



**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SAVUNMA SANAYİNDE ENDÜSTRİ 4.0 VE ÖNGÖRÜCÜ
BAKIM UYGULAMASI**

YASİN YÜCE

**SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Faruk ULAMIŞ

KIRIKKALE - 2023



**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SAVUNMA SANAYİNDE ENDÜSTRİ 4.0 VE ÖNGÖRÜCÜ
BAKIM UYGULAMASI**

YASİN YÜCE

**SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Faruk ULAMIŞ

KIRIKKALE – 2023

ONAY SAYFASI

Yasin YÜCE tarafından hazırlanan “**SAVUNMA SANAYİNDE ENDÜSTRİ 4.0 VE ÖNGÖRÜCÜ BAKIM UYGULAMASI**” adlı tez çalışması, aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Savunma Teknolojileri Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Faruk ULAMIŞ

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı,
Kırıkkale Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Doç. Dr. Murat LÜY

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı,
Kırıkkale Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğretim Üyesi Fuat TÜRK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı,
Çankırı Karatekin Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 31/01/2023

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Yasin YÜCE

31.01.2023

ÖZET

SAVUNMA SANAYİNDE ENDÜSTRİ 4.0 VE ÖNGÖRÜCÜ BAKIM UYGULAMASI

YÜCE, Yasin

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Faruk ULAMIŞ

2023, 79 sayfa

Toplumsal yaşam ve endüstriler tarihi bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Teknolojik gelişmeler ve hayata etkileri bakımından geçmiş dönemlere kıyasla daha hızlı bir dönüşüm süreci yaşanmakta. Dünya Ekonomik Forumu'na göre, dördüncü sanayi devrimi teknolojilerinin dünya ekonomisine 2025 yılına kadar 3,7 trilyon dolar ek katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Sivil yaşamda kullanılan bir otomobil yada savaş sahasında kullanılan bir tank veya bu gereçlerin üretildiği bir fabrika için bakım/onarım kritik öneme sahiptir. Günümüz karmaşık teknolojik sistemleri için etkili bir bakım/onarım yönetiminin önemi daha da artmaktadır. Endüstri 4.0, yapay zeka, siber fiziksel sistemler vb. teknolojiler tüm endüstriyel süreçlerde olduğu gibi bakım/onarım süreçlerinde de bir dönüşüm başlatmış, bu dönüşümün gözde yöntemlerinden biri öngörücü (kestirimci) bakım olarak öne çıkmıştır. Bakım/onarım süreçlerinin artan önemi sonucunda küresel bakım, onarım ve operasyon (MAINTENANCE, REPAIR, AND OPERATIONS - MRO) pazarı 2020'de 616,01 milyar dolar düzeyine ulaşmış ve 2026 yılına kadar 701,3 milyar dolar düzeyine ulaşması beklenmektedir. NATO 2020 yılı raporuna göre Türkiye savunma bütçesi 13.4 milyar dolardır ve ülkemiz harcamalarının %16,5 lik bölümünü işletme/bakım ve diğer faaliyetlerde sarf etmektedir. Bu oran yaklaşık olarak 2 milyar dolara karşılık gelmektedir. ABD için bu oran % 31.6 düzeyindedir

ve ABD nin savunma bütçesinin 784 milyar dolar olduğu göz önünde bulundurulursa ABD bakım, onarım ve diğer olarak sınıflandırılan faaliyetlere 247 milyar dolar harcama yapmıştır. Yeni nesil öngörücü/kestirimci bakım yönetimi sayesinde %25-30 oranında bakım maliyetlerinin azalması, arıza adet ve sürelerinde yaklaşık % 70-% 75 azalma ve arıza kaynaklı duruş sürelerinde % 35-% 45 azalma sağlandığı görülmüştür. Bu çalışmada Endüstri 4.0, Savunma Sanayi ve yeni nesil bakım süreçlerine yönelik inceleme yapılmış ve örnek bir uygulamaya yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Savunma Sanayi, Endüstri 4.0, Öngörücü Bakım, PLC

ABSTRACT

INDUSTRY 4.0 AND PREDICTIVE MAINTENANCE IN THE DEFENSE INDUSTRY

YÜCE, Yasin

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Defense Technology,

Master's Thesis Supervisor: Assist. Prof. Faruk ULAMIŞ

2023, 79 pages

Social life and industries are going through a historical transformation process. In terms of technological developments and their effects on life, there is a faster transformation process compared to previous periods. According to the World Economic Forum, it is predicted that the technologies of the fourth industrial revolution will make an additional contribution of 3.7 trillion USD to the world economy by 2025. Maintenance/repair is critical for an automobile used in civilian life, a tank used on the battlefield, or a factory where these equipment are produced. The importance of an effective maintenance/repair management for today's complex technological systems is increasing. Industry 4.0, artificial intelligence, cyber physical systems etc. Technologies have started a transformation in maintenance and repair processes, as in all industrial processes, and one of the favorite methods of this transformation has come to the fore as predictive maintenance. As a result of the increasing importance of maintenance/repair processes, the global maintenance, repair and operations (MAINTENANCE, REPAIR, AND OPERATIONS - MRO) market reached 616.01 Billion Dollars in 2020 and is expected to reach 701.3 Billion Dollars by 2026. According to NATO's 2020 report, Turkey's defense budget is 13.4 billion USD, and our country spends 16.5% of its expenditures on operation/maintenance and other activities. This rate corresponds to approximately 2 billion US dollars. For the USA, this rate is 31.6%, and considering that the US defense budget is 784 billion dollars, the USA spent 247 billion US dollars on activities classified as maintenance, repair and other. Thanks to the new generation

predictive maintenance management, it has been observed that maintenance costs are reduced by 25-30%, the number and duration of breakdowns are reduced by approximately 70%-75%, and downtimes caused by failures are reduced by 35%-45%. In this study, Industry 4.0, Defense Industry and new generation maintenance processes were examined and a sample application was included.

Keywords: Defense Industry, Industry 4.0, Predictive Maintenance, PLC



TEŞEKKÜR

Bilgi ve tecrübesi ile desteğini esirgemeyen ve tüm çalıőmalarımnda yol gösteren danışman hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Faruk ULAMIŞ'a,
Mühendislik deneyimi ile uygulama çalışmalarına destek veren Sayın Bülent CESUR'a,
Çalıőmalarım sırasında değerli yardımları ile destek veren Hümevra BURKAN'a,
Öğrenim hayatımda desteklerini esirgemeyen anne ve babama,
Tez çalıőmam boyunca daha az zaman ayırdığım oğlum, kızım ve en büyük destekcim eőim Filiz Yüce'ye teşekkür ederim.

Yasin YÜCE

2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	IV
ABSTRACT	VI
TEŞEKKÜR	VIII
İÇİNDEKİLER	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR	4
3. SANAYİ DEVRİMLERİ ve ENDÜSTRİ 4.0	9
3.1. Endüstri 4.0	10
3.1.1. Nesnelerin İnterneti (Internet of Things).....	11
3.1.2. Büyük Veri (Big Data).....	11
3.1.3. Bulut Bilişim (Cloud Computing)	11
3.1.4. Siber Güvenlik (Cybersecurity).....	12
3.1.5. Simülasyon (Simulation)	12
3.1.6. Artırılmış Gerçeklik (Augmented Reality).....	12
3.1.7. Otonom Robotlar (Autonomous Robots).....	12
3.1.8. Sistem Entegrasyonu (System Integration)	13
3.1.9. Katmanlı Üretim (Additive Manufacturing).....	13
3.2. Akıllı Fabrikalar (Smart Factory).....	13
3.3. Endüstri 4.0 ve Türkiye Milli Teknoloji Hamlesi	14
4. SAVUNMA SANAYİ	17
4.1. Savunma Sanayi ve Endüstri 4.0.....	17
4.2. Savunma Sanayi ve Bakım.....	20
5. BAKIM KAVRAMI	23
5.1. Bakım Türleri	25
5.1.1. Düzeltici (Arızı) Bakım	25
5.1.2. Periyodik (Önleyici) Bakım.....	25
5.1.3. Öngörücü (Kestirimci) Bakım	26
5.2. Bakım ve Dijital İkiz.....	29
5.3. Bakıma Yönelik Tasarım	31
5.3.1. Mekanik Bölüm	32
5.3.2. Elektrik-Otomasyon Bölümü.....	33

5.3.3. Yazılım Bölümü.....	34
5.3.4. Dokümantasyon	36
5.4. Yeni Yaklaşımlar	36
6. MATERYAL ve METOD	40
6.1. Materyal	40
6.2. Metod	50
7. SONUÇ ve GELECEK ÇALIŞMALAR.....	60
8. KAYNAKÇA	62
EKLER.....	75
EK.1	75
ÖZGEÇMİŞ.....	79



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Havelsan ADVENT	2
Şekil 3.1.	Endüstri gelişim dönemleri	9
Şekil 3.2.	Endüstri 4.0 teknolojileri	10
Şekil 3.3.	Anadolu Ajansı yapay zeka stratejisi infografik	15
Şekil 5.1.	Dijital İkiz Görsel	29
Şekil 5.2.	Örnek hidrolik yol-adım diyagramı.....	33
Şekil 5.3.	Sistem elektrik şeması örnek	34
Şekil 5.4.	Sistem yazılımı örnek akış şeması (flowchart).....	35
Şekil 6.1.	Sistem genel görünümü	41
Şekil 6.2.	Elektrik-Otomasyon bölümü sistem mimarisi.....	42
Şekil 6.3.	Elektrik-Otomasyon bölümü pano görünümleri.....	43
Şekil 6.4.	Siemens TIA Portal, PLC ve motor sürücü online görünüm.....	45
Şekil 6.5.	Sisteme mobil telefon üzerinden kablosuz erişim (PLC haberleşme ve veri kayıt sayfası).....	47
Şekil 6.6.	Sisteme dizüstü bilgisayar üzerinden kablosuz erişim	47
Şekil 6.7.	Kontrol paneli (Delta HMI) sayfa görünümleri.....	48
Şekil 6.8.	Manipülatörün çalışma anındaki görünümü (Kaldırıcı yukarıda, tutucu çene açık ve taşıma arabası ileride)	49
Şekil 6.9.	Sistem çalışma adımları.....	50
Şekil 6.10.	Adım mantığında çalışma sırasında yapay bir arıza oluşturulması sonucunda oluşan operatör paneli alarm görüntüsü	51
Şekil 6.11.	Titreşim seviyelerinin aşılması sonucu operatör panelinde görülen alarm bildirimi	52
Şekil 6.12.	Veri kayıt açıklamalar	53

Şekil 6.13. (a) PLC programında "csv" veri kayıt dosyası oluşturma fonksiyonu, (b) PLC programında veri kayıt dosyası silme fonksiyonu, (c) PLC programında veri kayıt dosyasına istenilen verilerin kaydedilmesini başlatma fonksiyonu	53
Şekil 6.14. Sistem motorunun soğutma fanı pervanesine takılan iki farklı boyuttaki parçanın titreşim verisinde oluşturduğu değişimin görüldüğü grafik (pompa rolantide çalıştırılmış ve sistem stop durumundadır)	54
Şekil 6.15. Pompa titreşim veri grafiği	55
Şekil 6.16. Titreşim değerlendirme standardı	55
Şekil 6.17. Pompa titreşim ve PLC Q 0.2 (Dijital Çıkış- 0/1) çıkışı ile kontrol edilen hidrolik valf veri grafiği	56
Şekil 6.18. Yağ sıcaklık ve sistem basınç veri grafiği	57
Şekil 6.19. Pompa titreşim ve sistem basınç veri grafiği	57
Şekil 6.20. Operatör paneli bakım sayfası görünümü	58

sunduğu fırsatların yanında yeni ekipmanlar ve daha karmaşık sistemler ortaya çıkmaktadır [16-17]. Karmaşık yapının yanı sıra kesintisiz çalışma isterleri kaliteli ve hızlı bakım/onarım ihtiyacını ortaya çıkarmıştır [9]. Bu durum dünyada bakım/onarım süreçlerinin yeniden gözden geçirilmesini ve yeni teknolojilere uygun bir seviyeye çıkarılmasını gerekli kılmıştır [18]. Şirketler bakım/onarım süreçlerini kısaltmak, basit ve verimli bir yapı haline getirmek için büyük çaba sarf etmektedirler [19-21]. Bakım/onarım süreçlerinin artan önemi sonucunda küresel bakım, onarım ve operasyon (MAINTENANCE, REPAIR, AND OPERATIONS - MRO) pazarı 2020'de 616 milyar dolar düzeyine ulaşmış ve 2026 yılına kadar 701 milyar dolar düzeyine ulaşması beklenmektedir [22]. Sivil havacılık sektöründe de 2020 yılı bakım/onarım harcamaları yaklaşık 50 milyar dolar düzeyinde gerçekleşmiş ve 2030 yılına kadar 115 milyar dolara ulaşması beklenmektedir [23].

Bu tez çalışmasında I4.0, savunma sanayi ve bakım süreçlerinin birbirleri ile ilişkisi ve etkileri incelenmiştir. Yeni nesil teknolojik yönelimlerin savunma sanayi bakım/onarım süreçlerinde yaptığı değişimler incelenmiştir. Bakım, onarım ve arıza tespiti için yeni nesil teknolojilere uygun örnek bir uygulama yapılmıştır. I4.0 konseptine uygun bir sistem kurulumu gerçekleştirilmiş ve bu sistemin nesnelerin internetine uygun ekipmanlardan oluşturulması amaçlanmıştır. Öngörücü bakım amacıyla sistem üzerinden verilerin güvenilir bir şekilde elde edilmesi için bir mimari oluşturulması amaçlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde literatür ve yapılan örnek çalışmalar incelenmiştir. Üçüncü bölümde Sanayi devrimleri, I4.0 ve akıllı fabrikalar incelenmiş, ülkemizde bu alanda yaşanan yeni gelişmelerle ilgili bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde savunma sanayinde I4.0 ve bakım kavramlarının ilişkileri ile ilgili bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde bakım kavramı incelenmiş ve yeni teknolojilerin bakım kavramına etkilerine yer verilmiştir. Altıncı bölümde yeni yaklaşımlara uygun bir sistem uygulaması anlatılmıştır. Yedinci bölümde elde edilen sonuçlar ve gelecek dönemde yapılabilecek çalışmalar ile ilgili bilgi verilmiştir.

2. LİTERATÜR

Bu çalışmada I4.0, bakım kavramı, savunma sanayinde bakım alanındaki gelişmeler ve uygulamaların incelenmesi amaçlanmıştır. I4.0 kavramının araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olduğu görülmektedir. Bakım konusu da tüm sektörler için ortak bir araştırma alanı olduğundan yeni yaklaşımların incelendiği çalışmalar artarak devam etmektedir.

I4.0 kavramının ve temel teknolojilerinin tanımlanması ve anlaşılmasının amaçlandığı literatür çalışmaları görülmektedir [6,24]. Diğer bir çalışmada, sanayi devrimlerinin incelemeleri yapılmakta ve bu teknolojik gelişmeler sonucunda ortaya çıkan dönüşüm ihtiyaçları incelenmektedir [1]. I4.0 kavramının ve yeni nesil teknolojilerin ortaya çıkışı, robotik sistemler, kavram tanımlama çalışmaları ve bu teknolojilerin meydana getireceği akıllı fabrikaların incelemeleri yapılmaktadır [4,25,26]. I4.0 kavramının çeşitli ülkelerdeki farklı tanımları ve uygulamaları incelenmekte ve Türkiye'deki teknolojik dönüşüm süreci ile ilgili de araştırmalar yapılmaktadır [27]. Akıllı fabrikaların kapsamlı tanımları ve akıllı üretim süreçleri ile ilgili literatür incelemeleri yapılmaktadır [3]. I4.0 için kritik önemdeki iletişim ve veri transferi, Nesnelerin İnterneti(IoT), Endüstriyel Nesnelerin İnterneti(IIoT), kablosuz ve hibrit veri iletişimi, 5G gibi yöntemlerin özellikleri, zorluklar, fırsatlar ve gelecek vaad eden çalışmalar araştırılmaktadır [28-30]. I4.0 için nesnelerin interneti teknolojileri ve profinet protokolünün özellikleri, zorluklar ve fırsatlar incelenmiştir [31]. Dijital ikiz teknolojisinin tanımı, I4.0 içindeki yeri, akıllı üretim ve endüstriyel süreçlere etkileri araştırılmaktadır [32-33].

I4.0 gibi bir çok teknolojinin ve karmaşık sistemlerin uyumlu olarak çalışması gereken yapılarda bakım kavramının önemli hale geldiği anlaşılmakta ve bu alanda araştırmaların arttığı görülmektedir. I4.0 gelişmelerinin bakım stratejilerine etkileri ve yeni endüstri devriminin bakım süreçlerinde yapacağı dönüşümler incelenmektedir [9]. I4.0 için bakım konsepti, zorluklar ve fırsatlar incelenmiştir [16,34]. Yeni teknolojilerin kullanımının işletmelerin bakım stratejilerine etkileri incelenmekte ve farklı rekabet önceliklerine sahip şirketlerin uyguladığı bakım

stratejilerinin sonuçlarına yer verilmektedir [10]. Bakım kavramının kapsamlı tanımı yapılmakta ve yeni nesil bakım yaklaşımları incelenerek güvenilirlik merkezli bakıma yönelik uygulama örneğine yer verilmektedir [35]. Bakım stratejilerinin seçimine yönelik bir araştırma ve örneğe yer verilmiştir [36]. Bakım yönetiminin maliyetlere etkisini inceleyen bir araştırma yapılmıştır [37]. İşletmeler için en uygun bakım stratejisinin belirlenmesinde veri analizine dayalı bir çalışma yapılmıştır [38].

Yeni nesil teknolojiler bakım kavramında da bir dönüşümü gerekli kılmıştır. Bakım faaliyetlerinin ihtiyaçlara cevap verebileceği yaklaşımlar yeni araştırma konularının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu bakım yaklaşımlarından biri öngörücü (kestirimci) bakım yöntemidir. Yeni teknolojilerin endüstrilerde başlattığı rekabet ortamında öngörücü bakım konusundaki kalite yönetimi incelenmiş ve çeşitli şirketlerin uygulama örneklerine yer verilmiştir [8]. I4.0 ve akıllı fabrikalara yönelik öngörücü bakım, bakım mimarisi ve önemi incelenmiştir. Öngörücü bakımın işletmeler açısından avantajlarına yer verilmiştir [7,20]. Öngörücü bakım ve ekipman ömrü tespitine yönelik incelemelere yer verilmiştir [39]. Endüstrilerde öngörücü bakıma yönelik bir araştırmaya yer verilmiş ve endüstriyel büyük veri kaynaklarının kestirimci bakımın kalitesine yönelik etkileri incelenmiştir [17]. Rüzgar tribünlerinde gerçek zamanlı durum izleme ve öngörücü bakım uygulama örneklerine yer verilmiştir [40-41]. Öngörücü bakım için dijital ikiz teknolojisinin avantajları incelenmiştir [42]. Nesnelerin interneti teknolojilerine uygun olarak sistem verilerinin elde edilmesi ve analizi ile gerçekleştirilen öngörücü bakım uygulamalarına yer verilmiştir [19,43]. Ekipman verilerinin kablosuz teknolojilerle toplanması ve bu verilerin analizi sonucunda etkili bakım stratejilerinin geliştirilmesine yönelik bir uygulamaya yer verilmiştir [44].

Öngörücü bakım mimarisinde endüstriyel verilerin doğru bir şekilde elde edilmesi ve bu verilerin analizi, öngörünün güvenilirliği için kritik önemdedir. Öngörücü bakım için veri analizinin önemi ve veri analizi yöntemlerinin gelişmesi sonucunda sağlanan avantajlara yer verilmiştir [45]. Güneş panellerinde veriye dayalı arıza tahmin ve tespiti uygulamasına yer verilmiştir [46]. Elektrik arızalarının analizinde ve tespitinde veriye dayalı bir uygulama örneğine yer verilmiştir [47].

Öngörücü bakım için arıza öngörüsünün daha hızlı ve güvenilir olarak yapılabileceği kritik sistem verilerinin hangileri olduğunun bilinmesi çok önemlidir. Bu veriler titreşim, sıcaklık, basınç vb. olabilmektedir. Sistemlerin ve sistemleri oluşturan

ekipmanların arıza tahmin ve tespiti için bu verilerin elde edildiği ve analizleri ile sonuca ulaşıldığı örnek araştırmalar artış göstermektedir. Bir şişeleme tesisindeki konveyör motorunun öngörücü bakım programının belirlenmesi, arıza tahmini ve tespiti için I4.0 konseptine uygun, PLC tabanlı titreşim kontrolü temelli bir uygulamaya yer verilmiştir [48]. Öngörücü bakıma yönelik bir uygulama örneğine yer verilmiş, titreşim, ultrasonik sinyaller, yağ analizi ve termal verilerin incelenmesi sonucunda arıza tahmin ve tespit uygulaması yapılmıştır [49]. Asenkron motorlar için titreşim analizi metotları kullanılarak arıza tahmin ve tespiti uygulamasına yer verilmiştir [50-52]. Titreşim sinyalleri ile motor rulmanlarının arıza tespiti uygulaması yapılmıştır [53]. Asenkron motorlarda gerçek zamanlı durum izleme ve veriye dayalı öngörücü bakım incelemesine yer verilmiştir [54]. Motorlarda titreşim, akım ve gerilim verilerinin analizi ile öngörücü bakıma yönelik örnek bir uygulama yapılmıştır [55]. Asenkron motorların bakım yöntemleri, asenkron motor arızaları ve bu arızaların tespit yöntemleri üzerine inceleme yapılmıştır [56-58]. Asenkron motorların arıza tespitinde akustik sinyallerin kullanımına yönelik örnek bir çalışma yapılmıştır [59]. Kızgın yağ pompalarının öngörücü bakımına yönelik titreşim sinyali analizi ile ilgili örnek uygulama yapılmıştır [60]. Motorların akım sinyalleri kullanılarak arıza tespiti uygulaması yapılmıştır [61]. Motor sürücülerin akım sensörlerinde oluşan arızaların tespitine yönelik bir uygulama gerçekleştirilmiştir [62]. Asenkron motorlarda akım, gerilim, tork ve akı sinyal verilerinin analizi sonucunda arıza tahmini ve tespiti uygulaması gerçekleştirilmiştir [63]. PLC tabanlı kablosuz bir kontrol sisteminin endüstriyel bir uygulaması yapılmıştır [64]. PLC tabanlı öngörücü bakım, durum izleme ve arıza tespitine yönelik uygulama yapılmıştır [65-66].

Tüm alanlarda olduğu gibi bakım konusunda da yapay zeka araştırmaları artış göstermektedir. Son yıllarda yapılan derin öğrenme temelli bakım uygulamalarının incelenmesi ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak yapılan bir öngörücü bakım uygulamasına yer verilmiştir [11]. Asenkron motorların titreşim ve akım sinyalleri kullanılarak derin öğrenme tabanlı bir arıza tespit uygulaması gerçekleştirilmiştir [67-68]. Asenkron motorların titreşim sinyallerinin sinir ağları analizi ile arıza tespit uygulamasına yer verilmiştir [69]. Asenkron motorların titreşim ve akım sinyallerinin sinir ağları ile değerlendirilmesi sonucunda arıza tespit uygulamasına yer verilmiştir [70]. Asenkron motorların titreşim ve akım sinyallerinin MSVM

(Multiclass Support Vector Machine) yaklaşımı ile incelenerek arıza tespit uygulaması yapılmıştır [71]. Asenkron motorları için yapay zeka tabanlı durum izleme uygulamasına yer verilmiştir [72]. Asenkron motor arızalarının gerçek zamanlı izlenmesi ve arıza tespiti için SVM (Support Vector Machine) yaklaşımı ve farklı makine öğrenimi yaklaşımları kullanımına yönelik örnek bir araştırmaya yer verilmiştir [73]. Rulmanların titreşim ve termal verilerinin yapay zeka yöntemleri ile analizi sonucunda arıza nedenlerinin tespiti uygulamasına yer verilmiştir [74]. Öngörücü bakım için makine öğrenmesi yöntemlerine yönelik literatür incelemesine yer verilmiştir [21,75]. Öngörücü bakım için derin öğrenme yöntemleri kullanılmıştır [18]. Makine öğrenimi temelli öngörücü bakım araştırmalarına yer verilmiştir [76-78]. Makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak öngörücü bakım uygulamasına yer verilmiştir [79]. Yapay zeka yöntemleri ile veri analizi sonucunda arıza tespitine yönelik bir araştırmaya yer verilmiştir [80]. Bina enerji sistemleri için yapay zeka temelli arıza tahmin ve tespit araştırmasına yer verilmiştir [81]. Makine arıza verilerinin yapay sinir ağları ile analizi sonucunda arıza tahmini uygulamasına yer verilmiştir [82].

Savunma sanayi ve havacılık endüstrisinde de bakım konusunda yeni yaklaşım araştırmaları devam etmektedir. Havacılıkta bakımın ve bakım güvenilirliği incelenmiştir [83]. Savunma silah sistemlerinin işletme ve bakım maliyetlerinin tahmini için yaklaşım modeli araştırmasına yer verilmiştir [84]. Paletli bir zırhlı aracın verileri incelenerek güvenilirlik merkezli bakım uygulamasına yer verilmiştir [85].

Literatür incelendiğinde I4.0, öngörücü (kestirimci) bakım, arıza tahmin ve tespitinde veri analizi ile ilgili araştırmaların son dönemde ilgi gören çalışma alanları olduğu anlaşılmaktadır. Bakım maliyetlerinin işletmeler üzerindeki etkileri sonucunda, tasarruf etmek ve üretim verimliliğini artırmak için bakım stratejileri konusunda araştırma faaliyetleri hız kazanmıştır. Araştırmalarımız sonucunda öngörücü bakım incelemelerinin büyük bir çoğunluğunun sistemin genel kontrolünden ziyade sistemi oluşturan belirli ekipmanlar üzerinde yapıldığı görülmüştür. Sistemlerin geneli ile ilgili çalışmalar olsa da yeterli olmadığı düşünülmektedir.

Literatürde savunma sanayi ve silah sistemleri özelinde çalışmaların yeterli olmadığı veya açık kaynaklarda paylaşılmadığı anlaşılmıştır. Orduların bakım maliyetleri ile ilgili açık kaynaklarda net bilgilere ulaşılamamıştır. Bakım konusunun ordular ve

savunma sanayi için kritik bir konu olduğu ve bu alanda araştırmaların yetersiz olduğu veya açık kaynaklarda paylaşılmadığı düşünölmektedir.

Literatür araştırmasında incelenen tüm çalışmalarda dikkati çeken en önemli unsurun analizlerde kullanılacak kaliteli ve güvenilir endüstriyel verilerin elde edilmesi olduğu anlaşılmıştır. Önceki bölümlerde açıklandığı üzere I4.0 konseptinde veri iletişimi büyük önem arz etmektedir. Ek olarak kaliteli ve güvenilir endüstriyel veri olmadan öngörücü bakım beklenen işlevleri yerine getiremeyeceği bilinmektedir.

Öngörücü bakımın kurulum maliyetlerinin yüksek olduğu bilinmektedir. Bu alandaki çalışmaların dikkatli yürütölmesi ve endüstriyel verilerin yüksek güvenilirlikte elde edilmesi önem arz etmektedir. Endüstriyel nesnelerin interneti vb. haberleşme ve veri iletişim teknolojilerinin kullanımı ile ilgili deneysel çalışmaların daha çok yapılması gerektiği düşünölmektedir.

I4.0, birçok teknolojinin entegre olarak çalıştığı ve üretimden lojistiğe, güvenlikten sağlığa tüm ekosistemi kapsayan bir teknolojik felsefe dönüşümünü temsil etmektedir. Yeni sanayi devriminin dahil olduğu teknolojilerin birçok yönünün olması ve farklı mühendislik disiplinlerini içermesi net bir tanım yapmayı güçleştirmektedir [6]. Bu teknolojiler incelendiğinde yeni sanayi devriminin farklı olmasını sağlayan felsefe dönüşümü daha net anlaşılacaktır. Şekil 3.2’de I4.0 teknolojilerinin bir tasviri görülmektedir.

3.1.1. Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)

Fiziksel nesnelerin birbirleriyle ve diğer sistemlerle internet protokolleri temelinde iletişim kurduğu teknolojiye verilen isimdir. Tanımdaki “nesneler” bilgi üretebilmeli, internet ortamında iletişim kurarak bu bilgiyi iletebilmeli ve sistemde adresi veya kendine özel kimliği olmalıdır. IoT şartlarını sağlayan endüstriye uygun akıllı üretim sistemlerinin iletişim kurduğu teknolojiye de “**endüstriyel nesnelerin interneti**” (IIoT) ismi verilmektedir. Nesnelerin interneti bir teknolojinin ötesinde büyük bir ekosistemi temsil etmektedir ve günümüz iş alışkanlıklarında köklü bir dönüşüme yol açması beklenmektedir. Bu teknolojinin büyük avantajlarının yanında internet ve veri güvenliği alanında riskli durumları da ortaya çıkaracağı tahmin edilmektedir [88].

3.1.2. Büyük Veri (Big Data)

Süreçler ve iş yapma yöntemleri vb. tüm durumların öngörüsü için veri kaynaklarından toplanan veri kümelerinin değerlendirilerek anlamlı hale getirilmesi işlemi olarak adlandırılabilir. Büyük veri tabiri, günümüz internet ortamında elde edilebilme imkanı olan neredeyse sonsuz büyüklükte verinin tarifi için kullanılmaktadır. Büyük veri ve veri madenciliği, başlangıçta anlamsız gibi görünen ancak günümüz endüstrileri için büyük rekabet avantajları sağlayabilecek bilgilerin elde edilebileceği yeni nesil teknolojileri temsil etmektedir [17,89].

3.1.3. Bulut Bilişim (Cloud Computing)

Fiziksel veya sanal olması farketmeksizin sunucuların, uygulamaların veri depolama, ağ yetenekleri gibi bilişim kaynaklarına gereksinim seviyesine göre internet üzerinden erişim hizmetlerine verilen isimdir. Kullanıcıların kişisel depolama imkanlarına ve bilgisayarlarına bağlı kalmaksızın bilgi ve belgelerine internet

üzerinden erişebileceği ve işlem yapabileceği web tabanlı yeni nesil teknolojidir. Bulut bilişim kişisel işlemlerin yanı sıra büyük proje gruplarında grup üyelerinin ortak işlemlerine imkan vermektedir ve bilişim sistemlerinde köklü bir dönüşümü temsil etmektedir [90-91]. Bulut bilişim sayesinde gelişen veri depolama kapasitesi daha fazla verinin analizine imkan sunmaktadır [45].

3.1.4. Siber Güvenlik (Cybersecurity)

Bilgisayarları, sunucuları, mobil cihazları, ağları ve kişisel verileri kötü amaçlı erişim, saldırı ve yazılımlardan koruyan güvenlik mimarisine verilen genel isimdir. Teknik olarak doğal çalışma sistemlerinde bağlantılılık olan birçok sistemin birbiri ile iletişimde ortaya çıkabilecek kötü amaçlı oluşumların önlenmesi amacıyla dayalıdır. Temelinde “Sanal Ortamda Güvenilir Olan Nedir?” sorusuna yanıt aranan ve katmanlı bir sürecin sonunda ortaya çıkan bir ekosistemdir [92].

3.1.5. Simülasyon (Simulation)

Teknolojik anlamda simülasyon; teorik veya fiziksel sistemlerin sanal ortamlarda modellenerek farklı durumlarda çıktılarının değişiminin incelenmesi için tasarım ve mühendislik uygulamalarının bir parçası haline gelmiş teknolojidir. Kullanım amacına göre şahısların veya şirketlerin hedef işlemlerinde bir öngörü sağlayarak risklerin minimize edilmesi ve başarı oranının artırılması amaçlanmaktadır [93].

3.1.6. Artırılmış Gerçeklik (Augmented Reality)

Gerçek dünyadaki ortamın görüntü, ses, grafik vb. sanal eklentilerle yeniden oluşturulmuş görünümüne verilen isimdir. Gerçek ve sanal nesnelere birleştirilerek kullanıcılara gerçek dünyada oluşturulması daha zor olan bir ön deneyim sunabilir. Örnek olarak boş bir binanın içine yerleştirilecek ekipman veya makinelerin sanal dünyada gerçeğe yakın olarak gösterilmesi ve kullanıcının yerleşim hakkında daha gerçekçi bir fikir edinmesi sağlanabilir. Görme ve işitme duyularına ek olarak koku, dokunma gibi duylara da etki edilebilmektedir. Bakım, sağlık, eğlence vb. sektörlerde kullanım örnekleri bulunmaktadır [94].

3.1.7. Otonom Robotlar (Autonomous Robots)

Robotların değişen şartlara göre kendi kararlarını verdiği ve bu kararlara göre eylemlerde bulunduğu teknolojiye verilen isimdir. Yapay zeka teknolojilerinin bir

parçası olarak incelenmektedir. Otonom robot teknolojileri I4.0 için önemli bir yere sahiptir. I4.0 felsefesinin vaat ettiği esneklik, verimlilik ve üretimde devamlılık için otonom robotlar önemli görevler üstlenmektedirler [95].

3.1.8. Sistem Entegrasyonu (System Integration)

Birden fazla sistemin ve alt sistemlerin birbirleri ile uyumlu olarak tek bir sistem gibi çalışmasının sağlanması işlemidir. Yazılım ve donanım kısımları veya mekanik bir sistemi oluşturan (otomobilde motor-şanzıman vb.) tüm temel ve alt sistemlerin birbiri ile uyumlu veya birbirini tamamlayıcı bir şekilde görev yapmasının sağlandığı işlemlerin bütünüdür [96].

3.1.9. Katmanlı Üretim (Additive Manufacturing)

Üç boyutlu sanal ortamlarda modellenen ürünlerin 3 boyutlu yazıcılarda katmanlar halinde fiziksel modele dönüştürülmesi teknolojisidir. Alışıl gelmiş aşındırıcı (talaşlı) imalat yöntemlerinden farklı olarak uygun bir şekilde birleştirilen katmanlar ile üretimi çok daha zor olan parçaların kolay ve uygun maliyetle üretilmesi sağlanmaktadır [97].

3.2. Akıllı Fabrikalar (Smart Factory)

Günümüz teknolojik sistemleri ile donatılmış, verimlilik esaslı, nesnelerin interneti gibi uygulamalarla gerçek zamanlı kontrol ve yönlendirme yapılabilen, makinelerin birbirleriyle haberleşerek süreçleri düzenlediği, makine öğrenmesi yöntemleri ile sistemlerin eğitilebildiği, stok, bakım, lojistik, teknik destek gibi üretim sonrası süreçlerin de entegre çalıştığı tamamen bağlantılı yeni nesil fabrika ortamlarına verilen isimdir [3].

Akıllı fabrika olgusu günümüz endüstriyel dönüşüm evresinde büyük bir yere sahiptir. I4.0, nesnelerin interneti, yapay zeka vb. gelişmeler üretim hatlarının da dönüşümünü zorunlu kılmıştır. Günümüz rekabet ortamı sektör aktörlerini her dönemden fazla yeniliğe zorlamaktadır. Teknolojik yeniliği ve üstünlüğü sağlayan sektör aktörlerinin öne geçmesi ve geride kalanın oyun dışı kalması tahmin edilenden hızlı gerçekleşmektedir. Rekabet sonucu firmalar, hızlı ve esnek üretim hatlarına, verimlilik dönüşümlerine ve nitelikli insan kaynağına yatırımlarını artırmışlardır.

Günümüzde tüketim alışkanlıklarının değişiminin bir sonucu olarak müşteri isterleri çeşitlenmiş ve daha esnek üretim hatlarına ihtiyaç artmıştır [25].

Akıllı fabrika, bilinen üretim kalıplarının çok üstünde bir üretim değerler zincirinin günümüz ihtiyaçlarına göre değişime uğramış halidir. İnsani ihtiyaçları olmayan robotların çalıştığı ve yapay zeka ile yönetilen yeni nesil fabrikalara geçiş hızlanmıştır. I4.0 da olduğu gibi aslında üretimde felsefe değişiminin temsil edildiği yeni fabrika modeli olarak nitelenmektedir [7,48].

3.3. Endüstri 4.0 ve Türkiye Milli Teknoloji Hamlesi

Türkiye olarak bu teknolojik dönüşüme ve sanayi devrimine uyum amaçlı çalışmalar devam etmektedir. Türkiye kendi dönüşüm sürecini Milli Teknoloji Hamlesi olarak isimlendirmiştir. Ülkemizde Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından 2019 yılında Sanayi Strateji Belgesi yayınlanmıştır. Tüm dünyada büyük bir dönüşümü tetikleyen yeni sanayi devrimi teknolojileri ülkemizde de bu alanda bir atılım gerçekleştirilmesini zorunlu kılmıştır. Küresel ekonominin gelişim süreci yeni sanayi devrimi ile önemli bir döneme girmiş bulunmaktadır. Bu kapsamda Ar-Ge yatırımları büyük önem arz etmektedir. Ülkemizde Ar-Ge harcamalarının GSYİH içindeki oranının %1,8'e, Ar-Ge insan kaynağının 300 bine ve araştırmacı sayısının 200 bine ve ülkemizdeki yazılım geliştirici sayısının 500 bine çıkarılması hedeflenmektedir [86].

Bakanlık tarafından proje bazlı teşvik sistemi vb. uygulamalarla teknolojik olarak öncelikli alanlarda büyük ölçekli teşvikler verilmektedir [98]. Yine TÜBİTAK tarafından ülkemiz için öncelikli teknoloji alanları belirlenerek bu alanlarda çalışan enstitüler aracılığıyla Ar-Ge faaliyetleri yürütülmektedir. Ek olarak çağrılar yayınlanmakta, akademik çalışmalar ve sanayi gelişimi için proje bazlı destekler verilmektedir [99].

4. SAVUNMA SANAYİ

4.1. Savunma Sanayi ve Endüstri 4.0

Teknolojik gelişmeler tüm endüstrileri etkilediği gibi savunma sanayini de büyük oranda etkilemektedir. Ülkelerin, ordularına ve savunma sanayine verdiği önem sebebi ile dünya savunma harcamaları 2020 yılında yaklaşık 2 trilyon dolara ulaşmıştır [104]. NATO üyesi ülkelerin 2020 yılı savunma harcamaları ise 1,027 trilyon dolar seviyesindedir. Ülkemizin 2020 yılı savunma harcamaları da yaklaşık 13,4 milyar dolardır [105].

Dünya tarihinde, savaş finansmanı, insan kaynağı ve savunma sanayi endüstrisi savaşların sonucunu belirleyen önemli etkenler olmuştur. Dünyaya ve global ekonomiye etkisi açısından İkinci Dünya Savaşı savunma sanayi gücünün önemini anlayabilmek için önemli veriler sunmaktadır. İkinci Dünya Savaşında üretim endüstrisinin gücünün geldiği seviyeyi göstermesi bakımından bazı örnekler vermek yerinde olacaktır. Savaş süresince Almanya'nın ürettiği yaklaşık 46 bin tanka karşılık ABD 99 bin, Birleşik Krallık 29 bin civarında tank üretimi gerçekleştirmiştir. Yine Almanya'nın ürettiği yaklaşık 120 bin adet uçağa karşılık ABD 324 bin ve Birleşik Krallık 131 bin adet civarı üretim gerçekleştirmişlerdir. Savaşın taraflarının isimleri verilmeden sadece üretim gücü ve çeşitliliği ortaya konulursa, savaşın galibi olan tarafı tahmin etmek zor olmayacaktır. İnceleme konusu savunma sanayi olduğu için nicelik incelemesi ön planda tutulmuştur. Elbette orduların nicelikleri kadar nitelikleri de önemlidir ancak nitelikli bir savunma sanayi ile desteklenmeyen bir ordunun başarısız olma olasılığı yüksek olacaktır. İkinci Dünya Savaşında özellikle ABD üretim endüstrisi tüm dünya için çok büyük verimlilik örnekleri ortaya koymuştur ve büyük bir teknolojik yarış başlamıştır. Otomobil üreten bir fabrikanın hızlı bir şekilde savaş uçağı üreten bir fabrikaya dönüştürülmesi, üretim tekniklerindeki hızlı dönüşümler, silahların ve ekipmanların seri üretime uygun şekilde yeniden tasarlanması, gerçek savaş ortamında elde edilen bilgiler ışığında

askeri ürünlerde yapılan hızlı değişimler, üretim endüstrisinin savaşlarda ne kadar önemli olduğunu ortaya koymuştur. ABD askeri ekipman üretim endüstrisinin o dönem geldiği seviye tüm dünya için örnek teşkil etmiştir [106-111]. Seri ve çevik üretimin gücü, dönem teknolojilerinin verimli kullanımı ve sürekli geliştirilmesi tüm dünyada uygulanan bir model olmuş ve İkinci Dünya Savaşından sonra tüm üretim endüstrileri büyük bir dönüşüm yaşamıştır [58].

Ülkelerin düşman olarak tanımladığı diğer ülkelere karşı üstünlük mücadelesi en fazla savunma sanayi ve teknoloji alanlarında öne çıkmaktadır. Ülkelerin savunma sistemlerinde yaptığı yeniliklere cevap olarak rakip ülkelerin hızlı bir şekilde karşı tedbir oluşturma ihtiyacı büyük bir yarışın ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu yarışta, silah sistemlerinde özgün üretim kabiliyeti olan ülkeler büyük bir stratejik avantaj sağlamaktadır. Savunma ve silah sistemlerinde kendi kendine yeten ve güçlü olan ülkeler dünya siyasetine de her dönem yön vermişlerdir. Özgün silah sistemlerinin ne kadar önemli olduğunu göstermesi açısından önemli bir örnek 1982 yılında gerçekleşen Falkland Savaşıdır. İngiltere ile Arjantin arasında gerçekleşen bu savaşta Arjantin'in Fransa'dan temin ettiği Exocet füzeleri İngiliz donanması için büyük tehlike oluşturmaktaydı ve birçok gemisinin batmasına neden olmuştu. Siyasi girişimler sonucunda bu füzenin Arjantin'e daha fazla satılmaması sağlandı ve füzenin teknik bilgilerinin İngiltere ile paylaşılması sonucunda savaşta taraflardan biri dezavantajlı bir duruma düştü. Bir füzenin savaşın sonucuna ne kadar etki edeceği tartışılabilir ancak kendi silah sistemini üretemeyen ve silah sistemlerinde ikinci ülkelere bağımlı bir ülkenin girişeceği tüm mücadelelerde böyle bir durumla karşılaşma riski her zaman olacaktır [112].

Son dönemde ülkemizin terörle mücadele ve çeşitli coğrafyalardaki menfaatlerinin savunulması konusunda yaşanan silah ve silah alt sistemleri ambargolarında özgün bir savunma sanayinin değeri büyük oranda hissedilmektedir. Geçmiş dönemlerde yaşanan Kıbrıs Barış Harekatı ve terörle mücadele tecrübelerimiz benzer ambargolardan başarılı bir şekilde çıkış sağlayabileceğimizi bize göstermiştir. Savunma sanayimizin önemli kuruluşlarından olan ASELSAN, Kıbrıs Barış Harekatı sonrası dönemde ülkemize uygulanan ambargolar sonucunda yaşanan tecrübeler sonucu kurulmuştur ve büyük savunma projelerini başarılı bir şekilde geliştirerek ordumuzun hizmetine sunmaktadır [113]. Son dönemde silahlı insansız hava araçları ve bu araçlarda kullanılan gelişmiş mühimmatlar özgün savunma sanayimizin

stratejik önemini göstermektedir. Özgün savunma sanayini hayata geçirmek de güncel teknolojileri üretmemizi ve kullanmamızı zorunlu kılmaktadır.

Havadan Erken İhbar ve Kontrol Uçaklarımız ile tespit edilen hedeflerin F16 uçaklarımıza aktarılması ve F16 uçaklarımızdan ateşlenen bir füzenin bu uçaklarımız ile hedefe yönlendirilebilmesi kabiliyeti ordumuzun teknoloji kullanımına güzel bir örnektir. Bir diğer örnek ise insansız hava araçlarımızın orman yangınlarının erken tespiti için kullanımınıdır.

Savunma ve havacılık endüstrisi aktörleri her dönemde sivil teknolojiye yön vermiş veya öncüsü olmuştur. Günümüzde kullanılan birçok teknoloji savunma ve havacılık araştırmaları sonucunda kullanılmaya başlamış ve sivil kullanıma sunulmuştur. En bilinen örnek modern internet ağ mimarisinin başlangıcı sayılabilecek ABD savunma araştırmaları kurumu DARPA (The Defense Advanced Research Projects Agency - Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı) tarafından geliştirilen ARPANET ağ mimarisidir [114-115]. Bu ve benzer örnekler savunma sanayinde yaşanan teknolojik gelişimin diğer alanlardan bağımsız düşünülmemeyeceğini göstermektedir.

I4.0 teknolojilerinin vaadettiği gelişim süreçleri ülke orduları içinde büyük bir değer ifade etmektedir. İnsansız sistemler, yapay zeka, nesnelerin interneti, artırılmış gerçeklik vb. teknolojik gelişmeler orduların organizasyon yapılarında ve askeri doktrinlerde değişime yol açmaktadır. Son dönemde ülkemizin insansız sistemlerinin askeri operasyonlarda ulaştığı başarılar yeni teknolojilerin ordular için büyük kabiliyet artışı sağladığını doğrular niteliktedir.

Orduların askeri operasyonlarda kullandığı silah sistemlerindeki teknolojik gelişmelere ek olarak, savunma sanayi üretim ve bakım süreçlerinde de teknoloji kullanımı önem kazanmaktadır. Kısa sürede, uygun maliyet ve yüksek kalitede üretim kabiliyeti ülkelerin savunma sanayine aktardığı finansmanın büyüklüğü göz önüne alınınca büyük önem arz etmektedir. I4.0 teknolojilerinin üretim ve bakım süreçlerinde ortaya çıkardığı avantajlarla maliyetlerde iyileştirmeler sağlanması ve savunma sistemlerinin Ar-Ge faaliyetlerine daha fazla bütçe aktarılması hedeflenmektedir.

Orduların en önemli ögesi nitelikli insan kaynağıdır ve güncel teknolojiye uygun ekipmanlarla desteklenmesi gerekmektedir. Teknolojide geri olan bir ordunun insan kaynakları, üstün teknoloji kullanan düşman karşısında hızlı bir şekilde tükeneciktir.

Bu noktada ülkeler ve orduları için teknolojik dönüşümün en az hasım ordularınki kadar hızlı olması stratejik önem arz etmektedir [116].

Sonuç olarak orduların teknolojik kabiliyetleri her dönemde olduğu gibi günümüzde de beka meselesidir. Rekabette ve yenilikte geri kalan ülkeler ve orduları caydırıcılıklarını yitirecek ve güçlü ülkelerin sömürsü haline geleceklerdir. Savaşta ve barışta ülkeler, ordularını her zaman hazır tutmaları gerektiğini tarihteki tecrübelerinden bilirler ve buna göre hareket ederler. Günümüzde teknolojik rekabet her dönemden fazla ve bu teknolojik rekabette geri kalan milletler tarihe karışacaklar.

4.2. Savunma Sanayi ve Bakım

Ülkelerin gelecek vizyonları ve dünyadaki güçleri açısından ordularının caydırıcılığı önemli faktörlerden biridir. Orduların caydırıcılığı açısından en önemli etken de en az rakip orduları kadar teknolojik gelişmişlik ve harbe hazırlık seviyelerinde olmalarıdır. Teknolojik gelişmişlik daha karmaşık silah ve sistemlerin kullanıma girmesi anlamına gelmektedir. Bu duruma ek olarak ifa edilecek görevlerin zor şartlarına dayanması istenen ekipmanlar için talep edilen yüksek askeri standartlar, işleri daha da zorlaştırmaktadır. Bu noktada savunma sanayi ve ordular için bakım büyük önem arz etmektedir. Geniş kapsamda bakım operasyonu revizyon, bakım ve onarım işlemlerinin tamamını kapsamaktadır.

Revizyon, değişen şartlara uygun olarak askeri ekipmanda yapılan kapsamlı değişim ve yenileme sürecini temsil etmektedir, ekipmanların faydalı kullanım ömrünün uzaması da revizyon faaliyetlerinin sonuçlarından biridir.

Bakım, mevcut ekipmanların faydalı ömrünün verimli kullanılması için yürütülen askeri standartlarda birçok düzenli faaliyeti temsil etmektedir. Bakım süreçleri aynı zamanda orduların kullandığı ekipmanın harbe hazır olmasını da garanti etmektedir.

Onarım, savaş veya diğer ordu faaliyetlerinde ekipmanlarda meydana gelen arıza ve aksaklıkların hızlı bir şekilde giderilerek ekipmanın aynı hızda kullanıma sunulduğu veya cepheye tekrar intikalinin sağlandığı süreçtir [84].

Orduların güç çarpanlarının önemli faktörlerinden biri de harbe hazırlık seviyeleridir. Harbe hazırlık, bir ordunun veya birliğin görevlerini yerine getirebilmesi için gerekli olan tüm unsurlarının (personel, ekipman, teçhizat vb.) savaşa hazır olma durumunu ve güç seviyesini ifade etmektedir. Günümüzde tehdit seviyelerinin geldiği noktalar, orduların sürekli değişen şartlara hızlı adapte olmasını ve harbe hazırlık durumlarını mümkün olan en yüksek seviyede tutmalarını zorunlu kılmaktadır [117]. Ülkeler ordularını hazır tutmak için bir yandan yenileme ve teknoloji yükseltme çalışmaları yaparken diğer yandan yeni sistemlerini zorlu tatbikatlarda deneyimlemektedirler. Bu tatbikatlar ordu personellerinin yeni sistemleri test etmesini ve iyileştirme ihtiyaçlarını belirlemesini sağlamaktadır. Tatbikatların bir diğer amacı da ordu ekipmanlarının durumunun test edilmesinin sağlanmasıdır. Bilindiği üzere askeri araç ve ekipmanlar zorlu askeri standartlarda çalışmaları için tasarlanıp üretilmektedir. Askeri standartların yüksek olma sebebi de savaş durumunda araç ve ekipmanların askeri personelin ve ülkenin muharebe kabiliyetini aksatmamasıdır. Zorlu şartlara dayanıklı olarak üretilen ordu ekipmanlarının hazır durumda tutulmasının maliyetleri de yüksek olmaktadır. Günümüzde artan teknoloji kullanımı da bu idame masraflarını daha fazla artırmaktadır.

Yüksek askeri standartlara uygun olarak yapılan bakım, onarım ve revizyon faaliyetleri günümüzde ordular için ağır maliyetler ortaya çıkarmaktadır. Açık kaynaklarda orduların bakım faaliyetleri için yaptığı harcamaların net olarak açıklandığı bir veri bulunmama ile birlikte NATO raporlarında bakım, “işletme/bakım ve diğer (Operations & maintenance and other expenditures)” harcamalar olarak sınıflandırılmıştır. NATO 2020 yılı raporuna göre Türkiye savunma bütçesi 13,4 milyar dolardır ve ülkemiz harcamalarının %16,5’lik bölümünü işletme/bakım ve diğer faaliyetlerde sarf etmektedir. Bu oran yaklaşık olarak 2 milyar dolara karşılık gelmektedir. ABD için bu oran %31,6 düzeyindedir ve ABD’nin savunma bütçesinin 784 milyar dolar olduğu göz önünde bulundurulursa ABD bakım, onarım ve diğer olarak sınıflandırılan faaliyetlere 247 milyar dolar harcama yapmıştır [105]. Bir diğer araştırmada da 2012 yılında ABD ordusunun lojistik, yedek parça ve bakım için yaptığı harcamaların 150 milyar doları aştığı tahmin edilmektedir [118].

Bir diğer araştırmada ABD ordusu savunma ve silah sistemleri için, bir sistemin üretiminden hizmetten çıkana kadarki süreci Total Ownership Cost (Toplam Sahip

Olma Maliyeti) olarak adlandırdığından bahsetmektedir. Bu maliyetin hesaplanmasının sistem bazında zor bir süreç olduğu ve maliyet hesabının yıllara göre yapıldığı anlatılmaktadır. Bu kapsamda ABD Savunma Bakanlığı'nın 2010 yılı için toplam maliyetlerinin %67'sinin işletme ve bakım maliyetlerinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir [84].

Ulaşılabilen rakamlar net olarak sadece bakım giderlerini ifade etmese de ortaya çıkan rakamlara göre ordular bakım giderleri için büyük bütçeler ayırmak zorunda kalmaktadırlar. İfade edildiği üzere bakım, onarım ve revizyon süreçleri ordular ve harbe hazırlık seviyesi için hayati önemdedir. Ülkelerin bu harcamalardan kaçınması mümkün değildir. Ancak, bakım faaliyetlerinin veriminin artırılması ve yeni nesil teknolojik yöntemlerle bu faaliyetlerin finansal yüklerinin hafifletilmesi mümkündür. Buradan tasarruf edilecek kaynakların ülkelerin orduları için Ar-Ge ve teknolojik kabiliyetlerin geliştirilmesinde kullanılması faydalı olacaktır. Bakım maliyetlerinin yüksekliğinin farkında olan ülkeler orduları için I4.0 gibi dönüşümleri ve yeni nesil teknolojileri bakım süreçleri için de uygulama yolunda hızla ilerlemektedirler.

5. BAKIM KAVRAMI

Bakım, sistemlerin ve bu sistemleri oluşturan bileşenlerin işlevselliğinin devam etmesi, amaçlarına uygun çalışmalarının sağlanması ve kullanım ömürlerinin arttırılması için yapılan tüm faaliyetlere verilen genel bir isimdir [35-38]. Günlük yaşamda kullanılan araçlar, otomobiller, asansörler, üretimde kullanılan makineler, savunma için kullanılan silah sistemleri, uçaklar, hastanelerde kullanılan cihazlar vb. yani aklımıza gelecek tüm sistemler zamanla yıpranır ve sorunlar çıkarmaya başlar. Bakım kavramı bu yüzden toplumlar ve insan hayatı için büyük önem arz etmektedir. Gerekli bakımları yapılmamış tüm sistemler olumsuz bir etki yaratabilir [16]. Makine ve sistemlerin kullanıldığı tüm ortamlarda arıza kaynaklı sorunlar istenmeyen bir durumdur. Tüm kullanıcılar yaşanan sorunların en kısa sürede çözülmesini talep etmektedir. Burada “kullanıcı” tabiri ile ifade edilen, üretim hattında çalışan bir makine operatörü, röntgen cihazı çalışmayan bir sağlık personeli, akıllı cihazı sorun çıkaran bir müşteri, savaş ortamında tank kullanan bir asker olabilir.

Yeni sanayi devrimi olarak adlandırılan süreç tüm sektörlerde ve toplumsal yaşamda büyük bir dönüşüm başlatmıştır. Bu dönüşüm sonucunda yeni ihtiyaçlar ortaya çıkmış ve ihtiyaçlar sonucunda yeni sistemler çalışma ortamlarına dahil olmuştur. I4.0’ı meydana getiren bütün teknolojiler toplumlar için büyük avantajlar sunmasının yanında daha komplike sistem ve cihazlar hayatımıza girmiştir [17]. Akıllı fabrikalar ve siber fiziksel sistemler gibi yüksek teknoloji içeren kavramlar, birçok mühendislik disiplinin birlikte geliştirdiği entegre çalışan sistemler olmasının yanında birçok cihazın bağlantılı olmak zorunda olduğu sistemlerdir [16]. Bağlantılı olma durumu, bir ekipmanda meydana gelecek arızanın sistemin bütününe etkileyeceği anlamına da gelmektedir [7,48]. Bu etkilenmenin kapsamı çok geniş olduğu için bakım kavramının önemi her dönemden fazla hissedilmektedir.

Üretim, savunma, sağlık, ulaşım, tarım vb. tüm sektörlerde bakım kilit bir role sahiptir ve bu önem artarak devam edecektir. Ön planda kusursuz işliyor olarak görünen sistemlerin arka planında kaliteli, güvenilir bakım/onarım süreci ve ekibi

bulunur [9,36]. Tüm sektörler için öngörülemeyen arızalar sonucu oluşan üretim kayıpları, iş kazaları ve ek maliyetler istenmeyen bir durumdur. Yıkıcı rekabet ortamında öngörülemeyen aksaklık ve maliyetler yıpratıcı bir etki yapar. Tesislerdeki rastgele arıza ve duruşların dünya ekonomisine maliyetinin yaklaşık 2 trilyon dolar olduğu ve bu rakamın ABD için 700 milyar dolar seviyesinde olduğu tahmin edilmektedir [44,58].

Modern üretim anlayışı içerisinde, sistem güvenilirliği, ürünlerin kalitesi, teslim şartları, ek maliyetler kritik öneme sahiptir ve bakım stratejileri de bu kritik unsurlar için belirleyici bir faktördür. Küresel ekonomik sistemdeki aktörler tarihteki her dönemden daha zorlu piyasa şartları ile mücadele etmektedir. Bakım stratejisi de rekabet gücünü etkileyen önemli bir etken olarak geçmiş dönemden daha fazla ön plana çıkmaktadır. Bakım stratejisi hizmetine ihtiyaç olunan sistemlerin faydalı ömrünü artırmak ve beklenmeyen duruşları önlemek için kritik önemdedir ve üretim maliyetlerinin % 15 - %40 'ının bakım kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir [66]. Her geçen gün artan teknolojik cihaz kullanımının bakım maliyetlerini daha fazla yükselteceği öngörülmektedir. Geçmiş dönemlerde bakım prosedürleri üretim sürecinin bir parçası olarak düşünülmüş ve bu yönde planlama yapılmıştır. Günümüzde artan sistem karmaşıklığı bakım süreçlerinin başlı başına ayrı bir süreç olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Yapılan araştırmalar, rekabet gücü yüksek şirketlerin aynı oranda güçlü bir sistem devamlılığına sahip olduğunu ve bu devamlılığa yetkin bir bakım yönetimi ile ulaşıldığını göstermektedir [10]. Bu nedenle modern üretim felsefesini model alan şirketler bakım yönetimine geçmiş dönemlerden daha fazla önem vermeye başlamışlardır [7,20].

Bakım birimlerinden beklenen, sistemin sorunsuz işletilmesini sağlamak ve bakım maliyetlerini minimum düzeye gelecek şekilde sürekli iyileştirme yapmaktır [16]. Aynı zamanda bakım görevlerinin temel sorumluluğu kaliteli bir ekipman çalışma performansı sunulması ve bunun sonucunda ürünlerin kalitesinin artmasının sağlanmasıdır [10,48]. Etkili ve güvenilir bir bakım stratejisi tesis/ekipman güvenilirliğini sağlar ve büyük oranda iş kazalarının önüne geçebilir. Etkili bakım planlamaları sonucunda üretimi aksatacak durumlar oluşmadan önlenir ve üretimin verimliliği artar [7].

I4.0 teknolojileri geçmiş dönemlerde uygulanması zor ve maliyetli olan bazı yöntemleri daha ulaşılabilir kılmıştır. Arızaların ve aksaklıkların daha hızlı tespit

edilmesini sağlayabilecek sensör teknolojilerinin erişilebilirliğinin artması bakım modellerinin de daha yetkin bir şekilde planlanmasına olanak sunmuştur. Nesnelerin interneti vb. bağlantı teknolojilerinin yaygınlaşması sonucunda insanların ve makinelerin birbiri ile bağlantılı duruma getirilmesi, hızlı ve faydalı veri akışı sağlamıştır [19,45]. Elde edilen büyük veri yığınlarının anlamlandırılması sonucunda üretim verimliliğinde, arıza duruş sürelerinde, yedek parça ömürlerinde, bakım ve onarım maliyetlerinde, iş kazalarının önlenmesinde büyük avantaj sağlanmıştır [8,75].

5.1. Bakım Türleri

5.1.1. Düzeltici (Arızı) Bakım

En basit bakım türüdür, sistem arıza oluncaya kadar çalıştırılır, arıza olunca arızalı parça değiştirilir yada onarılır ve sistem çalışmaya devam eder. Arıza oluşacağı zaman ve onarım/duruş süresi bilinemez. Verimliliği düşük, maliyeti yüksek bakım türüdür. Bu bakım türünde bakım planlamasına gerek duyulmaz. Arızalarla ilgili öngörü durumu yoktur ve işletmenin üretim planlamaları da sağlıklı yapılamamaktadır. Arıza oluşuktan sonra maliyeti ve etkisi belirlenir. Öngörülemeyen arıza düzeni ve etkileri nedeniyle seri üretim anlayışına sahip işletmelerde uygulanması durumunda işletme için büyük zararlara yol açma ihtimali yüksektir [21,36,38].

5.1.2. Periyodik (Önleyici) Bakım

Sistem veya ekipmanlar arıza olmasına bakılmaksızın, sıklıkları önceden belirlenmiş bir periyotta planlı bir şekilde bakıma alınır. Bu bakım türünde belirlenen parça değişimleri, yağlama vb. faaliyetler ekipmanın durumu ne olursa olsun yapılır. Parçaların değişimi planlanmış ise arıza durumuna bakılmaksızın değişim gerçekleştirilir. Yetenekli bakım personeline ihtiyaç duyulur. Parça kullanım ömürlerinin iyi tespit edilemediği durumlarda ek maliyetlere neden olduğu bilinmektedir. Ancak üretim güvenilirliği ve tesis emniyetininin yüksek seviyelerde kalması sağlanır. Beklenmeyen arızaların engellenmesi konusunda yüksek başarı sağlanır. Yapılan üretim planlamalarına bakım kaynaklı olumsuz bir etki oluşmaz [21,36,38].

5.1.3. Öngörücü (Kestirimci) Bakım

Makine/ekipman sağlığının gerçek zamanlı takibinin yapılarak arızalar oluşmadan tahmin etmeye dayalı bir yöntemdir. Bir cihazın yada sistemin çalışma verilerinin takibi sonucunda oluşabilecek arızaların önceden tahmin edilmesi, arıza büyümeden müdahale edilmesi ve arıza önlemeye yönelik ekipman sağlığının iyileştirilmesi faaliyetlerini içeren bakım türü öngörücü bakım veya kestirimci bakım veya tahmini bakım (predictive maintenance) olarak isimlendirilmektedir [21,35].

Öngörücü bakım türünde ekipman sağlığı çeşitli sensörler yardımı ile kontrol edilir ve arıza oluşma süreci takip edilir. Arıza oluşmadan arızanın etkisi bilinir ve bu duruma göre bakım planlaması yapılır. Ekipman sağlığını bozan koşullar da tespit edileceği için sürecin bütünü ile ilgili önlem alma imkanları bulunur. Bakım personelleri ve üretim yönetiminin değerlendirmesi için büyük bir süreç resmi oluşur. Üretim süreçleri aksamadan gerekli onarımlar yapılır ve işletme en az hasarla faaliyetlerine devam eder. Öngörücü bakım uygulamaları kullanılan yöntem ve ekipmanlar nedeni ile ek maliyetlere neden olur. Bu bakım türü nitelikli bakım personeli gerektirmektedir.

Öngörücü bakım uzun bir süredir kullanılmakta olmasına karşın yaygınlığı yüksek değildir [39]. İlk yatırım maliyetleri, uzmanlık gerektirmesi ve teknolojik ekipman gerekliliği öngörücü bakımın tercih edilmesini zorlaştırmaktadır [7,20]. Ancak I4.0 teknolojilerinin yaygınlaşması öngörücü bakımı, uygulanabilir ve tercih edilebilir bir hale getirmiştir [48,73,75].

Öngörücü bakımı diğer bakım türlerinden ayıran en kritik özelliği bir sistemin ne zaman sorun çıkaracağına ve işletmeyi etkilemeden bu sorunun çözümünün yöntem ve zamanının belirlenmesine odaklanmasıdır [8].

Öngörücü bakım için veri toplamak yüksek öneme sahiptir ve gerekli verilerin elde edilmesi için uygun sensörlerin kritik ölçüm konumlarında olması gereklidir. Elde edilen verinin oranı arttıkça öngörücü bakımın arıza tahmin oranı artar ve daha doğru bir bakım planlaması yapılması sağlanmış olur. Günümüzde nesnelerin interneti, bulut bilişim, veri saklama vb. teknolojilerdeki ilerleme seviyesi ve gelişmiş sensörlerin maliyetlerindeki iyileştirmeler, öngörücü bakımın daha yaygın kullanılması için avantaj sağlamıştır [7,79]. Yaygın olarak kullanılan diğer bakım türü olan periyodik bakımın, gerekli olmayan planlı değişimler içerdiği için yüksek

maliyetlere neden olabildiği görülmüştür. Periyodik bakımlarda planlı bir şekilde değişimi yapılan yedek parçaların kullanım ömürlerinin süresi bilinmemekte ve fazladan maliyetler ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple periyodik bakımlar kullanışlı ancak kusurlu görülmektedir [45]. Bu yaklaşım yerine öngörücü bakım uygulanması durumunda % 90 oranında yerinde/etkili bakım yapıldığı görülmüş ve bu bakım stratejisinin arızaları büyük oranda azaltacağı, etkili bir öngörücü bakım stratejisinin % 25 oranında tasarruf sağlayacağı anlaşılmıştır [48].

Bakım stratejileri içinde öngörücü bakım I4.0 için gelecek vaad etmekte ve ilgi çekmektedir [18,76]. Bunun nedeni, I4.0 felsefesinin uygulamasında sistem aksaklıklarının hayati öneme sahip olmasıdır [11]. Öngörücü bakımın vaad ettiği arıza oluşmadan öngörmek ve sistem etkilenmeden önlem alma imkanı büyük bir avantaj sunmaktadır. Ayrıca günümüz şartlarında kaynakların verimli kullanılması yıkıcı rekabet ortamında tüm sektörler için önem arz etmektedir [9,73]. Öngörücü bakım, sistemlerin kullanım ömürlerini maksimum seviyelere çıkarmak, bakım faaliyetlerini minimum düzeye indirmek, beklenmedik duruşları önlemek, işçilik sürelerini ve yedek parça maliyetlerini azaltma hedefleri ile dikkat çekmektedir [11,19]. 2016 yılında yapılan bir araştırmaya göre 2030'lu yıllara kadar öngörücü bakım sayesinde 630 milyar dolar tasarruf sağlanacağı tahmin edilmektedir [8]. Öngörücü bakım yönetimi sayesinde %25 - %30 oranında bakım maliyetlerinin azalması, arıza adetlerinde yaklaşık %70 - %75 azalma ve arıza sürelerinde %35 - %45 azalma sağlandığı görülmüştür [7,49]. Ek olarak ABD Enerji Bakanlığına göre verimli bir bakım uygulamasının %5 - %20 arasında enerji tasarrufu sağladığı tahmin edilmektedir [39].

Sistemlerde yaşanan arızalar genellikle aniden oluşmaz, bir gelişim süreci bulunur [66]. Öngörücü bakım uygulanan sistemlerde arıza gelişme süreci toplanan veriler sayesinde incelenir ve arıza sebeplerine ve sonucuna dair yetkililerin bir fikir edinmesine olanak tanınmış olur [34]. Arızanın öngörülmesinin yanında arızaya sebep olan kök nedenlerde anlaşılacağı için bir planlama yapma ve tedbir geliştirme imkanı bulunur. Arızalar sistemin durmasına sebep olmadan önlenmiş olur. Ek olarak sistemin zayıf yönleri ve yedek parçaların faydalı ömürleri bilineceği için verimli bir yedek parça stok yönetiminin oluşması sağlanır [8,11]. Öngörücü bakım temelinde makine/ekipman sağlığı için titreşim, sıcaklık, akım, gerilim, dönü hızı, akustik ölçümler, yağ analizi vb. birçok verinin bir kombinasyonunu kullanır

[35,55,58,60]. Burada önemli olan arıza öngörüsü yapılacak sistem için kritik verinin ne olduğunun bilinmesidir. Bu kritik verilerin birbirleri ile ve sistemin bütünü ile ilişkilerinin değerlendirilmesi sonucunda sistemin geneli için etkili bakım ve revizyon planlama olanakları elde edilir [45,48,73].

Yeni nesil Öngörücü bakım iki kategoride incelenebilir:

İstatistik Tabanlı: Arıza nedenleri istatistiki olarak incelenir ve gelecekte oluşabilecek arızalar önceden tahmin edilmeye çalışılır.

Durum Tabanlı: Makine/ekipman verileri sürekli izlenir ve değişimler kontrol edilir. Performanstaki değişimlerin başlangıçları saptanır, bu değişimler duruşa neden olmaz ancak arıza nedenleri ile ilgili bilgiler verir [48,73].

Durum tabanlı veya gerçek zamanlı durum izleme, tesisteki değişimlerin veya hataların belirlenmesi için tüm ekipmanlarının parametre değişimleri ve bu değişimlere neden olan sebepler sensörler aracılığı ile sürekli izlenir. Kayıt altına alınan büyük endüstriyel veri yapay zeka vb. yöntemlerle anlamlandırılarak sistem durumları ve kalan faydalı ömürleri tespit edilir [8].

I4.0 teknolojilerinin ilerlemesi sonucunda akıllı fabrikalarda gerçek zamanlı endüstriyel verilerin elde edilmesi kolaylaşmıştır. Makine öğrenimi yöntemleri ile endüstriyel büyük verilerin değerlendirilmesi sonucunda akıllı fabrikalarda durum tabanlı veriye dayalı öngörücü bakım gelecek vaadeden bir bakım stratejisi haline gelmiştir [79].

Öngörücü (kestirimci) bakımın avantajları:

- Bakımı gereken sistem üretimi aksatmayacak bir zamanda/durumda kapatılır, plansız duruşlar ve onarım süreleri azalır.
- Enerji tasarrufu sağlanır.
- Sistemin faydalı ömrünü korumak için yapılan bakım süreleri ve maliyetleri minimize olur.
- Sistemin sürekli izlenilmesi sonucu faydalı ömür için yerinde bakım planlaması yapılır.
- Arıza başlangıcı tespiti ve arıza tahmini yapıldığı için yıkıcı zararlar oluşmadan tedbir alınır, bakım maliyetleri azalır ve bakımlar kolaylaşır.
- Sistemlerin faydalı ömürleri ve güvenilirliği artar, iş bitim sürelerini optimum hale gelir, sipariş teslim yönetimi kolaylaşır.

Öngörücü bakım uygulamalarının daha yüksek başarı sağlaması için insanlar, makineler ve bunlardan elde edilen verilerin birleştirilerek analiz edilmesi gerekmektedir. Dijital ikiz ile sistemlerin geçmiş verileri, gerçek zamanlı performans verileri ve öngörülen gelecek dönem verileri birleştirildiği için makine sağlığı kontrolü daha etkili yapılabilmektedir. Makine ve ekipmanların çalışma düzenlerinin etkilendiği durumların tespitinde daha hızlı hareket imkanı, onarım konusunda büyük avantaj sağlamaktadır. Elde edilen veriler beklenmeyen aksaklıkların büyük oranda önüne geçeceği için bakım uzmanlarının yerinde kararlar alması kolaylaşacağı düşünülmektedir. Üretim ekosisteminde beklenmeyen duruşların minimize edilmesi daha verimli bir üretim planlamasına imkan sağlayacaktır.

5.3. Bakıma Yönelik Tasarım

I4.0 ve modern üretim anlayışı günümüz endüstrilerinde büyük rekabet avantajlarına imkan sağlamıştır. Endüstriler için avantaj sağlayan bu durum bazı ek maliyetler de getirmiştir. Bu maliyetlerin başında kaliteli bakım prosedürleri gelmektedir. Üretim tesislerinin teknolojik dönüşüm sonrası daha karmaşık sistemler ve altyapılar ortaya çıkmıştır. Bakım birimleri de her geçen gün artış gösteren bir iş yükü ile karşı karşıya kalmaya başlamıştır. Bu iş artışı yeni yaklaşımlarla yönetilmez ise işletmeleri zarara uğratabilecek bir hale gelebilecektir. Buradan hareketle bakım konusunda öngörücü bakım vb. yeni yaklaşımlarla arızaların işletmeleri etkileyecek boyutlara ulaşmadan kontrol altına alınması planlanmaktadır. Yeni yaklaşımlar da her dönemden daha fazla yetkin personel ihtiyacını doğurmaktadır ve bu personellerin daha kaliteli ekipman ve imkanlarla desteklenmesi gerekmektedir. Bakım birimlerinin yetkinliklerine ek olarak kaliteli ve etkili bakım anlayışının en önemli faktörlerinden biri de etkin bakıma uygun makine ve ekipman tasarımıdır [123].

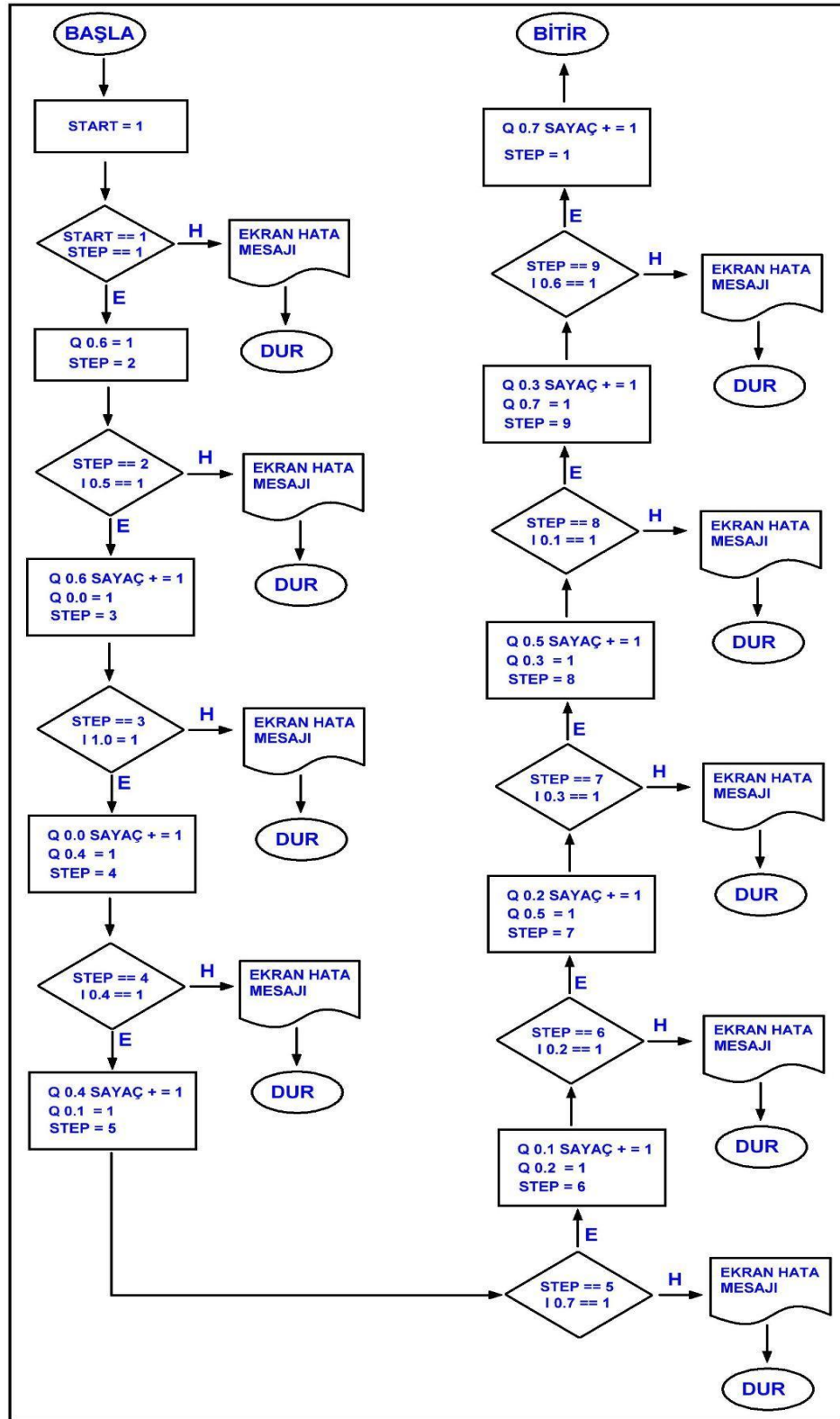
Bakım konusundaki yeni yaklaşımlar arızaların oluşmadan önlenmesi ve tesislerin minimum arıza seviyelerinde çalıştırılabilmesi felsefesine dayanmaktadır. Tesiste oluşabilecek aksaklıklar öngörülmüş olmalı ve tüm bakım çalışmaları üretim planlarının bir parçası olmalıdır. Bakım konusundaki bu etkili planlama bakım birimlerinin yetkinlikleri kadar tesisteki makine ve ekipmanında kalitesi ile de ilgili olacaktır. Makine ve ekipmanların, yıpratıcı üretim ortamlarına dayanıklı, uzun ömürlü ve kullanışlı olması gerekmektedir. Çalışan tüm sistemlerin yeri ve zamanı geldiğinde arıza yapacağı ve bir bakım/onarım işleminden geçeceği bilinerek tasarım

yapılmalıdır. Sistemler tasarlanırken üretim için belirlenen kriterlere ek olarak arıza oluştuğunda kısa sürede devreye alınabilecek bir yapıda olmaları gerekmektedir. Bakımları uzun süreler alan, arıza oluştuğunda zor süreçler ortaya çıkan sistemler işletmeler için de ek maliyetler getirecektir.

Bilindiği üzere tüm sistemler çeşitli kısım ve ekipmanların bir arada kullanımı ile istenilen görevleri yerine getirirler. Bu bölümler mekanik bölüm, elektrik-otomasyon bölümü ve günümüzde birçok sistemde ayrı olarak sınıflandırılması gereken yazılım bölümü. Bu üç bölümünde bakım yönünden işlevsellik açısından tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken özellikleri bulunmaktadır.

5.3.1. Mekanik Bölüm

Mekanik bölüm, sistemlerin fiziki hareketlerinin kontrol edildiği tüm ekipman ve parçaların bulunduğu bölümdür. Sistemlerin hedef işlevlerinin düzenli bir akışta olabilmesi için en kritik bölümdür. Mekanik bölüm, hidrolik, pnömatik kısımları da kapsamaktadır. Bakım faaliyetlerinin en fazla uygulandığı ve zaman aldığı kısımdır. Kalitesiz mekanik ekipman ve parça kullanımı işletmeler için büyük zararlara yol açabilmektedir. Bakım için işlevselliği artıracak ve bakım birimlerinin iş yükünün azalması için olumlu katkıları olacak genel ilkeler aşağıdaki gibi sayılabilir. Mekanik sistem tasarımlarında birinci öncelik iş güvenliği standartlarının göz önünde bulundurulması tasarımın yapılması olmalıdır. İş güvenliği ilkelerinden sonrada ilgili ulusal ve uluslararası standartlara uygun tasarım yapılmalıdır. Bilinmelidir ki standartlar bilimsel araştırma ve uygulamalar sonucunda otoriteler tarafından oluşturulmuş kurallardır. Mekanik tasarım ekipleri sistemlerin bakım ve onarımlar için uygun tasarımları konusunda bakım uzmanlarından faydalanmalıdır. Sistemlerde sık bakım gerektiren parçalar için ulaşılabilir ve kolay montaj yapılabilir bir tasarım tercih edilmelidir. Sistemde kullanılacak parçalar için güncel ve muadili olan ürünler tercih edilmeli ve yedek parça temini konusunda kullanıcıları zor durumda bırakmamalıdır. Hidrolik ve pnömatik sistemde iletim hatları ilgili basınç standartlarında kullanılmalı ve muhafazalı olarak tasarlanmalıdır. Projeler, montaj ve bakım kılavuzları, kullanım kılavuzları, parça teknik resimleri vb. dokümanlar özenle hazırlanmalıdır ve bakım personellerine teslim edilmelidir. Sistem veya sahadaki tüm ekipmanlar, ilgili teknik resimlerdeki teknik kodları ve isimleri ile etiketlenmelidir [123].



Şekil 5.4. Sistem yazılımı örnek akış şeması (flowchart)

5.3.4. Dokümantasyon

Montaj, bakım ve onarımlar için sistemlerin bilgilerinin bulunduğu dokümanlar önem arz etmektedir. Bu dokümanlar mekanik, elektrik, yazılım bölümleri ile ilgili tüm teknik bilgileri içermelidir. Bakım personellerinin yapacağı işlemleri standartlara ve kurallara uygun yapabilmeleri için belirlenmiş prosedürleri içeren kullanım, montaj ve bakım kılavuzlarına sahip olmaları gerekmektedir. Tasarım aşamasında eksiksiz hazırlanarak teslim edilmesi gereken bu dokümanlar sistemlerin en ince ayrıntılarına kadar bilgilerini içermelidir. Kullanılan cihazların bilgi dokümanları, versiyonları, teknik çizimleri, yerleşim ve montaj planları, mekanik-hidrolik-pnömatik şemaları, elektrik projeleri, kablo montaj planları, yazılımları, özel şartları vb. tüm bilgiler açıklamalı olarak bu dokümanların içerisinde bulunmalıdır. Birden çok kopyası oluşturulması gereken bu dokümanlarla ilgili bakım personelleri bilgilendirilmelidir.

5.4. Yeni Yaklaşımlar

Bakım, geçmiş dönemde üretim prosedürleri içerisinde sınıflandırılmaktaydı. Günümüz modern üretim anlayışı, akıllı fabrikalar ve yeni nesil karmaşık sistemler bakım işlemlerinin yeniden gözden geçirilmesini gerekli kılmıştır. Endüstrilerin dönüşüm süreçlerinde global ekosistemin yıkıcı rekabet şartları ve yüksek verimlilik ihtiyacı kilit rol oynamaktadır.

Üretim verimliliği konusunda bakım birimlerine her dönemden fazla görev düşmektedir. Kesintisiz ve kaliteli üretim, hata kaldıramayacak kadar kilit önemdedir. Zamanla yıpranan sistemlerin arıza duruş süreleri istenmeyen bir durumdur. Bakım konusundaki araştırmalar arızaların istenmeyen maddi kayıplara neden olduğunu göstermiştir. Maddi anlamda kayıp yaşamak istemeyen tüm aktörler bakım prosedürlerini modern bir yapıya ulaştırmak için büyük çaba sarf etmektedir.

Endüstrinin önde gelen şirketleri ve yardımcı sektörler yeni nesil teknolojilerin getirdiği avantajlardan mümkün olduğunca fazla yararlanmaktadırlar. Büyük veri analizi sonucunda daha arıza oluşum aşamasındayken tedbir geliştirip gerekli adımların atılması hedeflenmektedir. Sanal gerçeklik, simülasyon, dijital ikiz gibi teknolojileri kullanarak işletme ve bakım konusunda yüksek verim seviyelerine ulaşılmaktadır. Bakım süreçlerini düzenlerken bakım birimlerinde görev yapan

personellerin eğitimleri içinde büyük çaba sarf edilmektedir. Teknoloji kullanımı ile bakım birimlerinde daha az ama nitelikli personel kullanarak kaynakların verimli kullanılması sağlanmaktadır.

Önemli uçak motoru üreticilerinden Rolls Royce üretim ve sonrası hizmetler için bir veri toplama sistemi kurmuştur. Rolls-Royce, uçak motoru üretimi ve satış sonrası hizmetlerin kalitesi için büyük miktarda veri kullanmakta ve büyük veri analizi ile kararlar almaktadır. Analizler sonucunda, üretim stratejileri, arıza oluşturma ihtimallerini azaltan tasarım değişiklikleri, kaliteli servis hizmetleri ve öngörücü bakım kararları alınmakta. Firma motor hizmetleri için insanlara ek olarak nanorobot teknolojisi denemektedir. Öngörücü bakımın avantajlarından yararlanarak motor bakım planlamalarında büyük başarılar elde etmekte ve uçuş aksamalarını önlemektedir. Rolls-Royce, yaklaşık 14.000 motora ait titreşim, basınç, sıcaklık, hız sensörleri ile günlük 65.000 saatlik gaz türbini motoru çalışma verisi toplamaktadır. Toplanan veriler sayesinde günde yaklaşık 45 milyon dolara mal olan gaz türbini arızalarının neden olduğu gecikmeleri ve iptalleri en aza indirdiği bilinmektedir. Şirketin öngörücü bakımda başarı nedeni büyük veri analizini, akıllı sensörleri, yapay zekayı kullanma kabiliyetine sahip olmasıdır. Rolls-Royce gelecekte, makine öğrenimi (derin öğrenme) yoluyla bilgisayarların belirli durumlarda kendi kararlarını alabilecekleri bir iş ortamının olacağını öngörmektedir.

Dünyanın önde gelen otomobil şirketlerinden Hyundai, titreşim verilerini yapay zeka ile denetleyerek bir arıza öngörü sistemi geliştirmiştir. Bu sistemin sorunları %86 doğruluk oranı ile tespit ettiği yapılan deneyler ile anlaşılmıştır. Hyundai Motors öngörücü bakım ile arızalar ortaya çıkmadan tespit ederek önleyebilecek bir sistem kurmak için çalışmaktadır. Şirket, yapay zeka ile ses, titreşim, sıcaklık ve diğer sensör verilerini birleştirerek tüm mekanik sistemleri kapsayabilecek bir arıza tespit teknolojisi geliştirebileceği düşünülmektedir.

Bosch, çeşitli sektörlerde faaliyet gösteren dünyanın büyük endüstri şirketlerinden biridir. Şirket, kestirimci bakımı aktif olarak uygulayan lider şirketlerdendir ve üretim ortamındaki çeşitli kaynaklardan veri toplayıp analiz eden Nexeed Üretim Performans Yönetim Sistemini kullanmaktadır. Sistem, üretim hattındaki makinelerin mevcut durumunu ve bakım çalışmalarının en az duruş ile sağlanması için bir planlama yapmaktadır. Bosch, kestirimci bakım yönetimi ile üretim verimliliğini artırmakta ve meydana gelebilecek hataların maliyetini azaltmaktadır.

Nexeed Üretim Performans Yönetim Sistemi, bakım verilerine ek olarak süreç verilerini sürekli kaydederek ürün kalitesini de iyileştirebilir. Bosch, büyük veri analizi, akıllı sensörler, yapay zeka ve öngörücü bakım ile kalite yönetimini başarıyla sürdürmektedir [8].

Havacılık sektörünün öncü şirketlerinden General Elektrik, uçak motorlarının bakım planlaması için 2012 yılında 'Predix' isimli yazılımı geliştirmeye başladı. Bulut tabanlı çalışan bu sistem bakım operatörlerine motor verilerine gerçek zamanlı ulaşım ve analiz etme imkanı sunmaktaydı. Bu yazılım sayesinde dünyanın belirli bölgelerinde kullanılan motorların daha farklı bakım planına ihtiyacı olduğu ve bu bölgedeki motorların sınıflandırılmadan yapılan bakım planlarının dünyanın bütün bölgelerindeki uçak motorlarının bakım planlarını etkilediği için fazladan bakım ihtiyacı olduğu izlenimi verdiği anlaşılmıştır. Farklı bölgelerde kullanılan motor verileri ile daha verimli bakım planlamaları yapılarak büyük oranda gereksiz bakımın önüne geçilmiş oldu. Bu yazılımın topladığı gerçek zamanlı motor verileri kullanılarak yapılan öngörücü bakım modelinde GE ve birçok ilgili şirket büyük fayda sağlamış oldu [45].

Sivil havacılık endüstrisinde motor bakım verimliliğindeki her %1'lik iyileştirmenin ticari uçakların motor bakım maliyetlerini 250 milyon dolar azaltabileceği tahmin edilmektedir. Uçuş gecikmelerinin ve sefer iptallerinin ticari havayolu şirketlerine yaklaşık olarak 8 milyar dolara mal olduğu tahmin edilmektedir. Sadece ABD havayolu şirketleri için iyi planlanmış ve verimli olarak uygulanan öngörücü bakımın 60 bin civarında gecikmeyi veya iptali önleyebileceği tahmin edilmektedir [45]. Havayolu şirketlerinin bakım harcamalarının tüm harcamalar içindeki oranı %10 olarak tahmin edilmektedir [124].

Nesnelerin interneti, büyük veri, yapay zeka gibi teknolojilerin faydaları sayesinde birçok süreç yeniden şekillenmeye başlamıştır. Yapay zeka yöntemlerinin kullanılmaya başlandığı bakım süreçlerinde umut vaad eden dönüşümler yaşanmaya başlamıştır. Arıza ve sensör verilerinin yapay zeka yöntemleri ile anlamlandırılması sonucunda sadece arıza sebepleri ve sonucu için değil tüm sistemin gelecekte oluşabilecek arızaları için de bir öngörüye ulaşılabilmektedir [80].

Çeşitli sektörlerden öncü şirketlerin yapmış olduğu başarılı uygulamalar bize öngörücü bakım felsefesinin gelecekte diğer bakım türlerinden daha fazla tercih

edilebileceğini göstermektedir. Günümüz üretim anlayışında bakım faaliyetlerinin sektörlere getirdiği ek maliyetler bu konunun önemini her geçen gün arttığını göstermektedir ve arızaların daha oluşmadan önlenmesi için gelecek vaad eden bir ekosistem ortaya çıkmaya başlamıştır [7,21].



6. MATERYAL ve METOD

6.1. Materyal

Çalışmada I4.0 yapılarına uygun, endüstriyel nesnelerin interneti teknolojisi ile uyumlu bir otomasyon mimarisi oluşturulması amaçlanmıştır. Örnek sistemin, mimarisi ile donanımsal özellikleri bakımından esnek yapıda ve yeni nesil teknolojik cihazların kolay entegre edilebileceği bir düzlemde tasarlanması amaçlanmıştır. Yeni nesil sistemlerin en önemli özelliklerinin başında gelen bağlantılılık ve ağ üzerinden kesintisiz iletişim durumu bu uygulama örneğinde de öncelikli hedef olarak öne çıkmıştır. Oluşturulması amaçlanan mimaride, cihazların birbiri ile iletişimi ve bu iletişim sonucunda makine üzerinde bulunan çeşitli sensör verilerinin elde edilimi başarılmaya çalışılmıştır. Bu tür yeni nesil uygulamalarda karşılaşılabilecek sorunların ve çözümlerinin de ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

Sistem mobil ağ üzerinden erişim yapılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Kablosuz sistemlerde karşılaşılabilecek teknik sorunların görülerek çözüm yollarının incelenmesi amaçlanmıştır. Ek olarak sistem, arızaların tespitinin kolaylaştırılması açısından uygun PLC yazılım mimarisi üzerinden çalıştırılmıştır.

Örnek uygulamada, mekanik bölüm olarak mühimmat üretiminde kullanılan ve hidrolik preslere sıcak çelik parçaların taşınması amacıyla tasarlanan bir sistem kullanılmıştır. Sistem hidrolik ünitesindeki yağ tankından hidrolik pompa ile sisteme yağ aktarılmaktadır. Hidrolik pompa 5.5 KW asenkron elektrik motoru ile tahrik edilmektedir. Sisteme aktarılan hidrolik yağ, yön valfleri ile kontrol edilmekte ve manipülâtör üzerindeki pistonların istenilen pozisyonlara hareket etmesi sağlanmaktadır. Kullanılan sistemin elektrik/otomasyon kısmı tamamen yeniden düzenlenmiştir. Şekil 6.1’de sistem genel görünümü bulunmaktadır.

Örnek olarak kritik bir sistemde kullanılan bir parçanın üreticisinin taahhüt ettiği çalışma ömrünün üstüne çıkıldığında riske edilmeden değişiminin yapılması sağlanabilir. Bu ekipman verilerinin kayıt altına alınması ve veri analizinin yapılmasının bir diğer amacı ise işletmeler açısından büyük maliyetlere neden olan ekipman ve yedek parça ömrünün ve kalitesinin kontrolüdür. Aynı şartlar altında hangi markanın ürününün kullanılması gerektiği ve tüm fabrikada kullanılan kritik ekipmanların kalitesinin belirli seviyelerin üzerinde tutulmasıdır.



7. SONUÇ ve GELECEK ÇALIŞMALAR

I4.0, yapay zeka, siber fiziksel sistemler, robotik teknolojiler, akıllı fabrikalar ve benzeri birçok teknolojik gelişim toplumların geleceğini şekillendirmektedir. Tüm bu teknolojilerin temelini oluşturan sistemler, verimli ve kaliteli bakım/onarım ihtiyacı duymaktadır. Yeni nesil bakım/onarım da bu teknolojik gelişmelerden etkilenmiş ve arıza oluşup sistemi etkilemeye başlamadan öngörülmesi ve çözüme kavuşması amaçları ile yeniden şekillenmeye başlamıştır. Sistemlerin arızalarının tespitinde, veri toplama, verilerin anlamlandırılması, arıza nedeninin ve boyutunun tahmin/tespit edilmesi önem arz etmektedir. Bunu sağlayabilmek için veri elde ediminin kaliteli ve güvenilir olması gerekmektedir. Çalışmamızda kaliteli ve güvenilir sistem verilerinin günümüz nesnelerin interneti uygulamalarına uygun olarak elde edilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmamızda, endüstriyel nesnelerin interneti (IIoT) konsepti ile uyumlu, bağlantılı ve mobil erişim imkanı olan bir otomasyon mimarisi oluşturulmuştur. Sistemin kontrol programı da arıza tespit verimliliğini artıracak şekilde adım (step) mantığında düzenlenmiştir. Öngörücü (kestirimci) bakım için gerekli olan basınç, yağ sıcaklık, titreşim, dijital giriş/çıkış durumları, motor akım verileri Wi-Fi bağlantı üzerinden güvenilir ve kaliteli olarak kaydedilmiştir.

Uygulamamızda maliyet etkin bir çözüme ulaşmak amacıyla sistem sensör verilerinin elde ediminin merkez kontrol PLC üzerinden (Sistemde S7-1513) yapılması amaçlanmış ve sensörler için ek modül kullanılmamıştır. Bu durumda ek maliyetlerin önüne geçilmiştir ancak, sistem merkez kontrol PLC'nin kontrol edeceği makine/ekipman ve işlem arttıkça işlemci yükünün artacağı ve sistemin olumsuz yönde etkileyeceği düşünülmektedir. Ek olarak sistemde kullanılan sensör verileri için PLC ile saniyede en fazla 50 örnekleme veri elde edilmiştir. Güvenilir öngörü için bazı verilerin daha fazla örnekleme yapılması gerekmektedir. Örnek olarak titreşim verisi için sensör çözünürlüğü 1000 Hz ancak PLC üzerinden bu seviyede veri örneği elde edimi mümkün olmamıştır. Örnekleme sayısı yüksek olan sensörler için ek analog modül kullanımının daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Sistem verilerinin kablosuz erişimi ve kaydı için kullanılan Siemens Web Server özelliği sınırlı bir veri kayıt imkanı sunmaktadır. Bu durumda veri kayıt sınırı durum tabanlı öngörücü bakımın güvenilirliğini etkileyeceği için veri kaydı ve analizi için uygun bir arayüz geliştirilmesi gerektiği düşünülmektedir. Geliştirilen arayüzde kullanılacak sistem bilgisayarının, uygun işlem yükünü kaldırabilecek bir işlemciye ve veri yığınının fazlalığına uygun bir hafıza kapasitesine sahip olması gerektiği düşünülmektedir.

Bir diğer bulgu ise kablosuz bağlantı için kullanılan Wi-Fi modüllerin endüstriyel uygulamalara ve standartlara uygun cihazlar arasından seçilmesi gerekliliğidir. Uygulamalar sırasında kullanılan cihazların arıza veya iletişim kesilmelerinde gerekli tanılama ve düzeltme seçenekleri olmadığından veri kayıpları yaşandığı görülmüştür. Kullanılan cihazların gerçek zamanlı veri iletişimini, veri kalitesinde bozulma olmadan hızlı ve güvenilir bir şekilde sağlaması gerekmektedir. Kullanılacak cihazların, yedekli iletişim özelliği ve iletişim kopması veya çeşitli arızalarda tanılama ve uyarı özelliklerinin bulunması gerektiği düşünülmektedir.

Yapılan uygulama sonucunda arıza öngörü ve tespiti için güvenilir veri toplama aşaması tamamlanmıştır. Gelecek dönemde sistem sensör verilerinin gerçek zamanlı olarak kayıt altına alınması ve sistemin dijital ikizi olarak da isimlendirilebilecek bir sanal kopyasının oluşturulması çalışmalarına devam edilmesi amaçlanmaktadır. Operatör ve bakım personellerinin kullanımı amacı ile bir yazılım alt yapısının oluşturulması planlanmaktadır. Son aşama olan arıza tahmin ve tespiti için makine öğrenmesi vb. yapay zeka uygulama yazılım altyapısı ve algoritmaları oluşturulması amaçlanmaktadır.

Araştırmalar sonucunda ulaşılan genel görüş, yeni nesil sistemlerde olduğu gibi bakım stratejilerinde de esneklik büyük fayda sağlayacaktır. İşletmelerin, çalışma şartlarına özel bakım strateji ve yöntemlerini uygulamaya başlayacakları öngörülmektedir. Bir fabrika ortamında genel bir bakım stratejisi belirlenmesi yöneliminden farklı olarak, tüm cihaz verileri ile yapılan genel bir değerlendirme sonucu her makine veya donanıma uygun bakım yöntemi uygulamasının yaygınlık kazanacağı düşünülmektedir. Araştırmaların yoğunluğundan ve konu dağılımından hareketle, yapay zeka ve uygulamaları sayesinde kendi bakım ve onarımını yapan sistemlerin kullanıma sunulacağı, arıza ve duruş olmayan insansız akıllı fabrika ortamlarının yaygınlaşacağı öngörülmektedir.

8. KAYNAKÇA

- [1] Calp M H, Bahçekapılı E, Berigel M. (2018). Endüstri 4.0 Kapsamında Akıllı Fabrikaların İncelenmesi. Fifth International Management Information Systems Conference, Ankara, Türkiye, 24-26 Ekim.
- [2] Durdu A, İlbay Bozkurt Ü. (2017). Akıllı fabrikalarda dağıtılmış kontrol sistemleri uygulaması ve RFID yaklaşımı. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 8(3), 515-523.
- [3] Osterrieder P, Budde L, Friedli T. (2020). The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review. International Journal of Production Economics, 221, 107476.
- [4] Kayar A, Ayvaz B, Öztürk, F. (2018). Akıllı fabrikalar, akıllı üretim: endüstri 4.0'a genel bakış. In International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech) , Ankara, Türkiye, 22-23 Kasım.
- [5] IFR-International Federation Of Robotics. "World Robotics 2021", 28 October 2021,
https://ifr.org/downloads/press2018/2021_10_28_WR_PK_Presentation_long_version.pdf (Erişim Tarihi:29.11.2021)
- [6] Oztemel E, Gursev S. (2018). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. Journal of Intelligent Manufacturing, 31(1), 127-182.
- [7] Gürsoy M Ü, Çolak U C, Gökçe M H, Akkulak C, Ötleş S. (2019). ENDÜSTRİ İÇİN KESTİRİMCİ BAKIM. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 3(1), 56-66.
- [8] M Lee S, Lee D, SungKim Y. (2019). The quality management ecosystem for predictive maintenance in the Industry 4.0 era. International Journal of Quality Innovation, 5(1), 1-11.

- [9] Fusko M, Rakyta M, Krajcovic M, Dulina L, Gaso M, Grznar P. (2018). BASICS OF DESIGNING MAINTENANCE PROCESSES IN INDUSTRY 4.0 . MM Science Journal, 2018(1), 2252-2259.
- [10] Kumar Pinjala S, Pintelon L, Vereecke A. (2006). An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies. International Journal of Production Economics, 104(1), 214-229.
- [11] Zhang W, Yang D, Wang H. (2019). Data-Driven Methods for Predictive Maintenance of Industrial Equipment: A Survey. IEEE Systems Journal, 13(3), 2213-2227.
- [12] Havelsan, “ADVENT - Ağ Destekli Veri Entegre Savaş Yönetim Sistemi Özellikleri”. <https://www.havelsan.com.tr/sektorler/savunma-ve-guvenlik/deniz/su-ustu-savas-yonetim-sistemleri/havelsan-advent> (Erişim Tarihi:04.01.2022)
- [13] Havelsan, “Taktik Data Link Yönetim Merkezi Özellikleri”. <https://www.havelsan.com.tr/sektorler/savunma-ve-guvenlik/hava/taktik-data-link-yonetim-sistemi/havelsan-taktik-data-link-yonetim-sistemi> (Erişim Tarihi:20.12.2021)
- [14] Lockheed Martin, “ALIS - Autonomic Logistics Information System”. <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/autonomic-logistics-information-system-alis.html> (Erişim Tarihi:12.12.2021)
- [15] Aselsan, “Siper - Uzun Menzilli Bölge Hava ve Füze Savunma Sistemi Özellikleri”. <https://www.aselsan.com.tr/tr/cozumlerimiz/hava-ve-fuze-savunma-sistemleri/hava-ve-fuze-savunma-sistemleri/uzun-menzilli-bolge-hava-ve-fuze-savunma-sistemi-siper> (Erişim Tarihi:12.12.2021)
- [16] Li Z, Wang Y, Wang K-S. (2017). Intelligent predictive maintenance for fault diagnosis and prognosis in machine centers: Industry 4.0 scenario. Advances in Manufacturing, 5(4), 377-387.
- [17] Yan J, Meng Y, Lu L, Li L. (2017). Industrial Big Data in an Industry 4.0 Environment: Challenges Schemes and Applications for Predictive Maintenance. IEEE Access, 5, 23484-23491.

- [18] T.P.Nguyen K, Medjaher K. (2019). A new dynamic predictive maintenance framework using deep learning for failure prognostics . *Reliability Engineering & System Safety*, 188, 251-262.
- [19] Radu Constantin P, Robert I. (2017). Application of IoT concept on predictive maintenance of industrial equipment. *MATEC Web of Conferences*, 121, 02008.
- [20] Cachada A, Miguel Moreira P, Romero L, Barbosa J, Leitno P, A.S. Geraldés C, et al. (2018). Maintenance 4.0: Intelligent and Predictive Maintenance System Architecture. 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 139-146.
- [21] Yazıcı A, Çınar E, Sarıççek İ, Rana Dünder D. (2021). KESTİRİMCİ BAKIMDA MAKİNE ÖĞRENMEŞİ: LİTERATÜR ARAŞTIRMASI. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 256-276.
- [22] Mordor Intelligence, “GLOBAL MAINTENANCE, REPAIR, AND OPERATIONS (MRO) MARKET - GROWTH, TRENDS, COVID-19 IMPACT, AND FORECASTS (2021 - 2026)”, <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/maintenance-repair-operations-mro-industry> (Erişim Tarihi:20.10.2021)
- [23] Oliver Wyman, “Global Fleet and MRO Market Forecast 2021-2031”. https://www.oliverwyman.com/content/dam/oliver-wyman/v2/media/2021/feb/Global_FLeet_and_MRO_Market_Forecast_2021-2031_OW.pdf (Erişim Tarihi:20.10.2021)
- [24] Alcácer V, Cruz-Machado V. (2019). Scanning The Industry 4.0: A Literature Review On Technologies For Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, An International Journal*, 22(3), 899-919.
- [25] Şekkeli Z H, Bakan İ. (2018). AKILLI FABRİKALAR. *Journal of Life Economics*, 5(4), 203-220.
- [26] Fırat O Z, Fırat S Ü. (2017). Endüstri 4.0 Yolculuğunda Trendler ve Robotlar. *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 46(2), 211-223.
- [27] Yıldız A. (2018). Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 546-556.

- [28] Lucas-Estañ M C, Sepulcre M, Raptis T P, Passarella A, Conti M. (2018). Emerging Trends In Hybrid Wireless Communication and Data Management For The Industry 4.0. *Electronics*, 7(12), 400.
- [29] Vitturi S, Zunino C, Sauter T. (2019). Industrial Communication Systems and Their Future Challenges: Next-Generation Ethernet, IIoT, and 5G. *Proceedings of the IEEE*, 107(6), 944-961.
- [30] Ercan T, Kutay M. (2016). Endüstride Nesnelerin İnterneti (IoT) Uygulamaları. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(3), 599-607.
- [31] Dias A L, Sestito G S, Turcato A C, Brandão D. (2018). Panorama, Challenges and Opportunities In PROFINET Protocol Research. 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 186-193, November 2018.
- [32] Lu Y, Liu C, Kevin I, Wang K, Huang H, Xu X. (2020). Digital Twin-Driven Smart Manufacturing: Connotation, Reference Model, Applications and Research Issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837.
- [33] Fuller A, Fan Z, Day C, Barlow C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952-108971.
- [34] Sahal R, G.Breslin J, IntizarAli M. (2020). Big data and stream processing platforms for Industry 4.0 requirements mapping for a predictive maintenance use case. *Journal of Manufacturing Systems*, 54, 138-151.
- [35] Ünal G. (2009). Güvenilirlik Merkezli Bakım ve Bir Endüstriyel Uygulama. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [36] Görener A. (2013). Bakım stratejilerinin bulanık karar ortamında seçimi için WSA ve TOPSIS yöntemlerinin uygulanması. *Sigma: Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 31(3), 159-177.
- [37] Öteyaka H C, Öteyaka M Ö, Köse R. (2018). Ürün Maliyetini Azaltmak İçin İdeal Bakım Yönetimi. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 2(2), 56-60.
- [38] Öteyaka H. C. (2020). Endüstriyel Bir Üretim Hattı İçin Optimal Bakım Stratejisinin ve Periyodunun Belirlenmesi. Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye.

- [39] Özdemir H, Önel İ Y, Duyar A. (2016). İNOVATİF MODEL BAZLI ARIZA ERKEN UYARI YAZILIMIYLA BEKLENMEDİK DURUŞLARA SON VERME. *Mühendis ve Makine*, 57(672), 44-49.
- [40] Canizo M, Onieva E, Conde A, Charramendieta S, Trujillo S. (2017). Real-time predictive maintenance for wind turbines using Big Data frameworks. *IEEE International Conference On Prognostics and Health Management (ICPHM)*, 70-77, June 2017.
- [41] Dao P B, Staszewski W J, Barszcz T, Uhl T. (2018). Condition monitoring and fault detection in wind turbines based on cointegration analysis of SCADA data. *Renewable Energy*, 116, 107-122.
- [42] Liu Z, Meyendorf N, Mrad N. (2018). The Role Of Data Fusion In Predictive Maintenance Using Digital Twin. *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1949, No. 1, p. 020023). AIP Publishing LLC. April, 2018.
- [43] Civerchia F, Bocchino S, Salvadori C, Rossi E, Maggiani L, Petracca M. (2017). Industrial Internet Of Things Monitoring Solution For Advanced Predictive Maintenance Applications. *Journal of Industrial Information Integration*, 7, 4-12.
- [44] Bal A. (2013). Üretim Tesisleri İçin Rfid Destekli Bakım Yönetimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [45] Daily J, Peterson J. (2017). Predictive Maintenance: How Big Data Analysis Can Improve Maintenance. In *Supply Chain Integration Challenges In Commercial Aerospace*, Springer, 267-278,.
- [46] Garoudja E, Harrou F, Sun Y, Kara K, Chouder A, Silvestre S. (2017). Statistical fault detection in photovoltaic systems. *Solar Energy*, 150, 485-499.
- [47] Eraslan Ü G, Balo F, Uçar U U, Çetin B. (2018). Çok Kriterli Karar Verme Metodu Çerçevesinde Elektrik Arıza Analizinin Değerlendirilmesi. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi, Özel Sayı*, 135-146.
- [48] Sonia Kiangala K, Wang Z. (2018). Initiating predictive maintenance for a conveyor motor in a bottling plant using industry 4.0 concepts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(9-12), 3251-3271.
- [49] Aydın G, Meran C. (2018). Çimento Sektöründe Kestirimci Bakımla Arıza Teşhisi ve Önlenmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(692), 48-67.

- [50] Glowacz A, Glowacz W, Kozik J, Piech K, Gutten M, Caesarendra W, Khan Z F. (2019). Detection Of Deterioration Of Three-phase Induction Motor Using Vibration Signals. *Measurement Science Review*, 19(6), 241-249.
- [51] Tsytkin M. (2017). Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique—diagnosis Of Electromagnetic Anomalies. 2017 IEEE AUTOTESTCON, September 2017.
- [52] Çeven S, Bayır R. (2020). Bir Asenkron Motorun Mekanik Titreşim Sinyallerinin Ölçülerek Arıza Analizinin Yapılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Özel Sayı, 312-322, Ağustos 2020.
- [53] Nayana B R, Geethanjali P. (2017). Analysis Of Statistical Time-domain Features Effectiveness In Identification Of Bearing Faults From Vibration Signal. *IEEE Sensors Journal*, 17(17), 5618-5625.
- [54] Şeker S, Ayaz E. (2002). Endüstriyel Süreçlerde Durum İzleme ve Öngörülü Bakım Teknolojileri. *İstanbul Üniversitesi Elektrik-Elektronik Dergisi*, 1(1), 140-142.
- [55] Erol S S. (2015). Dinamik Sistemlerin Kestirimci Bakımına Etki Eden Faktörlerin Durum Bazlı İncelenmesi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.
- [56] Bahadır KOCA Y, ÜNSAL A. (2017). Asenkron Motorların Elektriksel ve Mekaniksel Arızalarının Değerlendirilmesi. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 7(2), 37-46.
- [57] Çıra F. (2017). Asenkron Motorlarda Gerçek Zamanlı Durum İzleme ve Arıza Tespiti. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 7(1), 12-24.
- [58] Tabak A, Özkaymak M. (2020). ELEKTRİK MOTORLARINDA UYGULANAN BAKIM YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ, KARŞILAŞTIRILMASI VE UZAKTAN ERİŞİMİN KESTİRİMCİ BAKIMA ETKİSİ. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(4), 889-905.
- [59] Glowacz A. (2019). Fault Diagnosis Of Single-Phase Induction Motor Based On Acoustic Signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 117, 65-80.
- [60] Yaman G, Karadayı H M. (2014). Titreşim Analizi İle Pompalarda Arıza Tesbiti ve Kestirimci Bakım İçin Örnek Bir Çalışma. *Tesisat Mühendisliği*, 140, 36-51.

- [61] Antonino-Daviu, J, Popaleny P. (2018). Detection of induction motor coupling unbalanced and misalignment via advanced transient current signature analysis. XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2359-2364, September 2018.
- [62] Manohar M, Das S. (2017). Current sensor fault-tolerant control for direct torque control of induction motor drive using flux-linkage observer. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 13(6), 2824-2833.
- [63] Minaz M R, Yıldız K. (2019). İndüksiyon Motorun Mekanik Arıza Teşhisinde Makine Öğrenme Yöntemlerinin Kullanılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 16, 881-904.
- [64] Bayindir R, Cetinceviz Y. (2011). A water pumping control system with a programmable logic controller (PLC) and industrial wireless modules for industrial plants—An experimental setup. ISA transactions, 50(2), 321-328.
- [65] Robert S G, Bizon N, Oproescu M. (2018). The importance of PLC in the predictive maintenance of electronic equipment. 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 1-5, June 2018.
- [66] Yılmaz M, Düğenci M, Çayır E. (2011). PLC İle SCADA Üzerinden Akım Tabanlı Makine Durum İzlemesi ve Arıza Teşhisi. 6th International Advanced Technologies Symposium (Iats' 11), Elazığ, Türkiye, 16-18 Mayıs 2011.
- [67] Shao S, Yan R, Lu Y, Wang P, Gao R X. (2019). DCNN-Based Multi-Signal Induction Motor Fault Diagnosis. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 69(6), 2658-2669.
- [68] Ali M Z, Shabbir M N S K, Liang X, Zhang Y, Hu T. (2019). Machine Learning-Based Fault Diagnosis for Single and Multi-Faults in Induction Motors Using Measured Stator Currents and Vibration Signals. IEEE Transactions on Industry Applications, 55(3), 2378-2391.
- [69] Sun W, Zhao R, Yan R, Shao S, Chen X. (2017). Convolutional Discriminative Feature Learning For Induction Motor Fault Diagnosis. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 13(3), 1350-1359.
- [70] Ayaz E, Şeker S. (2002). İleri işaret işleme yöntemleri ile elektrik motorlarında rulman arıza tanısı. İTÜDERGİSİ/d, 1(1).

- [71] Gangsar P, Tiwari R. (2017). Comparative investigation of vibration and current monitoring for prediction of mechanical and electrical faults in induction motor based on multiclass-support vector machine algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 94, 464-481.
- [72] Ayaz E. (2002). Elektrik Motorlarında Dalgacık Analizi Yaklaşımı İle Rulman Arıza Tanısı ve Yapay Zeka Tabanlı Bir Durum İzleme Sistemi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [73] Aydın İ. (2011). Gerçek Zamanlı Durum İzleme ve Arıza Teşhisi İçin Bağışık Akıllı Hesaplama Tekniklerinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.
- [74] Aliustaoğlu C. (2008). Rulman Arızalarının Gerçek Zamanda Analizi ve Arıza Kaynaklarının Tespit Edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
- [75] Carvalho T P, Soares F A, Vita R, Francisco R D P, Basto J P, Alcalá S G. (2019). A Systematic Literature Review Of Machine Learning Methods Applied To Predictive Maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024.
- [76] Amruthnath N, Gupta T. (2018). A Research Study On Unsupervised Machine Learning Algorithms For Early Fault Detection In Predictive Maintenance. 5th International Conference On Industrial Engineering And Applications (ICIEA) IEEE, 355-361, April 2018.
- [77] Luo B, Wang H, Liu H, Li B, Peng F. (2018). Early fault detection of machine tools based on deep learning and dynamic identification. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 509-518.
- [78] Kızrak M A, Bolat B. (2019). Uçak Motoru Sağlığı için Uzun-Kısa Süreli Bellek Yöntemi ile Öngörücü Bakım. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 12(2), 103-109.
- [79] Öztanır O. (2018). Makine Öğrenmesi Kullanılarak Kestirimci Bakım. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- [80] Çömlekçi O. (2020). Endüstriyel Otomasyon Sistemlerinde Yapay Zeka Yöntemleri İle Arıza Tespiti. Yüksek Lisans Tezi. Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.

- [81] Zhao Y, Li T, Zhang X, Zhang C. (2019). Artificial intelligence-based fault detection and diagnosis methods for building energy systems: Advantages, challenges and the future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 85-101.
- [82] Güngör E. (2007). Yapay Sinir Ağları Yardımı İle Makine Arızalarının Önceden Tahmin Edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
- [83] Muştu M, Bütün E. (2018). HAVACILIK TARİHİ İÇERİSİNDE BAKIM GÜVENİLİRLİĞİ. *Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi*, 3(2), 70-77.
- [84] Martin J D, Finke D A, Ligetti C B. (2011). On the estimation of operations and maintenance costs for defense systems. 2011 Winter Simulation Conference (WSC), 2478-2489, December 2011.
- [85] Zeytin M. (2020). Paletli Bir Zırhlı Aracın Süspansiyon Sisteminin Saha Verileri İle Hata Türleri ve Etkileri Analizi Sonuçlarına Göre Güvenilirlik Merkezli Bakım Planlaması. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- [86] Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. 2023 Sanayi ve Teknolojisi Strateji Belgesi - 18 Eylül 2019. <https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/SanayiStratejiBelgesi2023.pdf> (Erişim Tarihi:12.12.2021)
- [87] Endüstri 4.0 Platformu. Endüstri Tarihine Kısa Bir Yolculuk - Endüstri 4.0'ın Yapısı. <https://www.endustri40.com/endustri-tarihine-kisa-bir-yolculuk/> (Erişim Tarihi:17.12.2021)
- [88] Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer networks*, 54(15), 2787-2805.
- [89] Sagioglu, S., & Sinanc, D. (2013). Big data: A review. 2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS). <https://doi.org/10.1109/cts.2013.6567202>
- [90] N.O.Sadiku, M., M.Musa, S., & D.Momoh, O. (2014). Cloud Computing: Opportunities and Challenges. *IEEE Potentials*. <https://doi.org/10.1109/mpot.2013.2279684>
- [91] Mirashe, S. P., & Kalyankar, N. V. (2010). Cloud computing. arXiv preprint arXiv:1003.4074.

- [92] Craigen, Dan, Nadia Diakun-Thibault, and Randy Purse. (2014). Defining cybersecurity. *Technology Innovation Management Review* 4.10
- [93] Çelen, S. (2017). Sanayi 4.0 ve simülasyon. *International journal of 3D printing technologies and digital industry*, 1(1), 9-26.
- [94] Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo, P., Damiani, E., & Ivkovic, M. (2010). Augmented reality technologies systems and applications. *Multimedia Tools and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s11042-010-0660-6>
- [95] Yazıcı, A. (2016). Endüstri 4.0 ve Otonom Robotlar. *EMO Elektrik Mühendisliği Dergisi*. 459, 39.
- [96] Sztipanovits, J., Koutsoukos, X., Karsai, G., Kottenstette, N., Antsaklis, P., Gupta, V., ... Baras, J. (2012). Toward a Science of Cyber-Physical System Integration. *Proceedings of the IEEE*. <https://doi.org/10.1109/jproc.2011.2161529>
- [97] Gökhan, Ö. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi. Mühendislik Bilimleri Dergisi* 9.1 (2020), 606-621.
- [98] Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. Destek ve Teşvikler. <https://www.sanayi.gov.tr/destek-ve-tesvikler/yatirim-tesvik-sistemleri> (Erişim Tarihi:12.12.2021)
- [99] Tübitak. Destekler. <https://www.tubitak.gov.tr/tr/destekler> (Erişim tarihi:12.12.2021)
- [100] Anadolu Ajansı. “Yapay Zeka Stratejisi“ <https://www.aa.com.tr/uploads/userFiles/23525b19-4139-468c-8051-ba931b6738e4/AGUSTOS2021%2Fyapay-B.jpg> (Erişim Tarihi:25.07.2022)
- [101] Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi. Ulusal Yapay Zeka Stratejisi 2021-2025. <https://cbddo.gov.tr/uyzs> (Erişim Tarihi:11.05.2022)
- [102] Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayi Başkanlığı. Arge ve Teknoloji Yönetim Portalı. <https://arge.ssb.gov.tr/Sayfalar/default.aspx> (Erişim Tarihi:12.12.2021)
- [103] Türkiye İstatistik Kurumu. Araştırma Geliştirme Faaliyetleri Araştırması - 2020. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Research-and-Development-Activities-Survey-2020-37439> (Erişim Tarihi:12.12.2021)

- [104] Anadolu Ajansı. Küresel Askeri Harcamalar 2020. <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/kuresel-askeri-harcamalar-2020de-yaklasik-2-trilyon-dolara-cikti/2222077> (Erişim Tarihi:20.10.2021)
- [105] NATO. Defence Expenditure of NATO Countries (2014-2021). https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_184844.htm (Erişim Tarihi:20.10.2021)
- [106] War Factories (TV Series-2019). <https://www.imdb.com/title/tt11281232/> (Erişim Tarihi:20.10.2021)
- [107] World War II in Numbers (TV Series-2019). <https://www.imdb.com/title/tt13926382/> (Erişim Tarihi:20.10.2021)
- [108] Doyle, Peter. (2013). World War II in numbers. 1st ed. A&C Black,.
- [109] Lopez, Jean, Nicolas Aubin, and Vincent Bernard, eds. (2019). World War II Infographics. 1st ed. Thames & Hudson.
- [110] Ellis, John, Mike Cox, and Michael Cox. (1993). The World War I databook: the essential facts and figures for all the combatants. 1st ed. Aurum Press Ltd.
- [111] World War I-II Archive. <https://web.archive.org/web/20040304104716/http://members.aol.com/veterans/warlib6d.htm> (Erişim Tarihi:20.10.2021)
- [112] Ders Çıkarılması Gereken Bir Savaş Falkland Savaşı. <https://www.savunmasanayi.org/falkland-savasi/> (Erişim Tarihi:25.07.2022)
- [113] Özel, A. (2007). Teknolojiye Yetişmek ve Sahip Olmak: Aselsan Örneği. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi. İstanbul. Türkiye.
- [114] Clark, D. (1988). The design philosophy of the DARPA Internet protocols. In Symposium proceedings on Communications architectures and protocols (pp. 106-114). 1988, August.
- [115] The Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). (Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı). <https://www.darpa.mil/> (Erişim Tarihi:25.07.2022)
- [116] STM Teknolojik Düşünce Merkezi (STM Thinktech). Savunma Sanayiinde Teknolojik Dönüşüm ve İstihdam https://thinktech.stm.com.tr/uploads/docs/1630420774_stm-savunma-sanayiinde-teknolojik-donusum.pdf (Erişim Tarihi:11.05.2022)

[117] Kandakoğlu A. (2012). Harbe Hazırlığın Yönetimine Yönelik Bir Karar Destek Sistemi. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. İstanbul, Türkiye.

[118] Ervin S I. (2012). Defense Industry Targets \$150B Weapons Maintenance Market. National Defense, 97(704), 21-23. https://www.jstor.org/stable/27019413?seq=1#metadata_info_tab_contents (Erişim Tarihi:11.05.2022)

[119] Why Digital Twins Are One of the Building Blocks of the Metaverse.

<https://www.thedigitalspeaker.com/digital-twins-building-block-metaverse/>

(Erişim Tarihi:12.05.2022)

[120] STM ThinkTech. Savunma ve Güvenlik Blog. Dijital İkiz Teknolojileri ve Üretime Faydaları. <https://thinktech.stm.com.tr/tr/dijital-ikiz-teknolojileri-ve-uretime-faydalari> (Erişim Tarihi:28.07.2022)

[121] Çalış D, M. (2022). İŞLETMELER İÇİN YENİ BİR VERİMLİLİK TEKNOLOJİSİ: DİJİTAL İKİZ. Verimlilik Dergisi. Özel Sayı, 189-206. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.981349>

[122] Tao F, Zhang H, Liu A, Nee A Y. (2018). Digital Twin In Industry: State-Of-The-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15(4), 2405-2415.

[123] Babacan, U, C. Meran, C. (2019). Bakıma Yönelik Tasarım ve Uygulamaları”. Mühendis ve Makina, 60(695), 119-131.

[124] Kalkınma Bakanlığı. (2018). HAVA TAŞITLARI ÜRETİMİ VE BAKIM ONARIMI - ÇALIŞMA GRUBU RAPORU 2018 Ankara, Türkiye. https://www.sbb.gov.tr/wpcontent/uploads/2020/04/HavaAraclariUretimi_ve_BakimOnarimiCalismaGrubuRaporu.pdf (Erişim Tarihi:20.10.2021)

[125] Siemens CPU 1513-1 PN Özellikler. <https://mall.industry.siemens.com/mall/tr/tr/Catalog/Products/10204210?tree=CatalogTree> (Erişim Tarihi:24.09.2022)

[126] Siemens SIMATIC ET 200MP Özellikler. <https://mall.industry.siemens.com/mall/tr/tr/Catalog/Products/10045647?tree=CatalogTree> (Erişim Tarihi:24.09.2022)

- [127] Siemens CPU 1215 Özellikler.
<https://mall.industry.siemens.com/mall/tr/tr/Catalog/Products/10045647?tree=CatalogTree> (Erişim Tarihi:24.09.2022)
- [128] Siemens Sinamics G120C Motor Sürücü Özellikler.
<https://mall.industry.siemens.com/mall/tr/tr/Catalog/Products/10121995?tree=CatalogTree> (Erişim Tarihi:24.09.2022)
- [129] Siemens PROFİNET Özellikler.
<https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industrial-communication/profinet.html> (Erişim Tarihi:24.09.2022)
- [130] MODBUS TCP. <https://www.elektrikport.com/makale-detay/modbus-nedir/17063#ad-image-0> (Erişim Tarihi:24.09.2022)
- [131] Siemens Web Server Özellikleri.
<https://support.industry.siemens.com/cs/document/68011496/creating-and-using-user-defined-web-pages-on-s7-1200-s7-1500?dti=0&lc=en-WW> (Erişim Tarihi:24.09.2022)
- [132] Phoenix Contact Katı-hal Röleleri ve Elektromekanik Röleler Ürün Özellikleri.
<https://www.phoenixcontact.com/tr-tr/urunler/tek-role-rel-mr-24dc21-2961105> (Erişim Tarihi:24.09.2022)
- [133] Festo Ürün Kullanım Ömrü.
https://www.festo.com/net/tr_tr/SupportPortal/Files/425242/Lebensdauer_FIF_150806_TR.pdf (Erişim Tarihi:24.09.2022)

412, 2021-08-31,15:34:09.895, 314, 492, 113, 1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.562000E+0
413, 2021-08-31,15:34:09.916, 314, 492, 115, 1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.561000E+0
414, 2021-08-31,15:34:09.930, 314, 492, 115, 1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.561000E+0
.....
.....
500, 2021-08-31,15:34:11.727, 314, 498, 108, 1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.568000E+0
501, 2021-08-31,15:34:11.740, 314, 498, 108, 1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.572001E+0
502, 2021-08-31,15:34:11.754, 314, 498, 108, 1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.573000E+0
503, 2021-08-31,15:34:11.781, 314, 498, 108, 1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.565001E+0
504, 2021-08-31,15:34:11.796, 314, 498, 108, 1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.569000E+0
.....
.....
820, 2021-08-31,15:34:18.664, 314, 717, 107, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.729001E+0
821, 2021-08-31,15:34:18.712, 314, 717, 107, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.727000E+0
822, 2021-08-31,15:34:18.726, 314, 717, 107, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.723001E+0
823, 2021-08-31,15:34:18.747, 314, 717, 107, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.725000E+0
824, 2021-08-31,15:34:18.760, 314, 717, 107, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.724000E+0
.....
.....
1100, 2021-08-31,15:34:24.789, 313, 357, 250, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.529000E+0
1101, 2021-08-31,15:34:24.804, 314, 357, 250, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.522000E+0
1102, 2021-08-31,15:34:24.819, 314, 357, 250, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.519001E+0
1103, 2021-08-31,15:34:24.836, 314, 357, 250, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.516000E+0
.....
.....
1210, 2021-08-31,15:34:27.276, 314, 370, 125, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.492001E+0
1211, 2021-08-31,15:34:27.298, 314, 370, 125, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.490000E+0
1212, 2021-08-31,15:34:27.317, 314, 370, 125, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.488000E+0
1213, 2021-08-31,15:34:27.332, 314, 370, 125, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.490000E+0
.....
.....
1650, 2021-08-31,15:34:37.597, 312, 899, 124, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.863000E+0
1651, 2021-08-31,15:34:37.617, 312, 899, 124, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.865000E+0
1652, 2021-08-31,15:34:37.635, 312, 899, 124, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.865000E+0
1653, 2021-08-31,15:34:37.653, 312, 899, 124, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.867001E+0
1654, 2021-08-31,15:34:37.669, 312, 899, 124, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.866000E+0
.....
.....
2000, 2021-08-31,15:34:46.224, 312, 899, 112, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.868001E+0
2001, 2021-08-31,15:34:46.243, 312, 899, 112, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.873000E+0
2002, 2021-08-31,15:34:46.263, 312, 899, 112, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.874001E+0
2003, 2021-08-31,15:34:46.284, 312, 899, 112, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.878000E+0
2004, 2021-08-31,15:34:46.300, 312, 899, 112, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.879000E+0
2005, 2021-08-31,15:34:46.324, 312, 899, 112, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.882000E+0
.....
.....

2600, 2021-08-31,15:35:01.985, 312, 544, 96, 1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.609000E+0
 2601, 2021-08-31,15:35:02.002, 312, 544, 96, 1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.610000E+0
 2602, 2021-08-31,15:35:02.030, 312, 544, 96, 1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.609000E+0
 2603, 2021-08-31,15:35:02.050, 312, 544, 96, 1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.615000E+0
 2604, 2021-08-31,15:35:02.068, 312, 544, 96, 1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.621000E+0

 2990, 2021-08-31,15:35:12.368, 314, 721, 192, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.721000E+0
 2991, 2021-08-31,15:35:12.389, 314, 721, 192, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.720000E+0
 2992, 2021-08-31,15:35:12.440, 314, 721, 192, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.716001E+0
 2993, 2021-08-31,15:35:12.459, 314, 721, 192, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.716001E+0

 3003, 2021-08-31,15:35:12.718, 314, 717, 125, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.730000E+0
 3004, 2021-08-31,15:35:12.740, 313, 717, 125, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.724000E+0
 3005, 2021-08-31,15:35:12.759, 313, 717, 125, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.727000E+0
 3006, 2021-08-31,15:35:12.778, 313, 717, 125, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.727000E+0

 4107, 2021-08-31,15:35:44.651, 314, 908, 115, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.871000E+0
 4108, 2021-08-31,15:35:44.683, 314, 898, 111, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.870000E+0
 4109, 2021-08-31,15:35:44.705, 313, 898, 111, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.872000E+0
 4110, 2021-08-31,15:35:44.729, 313, 898, 111, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.871000E+0

 4502, 2021-08-31,15:35:57.086, 314, 559, 98, 1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,0, 7.611001E+0
 4503, 2021-08-31,15:35:57.109, 314, 559, 98, 1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,0, 7.607000E+0
 4504, 2021-08-31,15:35:57.131, 314, 559, 98, 1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,0, 7.604001E+0
 4505, 2021-08-31,15:35:57.165, 314, 559, 98, 1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,0, 7.603000E+0

 5000, 2021-08-31,15:36:13.455, 315, 685, 112, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.700000E+0
 5001, 2021-08-31,15:36:13.481, 315, 691, 112, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.695000E+0
 5002, 2021-08-31,15:36:13.506, 315, 691, 105, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.700000E+0
 5003, 2021-08-31,15:36:13.530, 314, 691, 105, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.703001E+0
 5004, 2021-08-31,15:36:13.568, 314, 691, 105, 1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0, 7.697001E+0

 5203, 2021-08-31,15:36:20.248, 314, 368, 128, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.475000E+0
 5204, 2021-08-31,15:36:20.276, 314, 368, 128, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.477000E+0
 5205, 2021-08-31,15:36:20.310, 314, 368, 128, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.481000E+0

 5450, 2021-08-31,15:36:28.774, 315, 894, 130, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.875000E+0
 5451, 2021-08-31,15:36:28.799, 315, 894, 120, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.879000E+0
 5452, 2021-08-31,15:36:28.832, 315, 894, 120, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.875000E+0

```

.....
.....
6010, 2021-08-31,15:36:48.810, 315, 1056, 124, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.883000E+0
6011, 2021-08-31,15:36:48.845, 315, 1056, 225, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.903000E+0
6012, 2021-08-31,15:36:48.902, 314, 1056, 225, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.921000E+0
6013, 2021-08-31,15:36:48.932, 314, 1056, 225, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.934000E+0
6014, 2021-08-31,15:36:48.963, 314, 1056, 225, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.943000E+0
.....
.....
7005, 2021-08-31,15:37:26.759, 316, 900, 132, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.874001E+0
7006, 2021-08-31,15:37:26.791, 316, 900, 132, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.872000E+0
7007, 2021-08-31,15:37:26.854, 316, 886, 132, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.870000E+0
7008, 2021-08-31,15:37:26.885, 316, 886, 127, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.874001E+0
7009, 2021-08-31,15:37:26.928, 316, 886, 127, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.869000E+0
7010, 2021-08-31,15:37:26.959, 316, 886, 127, 0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0, 7.866000E+0
.....
.....
8200, 2021-08-31,15:38:14.861, 318, 372, 165, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.495000E+0
8201, 2021-08-31,15:38:14.898, 318, 372, 165, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.496000E+0
8202, 2021-08-31,15:38:14.935, 318, 372, 165, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.490000E+0
8203, 2021-08-31,15:38:14.973, 318, 372, 165, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.491000E+0
8204, 2021-08-31,15:38:15.017, 318, 372, 165, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.496000E+0
8205, 2021-08-31,15:38:15.049, 318, 376, 159, 0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0, 7.498000E+0
.....
.....
8801, 2021-08-31,15:38:40.455, 318, 1051, 159, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.989000E+0
8802, 2021-08-31,15:38:40.489, 318, 1041, 152, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.991000E+0
8803, 2021-08-31,15:38:40.522, 317, 1041, 152, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.998000E+0
8804, 2021-08-31,15:38:40.556, 317, 1041, 152, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.994000E+0
8805, 2021-08-31,15:38:40.623, 317, 1041, 152, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.989000E+0
8806, 2021-08-31,15:38:40.666, 317, 1041, 152, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.994000E+0
8807, 2021-08-31,15:38:40.702, 317, 1055, 152, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.994000E+0
8808, 2021-08-31,15:38:40.738, 316, 1055, 154, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.991000E+0
8809, 2021-08-31,15:38:40.774, 316, 1055, 154, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.993001E+0
8810, 2021-08-31,15:38:40.822, 316, 1055, 154, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 8.003000E+0
8811, 2021-08-31,15:38:40.856, 316, 1055, 154, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 8.005000E+0
8812, 2021-08-31,15:38:40.898, 316, 1055, 154, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 8.004001E+0
8813, 2021-08-31,15:38:40.934, 316, 1036, 156, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 8.007000E+0
8814, 2021-08-31,15:38:40.977, 316, 1036, 156, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 8.011001E+0
8815, 2021-08-31,15:38:41.013, 316, 1036, 156, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 8.010000E+0
8816, 2021-08-31,15:38:41.082, 316, 1036, 156, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 8.006001E+0
8817, 2021-08-31,15:38:41.119, 316, 1036, 156, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 8.006001E+0
8818, 2021-08-31,15:38:41.159, 316, 1053, 153, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 8.007000E+0
8819, 2021-08-31,15:38:41.196, 316, 1053, 153, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 8.000000E+0
8820, 2021-08-31,15:38:41.233, 316, 1053, 153, 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0, 7.999001E+0

```

//END

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı

Doğum Tarihi

Yabancı Dil

Eğitim Durumu

Lise

Ön Lisans

Lisans

Lisans

Yüksek Lisans

Çalıştığı Kurumlar :