

Demiryolu Bakım İzleme Sistemleri

Burakhan Elden

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Raylı Sistemler Anabilim Dalı

Ocak 2020

Railway Monitoring System For Maintenance

Burakhan Elden

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Railway System

January 2020

Demiryolu Bakım İzleme Sistemleri

Burakhan ELDEN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Raylı Sistemler Anabilim Dalı

Raylı Sistemler Kontrol ve Sinyalizasyonu Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. Ahmet Yazıcı

Ocak 2020

ONAY

Raylı Sistemler Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Burakhan ELDEN'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Demiryolu Bakım İzleme Sistemleri" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Ahmet Yazıcı

İkinci Danışman : --

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Hasan Hüseyin ERKAYA

Üye : Doç. Dr. Ahmet YAZICI

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ömür AKBAYIR

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet Erşahan
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç.Dr. Ahmet Yazıcı danışmanlığında hazırlamış olduğum “Demiryolu Bakım İzleme Sistemleri” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 04/02/2020

Burakhan ELDEN
İmza

ÖZET

Bakım hem sistem güvenliği hem de maliyet açısından demiryolu işletmelerinin vazgeçilmez bir parçasıdır. Bu tez çalışmasında ilk olarak bakım çalışmalarında uyulması gereken standartlara değinilmiştir. Bu standartlar, bakım çalışmalarında uyulması gereken kurallar için önem arz etmektedir. Sonrasında demiryollarında klasik bakım yaklaşımları incelenerek bakımın demiryollarındaki öneminden bahsedilmiştir. Öncelikli olarak demiryollarında terkedilmeye başlanan bakım metodolojilerinden olan reaktif bakım çalışmaları incelenmiştir. Reaktif bakımın eksiklerinin önüne geçilen önleyici bakımın bu sistemlerdeki avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Teknolojinin ilerlemesi ile beraber bakım uygulamaları da dönüşümler göstermekte olup, önleyici bakım yerini alabilecek kestirimci ve öngörücü bakım uygulamaları yaygınlaşmış ve son zamanlarda demiryollarında kullanılmaya başlanmıştır. Ancak günümüz teknolojik koşullarında önleyici bakım maliyet ve güvenlik etkin bir yaklaşım değildir. Diğer taraftan kestirimci bakımda bazı tahminlerde bulunulsa bile sistemin güvenilirliği için yeterli olmamaktadır. Bu eksikler kapsamında yakın zamanda bu alanda demiryolu sistemlerinin veri üzerine izlenmesi ile arızaları öngörecektir şekilde Öngörü ve Sağlık Yönetimi (ÖSY) uygulamaları aktif olarak çalışılmaya başlanan bir alan olmuştur.

Bakım çalışmaları zamanından önce öngörülerek yapılan bu sistemlerde; hem malzemelerin kullanım ömrü uzar, hem de sistem güvenilirliği en üst düzeye çıkar. Hızla ilerleyen teknolojik gelişmeler bu avantajların yanında bakım sistemlerinin daha ekonomik ve zaman anlamında daha hızlı olmasını gerektirmektedir. Tezde önerilen ÖSY yaklaşımı ile temelde demiryolu izleme sistemlerinin izlenerek güvenilirliğin artırılmasını sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Reaktif Bakım, Önleyici bakım, Kestirimci Bakım, Öngörücü bakım, Arıza Öngörme ve Sağlık Yönetimi

SUMMARY

Maintenance is an indispensable part of railway operators both in terms of system security and cost. In this thesis, firstly, the standards to be followed in maintenance studies are mentioned. These standards are important for the rules that must be followed in maintenance works. Afterwards, the importance of maintenance on railways was mentioned by examining classical maintenance approaches on railways. Reactive maintenance studies, one of the maintenance methodologies that were started to be abandoned on railways, were examined. The advantages and disadvantages of preventive maintenance in these systems, which prevent the deficiencies of reactive maintenance, are mentioned. With the advancement of technology, maintenance practices are also transforming, and predictive and predictive maintenance practices that can take the place of preventive maintenance have become widespread and have been recently used in railways. However, in today's technological conditions, preventive maintenance is not a cost and safety effective approach. On the other hand, even if some predictions are made in predictive maintenance, it is not sufficient for the reliability of the system. Within the scope of these shortcomings, Prognostic and Health Management (PHM) practices have been an active study in this area, with the monitoring of railway systems on data, to predict failures

In these systems, which are made by predicting the maintenance work before the time; both the life of the materials are extended and the system reliability is maximized. Rapidly advancing technological developments require maintenance systems to be more economical and faster in terms of time. With the PHM approach proposed in the thesis, basically it ensures to increase reliability by monitoring railway monitoring systems.

Keywords: Corrective maintenance, Preventive maintenance, Predictive maintenance, Prognostic and Health Management

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım esnasında, tez çalışmalarına başladığım andan itibaren, güler yüzü, anlayışı, yön gösterici tavrıyla beni her zaman motive eden, iş yaşamımla beraber yürüttüğüm çalışmada zorlandığım anlarda bana anlayış gösteren, tez çalışmalarımız haricinde de değerli sohbetini benden esirgemeyen, değerli tez danışmanım, hocam Doç. Dr. Ahmet YAZICI'ya şükranlarımı sunarım.

Bugünlere gelmemde sayısız emekleri geçen, her anımda yanımda olan, her kararına saygı duyan ve beni devamlı destekleyen aileme, varlığıyla bana değer katan eşime ve çok değerli oğlum Gökalp'e sonsuz şükranlarımı ve sevgimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| ÖZET | vi |
| SUMMARY | vii |
| TEŞEKKÜR | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | x |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xi |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | xii |
| 1. GİRİŞ VE AMAÇ | 1 |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI | 3 |
| 2.1. Demiryolu Sistemleri Bakım Standartları | 3 |
| 2.2. Demiryollarında Yaygın Bakım Uygulamaları | 22 |
| 2.2.1. Bakım Tipleri Açısından Sınıflandırma | 27 |
| 2.2.1.1. <u>Reaktif bakım</u> | 29 |
| 2.2.1.2. <u>Önleyici Bakım</u> | 32 |
| 2.2.1.3. <u>Kestirimci Bakım</u> | 38 |
| 2.2.2 Yaygın bakım uygulamalarının karşılaştırılması..... | 41 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM | 44 |
| 3.1. Demiryollarında Bakım ile İlgili Yenilikçi Uygulamalar | 44 |
| 3.2 Öngörü ve Sağlık Yönetimi | 49 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA | 53 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER | 59 |
| KAYNAKLAR DİZİNİ | 60 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Sekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 2.1. Demiryolu standartları..... | 4 |
| 2.2. EN standartları..... | 9 |
| 2.3. Demiryolu Bakım Türleri | 28 |
| 2.4. Reaktif Bakım Tipi | 29 |
| 2.5. Bakım Stratejisi | 33 |
| 2.6. Kabul Edilebilir Performansı Korumak için Önleyici Bakım | 34 |
| 2.7. Kestirimci Bakım Fiyat Eğrisi..... | 39 |
| 2.8. Bakım – Arıza Oranı..... | 43 |
| 3.1. Gelecekteki akıllı makineler..... | 46 |
| 3.2. Maliyet – Arıza Oranı..... | 49 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>Cizelge</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 2.1.SIL seviyeleri..... | 7 |
| 2.2.Demiryolu uygulamalarında kullanılacak standartlar..... | 10 |
| 2.3.Bilgi teknolojileriyle ilgili standartlar | 12 |
| 2.4.Sinyalizasyon ve bağlı ekipman standartlar | 12 |
| 2.5.Avrupa Konseyine bağlı standartlar | 15 |
| 2.6.ERTMS ile ilgili standartlar | 18 |
| 2.7.Demiryolu araçlarıyla ilgili standartlar..... | 19 |
| 2.8.Sistem yazılımı ve ara katmanlarla standartlar..... | 19 |
| 2.9.GSMR ve Telsiz haberleşme standartları | 21 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <u>Kısaltmalar</u> | <u>Açıklama</u> |
|---------------------------|---|
| BT | Bilgi teknolojisi |
| COTIF | Uluslararası Demiryolu Taşımalarına ilişkin Sözleşme (Convention Concerning International Carriage by Rail) |
| DDB | Duruma Dayalı Bakım |
| FPR | İlk İlkeleri Düşünme (First Principle Reasoning) |
| GMB | Güvenilirlik Merkezli Bakım (Reliability Centered Maintenance) |
| IOT | Nesnelerin İnterneti (Internet of Things) |
| MTBF | Arızalar Arasındaki Ortalama Süre (mean time between failures) |
| OCL | İzleme merkezi (Overhead Contact Line) |
| OTIF | Demiryolu ile Uluslararası Taşıma için Hükümetler arası Organizasyon |
| ÖSY | Öngörü ve Sağlık Yönetimi |
| RAMS | Reliability, Availability, Maintainability, Safety |
| RUL | Faydalı ömür (Remaining Useful Life) |
| SIL | Güvenlik Bütünlüğü Seviyesi (Safety Integrity Level) |
| TCDD | Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları |
| TKYS | Tren Kontrol ve Yönetim Sistemi (TCMS (Train Control & Management System)) |
| TSI | Technical specification for interoperability |

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Demiryolu, diğer ulaştırma sistemlerinde olduğu gibi, kendine özgü bir sistem ağı, taşıt filosu ve işletme sisteminden oluşmaktadır. Demiryollarında kullanılan taşıtların özelliklerine göre taşımacılığın yapılacağı yol ekipmanları ile buna bağlı sinyalizasyon sistemi ve yol altyapısı tasarlanmaktadır. Bu nedenle, altyapıda gerekli bakımlarının yapılması önemlidir. Demiryolu planlama süreci ve organizasyonel şeması dikkate alınarak bakım sistematığının şekillendirilmesi sistemin uzun ömürlü olması adına gereklidir. Güvenli ve konforlu bir hizmet verilmesi, taşımacılığın kesintisiz sağlanması için verilen hizmetlerde bakım kriterlerini göz önünde bulundurmak için hem ekonomik hem de güvenli olması açısından son derece önemlidir.

Tasarım ve projelendirme aşamaları ile beraber sistem seyrüseferinin sağlanması ve hattın sağlıklı işletilebilmesi için demiryolu sisteminin izlenerek ekipmanların bakımlarının uygun zamanda yapılması gerekmektedir (Sethiya, 2006; Saharkhız vd., 2012; Wienker vd., 2016). Bu sebeple tüm demiryolu altyapı sistemleri için dünyada bakım standartları ve prosedürler oluşturulmuş, altyapı tesislerinin sürekli denetimi sağlanmıştır (Podofillini vd., 2006; Grimsey ve Lewis, 2004; Rondinelli ve Berry, 2000).

Demiryolları sistemlerinde genel olarak önleyici bakım yapılmaktadır (Patra ve Kumar, 2010). Önleyici bakım sistemde kullanılan ekipmanların sürekli aktif olmasından kaynaklı yapılması gereken bakım şeklidir (Endrenyi vd., 2001). Kestirimci bakım, sistemde aktif bir şekilde çalışan ekipmanın gösterdiği değer kapsamında uygulanması gereken bakım programını kapsamaktadır (Pedregal vd., 2004). Yani kestirimci bakım çeşitli ölçme ve gözlemlerle, arıza meydana gelmesi ihtimali olan sistem parçasının belirlenerek; sistem arızalanmadan önce, yapılması istenen bakımın uygulanması yöntemidir (Dhillon, 2002).

Ancak günümüz teknolojik koşullarında önleyici bakım maliyet ve güvenlik etkin bir yaklaşım değildir. Diğer taraftan kestirimci bakımda bazı tahminlerde bulunulsa bile sistemin güvenilirliği için yeterli olmamaktadır. Yakın zamanda arıza giderimi için öne

çıkan “Öngörü ve Sağlık Yönetimi” (ÖSY) sistemleri ile sistemlerin izlenmesi önem kazanmıştır (Lee vd., 2001). Demiryolları sistemlerinde güvenilirlik, kullanılabilirlik, bakım ve güvenlik özellikleri (Reliability – Availability – Maintainability – Safety, RAMS) dikkate alan kısaca RAMS yaklaşımı bir ürünün kullanım ömrü boyunca belirlenmiş kullanılabilirliğini hesaplayan bir yöntem ve mühendislik disiplindir (Filip vd., 2008; Fonseca ve junior, 2005). Ayrıca RAMS bileşenleri; kullanılabilirlik, öngörülebilirlik, işletmenin bakım maliyetlerini, kullanıcı sistemlerinin işletimi esnasında oluşabilecek sağlık ile emniyet riskleri, maliyet, vb. gerekli faktörlerin belirlenmesine yardımcı olur (Beugin ve Marais, 2012). Gelişen dünyada demiryolu kuruluşları, hat trafiğinin sağlıklı bir şekilde işletilmesi için uzun vadeli proje ve planlamalarında RAMS’e önem vermektedir (Daniau, 2014). Özellikle taşımacılık sektörünün hızla geliştiği bir platformda RAMS yönetimi gerek sistem güvenilirliği gerekse de işletilebilirlik açısından önemlidir (Lyngbys vd., 2008; Steriade, 2001). Bu kapsamda teknolojik gelişmeler göz önüne alınarak yeni bakım kavramlarından olan ÖSY önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında, öncelikli olarak demiryolu sistemlerindeki mevcut bakım yaklaşımları Bölüm 2’de detaylandırılmaktadır. Bu bağlamda demiryollarında bakım açısından standartlar neler olduğu, genel olarak bakımla ilgili sınıflandırmalar, demiryollarında yaygın uygulaması olan ve olması gereken bakım çalışmaları verilmektedir. Ayrıca demiryollarında kullanılan kestirimci bakım uygulamaları da verilmektedir. Bölüm 3’te ise demiryollarında yenilikçi yaklaşımlardan olan ÖSY ile ilgili demiryolu uygulamaları çalışmaları derlenmektedir. Bölüm 4’te ise yenilikçi bakım yöntemlerinin öneminden bahsedilerek, gelecek çalışmalar hakkındaki öneriler sunulacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

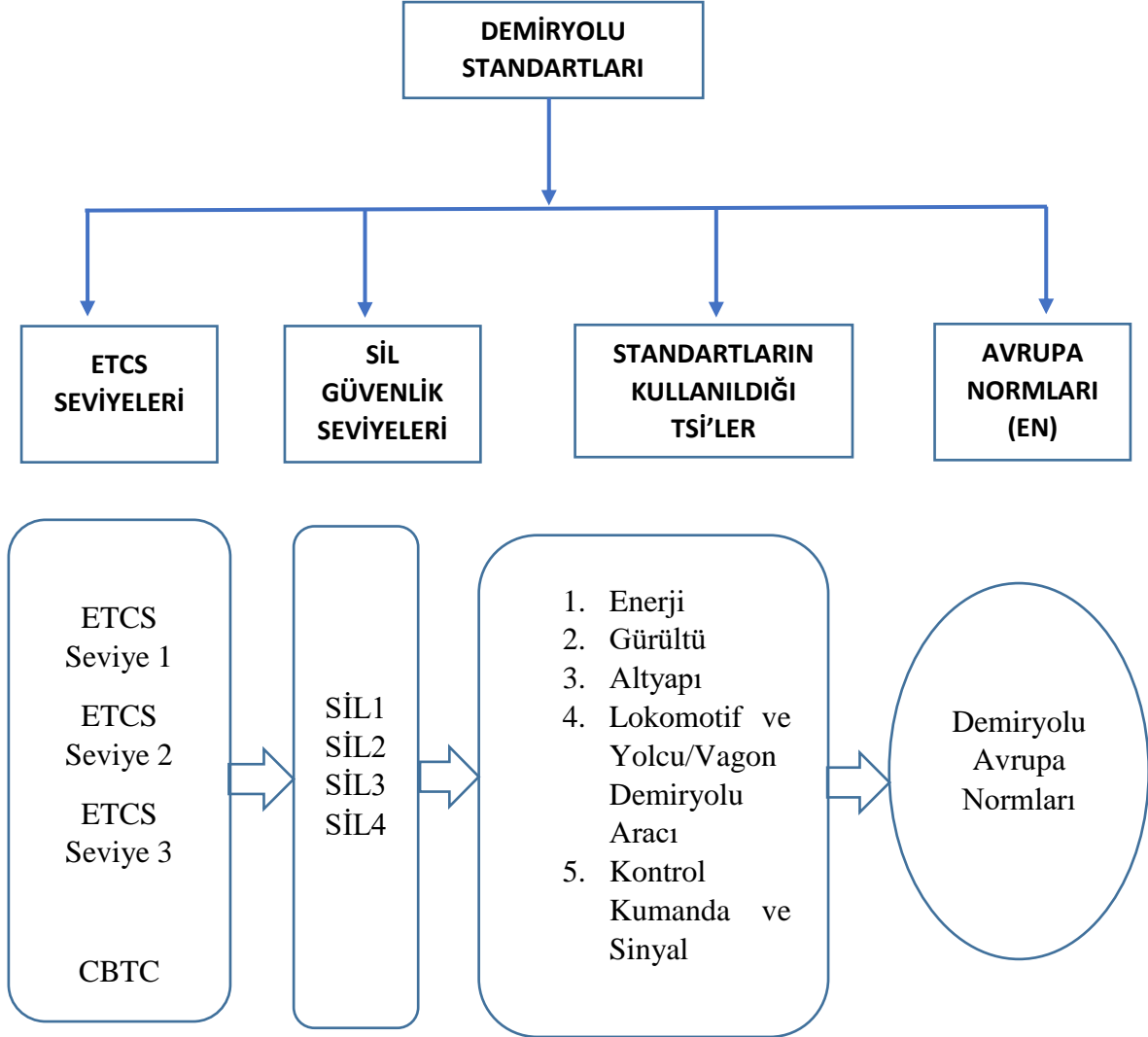
Demiryollarında bakım kapsamında uyulması gereken standartlar ve farklı bakım uygulamaları bulunmaktadır. Bu standartlar bakım programı belirlenirken izlenilmesi gereken yol haritası, sistem ve ekipman hazırlıkları ve bunların ilişkilendirildiği prosedürleri belirtmektedir. Diğer taraftan demiryollarında bakım planlamaları genel olarak; önleyici bakım, kestirimci bakım ve öngörücü bakım olarak üç grupta incelenebilir. Takip eden alt bölümlerde demiryollarında bakım ile ilgili standartlar ve bakım uygulamaları verilmektedir.

2.1. Demiryolu Sistemleri Bakım Standartları

Demiryolu taşımacılık sistemi son yıllarda kapsamlı bir dönüşüm geçirmektedir. Bunun temel nedeni olarak, yüksek hızlı trenlerin piyasaya sürülmesi, metropol yerleşim yerlerindeki yüksek trafik yoğunluğu ve demiryolu şirketlerinin yeniden yapılandırılmasıdır (Urena vd., 2009). Yüksek hızlı ulaşım ağlarının ve artan trafik yoğunluğunun ortaya çıkmasıyla, demiryolu altyapısı ve trenlerinde, operasyonel yaşamları boyunca kaliteli hizmet ve bakım süreçlerinin sıkı bir şekilde kontrol edilmesi gereken yeni teknoloji ihtiyaçları doğurmuştur. Bu amaçla demiryolu sistemleri için farklı kurumlar tarafından tanımlanmış standartlar bulunmaktadır. Şekil 2.1 ile genel çerçevesi verilen bu standartlar demiryolu taşımacılık sistemlerinde sistemin güvenliği ve koordineli çalışabilmesi için zorunludur (Silla, 2012).

Türkiye, uluslararası bir kuruluş olan OTIF'e üyedir. OTIF tarafından yayınlanan Uluslararası Demiryolu Taşımacılığına İlişkin Sözleşme (COTIF) TBMM tarafından çıkarılan 06.10.2005 Tarih ve 5408 sayılı kanunla Türkiye Cumhuriyeti tarafından kabul edilmiş ve kabul edilen COTIF' in şartlarını Ülke olarak 01.07.2006 tarihinden itibaren uluslararası trafikte uygulama zorunluluğu doğmuştur. Hükümetler arası bu organizasyonun temel amacı, demiryolu ile yapılan yük ve yolcu taşımacılığının uygulanmasında kullanılan kurallarda yeknesaklığın sağlanması ve geliştirilmesidir. COTIF 1999'un G eki ATMF'nin 1p1582 sayılı maddesi doğrultusunda oluşturulan Tek Tip Kurallardan (UTP) biri olan "Bakımdan Sorumlu Birimlerin (ECM) Denetimi ve Belgelendirilmesi" başlıklı doküman 01/06/2013 tarihinde yürürlüğe girmiştir. ECM Düzenlemesinin yürürlüğe girmesiyle

sertifikalı bir ECM atanmamış yük vagonları COTIF'e taraf ve Avrupa Birliği ülkeleri hatlarına kabul edilmemektedir (Akbayır, 2012).



Şekil 2.1: Demiryolu standartları (Silla, 2012; Platzer ve Quesel, 2009; Reynders vd., 2011; Hokstad ve Corneliussen 2004; BS EN 50126-1)

European Train Control System (ETCS) yani Avrupa Tren Kontrol Sistemi yaygın olarak birçok Avrupa ülkesinde önceden belirlenmiş merkezden trenleri kontrol edebilmek için kullanılan kontrol ve sinyalizasyon sistemidir (Platzer ve Quesel, 2009; Johannes Faber ve Roland Meyer, 2006). European Rail Traffic Management System (ERTMS) yani Avrupa Demiryolu Trafiği Yönetim Sistemi ismi ile ülkelerin kabul ettiği bir protokol meydana getirilmiştir (Midya ve Thottappillil, 2007; Abed, 2010). Bu protokolün temel amacı Avrupa

ülkelerinde tek bir sinyalizasyon dilinin kullanılmaya başlamasıdır (Faber ve Meyer, 2006; Midya ve Thottappillil, 2007). Kullanılacak olan bu dil, kullanılan ekipman, yapılacak bakım ve sürdürülecek işletme sisteminin bir bütün içerisinde ele alınmasını sağlamaktadır. İş sağlığı ve güvenliği açısından bakım ile ilgili bazı Avrupa Ülkeleri kuralları ve yönetmelikleri şunlardır (Vaubel, 2008):

- **89/656/EEC Konsey Direktifi:** Çalışma ortamında bireysel koruyucu ekipmanların bakımçı personel tarafından kullanımı için asgari güvenlik ve sağlık şartlarıyla ilişkin direktiftir. Bireysel koruyucular, yöneticiler tarafından ücretsiz sağlanmalı, gerekli bakım, değişim ve temizliği yapılarak hijyenik tutulması sağlanmalıdır.
- **92/91/EEC Konsey Direktifi:** Sondaj vasıtasıyla çalışma yapan işletmelerde bakımçıların güvenlik ve sağlık korumalarını iyileştirmek için asgari gereksinimleri hakkında bilgilendirir. İçeriğinde bakım ile ilgili hükümleri bulunduran karada ve denizdeki sektörlere uygulanabilir asgari şartları da içermektedir.
- **92/104/EEC Konsey Direktifi:** Yer üstü ve yeraltı maden çıkarma işletmelerinde çalışanların güvenlik ve sağlık korumalarını artırmak için asgari şartları açıklamaktadır.
- **98/24/EC Konsey Direktifi:** Çalışma ortamında kimyasal maddelere ilişkin risklerden çalışanların güvenlik ve sağlıklarının korunması ile ilgilidir. Güvenlik ve sağlığı etkileyen zararlı etkilere yol açabilecek ya da önemli ölçüde maruz olma ihtimali bulunan bakım faaliyetleri için risk değerlendirmesi yapmaktadır.
- **2006/42/EC Direktifi:** Teçhizat, makine ve ekipman ile ilgili ve 95/16/EC direktifini değiştiren direktifin gerekçesinde doğrudan teçhizat kullanımı nedeniyle olan çok sayıda kazanın sosyal maliyeti makinenin güvenli tasarımı ve imali ve uygun kurulum ve bakım ile azaltılabileceğini belirtilmektedir.

ETCS Seviye1, sistemde kullanılan sinyalizasyon sistemine kolayca eklenebilir, kumanda merkezine sabit ve ayarlanabilir Eurobalises aracılığıyla bilgi iletimi sağlar. Ayrıca, rota verilerini ilgili saha ekipmanına gönderirler. Alınan verilerde, maksimum hız ve kırılma eğrilerini herhangi bir zamanda hesaplar ve sistem iletimini sağlar

(Obrenovic vd., 2006). ETCS Seviye2, sinyal sistemi ve bağı ekipmanlarla birbiri arasında etkin çalışan radyo tabanlı bir sistemdir. Tren tam konumunu ve yönünü bildirmek için sürekli olarak Radyo Blok Merkezine (RBC) veri gönderir. Eurobalises pasif konumlandırma ekipmanları olarak kullanılır. GSM-R ile sürekli ETCS veri iletimi sağlanır. ETCS Seviye3, demiryolu üzerinde herhangi bir yol ekipmanı olmayan, iletim sistemini tamamen radyo tabanlı iletişime dayanan bir sistemdir. RBC sürekli olarak her trenin pozisyonunu alır ve herhangi bir zamanda olası en küçük tren mesafelerini hesaplar. Bunun için sinyalizasyon sisteminde kullanılan ray devresi artık sabit bloklarla ayrılmamakta, “hareketli bloklara” tren hareketlerine uygun yol ayrılmaktadır. Aynı zamanda, bu bilgilerin sağlanması için hiçbir yol ekipmanı olmadığı için trenlerin güvenli ilerleyişi sistem bütünlüğünde çok önemlidir (Palumbo, 2013). ETCS Level 3 şu an hala standardizasyon aşamasındadır. İletişim Tabanlı Tren Kontrol (Communications-Based Train Control) sinyalizasyon sistemi, tren ile kumanda merkezi arasında sürekli bilgi iletimi sağlayarak, hem trenin tam konumunu, hem de trenin uzaktan kontrolünü, geleneksel sinyalizasyon sistemlerine göre daha doğru ve hızlı yapabilen yenilikçi sinyalizasyon sistemidir (Ghazel, 2014). CBTC'de, trenin ön ve arkasında trenle birlikte hareket eden sanal bir sinyal bloğu oluşturularak, trenin hareketine bağlı olarak hareket eder veya durur. Önde giden trenle, arkadan gelen trenin sanal blokları birbiriyle kesişmeye başladığında, arkadaki tren daha hızlıysa, güvenli yaklaşma mesafesine gelindiğinde, arkadaki tren, öndeki trenin hızına eşitlenir. Bu sayede hat kapasitesi artırılır. Öndeki tren bir şekilde durduğunda, arkadaki tren de, yakın, fakat güvenli bir mesafede durmaktadır. CBTC, ETCS L2 ile ETCS L3 arasında kalan bir geçiş sistemidir (Pascoe ve Eichorn, 2009).

ETCS genel kapsamda hat standartlarını belirtirken bu hatlara bağlı sistem ekipmanlarının güvenilirliği açısından ise SIL sertifikası ile bir sistemin Safety Instrumented Function (SIF) güvenilirliğini belirlenir. SIF, herhangi bir işlem sırasında oluşabilecek tehlikeli bir durumun algılanması ve bu durumunun engellenmesi fonksiyonudur (Jin vd., 2011). Uluslararası IEC 61508 standardına göre (International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) tarafından yayınlanan dayanarak, en fazla SIL 4 ve en az SIL 1 olmak üzere dört SIL seviyesi tanımlanmıştır (Hokstad ve Corneliussen 2004). Sil seviyeleri Çizelge 2.1’de olduğu gibi düzenlenmiş olup, güvenilirlik oranları arttıkça arıza yapma ihtimali ve risk faktörleri azalmaktadır.

Çizelge 2.1. SIL Seviyeleri (Jin vd., 2011)

| SIL SEVİYESİ | GÜVENİRLİLİK | TALEP DURUMUNDA ARIZA YAPMA İHTİMALİ | RİSK AZALTMA FAKTÖRÜ |
|---------------------|--------------------------|---|------------------------------|
| SIL 4 | > %99.99 | %0.01 ve %0.001 arası | 10000 ve 100000 kat arasında |
| SIL 3 | %99.9 ve %99.99 arasında | %0.1 ve %0.01 arası | 1000 ve 10000 kat arasında |
| SIL 2 | %99 ve %99.9 arasında | %1 ve %0.1 arası | 100 ve 1000 kat arasında |
| SIL 1 | %90 ve %99 arasında | %10 ve %1 arası | 10 ve 100 kat arasında |

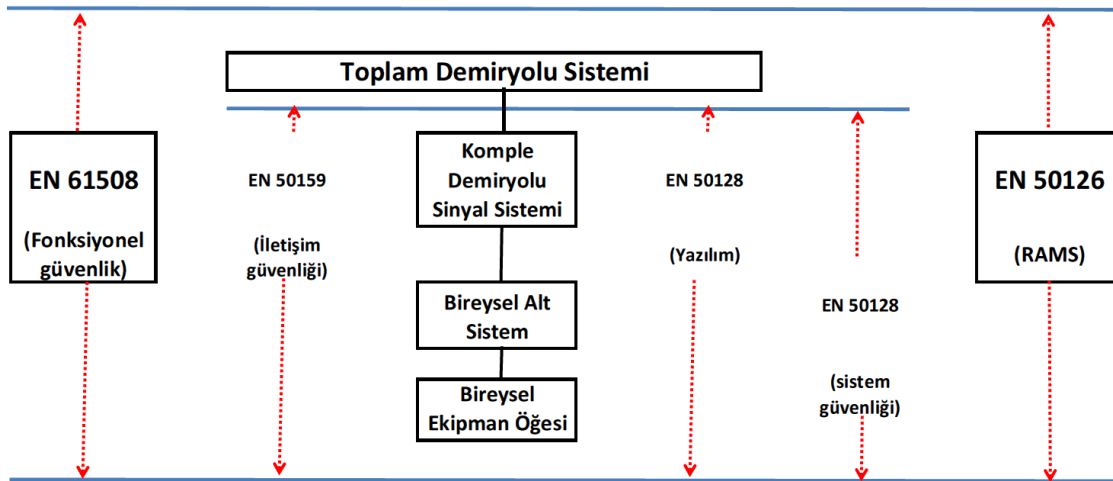
SIL seviyeleri ile setifikalanan sistemlerin tasarımı ve RAMS güvenliği ve işletilebilirliği açısından, bakımlarda da uyulması gerekli standartlar vardır. Bu standartlar ERA ve OTİF bünyesinde belirlenmiş bir takım TSI'lar çerçevesinde belirlenmiştir. Karşılıklı işletilebilirlik noktasında, güvenli taşımacılığın sağlanabilmesi için ERA'nın (European Union Agency for Railways) düzenlemiş olduğu TSI'lar (Technical specification for interoperability), bunların eşleniği olan OTİF'in (Intergovernmental Organisation for International Carriage by Rail) yayınlamış olduğu UTP'ler (Uniform Technical Prescription) bu standartların kullanıldığı teknik şartnamelerdir (Reynders vd., 2011; Flinders, 2004; Fodiman ve Staiger, 2006). Kullanıcı kısmında sistem yeterliliği açısından yardımcı olması için belirlenen bu TSI'lar;

- Enerji Teknik Şartnamesi (Energy TSI)
- Gürültü Teknik Şartnamesi (Noise TSI)
- Altyapı Şartnamesi (Infrastructure TSI)
- Lokomotif ve Yolcu / Vagon Demiryolu Aracı Teknik Şartnamesi (Locomotives And Passenger / Wagons Rolling Stock TSI)
- Kontrol Kumanda ve Sinyal Teknik Şartnamesi (Control Command And Signaling TSI)

olarak ERTMS/ETCS konsorsiyumun 2005 yılında yayınlamış olduğu “Birlikte Çalışabilirlikle İlgili Konsolidasyon TSI”ının 1-0-0 sayılı ek sayısında belirlenmiştir. Bu TSI’lar gerek karşılıklı işletilebilirlik, gerekse de bakım için gerekli standartların belirlenmesinde önem arz eden teknik şartnamelerdir. Bu standartlar göz önüne alınarak gerekli önleyici bakım çalışmaları yapılmaktadır (Spiegel, 2009).

Avrupa Birliği’nde Standartlar arasında harmonizasyonu sağlamak için oluşturulan Avrupa Standartları (EN - Europeane Norm), direktiflerde belirtilen güvenlik gerekliliklerini teknik talimatlara çevirir. Avrupa'daki mevcut yeniden yapılanma süreci, esasen rekabet ve emniyet ile ilgili yeni yasal direktiflerle düzenlenmektedir. Demiryolu taşımacılığında emniyetle ilgili Avrupa Direktifleri 2001/12 / EC (BS EN 50126-1, 1999), 2001/13/EC ve 2001/14/EC 'dir. Bu nedenle, ortak bir hedefe ulaşmak için birlikte çalışan ekipman, insanlar ve prosedürler toplanmalı ve yeni değişikliklere uyum sağlamalıdır (Finger, 2014).

Raylı Ulaşım Sisteminin Geliştirilmesinde Teknik İşbirliği Komitesinin (Committee on Technical Cooperation in the Development of the Rail Transport System) 2016 yılında yayınlamış olduğu RAMS and Life Cycle Costs (LCC) yayınında bakımın oluşma zamanları Şekil 3.2’ ye göre insan faktörüne, bakım prosedürlerine ve lojistik hizmetlerine bağlı olarak değiştiğini bildirmiştir (Cordon vd., 2018; Kim vd., 2009). Reliability, Availability, Maintainability, Safety (RAMS), sistemin güvenlik ve kullanılabilirlik açısından; sistem durumu, operasyon durumu ve bakım durumu açısından ilişkili olduğunu belirtir. Bu sertifikasyon sürecinde demiryollarında sistem işlevselliği, servis sıklığı, servis düzenliliği, ücret yapısı vb. üzerinde RAMS'in net bir etkisi vardır. Böylece müşteriye verilen hizmetin kalitesini arttırmaya yardımcı olur (BS EN 50126-1, 1999; Müller vd., 2009).



Şekil 2.2: EN standartları (BS EN 50126-1, 1999)

Rams Şekil 2.2’de;

- EN 50126 Demiryolu Uygulamaları: Güvenilirlik, Kullanılabilirlik, Bakım ve Güvenlik Özellikleri ve Gösterilmesi (RAMS)
- EN 50128 Demiryolu Uygulamaları: İletişim, sinyalizasyon ve işleme sistemleri - Demiryolu kontrol ve koruma sistemleri için yazılım
- EN 50129 Demiryolu Uygulamaları: İletişim, sinyalizasyon ve işleme sistemleri - Sinyalizasyon için emniyetle ilgili elektronik sistemler
- EN 50159 Demiryolu Uygulamaları: İletişim, sinyalizasyon ve işleme sistemleri - İletim sistemlerinde emniyetle ilgili iletişim
- EN 61508 Elektrik/elektronik/programlanabilir elektronik güvenlikle ilgili sistemlerin işlevsel güvenliği (IEC 61508)

standartlarını içermektedir. Bunlar bakım yapılacak ekipmanlar ile ilgili gerekli teknik şartnamelerin olduğu, bakım yapılırken hangi kurallara uyulacağını belirten gerekli EN standartlarıdır.

Şekil 2.1’den tanımlama yapılarak RAMS Europeane Norm’un içerisinde yalnızca EN 50126 olarak gözükmese de, sistem bütünlüğü ele alınarak incelendiğinde gerek üretim esnasında gerek de işletim sistemlerinde tüm adımları ilgilendiren geniş kapsamlı bir konudur. Sürdürülebilir bir sistemde RAMS ETCS’deki işletilebilirliği, SİL

seviyelerindeki güvenliği, TSI'lardaki şartname konularını ve EN sertifikalarını etkileyen ve yönlendiren bir yaklaşım tarzıdır. RAMS'in izleme sistemlerindeki rolü yenilikçi bakım yaklaşımlarının da inceleneceği materyal ve yöntem başlığında ele alınacaktır.

Demiryollarında sistem bakımları altyapı, üst yapı ve araç bakımları olarak incelenmektedir. Altyapı sistemlerinde bakımlar; ray devreleri, makas sistemleri, hemzemin geçitler, sinyaller, ray devreleri ve araç takip sistemleri, anlaşılan sistemleri ve CTC kumanda kontrol sistemleri olarak incelenmektedir. Altyapı sistemleri genel kapsamda sinyalizasyon sistemleriyle ilgili olup, üst yapı sistemleri bu mekanizmanın bağlı bulunduğu teşkilat yapılarını ve yol ekipmanlarını kapsamaktadır. Altyapı, üstyapı ve araç bakımları UIC ve OTIF standartlarında yapılması gerekmekte olup bu bakımlar için uyulması gereken uluslararası standartlar bulunmaktadır. Demiryolu uygulamalarında kullanılacak genel standartlar EN standartları çerçevesinde belirlenmiş olup, bu kapsamda yapılacak bakım ve revizyon işlemlerinde de Çizelge 2.2.'deki standartlara uyulması gerekmektedir.

Çizelge 2.2. Demiryolu uygulamalarında kullanılacak standartlar (Ogunsola ve Mariscotti, 2013; Maddock, 1994; TCDD Bakım El Kitabı, 2018)

| SIRA | AÇIKLAMA | STANDARTLAR |
|------|---|-----------------|
| 1 | Demiryolu uygulamaları-Güvenilirlik, Bulunabilirlik, Onarılabilirlik ve Güvenlik (RAMS)'in gösterimi ve özellikleri | EN 50126 |
| 2 | Demiryolu uygulamaları-Haberleşme, sinyalizasyon ve işlem sistemleri-Demiryolu kontrol ve koruma sistemleri için yazılım | EN 50128 |
| 3 | Demiryolu uygulamaları-Haberleşme, sinyalizasyon ve işlem sistemleri-Sinyalizasyon sistemleri için güvenlikle ilgili elektronik sistemler | EN 50129 (RAMS) |
| 4 | Demiryolu uygulamaları-Ekipman için çevresel koşullar-Bölüm 1: Araç üstü ekipmanı | EN 50125-1 |
| 5 | Demiryolu Uygulamaları-Yalıtım Koordinasyonu-Bölüm 1: Tüm elektrik elektronik ekipmanla ilgili gereksinimler, toleranslar ve sızıntı (kaçak) mesafeleri | |
| 6 | Demiryolu uygulamaları-Ekipman için çevresel koşullar-Bölüm 3: Sinyalizasyon ve telekomünikasyon için ekipman | EN 50125-3 |

Çizelge 2.2. Demiryolu uygulamalarında kullanılacak standartlar (Ogunsola ve Mariscotti, 2013; Maddock, 1994; TCDD Bakım El Kitabı, 2018) – devam

| SIRA | AÇIKLAMA | STANDARTLAR |
|-------------|--|---------------------|
| 7 | Demiryolu uygulamaları-Elektromanyetik uyumluluk-Bölüm 3-2: Demiryolu aracı Cihazlar | EN 50121-3-2 |
| 8 | Demiryolu uygulamaları-Elektromanyetik uyumluluk-Bölüm 4: Sinyalizasyon ve telekomünikasyon cihazlarının yayılımı ve bağışıklığı | EN 50121-4 |
| 9 | Demiryolu uygulamaları-Demiryolu aracı ve aracı sezen sistemlerin arasındaki uyumluluk | EN 50238 |
| 10 | Demiryolu Uygulamaları-Elektriksel Güvenlik ve Topraklama ile ilgili Koruyucu Tedbirler | EN 50122 |
| 11 | Işınımlı radyo frekansı, elektromanyetik alan bağışıklık testi. | EN 55011 |
| 12 | Demiryolu Uygulamaları-demiryolu araçlarında kullanılan elektronik ekipman ve donanımlar. | EN 50155 |
| 13 | Demiryolu Uygulamaları-İletişim, sinyalizasyon ve veri işleme sistemleri- açık/kapalı iletim sistemlerinde güvenlikle ilgili iletişim. | EN 50159 |
| 14 | Demiryolu Uygulamaları-elektronik ekipmanların montajı. | EN 50261 |
| 15 | Demiryolu Uygulamaları . Yalıtım Koordinasyonu. Temel Gereklilikler. Tüm elektronik ve elektrik ekipmanlar için açıklıklar ve krepaj mesafesi, | EN 50124 |

Bilgi teknolojileri, her türlü elektronik veriyi oluşturmak, işlemek, saklamak, korumak ve değiştirmek veya bunlara erişmek için kullanılan depolama, ağ ve diğer fiziksel aygıtların, altyapı ve işlemlerin kullanılması ile ilgili teknoloji olarak değerlendirilir. TCDD’de bilgi teknolojilerinde kullanılan ekipmanlar ve bunların bakımında uyulacak prosedürlerle alakalı standartlar Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Bilgi teknolojileriyle ilgili standartlar (Demiryolları Planlama ve Tasarım Teknik Esasları, 2007; TCDD Bakım El Kitabı, 2018)

| SIRA | AÇIKLAMA | STANDARTLAR |
|------|--|-------------|
| 1 | Bilgi teknolojisi ekipmanları ile donatılmış binalarda eşit potansiyelli bağlama ve topraklama uygulaması. | EN 50310 |
| 2 | Bilgi teknolojisi - Genel kablaç sistemleri. | EN 50713 |
| 3 | Bilgi teknolojisi - Kablaç sistemi tesisatı | EN 50714 |
| 4 | Bilgi teknolojisi donanımlarının elektriksel güvenliği. | EN 60950 |

Avrupa normları çerçevesinde üye ülkelerin sinyalizasyon tasarımında en önemli kriterler karşılıklı işletilebilirlik kriterleridir. Üye bir ülkeden hatta çıkan bir trenin kesintisiz bir şekilde yoluna devam edebilmesi için gerekli sinyalizasyon alt yapısı gerekli TSI'lar oluşturulmuş ve bunlar bir takım standartlara oturtulmuştur. Karşılıklı işletilebilirlik noktasında kullanılacak sinyalizasyon sistemleri ve bunların bağlı sistem ekipmanlarının bakımında kullanılacak standartlar Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Sinyalizasyon ve bağlı ekipman standartlar (Demiryolları Planlama ve Tasarım Teknik Esasları, 2007; TCDD Bakım El Kitabı, 2018; Kumar, 2014)

| SIRA | AÇIKLAMA | STANDARTLAR |
|------|---|-------------|
| 1 | Muhafaza kutuları ile sağlanan koruma düzeyleri ile ilgili şartname (IP kodu) | EN 60529 |
| 2 | Elektrikli/ elektronik/programlanabilir elektronik güvenlikle ilgili sistemlerin işlevsel güvenliği. | EN 61508 |
| 3 | Kablo teknik değerleri. | IEC 60794 |
| 4 | Elektrikli/Elektronik/Programlanabilir Elektronik Güvenlikle ilgili Sistemlerin İşlevsel Güvenliği- Bölümler 1-7. | IEC 61508 |
| 5 | Sinyalizasyon teçhizatlarının uzaktan kontrolü. | UIC 7801 |

Çizelge 2.4. Sinyalizasyon ve bağlı ekipman standartlar (Demiryolları Planlama ve Tasarım Teknik Esasları, 2007; TCDD Bakım El Kitabı, 2018; Kumar, 2014) – devam

| SIRA | AÇIKLAMA | STANDARTLAR |
|-------------|---|--|
| 6 | İletim sistemleri ve sinyalizasyon teçhizatları için uzaktan kontrol ve kumanda yöntemleri. | UIC 7811 |
| 7 | Hemzemin geçit koruma sistemleri. | UIC 760, 761,762 |
| 8 | Elektromanyetik uyumluluk. | 89/336/EEC |
| 9 | Elektromanyetik uyumluluk, | CENELEC, EN 50081-2; EN 50121-1; |
| 10 | Elektrostatik deşarj (ESD), | IEC, 61000-4-2 |
| 11 | Hızlı geçici patlama, | IEC 61000-4-4 |
| 12 | Güç darbesi, | IEC 61000-4-5 |
| 13 | RAMS, | IEC 62278;IEC 62279; IEC 62280 |
| 14 | Bağlı olma analiz teknikleri –Güvenilirlik Blok Şeması: Güvenlik | IEC 61 078 |
| 15 | Sistemlerin, Ekipmanların ve parçaların güvenilirliği, Bölüm 7: Arıza ağacı analiz rehberi, | IEC 61 025 |
| 16 | Bağlı olma-sistemin güvenilirliği ile ilgili analiz teknikleri-Arıza modu ve etki analizine ilişkin prosedür, | IEC 60 812 |
| 17 | Şebeke zaman protokolü, | RFC 1305 |
| 18 | Kablo standardı ve kablo kurulum standardı, | BS 6360; IEC 60228; IEC 287; IEC 364-5-523; |
| 19 | Emniyet sisteminin yüksek hız gereksinimlerine adaptasyonu, | UIC 734 |

Çizelge 2.4. Sinyalizasyon ve bağlı ekipman standartlar (Demiryolları Planlama ve Tasarım Teknik Esasları, 2007; TCDD Bakım El Kitabı, 2018; Kumar, 2014) – devam

| SIRA | AÇIKLAMA | STANDARTLAR |
|------|--|-----------------------|
| 20 | Özel İletim Modülü FFFIS02, Ref: Subset-035, Versiyon: 2.1.1, Tarih: 01.01.2010 | Subset-035 |
| 21 | Boyutlandırma ve Mühendislik Kuralları, Ref: Subset-040, Versiyon: 2.3.0, Tarih: 19.10.2009 | Subset-040 |
| 22 | Birlikte İşlerlik için Performans Gereksinimleri , Ref: Subset-041, Versiyon: 2.1.0, Tarih: 01.01.2010 | Subset-041 |
| 23 | TSI'nın Ek-A dokümanları üzerine Birlikte İşlerliğin Sağlanması (temel olarak Subset-026 v2.2.2 üzerine), Ref: Subset-108, Versiyon: 1.2.0, Tarih: 01.01.2010 | Subset-108 |
| 24 | Özelliklere ait Test Durumları, Ref: Subset-076-5-2, Versiyon: 2.3.1, Tarih: 19.10.2009 | Subset-076-5-2 |
| 25 | Test Sıraları (Test sequences), Ref: Subset-076-6-3, Versiyon: 2.3.1, Tarih:19.10.2009 | Subset-076-6-3 |
| 26 | Test Şartnamelerinin Kapsamı (Scope of the test specifications), Ref: Subset-076-7, Versiyon: 1.0.2, Tarih: 19.10.2009 | Subset-076-7 |
| 27 | 04E083 Kontrol-Kumanda ve Sinyalizasyon alt sistemleri için Güvenlik Gereksinimleri ve Karşılıklı İşletilebilirlik için Güvenlik Analizleri Gereksinimleri, Versiyon 1.0.,Tarih: 01.01.2010 | O4E083 |
| 28 | 04E084 Sinyalizasyon alt sistemi ve kontrol-kumanda için karşılıklı işletilebilirliğe ait güvenlik analiz gereksinimleri ve güvenlik gereksinimleri için gerekçeli rapor, Ref: 04E084 Versiyon 1.0., Tarih: 01.01.2010 | O4E084 |
| 29 | Euroloop için Test Spesifikasyonları, Ref: Subset-103, Versiyon:1.0.0., Tarih: 19.10.2009 | Subset-103 |
| 30 | Track-Side-Trainborne FIS forRadioIn-fill, Ref: Subset-047, Version 2.0.0., Tarih: 01.01.2010 | Subset-047 |

Avrupa Konseyinin karşılıklı işletilebilirlikle ilgili prosedürlere bağlı olarak bakım yapılabilmesi için uyulması gereken standartlar Çizelge 2.5’de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Avrupa Konseyine bağlı standartlar (Holvad, 2009; Clairbois ve Garai, 2015; TCDD Bakım El Kitabı, 2018)

| SIRA | AÇIKLAMA | STANDARTLAR |
|------|--|-------------|
| 1 | Avrupa yüksek hızlı demiryolu sisteminin birlikte işlerliği üzerine Avrupa Konseyinin 23 Temmuz 1996 tarihli 96/48/EC direktifi, Karar Tarihi:23.07.1996, | 96/48/EC |
| 2 | Avrupa-transit konvansiyonel demiryolu sisteminin karşılıklı işletilebilirliği üzerine, Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin 19 Mart 2001 tarihli 2001/16/EC simgeli direktifi Baskı: Avrupa Topluluğu'nun Resmi Dergisi, 20.04.2001, L110/1-27 | 2001/16/EC |
| 3 | Güvenlik sertifikası ve demiryolu altyapısının kullanımı için toplanan parasal bedel ve demiryolu altyapısı kapasitesinin tahsisi üzerine olan 2001/14/EC simgeli direktifi ile demiryolu sorumluluklarına ilişkin resmi izin (lisans) verilmesi üzerine olan Konseyin 95/18/EC simgeli direktifini değiştiren ve Topluluğun demiryollarının güvenliğine ilişkin Avrupa Parlamentosu ve Avrupa Konseyi'nin 29 Nisan 2004 tarihli 2004/49/EC simgeli direktifi (Demiryolu Güvenliği Direktifi) Baskı: Avrupa Birliği'nin Resmi Dergisi, 30.04.2004, L164/44-113 | 2004/49/EC |
| 4 | Güvenlik sertifikası ve demiryolu altyapısının kullanımı için toplanan parasal bedel ve demiryolu altyapısı kapasitesinin tahsisi üzerine olan 2001/14/EC simgeli direktifi ile demiryolu sorumluluklarına ilişkin resmi izin (lisans) verilmesi üzerine olan Konseyin 95/18/EC simgeli direktifini değiştiren ve Topluluğun demiryollarının güvenliğine ilişkin Avrupa Parlamentosu ve Avrupa Konseyi'nin 29 Nisan 2004 tarihli 2004/49/EC simgeli direktifine düzeltme (Demiryolu Güvenliği Direktifi) (OJ L 164, 30.4.2004) Baskı: Avrupa Birliği'nin Resmi Dergisi, 21.06.2004, L220/16-39 | 95/18/EC |
| 5 | Avrupa-transit yüksek-hızlı demiryolu sisteminin karşılıklı işletilebilirliği üzerine olan Konsey'in 96/48/EC simgeli direktifi ile Avrupa-transit konvansiyonel demiryolu sisteminin karşılıklı işletilebilirliği üzerine olan Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin 2001/16/EC simgeli direktifini değiştiren, Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin 29 Nisan 2004 tarihli 2004/50/EC simgeli direktifi Baskı: Avrupa Birliği'nin Resmi Dergisi, 30.04.2004, L164/114-163 | 96/48/EC |

Çizelge 2.5. Avrupa Konseyine bağlı standartlar (Holvad, 2009; Clairbois ve Garai, 2015; TCDD Bakım El Kitabı, 2018) - devam

| SIRA | AÇIKLAMA | STANDARTLAR |
|------|---|-------------|
| 6 | Avrupa yüksek hızlı demiryolu sisteminin birlikte işletilebilirliği üzerine Avrupa Konseyinin ve Parlamentosunun 29 Nisan 2004 Tarihli 2004/50/EC direktifi, Karar Tarihi: 29.04.2004 Ref: 2004/50/EC L220/40-57 | 2004/50/EC |
| 7 | Avrupa-transit yüksek-hızlı demiryolu sisteminin karşılıklı işletilebilirliği üzerine olan Konsey'in 96/48/EC simgeli direktifi ile Avrupa-transit konvansiyonel demiryolu sisteminin karşılıklı işletilebilirliği üzerine olan Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin 2001/16/EC simgeli direktifini değiştiren, Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin 29 Nisan 2004 tarihli 2004/50/EC simgeli direktifine düzeltme (OJ L 164, 30.4.2004)Baskı: Avrupa Birliği'nin Resmi Dergisi, 21.06.2004, L220/40-57. | 2001/16/EC |
| 8 | 2001/16/EC simgeli direktifinde söz edilen Avrupa-transit konvansiyonel demiryolu sisteminin kontrol-kumanda ve sinyalizasyon alt sistemine ait Seviye A sisteminin (ERTMS) temel karakteristiklerini belirleyen ve Komisyonun 30 Mayıs 2002 tarihli 2002/731/EC kararının simgeli Ek-A kısmını değiştiren, Komisyonun 29 Nisan 2004 tarihli 2004/447/EC simgeli kararı Baskı: Avrupa Birliği'nin Resmi Dergisi, 30.04.2004, L155/65-79. | 2002/731/EC |
| 9 | Avrupa-transit konvansiyonel demiryolu sisteminin kontrol-kumanda ve sinyalizasyon alt sistemine ilişkin karşılıklı işletilebilirlik için teknik şartname hakkında, Komisyonun 28 Mart 2006 tarihli 2006/679/EC simgeli kararı (C(2006) 964 doküman numarası ile bildirilmiştir.) Baskı: Avrupa Birliği'nin Resmi Dergisi, 16.10.2006, L284/1-176 | 2006/679/EC |
| 10 | Avrupa-transit konvansiyonel demiryolu sisteminin kontrol-kumanda ve sinyalizasyon alt sistemine ilişkin karşılıklı işletilebilirlik için teknik şartname hakkında,2006/679/EC simgeli kararının EK-A'sı ile Avrupa-transit Yüksek Hız demiryolu sistemine ilişkin 2006/860/EC simgeli kararının EK-A'sını değiştiren 6 Mart 2007 tarihli 2007/153/EC simgeli komisyon kararı. Baskı: Avrupa Birliği Resmi Dergisi, 07.03.2007, L67/13-17 | 2006/860/EC |

Çizelge 2.5. Avrupa Konseyine bağlı standartlar (Holvad, 2009; Clairbois ve Garai, 2015; TCDD Bakım El Kitabı, 2018) - devam

| SIRA | AÇIKLAMA | STANDARTLAR |
|------|---|-----------------------------|
| 11 | Avrupa Konseyinin 2006/679/EC kararının Ek-A'sını değiştiren komisyonun 07.11.2006 tarihli kararı, Basım Tarihi: 07.12.2006 L342/1-165 | 2006/679/EC |
| 12 | Avrupa-transit konvansiyonel demiryolu sisteminin trafik yönetimi ve işletmesi alt sistemine ilişkin karşılıklı işletilebilirlik için teknik şartname hakkında, Komisyonun 11 Ağustos 2006 tarihli 2006/920/EC simgeli kararı (C(2006) 3593 doküman numarası ile bildirilmiştir.) Baskı: Avrupa Birliği'nin Resmi Dergisi, 18.12.2006, L359/1-160 | 2006/920/EC |
| 13 | Avrupa Konseyi ve Parlamentosunun Demiryolu sistemlerinin Karşılıklı İşletilebilirliğine dair 17 Haziran 2008 tarihli yeniden biçimlendirilmiş kararı L191 Bölüm 51. | L191 |
| 14 | Avrupa Konseyinin Birlikte İşletilebilirlik için 30.05.2002 tarihli kararı, Basım Tarihi: 12.09.2002 | 2002/730/EC L245/1-36 |
| 15 | Avrupa Konseyinin Birlikte İşletilebilirlik için 30.05.2002 tarihli kararı, Basım Tarihi: 12.09.2002 | 2002/731/EC L245/37-142 |
| 16 | Avrupa Konseyinin Birlikte İşletilebilirlik için 30.05.2002 tarihli kararı, Basım Tarihi: 12.09.2002 | 2002/733/EC L245/280-369 |
| 17 | Avrupa Konseyinin Birlikte İşletilebilirlik için 30.05.2002 tarihli kararı, Basım Tarihi: 12.09.2002 | 2002/734/EC L245/370-40 |

Avrupa'da artan ve hızlanan demiryolu ağına paralel olarak, UIC ülkeleri arasında demiryolu taşımacılığı yoğun bir trafik akışına neden olmuştur. Farklı sinyalizasyon sistemleri kullanan ülkelere geçiş yapılırken sistemler arasında karmaşıklık bir takım sorunlar doğurmuştur. Bu sorunlar lokomotif değiştirmek veya iki farklı sinyal sistemini çözebilecek ekipmanları olan trenler teşkil etmek suretiyle çözümlenmeye çalışılmıştır. Bir başka sorun da makinistlerin farklı sinyalizasyon sistemleri için özel eğitim ihtiyacı olmuştur. Demiryolu trafiğini olumsuz etkileyen bu sebeplerden ötürü, Avrupa Demiryolu Trafiği Yönetim Sistemi olan ERTMS (European Rail Traffic Management System) adında bir protokol oluşturulmuştur. Protokolün temel amacı; Avrupa ülkelerinde tek bir

sinyalizasyon dili kullanmasıdır. Avrupa Demiryolu Trafiki Yönetim Sistemine uygun olarak yapılması gereken bakımlarda dikkat edilecek standartlar Çizelge 2.6’da verilmiştir.

Çizelge 2.6. ERTMS ile ilgili standartlar (TCDD Bakım El Kitabı, 2018)

| SIRA | AÇIKLAMA | STANDARTLAR |
|-------------|--|----------------------------|
| 1 | ERTMS/ETCS Fonksiyonel Gereksinimleri Şartnamesi, Ref: ERA/ERTMS/003204, Versiyon 5.0., Tarih: 01.01.2010 | ERA/ERTMS/003204 |
| 2 | UNISIG Terim ve Kısaltmalar Sözlüğü, Ref: Subset-023, Versiyon: 2.0.0, Tarih: 01.01.2010 | Subset-023 |
| 3 | UNISIG ERTMS/ETCS Sistem Gereksinimleri Şartnamesi Sınıf 1, (1-8 Bölümler),Ref: Subset-026-(01-08), Versiyon: 2.3.0, Tarih: 01.01.2010 | Subset-026-(01-08) |
| 4 | UNISIG FFFIS Yasal Kayıt-İndirim Cihazı (Juridical Recorder-DownloadingTool), Ref: Subset-027, Versiyon: 2.3.0, Tarih: 19.10.2009 | Subset-027 |
| 5 | Eurobalise için FFFIS, Ref: Subset-036, Versiyon: 2.4.1, Tarih: 01.01.2010 | Subset-036 |
| 6 | Euroloop Alt Sistemi için FFFIS, Ref: Subset-044, Versiyon: 2.3.0, Tarih: 19.10.2009 | Subset-44 |
| 7 | ETCS Seviye 1&2’nin teknik birlikte işlerliği için emniyet gereksinimleri, Ref: Subset-091, Versiyon: 2.5.0, Tarih: 19.10.2009 | Subset-91 |
| 8 | UNISIG Araç Üstü Referans Test Kabiliyeti için Fonksiyonel Gereksinimler, Ref: Subset-094, Versiyon: 2.0.2, Tarih: 19.10.2009 | Subset-94 |
| 9 | Eurobalise FFFIS için Test Şartnamesi , Ref: UNISIG Subset-085, Versiyon: 2.2.2, Tarih: 01.01.2010 | UNISIG Subset-085 |
| 10 | UIC ERTMS/ETCS Çevresel gereksinimleri Ref: EEIG-97S066, Versiyon:5, Tarih: 01.01.2010 | EEIG-97S066 |
| 11 | UNISIG ERTMS ETCS Seviye 1 özellik listesi, Ref: Subset-076-5-1_v221, Versiyon: 2.3.1, Tarih: 19.10.2009 | Subset-076-5-1_v221 |
| 12 | UNISIG ERTMS Araç Üstü Ekipman Ön-Uyumlaştırma Gereksinimleri, Ref:Subset 107A, Versiyon: 1.0.0. Tarih: 01.01.2010 | Subset 107A |

Çizelge 2.6. ERTMS ile ilgili standartlar (TCDD Bakım El Kitabı, 2018) - devam

| SIRA | AÇIKLAMA | STANDARTLAR |
|-------------|--|---------------------|
| 13 | ETCS Marker Boards tanımı, Ref: 06E068, Versiyon: 1.0, Tarih: 01.01.2010 | 06E068 V-1 |
| 14 | ERTMS Euroradio Uyum Sağlama Gereksinimleri, Ref: Subset-092-1, Versiyon:2.3.0.,Tarih: 19.10.2009 | Subset-092-1 |
| 15 | ERTMS Euroradio Test Durumları Güvenlik Katmanı, Ref: Subset-092-2, Versiyon: 2.3.0., Tarih:19.10.2009 | Subset-092-2 |

Demiryolu araçlarının bakımlarında uyulması gereken standartlar Çizelge 2.7’de belirtilmiştir.

Çizelge 2.7. Demiryolu araçlarıyla ilgili standartlar (TCDD Bakım El Kitabı, 2018)

| SIRA | AÇIKLAMA | STANDARTLAR |
|-------------|--|-----------------------------|
| 1 | Demiryolu araçlarında kullanılan elektronik ekipman ve donanımlar. | IEC 60571; IEC 60077 |
| 2 | Tren Arabirimi için FIS, Ref: Subset-034, Versiyon: 2.0.0, Tarih: 01.01.2010 | Subset-034 |
| 3 | EEIG:97E2675B Odometer FFFIS Versiyon:5, Tarih:01.01.2010 | EEIG:97E2675B |
| 4 | 06E225 Sürücü-Makine arayüzü işletme bilgileri ,Versiyon: 1, Tarih: 06 Ekim 2006 | O6E225 |

Çizelge 2.8. Sistem yazılımı ve ara katmanlarla standartlar (TCDD Bakım El Kitabı, 2018)

| | | |
|----|--|----------------------------|
| 1 | İnsan-Makina Arabirimi için FIS, Ref: Subset-033, Versiyon: 2.0.0, Tarih: 01.01.2010 | Subset-033 |
| 2 | STM FFFIS Güvenli Zaman Katmanı, Ref: Subset-056, Versiyon: 2.2.0., Tarih: 01.01.2010 | Subset-056 |
| 3 | STM FFFIS Güvenli Bağlantı Katmanı, Ref: Subset-057, Versiyon: 2.2.0., Tarih: 01.01.2010 | Subset-057 |
| 4 | Arabirim “k” için test spesifikasyonları, Ref: Subset-102, Versiyon: 1.0.0., Tarih: 01.01.2010 | Subset-102 |
| 5 | FFFIS STM test durumları dokümanı , Ref: Subset-074-2, Versiyon: 1.0.0., Tarih: 01.01.2010 | Subset-074-2 |
| 6 | Arabirim “K” spesifikasyonları, Ref:Subset-101, Versiyon:1.0.0., Tarih:01.01.2010 | Subset-101 |
| 7 | Arabirim “G” spesifikasyonları, Ref:Subset-100, Versiyon:1.0.1., Tarih:01.01.2010 | Subset-100 |
| 8 | STM için Performans Gereksinimleri, Ref:Subset-059, Versiyon: 2.1.1., Tarih: 01.01.2010 | Subset-059 |
| 9 | FFFIS STM Uygulama Katmanı, Ref: Subest-058, Versiyon:2.1.1., Tarih:01.01.2010 | Subset-058 |
| 10 | FFFIS STM Uygulama Katmanı, Ref: Subest-058, Versiyon:2.1.1., Tarih:01.01.2010 | Subset-058 |
| 11 | İletilen bağışıklık düzeyi (Immunitylevel), | CENELEC, EN 50082-2 |
| 12 | İletilen bağışıklık düzeyi (Immunitylevel), | IEC 61000-6-2 |
| 13 | Standart CD ROM formatı, | ISO 9660 |

Demiryolu işletmeciliğinde gerek kumanda işlemlerinde gerekse de sistem iletişiminde kullanılan yazılımlar ve ara katmanlarla ilgili yapılacak bakımlarda uyulması gereken standartlar Çizelge 2.8’deki gibidir.

Demiryollarında sinyalizasyon sistemi ile çeken ve çekilen araçlar arasında dijital, güvenli ve güvenilir iletişim sağlayan GSMR teknolojisi bulunmaktadır. GSM-R sistemi diğer haberleşme ve GSM sistemleriyle birlikte çalışabilen bir sistemdir. Aynı zamanda trende kesintisiz ses ve GPRS bağlantılı internet haberleşmesi de mümkün kılmaktadır.

Sistem, yolcuların tüm gecikmelerden anında bilgilendirilmesi, inen/binen ve trendeki yolcu sayısı, trende bilet satışı ve vagon takip sistemi, trenden bakımcı ekibe anlık bilgi iletimi gibi değişik uygulama olanakları da sunmaktadır. Demiryolu sistemlerinde hem GSMR sistemlerde hem de telsiz haberleşmesinde yapılacak olan bakımlarda kullanılan standartlar Çizelge 2.9'da verilmiştir.

Çizelge 2.9. GSMR ve Telsiz (TCDD Bakım El Kitabı, 2018)

| SIRA | AÇIKLAMA | STANDARTLAR |
|------|---|---------------------------|
| 1 | Elektromanyetik Uyumluluk ve Telsiz Spektrumu Konuları; Demiryolları için Otomatik Araç Tanımlama Ünitesi | ETSI EN 300761 |
| 2 | Radyo frekans ışıınımı tarafından alev alabilir atmosferin istenmeyen ateşlenmesinin önlenmesi, | BS,6656; IEC 60079 |
| 3 | Euroradio FIS Ref:Subset-037, Versiyon 2.3.0. Tarih: 01.01.2010 | Subset-037 |
| 4 | RBC/RBC Devir Teslimi için FIS ,Ref:Subset-039 Versiyon:2.3.0., Tarih:01.01.2010 | Subset-039 |
| 5 | RadioIn-Fill FFFS, Ref:Subset-046,Versiyon: 2.0.0., Tarih: 01.01.2010 | Subset-046 |
| 6 | Trainborne FFFIS forRadioIn-fill, Ref: Subset-048, Version:2.0.0., Tarih: 01.01.2010 | Subset-048 |
| 7 | RadioIn-Fill FIS with LEU/Interlocking,Ref:Subset-049, Version: 2.0.0.,Tarih: 01.01.2010 | Subset-049 |
| 8 | EIRENE GSM-R Fonksiyonel Gereksinim Şartnamesi, Ref: EIRENE FRS, Versiyon:7, Tarih: 01.01.2010 | EIRENE FRS v-7 |
| 9 | EIRENE GSM-R Sistem Gereksinim Şartnamesi, Ref:EIRENE SRS, Versiyon: 15, Tarih: 01.01.2010 | EIRENE FRS v-15 |
| 10 | MoraneRadioTransmission FFFIS forEuroradio, Ref: A11T6001 12, Version: 12, Tarih: 01.01.2010 | A11T6001 12 |
| 11 | 876-880 ve 921-925 MHz bandlarında demiryolu için frekasbandlarının tayini ve elde edilebilirliği üzerine Elektronik Haberleşme Komitesininin 05 Temmuz 2002 tarihli kararı, Ref:ECC/DCC/(02)(05) | ECC/DCC/(02)(05) |
| 12 | RBC-RBC Güvenli İletişim Arabirimi için Gereksinimler, Ref: Subset-097, Versiyon: 1.1.0., Tarih: 01.01.2010 | Subset-097 |
| 13 | RBC-RBC Güvenli İletişim Arabirimi, Ref: Subset-098, Versiyon: 1.0.0., Tarih: 01.01.2010 | Subset-098 |

Bu alanda ülkemizde söz sahibi uygulayıcı kuruluş TCDD, bakım yapacak ekiplerin “Demiryolu Altyapısında Yükleniciler Tarafından Yürütülen Yapım, Bakım ve Onarım Faaliyetlerinde Emniyet Gereksinimlerine Dair 551 Numaralı Genel Emir” kapsamında eğitim almasını öngörmektedir. Bu eğitimin bakımla ilgili kısımları incelendiğinde, bakımın belirgin bir plan ve program çerçevesinde yapılıp, yeterli eğitimin sağlanması amaçlanmıştır (TCDD Bakım El Kitabı, 2018).

2.2. Demiryollarında Yaygın Bakım Uygulamaları

Bakım, günümüze kadar her işletme çalışmasında planlı olarak yapılması gereken bir program olarak ifade edilirken, 21. yüzyılda işletmecilerin gelir ve gider kalemlerini değiştiren önemli bir süreç olarak ifade edilmektedir (Jambekar, 2000). Demiryollarında da, diğer sistemlerde olduğu gibi sistem devamlılığı önemlidir. İşletmeciler için bakım hizmeti; önemli yatırımlar yapılan teknolojik teçhizatları çalışır halde bulundurmak, belirli süreçlerdeki arıza sayılarını azaltmak ve aniden oluşacak bakım maliyetlerini düşürmek için kullanılmaktadır (Ahuja ve Khamba, 2008). Hattın sağlıklı bir şekilde işletilebilmesi, sistem güvenliği ve cihazların ekonomik ömrü açısından bakımların doğru zamanda doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir (Ji vd., 2007; Al-najjar ve Alsyouf, 2003). Teçhizat ve makinalarda meydana gelecek olan arızalar, çalışma sürecini yavaşlatacak ve hatta durdurabilecektir. Arızalar nedeniyle meydana gelecek gecikmeler kayıp maliyetlerinin, araştırma ve düzeltme maliyetlerinin ve sistem kalitesinin düşmesi sebebiyle toplam maliyetleri artıracaktır. Beklenmeyen arızalar ve bunlara bağlı gecikmeler işletmeciler için pahalı deneyimler olmakta ve büyük maddi kayıplara sebep olmaktadır (Torres vd., 2008). Ancak unutulmamalıdır ki bakım sistemleri pahalıdır ve bakım bütçeleri maliyet yüzünden işletmeci tarafından her zaman baskılanmaktadır (Peeters ve Kroon, 2007). Bu nedenle planlanan bakımları azaltmaksızın bakım masraflarını azaltmak önemlidir (Budai vd., 2006). Bakımı bir süreç olarak ifade edersek şu alt başlıklar altında incelenir (TCDD Bakım El Kitabı, 2018):

- Planlama
- İş ortamını güvenli hale getirme

- Uygun işe uygun ekipman
- Planlanmış çalışma
- Kontrol

Planlama: Bakımın başarılı olabilmesi için önemli bir koşuldur. Bakım ve arızalarla ilgili risk değerlendirmesi yapılmalı ve bakımcılar bu sürece dahil edilmelidir (Kubzin ve Strusevich, 2006). Planlama sürecinde dikkat edilmesi gereken konular şunlardır;

- Görevlendirmelerin kapsamı, neler yapılması gerektiğinin iyi bir şekilde belirlenmesi ve diğer bakımcıların, iş ortamındaki çalışmalarını nasıl etkileyeceği,
- Risk değerlendirmesinin yapılması: Potansiyel tehlikelerin belirlenmesinin (Örneğin; tehlikeli maddeler, makinelerin hareketli parçaları, elektrik, elektromanyetik alan, kapalı alanlar, kimyasal maddeler ve havadaki toz) iyi bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Riskleri en az seviyeye indirmek veya ortadan kaldırmak için önlemler geliştirilmelidir.
- Güvenli çalışma sistemleri belirlenmelidir (çalışma izni, kilitleme sistemleri).
- Bakım faaliyeti için gereken zaman ve kaynaklar programlanmalıdır.
- Bakım ve diğer birim çalışanları arasında iletişim kanalının kurulması gerekmektedir.
- Yetkinlik ve yeterli eğitim sağlanmalıdır.

İş ortamını güvenli hale getirme: Bakımcının çalışma alanı; işaretler ve önlemler alınarak, yetkisiz girişlere izin verilmeyip çalışma ortamı güvenli hale getirilmelidir. Çalışma ortamının güç kilitlemesi, tesislerin hareketli parçalarının korunması, havalandırma ve çalışma alanına giriş-çıkışlarda bakımcılar için güvenli güzergâh ve yolların sağlanması ile temiz ve güvenli tutulması gerekmektedir (Weinstein ve Chung, 1999). Ekipman koruyucular mümkün olduğunca, iptal edilmeden küçük bakım ve onarım işlerine müsaade edecek biçimde tasarlanmalı, koruyucuları iptal etmek gerekiyorsa veya çıkarılması gerekiyorsa kilitleme prosedürleri uygulanmalıdır. Bakım biriminde çalışan bakımcılar ile diğer birimlerin çalışanları, hangi durumlarda ve ne şekilde koruyucu çıkarılabileceği hakkında eğitilmelidirler (Niskanen, 1993).

Uygun işe uygun ekipman: Bakım biriminde çalışan bakımıcılar, olumsuz ve riskli durumlarla karşılaştıklarında bu durumu tolere edecek uygun ekipman, alet ve kişisel koruyucu donanımlarına sahip olmalıdırlar. Kullanılacak aletler ve ekipmanlar konusunda işverenler sorumlu olup, aşağıda sıralanan şartları dikkate almalıdır:

- Yapılacak iş için doğru tercih olan alet ve ekipmanlar mevcut olmalıdır.
- Kullanım talimatları uygun yerlerde hazır bir şekilde bulunmalıdır.
- Ekipmanlar kullanılabilir durumda olmalıdır.
- İş ve çalışma ortamı uygun olmalıdır. (Örnek olarak yanıcı ortamlarda kıvılcım çıkarmayan aletler)
- Ergonomiye uygun olmalıdır.
- Kişisel koruyucu ekipmanlar bulunmalıdır.
- Teçhizat ve ekipmanlar ek risk oluşturmamalı, ilgili risklere uygun olmalıdır.
- Bakımcının sağlık durumu çalışmaya uygun olmalıdır.
- Gerekli ayarlar yapıldıktan sonra, teçhizat bakımcıya tam olarak uymalıdır.

Planlanmış çalışma: Bakımcılar için güvenli çalışma koşulları belirlenip gerekli yerlere iletilmeli, koşullar hem çalışanlar hem de denetleyiciler tarafından anlaşılmalı ve doğru biçimde uygulanmalıdır. Bakım süreci takip altında gerçekleştirilmeli, bu sayede belirlenen emniyet uygulamaları ve kurallar gözlenebilmelidir. Bakım süreçleri genellikle zaman kaynaklı ve çalışan sistem altında yapılan bakımdan kaynaklı olarak baskı altında yürütülür. Örneğin; Bakım esnasında yapılacak bir hata, sistemi duraklatabilir. Bu yüzden zaman baskısı da olsa güvenlik prosedürlerinin takip edilmesi gerekir. Prosedürlere uymadan yapılan kısa yollu çalışmalar; kazalara, yaralanmalara ve maddi hasara neden olabilmektedir. Beklenmedik olaylar da prosedürlerde yer almalıdır. Kişinin kendi yetkinliğini aşan veya öngörülemeyen bir sorunla karşılaşıldığında güvenlik sistemi, işi durdurmalıdır. Unutulmamalıdır ki, kişinin beceri ve yetkinlik derecesini aşan olaylar, kazalara neden olabilmektedir (Levitt, 2000).

Denetim Yapma: Bakım sürecinde, bakım işleminin tam olarak gerçekleştirildiğinde, bakımı yapılan teçhizat ve ekipmanın güvenli bir şekilde çalışarak bakım sonrasındaki arızalı malzemenin onarılıp, sistemin yenilendiğinden emin olmak için son kontrol mutlaka yapılmalıdır. Bütün kontroller yapıp bitirildikten sonra bakım çizelgesi imzalanır ve bakımcılar bilgilendirilir. Son olarak da, yapılan işlemleri ve karşılaşılan sorunları, bu sorunlarla ilgili görüşleri içeren bir rapor hazırlanmalıdır. Ayrıca rapor bu süreçte çalışanların ve çevresinde çalışanların da dahil edildiği bir ekip toplantısında tartışılmalı, bakım faaliyetleriyle ilgili görüş ve iyileştirme için öneriler ele alınmalıdır. Bu sonraki bakım programlarına dayanak teşkil edecektir.

Bakım bu işlemlerin yanı sıra aşağıdaki gibi devreye alma işlemlerini de içerir (Reason, 2019):

- Test ve deneme işlemleri,
- Emniyet aygıtlarını sıfırlama,
- Uygun işaretlerin sağlanması,
- Nihai teslim öncesi deneme işlemleri,
- Tüm alanın restorasyonu ve temizliği,
- Bakım atıklarının toplanması ve nakli işlemleri.

Bakım sistemi planlı bir sürece bağlanırken şu konu unutulmamalıdır; çok fazla bakım yapılması sistemdeki arızaları önlemekten ziyade, sistemin aksamasına, başarısızlığa ve sistem kesintisine neden olabilir. Bu sebeple yaygın düşüncenin aksine, bakımın rolü en hızlı sürede “düzeltmek” değil, bunun yerine ekipman veya sistemle ilgili sorunların neden olduğu tüm kayıpları önlemektir.

Tüm bu bakım misyonunu sağlamış olsak bile aşağıdakiler hakkında yetersiz bilgi, kazalara yol açmaktadır.

- Bakım çalışanları veya diğer sistem çalışanlarının varlığı,
- Genel güvenlik prosedürleri, güvenlik teknolojisi ve ekipmanlar,
- Çalışma ortamı,

- Bakım işlemleri için işletmenin hazırlanması ve bakım uygulamalarını başlatmak için gereken izinler.

Bakım uygulamalarına başlamak üzereyken bakım çalışanlarının ne zaman geleceğini mevcut çalışan personelin bilmesi gerekmektedir. Risk değerlendirilmeleri yapılmalı ve önleyici tedbirler uygulanması gerekmektedir. Bakım birimi çalışanları, risk değerlendirmesi sonuçları ve önleyici tedbirler hakkında bilgilendirilmelidir. Bakımcıların görevleri, yetki ve sorumlulukları açık bir şekilde ifade edilmelidir ve süreçle ilgili konular bütün taraflarca anlaşılmalıdır (Levitt, 2000).

Teknolojide bilgi işlem ve otomasyon sistemlerinin gelişimi ile birlikte üretim yönetimindeki; tam zamanında üretim ve yalın üretim gibi yeni yaklaşımların gerekli kıldığı yeni yapılanmalar, bakım faaliyetlerinin önemini de artırmıştır. Bakım, her üretim kuruluşunda olması gerekli bir faaliyet olarak kabul edilirken, günümüzde ise şirketin gelir ve giderlerini etkileyen kritik bir işletme fonksiyonudur (Jambekar, 2000). Sürekli büyüyen küresel pazarda verimlilik, herhangi bir şirket için rekabetçi piyasada tutunmada kilit bir rol oynamaktadır (Flint 2004). Verimlilik farklı bakım stratejilerine odaklanarak etkin bakım stratejilerinin uygulanmasıyla sağlanabilir (Faber ve Meyer, 2006). Verimli bakım planlaması için, bu bakım tiplerinin belirlenmesi ve uygulanmasında standartları belirlerken göz önünde bulundurulması gereken üç önemli konu şunlardır (Ferreira ve Murray, 1997):

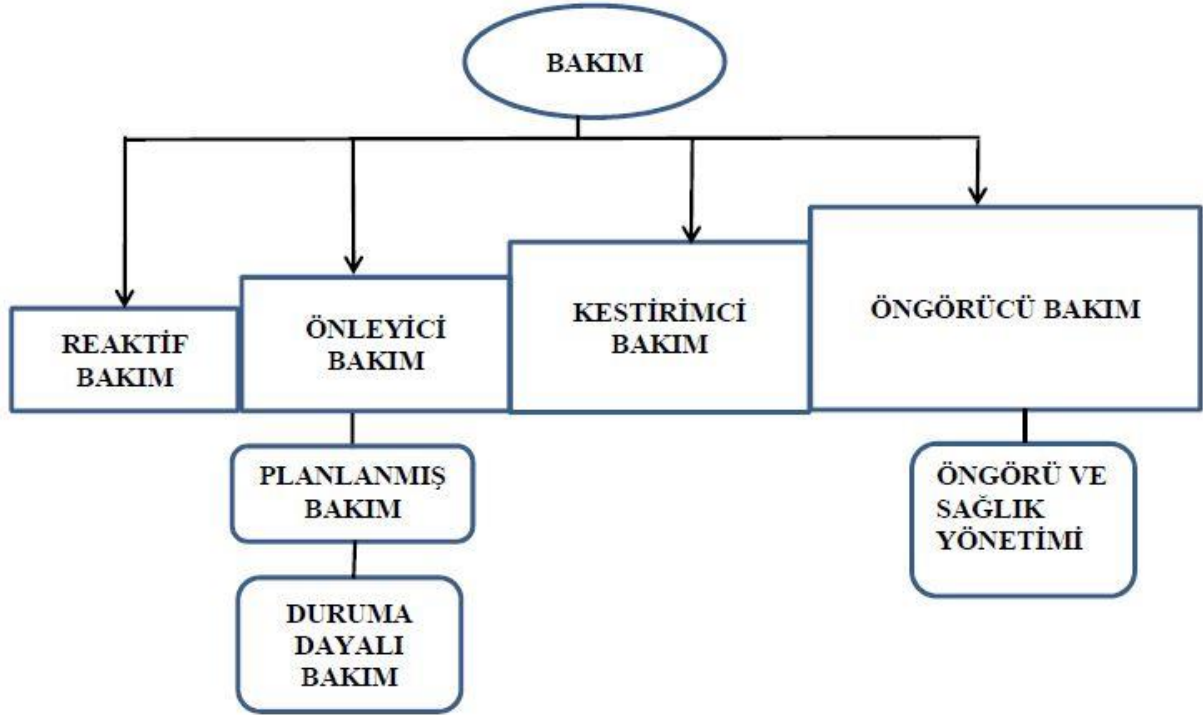
- Bakım zamanı gelmiş fiziksel ekipmanların düzeltilmesi ve yenilenmesi faaliyetleri
- Çalışan sistemdeki parçaların arızalanması, bakım planlama modellerinin kapsamı ve yetenekleri
- Sistem ekipmanlarının çalışması esnasında sistematik açıdan mühendislik bilimini de dikkate alarak bakım prosedürlerinin optimizasyon işlemlerine dahil edilmesi ve bunula ilgili parametreler

Verimliliğin bakım stratejileriyle geliştirilmesi göz önüne alındığında, demiryollarında önleyici bakım faaliyetleri, küçük rutin işlere ve projelere bölünerek incelenebilir. Rutin bakım faaliyetleri; örneğin rayların denetimi, makaslar, hemzemin geçit, sinyalizasyon sistemi ve makas yağlama gibi denetimler küçük onarımlardan oluşur (Esveld 2001). Bu faaliyetlerin gerçekleştirilmesi çok zaman almaz ve düzenli olarak yapılır. Düzenli yapılan

bu bakımların zaman periyodları aylık ile yıllık bakım faaliyetleri olarak değişmektedir (Gilbert ve Finch, 1985). Projelerde, bakım konsepti malzemelerin yenilenmesi çalışmalarını içerir. Bu bakımın kapsamında; balast temizliği, boraj çalışmalarını içerir. Bu bakım faaliyeti birkaç yılda bir yapılır (Esveld, 2001). Tren işletmeciliğinde yapılması planlanan bakımlarsa, tren seyrüseferi göze alınarak programlanır; böylece tren işletmeciliğini etkilemeden düzenli bakımlar sağlanmış olur. Birçok ülkede bakımlarda, makinist ve dispeçerleri daha az etkileyecek süreler bulacak zaman çizelgeleri kullanır. Çünkü tren işletmeciliği sırasında bakımların yapılması, bakım emniyeti açısından güvenli olmayabilir. Bu nedenle, bazı ülkelerde (örneğin Hollanda) bakım çalışmaları gece boyunca (sadece birkaç tren varken veya hiç tren yokken) veya gün içinde tren işletmeciliğinin kesilmesi ile yapılır (Faber ve Meyer, 2006).

2.2.1. Bakım Tipleri Açısından Sınıflandırma

Literatürde bakım tipleri açısından farklı sınıflandırmalar bulunmaktadır. Şekil 2.3'te bu sınıflandırmalara bir örnek verilmektedir. Bu şekil incelendiğinde raylı sistemlerde bakım; reaktif bakım, önleyici bakım, kestirimci ve öngörücü bakım olmak üzere dört ana başlıkta incelenebilir. İlk olarak arıza durumlarında kullanılan reaktif bakım incelenecektir. Reaktif bakım, koruyucu bakımın bir parçası olarak yapılan ve ekipmanın ilk durumuna getirilmesinde rol oynayan bir bakım şeklidir. Sistemlerde belirli aralıklarla yapılan Önleyici bakım (Preventive Maintenance), olası arızaları bulabilecek, değişiklikler veya onarımlar yapabilecek ve bu sayede arızaları önleyecek bir sistem oluşturmaktadır. Önleyici bakımlardan sonra sistem sürekliliğinin sağlanması ve hat güvenliğinin önemi için arızaların önceden tespitini sağlayan Kestirimci bakım (Predictive Maintenance) incelenecektir. Kestirimci bakımda doğru bir bilgi sistemi oluşturularak, bakım modellerine tahmin etmeye çalıştığımız olayların örneklerini sunmaktadır. Hatalar ve bakım faaliyetleri geçmiş modellerin bu olayları tahmin etmesini sağlamaktadır. İdeal bilgi sistemi, sistem durumuna ait gözlemlenmiş zaman dizisinden oluşmaktadır.



Şekil 2.3: Demiryolu Bakım Türleri

Bu bakım yöntemlerini de içine alan, proaktif bir bakım türü olan öngörücü bakım, demiryollarında yenilikçi bakım yaklaşımlarının inceleneceği materyal ve yöntem başlığında ele alınacaktır.

2.2.1.1. Reaktif bakım

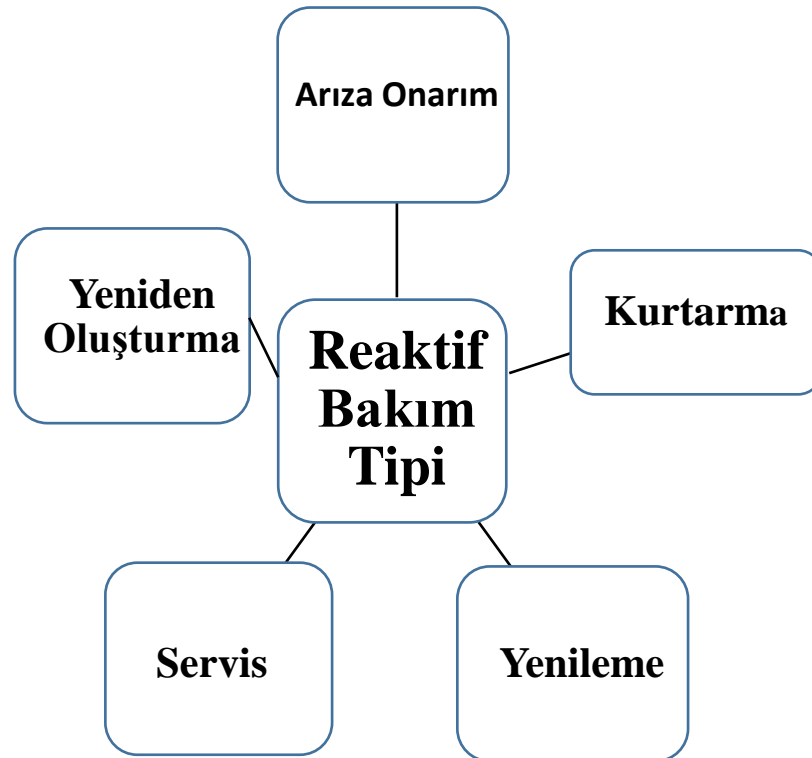
Faaliyetlerin bir sistemi arızalı bir durumdan çalışan bir duruma geri getirmeyi amaçladığında yapılan bakımdır. Bu bakım tipinde arızalanan parça genel olarak bakım esnasında değiştirilir. Arızadan önce değiştirme, yalnızca arıza oranı kesinlikle artıyorsa avantajlıdır. Bu durumun mantığı, sabit bir arıza oranına sahip ekipman göz önüne alınarak anlaşılabilir. Bu gibi durumlarda, arıza oluşmadan ekipman değiştirmek ancak şimdiki durumdan iyi olması koşuluyla yapılır. Bu değişim ekipmanın bir sonraki arızalanma olasılığını etkilemez. Bu nedenle, değiştirme maliyetleri yükseliyorsa da, arızadan önce herhangi bir parçanın değiştirilmesi tavsiye edilmez (McCall, 1965). Arızalanma sıklığı zamanla azalır aynı sıralama geçerlidir. Azalan arıza oranı durumunda, ekipman ne kadar

uzun süre çalışırsa, bir sonraki durumda arızalanma olasılığı o kadar düşüktür ve arıza süresinin hesaplanması da pek mümkün değildir (Mckone ve Weiss, 2002).

Bu bakım tipinde arızanın tespiti için; potansiyel sorunların ne zaman başladığını belirtmek için belirlenmiş değer aralıkları, insan duyuları ve gerekli cihazlar kullanarak tespitler yapılır. Bu tespitleri önceden belirlemek için insan kararları gerekir, böylece denetim veya otomatik tespit eşik sınırının ne zaman aşıldığını belirlenebilir (Mobley, 2002).

Reaktif bakım için genel kurallar şunlardır:

- Kritik bileşenleri incelenmelidir
- Güvenlik her şeyden önemlidir
- Arızalar onarılmalıdır
- Çalışırsa düzeltme yapılmamalıdır



Şekil 2.4: Reaktif Bakım Tipi (JJ McCall, 1965)

Reaktif bakım, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi beş ana kategoride sınıflandırılabilir (Dhillon, 2002).

- **Arıza onarımı:** Arızalı ürün tekar çalışır duruma getirilir.
- **Kurtarma:** Bu bakım maddesi, onarılamayan malzemelerin elden çıkarılması ve kurtarılabilir malzemelerin onarım, revizyon veya yeniden yapılanmasıyla ilgilidir.
- **Yeniden Oluşturma:** Bir öğeyi performans, yaşam beklentisi ve görünümdeki orijinal durumuna mümkün olduğunca yakın bir standarda geri getirmekle ilgilidir. Bu, tüm parçaların tamamen sökülmesi, tüm parçaların incelenmesi, aşınmış ve kullanılamaz parçaların orijinal şartnamelere ve üretim toleranslarına göre onarılması, değiştirilmesi, orijinal üretim kurallarına göre yeniden montajı ve test edilmesi yoluyla elde edilir.
- **Yenileme:** “Sadece uygun şekilde kontrol edin ve onarın” yaklaşımını kullanarak bir öğeyi bakım yapılabilirlik standartlarına göre hizmet verilen genel durumuna geri getirilmesidir.
- **Servis:** Doğru bakım işlemlerinin sağlanabilmesi için işin uzmanı yetkili servisler gerekebilir.

Reaktif bakımda genel olarak oluşan arızalar giderilir. Arıza yapma olasılığı zamana bağlı olmayan elemanları kapsar. Plansız bakımlar reaktif bakım kapsamında yer almaktadır. Bir parçanın bilinen veya tahmin edilen arızasının düzeltilerek belirlenen duruma geri getirmek için yapılan bakım faaliyetleri olan plansız bakımlar, ortaya çıkan arızaların veya hasarların giderilmesi amacıyla uygulanırlar. Sistem çalışması veya kontroller esnasında trafik emniyetini tehlikeye düşürücü herhangi bir arızanın oluşması durumunda, plansız bakım ve onarım işlemlerinin hemen uygulanması gerekmekte ve düzeltici işlem gerçekleştirilmeden sistemin servise verilmesi mümkün olmamaktadır. Bu bakımlarda, sistemin bakım işlemlerinin ne kadar süreceği dolayısı ile sistemin ne kadar süre bakım kalacağı bilinmemektedir (Gürbüz ve Cömert, 2012).

Bakımın doğru yönetimi birçok şirkete verimliliği ve kârlılığını arttırma konusunda önemli bir potansiyel sunar (Sheut ve Krajewski, 1994). Geleneksel bakım yöntemlerinde, bakım

maliyetleri planlaması ve kontrol edilebilmesi zordur (Pintelon ve Gelders 1992). Bir cihaz arızalanacaksa tesadüfen görülür veya arızalandıktan sonra değiştirilir ve buna dayanarak bir bakım maliyeti ortaya çıkar (Sheut ve Krajewski, 1994). Cihaz arızalandıktan sonra yapılan reaktif bakımlarda cihazın bağlı olduğu sistem ekipmanı, arıza giderilene kadar sistemin düzgün çalışmasına izin vermeyecektir. Bu da arızadan kaynaklanan maliyeti artıracaktır. Sistem bakımlarını reaktif bakım çerçevesinde planlayan bakım personeli, bu maliyeti hesaplayarak planlama yapmalıdır (Dhillon, 2002). Geleneksel olarak, sistem arızalarını gidermede birçok reaktif bakım tekniği vardır. Bu teknikler arasında servis ekipleri, envanter tamponları, makine yedekliliği ve benzerleri bulunmaktadır (Peele ve Chapman, 1984). Reaktif bakım çoğu sistem arızasının, bozulma sıklığını azaltsa, böyle bir bakım diğer bakımlara göre çok maliyetlidir (Elsayed ve Dhillon, 1979). Bakım ekibinin büyüklüğünün artırılması; bakım süresini hızlandırabilir ve sistem kullanılabilirliğini hızla geri kazanabilir. Ancak, bu yaklaşım yedek parça tedariki kadar etkili olmayabilir. Yöneticilerin bakım maliyetini planlamak ve kontrol etmek için alternatif politikaların fiyat/performans analizini yapma kabiliyetine sahip olmaları önemlidir (Hegedús vd., 2018).

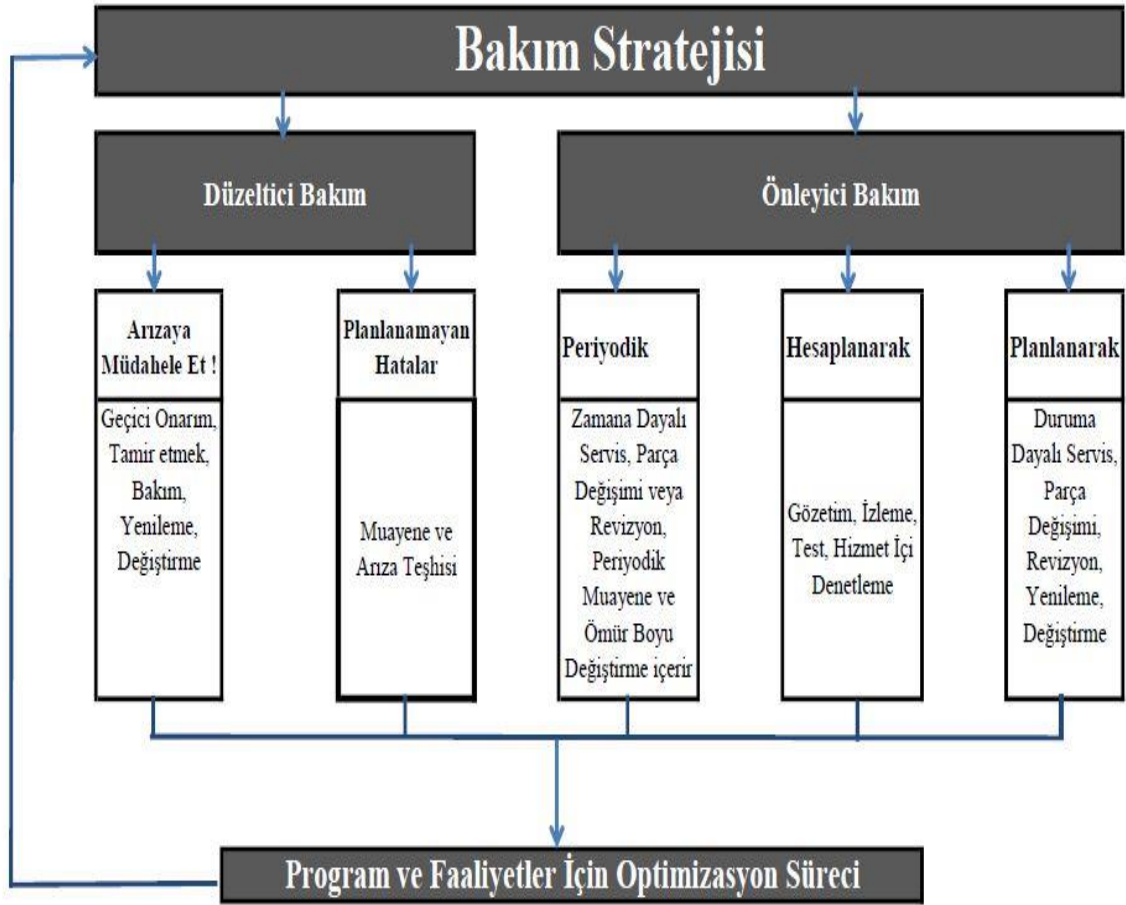
2.2.1.2. Önleyici Bakım

Faaliyetlerin önceden belirlenen aralıklarla veya tavsiye edilen kriterler uyarınca arıza olasılığını ya da bir öğenin işleyişinin bozulmasını azaltmak için planlanarak gerçekleştirildiği bakım olan önleyici bakımda, faaliyetler planlanmıştır ve bir sistemin arızaya yol açan bozulmasını kontrol etmeye yöneliktir. Bakım, bir sistemin parçalarını çalışır durumda tutmakla ilgilidir. Bakım yönetiminin amacı, arızaların olumsuz etkilerini azaltmak ve sistem kullanılabilirliğini minimum maliyetle en üst düzeye çıkarmaktır. Geleneksel olarak, böyle bir amaca ulaşmak için iki temel yaklaşım vardır. Birincisi, ortaya çıktıklarında ekipman arızalarının sıklığını azaltmaya çalışan önleyici bakımdır. Amaç, olası arızaları bulabilecek, değişiklikler veya onarımlar yapabilecek ve arızaları önleyecek bir sistem oluşturmaktır. Bir diğeri, bir kez meydana geldiğinde ekipman arızalarının şiddetini azaltmaya çalışan reaktif bakımdır. Önleyici bakımın aksine bu taktik, ekipmanı mümkün olan en kısa sürede üretime geri getiren bakım prosedürlerine ve makine çalışmıyorken üretim kaybını en aza indiren diğer alternatiflere odaklanır (Gilbert ve Finch, 1985). Üretim

hızının yüksek olduğu sistemlerde en büyük zorluklardan biri, bakım organizasyonunun rolünü gerçekleştirmede ekipmana erişim sağlamak için bakım yapmaktır. Önleyici bakım yapmanın avantaj ve dezavantajlarını Şekil 2.5'deki gibi genel kapsamda belirtilmiştir (Swanson, 2001).

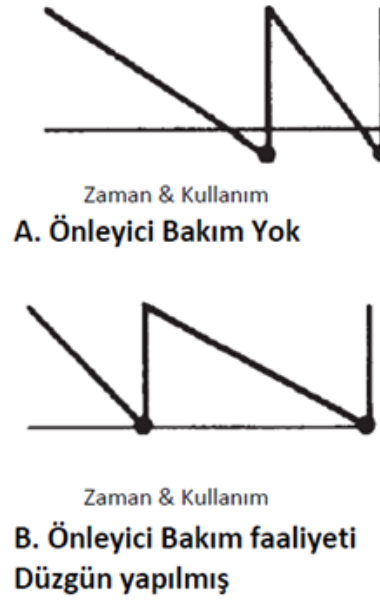
Önleyici bir bakım programı, genellikle bakım parametrelerini "mümkün olan en iyi" şekilde yapılması için uygulanan yöntemlerden biridir. Bunu yapmak için, çeşitli bakım dönemlerinde gerekli maliyet hesapları çıkarılır ve bakım maliyetleri karşılaştırılarak planlama yapılır. Şekil 2.5'deki karşılaştırmada da bahsedildiği üzere reaktif bakımlarda arızaya müdahale etme esnasında parça değişimi söz konusu olup, bakım periyodları planlanamamaktadır. Önleyici bakımda ise servis süresi, revizyon ve muayene süresi hesaplanarak bir bakım planlaması yapılacaktır. Önleyici bakım faaliyetlerinin çoğu, genellikle aynı anda birkaç bileşeni içerir. Bir ortak önleyici faaliyetin maliyeti, benzer bakım işlemlerinin ayrı ayrı yapılması nedeniyle oluşan toplam maliyetten daha ekonomiktir. Aynı anda birkaç bileşenin bakımının yapılması aslında en uygun bakım yöntemi değildir. Ancak yine de bir bileşen grubunun eş zamanlı kontrol, inceleme ve bakımdan geçirilmesi durumunda maliyet ve bakım işlemleri anlamında kazançlar vardır (Gertsbakh, 2000).

Önleyici bakım yönetiminde özellikle reaktif bakıma göre belirgin avantajları vardır. Arızaları gidermeye yönelik reaktif bakımın aksine, koruyucu bakım planlanabilir. Bu, "reaktif" yönetim yerine "ön aktif" anlamına gelir. İş yükleri, ekipmanın makul zamanlarda önleyici faaliyetler için hazır olması için planlanabilir. Fazla mesailer azaltılabilir veya ortadan kaldırılabilir. Oluşabilecek sürprizler azalır. Uygun olduğunda iş yapılabilir; bununla birlikte, tüm çalışmaların fazla mesai yapmadan işin zamanında yapılmasını sağlamak için zamana dayalı koruyucu bakım görevlerinin uygun şekilde dağıtılması gerekir. Önleyici bakım yaklaşımı, hangi parçaların gerekli olacağına planlanmasına izin verdiği için ve ne zaman olacağına göre, söz konusu maddi gerekliliklerin etkinlik için hazır olduklarından emin olmaları beklenebilir. Önleyici bakım uygulanmadığında ortaya çıkabilecek arızaları gidermek için gereken stoklarla karşılaştırıldığında önleyici bakım uygulanan sistemlerde daha küçük bir parça stoğu gerekir. Üretime yüksek talep ve düşük ekipman bulunabilirliği nedeniyle, arıza durumunda, yedek ekipman genellikle gereklidir.



Şekil 2.5: Bakım Stratejisi (Swanson, 2001)

Bazı yedeklemeler önleyici bakım için hala gerekli olabilir, ancak ihtiyaç ve yatırımlar kesinlikle azalacaktır. Önleyici denetimler veya sistem tespit cihazları kullanılmazsa, sistem ekipmanı arızalanana kadar çalışıp, önemli durumlarda bozulabilir ve diğer sistemlerde de bozulmalara neden olabilir. Sistem performansı genellikle Şekil 2.6'da gösterildiği gibi testere dişi şeklini izler, bu da bakımdan sonra iyi sonuç verir. Önleyici bakımın yapılmadığı sistemlerde kullanım ömrü zaman çizelgesinin dışına çıkar ve sistem kullanılamaz. Önleyici bakımın doğru yapıldığı bir sistemde zaman çizelgesi boyunca sistemin kullanılması öngörülmektedir. Sistem, arıza meydana gelince tekrar yüksek seviyeye getirilmeye kadar zaman çizelgesinde kullanılamaz. İyi bir algılama sistemi, çok düşük bir seviyeye ulaşmadan önce düşük bir performansı izler.



Şekil 2.6: Kabul Edilebilir Performansı Korumak için Önleyici Bakım (Gertsbakh, 2000)

İyi bir önleyici bakım, kaliteli çıktı almayı sağlar. Toleranslar kontrol sınırları içinde tutulur. Doğal olarak, verimlilik de artar. Firmalar genel olarak asıl amaç olan fayda ve karları kabul etmeden yalnızca maliyetleri göz önünde bulundururlar. Önleyici bakım; reaktif bakım, önleyici bakım ve üretim gelirleri arasında üç yönlü bir denge sağlar.

Önleyici bakım yapmak sistem bütünlüğü için çok önemli olmasına rağmen, bazı eksikliklerin en aza indirilmesi gerekmektedir (Mobley, 2002). Özellikle bir kişi sisteme her müdahale edişinde, ihmal, bilgisizlik, kötüye kullanım veya yanlış işlemler sonucu hasar meydana gelebilir. Yani burada sistematik olarak hata yapmaya müsait olan insanlar yüksek güvenlik sistem sertifikalarına sahip cihazlara müdahale etmektedir. Sistem arızası sırasında kullanılacak olan yedek parça, sistemde kullanılmakta olan parçalara göre daha hızlı arızalanma ihtimali bulunmaktadır. Yedek parçalar genellikle yeni ekipmana yerleştirilen parçalarla aynı kalite güvence ve güvenilirlik testlerine tabi tutulmaz. Parçaların önceden planlanmış önleyici bakım aralıklarında değiştirilmesi, bir arıza meydana gelinceye kadar beklemek yerine, parçanın arızalanmadan önceki kullanım ömrünü sonlandıracağı ve bu nedenle daha fazla parça gerektireceği açıktır. Bu, parça maliyetinin genellikle en küçük bileşen olacağı parçalar, işçilik ve arıza süreleri arasındaki değişimin bir parçasıdır. Ancak kontrol edilmesi gerekir. Bugün harcanan maliyet, enflasyonun zaman değeri göz önüne

alındığında harcanan veya yarın harcanacak olan maliyetten daha değerli olmasına neden olduğundan, önleyici bakıma yapılan yatırımın, bu maliyetlerin zamanında yapılan bakım maliyetinden daha erken yapıldığı kabul edilmelidir.

Planlanmış Bakım

Zamanlanmış, sabit aralıklı önleyici bakım görevleri genellikle önceden tespit edilemeyen arızalar azaltılabilirse veya sistem ekipmanlarınca belirlenirse kullanılmalıdır. Değer aralığı tespit edebilen ve durum izleme görevlerini başlatabilecek sabit aralıklı bakım ve sabit aralıklı denetim arasında ayırım yapılmalıdır. Buna örnek vermek gerekirse sabit aralıklı görev örnekleri arasında, değişiklik yapılması gerekip gerekmediğine bakılmaksızın, bir otomobilde 4.800 km yağ değişimi ve 77.200 km buji değişiklikleri bulunur. Bu, israf edici olabilir, çünkü tüm ekipman ve çalışma ortamları aynı değildir. Bir durum için doğru olan, bir başkası için doğru olmayabilir (Moblely, 2002).

Planlanmış bakımın genel olarak avantajları güvenli çalışma koşullarını sağlamak, cihazdan maksimum performans elde etmek, arıza sıklığını azaltmak ve üretim kayıplarını engellemek, yedek parça ve işçilik maliyetlerini azaltmak, etkili yedek parça stok planlaması sağlamak, enerji tasarrufu sağlamak gibi birçok avantajı bulunmaktadır. Genel olarak, planlanmış bakımın birçok avantajı olmakla birlikte, avantajların ve dezavantajların, pozitifin artırılması ve negatifin azaltılması için gözden geçirilmesi elbetteki tüm sistemlerde olduğu gibi faydalıdır. Çoğu durumda, avantajların ve dezavantajların, kullanılan koruyucu bakım görevleri ve tekniklerinin türüne göre değişmektedir. Planlanmış bakımın birtakım dezavantajları da bulunmaktadır. Ekipmanların bakım programına uygun olarak bakım görmesinden kaynaklı olarak, gerektiğinden daha yüksek bakım maliyetine neden olur. Ekipmanlar kullanım açısından mükemmel durumda olsa bile, yine de süresi geldiğinden dolayı bakım yapılması ve değiştirilmesi gereken parçaların değiştirilmesi gerekmektedir. Bir parçanın arızalanmadan önce değiştirilmesi gerekiyorsa bunun tespit edilmesi gerekmektedir. Bu ancak bakım esnasında fark edilirse değiştirilebilir. Bu dinamik sistemlerde sürekli malzeme kontrol isteği doğurmaktadır (Dhall ve Solanki, 2017).

Duruma Dayalı Bakımı

Son yıllara kadar bakım işlemlerinin çoğu önceden belirlenmiş önleyici ya da reaktif yaklaşımla gerçekleştirilmekteydi. Önceden belirlenmiş önleyici yaklaşım, bileşenlerin, alt sistemlerin veya sistemlerin bozulmasını önlemek için sabit bakım aralıklarına sahiptir. Açık bir arıza veya arıza meydana geldikten sonra reaktif bakım yapılır. Her iki yaklaşımın da üretim kaybı, yedek parça bulundurma maliyeti, kalite eksiklikleri vb. nedeniyle birçok uygulamada maliyetli olduğu görülmüştür (Sethiya, 2006).

Temel parametreleri göz önüne alındığında önleyici bakım tipi olan duruma dayalı bakım (DDB), hangi bakımın yapılması gerektiğini seçmek için varlığın fiili durumuna dayanan bir bakım stratejisidir. DDB'de bakım, belirli göstergelerin yaklaşmakta olan başarısızlığı ve düşük performansı göstermesi durumunda yapılır. Durum verileri dahili algılayıcılarla sürekli olarak veya belirli aralıklarla toplanır. Günümüzde, teknolojik gelişmeler veri toplama, saklama ve analiz etmeyi kolaylaştırmaktadır. Bakımın önceden tanımlanmış, zamanlanmış aralıklara göre yapıldığı planlanmış, zamanlanmış bakımın aksine DDB 'de bakım; sistem ekipmanları tarafından tetiklendiğinde yapılır. Önleyici bakımın diğer türlerine kıyasla, bakım işleri arasındaki süre uzundur, çünkü DDB'de bakım gerektiği gibi yapılır (Sethiya, 2006). Duruma dayalı bakım tekniklerinin kullanımı genellikle sabit aralıklardan daha iyidir (Moblely, 2002).

DDB'nin amacı, yaklaşmakta olan ekipman arızasını tespit etmektir, böylece bakım gerektiğinde planlanabilmektedir. DDB, önleyici ve düzeltici faaliyetlerin doğru zamanda planlanmasını sağlar. DDB, ekipman çalışırken gerçekleştirilir ve bu da normal operasyonlardaki aksaklıkları azaltır. DDB ayrıca:

- Ekipman güvenilirliğini artırır,
- Ekipman arızalarının maliyetini düşürür,
- Bakım için harcanan zamanı en aza indirir,
- Arızalardan dolayı planlanmamış aksama sürelerini en aza indirir,
- Acil yedek parça ihtiyacını en aza indirir,
- Faaliyetleri planlayarak fazla mesai maliyetlerini en aza indirir,

- Bakım aralıklarını optimize eder,
- İşçi güvenliğini artırır
- Sistem hasarı olasılığını azaltır. (Sethiya, 2006)

Modern mühendislik sistemleri ve demiryolu teknolojisi gün geçtikçe daha da karmaşık hale geliyor. Bu sistemler gün geçtikçe daha fazla dinamik ortamlarda çalışıyor. Böylece, bu tür sistemlerin güvenilirliğini sürdürmek daha karmaşık ve zorlu bir hale geliyor (Uckun vd., 2008). Klasik olarak yapılan önleyici bakımlarda, belirli bir süreden sonra ekipmanlara düzenli servis ve bakımı önerilir (Lee vd., 2001).

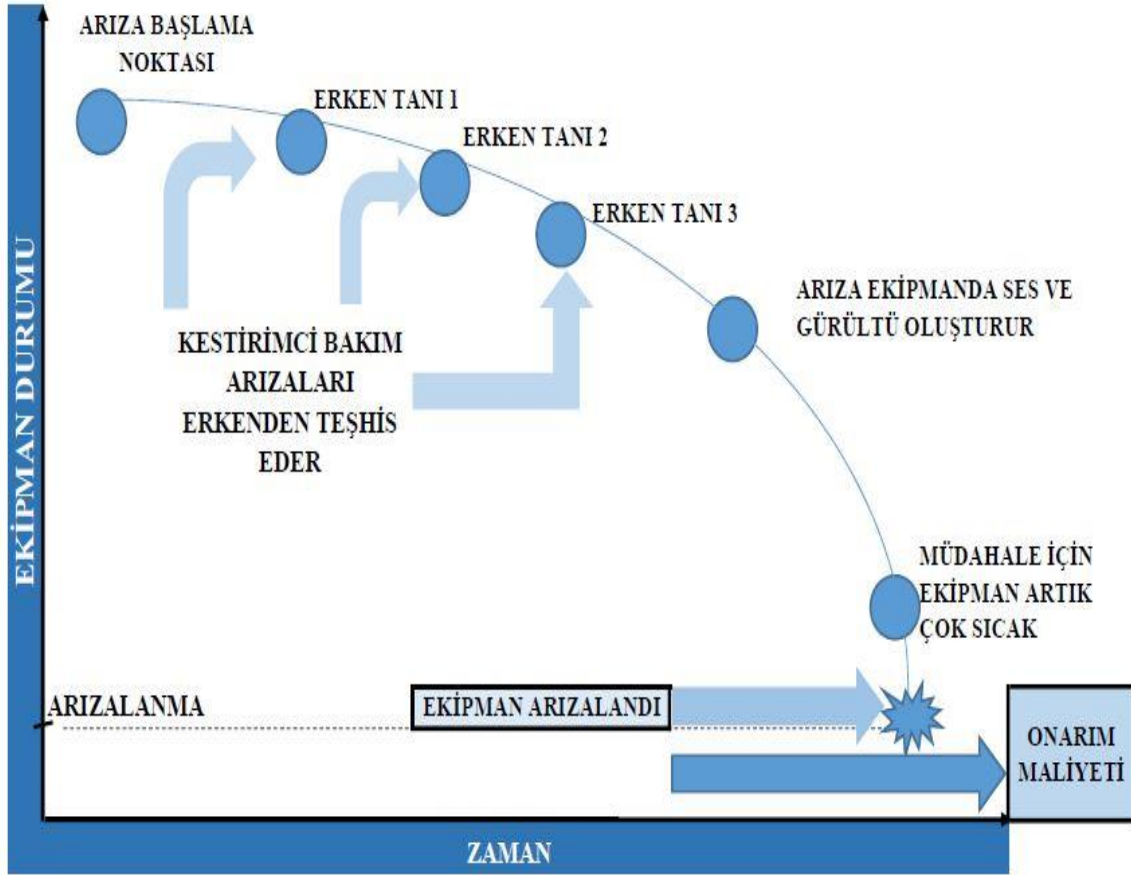
2.2.1.3. Kestirimci Bakım

Kestirimci Bakım, arıza olasılığını azaltmak için normal çalışma sırasında ekipmanın performansını ve durumunu izleyen bakımdır (Tan ve Raghavan, 2008). 1990'lı yıllardan beri endüstriyel dünyada kestirimci bakım kullanılmaktadır. Kestirimci Bakım, önce ekipman arızasının ne zaman ortaya çıkabileceğini (belirli faktörlere dayanarak) tahmin etmeyi ve ardından düzenli olarak planlanmış ve düzeltici bakım yoluyla arızayı önleme becerisidir (Moblely, 2002).

Kestirimci Bakımın görevleri, planlanmamış aksama sürelerini ve düzeltici veya onarım faaliyetleriyle sonuçlanabilecek erken ekipman hasarlarını önlemeyi amaçlar. Bu bakım yönetimi yaklaşımı esas olarak, zamanlanmış bir program veya kabul edilebilir güvenilirlik ve kullanılabilirlik seviyelerini korumak için tasarlanmış bakım periyotlarını kapsar. Kestirimci bakımın gerçek uygulaması kullanım alanlarına göre büyük ölçüde değişir. Kapsamlı bir kestirimci bakım programı, tüm kritik tesis makineleri için onarım, yağlama, ayarlamalar ve makine yeniden yapılandırılmaları gibi tüm sistem ekipmanlarının bakımını planlamaktadır (Moblely, 2002). Kestirimci bakımı önleyici bakımdan ayıran özellik, önleyici bakımın belli zaman dilimleri içinde yapılması; kestirimci bakımın ise, kestirimci bakım sistematigi olarak ölçme, gözlem ve değerlendirmeler sonucunda belirlenecek zamanda yapılmasıdır (Dhillon, 2002). Kestirimci bakımın önemli aşamalarından biri, sistemin veya donanımın performansındaki bozulmayı görme olanağı sağlayan ölçme ve

gözleme analizleri belirlenmesidir (Moubay, 1997). Kestirimci bakım yaklaşımının dezavantajı, arızalı ekipmanların yanlış değerlendirilmesinden dolayı bakım işlerinin artması olabilmektedir (Sethiya, 2006). Ancak bu sorun eğitimle ve tecrübe edinildikçe azalır ve zamanla ortadan kalkar. Kestirimci bakım yaklaşımında, çalışır durumdaki makinelerin durumlarını izleyerek, oluşabilecek muhtemel arızaları, analizler neticesinde tahmin ederek uygun bakım zamanını ve uygun stokları planlayarak arızaya müdahale etme amacı vardır (Yaman, 2014).

Kestirimci bakım, öncelikle sistemi değerlendirmek için dayanıklılık test teknikleri, görsel inceleme ve performans verileri kullanır. İsteğe bağlı olarak zamanlaması ayarlanmış bakım görevlerini, yalnızca ekipman tarafından uygun bakım görevlisiyle bakımı yapılır (Faber ve Meyer, 2006). Kestirimci bakımla Şekil 2.7 ile ifade edilen ekipman olası arıza durumunun zaman bağlı değişim grafiğinde, arızayı ilk başlangıç zamanında tahmin etmek imkanı olabilir. Arıza başladıktan sonra sisteme uygun olarak tasarlanmış bir Kestirimcibakım sistemi, arızayı ekipmana zarar vermeden tespit ederek ekipmanın ve bu ekipmana bağlı diğer sistemlerin daha fazla zarar görmeden teşhis edilmesini sağlar. Ekipman durumunun kontrolü zaman içerisinde erken teşhis edilemezse onarım maliyeti artmaktadır. Şekilde Erken Tanı1, Erken Tanı 2 ve Erken Tanı 3 zaman periyodlarında teşhis edilemeyen hata, zaman geçtikçe müdahale şansını azaltmaktadır. Erken tanı yapılamayan hata, sesli gürültü verir ve zaman içerisinde arızalanır. Bu bakımcı için bir onarım maliyeti doğurur. Kestirimci bakımla erken tanı yapılan bir hata zamanında giderilir ve onarım maliyeti oluşturmadan sistem devamlılığını sağlar.



Şekil 2.7: Kestirimci Bakım Ekipman Durumunun Zamana Bağlı Arıza Tespit Eğrisi (Faber ve Meyer, 2006)

Kestirimci bakım programı oluşturmadan önce, bakım yapacak sistem için aşağıda belirtilen ön çalışmalar yapılmalıdır:

- Ekipman ve ihtiyaç analizi yapmak
- Arıza süresi, ekipman hataları, kayıplar (verim ve enerji), olası düzenleme cezaları ve işyeri güvenliği ile ilgili mevcut tüm kayıtları gözden geçirme
- Tanımlar ve kavramlar oluşturmak, ayrıca kestirimci bakım için bir veri oluşturmak
- Bakımcıların eğitimi ve katılımın sağlanması
- Bir ekipman envanterinin tamamlanması ve mevcut ekipman koşullarının değerlendirilmesi

- Programın ilk uygulaması için ekipman seçme
- Bireysel sistemlere ve bileşenlere dayalı sistem detaylarını geliştirme
- Var olan önleyici veya kestirimci bakımın değerlendirilmesi
- Hangi sistemlerin dahil edileceğine ve neyin denetleneceğine karar verilmesi
- Programın önemini tanımlamak ve kestirimci bakım frekansını ve zamanlama tipini belirlemek
- Öngörülen kaynakları değerlendirmek ve personel rol ve sorumluluklarını atamak
- Programı düzenlemek ve çizelgeleme sistemine entegre etmek
- Ekipmanı yükseltme ve eğitimini almak
- Bilgisayarlı bakım yönetim sistemleri (CMMS) oluşturma

Kestirimci bakım gerçekleştirildiğinde ve yapıldığında, başarılı bir bakım programının temel taşıdır. Genel kapsamda kestirimci bakımın avantaj ve dezavantajlarını sıralarsak:

Kestirimci Bakım Avantajları

- Uygun olduğunda yapılıır.
- Ekipman çalışma süresini artırır.
- Maksimum üretim geliri yaratır.
- Prosedürleri, süreleri ve maliyetleri standartlaştırır.
- Parça envanterini en aza indirir.
- Fazla mesai keser.
- İş yükünü dengeler.
- Bekleme donanımına olan ihtiyacı azaltır.
- Güvenlik ve kirlilik kontrolünü iyileştirir.
- Paketleme işlerini ve sözleşmelerini kolaylaştırır.
- Kaynakları elinde bulundurur.

- Reaksiyon yerine ön-eylemi uyarır.
- Kullanıcıya destek gösterir.
- Tutarlı kaliteyi sağlar.
- Fayda / maliyet optimizasyonunu teşvik eder.

Kestirimci Bakım Dezavantajları

- Yeni parçalardaki arızalara açıktır.
- İlk kurulum maliyetleri arttırır.
- Ekipmana dijital olarak erişim gereksinimi duyar.

2.2.2 Yaygın bakım uygulamalarının karşılaştırılması

Avrupa Standardı EN 13306'ya göre bakım; bir cihazı kullanım ömrü boyunca muhafaza etmek, gerekli işlevi gerçekleştirecek duruma getirmek veya yenilemek için tüm teknik, idari ve yönetsel eylemlerin kombinasyonudur (Dragomir vd., 2007). Dünyada demiryollarında bakım işlemlerinin çoğu önceden belirlenmiş önleyici yada reaktif yaklaşımla gerçekleştirilmektedir. Bakım ile sistemlerin önleyici ve düzeltme işlemleri ile sistemin ömrünün uzatılması ve güvenilirlik elde edilebilirlik göstergeleriyle işleyişini garanti etmektedir. Son yıllarda gelişen teknoloji ile de kestirimci bakım sistemleri önem kazanmaktadır. Sistemden elde edilen veriler kapsamında, ekipman maliyetini en aza indirmeyi amaçlayan kestirimci bakım çalışmaları yapılmaktadır. Demiryollarında sistem güvenliği açısından yapılan bakımlar, sürekliliğin sağlanması açısından önem arz etmektedir. Bu bakım sistemleri genel kapsamda birbirlerine bağlı olsa da; birbirlerine göre farklılıkları, avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Bakımın amacı işletmede bulunan her türlü bakımı yapılan makine ve donanımlarının ne şartlarda olursa olsun arıza yapmadan çalışmasını sağlamaktır. Dikkat edilmesi gereken, “ne şartlarda olursa olsun” anlamından, “ne maliyetle olursa olsun” anlamını çıkartmamak gerekir. Bu anlayıştan ziyade amaçlanması gereken, artan bakım karmaşıklığının artan

maliyetleri ile birlikte artan yüksek arıza oranları sonucunda oluşan maliyetleri göz önüne alarak optimum bir durum oluşturmaktır.

Reaktif bakım ve önleyici bakım yöntemi arasında önleyici bakım genel olarak endüstri ve akademik araştırmalarda daha fazla dikkat çekmiştir (Gilbert ve Finch,1985). Bununla birlikte, reaktif bakım göz ardı edilmemelidir. Çünkü önleyici bakım programı ne kadar kapsamlı olursa olsun, kritik işlemlerin başarısız olabileceği ve iyileştirici önlemlerin alınması ihtimali her zaman vardır. Şirketler tüm ekipman arızalarının oluşmasını asla engelleyemez. Bu yüzden reaktif bakım her zaman bakım yönetiminin bir parçası olmalıdır (Peele ve Chapman, 1984).

Maliyet politikaları göz önünde bulundurulurken diğer bir yandan güvenli bakımın sağlanması için dikkat edilmesi gereken bir takım temel kurallar bulunmaktadır. Bu kurallar bakımın belirli standartlar ve emniyet içerisinde yapılmasını sağlamaktadır. Bu kurullarla bakım yapacak ekibin bakım yapmadan önce bakımla ilgili yeterli eğitime sahip olup, demiryolu işletmeciliğini aksatmadan yapmasını sağlayacak yeterli unsurlara sahip olmasını amaçlamaktadır. Bakım planlaması doğru yapılmalı, bakım yapacak personel doğru eğitilmeli ve bu bakımlar doğru bir şekilde kayıt altına alınmalıdır (Liao ve Chen, 2003). Genellikle bakım için, tamamen sökme, yedek parçaları değiştirme, bir parçayı onarma gibi teknik görevler olarak düşünme eğilimi vardır. Uygulamada kestirimci bakım çok daha geniş yelpazede ek görevler içerir (Martorell vd., 1995). Bunlar:

- Uygun araçların seçimi,
- Uygun bakım malzemelerinin seçimi,
- Alanları hazırlama (diğer personelin tahliyesi, trafik kontrolü ve uyarı işaretler koyma)
- Tesis veya alanları durdurma için hazırlama ve Yedek malzemeleri taşıma (elle veya araçlar ile)
- Gerekli güvenlik önlemlerini hazırlama (Ör: etiketleme-kilitleme, enerjiyi boşaltma, eğitim)

Uygulaması ve bunların alt uygulama tiplerinden oluşmaktadır (Mobley, 2002). Hata oranı ile bakım felsefesindeki değişim arasındaki ilişki, Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Sistemdeki hata oranı yapılan bakım sistemi kapsamında değişmektedir. Kestirimci bakım, bu üç bakım arasında en az hata oranına sahip olsa da içerisinde bulundurduğu bir takım dezavantajları bulunmaktadır. Kapsamlı bir kestirimci bakım programının eklenmesi, sistem verimliliğini; her makinenin fiili mekanik durumu ve her sistemin işletim verimliliği gibi kritik önem teşkil eden sistem hakkında gerçek veriler sağlar. Ancak gerek ekipman ömrü gerekse de sistem güvenliği açısından kestirimci bakım uygulamaları yeterli değildir. Bu anlamda son dönemlerde öngörücü bakım sistemleri çözüm yaklaşımları geliştirmiştir.



Şekil 2.8 : Bakım – Arıza Oranı (Sethiya, 2006)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Demiryollarında Bakım ile İlgili Yenilikçi Uygulamalar

Demiryolu sistemleri yüksek maliyetli uzun vadeli yatırımlar olup, bu yatırımların kısa vadelerde kendisini karşılması düşünülemez. Bu kapsamda tasarım aşamasında kurulacak sistemin iyi tasarlanması ve ileriki dönemlerde maliyet analizinin çıkarılması gerekmektedir. Bu tasarım aşamasında RAMS ve Yaşam Döngüsü Maliyeti (Life Cycle Cost, LCC) yaklaşımına önem gösterilmelidir. RAMS yönetimi maliyet açısından önem kazanırken, LCC analizleri alternatif stratejilerle sistemin kullanım ömrü boyunca nasıl bir ekonomik yaklaşımda bulunulması gerektiği hakkında fikir vermektedir (Gündoğdu ve Dal, 2011). Bakım sistemlerinin tasarımı noktasında RAMS yaklaşımı açıklanacak olup, gelişen teknolojide yenilikçi bakım uygulamalarını incelenecektir.

RAMS yaklaşımı, sistemin amaçlanan işlevini yerine getirme sırasında sistemdeki arıza bilgilerini kullanarak analiz gerçekleştirir. Arıza ve bakım verilerinin kullanılması RAMS analizinde ve sistemin yönetiminde önemli bir faktördür. RAMS verilerinin toplanmasına ilişkin çeşitli yöntemler vardır. Toplanan verilerin sistem için gerekli olan tüm RAMS analizlerini desteklediğini tespit etmek gerekir. Bir diğer önemli husus, verilerin sistemin yaşam döngüsü perspektifini ve daha da önemlisi bu durumda bakım aşamasını desteklemesi gerektiğidir (Lyngbys vd., 2008).

RAMS yönetim sistemleri, yönetim işlevlerinin kontrol edilmesi ve yönetim etkinliklerini koordine edilmesini sağlamak için en uygun süreci ve çeşitli teknikleri kullanır. Aktif çalışan sistemleri kullanan işletmeler için, güvenilirlik (reliability), sürdürülebilirlik (maintainability) ve kullanılabilirlik (availability) gibi bakım süreçleri işletmecinin başarısında önem arz etmektedir (BS EN 50126-1, 1999). RAMS yönetimi sistem yaklaşımı, demiryollarında aşağıdaki hedefleri gerçekleştirmek için gereklidir (Budai vd., 2006):

- Sistem mühendisliğinin süreçlere etkili bir şekilde entegre etmek (Mobley, 2002)
- Sistem sürdürülebilirliğinin sağlanması

- Planlanan hedeflerin başarıyla yerine getirilmesi (Lin vd., 2015)
- Sistem ürün ve organizasyonun performansını sürekli iyileştirmek

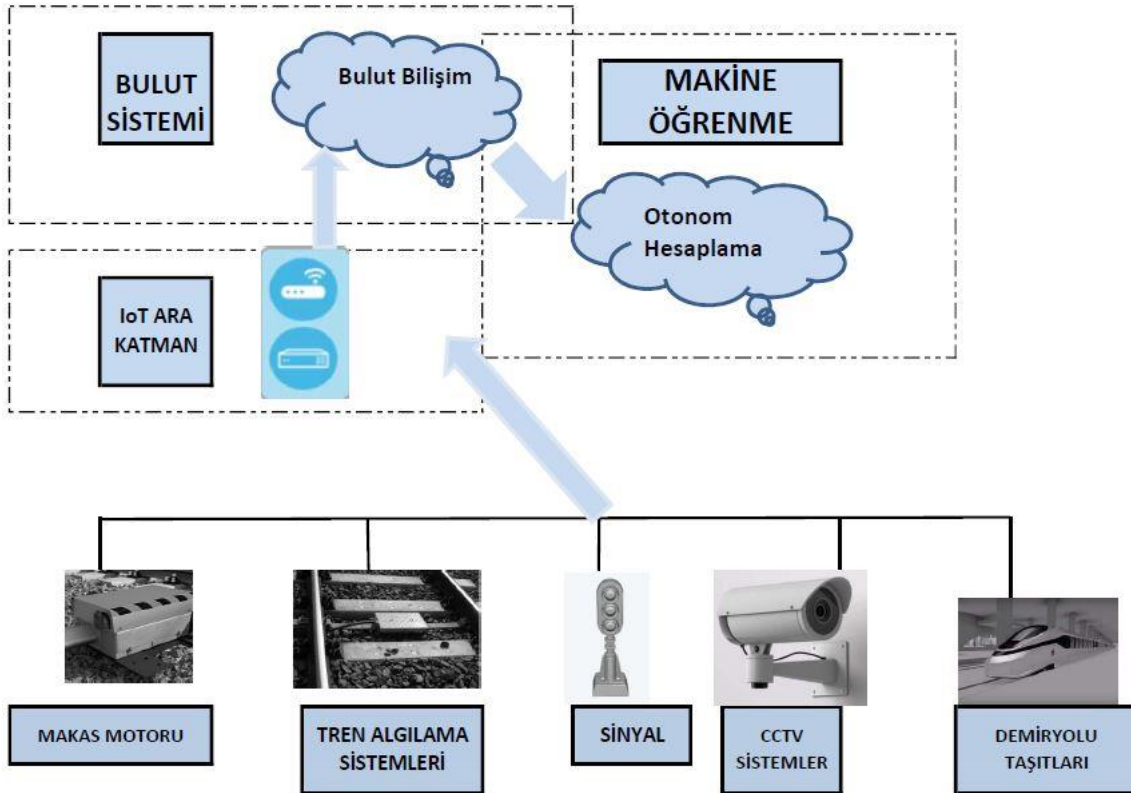
Tren taşımacılığının sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi ve sistem maliyetlerinin kontrol edilebilmesi için RAMS bileşenlerinin tasarımı uygun bir şekilde yapılmalı ve RAMS bileşenlerinden olan bakımın sistem faktörleri içerisinde doğru uygulanması gerekmektedir. Bakım, sistemin daha iyi çalışması için çok önemlidir (Lee, 1995). Bununla beraber, çalışan sistemlerde bakım uygulamalarının sağlanmasında birtakım standartlar ve zorluklar bulunmaktadır. Bu kapsamda bakım prosedürlerinin doğru bir şekilde yürütülebilmesi için uygulanması gereken yöntemler bulunmakta olup, üretim ve bakım faaliyetleri geleneksel olarak kısa vadeli meselelere odaklanan bakım politikalarının (kaynakların kullanımı, maliyet vb.) daha uzun vadeli hedeflere yönelmesine imkan sağlamaktadır (Budai vd., 2006).

RAMS yönetimi bir bütün olarak değerlendirildiğine, sistemin en güvenli ve en uygun şekilde devamlılığını ele alır. Bu sistematik tasarım aşamasından bakım aşamasına kadar uzanan bir değerler kümesidir. RAMS yönetimi, demiryolu sistemlerinde genel olarak şu konuların üzerinde yoğunlaşmıştır (BS EN 50126-1, 1999):

- Güvenilirlik, kullanılabilirlik, sürdürülebilirlik, ve emniyet, RAMS gerekliliklerine ve sistem kullanımına uygun RAMS özelliklerinin tanımı,
- Demiryolu tren trafiği hizmetinin kalitesini etkileyen arızalar ve hatalar gibi potansiyel tehditler
- Arıza önleme, hata toleransı, hata giderme ve hata tahmini gibi kontrol araçlarının sağlanması (Lundteigen ve Rausand, 2009).

Son yıllarda, yenilikçi bakım stratejilerinin uygulanabilir olması için birçok araştırma girişimi başlatılmıştır (Wakjira ve Singh, 2012). Bu girişimlerin odak noktası; en iyi ve sürekli ürün kalitesini elde etmek, işlem performansını sağlamak, arıza sayısını ve benzeri olumsuzlukları azaltmaktır. Akıllı bakım teknolojilerinin geliştirilmesi, geleneksel

endüstriyel perspektifi arızalar arasındaki ortalama zamandan, arızalar arasındaki ortalama sürenin (Meantime Between Failure, MTBF) artırılması amaçlanmaktadır. Bu amaçla sistemler arası iletişimin yoğun şekilde kullanıldığı veri odaklı akıllı bakım teknolojileri günümüzde yaygınlaşmaya başlamıştır (Makinde vd., 2017). Bu alanda, nesnelerin interneti (Internet of Things, IOT), bulut bilişim, veri analitiği vb. teknolojiler bir örneği Şekil 3.1’de verilen mimari ile yenilikçi bakım uygulamalarında kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 3.1:Yenilikçi Bakım Uygulaması Mimarisi

Şekil 3.1’de verildiği üzere demiryolu sistemlerinde gerek alt yapı gerekse araç üzerinde veriler toplanabilmektedir. Bu toplanan veriler nesnelerin İnterneti olarak ifade ettiğimiz IoT ile hem sistem içerisinde farklı birimlerde hem de merkezi bir noktada toplanabilmektedir. IoT ilk başlarda makineden makineye, makineden altyapıya, makineden çevreye olarak ifade edilebilecek haberleşme tipleri ile başlayıp günümüzde dağıtık olarak da haberleşmeye imkan kılan bir teknolojidir (Atzori vd., 2010). IoT, yapay zeka, büyük veri, makine öğrenmesi, derin öğrenme, robotlar ve otomasyon, artırılmış sanal gerçeklik gibi teknolojik

odaklı alanlardaki etkinliğiyle beraber ve akıllı şehirler, akıllı ulaşım, akıllı üretim, enerji verimliliği gibi sistemlerde önemli bir teknoloji haline gelmiştir (Lu, 2017; Li, 2017). "IoT" terimi ilk olarak 1999'da Kevin Ashton tarafından kullanılmış ve Auto-ID Center'ın, ağa bağlı radyo frekansı tanımlama (RFID) ve diğer ortaya çıkan algılama teknolojileri üzerine çalışan bir araştırma grubunun çalışmaları sayesinde yaygın bir şekilde terim olarak kullanılmaya başlanmıştır (Kranenburg ve Bassi, 2012). Günümüzde gelişen teknolojiyle beraber internet bağlantısı olan her cihaz, IoT teknolojinin bir parçasıdır. IoT, diğer makineler, nesnelere, ortamlar ve altyapılarla etkileşimde bulunan ve iletişim kuran akıllı makinelerden oluşur (Gubbi vd., 2013). IoT ile beraber büyük miktarlarda veri üretilir ve bu veriler hayatlarımızı daha kolay ve güvenli hale getirmek, çevre üzerindeki etkimizi azaltmak için işleri "kontrol edebilecek ve kontrol edilebilecek" yararlı işlemlerle işlenir (Zanella vd., 2014).

Toplanan bu veriler bulut bilişim altında anonim olarak kullanılabilir. Bulut bilişim ile sadece bir noktada veri toplama yerine bir sistemin tüm karar verme sürecini tamamlanması için birden fazla noktada verilerin dağıtılıp toplanmasına imkan sunar. Böylece, her alt sistemde veri işleme işleminin bir parçası yapılır ve daha sonra bir çözüm önermek için bir araya getirilebilir. Yada her sistem tüm analizi kendi perspektifinden bitirebilir ve ana sistemin neyin en iyi veya en uygun analiz olduğuna karar vermesine izin verebilir. Bulut bilgi işlem uygulayarak, sistem hesaplama maliyetini paylaşabilir ve karar verme sürecini hızlandırabilir (Lee vd., 2011).

Sistemin geçmiş verileri bulut ortamda tutulabileceği gibi diğer yerel veri tabanlarında tutulabilir. Bu veri tabanı karar verme süreci için temel bilgidir ve sistemin ömrü ile birlikte gelişebilmektedir. Algılayıcı teknolojisindeki gelişmeler ve makinenin fiziksel dinamik özellikleri üzerine araştırmalar bu veritabanına katkıda bulunabilir (Lee vd., 2011). Farklı yerlerde toplanan veriler çevrim içi öğrenme araçları (online learning) ile sistemin karakteristiğinin öğrenilmesi veya farklı makine öğrenmesi yaklaşımı ile arızaların öngörülmesi vb. amaçlarla kullanılabilir.

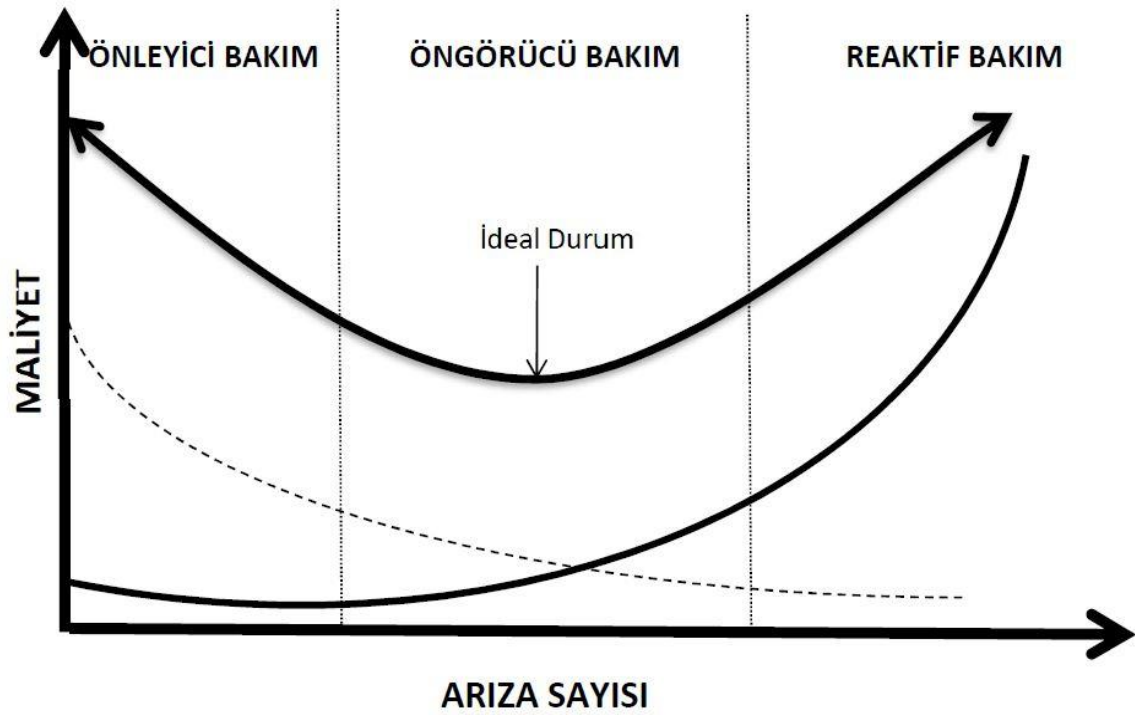
Bir öğrenme yaklaşımının amacı, sadece sistem değişikliklerini tespit etmek değil aynı zamanda bu bilgiyi daha verimli şekilde kullanarak en az insan müdahalesiyle sifıra yakın arıza performansı sağlamaktır. Bu kapsamda sistemdeki değişiklikleri öğrenebilmek için uyarlanabilir bir prosedür geliştirilmeli ve çevrimiçi öğrenme araçları, sistem arızalarını öğrenebilmeli ve bilgiyi biriktirmelidir (Lee vd., 2011).

Diğer taraftan konuşma, tanıma, bilgisayarlı görme (yüz, el yazısı ve nesne tanıma), bilgi alma, robotik, tıbbi teşhis, finansal tahmin, hedef izleme, biyolojik tahmin vb. gibi birçok alanda kullanılan farklı makine öğrenmesi yaklaşımları ile sistem izlemesi ve bakıma yönelik yenilikçi yapay zeka öğrenmesi uygulamaları geliştirilebilir. Bu alandaki yaklaşımlar temel olarak denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme olarak üçe ayrılabilir (Lison, 2015). Farklı Makine öğrenmesi yaklaşımları, ÖSY uygulamalarında, sistemlerin davranışlarını öğrenmek ve öngörülerde bulunmak için kullanılabilir (Khan ve Yairi, 2018; Li vd., 2018; Sutharssan vd., 2015).

Dolayısıyla, bakım alanında önleyici bakım yapmak yerine, algılayıcılar ve sistemlerden toplanan verilerin IoT teknolojileriyle aktarımı, analiz edilmesi ve makine öğrenmesi yaklaşımları ile yenilikçi bakım politikaları değiştirilebilir (Chapman vd., 2014; Bandyopadhyay ve Sen, 2011). Bu tip bir sistemde, alınan veriler yerinde (edge computing) veya merkezde toplanarak analiz edilir ve sistem arızalanmadan uyarı üretilir (Tedeschi vd., 2017). Bu önerilen sistem, aynı zamanda herhangi bir ekipmanın arızalanması durumunda acil durum uyarıları da oluşturabilir (Dhall ve Solanki, 2017). Bu sayede servise gelen parçalar sadece değiştirilmesi gerektiği zamanda değiştirilir. Bu, bakımcıya bakım maliyetlerinde azalma sağlar. Olası parça arızası hakkında gerçek zamanlı uyarılar alınır. Ekipman farklı zaman dilimlerinde ve farklı yerlerde nasıl performans gösterdiğini görüntülemek için analitik ve raporlama gösterge tabloları kullanılarak daha fazla bilgi sahibi olunur. Ekipmanların alışkanlıkları analiz edilebilir ve uygun önlemler alınır.

Şekil 3.2’de belirtildiği gibi bakım sistemlerinde maliyet ve arıza oranında bir denge bulunmaktadır. Bu denge iyi sağlanmadığı takdirde bakımcı fazla bakım maliyetiyle ya da fazla arıza ile karşı karşıya kalacaktır. Bu kapsamda bakımcının sistem tasarımında bakım

şeklini doğru ayarlaması gerekmektedir. Reaktif Bakım sistemlerinde önleyici bakımlara yapılan masraflar en az seviyede iken, reaktif bakım kapsamında tamir masraflarına yapılan bakım maliyetleri artmaktadır. Önleyici bakımda ise önleyici masrafları yüksek tutulup, tamir masrafları en aza indirilmeye ve sistemi sürekli ayakta tutmaya yönelik bir bakım topolojisi tasarlanmaktadır. Öngörücü bakım sistemleri, tamir masrafları ile önleyici bakım masraflarını dengeleyip, masrafları en aza indiren bakım topolojisini sunmaktadır. Ayrıca



| | |
|------|-----------------|
| ↔ | Toplam Maliyet |
| — | Tamir Masrafı |
| ---- | Önleyici Masraf |

Şekil 3.2: Maliyet – Arıza Oranı (Klanker ve Stepanoviç, 2017)

3.2 Öngörü ve Sağlık Yönetimi

Öngörü ve Sağlık Yönetimi ile sistemden daha fazla veri toplanarak sistem sağlığının izlenilmesi ve olası arızaların önceden öngörüsü sağlanıp, sistem ömrünün uzatılması hedeflenmektedir (Xia, 2018). Günümüz sistemlerinde toplanan verilerle bayesian ağları gibi akıllı algoritmaları kullanarak, arızaların tespit edilmesi ve bunun sonucunda sistemde

“düzeltme” yerine sinir ağı, bulanık mantık, eşleşme matrisi ve markov modeller sayesinde öngörü ve önleme konusunda bakım sistemlerine yeni yaklaşımlar sağlamaktadır (Khan ve Yairi, 2018; Ferreira, 2012; Friedman vd., 1997). Demiryolu altyapısındaki güvenlik, ana bileşenlerin işlevlerini güvenli bir şekilde yerine getirmesi olarak anlaşılmalıdır (Le Guen, 1999; Roberts vd., 1987). Bu kritik elemanlar için Güvenirlilik Merkezli Bakım’a (GMB) dayanan tahmine dayalı bir bakım sistemi geliştirilmiştir. Sistemin temel amacı, güvenliği riske sokmadan olası arızaları kabul edilebilir bir seviyeye düşürmek için önceden öngörerek veya üretebileceği hasarı en aza indirmenin yanı sıra bir kaza meydana gelme ihtimalini ortadan kaldırmaktır (Muttram, 2002).

Güvenirlilik Merkezli Bakım yenilikçi bakım süreçleri içerisinde değerlendirilebilir. Programın uygulanması sırasında sistem sınırları, fonksiyonel arızalar ve fonksiyon türleri çok iyi tanımlanmasına ve anlaşılmasına dayanmaktadır. GMB, üst düzey bakım standartlarına ulaşmak için üst düzey sistemlere rehberlik sağlayan etkili bir araç olarak düşünülebilir (Borris, 2006). Güvenirlilik Merkezli Bakım, kullanılan ekipmanların işlevlerini inceler. Doğru analizi yapılmış bir önleyici bakım bile, sistemin aktif şekilde çalışması için çok maliyetli olabilir. Ayrıca güvenlik açıkları da doğurabilir. GMB’nin maliyete karşı sonuç metodolojisi, kullanıcının maliyetini de dikkate alarak bakım kararı vermesini sağlar (Bloom, 2006).

Bir mühendislik disiplini olarak ÖSY, kullanıcılara bir sistemin durumunu veya genel bir sistemi entegre bir şekilde görmeyi amaçlamaktadır. ÖSY, yaklaşmakta olan arızaları önceden tespit etmek ve riskleri azaltmak için mevcut yaşam döngüsü koşulları içerisinde bir sistemin güvenilirliğini değerlendiren yeni bir mühendislik disiplindir. ÖSY, başarısızlık mekanizmalarını sistem yaşam döngüsü yönetimine bağlar (Uckun vd., 2008). Belirli ekipmanın arızasını önceden bilmek ve önlenmesi, hem sistemin hem de işlemlerin genel güvenilirliğini ve güvenliğini artırırken önemli miktarda zaman ve para tasarrufu sağlayacaktır. Etkili bir ÖSY sisteminin bileşenlerin ve alt elemanlarının hatalarını erken tespit ederek, izolasyonunu sağlaması beklenir. Böyle bir sistemi kullanarak, gereksiz ve maliyetli önleyici bakım programları ortadan kaldırılabilir. Bakım programlaması optimize edilebilir, yedek parça ve kaynaklar için tedarik süresi azaltılabilir, bunların tümü önemli maliyet tasarrufu sağlar (Kalgren vd., 2007).

ÖSY alanındaki araştırma çalışmaları ile bu alanda birçok algoritma geliştirilmiştir (Liu vd., 2018). Bu algoritmaların bir kısmı, rulmanlar ve ortak döner makine bileşenlerini içerdiğinden dolayı demiryolu uygulamalarında kullanılmak için çok uygundur (Lee vd., 2014). Prognostik modeller genellikle sürekli çalışan sistemler için üretilmiştir, ancak işletim sistemlerinde çalışma frekansları zamanla değişebilmektedir. Sistemlere bağlı olarak hem yüksek hızlı çalışmalarda hem de düşük hızlı çalışmalarda kullanılmaya uygundur. Araçlar, insanların sürüş davranışlarına ve yol düzenlerine göre farklı şekilde çalışır. Gelecekteki kişisel bakım teknikleri, tahmin algoritmasını sağlamak için prognostik modelleri dinamik olarak seçmek amacıyla sistemdeki değişen şartları kontrol altında tutmalıdır (Scanff vd., 2007). Arızaları tespit etmek için gelecekteki kişisel bakım teknikleri, çalışma koşullarındaki değişiklikleri algılayabilmeli ve tespiti için uygun, en iyi modelleri seçebilmelidir. Doğrudan algılayıcı girişinden alınan bilgiler kapsamında tahmin yapmak yerine sistem için hangi algoritmanın kullanılması gerektiğini belirlemek önemlidir. Sistemin hangi algoritmada olduğuna bağlı olarak, her bir işletme sisteminde en iyi modeli birleştiren bir arama tablosu oluşturarak sisteme ilave edip, tarihe göre işlem yapan bir mekanizma kullanılır. Algoritma değiştiğinde hangi tahmin modelinin seçilmesi gerektiğine dinamik olarak sistem kendisi karar verir.

Genel olarak bir ÖSY uygulaması, algılamadan tahmine kadar birçok farklı görevden oluşur. Her görev farklı tekniklerden yararlanır; bu nedenle, ÖSY uygulaması tek bir yaklaşıma bağlı değildir. Filtreleme teknikleri, bir modele ve algılayıcı verilerine dayanarak sistem durumunu bir algoritma çerçevesinde tahmin etmek için de kullanılabilir. Özellikle, dış geri besleme düzeltme döngülerine dayanarak tahminleri düzeltme yeteneğine sahiptirler (Scanff vd., 2007).

Son zamanlarda, özerk sistem kavramını kullanarak ve bunu sürdürülebilir sistemler elde etmek için kullanan bazı alanlar ortaya çıkmıştır. Bilgi teknolojisi alanında, özerk bilgi işlem fikri 2001 yılında IBM tarafından ortaya çıkmış ve başlatılmıştır. Özerk bilgi işlem fikri, insan eylemlerini kontrol eden insan sinir sistemini simüle etmeye dayanmaktadır (Lee vd., 2011). Çoğunlukla BT ile ilgili olarak ortaya çıkan bir başka alan, temel olarak insanların biyolojik bağışıklık sistemini taklit eden ve bağışıklık sisteminin biyolojik mekanizmasına dayanan yapay bağışıklık sistemleridir (AIS). Özerkliğe olan talep arttıkça, hataların doğru

şekilde tanımlanmasının ve yanıtlanmasının önemi daha belirgin hale gelir. Bu otonom sistemler kararlarını yalnızca aldıkları sensör okumalarına dayandırmalıdır. Otonom sistem teknikleri geliştirildikçe, özerk olmayan sistemlerde de gerçekleştirilebilir, çünkü gerçek zamanlı olarak sistemi kullanan insan temelli operatörlere yardımcı olur (Glover vd., 2010).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Demiryolu altyapısının bakımı, kayda değer kaynaklar ve önemli bir bütçe gerektirir. Geliştirilen algoritmaların ve ölçme yöntemlerinin çoğu demiryolu altyapısında bir ÖSY sistemi geliştirmek için bir metodoloji oluşturmaktadır. Son yıllarda, demiryolu sektörünün çeşitli üretici firmaları hizmet faaliyetleri için özellikle uzaktan izleme, arıza teşhisi, gömülü algılayıcılar teknikleri ve daha geniş kapsamlı öngörücü bakım çözümlerine artan bir ilgi göstermiştir. Bu ilgi, demiryolu işletmecilerinin bakım giderleri ve revizyon gibi operasyonel harcamaları azaltma gereksinimi doğurmuştur. Bu bağlamda, ÖSY tekniklerine dayalı izleme sistemleri, teşhis ve prognostik algoritmaları ve karar destek çözümlerinin geliştirilmesi için çaba harcanmaktadır.

2006 yılında, ALSTOM, çeşitli bileşenlerin sağlık durumunu sürekli izlemeye izin veren çoklu algılayıcı kaynaklarından veri toplayan “TrainTracer” adında önleyici bir bakım aracı başlattı (Brahimi vd., 2016). 2008'de Alstom, uzaktan izleme ve analiz için ETRAIN sistemini sundu. ETRAIN, yerleşik COMBOX terminaliyle beraber, trenden yere veri aktarım şebekelerinden, yani GSM/GPRS ve WLAN'dan ve yer işlem sisteminden oluşur. ETRAIN, dahili veri kayıtlarını indirme, lokomotif arızası ve olay kayıtlarının çevrimdışı analizi ve lokomotif GPS konumlandırma fonksiyonlarını sağlar. Alstom, 2014 yılında, TrainScanner, TrainTracer, Motes ve Alstom bulut hizmetlerini birleştiren HealthHub adında bir bakım aracı başlattı. Bu sistemde, TrainScanner otomatik olarak tekerleklerin, fren balatalarının ve pantograf karbon şeritlerinin yanı sıra bir ekipmandan geçtiğinde tren bütünlüğünün durumunu ölçen bir tanılama portalı olarak tasarlanmıştır. Motes sistemi, kablosuz algılayıcılar kullanarak ray titreşimini ve sıcaklığını izler. TrainTracer, yerleşik sistemleri, demiryolunu ve katener'i uzaktan izler. Tüm farklı tipteki veriler Alstom bulutunda toplanır ve analiz edilir; bu da sistem stabilizite durumunu ve verilen parçaların kullanım ömrünü öngörür ve yedek parça ve bakım görevlerinin planlanmasına yardımcı olur. Tüm sonuçların Alstom bulut hizmetleri tarafından yayınlanır ve sistem kullanıcısı da İnternet üzerinden sisteme erişebilir. HealthHub, İngiltere'nin West Coast ana hattında çalışan Virgin Trenleri için kapsamlı bakım hizmeti sunmaktadır (Lu vd., 2016).

2010 yılında bir başka demiryolu sistem üreticisi firması olan Bombardier, bir dizi Web tabanlı telematik servisi olan MyBTfleet'i başlattı ve 2013'te APP sürümünü piyasaya sürdü. MyBTfleet, operatörler için GPS tabanlı tren konumu izleme, tren bakım planı ve müşteri kayıt hizmetleri sunmaktadır. Katalog ve el kitabı bakım personeli için hizmet almayı amaçlarken mühendisler için Orbita çevrimiçi hata tanılama ve gerçek zamanlı izleme ile veri merkezi erişimini sağlamaktadır. Ayrıca, MyBTfleet'in enerji yönetimi ve sürücü masası, simülasyon servisi de sağlamaktadır. Ocak 2015'te Bombardier, yerleşik TKYS (Tren Kontrol ve Yönetim Sistemi) sistemine sorunsuzca erişebilen, tren ve MyBTfleet kontrol merkezi arasında iki yönlü gerçek zamanlı veri etkileşimi sağlayabilen MyBTfleet ağ geçidi 2.0'ı da tanıttı. Sonuç olarak bu yöntem ile kontrol merkezindeki teknik personel, sistemdeki çalışma durumunu gerçek zamanlı olarak alabilir, monitöre özel uyarılar yükleyebilir ve parametre sapması durumunda anında geri bildirim alabilir (Lu vd., 2016).

Yine bir demiryolu sistem üreticisi olan Siemens firması, 2007 yılında bir dizi kablosuz veri iletimi, uzaktan izleme ve analiz sistemi olan EFLEET sistemini başlattı. Sistem yerleşik bir terminalden, haberleşme ağlarından ve yer işlem sisteminden oluşuyor. EFLEET sistemi lokomotif GPS konumlandırma, uzaktan arıza alarmı ve uzaktan işletim verilerinin gözden geçirilmesi, veri kayıtlarının indirilmesi, çevrimdışı analiz ve hataların olay kayıtlarının uzman teşhisi gibi fonksiyonlar sunar. 2014 yılında Siemens, % 100 RAILability adlı uzaktan izleme, akıllı veri işleme, büyük veri analizi ve kestirimci bakım teknolojilerini benimseyerek, bu sistem ürün bakımını yedek parça servisi ve işletme yönetimi hizmetleri sağlayan tahmini bakım sistem setini yayınladı (Lu vd., 2016).

Heyelan gerçekleşen önemli altyapıların, jeolojik riski yönetmek için erken uyarı sistemlerinin iyileştirilmesine yönelik bir çalışma olan kaya algılama sistemi, İtalya'da Acuto bölgesinde test edilmiştir. Gerçek zamanlı izleme için İtalya Ulusal Araştırma Konseyi tarafından geliştirilen bir yapay zeka kamera prototipi AiCP (artificial intelligence camera prototype), kaya düşmesi tespitine adanmış çok sensörlü bir izleme sistemine entegre edilmiştir. Optik izlemeye uygun boyutlara sahip olan kaya kütesinin bir kısmı, en az 100 mm boy değişimini 1 mm hassasiyetle optik olarak ölçen ekstansometre adında ölçüm cihazlarıyla donatılmıştır. Demiryolu rayına kaya blokları atılarak çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu deneyler sırasında, AiCP blokları tespit etmiş ve otomatik olarak bir alarm

sinyali iletmiştir. Deney sonucunda sistem, AiCP cihazının bir saha izleme hedefi üzerindeki engelleri tespit etmek için saha test koşullarında uygun olduğu ve 20 cm uzunluğa kadar kaya bloklarını tespit etmek için algılama algoritmasının güvenilir olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca periyodik olarak voltaj kontrolü yaparak güç kaynağı ünitesinin verimliliği de sağlanmıştır (Fantini vd., 2017).

Son yıllarda, demiryolları yolcuların akış yoğunluğunu gerçek zamanlı olarak bilmek, akış yönetimini yönetmek ve istasyonları daha güvenli hale getirmek için CCTV sistemi uygulamalarına geçmektedir. Gözetim olarak CCTV her şeyi gerçek zamanlı olarak izlemeye yardımcı olup, CCTV gözetimi kullanılarak hızlı geçiş için akıllı sistemde uygulama sunmaktadır. Konu ile ilgili araştırmacılar, bir girdi görüntüsünü alıp görüntüdeki çeşitli görünüşleri ve nesnelere birbirinden ayırabilen derin öğrenme algoritması olan Evrişimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks, CNN) ile nesnelere tespit etmek ve yolcuların akış analizi gibi davranışlarını izlemek, tehlikeli alanlardan kaçınmak ve davetsiz misafir ziyaretçilerini engellemek için derin öğrenme algoritmaları önermektedir. Endonezya Bandung Tren İstasyonunda CCTV ile akıllı gözetim geliştirilerek akıllı istasyon oluşturulmuştur. Sistem derin öğrenme algoritmasından ve büyük miktarda veri ve hesaplama içeren sorunları çözmek için birçok bilgisayar ağının kullanılmasını kolaylaştıran bir açık kaynaklı yazılım programları olan Hadoop, Apache Kafka ve Apache Spark gibi büyük veri teknolojilerinden oluşmaktadır. Bu sayede gözetim kayıtlarından elde edilen büyük verilerden, anlamlı ve önemli olanlar operatöre aktarılarak daha verimli bir izleme sağlanmaktadır (Dahlan vd., 2019).

On Board Sistem ile Araç Takibi yapılan bir sistemde tanı mimarisinin gömülü hata teşhisi için FPR yöntemiyle birleştirilmesi yapılmış olup, endüstriyel SURFER projesi kapsamında bir tren sisteminin araç üstü izlemesinde uygulanmıştır. Yakın gelecekte yaklaşımı tamamen doğrulamak için EMAPS adlı deneysel bir platform uygulanmasından bahsedilmektedir. Kısa vadeli önergeleri, tümleşik analizleri geliştirmek için aynı hiyerarşik seviyedeki sistemler arasında işbirliği stratejilerinin uygulanması gerekmekte olup, orta vadeli planlarda SURFER projesinin düzeltici bakım yerine öngörücü bakım projesine odaklanacağından bahsetmektedir. Uzun vadeli bakış açılarında tanı yöntemleri üzerine çalışılıp, FPR ile karşılaştırılacaktır. Bu kapsamda öngörücü yaklaşımlar izlenecek ve bu

şekilde izleme yapılacaktır. Bu yaklaşımla sistemde bildirilen hataların asıl nedenlerini belirlemek için gereken zamanın % 40 oranında azalması sistemin avantajıdır. Sistemin dezavantajı ise FPR yöntemiyle önerilen tanılama sistemi % 95 insan analiziyle aynı tanı başarı oranına sahiptir ve bu maliyetlerde bu analiz yatırım açısından pahalıdır (Mortellec vd., 2013).

Kataner Sistemi İzleme Sisteminin yapıldığı bir sistemde, kataner sisteminde her türlü büyük ölçekli dağıtık sisteme kolayca uygulanabilecek OCL izleme sisteminin unsurlarının önemini belirlemek için yeni bir metodoloji önerisi yapılmıştır. Bu sistemin avantajı OCL sistemi sayesinde prosedürlerin önemli ölçüde azaltılması ve sistemin performansındaki artışı hesaplamasıdır. Bu metodolojinin İspanya demiryolu ağının izleme sistemlerinde, işletmeciyeye yenileme kampanyaları, tasarım veya montaj değişiklikleri gibi farklı karar türlerini almada, karmaşık bir sistemin elemanlarının her birinin bakım sıklıklarının tespitinde yardımcı olmak için çok faydalı olduğu belirtilmektedir. (Duque vd., 2009).

Camci vd.nin (2014) demiryolu makas motorlarının öngörücü yaklaşımı olarak incelediği “Comparison of sensors and methodologies for effective prognostics on railway turnout systems” makalesinde, demiryolu makas motorlarıyla ilgili dikkat edilmesi gereken konu yalnızca bakım maliyetlerinin fazla olması değil, aynı zamanda makas motorlarından kaynaklanan arızaların demiryollarındaki kazaların en önemli yapı taşlarından olmasıdır. Bu çalışmada makas motorlarına kuvvet algılayıcısı, akım ve gerilim algılayıcısı (DC motor gerilimi / DC motor akımı), lineer doğrusal cetvel, yakınlık algılayıcısı, döner makine kodlayıcı, bir dizi destekli artırımlı kodlayıcı kullanılarak makas motorlarındaki veriler izlenmiştir. Sonuç olarak teşhiste görülebilecek olan prognostiklerin ilk aşaması, bir sistemin mevcut sağlık durumunu değerlendirmeyi amaçlar. Tipik olarak, örüntü tanıma teknikleri (sınıflandırma ve kümeleme) sistemin sağlık durumunu belirlemek için bu aşamada kullanılır. İkinci aşamada, sağlık durumu, zaman serileri veya fiziksel bozulma yöntemleri gibi tahmin tekniklerini kullanarak sistemin RUL'sini tahmin etmede kullanılır (Camci vd., 2014).

Öngörücü yöntemler veri odaklı ve model tabanlı olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Veri odaklı yaklaşımda başarısızlık, benzer ekipmandan toplanan geçmiş arıza verilerine dayanarak modellenmiştir. Arızaya neden olan veriler, veri odaklı bir öngörücü model elde etmenin anahtarıdır. Arıza bozulmasında rol oynayan fiziki etkenler dikkate alınmaz. Benzer ekipmanın arıza bozulması kullanılarak oluşturulan model daha sonra gözlemlenen ekipmanın arıza bozulmasını tahmin etmek için kullanılır. Verilere dayalı modeller, sistemin fiziki yeterlilikleri veya mekaniği ile ilgili ayrıntılı bilgiye sahip olmadıkları için kara kutu olarak kabul edilir. Diğer taraftan model tabanlı sistemlerde tipik olarak, arızaya neden olan mekanizmanın ve arızanın fiziki nedenlerini içerir. Arızaya neden olan ve bu kapsamda diğer parametreleri etkileyen fiziksel ilişkiler matematiksel olarak modellenmiştir. Bilgi bakımından zengin öngörücü çıktı sağlamak için; model tabanlı modeller arıza tahmin formülleri, sisteme özgü mekanik bilgi ve durum izleme verilerini birleştirmeye çalışır. Model tabanlı modeller için başarısızlığın fiziki şartlarını modelleyebilme ve parametre değerlerini bilme kabiliyeti esastır. Verilere dayanan modellere göre bir avantaj, arıza oluşmasını temsil eden kayıtlara ihtiyaç duyulmamasıdır. Demiryolu makas motorları için veri güdümlü ve fizik temelli modeller uygulanmıştır. “Comparison of sensors and methodologies for effective prognostics on railway turnout systems” çalışmasından elde edilen veriler kapsamında kuvvet algılayıcıları arıza durumları için en iyi çözümü oluştururken, doğrusal lineer cetvel ve akım algılayıcıları ikinci opsiyon olarak düşünülmelidir. Yakınlık algılayıcısı öngörücü yaklaşım için iyi bir seçim olmadığı belirlenmiştir (Camci vd., 2014).

Bu tür teknolojilere olan bu ilgi, esasen planlı denetimlere ve uzmanların bilgisine dayanan geleneksel önleyici bakım politikalarının bir evrimini, varlığın mevcut durumuna, bakım kararları ve eylemlerini uygulamak için tahmin edilen, gelecekteki şartlara dayanan öngörücü bir bakıma yöneliktir. Bu şekilde, ÖSY yüksek güvenilirlik ve kullanılabilirlik ve bakım maliyeti eğitimleri elde etmek için çözümler sağlayabilir. Bu çözümlerin birçoğu, döner makineler sistemleri, elektronik aletler, havacılık ve askeri sistemler, hatta nükleer alan veya tıbbi alanlardaki belirli uygulamalar için geliştirilen mevcut ÖSY tekniklerini uyarlayarak, demiryolları bağlamında kullanılabilir. Bununla birlikte, demiryolu altyapısı için bir ÖSY çözümünün geliştirilmesi ve uygulanması, hem ÖSY hem de demiryolu izleme tekniklerinde mevcut tekniklerin iyi bir şekilde bilinmesini gerektirmektedir. Bir bakım

programı, arızadan sonra ekipmanı elden geçirmeyi veya değiştirmeyi, endüstriyel bir sistemi veya ekipmanı önleyici işlemler gerçekleştirerek gerekli fonksiyonunu yerine getirebileceği bir durumda tutmayı amaçlamaktadır. Bu nedenle, verimli bir bakım politikası benimsemek, işletmelerin yüksek güvenilirlik gibi gereklilikleri elde etmelerini sağlayabilir; maksimum kullanılabilirlik; güvenliği artırır; bakımın, bir sistemin ömrünün önemli bir parçası olduğu için varlığın yaşam döngüsü maliyetini en aza indirir. Bunu yapmak için Koşullu Bakım (DDB) bu tür gereksinimler için uyarlanmış bir strateji gibi görünmektedir. Aslında DDB, fiziksel varlığın sağlık durumuna ilişkin görevlerin planlandığı bir bakım programıdır. Düzgün ve etkin bir şekilde uygulandığında, gereksiz planlanan işlemlerin sayısını gerekli olanlarla değiştirerek bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir ve yalnızca varlığın mevcut durumu kritik olduğunda çalışarak hizmet optimizasyonu sağlayabilir. Yavaş yavaş, DDB yeni tekniklerin kullanımı ve daha geniş çerçevesi nedeniyle ÖSY alanının ortaya çıkmasına neden olmuştur (Brahimi vd., 2016).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Demiryolu sisteminin işletilebilir tutulması hem stratejik hem de ekonomik olarak önemlidir. Demiryolu hattında trenlerin duruş sürelerinin veya meydana gelen kazaların maliyeti, işletmecilikte toplam maliyetin önemli bir unsurunu oluşturmaktadır. Hat kapasitesinin genişletilerek taşımacılığın artırıldığı yeni sistemlerde, arızalara mümkün olduğunca oluşmadan önce farkına varılarak işletmeyi aksatmayacak şekilde müdahale edilmelidir. Bu sebeple etkili öngörücü stratejilerin uygulanmasıyla bu arızaların azaltılması ve sistem giderlerinin en az seviyeye indirilmesi gerekmektedir.

Gelişen dijital teknolojilerle farklı alanlarda yaygın olarak kullanılan öngörücü bakım yaklaşımı son dönemlerde demiryollarında da aktif bir şekilde kullanılmaya başlanılmıştır. Literatür özetinde bahsedildiği gibi tren setlerinde, sinyalizasyon ekipmanlarında ve kataner takip sistemlerindeki gibi örnek çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöntemlerle periyodik bakım maliyetlerini azaltacak şekilde arızalar oluşmadan önce yapılacak öngörü ile sistemlerin güvenli ve performanslı çalışması sağlanabilir. Literatür incelendiğinde demiryollarında öngörücü bakıma yönelik farklı alt sistemlerde değişik yapay zeka uygulamalarına rastlanmaktadır. Ancak, henüz bu tip çalışmalarda standartlaşma mevcut değildir.

Gelecek çalışmalarda öncelikle farklı üreticilere ait demiryolu sistemlerinin kendi aralarında haberleşmesi için IoT ara katman ağ geçitleri ve yazılım altyapısının geliştirilmesi ve standartlaştırılması önemlidir. Sonrasında ise demiryolu ağının fiziksel yapısı dikkate alınarak ve veri yoğunluğu dikkate alınarak yerel saklama birimleri veya bulut bilişim saklama alternatiflerinin altyapısı tasarlanabilir. Ayrıca literatüre bakıldığında öngörü ve sağlık yönetimi ile yapay zeka algoritmalarının da çeşitliliği dikkat çekmektedir. Burada alt sistemle tipine ve kullanım amacına bağlı yapay zeka yaklaşımlarının sınıflandırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abed, S.K., 2010, European rail traffic management system-an overview. 2010 1st International Conference on Energy, Power and Control (EPC-IQ)
- Ahuja, I.P.S., ve Khamba, J.S., 2008, Total productive maintenance: literature review and directions. International Journal of Quality & Reliability
- Akbayır, Ö.,2012, Bir Yük Vagonu için Bakımdan Sorumlu Birim (ECM) Ve Sertifikasyonu. 2. Uluslar arası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'13), 9-11 Ekim 2013
- Atzori, L., Lera, A., Morabito, D., 2010, The Internet of Things A survey. Computer networks Volume 54, Issue 15, 28 October 2010, Pages 2787-2805
- Bandyopadhyay, D. ve Sen, Y., 2011, Internet of Things Applications and Challenges in technology and standardization. Springer Science+Business Media, LLC, 2011. p.49-67
- Bloom, N., 2006, Reliability centered maintenance (RCM): implementation made simple. McGraw-Hill Education, 2006.
- Borris, S., 2006, Total productive maintenance. McGraw-Hill,2006. p.257-313
- Brahimi, M., Medjaher, K., Leouatni, M., Zerhouni, N., 2016, Development of A Prognostics and Health Management System for the Railway Infrastructure – Review and Methodology. In Prognostics and System Health Management Conference (phm-chengdu), 2016 (pp. 1–8)
- BS Dhillon, 2002, Engineering Maintenance, A Modern Approach, CRC Press, LLC, p. 81-98
- BS EN 50126-1, 1999, Railway applications- The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)
- Budai, G.,Huisman, D., Dekker, R., 2006, Scheduling preventive railway maintenance activities. Journal of the Operational Research Society Volume 57, 2006 - Issue 9
- Camci, F., Eker, O.F., Başkan, S., Konur, S., 2014, Comparison of sensors and methodologies for effective prognostics on railway turnout systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 230, 1 (2016), 24–42.
- CENELEC ENV50129, 1998, Railway applications—safety related electronic systems for signalling.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chapman, L., Young, D.T., Muller, C.L., Rose, P., Lucas, C., Walden, J., 2014, Winter Road Maintenance and the Internet of Things. In Proceeding of 17th International Road Weather Conference, Andorra, 30 January–1 February 2014.
- Clairbois, J.P. ve Garai M., 2015, The European standards for roads and railways noise barriers state of the art. In: Proc Euronoise 2015, Maastricht, The Netherlands; 2015.
- Cordon, A.C., Redondoa, N.J., Gámiza, J. M., Villenaa, F. A. G., Escalantea, J. P., Garmabakib, A.H.S., Famurewab, S. M., Duarte, E., Morgado, J., 2018, Combined RAMS and LCC analysis in railway and road transport infrastructure. Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, April 16-19, 2018, Vienna, Austria
- Gürbüz, H. Ve Cömert, E., 2012. Bakım Planlama Faaliyetlerinde Tamsayılı Doğrusal Programlama ve Bir Uygulama. Karadeniz Sosyal Bilimler Dergisi, 2012 - dergipark.org.tr
- Dahlan, I. A., Hamami, F., Supangkat, S.H., Hidayat, F., 2019, Big Data Implementation of Smart Rapid Transit using CCTV Surveillance. 2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)
- Dhall, R. ve Solanki, V., 2017, An IoT Based Predictive Connected Car Maintenance Approach. International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence, Vol. 4, N°3
- Dragomir, O. E., Gouriveau, R., Zerhouni, N., Dragomir, F., 2007, Framework for a distributed and hybrid prognostic system. The 4th International Federation of Automatic Control Conference on Management and Control of Production and Logistics September 27-30, Sibiu – Romania
- Duque, O., Zorita, A.L., Escudero, L.A.G., Fernández, M.A., 2009, Criticality determination based on failure records for decision-making in the overhead contact line system. The manuscript was received on 11 December 2008 and was accepted after revision for publication on 22 April 2009.
- EC Draft prEN50126, 1998, Railway applications—software for railway control and protection systems.
- El- Al-najjar, B., ve Alsyouf, I., 2003, Selecting the most efficient maintenance approach using. International journal of production economics, 2003.
- Elsayed, E. A., ve Dhillon, B. S., 1979, Repairable systems with one standby unit. Microelectro Reliab. Vol. 19, pp. 243 to 245.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Endrenyi, J., Aboresheid, S., Allan, R.N., Anders, G.J., Asgarpoor, S., Billinton, R., Chowdhury, N., Dialynas, E.N., Fipper, M., Fletcher, R. H., Grigg, C., McCalley, J., Meliopoulos, S., Mielnik, T. C., Nitu, P., Rau, N., Reppen, N. D., Salvaderi, L., Schneider, A., Singh, C.H., 2001, The Present Status of Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability. A Report of the IEEE/PES Task Force on Impact of Maintenance Strategy on Reliability of the Reliability, Risk and Probability Applications Subcommittee
- Faber, J. ve Meyer, R., 2006, Model Checking Data-Dependent Real-Time Properties of the European Train Control System. Proceedings of the Formal Methods in Computer Aided Design (FMCAD'06) 0-7695-2707-8/06, 2006
- Fantini, A., Fiorucci, M., Martino, S., 2017, Rock Falls Impacting Railway Tracks: Detection Analysis through an Artificial Intelligence Camera Prototype. Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2017, Article ID 9386928, p. 11
- Ferreira, L. ve Murray, M. H., 1997, Modelling rail track deterioration and maintenance: current practices and future needs. Transport reviews, 1997, VOL. 17, No. 3, p. 207-221
- Finger, M., 2014, Governance of competition and performance in European railways: An analysis of five cases. Utilities Policy Volume 31, December 2014, p. 278-288
- Flinders, M., 2004, Distributed public governance in the European Union. Journal of European Public Policy 11:3 June 2004. p. 520–544
- Flint, D.J., 2004, Strategic marketing in global supply chains Four challenges. Industrial marketing management volume 33, Issue 1, January 2004. p. 45-50
- Fodiman, P. ve Staiger, M., 2006, Improvement of the noise Technical Specifications for Interoperability: The input of the NOEMIE project. Journal of Sound and Vibration Volume 293, Issues 3–5, 13 June 2006. p. 475-484
- Friedman, N., Geiger, D., Goldszmidt, M., 1997, Bayesian Network Classifiers. Machine learning, 29, 131–163 (1997) 1997 kluwer academic publishers. manufactured in the netherlands.
- Gertsbakh, I., 2000. Lectures in Reliability Theory With Applications to Preventive Maintenance, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005, p. 67-103
- Ghazel, M., 2014, Formalizing a subset of ERTMS/ETCS specifications for verification purposes. Transportation Research Part C: Emerging Technologies Volume 42, May 2014. p. 60-75

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Glover, W., Cross J., Lucas A., Stecki C., & Stecki J., 2010, The Use of Prognostic Health Management for Autonomous Unmanned Air Systems. Proceeding of International Conference on Prognostics and Health Management, October 10-16, Portland, Oregon, USA
- Gubbi, J., Cross, J., Lucas, A., Stecki, C., Stecki, J., 2013, Internet of Things (IoT) A vision, architectural elements, and future directions. Future Generation Computer Systems Volume 29, Issue 7, September 2013. p. 1645-1660
- Gündoğdu, F., ve Dal, E., 2011, Demiryolu projelerinde RAMS yönetimi ve LCC(Life Cycle Cost) kavramı. Transist 2011, Ulusal toplu ulaşım sempozyumu ve sergisi, 01-02 Aralık, İstanbul
- Hegedús, C., Ciancarini, P., Frankó, A., Kancilija, A., Papa, A., Poklukar, S., Riccardi, M., Sillitti A., Varga, P., 2018, Proactive Maintenance of Railway Switches. 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies CODIT 2018 Thessaloniki (Greece)
- Hokstad, P. ve Corneliussen, K., 2004, Loss of safety assessment and the IEC 61508 standard. Reliability Engineering & System Safety Volume 83, Issue 1, January 2004, Pages 111-120
- Holvad, T., 2009, Review of Railway Policy Reforms in Europe, Built Environment Volume 35, Number 1 2009
- Jambekar, A. B., 2000, A systems thinking perspective of maintenance, operations, and process quality. Journal of Quality in Maintenance Engineering 6(2):123–132.
- Gilbert, J.P., ve Finch, B.J., 1985, Maintenance Management: Keeping Up With Production's Changing Trends and Technologies. Journal of Operations Management Volume 6, Issue 1, November 1985. p. 1-12
- Jin H., Lundteigen M.A., Rausand M., 2011, Reliability performance of safety instrumented systems: A common approach for both low- and high-demand mode of operation. Reliability Engineering and System Safety 2011;96:365–73.
- Kalgren, P.W., Baybutt, M., Ginart, A., Minnella, C., Roemer, M., Dabney, T., 2007. Application of prognostic health management in digital electronic systems. . In Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, March 1–9.
- Khan, S. ve Yairi, T., 2018. A review on the application of deep learning in system health management. Mechanical Systems and Signal Processing, 107:241–265, 2018.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kim, J.W., Chung, J.D., Han, S.Y., 2009. Life cycle cost model for evaluating RAMS requirements for rolling stocks. . In: *Computers & Industrial Engineering, International Conference on IEEE. CIE. Troyes, France. 2009. P. 1189-1191.*
- Klanker, G., ve Stepanović, I., 2017, The impact of different maintenance policies on ownerscosts: Case Studies from Croatia and the Netherlands. *The Value of Structural Health Monitoring for the reliable Bridge Management Zagreb 2-3 March 2017*
- Kranenburg, R.V. ve Bassi, A., 2012, IoT Challenges. *Internet of People, Tentoonstellingslaan 22, 9000 Gent Belgium p. 1:9*
- Kumar, V., 2014, Role Of Third Party Agency In FPSO/FSO EPCIC Project. *International Journal Of Scientific & Technology Research Volume 3, Issue 8, August 2014*
- Le Mortellec, A., Clarhaut, J., Sallez, Y., Berger, T., Trentesaux, D., 2013, Embedded holonic fault diagnosis of complex transportation systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence Volume 26, Issue 1, January 2013. p. 227-240*
- Lee, J., 1995, Machine performance monitoring and proactive maintenance in computer-integrated manufacturing review and perspective. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing 8 (5) (1995) 370–380.*
- Lee, J., Ghaffari M., Elmeligy S., 2011, Self-maintenance and engineering immune systems Towards smarter machines and manufacturing systems. *Ann Rev Control 2011;35:111–22.*
- Lee, J., Wu, F.J., Zhao, W.Y., Ghaffari, M., Liao, L.X., Siegel, D., 2014, Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing Volume 42, Issues 1–2, January 2014. p. 314-334*
- Li, A.; Yang, X.; Dong, H.; Xie, Z.; Yang, C., 2018 *Machine Learning-Based Sensor Data Modeling Methods for Power Transformer PHM. Sensors 2018, 18, 4430.*
- Li B., Hou B., Yu W., Lu X., Yang C., 2017, Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review. *Front Inform Tech El 2017;18(1):86–96*
- Liao, C. J., ve Chen, W. J., 2003. Single-machine scheduling with periodic maintenance and nonresumable jobs. *Computers & Operations Research Volume 30, Issue 9, August 2003. p. 1335-1347*
- Lin, J., Pulido J., Asplund M., 2015, Reliability analysis for preventive maintenance based on classical and Bayesian semi-parametric degradation approaches using locomotive wheel-sets as a case study. *Reliability Engineering & System Safety Volume 134, February 2015. p. 143-156*

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lison, P., 2015. An introduction to machine learning, <http://folk.uio.no/plison/pdfs/talks/machinelearning.pdf>, erişim tarihi: 02.01.2020
- Liu, R.N., Yang, B.Y., Zio, E., Chen, X.F., 2018. Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing* Volume 108, August 2018, Pages 33-47
- Lu, X., Shan, S., Tang, G., Wen, Z. 2016. Survey on the Railway Telematic System for Rolling Stock. *Proceedings of the 2015 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation*, vol. 378, pp. 645–656, 2016.
- Lu, Y., 2017, Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration* Volume 6, June 2017. p. 1-10
- Lundteigen, M., ve Rausand M., 2009, Architectural constraints in IEC 61508: Do they have the intended effect. *Reliability Engineering & System Safety* Volume 94, Issue 2, February 2009. p. 520-525
- Lyngby, N., Hokstad, P., Vatn, J., 2008. rams-management-of-railway-tracks. *Handbook of Performability Engineering*. Springer London, pp. 1123–1145
- Makinde, O.A., Mporu, K., Ramatsetse, B.I., Adeyeri, M. K., Ayodeji, S. P., 2017, A maintenance system model for optimal reconfigurable vibrating screen management. *J. Indus. Eng. Int.* 14 (2018) 521–535.
- McCall, J.J., 1965, Maintenance policies for stochastically failing equipment: a survey. *Management science* Vol. 1, No. 5, March, 1965 Printed in U.S.A.
- Mckone, K. E., ve Weiss, E. N., 2002, Guidelines for implementing predictive maintenance. *Production and operations management* Vol. 11, No. 2, Summer 2002 Printed in U.S.A.
- Midya S. ve Thottappillil, R., 2007, An overview of electromagnetic compatibility challenges in European Rail Traffic Management System. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 16, 515–534.
- Mobley, R. K., 2002. *An Introduction to Predictive Maintenance*, Butterworth Heinemann, p. 43-70
- Moubray, J., 1997, *Reliability Centered Maintenance*, Elsevier Butter worth Heinemann Lineacre House, Jordan Hill, Oxford, p. 144-167
- Muttram, R. I., 2002, Railway Safety's Safety Risk Model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 216 (2002) 71–79

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Müller, J.R., Drewes, J., May, J., Trog, C., 2009, The Formal Representation of the Safety Case Processes described in the EN 5012x norms. International Railway Safety Conference (IRSC 2009), 2009.
- Obrenovic, M., Jäger, B., Lemmer, K., 2006, Development and evaluation of migration strategies for etcs level 1 applied on a synthetic track. ZEL 2006, Zilina (SK)
- Ogunsola, A., ve Mariscotti, A., 2013, Electromagn. Compat. in Railways. Springer Heidelberg, 2013. p. 217-313
- Palumbo, M., 2013, Railway Signalling since the birth to ERTMS. www.railwaysignalling.eu, 2013
- Pascoe, R. D., ve Eichorn, T. N., 2009, What is communication based train control. IEEE Veh. Technol. Mag., pp. 16–21, Dec. 2009.
- Patra, A.P. ve Kumar, U., 2010, Availability analysis of railway track circuits. Proc Inst Mech Eng Part F: Rail Rapid Transit 224:169– 177
- Pedregal, D.J., García, F. P., Schmid, F., 2004. RCM2 predictive maintenance of railway systems based on unobserved components models. Reliability Engineering & System Safety Volume 83, Issue 1, January 2004, Pages 103-11
- Peele, T.T. ve Chapman, R.L., 1984, Determining maintenance manpower requirements. Plant Engineering, 38 (16), 74-77.
- Peeters, M. and Kroon, L., 2007, Circulation of railway rolling stock: a branch-and-price approach. Computers & Operations Research Volume 35, Issue 2, February 2008. p. 538-556
- Pintelon, L.M. ve Gelders, L.F., 1992, Maintenance management decision making. European Journal of Operational Research Volume 58, Issue 3, 11 May 1992. p. 301-317
- Platzer, A., ve Quesel, J. D., 2009, European Train Control System: A case study in formal verification. International Conference on Formal Engineering Methods ICFEM 2009: Formal Methods and Software Engineering p. 246-265
- Podofilini, L., Zio, E., Vatn, Z., 2006, Risk-informed optimisation of railway tracks inspection and maintenance procedures. Reliability Engineering & System Safety Volume 91, Issue 1, January 2006. p. 20-35
- Reason, J., 2019, Understanding adverse events: human factors. : Vincent C, ed. Clinical risk management: enhancing patient safety. BMJ, 2001:9-30.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Reynders, A., Scheerder, G., Audenhove, C., 2011, The reliability of suicide rates: An analysis of railway suicides from two sources in fifteen European countries. *Journal of Affective Disorders* Volume 131, Issues 1–3, June 2011. p. 120-127
- Roberts, C., vd., 1987, Distributed quantitative and qualitative fault diagnosis: railway junction case study. *Control EngngPract* 2002;10:419–29., Stott PF. Automatic open level crossing. A review of safety. London, UK: Her Majesty's Stationery Office
- Saharkhız, E., Bagherpour M., Feylizadeh, M.R., Afsarı, A., 2012, Software Performance Evaluation of a Computerized Maintenance Management System A Statistical Based Comparison. *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability* 2012; 14 (1): 77–83.
- Scanff, E., Feldman, K.L., Ghelam, S., Sandborn, P., Glade, M., Fouchera, B., 2007, Life cycle cost impact of using prognostic health management (PHM) for helicopter avionics. *Microelectronics Reliability* Volume 47, Issue 12, December 2007. p. 1857-1864
- Sethiya, S. K., 2006. Condition Based Maintenance (CBM). Jan. 2006, Available at <http://irsme.nic.in/files/cbm-sethiya.pdf> [Accessed: April. 5, 2008].
- Sheut, C., ve Krajewski, L. J., 1994 A decision model for corrective maintenance management. *International Journal of Production Research* Volume 32, 1994 - Issue 6. p. 1365-1382
- Silla, A., 2012. The development of railway safety in Finland. *Accident Analysis & Prevention* Volume 45, March 2012. p. 737-744
- Steriade, D., 2001. The phonology of perceptibility effects: the P-map and its consequences for constraint organization. Ms., UCLA, Los Angeles, CA. Downloaded 29 May 2007 from www.linguistics.ucla.edu/people/steriade/papers/P-map_for_phonology.doc
- Sutharssan, T. Stoyanov, S., Bailey, C., Yin, C., 2015, Prognostic and health management for engineering systems: a review of the data-driven approach and algorithms. *The Journal of Engineering*, no. 7, pp. 215– 222, 2015
- Swanson, L., 2001. Linking maintenance strategies to performance. *International Journal of Production Economics* Volume 70, Issue 3, 18 April 2001. p. 237-244
- T.C. Ulaştırma Bakanlığı Demiryollar, Limanlar, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü Demiryolları Planlama ve Tasarım Teknik Esasları, 2007, <https://docplayer.biz.tr/573302-T-c-ulastirma-bakanligi-demiryollar-limanlar-havameydanlari-insaati-genel-mudurlugu-havameydanlari-planlama-ve-tasarim-teknik-esaslari.html>, erişim tarihi: 28.12.2019

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tan, C. M., ve Raghavan, N., 2008. A framework to practical predictive maintenance modeling for multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety* Volume 93, Issue 8, August 2008. p.1138-1150
- TCDD Bakım El Kitabı, 2018, p. 33-75
- Tedeschi, S. Mehnen, J., Tapoglou, N., Roy, R., 2017, Secure IoT Devices for the Maintenance of Machine Tools. *Proc. TLES*, 2017, pp. 150-155
- Torres, C., Valero, A., Rangel, V., Zaleta, A., 2008, On the cost formation process of the residues. *Energy* Volume 33, Issue 2, February 2008. p. 144-152
- Uckun S. Goebel, K., Lucas, P.J.F., 2008, Standardizing research methods for prognostics. *Proceedings of international conference on prognostics and health management*, Denver, Colorado: IEEE; 2008. p. 1–10.
- Urena, J.M., Menerault, P., Garmendia, M., 2009, The high-speed rail challenge for big intermediate cities: A national, regional and local perspective. *Cities* Volume 26, Issue 5, October 2009. p. 266-279
- Van der Spiegel, B., 2009, Railway Energy Measuring, Managing and Billing. 2009 6th International Conference on the European Energy Market, Pages: 1 – 8
- Vaubel, R., 2008, The political economy of labor market regulation by the European Union. *The Review of International Organizations* December 2008, Volume 3, Issue 4, p. 435–465
- Wakjira, M.W. ve Singh, A. P., 2012, Total Productive Maintenance A Case Study in Manufacturing Industry. *Global Journal of researches in engineering Industrial engineering*, 2012, Volume 12, Issue 1, pp. 2.
- Wienker, M., Henderson, K., Volkerts, J., 2016, The computerized maintenance management system an essential tool for world class maintenance. *An essential Tool for World Class Maintenance. Procedia Eng* 2016;138:413–20.
- Yaman, G., 2014. Titreşim Analizi ile Pompalarda Arıza Tesbiti ve Kestirimci Bakım İçin Örnek Bir Çalışma. *Tesisat Mühendisliği*, Sayı 140, pp. 36-51.
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., Zorzi, M., 2014. Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1):22–32, February 2014.