

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

**RAYLI TAŞITLARDA GÜVENİLİRLİK ANALİZİ VE
BİR UYGULAMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Müh. Çağatay TEKE

Enstitü Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Baha GÜNEY

Haziran 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RAYLI TAŞITLARDA GÜVENİLİRLİK ANALİZİ VE
BİR UYGULAMA

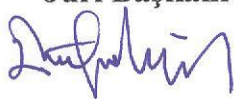
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Müh. Çağatay TEKE

Enstitü Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 29 / 06 /2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Emin GÜNDOĞAR
Jüri Başkanı



Doç. Dr. İmdat TAYMAZ
Üye



Yrd. Doç. Dr. Baha GÜNEY
Üye



ÖNSÖZ

Ulaşım insanlığın en temel ihtiyaçlarından biridir. Günümüzde Raylı Sistem araçlarına yapılan yatırım giderek artmaktadır. Bu araçların, yüksek güvenilirlik, yüksek işletme performansı, kolay bakım yapılabilirlik ve yolcu güvenliği gibi önemli gereklilikleri karşılaması gerekmektedir.

Bir sistemin, belirlenmiş olan standartları ne derece karşıladığının tespiti için sistemin hata analizinin yapılıp bu analizlerden de sistemin güvenilirlik değerinin çıkarılması gerekir. Bu konudaki çalışmalar Türkiye’de son dönemde önem kazanmıştır. Bu tezin, bu alanda yapılan çalışmalara katkı sağlaması hedeflenmiştir.

Çalışmamda beni yönlendiren ve her konuda bana yardımcı olan tez danışmanım, Sayın Yrd. Doç. Dr. Baha GÜNEY’e ve beni maddi manevi destekleyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 2.

RAMS ANALİZİ	3
2.1. RAMS Analiziyle İlgili Genel Bilgi	3
2.2. Güvenilirlik (Reliability)	4
2.4. Bakım Yapılabilirlik (Maintainability)	6
2.5. Güvenlik (Safety)	8

BÖLÜM 3.

GÜVENİLİRLİK (RELIABILITY)	10
3.1. Genel Bilgi ve Tarihçe	10
3.2. Güvenilirlik Tanımları	16
3.3. Güvenilirlikle İlgili Temel Formüller	17
3.3.1. Arıza dağılımı	17
3.3.2. Güvenilirlik fonksiyonu	19
3.3.3. Arıza hızı fonksiyonu ve banyo küveti eğrisi	19
3.3.4. Arızalar arası ortalama zaman	20
3.4. Güvenilirlik Konfigürasyonları	20

3.4.1. Seri konfigürasyon.....	20
3.4.2. Paralel konfigürasyon	21
3.4.3. K-m konfigürasyon.....	22
3.4.4. Yedekli konfigürasyon	22
3.4.5. Köprü konfigürasyon.....	23
3.5. Güvenilirlik Analiz Metotları	23
3.5.1. Arıza tipleri ve etki analizi (FMEA).....	24
3.5.2. Markov metodu.....	25
3.5.3. Hata ağacı analizi.....	26

BÖLÜM 4.

HATA AĞACI ANALİZİ (FTA) VE GÜVENİLİRLİK BLOK DİYAGRAMI

(RBD).....	27
4.1. Hata Ağacı Analizi (Fault Tree Analysis - FTA)	27
4.2. Güvenilirlik Blok Diyagramı (RBD)	29
4.3. Hata Ağacı Analizinden Güvenilirlik Blok Diyagramına Geçiş	30

BÖLÜM 5.

RAYLI SİSTEM YOLCU TAŞIMA ARAÇLARINDA KLİMA SİSTEMİ

GÜVENİLİRLİK HESAPLAMASI	32
5.1. Raylı Sistem Yolcu Taşıma Araçları	32
5.1.1. Hafif raylı sistemler	32
5.1.2. Ağır raylı sistemler	33
5.2. Bir Raylı Sistem Yolcu Taşıma Aracındaki Klima Sisteminin Güvenilirliğinin Hesaplanması	33
5.2.1. Uygulamayla ilgili genel bilgi	33
5.2.2. Raylı sistem yolcu taşıma aracındaki klima sistemi	33
5.2.3. Klima sistemindeki komponentler ve arıza verileri.....	37
5.2.4. Klima sistemindeki komponentlerin arıza tablosu	38
5.2.5. Klima sisteminin hata ağacı.....	39
5.2.7. Klima sisteminin güvenilirlik değerinin hesaplanması	41

BÖLÜM 6.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER49

KAYNAKLAR51

ÖZGEÇMİŞ55

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

RAMS	:Güvenilirlik Kullanılabilirlik Bakım Yapılabilirlik Güvenlik
MTBF	:Arızalar Arası Ortalama Zaman
A	:Kullanılabilirlik
MTTR	:Onarım İçin Ortalama Zaman
AGREE	:Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment
t	:Zaman
F(t)	:Olasılık dağılım fonksiyonu
f(t), f(y)	:Olasılık yoğunluk fonksiyonu
R(t)	:Güvenilirlik fonksiyonu
r(t)	:Arıza hızı
R_s	:Seri konfigürasyona sahip sistemin güvenilirliği
m	:Sistemdeki birim sayısı
R_i	:i. biriminin güvenilirliği
R_{ps}	:Paralel konfigürasyona sahip sistemin güvenilirliği
$R_{k/m}$:K-m tipi konfigürasyona sahip sistemin güvenilirliği
R_y	:Yedekli Konfigürasyona sahip sistemin güvenilirliği
R_b	:Köprü konfigürasyona sahip sistemin güvenilirliği
FMEA	:Arıza Tipleri ve Etki Analizi
FTA	:Hata ağacı analizi
RBD	:Güvenilirlik blok diyagramı
R_l	:Isıtma sisteminin güvenilirliği
R_s	:Soğutma sisteminin güvenilirliği
R_k	:Kontrolörün güvenilirliği
R_{ks}	:Klima sisteminin güvenilirliği
$R_{kış}$:Klima sisteminin kış mevsimi için güvenilirlik değeri
R_{yaz}	:Klima sisteminin yaz mevsimi için güvenilirlik değeri

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Rams Analizi Bileşenleri Arasındaki İlişki	4
Şekil 2.2.	Kullanılabilirlik Formülü	6
Şekil 2.3.	Bakım Yapılabilirlik Tasarım Süreci	8
Şekil 2.4.	İnsan Hatalarının Sebep Olduğu Kazaların Azaltılması İçin Alınması Gereken Önlemler	10
Şekil 3.1.	Örnek Bir Arıza Dağılımı (Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu)	18
Şekil 3.2.	Banyo Küveti Eğrisi	20
Şekil 3.3.	Seri Konfigürasyon	21
Şekil 3.4.	Paralel Konfigürasyon	21
Şekil 3.5.	Yedek Birim Bekleten Konfigürasyon	22
Şekil 3.6.	Köprü Konfigürasyon	23
Şekil 3.7.	FMEA'nın Adımları	24
Şekil 4.1.	Yaygın Olarak Kullanılan Hata Ağacı Sembolleri	26
Şekil 4.2.	Hata Ağacı Analizi Örneği	28
Şekil 4.3.	Örnek Bir Güvenilirlik Blok Diyagramı	29
Şekil 4.4.	Hata Ağacı ve Güvenilirlik Blok Diyagramı	30
Şekil 4.5.	Hata Ağacı ve Güvenilirlik Blok Diyagramı	30
Şekil 5.1.	Klima Sisteminin Ana Komponentleri	33
Şekil 5.2.	Klima Sistemi Soğutucu Akışkan Devre Diyagramı	35
Şekil 5.3.	Klima Sisteminin Hata Ağacı	39
Şekil 5.4.	Klima Sisteminin Güvenilirlik Blok Diyagramı	40
Şekil 5.5.	Kontrolördeki Yedekli Sistemin Güvenilirlik Blok Diyagramı	44
Şekil 5.6.	Klima Sisteminin Güvenilirlik Blok Diyagramı	45
Şekil 5.7.	Klima Sisteminin Kış Mevsimi İçin Güvenilirlik Blok Diyagramı	46
Şekil 5.8.	Klima Sisteminin Yaz Mevsimi İçin Güvenilirlik Blok Diyagramı	47

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	En Önemli On Ürün Değişkeni	12
Tablo 5.1.	Klima Sistemi Soğutucu Akışkan Devre Diyagramındaki Klima Sistemi Komponentleri	36
Tablo 5.2.	Klima Sistemindeki Komponentlere İlişkin Arıza Sayısı Bilgileri.....	37
Tablo 5.3	Klima Sistemindeki Komponentlere Ait Arıza Tablosu	38
Tablo 5.4.	Klima Sistemindeki Komponentlere Ait Güvenilirlik Değerleri	41
Tablo 5.5.	Isıtma Sistemindeki Komponentlere Ait Güvenilirlik Değerleri	42
Tablo 5.6.	Soğutma Sistemindeki Komponentlere Ait Güvenilirlik Değerleri	43
Tablo 5.7.	Kontrolörün Komponentlerine Ait Güvenilirlik Değerleri	44
Tablo 5.8.	Klima Sistemindeki Alt Sistemlerin Güvenilirlik Değerleri	45

ÖZET

Anahtar Kelimeler: RAMS Analizi, Raylı Taşıtlar, Klima Sistemi, Hata Ağacı Analizi, Güvenilirlik Blok Diyagramı, Güvenilirlik Analizi

Ulaşımında raylı sistemlerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Raylı ulaşım sistemlerinin en önemli dört bileşeni hat altyapısı, enerji besleme sistemleri, sinyalizasyon ve raylı araçlardır (metro araçları, tramvay, LRV, anahat yolcu vagonları, yüksek hız trenleri, elektrikli ve dizel çoklu setler vb.). Raylı sistem yolcu taşıma araçlarını işleten firmalar imalatçılardan yüksek güvenilirliğe sahip araçları, düşük işletim maliyeti, yüksek yolcu konforu, memnuniyeti ve güvenlik için talep etmektedirler. Bundan dolayı araç satın alma teklif dökümanları arasında aracın RAMS analizlerini talep etmektedirler. Bu talep, araç imalatçısından araç ana ekipmanları tedarikçilerine yansımaktadır. Bu çalışmada yolcu vagonlarındaki klima sisteminin RAMS analizinin bileşenlerinden biri olan Güvenilirlik değeri hesaplanmıştır. Bunun için klima sistemini oluşturan ekipmanların arıza hızı verileri kullanılmıştır. Klima sistemindeki ekipmanların arıza sebepleri Güvenilirlik analiz metodlarından Hata Ağacı yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu analiz sonucu elde edilen hata ağacı Güvenilirlik Blok Diyagramına dönüştürülmüştür. Blok diyagramdan da klima sisteminin güvenilirliği elde edilmiştir. Bu veriler aynı zamanda Ürün Yaşam Döngüsü Maliyetinin hesaplanmasına esas teşkil etmektedir.

RELIABILITY ANALYSIS IN RAIL VEHICLES AND AN APPLICATION

SUMMARY

Keywords: RAMS analysis, rail vehicles, HVAC system, Fault Tree Analysis, Reliability Block Diagram, Reliability

The use of rail systems in transportation is increasing day by day. Four basic components of rail transportation systems are line infrastructure, power supply systems, signalization and rail vehicles (underground vehicles, tramway, light rail vehicles, long distance trains, high speed trains, electrical and diesel multiple units etc.). The operators running rail system passenger rolling stocks demand high reliable products from manufacturers for low management cost, high passenger comfort and pleasure. For this reason, they demand RAMS analysis among vehicle tender offer documents. This demand reflects from vehicle manufacturer to the supplier of main equipments of vehicle. In the current study, reliability value which is a component of RAMS analysis of HVAC system in passenger rolling stocks was calculated. Hence, failure rate data of equipments organizing HVAC system was used. The failure reasons of equipments in HVAC system were analyzed by Fault Tree Analysis. The Fault Tree obtained after this analysis was converted into Reliability Block Diagram. Also, HVAC system reliability was obtained from Block Diagram. Besides, these data constitute the basis in calculating Product Life Cycle Cost.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde ulaşım, insanların en önemli sorunu hâline gelmiştir. Özellikle büyük kentlerde yaşayan insanlar her gün bu sorunla daha fazla karşılaşmaktadırlar. Hızlı kentleşme, yoğun nüfus artışı, hava kirliliği ve enerji sıkıntısı gibi büyük sorunlar, ulaşımında raylı sisteme geçişi zorunlu hâle getirmiştir.

Raylı sistem taşımacılığı, yatırım maliyetleri yüksek olmakla birlikte, işletme maliyetleri karayolu taşımacılığına göre daha düşüktür. Ayrıca kaza riskleri, enerji tüketimi, trafik sıkışıklığı ve personel istihdamı kara yolu taşımacılığına göre daha azdır. Bununla birlikte raylı sistem taşıma kapasitesi, karayolu taşımacılığına göre çok daha yüksektir. Bütün bu şartlar günümüzde raylı taşımacılığın yaygınlaşmasını hızlandırmıştır [1].

Gelişmiş ülkelerin büyük kentlerinde, XIX. yüzyılın sonlarından başlayan raylı sistem ağlarının genişletilme çabaları, günümüzde de sürmektedir. Bu çabalar, 1973-1974 yıllarındaki enerji bunalımı ve 1990 yıllarında sonra çevreye olan duyarlılığın artması nedeniyle hızlanmıştır.

1970'li yıllarda, gelişmiş ülkelerde, nüfusu 300.000'in altında hatta 100.000 dolayında olan kentlerde bile (Almanya'da Ulm, Würzburg, Mainz) raylı sistem uygulaması yapılmıştır [2].

Türkiye'de şehir içi raylı sistem 116 yıl önce başlamıştır. 1955 yılına gelindiğinde İstanbul'daki raylı sistemin toplam uzunluğu 130 km'ye ulaşmış fakat daha sonra politik sebeplerle tüm raylı sistem sökülerek, kara yolu taşımacılığına geçilmiştir.

Halen İstanbul'da 32 km hafif raylı, 75 km TCDD banliyö ve 8 km Taksim Metrosu olmak üzere toplam 115 km'lik şehir içi raylı yolcu taşıma sistemi vardır. İzmir'de 10 km, Ankara'da 24 km, Konya'da 18 km, Bursa'da 18 km ve Eskişehir 15 km aktif

raylı sistem mevcut olup, Ankara, İstanbul, Kayseri ve Adana’da yeni hat çalışmaları devam etmektedir [1].

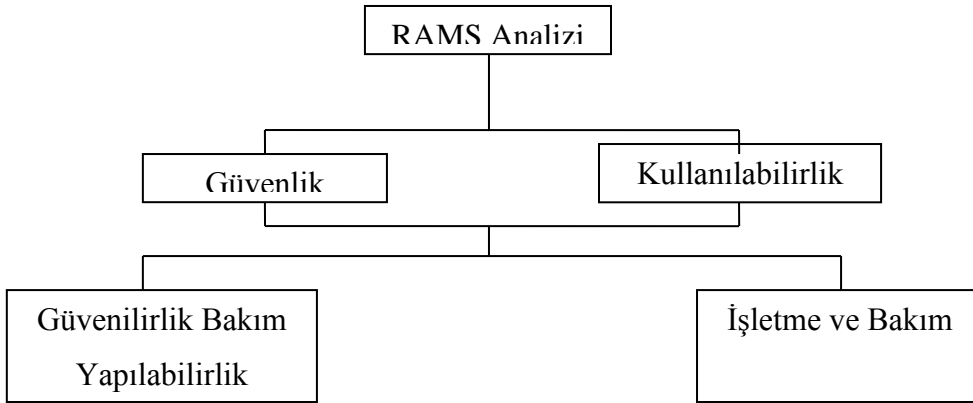
Ulaşımında Raylı sistem araçları kullanımının artması, yolcu konforu açısından bazı standartlar belirlenmesi gerekliliği doğurmuştur. Raylı sistem yolcu taşıma araçlarını işleten firmalar imalatçılardan yüksek güvenilirliğe sahip ürünleri, düşük işletim maliyeti, yüksek yolcu konforu ve memnuniyeti için talep etmektedirler. Bundan dolayı araç satın alma teklif dökümanları arasında aracın RAMS analizlerini talep etmektedirler. Bu talep, araç imalatçısından araç ana ekipmanları tedarikçilerine yansımaktadır.

Bu tez çalışmasında, ilk olarak RAMS analiziyle ilgili genel bilgi verilmiş ve RAMS analizinin bileşenleri açıklanmıştır. Bir sonraki konu olarak Güvenilirlik kavramı ele alınmıştır. Bu konuda güvenilirlikle ilgili temel tanımlar, formüller ve güvenilirlik konfigürasyonları hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Güvenilirlik hesabının yapılmasında kullanılan Hata Ağacı Analizi ve Güvenilirlik Blok Diyagramı bir sonraki konu başlığını oluşturmaktadır. Bu konuda Hata Ağacı Analizinde kullanılan kapılar(gate) ve Hata Ağacının Güvenilirlik Blok Diyagramına nasıl dönüştürüldüğüyle ilgili bilgi verilmiştir. Çalışmanın beşinci konusu olan Raylı Sistem Yolcu Taşıma Araçlarında Klima Sistemi Güvenilirlik Hesaplaması konusunda Raylı Sistem araçlarıyla ilgili genel bilgi ve yolcu vagonlarında kullanılan klima sistemiyle ilgili bilgi verilmiştir. Ayrıca tez çalışması kapsamında yapılan uygulamanın adımları anlatılmıştır. Son konu olan Sonuç kısmında ise elde edilen güvenilirlik değerinin yorumu ve kullanılabileceği alanlardan bahsedilmiştir.

BÖLÜM 2. RAMS ANALİZİ

2.1. RAMS Analiziyle İlgili Genel Bilgi

Raylı sistem taşımacılığı, zaman ve kaynak ihtiyacı yüksek olan bir yatırımdır. Bu yatırımların orta vadede kendisini amorti etmesi pek de mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla bu yatırımlarda kaynak yönetiminin proje safhasından başlayarak iyi yapılması maliyetlerin minimum düzeyde tutulması açısından önemlidir. RAMS analizi, bu anlamda, maliyetlerin kontrolü açısından ciddi avantajlar sağlamaktadır.



Şekil 2.1. Rams Analizi Bileşenleri Arasındaki İlişki [3]

RAMS İngilizce Reliability (Güvenilirlik), Availability (Kullanılabilirlik), Maintainability (Bakım Yapılabilirlik) ve Safety (Güvenlik) kelimelerinin baş harflerinden oluşur. TS EN 50126 Demiryolu RAMS standardına göre; RAMS, bir sistemin ömrü boyunca oluşturulan mühendislik kavramları, metotları, vasıtaları ve tekniklerinin uygulanmasıyla sağlanan, uzun vadeli işletilmesine ait bir karakteristiğidir. Başka bir tanım olarak RAMS analizi, bir ürünün ömür çevrimi boyunca belirlenmiş işlevselliğini tahmin etmeyi amaçlayan bir yönetim ve mühendislik disiplindir. Bir sistemin RAMS'ı sistem veya sistemi oluşturan alt sistemler veya bileşenlerin, belirtildiği şekilde görev yapması ve hem kullanılabilir

hem de güvenli olması için güvenilirlik derecesinin bir nicel ve nitel göstergesi olarak karakterize edilebilir. Bir demiryolu sisteminin amacı belirli bir zamanda demiryolu trafiği için belirlenen bir seviyeyi güvenli bir şekilde başarmaktır. RAMS analizi bu amacın başarılmasındaki güven derecesini tarif eder [3].

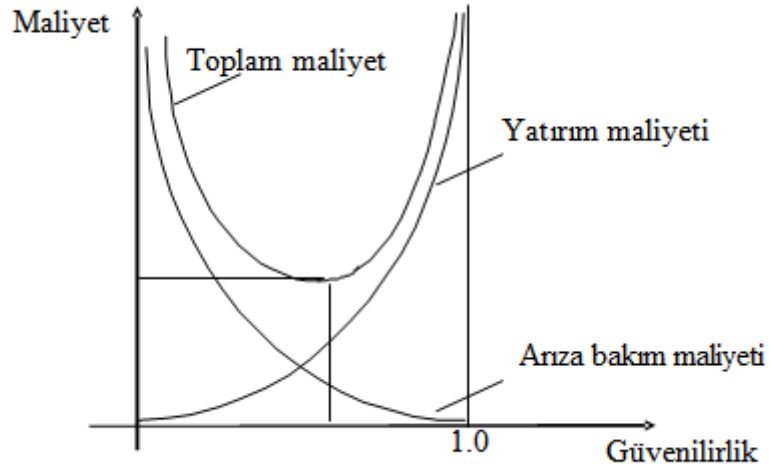
2.2. Güvenilirlik (Reliability)

Çağlar boyunca insanlık her alanda güvenilirlik ve süreklilik arayışı içinde olmuştur. Güvenilirlik, pek çok alanda bu derece önemli bir kavram olmasına karşın, ölçülmesi çok zor olan bir büyüklüktür. Örneğin güvenilir bir kişi ile güvenilir olmayan bir kişi arasındaki ayrım 3 ile 4 arasındaki fark kadar kesinlik taşımaz. Ancak bağıl bir fark söz konusudur.

Sosyal yaşamda güvenilirlik bir işlevin yerine getirilmesinin ölçüsü olarak tanımlanabilir. Örneğin, sürekli olarak doğruyu söyleyen bir kişi doğru konuşma açısından, sürekli işini zamanında bitiren bir kişi iş zamanlaması bakımından vb. güvenilir kişiler olarak adlandırılırlar. Yalnız bu nitelendirme mutlak bir kesinlik belirtmez. Öyle ki, doğru konuşma bakımından güvenilir bir kişi olmak, her zaman doğru konuşulacağına garantisini vermez. Sadece o kişinin doğru konuşma olasılığının göreceli olarak yüksek olduğunu belirtir. Dolayısıyla bu alanda güvenilirlik, bir işlevin yerine getirilmesinin kalitesi (olasılığı) olarak da tanımlanabilir.

Güvenilirliği mühendislik bazında ele alacak olursak; modern toplumumuzda mühendislerin sorumluluğunda olan muhtelif ürünlerin veya sistemlerin planlanması, üretimi ve işletimi konularını içeren bir tanımlama yapmamız gerekir [4]. Güvenilirlik, bir parçanın verilen bir zaman aralığı içerisinde problem çıkarmadan kendinden beklenen fonksiyonları yerine getirebilme performansıdır [3]. Ürünlerden ve sistemlerden yararlanan kullanıcılar öncelikle bunların güvenilir olmasını isterler. Bu anlamda güvenilirliği bir karşılaştırma kavramı olarak kullanırlar. Dolayısıyla lojik olarak güvenilir veya güvenilirmez nitelendirmeleri büyük bir anlam taşımaz. Önemli olan "ne derece güvenilir?" sorusunun yanıtıdır. Böyle bir sorunun yanıtı ise (güvenilirliğin derecesi) 0.0 ile 1.0 (veya % 0 ile %100) arasındaki gerçel sayılarla verilir.

Bir mühendis açısından "ne derece güvenilir" sorusunun yanıtı kadar güvenilirlik ve ekonomi arasındaki ilişki de büyük önem taşır. Yüksek güvenilirliğin daha fazla harcamayı gerektirdiği gerçeğinden hareketle, uygulamada maksimum güvenilirlik değil yeterli güvenilirlik hedeflenir. Yeterliliğin ölçüsü ise uygulama alanına bağlıdır. Aşağıdaki şekil güvenilirlik ve maliyet ilişkisini göstermektedir [4]:



Şekil 2.2. Toplam Maliyet Ve Güvenilirlik [4]

2.3. Kullanılabilirlik (Availability)

Bir sistemin veya ürünün gerekli dış kaynakların sağlandığı varsayımıyla, verilen bir zamanda veya verilen bir zaman aralığı boyunca belirlenen şartlar altında gerekli bir fonksiyonu yapacak bir durumda olma kabiliyetidir [5].

Güvenilirlik gibi Kullanılabilirlik de bir olasılıktır. Kullanılabilirlik hem güvenilirlikle hem de bakım yapılabilirlikle ilişkilidir. Sistem kullanılabilirliğini tahmin etmek için hem arızalar hem de onarım süresi göz önünde bulundurulmalıdır. Bir sistem ya da komponent için kullanılabilirliği aşağıdaki formülle ifade edebiliriz:

$$\text{Kullanılabilirlik} = \frac{\text{Çalışır Zaman}}{(\text{Çalışır Zaman} + \text{Çalışır Olmayan Zaman})}$$

Bu formüldeki Çalışır ve Çalışır Olmayan Zamanı aşağıdaki iki değeri bulduğumuzda elde etmiş oluruz:

- MTBF: Mean Time Between Failure (Arızalar Arası Ortalama Zaman)
- MTTR: Mean Time To Repair (Ortalama Onarım Zamanı)

Bu iki değeri formülde yerine koyduğumuzda formül aşağıdaki şekle dönüşür:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (2.1)$$

Kullanılabilirlik değerinin yüksek olması istenir. Bu değer ne kadar yüksek olursa arıza onarımı için ve rutin önleyici bakımlar için harcanan zaman o kadar az olur. Bundan dolayı güvenilirlik ve bakım yapılabilirlik kullanılabilirliği ve dolayısıyla maliyeti etkiler [6].

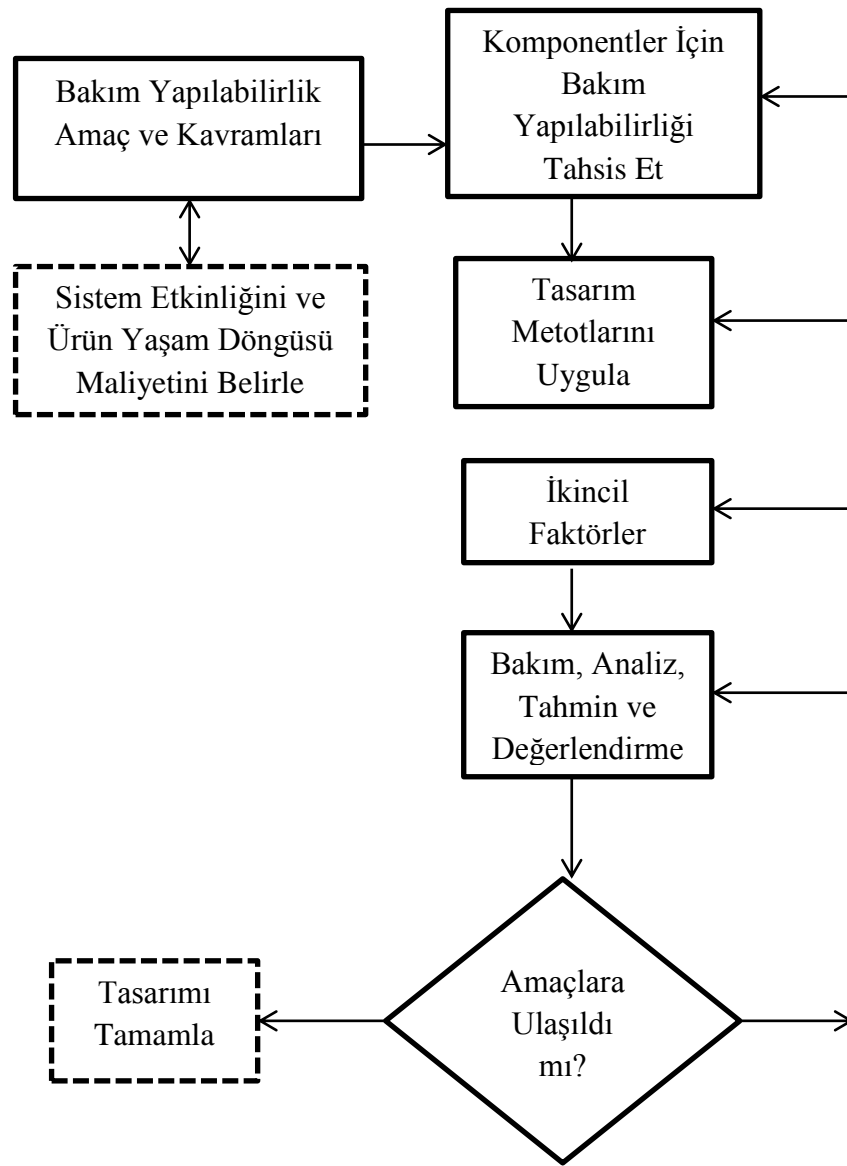
2.4. Bakım Yapılabilirlik (Maintainability)

Bir sistemin veya ürünün belirli bakım şartları altında, belirli prosedürler ve kaynaklar kullanılarak, verilen bir zamanda veya verilen bir zaman aralığı boyunca bakım yapılabilmeye müsait olabilme yetisidir [3].

Bakım yapılabilirlik için güvenilirliğe göre genellikle daha az çaba ve kaynak sarf edilir. Nitekim ürün yaşam döngüsü maliyetinde güvenilirliğin geliştirilmesinin maliyeti azaltmada etkili olması, bunun bir göstergesi olabilir. Ancak uygulamadaki bazı sınırlamalardan dolayı yalnızca güvenilirliğin değil bakım yapılabilirliğin de geliştirilmesi maliyetin azaltılmasına ve kullanılabilirliğin artmasına olumlu etki yapacaktır.

Bakım yapılabilirlik bir sistemin veya parçanın tasarım aşamasında göz önünde bulundurulmalıdır. Sistem tasarlanırken kolay bakım yapılmasına olanak sağlayacak bir tasarım belirlenmelidir. Aşağıdaki şekil bakım yapılabilirliğin tasarım sürecini göstermektedir. Süreç bakım yapılabilirliğin amaçlarının tanımlanmasıyla başlar. Bu

amaçların belirlenmesi güvenilirlik spesifikasyonlarıyla çakışır. Bakım yapılabilirlikle ilgili istenen parametre değerlerine ulaşmada hatalardan arındırma, parça standardizasyonu, modülerizasyon gibi bakım yapılabilirlik tasarım metotları kullanılır. Yedek parça desteğinin seviyesi ve onarımın kalitesi ve miktarıyla ilgili olan ikincil faktörler de analizde yer almaktadır. Bakım yapılabilirlikle ilgili olarak istenen başarıya ulaşip ulaşılmadığı değerlendirildiğinde, eğer gerekli amaçlar karşılanamamışsa ek bir tasarım faaliyeti gerekebilir. Bu durumda güvenilirlikle ilgili belirlenen hedeflerin de revize edilmesi gerekebilir [6].



Şekil 2.3. Bakım Yapılabilirlik Tasarım Süreci

2.5. Güvenlik (Safety)

Güvenlik, bir sistemin veya parçanın belirli şartlar altında, verilen bir zamanda veya verilen bir zaman aralığı boyunca, şartları önceden tanımlanmış kabul edilemez bir zarar riski ortaya çıkması durumunda, gerekli emniyet fonksiyonlarını yerine getirerek güvenli bir konuma dönebilme kabiliyetidir [3].

Güvenlik, tehlikenin olmadığı ya da tehlikelere karşı koruma olduğu bir durumda söz konusudur. İstenen bakım yapılabilirlik seviyesine ulaşmak için sistem ya da komponent tasarımı yaparken göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktörlerden biri de güvenlidir. Tehlikelerin ve kazaların çoğu güvenlik özelliklerine ve insan faktörüne yeteri kadar dikkat edilmeden ya da dikkatsizce yapılmış tasarımdan kaynaklanmaktadır. Bu zorluklarla başa çıkmanın anahtar yolu ekipmanı, bakım personelini ve çalışanı korumayı sağlayacak güvenlik özelliklerinin tasarlanmasıdır.

Bir sistem ya da ekipmanda işlem yapan çalışanın da bakım yapan çalışanın da güvenliğinin sağlanması son derece önemlidir. Dolayısıyla güvenlik kavramı sistem ya da ekipmanın tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır. Tasarım aşamasında uygun insan davranışlarını bilmek daha güvenli ve bakım yapılabilirliği yüksek bir tasarım yapılmasını kolaylaştıracaktır. Aşağıda yaralanmalara sebep olan bazı tipik insan davranışları listelenmiştir:

- İnsanlar özellikle aşına oldukları mekanlarda elleriyle ve ayaklarıyla nereye temas ettiklerinin farkında değildirler.
- İnsanlar genellikle arızalı olduğunu bildikleri ekipmanı kullanmaya devam ederler.
- İnsanlar genellikle istenmeyen olayların gerçekleşme olasılığının çok düşük olduğunu düşünürler.

Tasarım sürecinde düşünülmesi gereken birçok güvenlik konusu vardır. Aşağıdaki şekil insan hatalarının sebep olduğu kazaların azaltılması için alınması gereken önlemleri göstermektedir [7]:



Şekil 2.4. İnsan Hatalarının Sebep Olduğu Kazaların Azaltılması İçin Alınması Gereken Önlemler

BÖLÜM 3. GÜVENİLİRLİK (RELIABILITY)

3.1. Genel Bilgi ve Tarihçe

Günümüzde, güvenilir ve iyi kalitede ürün ve servisler geliştirmek için dünya genelinde milyonlarca dolar harcanıyor. Küresel rekabet ve diğer faktörler imalatçıları yüksek güvenilirliğe sahip ve iyi kalitede ürün ve servis üretmeye zorluyor [8].

Her ne kadar yüksek güvenilirliğe sahip ürün ve servis üretilmeye çalışılsa da arıza olayının gerçekleşmesi kaçınılmazdır. Eski Sovyetler Birliğindeki Çernobil nükleer santrali kazası ve ABD nin uzay çalışmalarında rol alan Challenger adlı uzay mekiğinin infilak etmesi iki büyük arıza örneği olarak gösterilebilir. Bu arızaların etkisi maliyet artışı, insan yaralanması, belirgin bir ekonomik kayıp ve hatta ölüm bile olabilir. Arızaların sebepleri ise kötü mühendislik tasarımı, hatalı yapı veya hatalı imalat süreci, insan hatası, yetersiz bakım, yetersiz test ve kontrol, uygun olmayan kullanım ve büyük çevresel strese karşı koruma eksikliğidir [6].

Güvenilirlik, robot, sağlık, elektrik elektronik, internet, tekstil, gıda ve yazılım gibi birçok birçok alanda yer almaktadır [8]. Yaşamımız arabaların, trenlerin ve uçakların güvenilirliğine bağlıdır. Geçim kaynağımız, enerji üretiminin, telefonların, bilgisayarların güvenilirliğine bağlıdır. Sağlığımız ise kirlilik kontrol sistemlerinin, klima sistemlerinin ve acil müdahale sistemlerinin güvenilirliğine bağlıdır [9].

Güvenilirlikle ilgili yapılan mühendislik çalışmaları, sistemlerdeki arızaları ve onarımları araştırarak ve analiz ederek arıza olasılığını ve güvenlik risklerini azaltmayı ve böylece sistemin ömrü içerisindeki kullanılabilir zamanını artırmayı hedeflemektedir. Nitekim bu, bir sistem veya ürünün kullanıcıyı tatmin etmesi beklenen özelliklerinden biridir. Aşağıdaki tablo bir ürünün gereksinimleri

karşılması açısından yüksek değere sahip olmasına etki eden faktörleri göstermektedir:

Tablo 3.1. En Önemli On Ürün Değişkeni

DEĞİŞKEN	ORTALAMA PUAN
Performans	9,5
Uzun süre dayanma (Güvenilirlik)	9,0
Servis	8,9
Kolay onarılma (Bakım yapılabilirlik)	8,8
Garanti	8,4
Kullanım kolaylığı	8,3
Görünüm	7,7
Marka adı	6,3
Paketleme (Ambalaj görünümü)	5,8
En son model olma	5,4

Güvenilirlik, mühendislik disiplinleri arasında diğerlerine oranla yeni bir konudur. Sistemlerin karmaşıklığı, kamunun kaliteli ürün alma konusundaki bilinci, ürünün güvenilirlik açısından belirli özellikleri karşılama zorunlu kılacak yasa ve düzenlemeler, ürün veya sistemin garantisi, onarımı ve arızaların sebep olduğu yüksek maliyetten kaynaklanan kar endişesi gibi faktörler, güvenilirliğin zamanla olgunlaşmış bir mühendislik disiplini olmasını sağlayacaktır [6].

Güvenilirlikle ilgili literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında:

ATAMER Ş. ÇAVDAR. K., tek kademeli düz silindirik dişli çark mekanizmasının tasarım aşamasında verilere dayalı güvenilirlik analizi çalışması yapmıştır. Mekanizmanın güvenilirlik yapısını ortaya çıkarmak için basitleştirilmiş FMEA ve blok diyagram şemaları kullanılmıştır. Sistem elemanları için tecrübeye dayalı parametre aralıklarına sadık kalınarak rastgele hasar verisi üretilmiş ve bu verilerin işlenmesinde maksimum benzerlik yöntemi ile yerleşik Matlab komutu “wblfit” kullanılmıştır [10].

VOLKANOVSKI. A., CEPIN. M., ve MAVKO. B., Hata Ağacı Analizini kullanarak elektrik güç sistemlerinin güvenilirlik analizi için yeni bir yöntem geliştirmiştir. Belirli elektrik üretim noktalarındaki elektrik iletimindeki kesintilerle ilgili bir hata

ağacı oluşturulmuştur. Bu hata ağacının nicel analizi, bu sistemdeki önemli parçaların belirlenmesini sağlamıştır. Bu yeni yöntemin uygulanmasını sağlayan algoritma IEEE test sistemine uygulanmıştır. Böylelikle elektrik güç sisteminin güvenilirliğine katkı sağlayan ana bileşenler belirlenmiştir [11].

SHALEV. D. M., TIRAN. J., Condition-based fault tree analysis (CBFTA) adında, güncel arıza hızlarını belirleyip güvenilirlik değerini güncelleyen yeni bir hata ağacı yöntemi geliştirmiştir. Bu metod, hem tasarım aşamasında hem de sistemin ömrü boyunca sistemin güvenilirlik değerinin güncel kalmasını sağlamıştır [12].

ARWASHAN. N., matris cebire ve formülasyona dayanan ve giriş köprülerin güvenilirliğinin hesaplanmasında kullanılan bir sistem geliştirmiştir. Bu teknik, yüksek hesap doğruluğu ve etkin hesaplama sağlamıştır [13].

ERMOLIN. Y. A., arıza hızının mevsimsel olarak değiştiği durumlarda güvenilirlik değerinin hesaplanmasını sağlayacak bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem, durağan olmayan arıza hızlarının sabit bir değer almasını sağlayan formülasyona sahiptir. Böylelikle bu yöntem değişken arıza hızlarının mevcut olduğu durumlarda yaklaşık bir sistem güvenilirliği değeri elde edilmesini sağlamıştır [14].

DEVOOGHT. J., TOMBUYSES. B., Markov güvenilirlik ve kullanılabilirlik probleminin çözümünü basitleştirmede kümeleme yöntemini kullanmıştır. Tam kümeleme sadece istisna durumlarda mümkün olduğu için 2 duruma sahip markov modellerinde yaklaşık bir kümeleme gerçekleştirilmiştir [15].

Güvenilirlik ve risk birbirleriyle yakından ilişkili olan kavramlardır. Zayıf güvenilirliğin getirdiği riskler hem üreticiler hem de tüketiciler açısından önemlidir. Üreticiyle ilgili olan riskleri şu şekilde sıralayabiliriz:

- Rekabet: Ürün güvenilirliği, tüketiciler tarafından algılanan kalitenin önemli bir bileşenidir. Düşük güvenilirliğe sahip ürünler müşteriler tarafından fazla ilgi görmez ve sonunda yok olur.

- Müşteri Gereksinimleri: ABD hükümeti 1950’li yıllarda yaptığı çalışmalar sonucunda silah sistemlerinin belirli bir güvenilirliği karşılama istedi. Çünkü bu sistemlerin bakım maliyetleri oldukça fazlaydı. Günümüzde de müşteriler tarafından belirlenen güvenilirlik gereksinimleri üreticinin bu gereksinimi göz önünde bulundurarak ürün üretmesini sağlamaktadır.
- Garanti ve Servis Maliyetleri: Ürünler güvenilir olmadığı zaman garantiler imalatçılar için önemli bir yükür. Amerikan otomobil firmaları satışları artırmak için tüketicilerine daha uzun garanti süresi sağladı. Bunun en belirgin örneği Chrysler’in 7yıl yada 7000mil garanti vermesidir. Ancak bu uzun garanti süresi politikasının gerekli güvenilirlik sağlanarak sunulduğıyla ilgili bir kanıt yoktu. Sonuç olarak bu politika otomobil firmaları için çok maliyetli oldu.
- Sorumluluk(Liability) Maliyetleri: Siyasetçi ve aynı zamanda tüketici hakları savunucusu olan Ralph Nader’in çabalarıyla ABD kongresi yanlış tasarım yada imalatdan kaynaklanan ürün arıza ve performans kayıplarının sonuçlarından imalatçıların sorumlu olmasını sağlayan bir yasayı kanunlaştırdı. Böylece tüketicilerin zayıf güvenilirlik sebebiyle uğradıkları kayıp üreticiye yansıtılmış oldu.

Tüketicikle ilgili olan riskler ise şunlardır:

- Güvenlik: Ekipman, sistem veya ürün arızaları insan ölümleriyle sonuçlanabilir. Her yıl birçok insan trafik kazalarında hayatını kaybediyor. Birçok uçak düşmesi ekipman arızalarından kaynaklanıyor. Nükleer tesislerdeki arızalar birçok kişiyi olumsuz etkiliyor. Bunlardan dolayı tüketiciyle ilgili en büyük risk güvenliktir.
- Uygunsuzluk: Çoğu arıza ölümle sonuçlanmamasına rağmen gecikmelere ve beklenmeyen durumlara sebep olabilir. Örneğin havaalanlarındaki gecikmeler sık karşılaşılan bir durumdur ve bunun sebebi uçağın kalkışında rol oynayan bazı ekipman veya ekipmanların düzgün çalışmamasıdır. İletişim, bilgisayar

ve güç sistemlerindeki arızalar da iş hayatında ve günlük hayatta bazı aksaklıklara yol açar.

- Maliyet: Düşük güvenilirlik ekstra maliyete sebebiyet verir. Bu sebeple tüketiciler daha yüksek güvenilirliğe sahip ürünler için fazla ücret ödemeye gönüllüdürler. Japonya bu konuya bir hayli önem vermekte ve rakiplerinden daha güvenilir ürünler üreterek Pazar payını artırmayı hedeflemektedir [9].

İnsanoğlunun ilk aleti yapmasıyla birlikte kafasında "sağlamlık" ve "güvenilirlik" kavramları oluşmaya başlamıştır. Yüzyıllar boyunca her alanda "süreklilik" ve "güvenilirlik" arayışı içinde olan insanlık, 2. dünya savaşına dek, daha güvenli ve daha güvenilir üretimlerini ancak arızalar ve kazalarla kazandığı deneyimler temelinde nitel (kalitatif) olarak geliştirebilmiştir [4].

Almanya 2. Dünya Savaşında V1 ve V2 tip füzelerinin güvenilirliğini geliştirmek amacıyla temel güvenilirlik kavramlarını kullanmıştır [8]. 2. Dünya Savaşı nedeniyle, 1940'lı yıllarda ortaya çıkan füze, savaş uçağı vb. ürünlerle birlikte ilk ciddi nicel (kantitatif) güvenilirlik çalışmaları da gündeme gelmeye başlamıştır. Von Braun ve ekibi, füzelerin güvenilirliği konusundaki çalışmalarının ilk sonucunu, "Bir zincir, en zayıf halkasından daha kuvvetli olamaz" şeklinde ortaya koymuşlardır. Sistem ve bileşenleri arasındaki ilişkiyi belirten bu yargıdan hareketle öncelikle füzenin en zayıf bileşenini (noktasını) güçlendirmeye yönelik ekip, zamanla bu yöntemin istenilen güvenilirlik için yetersiz olduğunu görmüş ve tüm bileşenlerin belirli bir seviyeye getirilmesi gerektiğini saptamıştır. Aynı yıllarda General Motors, ABD' de yapılan çalışmalarla, lokomotiflerde kullanılan motorların faydalı ömrü 250.000 mil' den 1.000.000 mil değerine çıkarılmıştır. Diğer taraftan askeri uçak motorları ise 100.000 saatlik uçuşta birden fazla arıza vermeyecek şekilde tasarlanmıştır ki bu değer ilk ciddi güvenilirlik ölçütü olarak kabul edilmektedir [4].

ABD Savunma Bakanlığı askeri sistem ve komponentlerin güvenilirliğiyle ilgili ciddi problem yaşadıkten sonra 1945-1950 yılları arasında güvenilirlikle ilgili çalışmaları hızlandırdı. Bu çalışmalar sayesinde şu sonuçlara varıldı:

- Ordunun elektronik aygıtlarının sadece üçte biri düzgün olarak çalışmaktaydı.
- Elektronik ekipmanlar toplam zamanın %30'unda kullanılabilir durumdaydı.
- Askeri sistemlerin yıllık bakım maliyeti, satın alım maliyetlerinden 10 kat daha fazlaydı.

ABD Savunma Bakanlığı bu sonuçlara dayanarak 1950'de bir güvenilirlik komitesi kurdu. Bu komite 1952'de Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment (AGREE) adını alarak kalıcı bir gruba dönüştü [8]. Bu grup yaptığı ilk araştırmalarla, maliyeti 1 \$ olan bir elektronik ürünün, çalışabilmesinin sürekliliği için yılda ortalama 2 \$'lık bir bakım harcaması gerektirdiğini ortaya çıkardı. Bu önemli çelişki sonrası daha pahalı fakat daha az bakım gerektiren ürünlerin tasarımı fikri gelişmiş ve böylece güvenilirlik olgusu tasarımın bir parçası olarak düşünölmeye başlandı. Aynı yıllarda Fransa' da haberleşme alanında ilk ciddi güvenilirlik çalışmaları gündeme geldi [4]. 1954'de ABD'de ilk Uluslararası Güvenilirlik ve Kalite Kontrol Sempozyumu düzenlendi. 1956'da ise ilk ticari güvenilirlik kitabı yayınlandı. AGREE grubu 1957'de askeri elektronik ekipmanların güvenilirliğiyle ilgili spesifikasyonları açıklayan ilk raporunu yayınladı. Güvenilirlikle ilgili ilk yüksek lisans programı ise 1962'de ABD'de açıldı [8].

1960'lı yıllardaki çalışmalar, sistem güvenilirlik analizleri için yeni yöntemlerin geliştirilmesi doğrultusunda yoğunlaşmıştır. Bileşenlerde meydana gelen arızaların sisteme ve sonucunda çevreye olan yansıması araştırılmıştır. Havacılık ve uzay araştırmaları alanlarındaki çalışmalar nükleer silahlar, füzeler, haberleşme sistemleri, nükleer santraller ve elektrik enerji sistemleri alanlarında devam etmiş ve bu alanlarda ilk standartlar oluşturulmuştur.

1970'li yıllarda geliştirilen yöntemler nükleer güç santrallerine uyarlanmış; üretilen bir dizi arıza senaryolarının olası sonuçları irdelenmiştir. Bu sırada oluşan "3 mil adası kazası" sonrasında tüm çalışmaların yeniden gözden geçirilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Aynı yıllarda başta petrol, kimya, otomotiv ve demiryolu taşımacılığı olmak üzere büyüklü küçüklü çeşitli endüstriyel kuruluşlarda güvenilirlik analizleri

yapılmaya başlanmış ve yeni standartların oluşturulması yolunda ciddi adımlar atılmıştır. Diğer taraftan, yürütülen analizlerde kullanılacak bilgilerin önemi kavranmaya başlanmış ve istatistiki bilgi kayıtları gündeme gelmiştir. 1980'li yıllarda başlayan ve bugün hala gündemdeki yerini koruyan iki yeni çalışma alanı ise yarıiletken elektroniği ve yazılım güvenilirliğidir [4].

3.2. Güvenilirlik Tanımları

Elektrik ve Elektronik mühendisleri enstitüsü güvenilirliği “ Bir sistem ya da komponentin belirli bir zaman periyodunda, belirli koşullar altında işlevlerini yerine getirebilme yeteneği ” olarak tanımlamaktadır. Bu tanımlamada dört unsur yer almaktadır:

- Yetenek: Sayısal olarak olasılık ile ifade edilir. Bir sistem ya da komponentin düzgün bir şekilde çalışma ihtimalini ifade eder. 0-1 arasındaki ondalık sayılarla veya yüzde olarak ifade edilir.
- İşlev: Arızasız çalışarak gerçekleştirilen işlemleri ifade eder.
- Belirli Zaman Periyodu: Hiçbir şey daima yeterli bir şekilde gerçekleşmez. Bundan dolayı istenen işlev için bir zaman periyodu belirlenmelidir.
- Belirli Koşullar: Bir sistem ya da komponent bazı koşullar altında istenilen işlevleri yeterli bir şekilde yerine getirirken başka koşullar altında yetersiz bir şekilde çalışabilir. Örneğin ortam sıcaklığına göre ayarlanmış bir parça daha yüksek veya daha düşük sıcaklıklarda işlevlerini yeterli bir şekilde yerine getiremeyebilir. Belirli koşullar kavramı, sıcaklık, basınç, nem, sarsıntı, titreşim vb. etkenleri içerir [16].

Güvenilirlikle ilgili diğer tanımları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Güvenilirlik, bir ürünün belirli bir kullanım periyodunda istenilen işlevleri müşteri beklentilerini karşılayacak şekilde yerine getirme olasılığıdır [17].

- Güvenilirlik, bir sistem veya komponentin olasılıkla ifade edilen bir özelliğidir. Bu özellik, bir sistem veya komponentin belirli bir zaman periyodunda gerekli işlevleri yerine getirebilme olasılığını ifade eder [18].
- Güvenilirlik, bir ürünün kendinden beklenen uygulamaları belirli bir zaman periyodunda yeterli bir şekilde gerçekleştirme olasılığıdır [19].
- Güvenilirlik, bir komponent, aygıt, ekipman veya sistemin belirli koşullar altında, belirli bir zaman periyodu için kendinden beklenen işlevleri gerçekleştirme olasılığı olarak ifade edilebilir [20].
- Güvenilirlik, kalitenin zamana bağlı fonksiyonudur. Bu tanım, güvenilirliğin kaliteyle olan yakın ilişkisine vurgu yapar. Güvenilirlik, II. Dünya savaşı sonrası 1950’li yıllarda uzay ve elektronik endüstrilerindeki gelişmelere paralel olarak İstatistiksel Kalite Kontrolünden ayrılarak yeni bir çalışma alanı oldu. İstatistiksel Kalite Kontrol, imal edilen ürünlerin spesifikasyonlara uygunluğundan emin olmak için yürütülen bir izleme prosesidir. Rassal değişkenlerin oranı hataların sayısıdır ve uygunluktaki değişimin derecesidir. Güvenilirlik ise ürünün çalışma sürecindeki performansdır. Rassal değişkenlerin oranı arızalar arasında geçen sürenin miktarıyla ilgilidir [9].

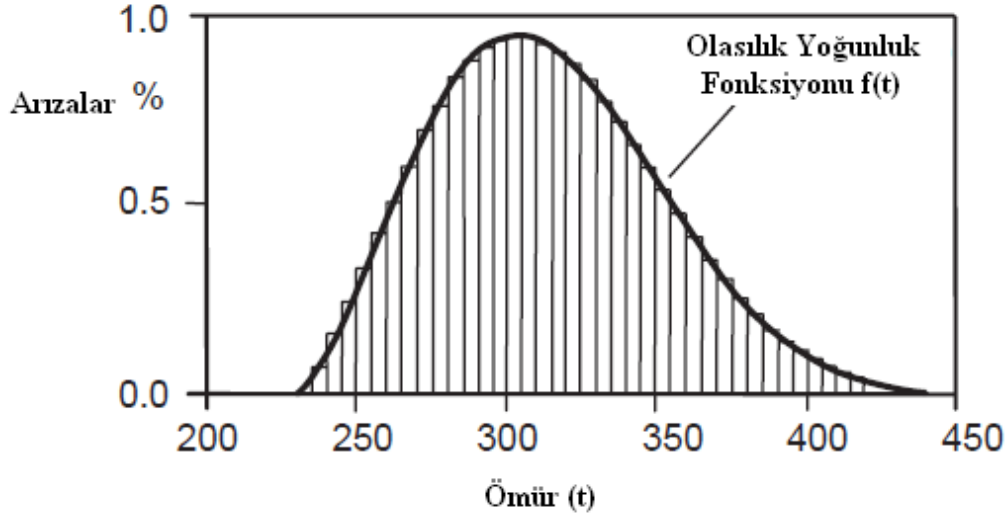
3.3. Güvenilirlikle İlgili Temel Formüller

Güvenilirlik hesabı yaparken bilinmesi gereken bir matematik altyapısı vardır. Güvenilirlik hesabıyla ilgili temel kavramlar ve bu kavramlara ilişkin matematiksel bilgiler bu başlığın alt başlıklarını oluşturmaktadır.

3.3.1. Arıza dağılımı

Arıza dağılımı, zamanla meydana gelen arızaların olasılığını tarif eden bir matematiksel modeldir [21]. Olasılık yoğunluk fonksiyonu olarak da bilinen bu kavram, arızaların sayısını zamanın bir fonksiyonu olarak ifade eder [22]. Bu fonksiyon, güvenilirlik fonksiyonu, arıza hızı, ortalama ömür gibi güvenilirlikle ilgili

önemli fonksiyonlar için temel teşkil etmektedir [21]. Aşağıda örnek bir arıza dağılımı görülmektedir.



Şekil 3.1. Örnek Bir Arıza Dağılımı (Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu) [22]

Olasılık yoğunluk fonksiyonuna ait formüller ise şu şekildedir:

$$\frac{dF(t)}{dt} = \frac{d\left[\int_0^t f(y)dy\right]}{dt} = f(t) \quad f(t) \geq 0 \quad \int_0^{\infty} f(t)dt = 1 \quad (3.1)$$

Bu formüldeki “t” zaman, “f(t)” olasılık yoğunluk fonksiyonu, “F(t)” ise olasılık dağılım fonksiyonudur. F(t), t zamanından önce arıza olma olasılığını verir ve formülasyon olarak aşağıdaki gibi gösterilir:

$$F(t) = \int_0^t f(y)dy \quad (3.2)$$

Bu formüldeki “t” zaman, “f(y)” olasılık yoğunluk fonksiyonu, “F(t)” ise olasılık dağılım fonksiyonudur.

3.3.2. Güvenilirlik fonksiyonu

Olasılık dağılım fonksiyonu, t zamanından önce arıza olma olasılığını veriyordu. Güvenilirlik fonksiyonu ise t zamanında veya t zamanından daha sonra arıza olma olasılığını verir. Başka bir deyişle t zamanından önce arıza olmama olasılığını verir. R(t) ile gösterilen güvenilirlik fonksiyonunun formülasyonu aşağıdaki gibidir:

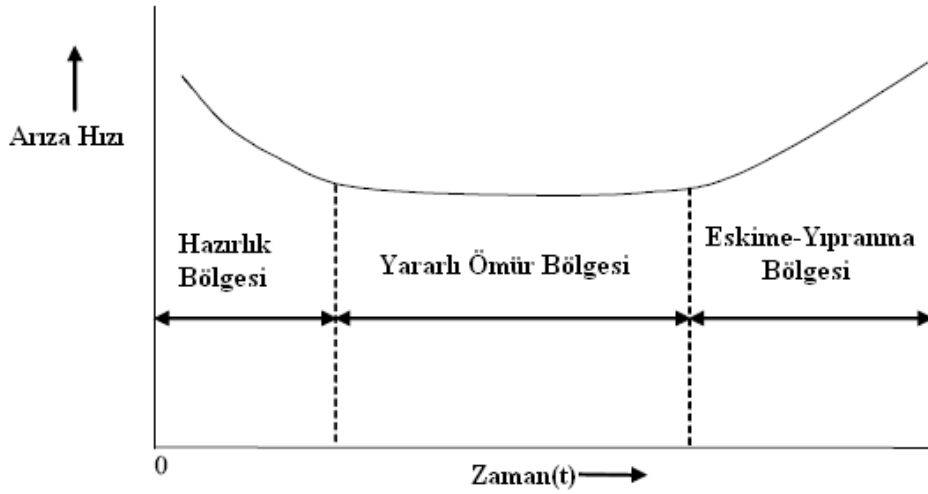
$$R(t) = 1 - F(t) \quad R(t) = 1 - \int_0^t f(y)dy \quad (3.3)$$

3.3.3. Arıza hızı fonksiyonu ve banyo küveti eğrisi

Arıza hızı fonksiyonu, verilen bir zaman diliminde meydana gelmesi beklenen arızaların sayısını ifade eder. r(t) ile gösterilen arıza hızına dair formül aşağıda yer almaktadır:

$$r(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.4)$$

Çeşitli mühendislik ürün veya sistemlerinin arıza hızları zamanla değişmektedir. Arıza dağılımlarındaki bu değişimi ifade etmede kullanılan kavram Banyo küveti eğrisidir. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi bu eğrinin 3 bölgesi vardır. Bunlar; alıştıırma-hazırlık bölgesi, yararlı ömür bölgesi ve yıpranma-eskime bölgesidir. Alıştıırma-hazırlık bölgesinde arıza hızı giderek düşmektedir. Bu bölgede gerçekleşen arızaların sebepleri yetersiz işçilik kalitesi, standartların altında parça veya malzeme kullanımı, yetersiz kalite kontrol, yetersiz imalat metotları, doğru olmayan kurulum ve çalıştıırmadaki insan hataları, hatalı paketleme ve taşımadır [23]. Yararlı ömür bölgesinde arıza hızı sabit kalmaktadır ve arızalar rassal olarak meydana gelir. Bu bölgede gerçekleşen arızaların sebepleri tespit edilemeyen eksiklikler, düşük güvenlik faktörleri, beklenenden daha yüksek rassal gerilim, kaçınılamaz koşullar ve insan hatalarıdır. Yıpranma-eskime bölgesinde ise arıza hızı artar. Bu bölgede gerçekleşen arızaların sebepleri ise yetersiz bakım, sürtünme kaynaklı aşınma, yaşlanma kaynaklı eskime, paslanma, yanlış genel bakım uygulamaları ve ürün ömrünün kısa tasarlanmış olmasıdır [24].



Şekil 3.2. Banyo Küveti Eğrisi [8]

3.3.4. Arızalar arası ortalama zaman

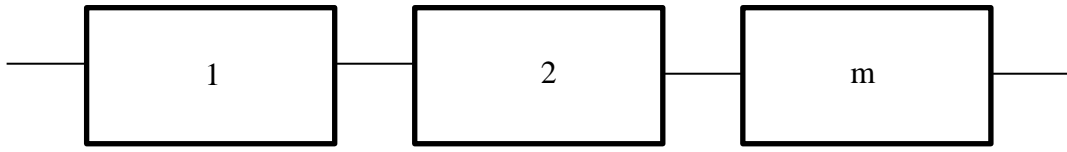
İngilizce Mean Time Between Failure (MTBF) kelimelerinden oluşan Arızalar Arası Ortalama Zaman, arıza zamanının beklenen değeri yani ortalamasıdır. Bu ortalama zaman, onarım için beklenen zaman, onarımda harcanan zaman, muayene ve önleyici bakım gibi diğer duruş zamanlarını hariç tutar [25].

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad \text{veya} \quad MTBF = \int_0^{\infty} tf(t)dt \quad \text{veya} \quad MTBF = \frac{1}{r(t)} \quad (3.5)$$

3.4. Güvenilirlik Konfigürasyonları

3.4.1. Seri konfigürasyon

Seri konfigürasyonda, sistemin başarısı için tüm birimler normal bir şekilde çalışmalıdır [26]. Aşağıdaki diyagram m birimden oluşan seri bir sistemi temsil etmektedir:



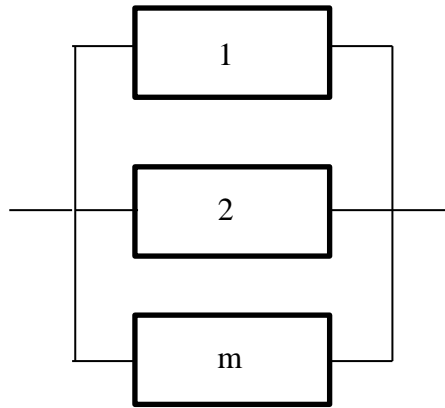
Şekil 3.3. Seri Konfigürasyon [27]

Bu sistemde birimlerden birinde arıza meydana geldiğinde sistemin çalışması sona erer. Bu sistemin güvenilirliği aşağıdaki gibi gösterilir:

$$R_s = \prod_{i=1}^m R_i \quad (3.6)$$

3.4.2. Paralel konfigürasyon

Bu durumda sistem m aktif birimden oluşur. Sistemin çalışmasını normal bir şekilde devam ettirebilmesi için en az bir birimin çalışmasını sürdürmesi yeterlidir. Bu sistemin güvenilirliği aşağıdaki gibi gösterilir:



Şekil 3.4. Paralel Konfigürasyon [27]

$$R_{ps} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - R_i) \quad (3.7)$$

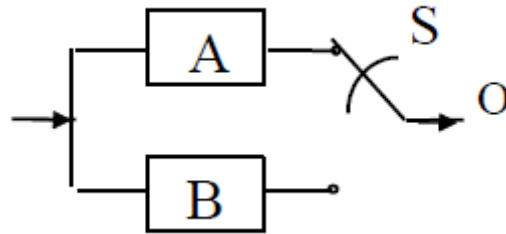
3.4.3. K-m konfigürasyon

Bu durumda sistem m aktif birimden oluşur. Sistemin çalışmasını normal bir şekilde devam ettirebilmesi için en az K birimin çalışmasını sürdürmesi yeterlidir. Seri ($K=m$) ve paralel ($K=1$) konfigürasyonlar bu durumun özel durumlarıdır. Bu sistemin güvenilirliği aşağıdaki gibi gösterilir:

$$R_{k/m} = \sum_{i=k}^m \binom{m}{i} R^i (1-R)^{m-i} \quad \binom{m}{i} = \frac{m!}{(m-i)!i!} \quad (3.8)$$

3.4.4. Yedekli konfigürasyon

Bu sistemde sadece bir birim aktif olarak çalışır ve m adet birim çalışmak için hazır durumda bekler. Çalışan birimde arıza olur olmaz anahtarlama mekanizması arızayı tespit eder ve arıza yapan birimi hazır durumda bekleyen birimlerden biriyle değiştirir. Sistem toplam $m+1$ birimden oluşur ve hazır durumda bekleyen birimlerin tamamı arıza yaptığı zaman sistemin çalışması sona erer [28]. Bu sistemin güvenilirliği aşağıdaki gibi gösterilir:



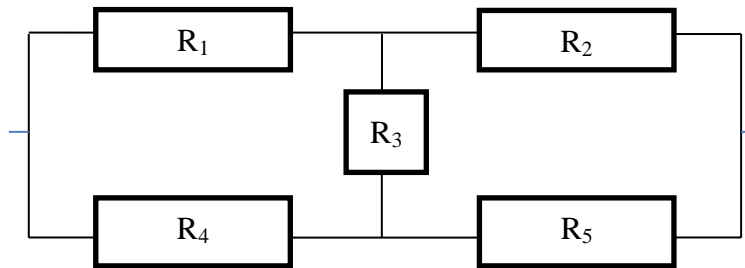
Şekil 3.5. Yedek Birim Bekleten Konfigürasyon [8]

$$R_y = \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda t)^i e^{-\lambda t}}{i!} \quad R_y = \frac{(\lambda_1 \times e^{-\lambda_2 t}) - (\lambda_2 \times e^{-\lambda_1 t})}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (3.9)$$

Yukarıdaki ilk formül özdeş birimler için, ikinci formül ise özdeş olmayan birimler için kullanılmaktadır.

3.4.5. Köprü konfigürasyon

Bazı mühendislik sistemlerinde, özellikle iletişim ağlarında sistemdeki birimler köprü konfigürasyona sahip olabilir. Aşağıdaki resimde her blok bir birimi ifade eder ve blokların içerisindeki rakamlar birim sayısını ifade eder.



Şekil 3.6. Köprü Konfigürasyon [8]

$$R_b = 2R_1R_2R_3R_4R_5 + R_2R_3R_4 + R_1R_3R_5 + R_2R_5 + R_1R_4 - R_2R_3R_4R_5 - R_1R_2R_3R_4 - R_1R_2R_3R_5 - R_1R_3R_4R_5 - R_1R_2R_4R_5 \quad (3.10)$$

$$R_b = 2R^5 - 5R^4 + 2R^3 + 2R^2 \quad (\text{özdeş birimler için}) \quad (3.11)$$

3.5. Güvenilirlik Analiz Metotları

Mühendislik sistemlerinin güvenilirliğinin analizinde kullanılan birçok yöntem olmakla birlikte burada en sık kullanılan 3 yöntem ele alınmıştır.

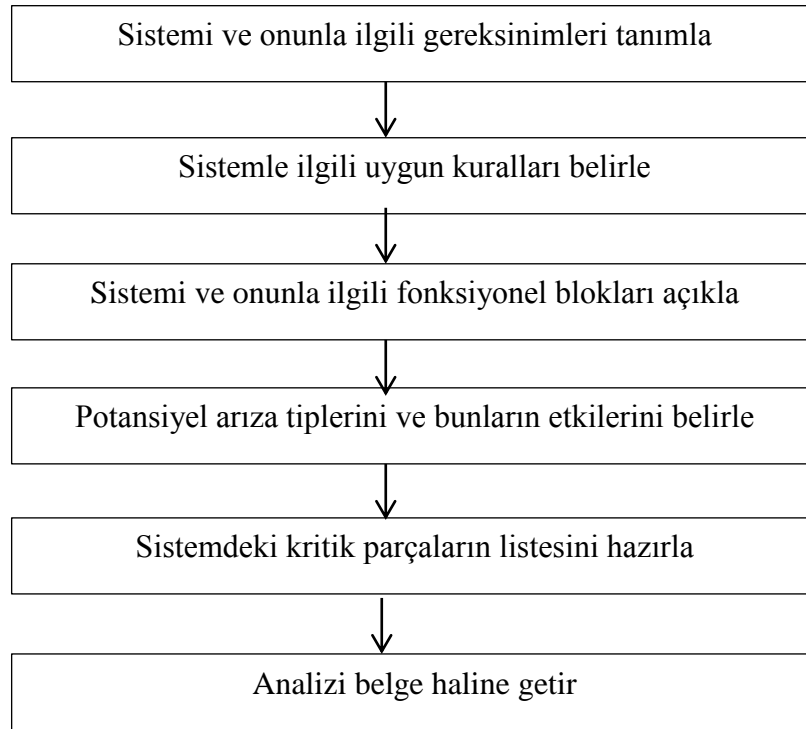
3.5.1. Arıza tipleri ve etki analizi (FMEA)

FMEA, İngilizce Failure Modes and Effect Analysis kelimelerinden oluşur. Bu yöntem incelenen sistemdeki her potansiyel arıza tipinin analizinin yürütülmesinde kullanılan bir yaklaşımdır. Böylelikle bu potansiyel arıza tiplerinin sisteme olan etkisi araştırılmış olunur. Sonuç olarak bu yaklaşım, sistemdeki her parçanın potansiyel arıza tiplerinin ve bu arıza tiplerinin sistemde meydana getirdiği etkinin listelenmesini sağlar.

Bu yöntemin ana karakteristiklerinden bazıları şunlardır:

- Detaylardan başlayıp genele doğru giden bir yaklaşımdır.
- Sistemdeki her parçanın olası arıza etkileri belirlendiği için tüm sistem tamamen incelenmiş olur.
- Bir sistem tasarlanırken zayıf noktaların belirlenmesini sağlar ve daha fazla analiz gerektiren alanları vurgular.
- Tasarım aşamasında rol alan kişiler arasındaki iletişimi geliştirir [8].

Bu yöntemin 6 ana adımı şöyledir:



Şekil 3.7. FMEA'nın Adımları [8]

3.5.2. Markov metodu

Markov metodu hem onarım yapılabilen hem de onarım yapılamayan sistemlere çözüm ürettiği için en güçlü güvenilirlik analiz metotlarından biridir. Büyük ve karmaşık sistemlerdeki problemler bu metot tarafından üretilen eşitlikler vasıtasıyla çözülebilir. Markov metodu şu varsayımlara dayanır:

- Δt ile ifade edilen sınırlı bir zaman aralığında bir durumdan diğerine geçişin olasılığı $\lambda \Delta t$ ile ifade edilir. Buradaki λ , Markov durumlarıyla ilgili geçiş oranıdır. Örneğin, arıza ya da onarım oranı λ ile ifade edilir.
- Markov durumlarında, bir önceki durumdan diğerine geçişin olasılığı olan $\lambda \Delta t$, bir sonraki duruma geçişin olasılığından küçükse bir önceki durumun geçiş olasılığı olan $\lambda \Delta t$ ihmal edilebilir.
- Tüm durumlar birbirinden bağımsızdır [8].

3.5.3. Hata ağacı analizi

Hata ağacı analizi (Fault Tree Analysis), mühendislik sistemlerinin güvenilirliğinin değerlendirilmesi için kullanılan yöntemler içerisinde en yaygın olarak kullanılanlardan biridir. Bu metot 1960'lı yılların başında haberleşme sektörüyle ilgili olan Bell telephone laboratories da geliştirildi. Daha sonraları uzay bilimleri, nükleer endüstrisi ve kimya endüstrisinde sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Yöntemin ilkesi, istenmeyen bir olaya (arıza) yol açan olayların (arızaların) şematik olarak gösterilmesidir. Hataların sonuçları hakkında bir fikir vermesi nedeniyle tasarım açısından büyük önem taşır [8].

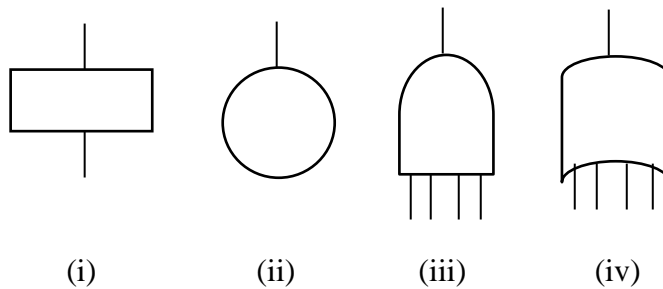
BÖLÜM 4. HATA AĞACI ANALİZİ (FTA) VE GÜVENİLİRLİK BLOK DİYAGRAMI (RBD)

4.1. Hata Ağacı Analizi (Fault Tree Analysis - FTA)

Hata ağacı, tanımlanmış istenmeyen olay veya durumun nedenlerinin mantıksal kombinasyonunun grafiksel ifadesidir [29]. Hata ağacı analizi (FTA) en iyi bilinen güvenilirlik analizi yöntemlerinden biridir. 1960'lardan itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Fonksiyonel hatanın ciddi sonuçlara neden olabileceği ve aynı zamanda önemli miktarda kaynağın tehlike analizi için ayrılabilirdiği karmaşık teknik sistemler için büyük önemi vardır [30].

Günümüzde hata ağacı analizi hataların önceden tanımlanabilmesi, dolayısı ile önlem alınabilmesi için kullanılan bir teknik halini almıştır. Diğer taraftan FTA; yeni ürün veya sistemlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar sırasında da kullanılmaktadır [31].

Hata ağacı analizinde kullanılan 4 temel sembol şunlardır:



Şekil 4.1. Yaygın Olarak Kullanılan Hata Ağacı Sembolleri [8]

Bu sembollerin anlamları ise şunlardır:

i: Bu sembol, and veya or mantık kapısına bağlanan arızalardan kaynaklanan arızayı ifade eder.

ii: Bu sembol, temel bir komponentteki arızayı temsil eder.

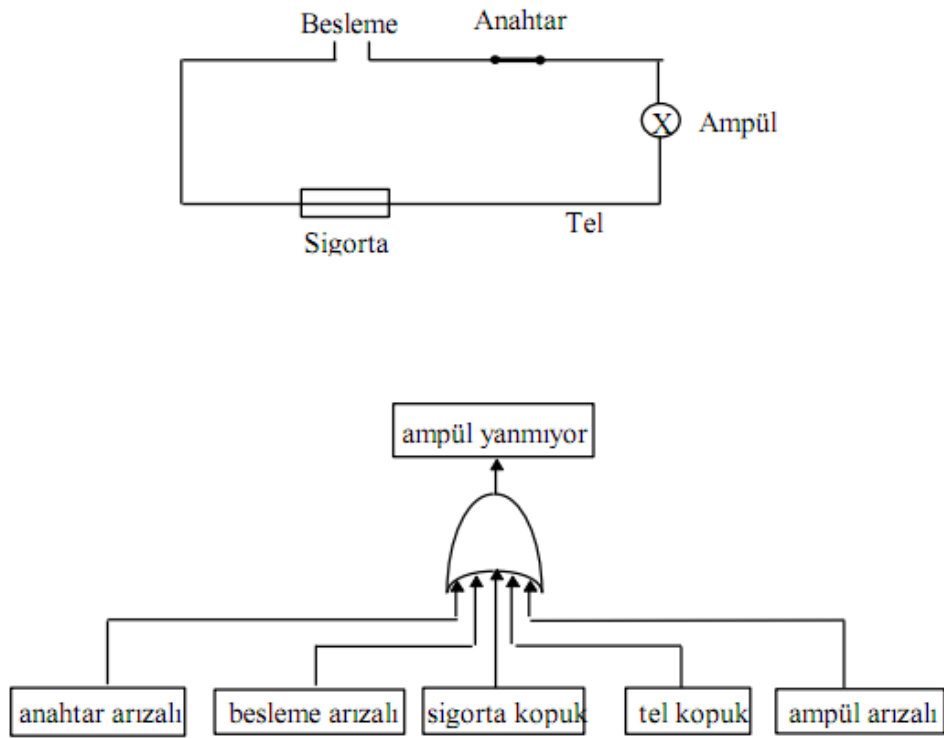
iii: And mantıksal kapısı. Bu kapının girdisi olan tüm arıza sebepleri gerçekleştiği zaman bu kapının çıktısı olan arıza gerçekleşir.

iv: Or mantıksal kapısı. Bu kapının girdisi olan arıza sebeplerinden bir ya da daha fazlası gerçekleştiği zaman bu kapının çıktısı olan arıza gerçekleşir.

Hata ağaçları her biri kendisinden bir alt düzeydeki arızaların mantıksal bir fonksiyonu olarak tanımlanan, çeşitli düzeylerde arızalar zinciridir. Yöntem en üst düzey arızadan (istenmeyen olay) en alttaki temel arızalara varana dek, her bir arızanın kaynağını belirleme şeklinde tanımlanabilir. Örneğin aşağıdaki şekilde ampülün yanmamasının (istenmeyen olay) nedeni;

- anahtar arızası,
- besleme arızası,
- sigorta atıklığı,
- tel kopukluğu,
- ampül arızası

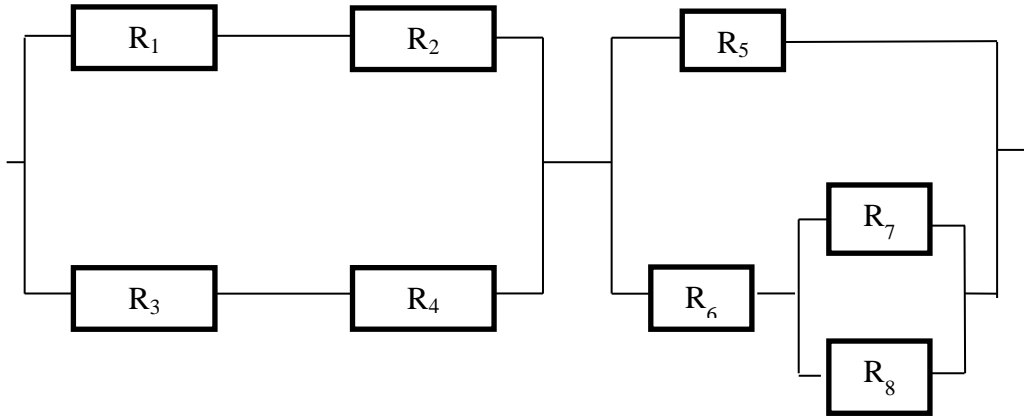
veya bunların birleşimi olabilir. Dolayısıyla ampülün yanmaması, belirtilen olayların bir mantıksal VEYA kapısı ile birleştirilmesiyle modellenir [8].



Şekil 4.2. Hata Ağacı Analizi Örneği [8]

4.2. Güvenilirlik Blok Diyagramı (RBD)

Güvenilirlik blok diyagramı, sistem komponentlerinin grafiksel gösterimidir ve sistemin güvenilirliğinin belirlenmesinde kullanılır. Diyagramdaki bloklar sistem komponentlerini, çizgiler ise komponentler arasındaki bağlantıyı ifade eder. Aşağıda örnek bir güvenilirlik blok diyagramı yer almaktadır:



Şekil 4.3. Örnek Bir Güvenilirlik Blok Diyagramı [8]

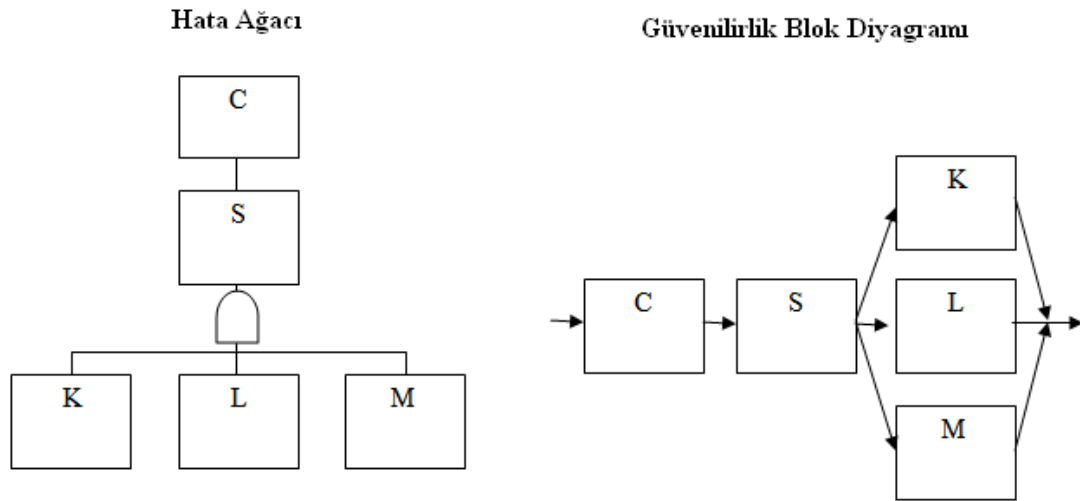
Güvenilirlik blok diyagramları oluşturulurken bazı varsayımlarda bulunulur. Bunlar:

- Çizgilerdeki güvenilirlik değeri 1'dir.
- Diyagramdaki blokların arızaları istatistiksel olarak bağımsızdır.
- Bloklar 2 alternatife sahiptir; ya çalışır ve işlevini düzgün bir şekilde yerine getirir ya da arızalıdır ve çalışamaz [32].

4.3. Hata Ağacı Analizinden Güvenilirlik Blok Diyagramına Geçiş

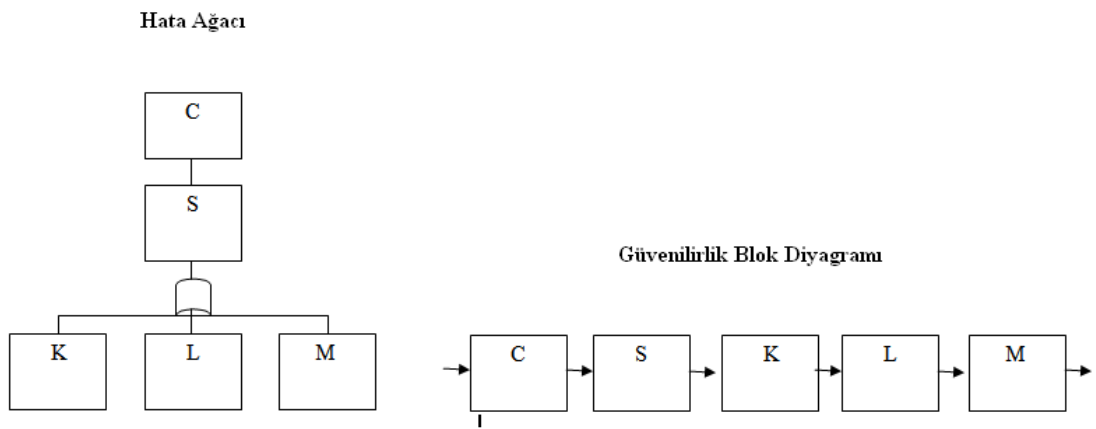
Güvenilirlik hesabı yaparken önce hata ağacı analizi yapılır ve elde edilen hata ağacı güvenilirlik blok diyagramına dönüştürülür. Bu dönüşüm esnasında şu 2 duruma dikkat etmek gerekmektedir:

- Hata ağacındaki and mantıksal kapıları güvenilirlik blok diyagramında paralel blok yapısına dönüştür.



Şekil 4.4. Hata Ağacı ve Güvenilirlik Blok Diyagramı [32]

- Hata ağacındaki or mantıksal kapıları güvenilirlik blok diyagramında seri blok yapısına dönüştür [32].



Şekil 4.5. Hata Ağacı ve Güvenilirlik Blok Diyagramı [32]

BÖLÜM 5. RAYLI SİSTEM YOLCU TAŞIMA ARAÇLARINDA KLİMA SİSTEMİ GÜVENİLİRLİK HESAPLAMASI

5.1. Raylı Sistem Yolcu Taşıma Araçları

Raylı sistemler teknolojisi dünyada hızla gelişmekte, pazar payı giderek artmakta ve rekabet koşulları ağırlaşan bir sektör olmaktadır. Dolayısıyla sektör sürekli gelişim gösteren, kendini yenileyen, AR-GE çalışmalarına ağırlık veren bir sanayi dalı olma durumundadır.

Ulaşımın ülkelerin en önemli sorunlarından olması, gelişmekte olan ülkelerde sektörün gelişmesi stratejik bir devlet politikası haline gelmektedir. Ülkemizde ise raylı sistemler hızla gelişmekte ve önem kazanmakta, devlet demir yolları ve şehir içi ulaşım ile birlikte ülke ekonomisine ulaşım ve istihdam alanında yüksek oranda katma değer sağlamaktadır [33].

5.1.1. Hafif raylı sistemler

Esas olarak klasik tramvayın modernleştirilmiş ve evrimleşmiş halidir. Hafif raylı taşımacılık; tek araba veya kısa dizi halinde işletilebilen yer seviyesinde veya yükseltilmiş yollarda kendine ait özel bir yolu ve çoğunlukla caddeleri kullanan bir kent içi elektrikli ulaşım sistemidir. Gelişen ve hızla genişleyen büyük kentlerin toplu yolcu taşıma ihtiyaçlarını karşılamak için geliştirilen ve günümüz büyük kentlerinde yaşamı ve ulaşımı kolaylaştıran elektrik enerjisiyle çalışan çeken ve çekilen araçlardan oluşan bir sistemdir. Temel özelliği çalıştığı yolun tamamıyla diğer kullanıcılardan ayrılmış olmasıdır. Başlıca hafif raylı sistem yolcu taşıma araçları şunlardır:

- Tramway: Genelde kara yolu ile aynı güzergahı paylaşan, üzerinde bulunan elektrik tellerinden enerjisini alan belirli istasyonlarda yolcu alıp indiren tek araç olarak dizayn edilen çeken araçlardır [33].

5.1.2. Ağır raylı sistemler

Temel özelliği çalıştığı yolun tamamıyla diğer kullanıcılardan ayrılmış olmasıdır. Başlıca çeşitleri şunlardır:

- Metro: En büyük trafik potansiyelini gerçekleştirecek taşıt türüdür. Yer altında veya bazen yer üstünde hareket eder, yol kesişmesi yoktur. Kendi içinde kapalı bir sistemdir ve burada yalnızca metro taşıtları çalışır.
- Banliyö: Kendine ait demir yolunda hareket eden bir sistemdir. Yoğun kent dışı yöre trafiğine hizmet götürür. Genelde elektrikli (Diesel Multiple Unit’de olabilir) demiryollarında hareket eden bir sistemdir.
- Yolcu trenleri: Sadece yolcu taşımak için çeşitli şekillerde dizayn edilen, çekilen araçların bir grup oluşturduğu bir veya birkaç lokomotifin çektiği trenlerdir [33].

5.2. Bir Raylı Sistem Yolcu Taşıma Aracındaki Klima Sisteminin Güvenilirliğinin Hesaplanması

5.2.1. Uygulamayla ilgili genel bilgi

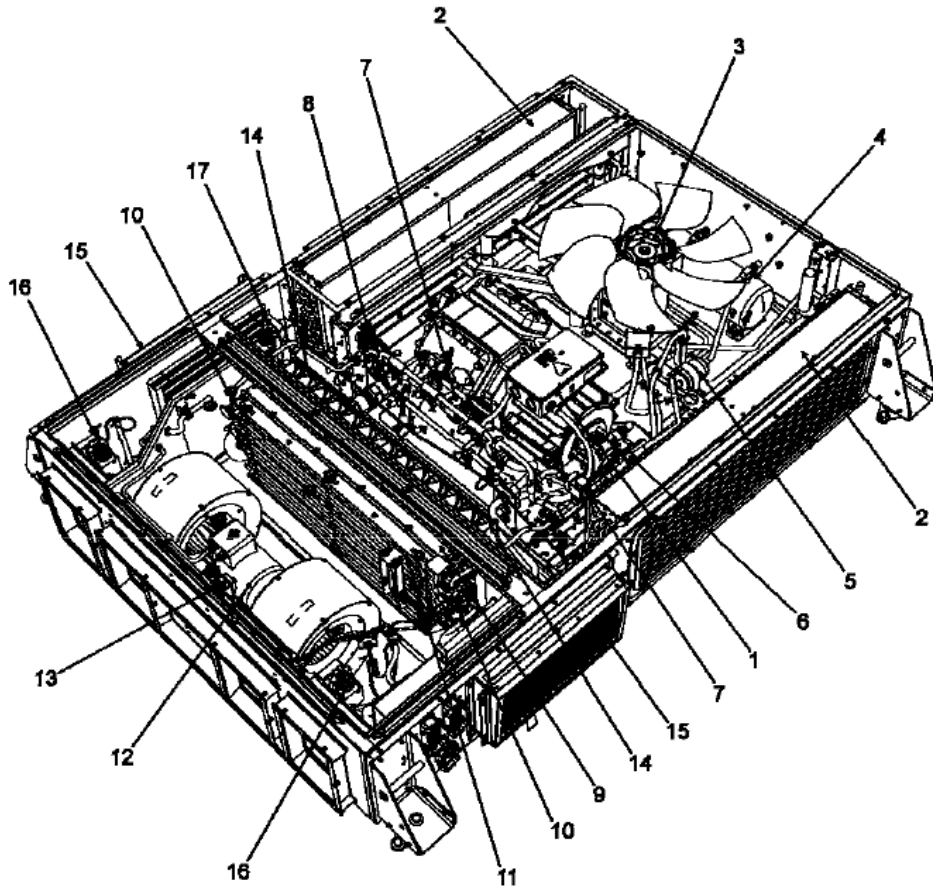
Uygulamanın yapıldığı raylı sistem aracı, ağır raylı sistem araçlarından banliyö kategorisine dahildir. Dizel motora sahip olan bu araç toplamda 2 vagon dan oluşur. Uygulamada, bu raylı sistem aracının klima sisteminin güvenilirliği hesaplanmıştır. Hesaplama için klima sistemine dair gerekli bilgiler, aracın klima sistemi tedarikçisinden temin edilmiştir.

5.2.2. Raylı sistem yolcu taşıma aracındaki klima sistemi

Uygulama konusunu oluşturan araçtaki klima sistemi R-134a tipi soğutucu akışkan kullanarak ısıtma, soğutma ve havalandırma işlemlerini başarılı bir şekilde gerçekleştirecek komponentlere sahiptir. Bu klima sistemi çatıya montajlı olacak şekilde tasarlanmıştır ve iki kademeli güce sahip bir kompresörle iki kademe hıza

sahip kondenser fan motor içermektedir. Isıtma ise her birim için 2 kademeli olarak gerçekleştirilir. Klima başına bir evaporatör fan motor yolcuların bulunduğu kısma hava üfler. Bakım faaliyetlerinin ve kontrollerin rahat bir şekilde yapılmasını sağlayacak bir tasarıma sahiptir. Ayrıca bu klima sistemi, bağlantılı olması gereken diğer sistem ve komponentlere AC ve DC prizlerle bağlanır. Sistem, 24Vdc bataryadan ve 3faz 380Vac ve 50 Hz güç çeviriciden beslenir.

Klima sistemine ait ana komponentler aşağıda yer almaktadır:



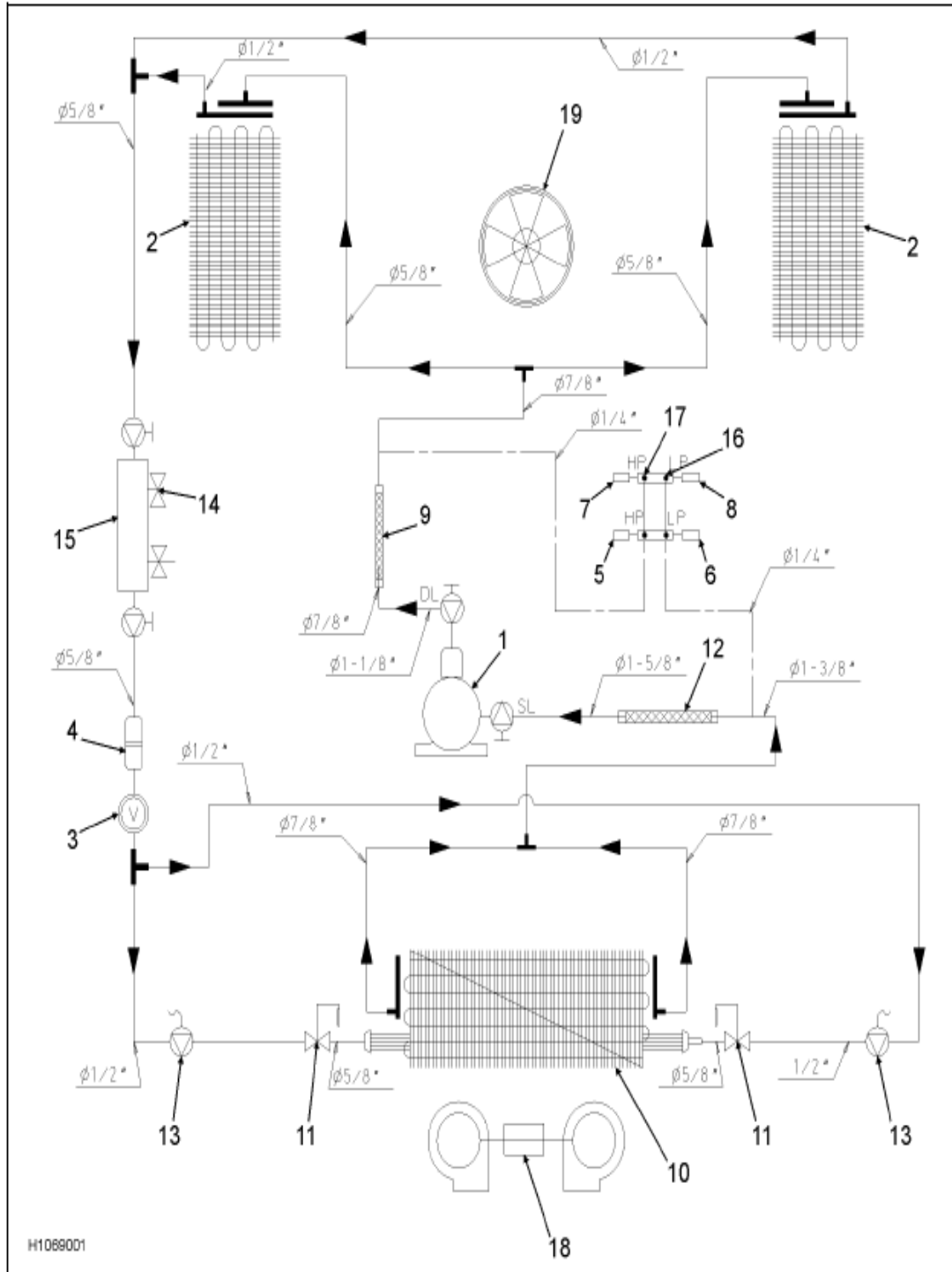
Şekil 5.1. Klima Sisteminin Ana Komponentleri

Şekilde numara ile belirtilen klima sistemi komponentleri şunlardır:

- 1 kompresör (1).
- 2 kondenser sargısı (2).
- 1 kondenser fan motor kompleksi (3).

- 1 sıvı toplayıcı (4).
- 1 nem alma filtresi (5).
- 1 izleme camı ve nem göstergesi (6).
- 2 sıvı hattı selenoid valfi (7).
- 1 akışkan kontrol kompleksi (8). Bu da aşağıdaki parçalardan oluşur:
 - 1 Alçak basınç güvenlik anahtarı
 - 1 Yüksek basınç güvenlik anahtarı
 - 1 Alçak basınç transduseri
 - 1 Yüksek basınç transduseri
 - 1 Alçak basınç servis valfi
 - 1 Yüksek basınç servis valfi
- 1 Evaporatör sargısı (9).
- 2 Termostatik genişleme valfi (10).
- 1 Isıtma tiji (11).
- 1 Evaporatör fan motor kompleksi (12).
- 1 Hava basınç anahtarı (13).
- 2 Dönüş hava filtresi (14).
- 2 Temiz hava filtresi (15)
- 2 Dönüş hava damperi (16).
- 2 Temiz hava damperi (17).
- 1 Temiz hava sensörü
- 1 Besleme hava sensörü
- 1 Dönüş hava sensörü

Klima sistemine ait soğutucu akışkan devre diyagramı aşağıda yer almaktadır:



Şekil 5.2. Klima Sistemi Soğutucu Akışkan Devre Diyagramı

Yukarıdaki şekilde numara ile belirtilen klima sistemi komponentleri ise şunlardır:

Tablo 5.1. Klima Sistemi Soğutucu Akışkan Devre Diyagramındaki Klima Sistemi Komponentleri

No	İsim	Miktar
1	Kompresör	1
2	Kondenser Sargısı	2
3	İzleme Camı ve Nem Göstergesi	1
4	Nem Alma Filtresi	1
5	Yüksek Basınç Transduseri	1
6	Alçak Basınç Transduseri	1
7	Alçak Basınç Devre Kesici	1
8	Yüksek Basınç Devre Kesici	1
9	Deşarj Hattı Titreşim Sönümleyici	1
10	Evaporatör Sargısı	1
11	Genleşme valfi	2
12	Emme Hattı Titreşim Sönümleyici	1
13	Sıvı Hattı Selenoid Valfi	2
14	Akışkan Emniyet Valfi	1
15	Sıvı Toplayıcı	1
16	Alçak Basınç Servis Valfi	1
17	Yüksek Basınç Servis Valfi	1
18	Evaporatör Fan Motor Komplexi	1
19	Kondenser Fan Motor Komplexi	1

5.2.3. Klima sistemindeki komponentler ve arıza verileri

Klima sistemindeki komponentler ve bu komponentlere ilişkin arıza sayısı bilgileri aşağıda verilmiştir:

Tablo 5.2. Klima Sistemindeki Komponentlere İlişkin Arıza Sayısı Bilgileri

Komponent	Adet	Birim Arıza Sayısı (36500saat)	Kullanım Faktörü	Arıza Sayısı (Toplam)
Hermetik kompresör	4	0,118	0,6	0,283
Kondenser fan motor	2	0,094	0,6	0,113
Evaporatör fan motor	2	0,100	1	0,200
Hava filtresi	2	0	1	0
Yüksek basınç anahtarı	4	0,026	0,6	0,061
Alçak basınç anahtarı	4	0,026	0,6	0,061
Evaporatör sargısı	2	0,108	0,6	0,131
Kondenser sargısı	4	0,113	0,6	0,272
Nem alma filtresi	4	0,037	0,6	0,089
Titreşim sönümleyici	8	0,073	0,6	0,354
Hava basınç anahtarı	2	0,020	1	0,039
Ara bağlantı	6	0,031	1	0,186
Genleşme valfi	4	0,035	0,6	0,083
Solenoid valf	4	0,039	0,6	0,093
Bypass valf	4	0,019	0,6	0,045
Klixon termostat	4	0,015	0,4	0,024
Isıtma tiji	2	0,021	0,4	0,017
Yedekleme termostatu	2	0,015	0,2	0,006
Kontaktör	14	0,029	1	0,408
Röle	12	0,028	1	0,337
Elektronik devre kartı(pcb)	1	0,018	1	0,018
Besleme hava sensörü	2	0,026	1	0,052
Dönüş hava sensörü	2	0,026	1	0,052
Temiz hava sensörü	2	0,026	1	0,052

Tablodaki Birim Arıza sayısı, bir adet komponentin 36500 saatteki arıza sayısını ifade etmektedir. Dolayısıyla burada arıza hızı, belirli bir zaman periyodundaki arıza sayısı olarak ifade edilmiştir. Klima sisteminin kullanıldığı raylı sistem aracı yılda 3650 saat çalışmaktadır. Raylı sistem yolcu taşıma araçlarında analiz süresi genellikle 10 yıldır. Bu durumda 10 yıllık toplam çalışma süresi $3650 \times 10 = 36500$ saattir. Bundan dolayı arıza hızı, 36500 saatte gerçekleşen arıza sayısı olarak ifade edilmiştir. Tabloda bir diğer açıklanması gereken husus kullanım faktörü sütunudur. Uygulamanın konusunu oluşturan araç toplam çalışma zamanının %60'ında soğutma %40'ında ise ısıtma yapmaktadır. Dolayısıyla ısıtmada görev alan komponentin kullanım faktörü değeri 0,4 soğutmada görev alan komponentin kullanım faktörü 0,6 ve her ikisinde de görev alan komponentin kullanım faktörü ise 1 alınmıştır. Böyle bir ayırım yapılmasının sebebi, komponentlerin kullanım süresine karşılık gelen arıza hızını tespit edebilmek içindir. Tablodaki toplam arıza sayısı değerlerini bulurken her komponente ait adet, birim arıza sayısı ve kullanım faktörü değerleri birbiriyle çarpılmıştır. Örneğin Hermetik kompresör için toplam arıza sayısı, $4 \times 0,118 \times 0,6 = 0,283$ olarak bulunmuştur.

5.2.4. Klima sistemindeki komponentlerin arıza tablosu

Klima sistemindeki komponentlere ait arıza tablosu aşağıda yer almaktadır:

Tablo 5.3. Klima Sistemindeki Komponentlere Ait Arıza Tablosu

Arızalı sistem Veya Komponent	Arızaya Sebep Olan Sistem Veya Komponent(ler)
Klima Sistemi	Isıtma Sistemi, Soğutma Sistemi
	Kontrolör
Kontrolör	Elektronik Devre Kartı (PCB)
	Sensörler
Sensörler	Besleme Hava Sensörü
	Dönüş Hava Sensörü
	Temiz Hava Sensörü
Isıtma Sistemi	Evaporatör Fan Motor
	Hava Basınç Anahtarı
	Ara Bağlantı
	Klixon Termostat
	Isıtma Tiji
	Kontaktör
	Röle

Tablo 5.3.(Devam) Klima Sistemindeki Komponentlere Ait Arıza Tablosu

Arızalı sistem Veya Komponent	Arızaya Sebep Olan Sistem Veya Komponent(ler)
Soğutma Sistemi	Hermetik kompresör
	Kondenser Fan Motor
	Evaporatör Fan motor
	Yüksek basınç anahtarı
	Alçak Basınç anahtarı
	Evaporatör sargısı
	Kondenser sargısı
	Nem Alma Filtresi
	Titreşim sönümleyici
	Hava Basınç Anahtarı
	Ara bağlantı
	Genleşme valfi
	Solenoid valf
	Bypass valf
	Kontaktör
Röle	

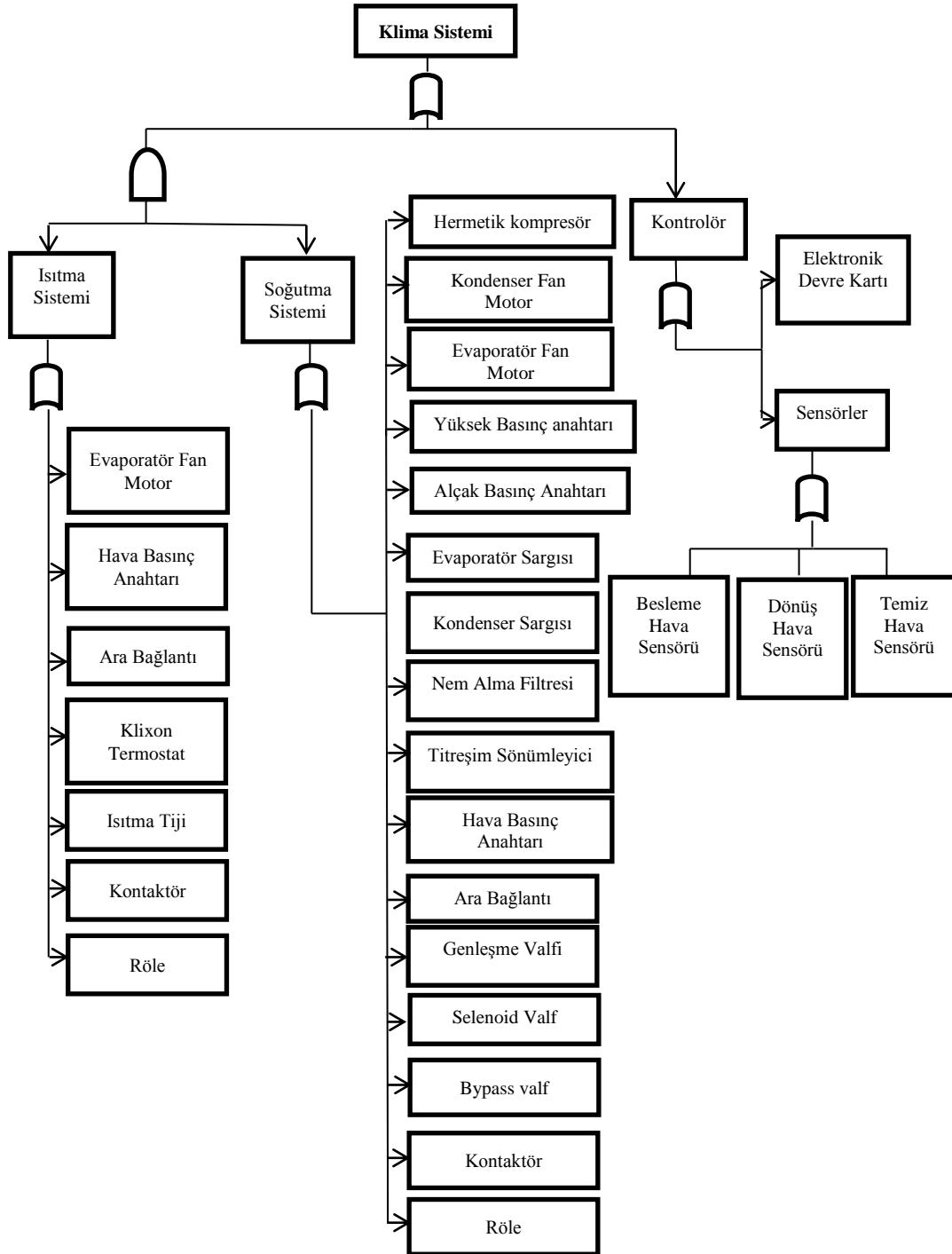
Bu tablo klima sistemine ait bakım dokümanı ve geçmiş arıza bilgilerine dayanarak oluşturulmuştur. Tablo, hangi komponentlerdeki arızaların hangi sistem veya komponentlerde arızaya sebep olduğunu göstermektedir. Bu tablodaki verilere dayanarak klima sisteminin hata ağacı oluşturulacaktır.

5.2.5. Klima sisteminin hata ağacı

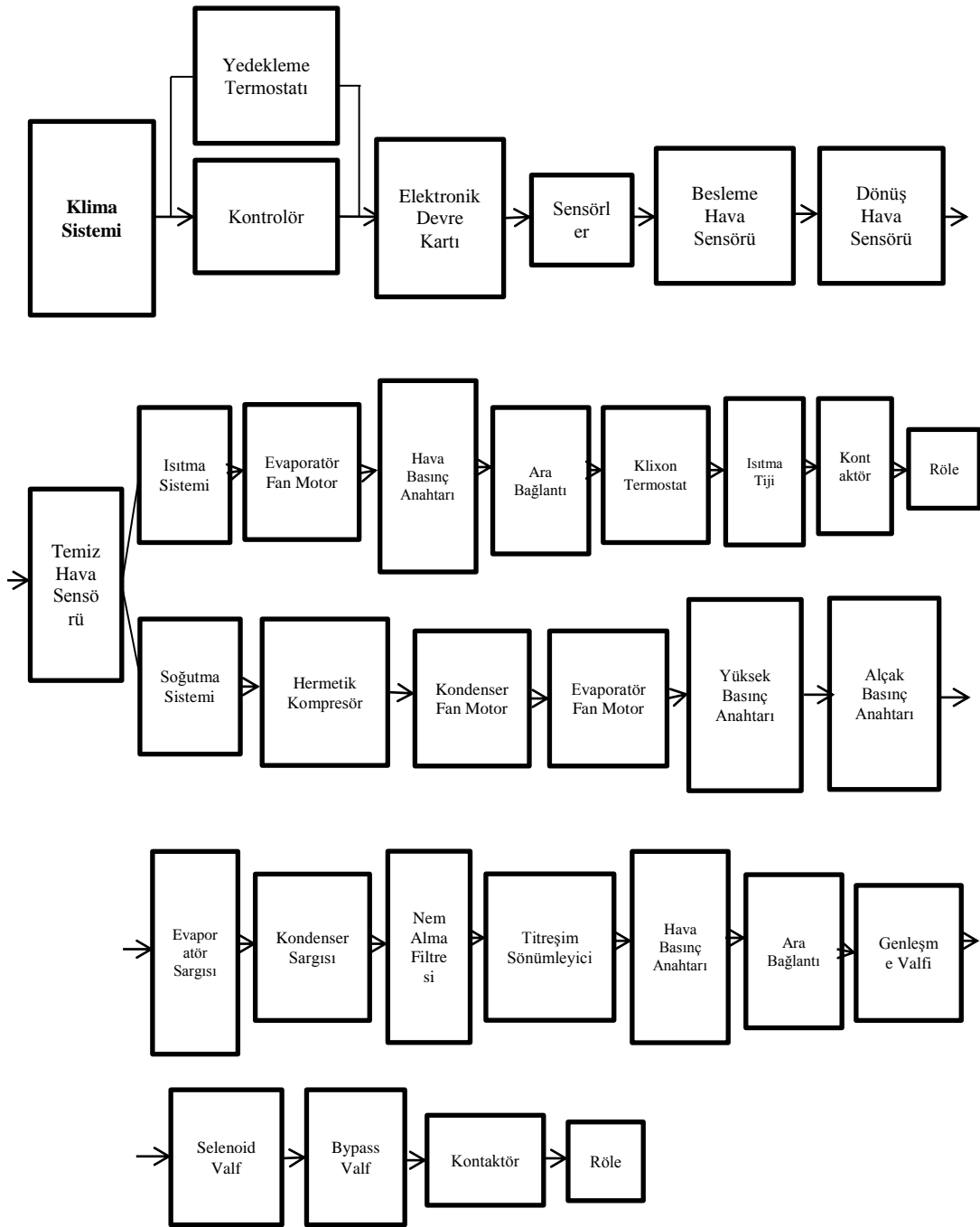
Klima sistemindeki komponentlere ait arıza tablosundan yararlanılarak oluşturulan hata ağacı aşağıda yer almaktadır:

5.2.6. Klima sisteminin güvenilirlik blok diyagramı

Klima sisteminin hata ağacından yararlanılarak oluşturulan güvenilirlik blok diyagramı aşağıda yer almaktadır:



Şekil 5.3. Klima Sistemi Hata Ağacı



Şekil 5.4. Klima Sisteminin Güvenilirlik Blok Diyagramı

5.2.7. Klima sisteminin güvenilirlik değerinin hesaplanması

Klima sistemindeki her bir komponentin güvenilirliği arıza sayısı verilerinin yer aldığı Tablo 5.2'den yararlanarak aşağıdaki gibi bulunmuştur:

Tablo 5.4. Klima Sistemindeki Komponentlere Ait Güvenilirlik Değerleri

Komponent	Arıza Hızı	Güvenilirlik Değeri
Hermetik kompresör	$7,753 \times 10^{-6}$	$R_1 = 0,754$
Kondenser Fan Motor	$3,096 \times 10^{-6}$	$R_2 = 0,893$
Evaporatör Fan motor	$5,479 \times 10^{-6}$	$R_3 = 0,819$
Hava Filtresi	0	$R_4 = 1$
Yüksek basınç anahtarı	$1,671 \times 10^{-6}$	$R_5 = 0,94$
Açık Basınç anahtarı	$1,671 \times 10^{-6}$	$R_6 = 0,94$
Evaporatör sargısı	$3,589 \times 10^{-6}$	$R_7 = 0,878$
Kondenser sargısı	$7,452 \times 10^{-6}$	$R_8 = 0,762$
Nem Alma Filtresi	$2,438 \times 10^{-6}$	$R_9 = 0,915$
Titreşim sönümleyici	$9,697 \times 10^{-6}$	$R_{10} = 0,702$
Hava Basınç Anahtarı	$1,068 \times 10^{-6}$	$R_{11} = 0,962$
Ara bağlantı	$5,096 \times 10^{-6}$	$R_{12} = 0,830$
Genleşme valfi	$2,274 \times 10^{-6}$	$R_{13} = 0,92$
Solenoid valf	$2,548 \times 10^{-6}$	$R_{14} = 0,911$
Bypass valf	$1,233 \times 10^{-6}$	$R_{15} = 0,956$
Klixon termostat	$6,575 \times 10^{-7}$	$R_{16} = 0,976$
Isıtma Tiji	$4,658 \times 10^{-7}$	$R_{17} = 0,984$
Yedekleme Termostatu	$1,644 \times 10^{-7}$	$R_{18} = 0,994$
Kontaktör	$11,178 \times 10^{-6}$	$R_{19} = 0,664$
Röle	$9,233 \times 10^{-6}$	$R_{20} = 0,714$
Elektronik Devre Kartı(PCB)	$4,932 \times 10^{-7}$	$R_{21} = 0,982$
Besleme Hava sensörü	$1,425 \times 10^{-6}$	$R_{22} = 0,950$
Dönüş Hava sensörü	$1,425 \times 10^{-6}$	$R_{23} = 0,950$
Temiz Hava sensörü	$1,425 \times 10^{-6}$	$R_{24} = 0,950$

Bu tablodaki güvenilirlik değerleri hesaplanırken önce her bir komponente ait arıza hızı değerleri bulunmuştur. Arıza hızını bulmak için komponente ait toplam arıza sayısı, toplam çalışma süresine bölünür. Örneğin hermetik kompresör için arıza hızı; $0,283/36500=7,753 \times 10^{-6}$ olarak bulunur.

Güvenilirlik değeri, arıza hızının sabit olduğu yani üssel dağılıma uyduğu durumda hesaplanır. Çünkü bu durumda arıza olma durumu tamamen rassaldır. Elektrik-elektronik sistemler bu tarz arıza davranışı gösterirler. Mekanik sistemler ise banyo küveti eğrisindeki eskime-yıpranma bölgesine kadar bu arıza davranışını gösterirler. Dolayısıyla klima sisteminin güvenilirlik değeri hesaplanırken arıza hızının sabit olduğu yani üssel dağılıma uyduğu kabul edilmiştir. Üssel dağılımın ortalaması $1/\lambda$ dir. Bu durum için $r(t)=\lambda$ ve $R(t)=e^{-\lambda t}$ dir.

Bu tablodaki güvenilirlik değerlerine güvenilirlik blok diyagramındaki komponentler arasındaki ilişki baz alınarak uygun hesaplama yöntemi uygulanır. Böylece klima sistemindeki ısıtma sisteminin, soğutma sisteminin, kontrolörün ve dolayısıyla tüm klima sisteminin güvenilirlik değeri elde edilmiş olunur.

Isıtma sisteminin güvenilirlik değeri hesabı aşağıda yer almaktadır:

Tablo 5.5. Isıtma Sistemindeki Komponentlere Ait Güvenilirlik Değerleri

Komponent	Arıza Hızı	Güvenilirlik Değeri
Evaporatör Fan motor*	$2,190 \times 10^{-6}$	$R_3= 0,923$
Hava Basınç Anahtarı*	$4,272 \times 10^{-7}$	$R_{11}= 0,985$
Ara bağlantı*	$2,038 \times 10^{-6}$	$R_{12}= 0,928$
Klixon termostat	$6,575 \times 10^{-7}$	$R_{16}= 0,976$
Isıtma Tijleri	$4,658 \times 10^{-7}$	$R_{17}= 0,984$
Kontaktör*	$4,471 \times 10^{-6}$	$R_{19}= 0,849$
Röle*	$3,693 \times 10^{-6}$	$R_{20}= 0,874$

Yukarıdaki tabloda * işareti olan komponentlerin güvenilirlik değeri yeniden hesaplanmıştır. Bunun sebebi her bir komponentin kullanım faktörü değerinin bulunmasıdır. Tablo 5.2’de yer alan güvenilirlik değerleri, komponentlerin toplam kullanım oranına karşılık gelen değerlerdir. Örneğin evaporatör fan motor, hem ısıtma sistemi hem de soğutma sistemi çalışırken aktif olduğundan dolayı kullanım faktörü 1’dir. Ancak, ısıtma sisteminin güvenilirliği hesaplanırken Evaporatör Fan motor’ un kullanım faktörü 0,4’tür. Çünkü bu komponent, toplam çalışma zamanının

%40'ında ısıtma sistemi devredeyken çalışmaktadır. Dolayısıyla bu komponent, ısıtma sistemi bünyesindeki bir komponent olarak ele alındığında toplam arıza sayısı ve arıza hızı daha düşük ve buna bağlı olarak güvenilirlik değeri daha yüksek olacaktır.

Isıtma sisteminin güvenilirliği: $R_1 = R_3 \times R_{11} \times R_{12} \times R_{16} \times R_{17} \times R_{19} \times R_{20}$

Isıtma sisteminin güvenilirliği: $R_1 = 0,923 \times 0,985 \times 0,928 \times 0,976 \times 0,984 \times 0,849 \times 0,874 = 0,601$ olarak bulunur.

Soğutma sisteminin güvenilirlik değeri hesabı aşağıda yer almaktadır:

Tablo 5.6. Soğutma Sistemindeki Komponentlere Ait Güvenilirlik Değerleri

Komponent	Arıza Hızı	Güvenilirlik Değeri
Hermetik kompresör	$7,753 \times 10^{-6}$	$R_1 = 0,754$
Kondenser Fan Motor	$3,096 \times 10^{-6}$	$R_2 = 0,893$
Evaporatör Fan motor*	$3,287 \times 10^{-6}$	$R_3 = 0,887$
Yüksek basınç anahtarı	$1,671 \times 10^{-6}$	$R_5 = 0,94$
Alçak Basınç anahtarı	$1,671 \times 10^{-6}$	$R_6 = 0,94$
Evaporatör sargısı	$3,589 \times 10^{-6}$	$R_7 = 0,878$
Kondenser sargısı	$7,452 \times 10^{-6}$	$R_8 = 0,762$
Nem Alma Filtresi	$2,438 \times 10^{-6}$	$R_9 = 0,915$
Titreşim sönmüleyici	$9,697 \times 10^{-6}$	$R_{10} = 0,702$
Hava Basınç Anahtarı*	$6,408 \times 10^{-7}$	$R_{11} = 0,977$
Ara bağlantı*	$3,058 \times 10^{-6}$	$R_{12} = 0,894$
Genleşme valfi	$2,274 \times 10^{-6}$	$R_{13} = 0,92$
Solenoid valf	$2,548 \times 10^{-6}$	$R_{14} = 0,911$
Bypass valf	$1,233 \times 10^{-6}$	$R_{15} = 0,956$
Kontaktör*	$6,707 \times 10^{-6}$	$R_{19} = 0,782$
Röle*	$5,540 \times 10^{-6}$	$R_{20} = 0,821$

* Kullanım faktöründen dolayı güvenilirlik değeri yeniden hesaplanan komponent

Soğutma sisteminin güvenilirliği: $R_s = R_1 \times R_2 \times R_3 \times R_5 \times R_6 \times R_7 \times R_8 \times R_9 \times R_{10} \times R_{11} \times R_{12} \times R_{13} \times R_{14} \times R_{15} \times R_{19} \times R_{20}$

Soğutma sisteminin güvenilirliği: $R_s = 0,754 \times 0,893 \times 0,887 \times 0,94 \times 0,94 \times 0,878 \times 0,762 \times 0,915 \times 0,702 \times 0,977 \times 0,894 \times 0,92 \times 0,911 \times 0,956 \times 0,782 \times 0,821 = 0,102$ olarak bulunur.

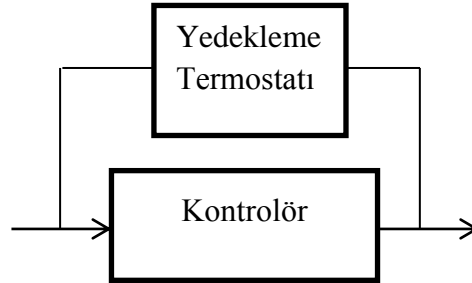
Kontrolörün güvenilirlik değeri hesabı aşağıda yer almaktadır:

Tablo 5.7. Kontrolörün Komponentlerine Ait Güvenilirlik Değerleri

Komponent	Arıza Hızı	Güvenilirlik Değeri
Elektronik Devre Kartı(PCB)	$4,932 \times 10^{-7}$	$R_{21} = 0,982$
Besleme Hava sensörü	$1,425 \times 10^{-6}$	$R_{22} = 0,950$
Dönüş Hava sensörü	$1,425 \times 10^{-6}$	$R_{23} = 0,950$
Temiz Hava sensörü	$1,425 \times 10^{-6}$	$R_{24} = 0,950$

Kontrolörün güvenilirliği: $R_k = R_{21} \times R_{22} \times R_{23} \times R_{24}$

Kontrolörün güvenilirliği: $R_k = 0,982 \times 0,950 \times 0,950 \times 0,950 = 0,842$ olarak bulunur. Kontrolör yedek komponente sahiptir. Yedekleme termostadı kontrolörde bir arıza meydana geldiği zaman devreye girmektedir. Dolayısıyla kontrolörün güvenilirliği, yedekleme termostadı sayesinde yukarıdaki değerden daha yüksek olacaktır. Kontrolördeki yedekleme mekanizmasını gösteren güvenilirlik blok diyagramı aşağıda yer almaktadır:



Şekil 5.5. Kontrolördeki Yedekli Sistemin Güvenilirlik Blok Diyagramı

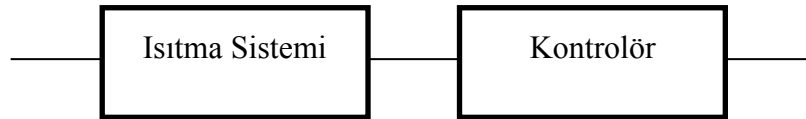
Bu durumda kontrolörün güvenilirliği aşağıdaki gibi elde edilir:

$$R_k = \frac{(\lambda_1 \times e^{-\lambda_2 t}) - (\lambda_2 \times e^{-\lambda_1 t})}{\lambda_1 - \lambda_2} = \frac{(0,172 \times 0,994) - (0,006 \times 0,842)}{0,172 - 0,006} = 0,999$$

Klima Sisteminin güvenilirliği:

$$R_{ks} = [1-(1-(0,923 \times 0,985 \times 0,928 \times 0,976 \times 0,984 \times 0,849 \times 0,874)) \times (1-(0,754 \times 0,893 \times 0,887 \times 0,94 \times 0,94 \times 0,878 \times 0,762 \times 0,915 \times 0,702 \times 0,977 \times 0,894 \times 0,92 \times 0,911 \times 0,956 \times 0,782 \times 0,821))] \times (0,999) = 0,641 \text{ olarak bulunur.}$$

Yukarıda değer, klima sisteminin 10 yıllık bir çalışma periyodu için elde edilen güvenilirlik değeridir. Buna ek olarak bu sistemin bir yıllık çalışma periyodu içinde mevsimsel güvenilirlik değerleri de hesaplanabilir. Araç kış mevsiminde çalıştığında soğutma sistemi çalışmayacak, ısıtma sistemi ve kontrolör devrede olacaktır. Bu duruma ait güvenilirlik blok diyagramı aşağıda yer almaktadır:

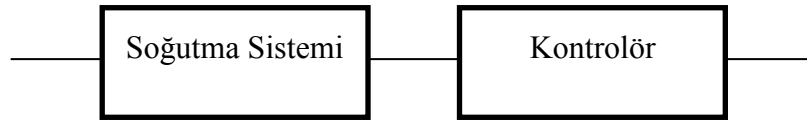


Şekil 5.7. Klima Sisteminin Kış Mevsimi İçin Güvenilirlik Blok Diyagramı

Bu durumda sistemin güvenilirliğini bulmak için önce ısıtma sisteminin ve kontrolörün bir yıllık güvenilirlik değerleri bulunmalıdır. 10 yıllık çalışma periyodu için $R_1 = 0,601$ ve $R_k = 0,999$ idi. Bir yıllık çalışma periyodu için R_1 ve R_k şöyle hesaplanır:

$R(t)=e^{-\lambda t}$, $\ln(0,601) = e^{-\lambda t}$, $\lambda t= 0,509$; t değeri 10 kat küçüldüğünden yeni $\lambda t = 0,509/10 = 0,051$ olur. Buradan yeni $R_1 = e^{-0,051} = 0,950$ olarak bulunur. Aynı işlem R_k için yapıldığında; $R(t)=e^{-\lambda t}$, $\ln(0,999) = e^{-\lambda t}$, $\lambda t= 0,001$; t değeri 10 kat küçüldüğünden yeni $\lambda t = 0,001/10 = 0,0001$ olur ve yeni $R_k = e^{-0,0001} = 0,999$ olarak bulunur. Buradan bir yıllık çalışma periyodunda klima sisteminin kış mevsimi için güvenilirlik değeri $R_{kış} = 0,950 \times 0,999 = 0,949$ olarak bulunur.

Aracın yaz mevsiminde çalıştığı durumda ise ısıtma sistemi çalışmayacak, soğutma sistemi ve kontrolör devrede olacaktır. Bu duruma ait güvenilirlik blok diyagramı aşağıda yer almaktadır:



Şekil 5.8. Klima Sisteminin Yaz Mevsimi İçin Güvenilirlik Blok Diyagramı

Bu durumda sistemin güvenilirliğini bulmak için önce soğutma sisteminin ve kontrolörün bir yıllık güvenilirlik değerleri bulunmalıdır. 10 yıllık çalışma periyodu için $R_s = 0,102$ ve $R_k = 0,999$ idi. Kış mevsimindeki yeni güvenilirlik değerlerinin Bir yıllık çalışma periyodu için R_s ve R_k şöyle hesaplanır:

$R(t) = e^{-\lambda t}$, $\ln(0,102) = e^{-\lambda t}$, $\lambda t = 2,283$; t değeri 10 kat küçüldüğünden yeni $\lambda t = 2,283/10 = 0,228$ olur. Buradan yeni $R_s = e^{-0,228} = 0,796$ olarak bulunur. Aynı işlem R_k için yapıldığında; $R(t) = e^{-\lambda t}$, $\ln(0,999) = e^{-\lambda t}$, $\lambda t = 0,001$; t değeri 10 kat küçüldüğünden yeni $\lambda t = 0,001/10 = 0,0001$ olur ve yeni $R_k = e^{-0,0001} = 0,999$ olarak bulunur. Buradan bir yıllık çalışma periyodunda klima sisteminin yaz mevsimi için güvenilirlik değeri $R_{yaz} = 0,796 \times 0,999 = 0,795$ olarak bulunur.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, elektromekanik sistemlerin güvenilirlik analizlerinin nasıl yapılacağı irdelenmiştir. Yapılan örnek uygulamayla, uygulamanın konusu olan ve buna benzer sistemlerin güvenilirlik analizlerinin nasıl yapılabileceği gösterilmiştir. Gerçekleştirilen güvenilirlik analizinde, ilk olarak incelenen sistemin genel tanımı ve bu sistemin hangi ihtiyaçları karşıladığı ortaya konmuştur. Sistemin fiziksel şeması (sistem konfigürasyonu) ve akışkan devre şeması gösterilmiştir. Ardından sistemin Diyagnostik (Arıza ve Muhtemel Sebepler) tablosu, önleyici bakım tablosu ve genel bakım (overhaul) tablosundan yapılan analizle ilgili olan bilgiler alınarak sistemin hata ağacı oluşturulmuştur. Bu hata ağacı güvenilirlik blok diyagramına dönüştürülmüştür. Blok diyagramdaki komponentlere ait güvenilirlik değerleri, komponentlerin analiz periyodundaki arıza sayısı ve işletme şartları (kullanım faktörü) dikkate alınarak hesaplanmıştır. Blok diyagramdaki komponentler arasındaki ilişki baz alınarak da sistemin genel güvenilirlik değeri elde edilmiştir.

Bu çalışmada yolcu vagonlarındaki klima sisteminin RAMS analizinin bileşenlerinden biri olan güvenilirlik değeri hesaplanmıştır. Hesaplamayla klima sisteminin 10 yıllık çalışma periyodu (36500 saat) için güvenilirlik değeri 0,641 olarak bulunmuştur. Bir başka deyişle, bu klima sisteminin 10 yıllık çalışma periyodunda arıza yapmama olasılığı 0,641'dir. Elde edilen değer çok yüksek olmaması normal bir durumdur. Nitekim 10 yıllık bir periyotta, farklı hava koşullarıyla karşılaşacak bir klima sisteminin arıza yapma olasılığının çok düşük olmaması beklenir. Sistemde yedekleme termostatı'nın kontrolörü yedeklemesi (kontrolör arızalı konuma geçtiğinde onun yerine görev yapması) kontrolörün güvenilirliğini 0.842den 0,999'a çıkarmıştır. Bu durum aynı zamanda sistemin genel güvenilirliğini de yukarı çekmiştir.

Klima sistemine dair elde edilen bu güvenilirlik değeri aynı zamanda ürün yaşam döngüsü maliyetinin hesaplanmasına esas teşkil etmektedir. Çünkü ürün yaşam

döngüsü maliyetinin önemli bileşenlerinden birisi de arıza bakımlarının maliyetidir. Arıza bakımlarının maliyetini belirleyebilmek için ürün yaşam döngüsündeki arıza sayısının bilinmesi gerekir. Ürünün yaşam döngüsündeki arıza sayısına ulaşabilmek için de güvenilirlik analizi kullanılır. İleri bir çalışma olarak, MTTR (Onarım İçin Ortalama Zaman) hesaplaması ve bunun ürün yaşam döngüsü maliyetine nasıl dönüştürüleceği düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] ANONİM, Raylı Sistemler Teknolojisi Alanı, MEB MEGEP Projesi http://emezun.meb.gov.tr/doc/tanitimmodulu/35-Rayli_Sistemler.pdf, (Erişim Tarihi: 04.03.2012).
- [2] ÖĞÜT, K. S., EVREN G., Türkiyede Kentsel Raylı Sistemlerin Gerekliği ve Uygulamada Dikkat Edilecek Konular. Uluslararası Demiryolu Sempozyumu, 2006.
- [3] GÜNDOĞDU, F., DAL. E., Demiryolu Projelerinde Rams Yönetimi ve Lcc (Life Cycle Cost) Kavramı. Transist Dördüncü Ulaşım Sempozyum ve Dergisi, 2011.
- [4] ÖZDEMİR, A., Reliability Analysis and Power System Applications. Lecture Notes, 2011.
- [5] ANONİM, Guideline for LCC and RAMS Analysis. Innotrack Guideline 2006.
- [6] EBELİNG, C. E., An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering. McGraw-Hill, Singapur, 1997.
- [7] DHILLON, B.S., Engineering Maintainability. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1999.
- [8] DHILLON, B.S., Applied Reliability And Quality. Springer-Verlag London Limited, London, 2007.
- [9] SHAFER, S. M., MEREDITH, J. R., Operations Management. John Wiley & Sons, New York, 1998.

- [10] ATAMER, Ş., ÇAVDAR. K., Tek Kademeli Dişli Kutusunun Güvenilirlik Analizi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 14, Sayı 1, 2009.
- [11] VOLKANOVSKI, A., CEPIN. M., ve MAVKO. B., Application of the Fault Tree Analysis for Assessment of Power System Reliability. Reliability Engineering & System Safety, Volume 94, Issue 6, June 2009, Pages 1116–1127
- [12] SHALEV, D. M., TIRAN. J., Condition-Based Fault Tree Analysis (CBFTA): A New Method For Improved Fault Tree Analysis (Fta), Reliability And Safety Calculations. Reliability Engineering & System Safety, Volume 92, Issue 9, September 2007, Pages 1231–1241.
- [13] ARWASHAN, N., Matrix formulation For The Calculation Of Structural Systems Reliability. Computers & Structures, Volume 66, Issue 5, March 1998, Pages 525–534.
- [14] ERMOLIN. Y. A., Reliability Calculation Under Seasonally Varying Failure Rate. ISA Transactions, Volume 46, Issue 1, February 2007, Pages 127–130
- [15] DEVOOGHT. J., TOMBUYSES. B., Aggregation Methods for Reliability and Availability Calculations. Reliability Engineering & System Safety, Volume 51, Issue 1, 1996, Pages 23–34.
- [16] VERMA, A.K., SRIVIDYA, A., KARANKI D. R., Reliability and Safety Engineering. Springer-Verlag London Limited, London, 2010.
- [17] WASSERMAN, G. S., Reliability Verification, Testing, and Analysis in Engineering Design. CRC Press, 2002.
- [18] BIROLINI, A., Reliability Engineering Theory And Practice. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 2007.

- [19] AMSTADTER, B. L., Reliability Mathematics. McGraw-Hill, New York, 1971.
- [20] LEWIS, E. E., Introduction to Reliability Engineering. John Wiley & Sons, Canada, 1987.
- [21] ANONİM, Reliability Glossary.
http://www.weibull.com/knowledge/rel_glossary.htm#F, (Erişim Tarihi: 02.03.2012)
- [22] BERTSCHE, B., Reliability in Automotive and Mechanical Engineering - Determination of Component and System Reliability. Springer-Verlag, 2008.
- [23] KAPUR, K.C., Reliability and Maintainability Handbook of Industrial Engineering. John Wiley & Sons, New York, 1982, pp. 8.5.1–8.5.34.
- [24] DHILLON, B. S., Reliability, Quality, and Safety for Engineers. CRC Press 2004.
- [25] MISHRA, R.C., SANDILYA, A., Reliability and Quality Management. New Age International , Daryaganj, Delhi, IND, 2009.
- [26] COX, S., TAIT, R., Safety, Reliability and Risk Management - An Integrated Approach. Elsevier, 1998.
- [27] KUMAR, D., CROCKER, C., CHITRA, T., SARANGA, T., Reliability and Six Sigma. Springer Science+Business Media, 2006.
- [28] ZIO, E., Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis. World Scientific, River Edge, NJ, USA, 2007.
- [29] RINGDAHL, L. H., Safety Analysis Principles and Practice in Occupational Safety. Taylor and Francis, London / Newyork 2001.

- [30] ÖKTEM, R., Hata Ağacı Analizi. www.ttb.org.tr/RD/data/FTA.doc, (Erişim Tarihi: 01.04.2012).
- [31] ANONİM, Hata Ağacı Analizi. <http://www.icsturkey.com/105-inv-05-hata-agaci-analizi.html>, (Erişim Tarihi: 01.04.2012).
- [32] CHAUDRON, M.R.V., Reliability Block Diagram Analysis And Tactics. www.win.tue.nl/~mchaudro/sa2007, (Erişim Tarihi: 03.04.2012).
- [33] ANONİM, Raylı Sistemlerin Kullanım Alanları ve Çeşitleri. www.megep.meb.gov.tr, (Erişim Tarihi: 05.04.2012)

ÖZGEÇMİŞ

Çağatay TEKE, 18.10.1987 tarihinde Sakarya'nın Pamukova ilçesinde doğmuştur. İlkokul 5.sınıfa kadar Pamukova Fatma Hanım İlköğretim Okulunda öğrenim görmüştür. Daha sonra ise Mithatpaşa Şehit Ahmet Akyol İlköğretim Okulunda öğrenimine devam etmiştir ve İlköğretimini bu okulda tamamlamıştır. 2001 yılında Sakarya Anadolu Lisesinde eğitim görmeye başlamıştır ve 2005 yılında mezun olmuştur. 2005 yılından itibaren ise Sakarya Üniversitesinde eğitim ve öğrenime başlamıştır ve 2009 yılında mezun olmuştur. Aynı sene Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde yüksek lisansa başlamıştır. 2011 yılında Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaya başlamıştır. Halen Sakarya Üniversitesinde görev yapmaya ve öğrenimine devam etmektedir.