

## STANDARD

# SİSTEM TASARIMINDA GÜVENİLİRLİK MERKEZLİ BAKIM UYGULAMALARI

Hakan Çekel<sup>1</sup>

## 1. GİRİŞ

Sanayi devrimi sonrasında, işletmelerin sürdürülebilir üretim kabiliyetlerini belirleyen en önemli unsurların başında; makina parkının kullanıma hazır olmasının yanı sıra atanan görevi de arızasız ve istenen performansla tamamlaması ve bunun sürekliliğinin olması gelmektedir. Modern dünyada tüm kurumlar, içinde buldukları rekabet koşullarında, verimlilik, kalite ve düşük maliyet gibi anahtar değişkenleri iyileştirmeye çalışmaktadır [1].

Araştırmalar, kara araçlarının ömür devri sürecindeki toplam maliyetin ortalama %54'lük bölümünün işletme ve idame giderlerinin oluşturduğunu göstermektedir (Tablo 3) [2]. Söz konusu giderler işletmelerin envanterine dahil edeceği sistemlere karar verirken, daha kısa süreli duruş ve düşük bakım maliyetleri ile işletilebilen, diğer bir deyişle minimum lojistik destek altyapısına ihtiyaç duyan sistemlere öncelik vermesine neden olmuştur.

**Tablo 1.** Sistemlerin Ömür Devri Maliyet Dağılımları [2]

Sistem Tipi	Gider Dağılımı		
	Ar-Ge	Üretim	İşletim ve Bakım Elden Çıkarma
Gemi	% 1	% 31	% 68
Kara Araçları	% 9	% 37	% 54
Döner Kanat	% 15	% 52	% 33
Uzay	% 18	% 66	% 16
Sabit Kanat	% 20	% 39	% 41
Elektronik	% 22	% 43	% 35
Füze	% 27	% 33	% 40

Karmaşık sistemlerin lojistik destek planlaması, sistemin tasarım safhaları ile eş güdümlü olarak ilerleyen, Şekil 1'deki ana başlıklar altında ele alınan ve üst başlık olarak Entegre Lojistik Destek (ELD) olarak isimlendirilen

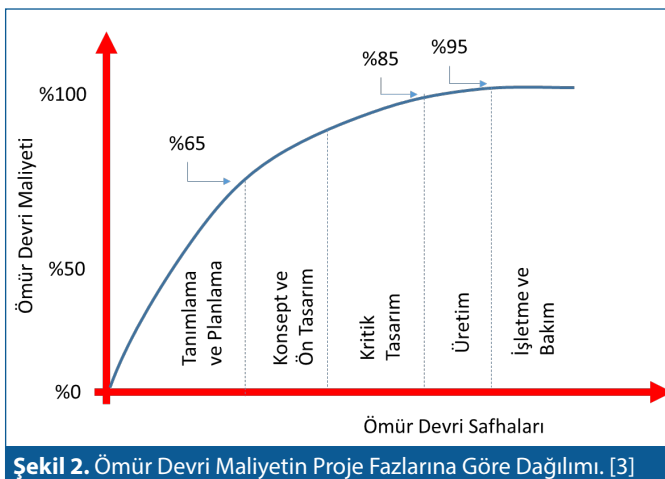
<sup>1</sup> Makina Mühendisi, Otokar ELD Müdürü - hcekel@otokar.com.tr

alt süreçleri içermektedir. Savunma sanayi uygulamalarından başlayarak birçok sektörde görev alan Lojistik Mühendisleri, ürünün ömür devri sürecinde doğru ve maliyet etkin desteklenmesinde en önemli planlayıcılar olarak rol almaktadırlar.

Bu yazıda, bakım desteğinin güvenilirlik odağında planlanması konusuna odaklanılmıştır. Temelde sistemin güvenilirliği yüksek, önleyici ve düzeltici bakım süreleri en aza indirilmiş ve kolay bakım yapılabilir sistemler olarak tasarlanması için sırasıyla, kavramsal (konsept) tasarım, ön tasarım, kritik tasarım gözden geçirme aşamalarında girdilerin ELD Mühendisleri tarafından sağlanması kritik öneme sahiptir. Bu sürecin sağlıklı işletilmesi ile yukarıda belirtilen işletme dönemi maliyetlerinin azaltılmasına yönelik önlemlerin, görece daha düşük maliyetle üretim



Şekil 1. Temel ELD Bileşenleri



Şekil 2. Ömür Devri Maliyetin Proje Fazlarına Göre Dağılımı. [3]

öncesi dönemde çözümlenmesini sağlayabilmektedir. Araştırmalar, sistemlerin ömür devri maliyetlerini doğrudan etkileyen kararların önemli bir bölümünün kritik tasarım gözden geçirme fazına kadar tamamlandığını göstermektedir (Şekil 2).

## 2. BAKIM VE GÜVENİLİRLİK İLİŞKİSİ

### 2.1 Bakım Nedir?

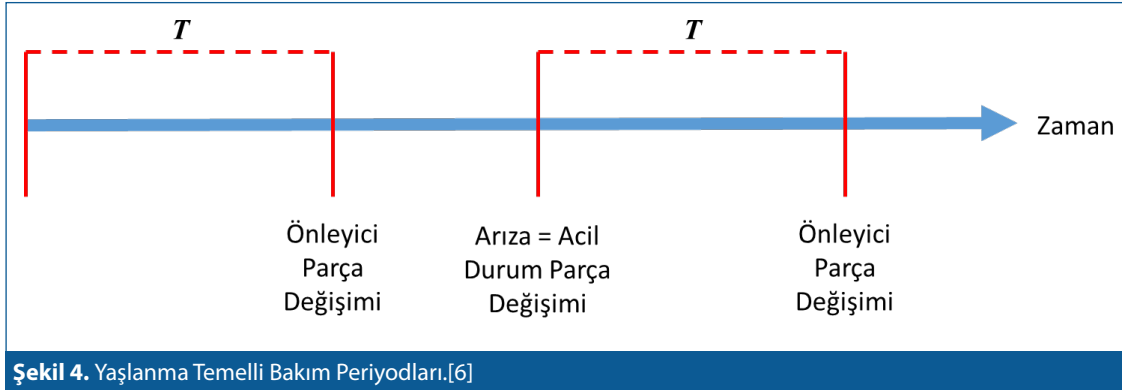
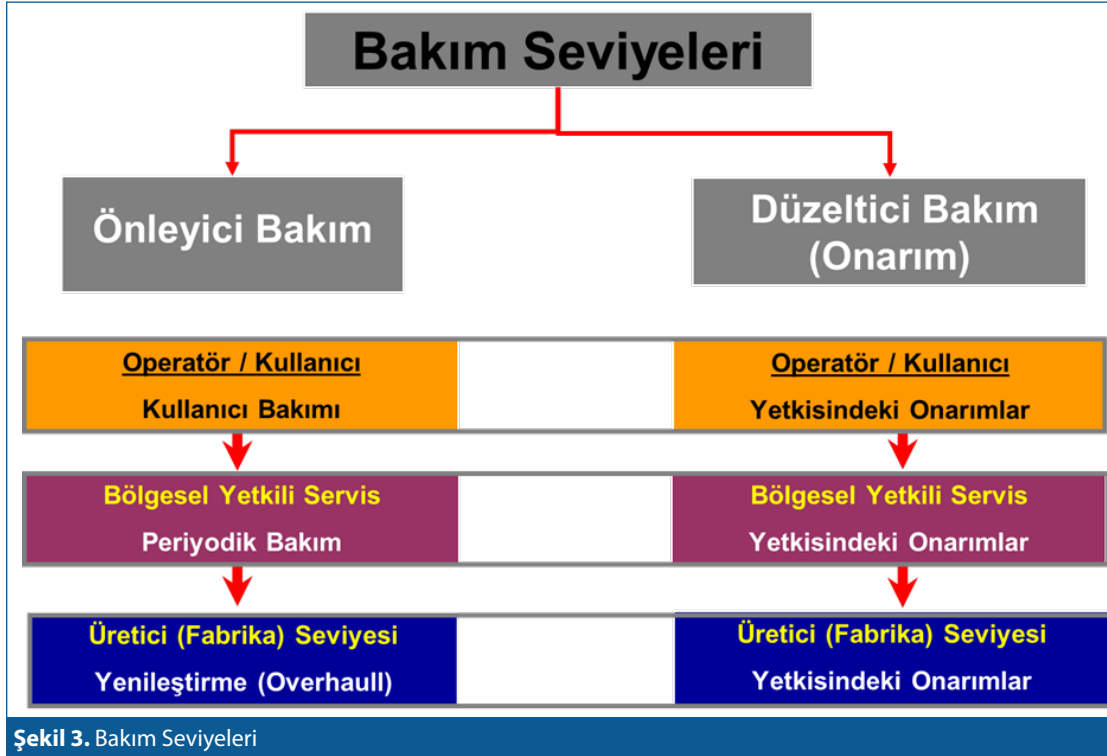
Bakım kavramı, Türk Dil Kurumu sözlüğünde, “bir şeyin iyi gelişmesi, iyi bir durumda kalması için verilen emek” olarak tanımlanırken, Oxford Dictionary’de “The process of keeping something in good condition - Bir şeyi iyi durumda tutma süreci” olarak tanımlanmıştır. Aynı kavram, Değişen ve Gelişen Çağda Lojistik kitabında ise “Bir sistemin belirlenen seviyede çalışmasını devam ettirmek veya sistemi tekrar bu seviyeye geri getirmek için gerekli her türlü işlemi kapsayan lojistik bir faaliyettir.” [4] şeklinde ele alınmıştır.

Bakım, kendi içinde Düzeltici Bakım (Onarım) ve Önleyici Bakım olmak üzere iki alt başlık altında ele alınmaktadır. Önleyici Bakım da, Periyodik Bakım ve Duruma Dayalı Bakım olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Bakım kavramlarının söz konusu kırımlarının şematik gösterimi Şekil 3’te sunulmuştur.

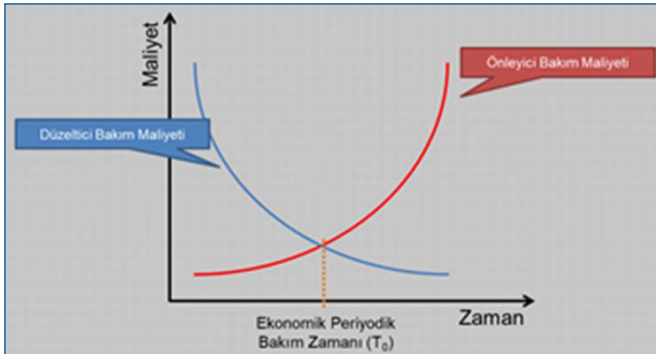
Sistemlerin bakım faaliyetlerinde düzeltici bakım (onarım) işlemi, araçların plansız kullanım dışı kalmasına neden olduğundan, önleyici bakım planlaması önem kazanmaktadır. Önleyici bakım periyodlarının kısaltılması dolayısı ile daha fazla periyodik bakım ve kontrol gerçekleştirilmesi, düzeltici bakım sayısının azaltılması için etkin bir çözüm olmasına karşın getirdiği maliyet yükü ve kullanım dışı kalma süresinin artması yine istenmeyen durumlara neden olabilmektedir.

Richard Barlow ve Larry Hunter’ın 1960 yılında yayımladıkları ve uzun süre bakım planlamasına kaynak olarak gösterilebilecek “Optimum Preventive Maintenance Policies” [5] isimli çalışma, öngörülen karmaşık sistemlerin bakım planlamasının, tasarımın başında belirlenen aralıklarla yapılacak bakımlara dayandırılması, sistemdeki parçaların yıpranma durumlarının izlenmesi veya yıpranma eğrisini herhangi bir değerlendirmeye tabi tutmayan Şekil 4’te gösterildiği gibi bir planlamayı içermektedir.

Gelişen teknoloji ile paralel olarak, tasarlanan sistemle-



rin kullanıma hazır olma sürelerinin en yüksek düzeyde tutulabilmesi için gerçekleştirilen periyodik bakımların maliyetleri ve bakımda geçen kullanım dışı sürelerin iş-



letmelere oluşturduğu maliyetler, önleyici bakım planlamasında yeni arayışların oluşmasını bir başka deyişle bakım planlamasının optimizasyon çalışmalarını gündeme getirmiştir. Bakım planlamasında önleyici bakım maliyetleri ile düzeltilici bakım maliyetlerinin değerlendirilerek, bakım planlamasının ekonomik açıdan değerlendirilmesi Şekil 5'te sunulmuştur.

## 2.2 Güvenilirlik Nedir?

Bir sistemin belirli koşullar altında ve belirli bir aralıkta (saat, km vb.) kendisinden beklenen işlevi (işlevleri) yerine getirme olasılığıdır. Güvenilirlik kavramının tanımından yola çıkarak, sistemin belirlenen görev süresince arıza yapmama olasılığı olarak da tanımlanabilir.

Güvenilirlik hesaplamasının en basit uygulamasında, aşağıda sunulan eşitlik kullanılarak hesaplama yapılabilir.

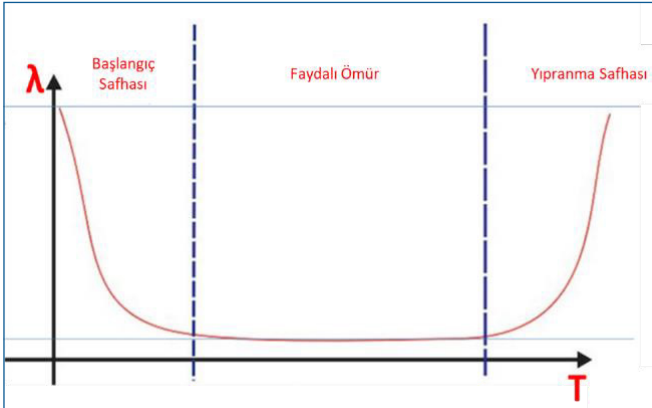
$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

R = Güvenilirlik

e = 2,71 Sabit

$\lambda$  = Arıza Oranı

t = Planlanan İşletme (Görev) Süresi



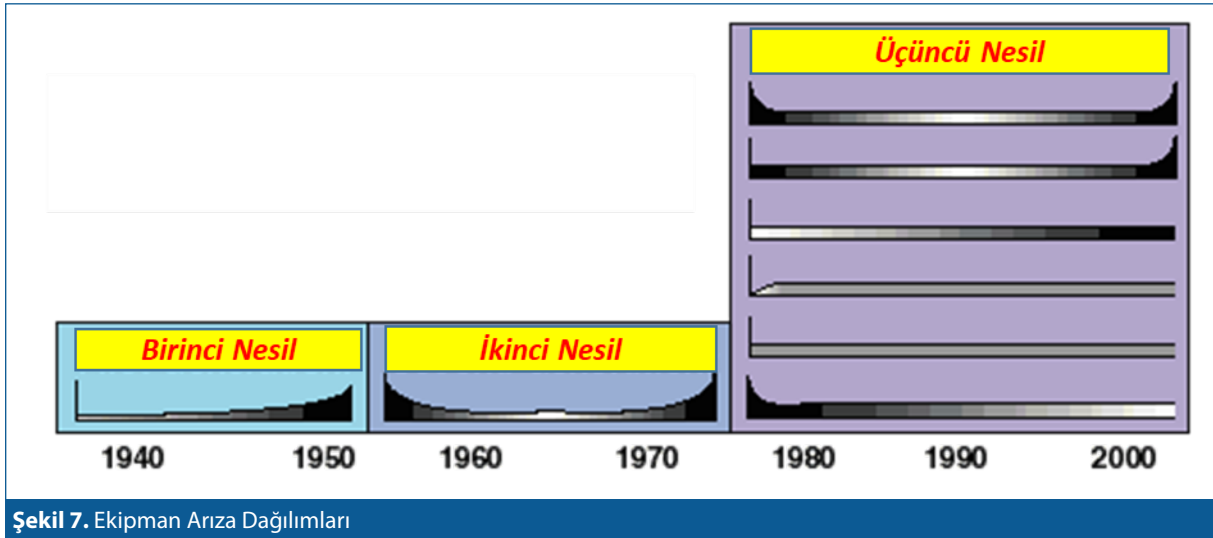
Şekil 6. Arıza Dağılımında Küvet Eğrisi Modeli

rülmesi, diğer bir deyişle arıza oranının sistemin yaşlanması ile ilişkisine bağlı değişiminin kritik öneme sahiptir.

Sistemlerin arıza yapma oranı ve beklentisi 1950'li yıllara kadar sistemin yaşlanması ile artacağı yönündeki bir kabulü benimsenmekteydi. 1960'ların başında ekipmanların overhaul (detaylı bakım) planlamalarının, Şekil 6'da sunulan küvet eğrisi karakterinde de olduğu gibi arızaların artışa geçtiği noktanın yakınında planlanabileceği söylenebilirdi.

1980'li yılların başından itibaren sistemlerin mekanik ve elektrik alt sistemlerini içeren karma yapılarının ağırlık kazanması, tek tip bir arıza oluşum oranı kabulü ile bakım planlamasının sorgulanmasına neden olmuştur. 1950'den başlayarak sistemlerin ömür devri sürecindeki arıza oranı değişim grafikleri Şekil 7'de sunulmuştur.

Arızaların farklı dağılımlar göstermesi durumuna odaklanıldığında; geçmiş dönemdeki kabullerden farklı olarak, önemli bölümünün sistemlerin yaşlanmasından bağımsız da olabileceği görülmektedir.



Şekil 7. Ekipman Arıza Dağılımları

Yukarıda sunulan güvenilirlik hesaplamasında, arıza oranı değerinin sistemin ömür devri sürecinde aynı oranda gerçekleşeceği varsayıldığı görülmektedir. Ancak gerçek hayatta sistemler, ömür devirlerinin fazlarına göre farklı arıza oranı dağılımları gösterebilmektedir. Şekil 3'te sunulan ideal önleyici bakım zamanı ve periyodunun belirlenmesinde, sistemin ne zaman arıza yapacağını doğru öngö-

### 3. GÜVENİLİRLİK MERKEZLİ BAKIM

#### 3.1 Gelişim Süreci

1950'lerin sonlarında sivil havacılık sektöründeki bakım maliyetlerinin çok yüksek ve bakım sürelerinin çok uzun olması nedeniyle, Amerikan Ulusal Havacılık Ajansı (FAA-Federal Aviation Agency) bünyesinde oluşturulan Bakım

**Tablo 2.** Geleneksel Bakım ile Güvenilirlik Merkezli Bakım (RCM) Karşılaştırması [7]

Önleyici Bakım Tipi	Geleneksel Bakım Yöntemi Gereksinimleri	RCM Gereksinimleri
Yapısal Muayene	4.000.000 Adam-Saat	66.000 Adam-Saat
Komple Bakım (Overhaul)	339 Parça Değişim	7 Parça Değişim
Türbin Motor Bakım	Periyodik Tekrar	Duruma Dayalı

Çalışma Grubu (MSG-Maintenance Steering Group) tarafından 1960 yılında yayınlanan Bakım Planlaması çalışması, Güvenilirlik Merkezli Bakım uygulamalarının başlangıç noktası olarak kabul edilmektedir.

Grubun çalışması daha sonra Boeing Jumbo Jet uçaklarının tasarımında MSG-1 ismi ile bakım planlama modeli olarak yayınlanmış ve bakıma ayrılan iş gücü, zaman/maliyet açısından önemli kazanımlar sağlamıştır (Tablo 2).

Model, 1970 yılında tüm sivil hava araçlarına uygulanmak üzere MSG-2 ismi ile bir kılavuz olarak yayınlanmış, 1972 yılında ise Avrupa havacılık endüstrisi tarafından da kabul edilerek A300 Airbus uçaklarında da uygulanmıştır.

1978 yılında ise Amerikan Hava Kuvvetlerinde de uygulanmaya başlanmış, sağlanan faydalar neticesinde, uygulamanın kritik görülen her türlü ekipmanda kullanılabilmesi amacıyla kapsamı genişletilerek, MSG-3 isimli yeni bir kılavuz doküman ile uygulamaya devam edilmiştir.

**Tablo 3.** RCM Kılavuz Kaynakların Gelişimi

Kılavuz/Standart	Yayın Yılı
MSG-1	1960
MSG-2	1970
MSG-3	1978
Mil Std 2173 Reliability Centered Maintenance	1981 (Rev.1986)
TS IEC 60300-3-11 Güvenilebilirlik Yönetimi	1999 (rev. 2003)
Bölüm 3-11 Güvenirlik Merkezli Bakım	

Bu yöntemin Güvenilirlik Merkezli Bakım (RCM-Reliability Centered Maintenance) olarak isimlendirilmesi ilk olarak MSG-3 kılavuzunda yapılmıştır. Bu yöntemin işletmeler tarafından kritik görülen tüm karmaşık ekipmanlara uygulanmasında; geleneksel olarak uygulanan süreç tabanlı bakım uygulamadan, görev bazlı bakım uygulamasına geçiş tanımlanmıştır.

### 3.2 Güvenilirlik Merkezli Bakım Uygulaması

Güvenilirlik Merkezli Bakım uygulamalarında amaç:

- Çalışan Güvenliği,
- Çevre Sağlığı,
- Görev Başarısı,
- İşletme Ekonomisi.

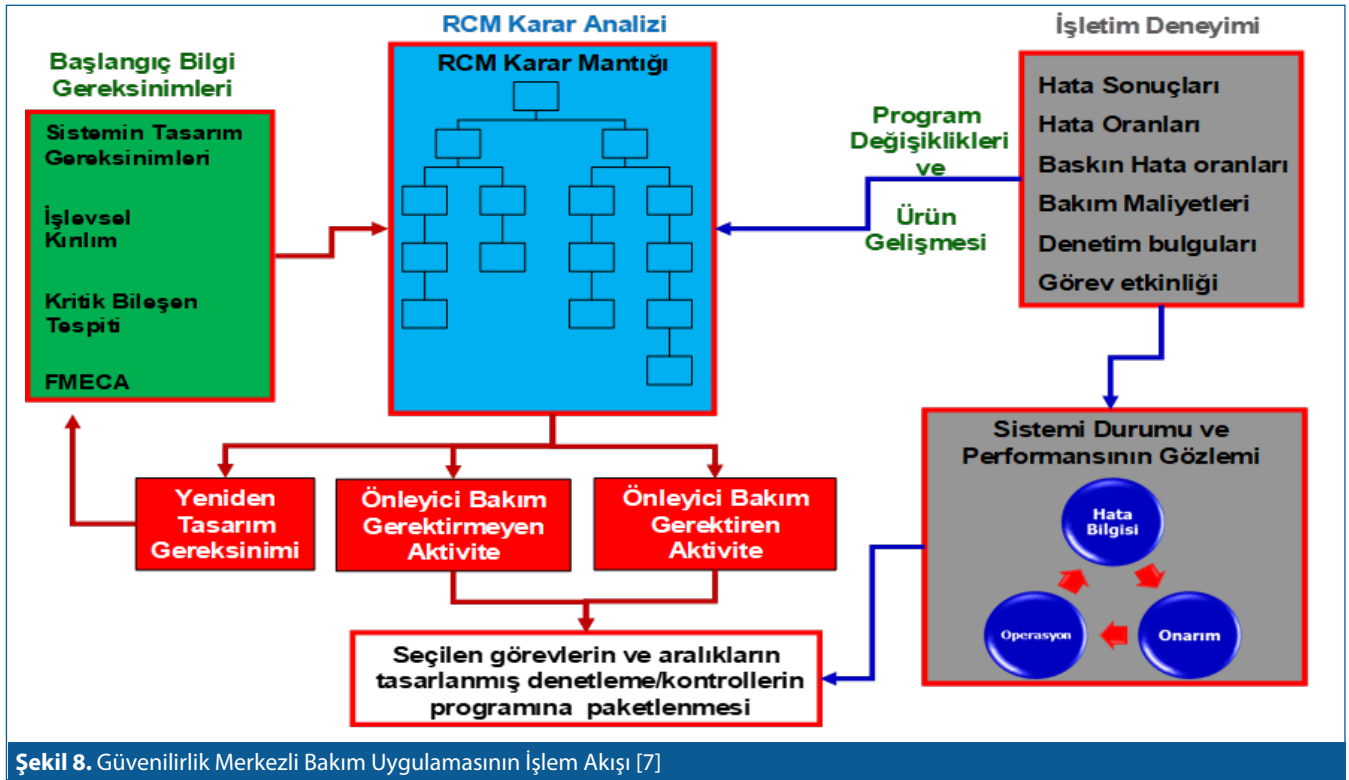
yukarıda sıralanan değişkenleri olumsuz etkileyen fonksiyonel hataların sonuçlarından sakınmak ya da belli bir seviyede azaltmaktır. Analitik temellidir ve proje amaçlarına ulaşılmasını sağlayan uygun araçları belirlemek için uygulanır. Söz konusu araçlar aşağıdaki başlıklar altında sınıflandırılabilir:

- Önleyici Bakım görevleri,
- Yeniden Tasarım,
- İşletim ve Bakım Süreçlerinin Geliştirilmesi.

Güvenilirlik Merkezli Bakım uygulaması, uygulandığı sistemlere göre küçük değişiklikler gösterse de aşağıda sunulan yedi temel sorunun yanıtlanmasına dayalı bir uygulama olarak tanımlanabilir.

- Araç işletme şartlarında hangi fonksiyonları ve performans standartlarını yerine getirmelidir?
- Bu fonksiyonları yerine getirmesine neler engel olur?
- Fonksiyonel arızaların nedenleri neler olabilir?
- Her bir arıza gerçekleştiğinde sonuçları ne olur?
- Arıza nasıl oluşur?
- Arızaları önceden kestirmek ve önlemek için ne yapılabilir?
- Eğer önleyici bir bakım yöntemi bulunmaz ise ne yapılmalıdır?

Temel olarak bir Güvenilirlik Merkezli Bakım uygulamasının iş işlem akışı, Şekil 8'de sunulan işlem adımları ile yürütülmektedir.



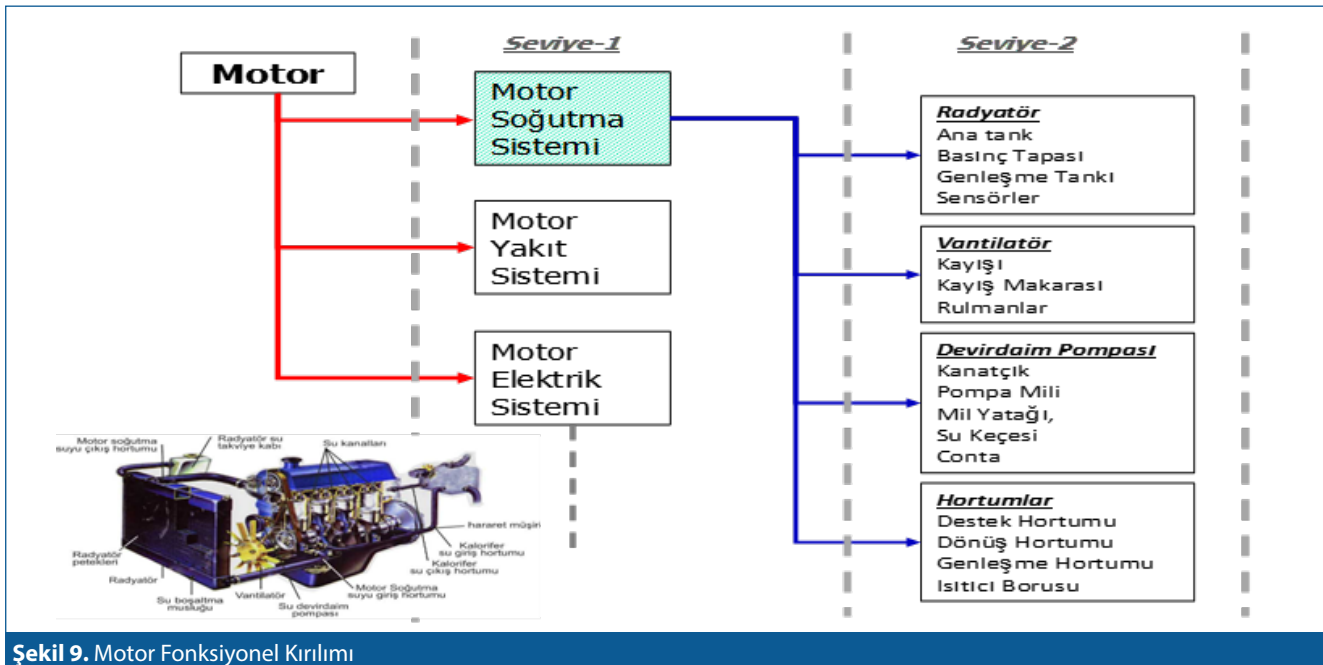
### 3.2.1 Başlangıç Bilgi Gereksinimleri

Analize tabi tutulan sistemin temel tasarım gereksinimlerinin ve kullanıcı tarafından öngörülen kullanım profillerinin tanımlanması gerekmektedir. Söz konusu görev profilleri fonksiyonel kırılımın ve güvenilirlik hesaplamalarına

temel teşkil edecek veriler olarak değerlendirilecektir. Örnek olarak, oluşturulan bir içten yanmalı motorun Fonksiyonel Kırılımı Şekil 9'da sunulmuştur.

### 3.2.2 Hata Modu, Etkileri ve Kritiklik Analizi

Hata modu, etkileri ve kritiklik analizi, bir sistemin tüm



potansiyel hatalarını ve hata mekanizmalarını belirlemek, her potansiyel hatanın sistem güvenliği ve performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve her hatayı kritikliğine göre sınıflandırmak için yapılan bir analizdir.

• **Birincil Amacı:**

Tüm ölümcül ve kritik hata olasılıklarının erken belirlenmesi böylece bunların tasarım düzeltmeleri sürecinde elenmelerini sağlamak.

• **İkincil Amacı:**

Tasarım etkinliğini onaylamak ve düzeltici bakım gereksinimlerini tanımlamak olarak tanımlanabilir.

Söz konusu analiz, Hata Modu, Etkileri ve Kritiklik Analizi olmak üzere iki alt analizden oluşmaktadır. Hata Modu, Etkileri Analizi; tasarımın gözden geçirilmesi olarak kullanılan FMECA çıktıları şunlara girdi sağlar:

- Yüksek riskli parçaları ve alanları belirlemek
- Özel muayene, test veya bakım gereksinimlerini belirlemek.

Kritiklik Analizi ise; belirlenmiş olan olası her hata modu-

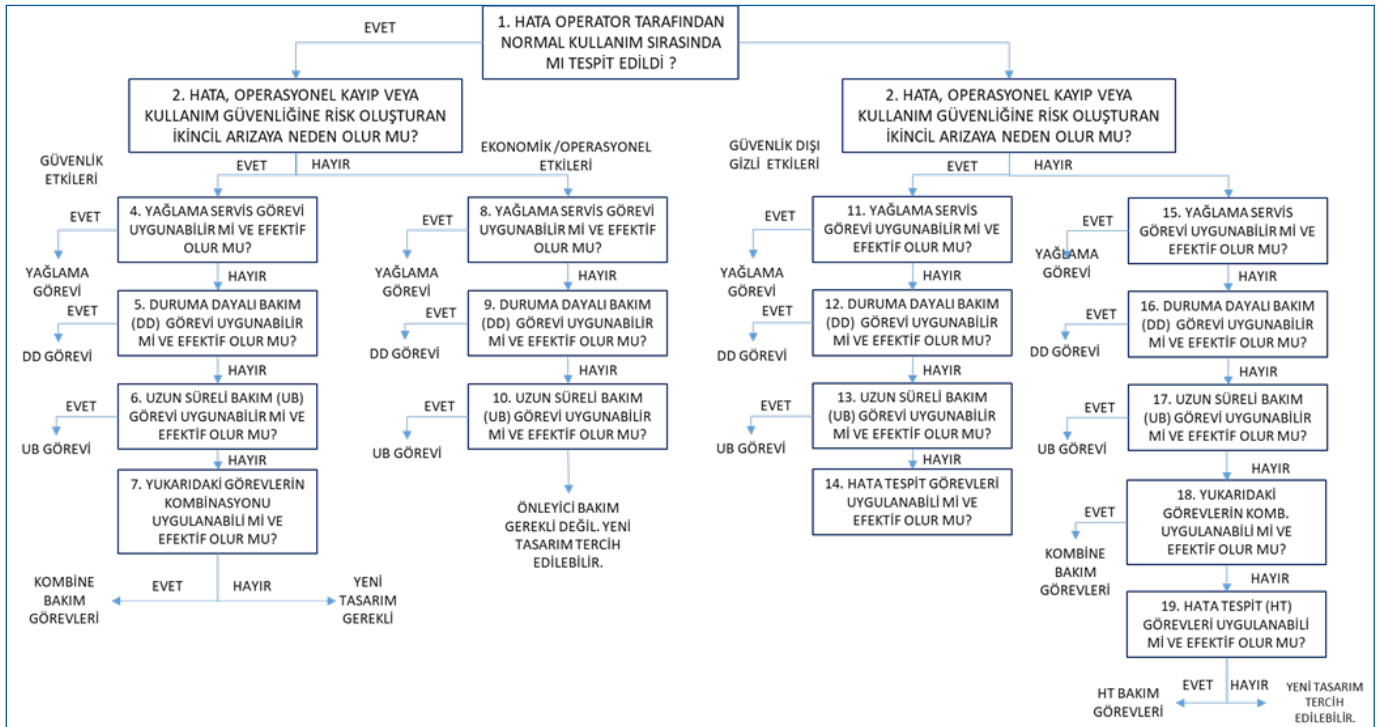
nun etkisini, önem sınıflandırması ile gerçekleşme olasılığının birleşimiyle sıraya koymaktır.

Hata Modu, Etkileri ve Kritiklik Analizi ile;

- Hata etkisinin ve sıklığının kritikliğini belirlenir,
- Hata ağacı analizi ve güvenilirlik blok diyagram modeli geliştirme için veri sağlanır,
- Sonraki tasarım düzeltmeleri için kritik hata modlarını belirlenir,
- Düzeltici bakım görevleri için bir temel oluşturulur,
- Nitelikli güvenilirlik, idame edilebilirlik, güvenlik ve lojistik analizler için altyapı hazırlanır,
- Güvenilirlik merkezli bakım (RCM) mantığının uygulanması ve önleyici bakım görevlerini geliştirmek için bir temel oluşturur.

### 3.2.3 Güvenilirlik Merkezli Bakım Karar Analizi

Güvenilirlik Merkezli Bakım uygulaması için başlangıç bilgilerinin hazırlanması çalışmalarının tamamlanmasından sonra, her bir arıza modu için karar analizi yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yürürlükteki farklı standartlarda ka-



Şekil 10. Karar Ağacı

rar analizi için birbirine yakın karar ağaçları tanımlanmış olup, işletmeler kendi süreçlerini dikkate alarak özgün karar ağaçlarını da oluşturabilmektedirler. Bu çalışmada MSG-3 tarafından yayınlanan güvenilirlik merkezli bakım karar ağacı kaynak alınmıştır. Söz konusu karar ağacı Şekil 10'da sunulmuştur.

#### 4. SONUÇ

İşletmelerin makina parkındaki sistemler için hazırlanacak bakım planlarının, araçtan beklenen kritik fonksiyonlara etkisine göre hazırlanması gerekir. Bu kapsamda;

- Arıza oranlarındaki azalma ile plansız duruşların azaltılması,
- Arıza oranlarındaki azalma ile güvenilirlik oranının artması,
- Aracın kritik fonksiyonlarına etkisi olmayan bakım görevlerinin elenmesi ile bakım görevlerinde malzeme ve işgücü gereksinimlerinin azaltılması,
- Bakım sürelerinin kısalması ile aracın operasyonel hazırlanma oranlarının arttırılması,
- Düzeltici ve Önleyici Bakım görevleri için bakım noktalarında tutulan yedek parça malzeme stoklarında gereksiz stok kaynaklı maliyetin azaltılması,
- Araçların tasarım sürecinde lojistik mühendislerinin bakım ekipmanı tasarımı, teknisyen eğitimi, sorun giderme (trouble shooting) çalışmalarını optimize ede-

bilmeleri için kritik veri tabanı oluşumuna önemli katkı sağladığı görülmektedir.

Bu çalışma ile, sistemlerin tasarım süreçlerinin başından itibaren tüm alt sistemlerine uygulanacak Güvenilirlik Merkezli Bakım analizleri sonucunda; oluşan bakım görev havuzundaki görevler birleştirilerek, önleyici bakım planlamasının optimize edilebileceği değerlendirilmektedir.

#### KAYNAKÇA

1. **Vishnu C. R. ve Regikumar V.** 2016. Reliability Based Maintenance Strategy Selection in Process Plants: A Case Study, Global Colloquium in Recent Advancement and Effectual Researches in Engineering, Science and Technology (RAE-REST 2016), S: 1080-1087
2. **Işın, Z.** 2009. Ömür Devri Maliyet Analiz Yaklaşımı ve Savunma Projelerinde Uygulamaları, Savunma Sanayi Gündemi, 2009, S: 39-43
3. **Blanchard, B.S.,** Design and Manage to Life Cycle Cost, Forest Grove, OR, MA Press, 1978
4. Değişen ve Gelişen Çağda Lojistik, Genelkurmay Basımevi, 2004
5. **Barlow, R. and Hunter, L.** Optimum preventive maintenance policies, Operations Research 1060; 8: 90-100, 1960
6. **Jin, L. and Yamamoto W.** 2017. Adaptive Age Replacement Using On-Line Monitoring, Procedia Engineering 174: 117-125
7. SATEM, Güvenilirlik Merkezli Bakım Eğitim Notları