en/service-en/expert-tip/tribology/ /June 9, 2024

[11] ADDINOL. *Adhesive wear*. https://addinol.de/en/service-en/expert-tip/adhesive-wear/ /June 9, 2024

[12] ADDINOL. *Abrasive wear*. ADDINOL Expert Tip. https://addinol.de/en/service-en/expert-tip/abrasive-wear/. /June 9, 2024

[13] Fontana, M. G., & Greene, N. D. (1967). Corrosion Engineering

[14] Tribology. *Fatigue wear*. https://www.tribonet.org/wiki/fatigue-wear/#Fatigue_wear /June 9, 2024

[15] Öncü, G., & Durak, E. (2021). STATİK YÜKLÜ RADYAL KAYMALI YATAKLARDA HİDRODİNAMİK YAĞLAMANIN ANALİZİ. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(1), 167-175.

[16] Güllü, E. (1996). ELASTOHİDRODİNAMİK YAĞLAMADA MUYLU VE BURÇ PÜRÜZLÜLÜK MİKTARLARININ PERFORMANS KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2(2), 97-102.

[17] Singh, S., Singh, E. J., & Singh, E. G. (2017). Automatic Lubrication System. *Steel Research International*, *4*, 894-899.

[18] SKF. *Automatic lubrication systems*. https://www.skf.com/us/products/lubrication-management/automatic-lubrication-systems /June 9, 2024

[19] SKF. *Maintenance handbook*. https://www.skf.com/mm/0901d19680567e2f/16964Ebu / June 9, 2024

[20] SKF Lincoln. *Multi-line lubrication systems*. https://www.skf.com/ph/products/lubrication-management/automatic-lubrication-systems/multi-line / June 9, 2024

[21] Ma, X., Zhang, M., Yang, F., Xue, Y., Gu, R., & Guo, N. (2023). Analysis of Circulation Characteristics and Heat Balance of High-Speed Rolling Bearing under Oil-Air Lubrication. Lubricants, 11(3), 136.

[22] Miyachi, T. (2000). Oil-air lubrication systems for steel production facilities. *KOYO Engineering Journal*, *125*, 1-12.

[23] Lališ, A., Bolčeková, S., & Štumbauer, O. (2020). Ontology-based reliability analysis of aircraft engine lubrication system. *Transportation Research Procedia*, *51*, 37-45.

[24] Mang, T., & Dresel, W. (Eds.). (2007). Lubricants and lubrication. John Wiley & Sons

[25] Gao, S., Hou, X., Ma, C., Yang, Y., Li, Z., Yin, R., & Zhu, R. (2024). Transient Simulation Analysis of Needle Roller Bearing in Oil Jet Lubrication and Planetary Gearbox Lubrication Conditions Based on Computational Fluid Dynamics. Lubricants, 12(2), 39.

[26] Li, K., Chen, G., & Liu, D. (2016). Study of the influence of lubrication parameters on gear lubrication properties and efficiency. Industrial Lubrication and Tribology, 68(6), 647-657.

[27] Liu, H., Li, Y. & Liu, G. (2018). Numerical investigation of oil spray lubrication for transonic bearings. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 40, 401

[28] Qiao, Z., Zhou, C., Su, J., & Jiang, X. (2024). A novel dynamic heat-flow coupled model under spray lubrication for high-speed gears: CFD simulation and experimental validation. Simulation Modelling Practice and Theory, 131, 102867.

[29] P. Shams Ghahfarokhi, A. Podgornovs, A. Kallaste, A. J. Marques Cardoso, A. Belahcen and T. Vaimann, March (2023). "The Oil Spray Cooling System of Automotive Traction Motors: The State of the Art," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 9, no. 1, pp. 428-451,

[30] Wu, C. H., & Kung, Y. T. (2005). A parametric study on oil/air lubrication of a high-speed spindle. Precision Engineering, 29(2), 162-167.

[31] Marey, N. A., & Ali, A. A. (2023). Novel measurement and control system of universal journal bearing test rig for marine applications. Alexandria Engineering Journal, 73, 11-26.

[32] Gunawan, A. I., Sanjaya, P. E. S., Sumantri, B., Wiryono, C., & Hendrawan, A. (2017, September). PLC-based control system for Lube oil system and gland steam condenser system on steam turbine. In 2017 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA) (pp. 171-178). IEEE.

[33] LubriSource. *System design. LubriSource.* https://www.lubrisource.com/system-design / June 9, 2024

[34] Cobey. *Lube oil consoles.* https://www.cobey.com/Lube_Oil_Consoles/lube_oil_consoles.html /June 9, 2024

[35] Turbomachinery International. *Compressor lubrication.* https://www.turbomachinerymag.com/view/compressor-lubrication /June 9, 2024

[36] Oil Filtration Systems. *Bearing lube oil systems.* https://www.oilfiltrationsystems.com/bearing-lube-oil-systems /June 9, 2024

[37] Allied Power Group. *Gas turbine lubrication systems.* https://alliedpg.com/latest-articles/gas-turbine-lubrication-systems/ /June 9, 2024

[38] Nicholas, G., Clarke, B. P., & Dwyer-Joyce, R. S. (2021). Detection of lubrication state in a field operational wind turbine gearbox bearing using ultrasonic reflectometry. Lubricants, 9(1), 6.

[39] Yi, S., Zhao, N., Li, S., & Xu, Z. (2014, August). A study on fault diagnostic method for the lube oil system of gas turbine based on rough sets theory. In *2014 11th*

International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD) (pp. 42-48). IEEE.

[40] Brun, Klaus & Kurz, Rainer & Thorp, Joseph & Winkelmann, Bernhard. (2016). GAS TURBINE PACKAGING OPTIONS AND FEATURES..

[41] Shangguan, L., & Xu, Y. (2023). Design and experimental research on centralized lubrication and waste oil recovery system for wind turbines. Applied Sciences, 13(3), 1873.

[42] Wu, L., Wang, K. C., Hau, G., Lei, Q., & Yang, C. H. (2024). Online Monitoring and Prediction Methodology of Lubricating Oil State in Gearbox of a Nuclear Power Plant Based on Measurement with Sensors. Sensors & Materials, 36.

[43] Steimes, J., Gruselle, F., & Hendrick, P. (2013, June). Study of an air-oil pump and separator solution for aero engine lubrication systems. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 55133, p. V002T01A008). American Society of Mechanical Engineers.

[44] Sedlář, M., & Abrahámek, P. (2023). Numerical Analysis of Oil Lubrication and Cooling of Roller Thrust Bearing in High-Performance Mixed-Flow Pump. *Energies*, *16*(19), 6890.

[45] Siemens.*S7-1200.Siemens.* https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/s7-1200.html /June 9, 2024

[46] Beijer Electronics. *X2 pro 21 operator panels*. https://www.beijerelektronik.com.tr/tr-TR/Products/Operator panels/X2 pro/X2 pro 21 /June 9, 2024

[47] Na, L. (2019). Application of Siemens Smart200 and S7-1200 Plc Complex Instructions in Industrial Automation [A]. Institute of Management Science and Industrial Engineering. In Proceedings of 2019 International Conference on Information Science, Medical and Health Informatics (ISMHI 2019) (Vol. 6). Institute of Management Science and Industrial Engineering:(Computer Science and Electronic Technology International Society).

[48] National Instruments. *NI cDAQ-9189 (model).* https://www.ni.com/en-tr/shop/model/cdaq-9189.html /June 9, 2024

[49] National Instruments. *CompactDAQ modules*. https://www.ni.com/en/shop/compactdaq/compactdaq-modules.html /June 9, 2024

[50] Phoenix Contact. *Industrial Ethernet switches*. https://www.phoenixcontact.com/en-us/products/industrial-communication/industrial-ethernet-switches /June 9, 2024

[51] National Instruments. *Fundamentals, system design, and setup for the 4-20 mA current loop*. https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/fundamentals--system-design--and-setup-for-the-4-to-20-ma-curren.html /June 9, 2024

[52] WIKA. A-10 pressure transmitter datasheet (Publication No. DS/PE8160). WIKA.https://www.wika.com/media/Data-sheets/Pressure/Pressure-sensors/ds_pe8160_en_co.pdf /June 9, 2024

[53] WIKA. *Electrical accessories datasheet (Publication No. DS/AC8007).* https://www.wika.com/media/Data-sheets/Pressure/Electrical-accessories/ds_ac8007_en_co.pdf /June 9, 2024

[54] WAGO. *4 iletkenli sensör klemensi*. https://www.wago.com/tr/ray-klemensler/4-iletkenli-sensoer-klemensi/p/2000-5417 /June 9, 2024

[55] WIKA. *Resistance thermometers datasheet (Publication No. DS/TE6017).* https://www.wika.com/media/Data-sheets/Temperature/Resistance-thermometers/ds_te6017_en_co.pdf /June 9, 2024

[56] Kayse. (2022). *MLG manyetik seviye göstergeleri [Magnetic level indicators]*. https://kayse.com.tr/wp-content/uploads/2022/12/mlg-manyetik-seviye-gostergeleri.pdf /June 9, 2024

[57] Kayse. *LS30-2 product datasheet.* https://kayse.com.tr/en/urun/ls302/?attachment_id=2306&download_file=28aqzknxj7epe /June 9, 2024

[58] Teesing. *Kracht gear type VC flowmeters datasheet*. https://teesing.com/media/files/productinformation/flowmeters/pd-flowmeters/hydraulic-applications/kracht-gear-type-vc-pd-flowmeters.pdf /June 9, 2024

[59] Kracht. (2021). *Electronics catalog.* https://www.kracht-media.eu/wp-content/uploads/Electronics_EN_06-2021.pdf /June 9, 2024

[60] Bartech Marine. *Oil Debris Sensor standard datasheet. Bartech Marine*. https://bartechmarine.com/wp-content/uploads/4212-Oil-Debris-sensor-standard-Data-sheet.pdf / June 9, 2024,

[61] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2020). *Termodinamik: Mühendislik Yaklaşımı* (9. baskı). McGraw-Hill Education.

[62] Sesino. *D7000 – Process Coolers*. https://www.sesino.com/en/products/d7000/ /June 10, 2024

[63] Alizadeh, R., Allen, J. K., & Mistree, F. (2020). Managing computational complexity using surrogate models: a critical review. Research in Engineering Design, 31(3), 275-298.

[64] NSK Ltd. *Technical report* (pp. 166-167). https://www.nsk-literature.com/en/technical-report/offline/download.pdf / June 10, 2024

[65] Beijer Elektronik. *iX HMI Software*. https://www.beijerelektronik.com.tr/tr-TR/Products/software/ix-hmi-software /June 10, 2024

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: İsmail ATİZ

Lisans: Marmara Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği (3.28/4.0)