

**HAVACILIK GÜVENİLİRLİK ANALİZİ  
TEKNİKLERİ VE  
OTOMOTİV TASARIMLARINDA  
KULLANILABİLİRLİĞİ**

**Selahattin GÖKDENİZ**  
Yüksek Lisans Tezi

**Sivil Havacılık Anabilim Dalı**  
Eylül-2006

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Selahattin Gökdeniz'in "Havacılık Güvenilirlik Analizi Teknikleri ve Otomobil Tasarımında Kullanılabilirliği" başlıklı Sivil Havacılık Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 16 Ağustos 2006 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı) : Yard. Doç. Dr. HAKAN KORUL	.....
Üye : Yard. Doç Dr. AYŞE KAHVECİOĞLU	.....
Üye : Yard. Doç. Dr. ENDER GEREDE	.....

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

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **HAVACILIK GÜVENİLİRLİK ANALİZİ TEKNİKLERİ VE OTOMOTİV TASARIMLARINDA KULLANILABİLİRLİĞİ**

**Selahattin GÖKDENİZ**

**Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Sivil Havacılık Anabilim Dalı**

**Danışman: Yard. Doç. Dr. Hakan KORUL  
2006, 82 sayfa**

Bu tez çalışmasında güvenilirlik temel kavramları ve analiz yöntemleri ele alınmıştır. Sistem, sistemin yapısı ile mühendislik ürünlerinde arıza oluşma nedenleri sıralanmıştır. Güvenilirliğin kalite ve sağlamlık ile ilişkisi gösterilmiştir. Sistemin hasarlanmaya karşı koyan iç karakteristikleri ve sisteme etkileyen dış kuvvetler (yükler) üzerinde durulmuştur. Güvenilirlik teknikleri ve yardımcılarından Hata ağacı analiz, hata türleri ve etkileri analizi, kalite fonksiyon yayılımı, uzman ve geri dönüş bilgileri ile güvenilirlik veri bankaları incelenmiştir. Yöntemlerin otomobil tasarımında kullanılabilirliğini göstermek için çelik bir plakanın kopma mekaniği örnek olarak verilmiştir. Sistemin mekanik ve matematiksel modellemesi yapılmıştır. Hesaplama tekniği olarak sistem fonksiyonunun gradyan vektörünün bulunması kullanılmıştır. Bölgesel duyarlık analizi ile tasarım ölçütlerindeki (giriş faktörleri) yüzde değişimlerin sistem performansını hangi ölçüde etkilediği hesaplanmış bulunan sonuçlar yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Güvenilirlik, Hata Ağacı Analizi, Kalite Fonksiyon Yayılımı, Yük-Dayanım Çakışması, Duyarlık Analizi.

**ABSTRACT****Master of Science Thesis****METHODS OF RELIABILITY IN AVIATION  
AND APPLICATION TO VEHICLE DESIGN****Selahattin GÖKDENİZ****Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Civil Aviation Program****Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hakan KORUL  
2006, 82 pages**

Main reliability basis and some tools are mentioned in this thesis. Systems, structure of systems and reasons of malfunctions which can be occurring in some engineering products are examined. Relationship between reliability, quality and robustness is explained. Reliability techniques such as fault tree analysis, fault modes and quality function deployment are given in details.

As an example mechanics of breakaway of a steel plate is given. Gradient vector of system function is calculated to use the analysis method. By local sensitivity analysis, percentages changes in design factors are read to deduce the effects of these parameters on system performance.

**Keywords:** Reliability, Fault Tree Analysis, Quality Function Deployment, Load-Strength Interference, Sensitivity Analysis

**TEŐEKKÖR**

Bu tez alıŐmasını gerekleŐtirmemde önemli katkısı ve yardımları olan danışman hocam Yard. Do. Dr. Hakan KORUL'a teŐekkÖr ediyorum.

Selahattin GÖKDENİZ

Eylöl2006

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. GÜVENİLİRLİĞE GİRİŞ ve TARİHÇE</b> .....	<b>3</b>
2.1. Güvenilirlikte Atılan İlk Adımlar; Yapıların İnşası ve Hammurabi Kanunları .....	3
2.2. Endüstri Devriminden Bugüne .....	6
2.2.1. II Dünya Savaşı'na kadar güvenilirlik .....	6
2.2.2. 1940'lı yıllarda güvenilirlik .....	7
2.2.3. 1950'li yıllar .....	9
2.2.4. 1960'lı yıllar .....	10
2.2.5. 1970'lerde güvenilirlik .....	12
2.2.6. Günümüzde güvenilirlik .....	12
<b>3. GÜVENİLİRLİKTE TEMEL KAVRAMLAR ve YÖNTEMLER</b> ....	<b>14</b>
3.1. Temel Kavramlar .....	14
3.1.1. Kalite ve güvenilirlik .....	14
3.1.2. Sağlık ve güvenilirlik .....	15
3.1.3. Güvenilirlik mühendisliği (Reliability Engineering) .....	15
3.1.4. Güvenilirlik ihtiyacı nasıl doğdu .....	15
3.1.5. Mühendislik ürünleri niçin arızalanır .....	17
3.1.6. Risk .....	20
3.1.7. Arıza tanım ve sınıflamaları .....	21

3.1.7.1. Arızanın ortaya çıkma hızı bakımından sınıflandırılması	21
3.1.7.2. Etki büyüklüğüne göre sınıflama	21
3.1.7.3. Hatanın yayılma hızı ve genliği ile ilgili sınıflama	22
3.1.7.4. Sistemin değişik yaşam profilinde oluşan arızaların sınıflaması (arıza karakteristiği)	22
3.1.7.5. Arızaların etkileri bakımından sınıflandırma	23
3.1.7.6. Hatanın nedenleri bakımından sınıflama	23
3.1.8. Güvenilirlik karakteristikleri (RAMS)	24
3.1.9. Güvenilirliğin bazı göstergeleri	25
3.1.10. Sistem	26
3.1.10.1. Sistem, alt sistem, sistem bileşenleri parça zinciri	27
3.1.10.2. Sistemleri doğası yönüyle sınıflama	28
3.1.10.3. Sistemlerin temel karakteristikleri	29
3.2. Analitik Yaklaşım Metotları	29
3.2.1. Endüktif yaklaşımlar	30
3.2.2. Dedüktif yaklaşımlar	30
3.2.3. Endüktif yaklaşımlara genel bakış	30
3.2.3.1. Parça sayımı yaklaşımı	31
3.2.3.2. FMEA tekniği	32
3.2.3.3. FMECA tekniği	33
3.2.3.4. PHA analiz tekniği	34
3.2.4. Hata ağacı analizi (Fault Tree Analysis - FTA)	35
3.2.4.1. Hata ağacı metodolojisi	35
3.2.4.2. FTA temel kavramları	36
3.2.4.3. İstenmeyen olay kavramı	37
3.2.4.4. Hata ağacının temel elemanları	38
3.2.4.5. Semboller ve hata ağacının blok yapısı	38
3.2.4.6. Hata ağacı hazırlamak için temel kurallar	41
3.2.4.7. Pistonlu motorlu uçağın ateşleme sistemi için hata ağacı	42
3.2.4.8. PFTA tam hata ağacı	44
3.3. Kalite Fonksiyon Yayılımı QFD (Quality Function Deployment)	45
3.3.1. Yöntem ve araçlar	46

3.3.2. Kalite evinin kurulma aşamaları .....	47
3.4. Geri Dönüş Bilgileri ve Uzman Görüşleri .....	48
3.4.1. Bilginin birikimi .....	48
3.4.2. Bilgi birikimi metotları .....	49
3.4.3. Bilgi bankaları .....	49
3.4.4. Veri tabanı yönetim sistemi .....	50
3.4.5. Güvenilirlik veri bankaları .....	50
3.4.6. Güvenilirlikte bir veri tabanının genel amaçları .....	51
3.4.7. Bilgi birikimi ve yönetimi konusunda karşılaşılan güçlükler .....	52
3.4.8. Güvenilirlik hataları veri bankası .....	52
3.4.9. Tarihsel olarak temel endüstriyel veri tabanları.....	53
3.4.10. Geri dönüş bilgileri .....	53
3.4.11. Uzman görüşleri .....	55
3.4.12. Bilirkişi çalışmasına karar verilmesi .....	56
3.5. Yük Dayanım Çakışması .....	57
3.5.1. Yük dayanım fonksiyonları dağılımı .....	58
<b>4. GÜVENİLİRLİK DUYARLIK ANALİZİ UYGULAMASI .....</b>	<b>61</b>
4.1. Giriş .....	61
4.2. Duyarlık Analiz Matematiği .....	61
4.3. Determinist Bölgesel Duyarlık Ölçümü .....	65
4.3.1. Duyarlığın birinci ölçümü .....	65
4.3.2. Duyarlığın ikinci ölçümü .....	66
4.4. Tasarım Parametreleri Karşısında Hata Türlerinin Duyarlık Analizi .	66
4.4.1. PFTA ve QFD ile bölgesel duyarlık analizi .....	67
4.4.2. PFTA ve QFD uygulaması .....	68
4.5. Çatlak Açılmış Bir Plakanın Kopma Riski İçin Duyarlık Analizi .....	73
<b>5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME .....</b>	<b>78</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>80</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Farmer Diyagramı (1967) .....	4
2.2. İnsanlık tarihi boyunca bilginin gelişimi .....	6
3.1. Algılanan risk .....	17
3.2. Sisteme gelen dış etkiler ve sistemin iç kapasitesi .....	17
3.3. Yük-dayanım dağılım fonksiyonları .....	19
3.4. Yük ve dayanımın zamana bağlı değişimi .....	19
3.5. Bir ürünün zamanın fonksiyonu olarak farklı yaşam periyotları .....	22
3.6. Güvenilirliğin temel göstergeleri .....	26
3.7. Bir sistemin ve bileşenlerinin gösterimi .....	28
3.8. VEYA kapılı hata ağacı olayı .....	40
3.9. Hata ağacı hazırlama mantığı .....	42
3.10. Pistonlu motorlu uçak için güvenilirlik blok diyagramı .....	43
3.11. Ateşleme sistem arızası için hata ağacı .....	43
3.12. Ateşleme sistemi için hazırlanmış tam hata ağacı (PFTA) .....	45
3.13. Kalite evinin temel bölümleri .....	46
3.14. Güvenilirlikte geri dönüş bilgilerinin ana etapları .....	55
3.15. Emniyet payı ve yük şiddetinin etkileri .....	59
4.1. Sistem prensip şeması .....	62
4.2. Tek değişkenli bir fonksiyonun gradyan vektörü .....	63
4.3. Tek değişkenli bir fonksiyonun bölgesel ve global minimumları .....	63
4.4. Hatanın yayılma yolu üzerinde eğilim grafiklerinin gösterilmesi .....	67
4.5. Kalitatif ve kantitatif analiz metodolojisi .....	69
4.6. İki parametreye bağlı bir problem için güvenlik ve arıza bölgeleri .....	71
4.7. Mekanik güvenilirlik problemi şeması .....	74
4.8. Üzerine yarık açılan çelik plakada kopma kırılması için hazırlanmış tam hata ağacı (PFTA) .....	74

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

3.1. Hata etkileri ağırlık tablosu .....	23
3.2. Parça sayımı yaklaşımında bileşenler ve arıza olasılıkları .....	31
3.3. Elektronik bir devre için hata türlerinin gösterilişi .....	33
3.4. Hata ağacı sembolleri .....	39
4.1. Tasarım kriterlerinin nominal değerleri .....	75

## 1. GİRİŞ

Havacılık güvenilirlik analizi teknikleri ve otomotiv alanında kullanılabilirliği konulu bu çalışmanın güvenilirlik tekniklerinin bir sentezi olması amaçlanmıştır. Güvenilirlik bugün otomotiv tasarım ve üretimi içine katılmıştır. Son yüzyılda gelişen ve olgunlaşan güvenilirlik yöntemleri, tasarımda belirlenen ihtiyaçlara cevap verebilirliği yönüyle seçilip uyarlanır. Taşıt tasarım ve üretiminde karmaşıklaşan sistemler, yeni malzeme ve teknolojilerin kullanılmasıyla güvenilirlik konusunda kendi standartlarını ve yöntemlerini yaratmak zorundadır. Farklı güvenilirlik tekniklerinin otomobil tasarımında ne şekilde kullanılabileceğinin ortaya konulması bu çalışmada ulaşılmak istenen asıl hedeftir.

Faydalanılan teknikler yakın tarihte gelişme göstermiştir. İkinci bölümde bu tarihsel gelişim anlatılmaktadır. Bu bölümde mevcut bilgi birikimi ve hesaplama tekniklerine, çok daha sonraları katılan, güvenilirlik teknikleri anlatılmıştır. Havacılıkta güvenilirlik konusu kronolojik sıra ile verilmiştir.

Üçüncü bölüm de güvenilirlik için temel kavram ve yöntemler verilmiştir. Bu bölümde açıklanan analiz teknikleri örnek uygulamanın yer aldığı son bölümle paralel ve uyumlu olacak şekilde anlatılmıştır. Hata Türleri ve Etkileri Analizi, Hata Ağacı Yöntemi, Kalite Fonksiyon Yayılımı ile Güvenilirlik Veri Bankaları ve Uzman Görüşleri son bölümde faydalanılan teknikler olduklarından, temelleri üzerinde üçüncü bölümde durulmuştur. Geliştirilen yöntemler havacılık kökenli olsun ya da olmasın hemen her alanda kullanılır olduğundan havacılıkta güvenilirlik adı altında ayrı bir bölüm verilmemiştir. Özellikle uç teknolojiler olarak kabul edilen Havacılık ve Uzay, Nükleer Enerji, Petrol ve Petrokimya dalları birbirlerinden alıntılarla yalnızca bu teknikleri kullanmakla kalmamışlar, gelişimine ve olgunlaşmalarına katkı sağlamışlardır.

Dördüncü bölüm örnek uygulamanın yer aldığı bölümdür. Otomobil tasarımı ve mekanik sistemlerin güvenilirlik analizleri için üçüncü bölümde anlatılan teknikler somut bir örneğe uyarlanmaya çalışılmıştır. Tasarım parametreleri ya da diğer deyişle sistem giriş parametrelerinin belirli oranlarda değişikliklerinin sistemin güvenilirliğini ne ölçüde etkileyebilecekleri

gösterilmiştir. 2003 yılında Renault Techno Centre'da gerçekleştirilen bu çalışmalara hata ağacının hazırlanması boyutuyla katkı sağlanmıştır.

Son bölümde elde edilen bulguların bir değerlendirmesi yapılmıştır. Bu tür bir çalışma sonucunda sistem için ilave öngörülmesi gerekli konulara değinilmiştir.

## 2. GÜVENİLİRLİĞE GİRİŞ ve TARİHÇE

### 2.1. Güvenilirlikte Atılan İlk Adımlar; Yapıların İnşası ve Hammurabi Kanunları

İnsanoğlunun adım adım belirsizliğin riskini mantık çerçevesinde yenip yeterince kesinliğe uzanan gelişiminden bahsetmek gerekecektir. Bu yolda atılmış önemli imzalar bulunur. Tecrübelerden elde edilen bilgi birikiminin yanında matematiksel hesaplamalar konusundaki ilerlemeler tarihsel gelişimde daha tutkulu tasarımlar ve ürünler yaratılmasına yol açmıştır.

Muhakkak ki Hammurabi tarihte güvenilirlik konusunda ilk kuralları ortaya koyandır.[1] Bu büyük Babil Kralı milattan önce 1755'lerde bilinen ilk talimatları ortaya koymuştur. Mezopotamya coğrafyasında 1000 yıl boyunca bu kurallar geçerliliğini korumuştur. Dönemin evlerinin inşası ve bu işi yapan inşaat ustalarının sorumlulukları hakkında kurallar getirmiştir. Bu kurallardan;

'Madde 229: Bir inşaat ustası birisi için bir ev yapmış fakat yeterince sağlam yapmadığından ev yıkılmış ve ev sahibi bu olay sonucunda ölmüşse bu inşaat ustasına ölüm cezası verilir',

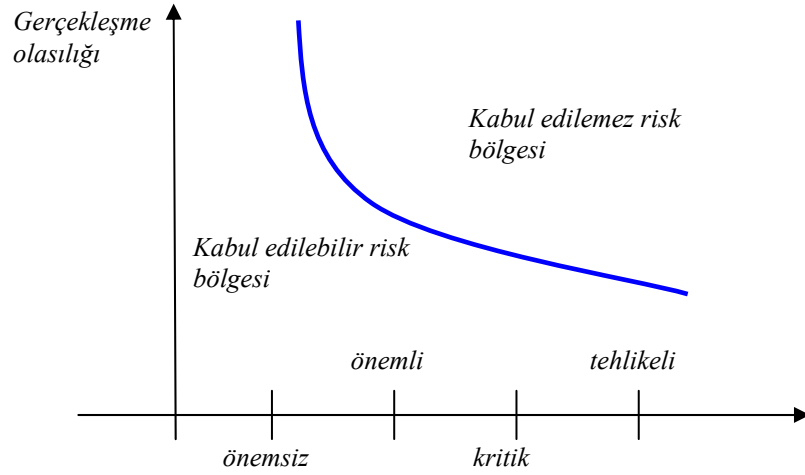
'Madde 230: Eğer yapının yıkılması sonucu mal sahibinin bir çocuğu ölmüşse bu ustanın bir çocuğu öldürülür'

hükmünü getirmiştir.[2]

Bu kanun maddelerinde not edilmeye değer durum yapıların inşasındaki güvenilirliğin tasarımcıya transfer edildiğini göstermesidir. Muhtemel kötü sonuçlar karşısında sorumluluk doğrudan yapımcıya yüklenmiştir. Gerçekte risk olayın ortaya çıkma ihtimali ve bu olayın sonuçlarına göre tanımlanır. Bu bağıntı Denklem 2.1 ile ifade edilebilir.

$$\text{risk} = \text{olasılık} \times \text{sonuçların ağırlığı} \quad (2.1)$$

Kullanım sırasında ortaya çıkması muhtemel olumsuz sonuçları azaltabilmek için inşa edenin sorumluluğunu arttırma yoluna gidilmiştir. Bu aynı zamanda Farmer diyagramının doğrudan bir uygulamasıdır.[3] Risk yaratan olayın gerçekleşme olasılığı ve sonuçlarının ağırlığı arasındaki ilişkiyi temsil eden bu diyagram Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.1.** Farmer diyagramı (1967) *Sonuçların ağırlığı*

Buna göre inşaat ustası şüphelenilen olayın sonuçlarının kendisi için ağır olacağını bildiğinden böyle bir olayın gerçekleşmesi ihtimalini azaltmaya girişecektir. Hammurabi olayın sonuçları üzerinde kurallar koyarken örneğin inşa etme yöntemlerini belirlemede serbest bırakmaktadır. Hammurabi Kanunları çok sonraları resmi otoritelerin belirlediği yazılı kuralların ve talimatların ilk halidir. Güncel talimatlara göre bu kurallar barbarlık olarak görülebilir. Oysaki taraflar arasında kan davasına neden olabilecek uygulamaların önüne geçebilmek hedeflenmiştir.

İnsanoğlunun bilimsel arayışında tecrübelerin birikimi ve öngörüsül modellerin hazırlanmasıyla bugün sorumluluk bir kişiye değil de kolektif bir gruba, sözgelimi mühendislere, dağıtılmaktadır.

Antik çağlardan beri hızlanarak gelişen statik bilgisi ve bilinmeyene hâkim olma çabaları orta çağ katedrallerinde olumlu/olumsuz etkilerini göstermiştir. Bu çağda deneme yanılma yoluyla bilinen birtakım başarısızlıklar da yaşanmıştır.[4] Genel olarak bir yapı sağlamlığını kanıtlamışsa bu yapının ölçek olarak büyütülmüş halinin de aynı derecede güvenilir olacağı düşünülmüştür. Rönesans döneminde felakete neden olan hatalar için ilerlemenin bedeli olduğu düşünülmekte ve ortaya çıkışlarının tanrının işi olduğu görüşü yaygın kanı olarak görülmektedir.

Leonardo da Vinci (1452–1519) kirişlerin dayanımı ve üzerlerine gelen

yüklerle ilişkisini incelemiştir. Kısa bir süre sonra Galileo yine kirişlerin dayanımlarını optimize etmeye çalışan böylece ilk modelleme çalışmaları üzerinde duran isim olmuştur.[4]

Fiziki gerçeklik ve hâkim olunan mevcut bilinen arasında tam olarak modellenemeyen fark vardır. Blaise Pascal (1623–1662) bu konu üzerinde;

‘Yarın ve bilinmeyen için çalışırken mantıkla hareket ederiz. Kanıtlanmış verilerin dağınıklığı bilinmezlik içinde çalışmamızı gerektirir’

demiştir. Pascal’ın bu önergesinin birinci bölümü basittir. ‘Yarın için çalışıyoruz’ bilimde ilerlemeye katkı sağlayan araştırmalarda ve olaylar hakkındaki bilgileri arttırmak için modellemeler yapıldığını belirtir. ‘Bilinmeyenle çalışıyoruz’ çünkü asla tüm verilere sahip olunamamaktadır. Bilginin fethinde ve daha cüretli yapılar ve makineler üretme arzusu ile insanoğlu ilerleme umudu için riskler göze alır. Pascal bu şekilde bilinmeyenler içinde karar alabilmeye katkı sağlamıştır. Eğer herkes verilerin bilinmezliğini kabul edip risk almasaydı, model en son kabul edilenden farklı olmayacaktı.

Bilimin bu dalında gelişimin en önemli motorlarından birisi de Güneş sisteminin incelenmesi konusundadır. Çünkü bu insanoğlunu modelleme kapasitesinden çok hassas ölçüm kapasitesine yöneltmiştir.

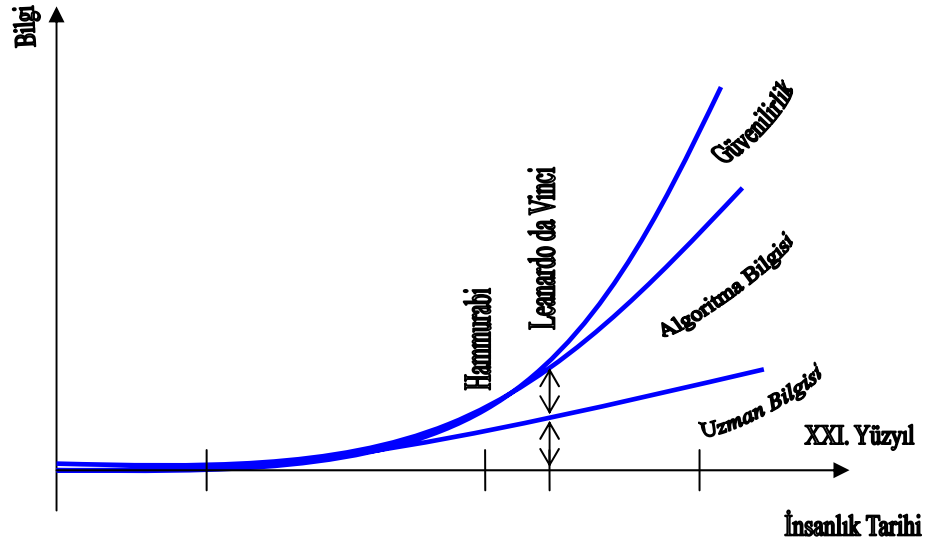
Nobel ödüllü Henri Poincaré 1903 yılındaki makalesinde öngörülme-yeni belirlenmiş sistemler içinde bir çerçeveye oturtmuş ve şunları belirtmiştir;

‘Çok küçük bir sebep, görmeyi beklemediğimiz ve rasgele diye tanımladığımız önemli bir etkiye neden olabilir. Başlangıçtaki çok küçük farkların sonuç üzerindeki çok büyük etkisiyle tahmin yapmak imkânsız olur ve biz rasgele olaylarla karşı karşıyayız’.[5]

Antik çağlardan itibaren endüstri devrimine kadar geçen geniş zaman aralığında tabiata ve meydana gelen fiziksel olaylara hâkim olmanın temelleri atılmıştır. Hesaplama teknikleri dolayısıyla matematik alanındaki gelişmeler bunun en önemli yardımcıları olmuştur. Bilginin tarihsel gelişiminde bilgi kaynaklarının değişimleri Şekil 2.2’de görülmektedir.

Bilginin iki farklı biçiminde; hesaplama bilgisi alanındaki gelişim ve

tecrübelere dayalı uzman bilgilerindeki değişim belki de çok küçük adımlarla başlamıştır ancak gelecekteki çok hızlı gelişmelerin yolu bu dönemde açılmıştır. Güvenilirlik alanındaki bilgilerimizin, bu ikisine, günümüze daha yakın zamanda katıldığı görülmektedir. İlerleyen bölümlerde de görüleceği gibi bu alandaki gelişim yine adım adım başlamış ve günümüzdeki durumuna hızlanarak gelmiştir.



Şekil 2.2. İnsanlık tarihi boyunca bilgi ve bilgi kaynaklarının gelişimi

## 2.2. Endüstri Devriminden Bugüne

### 2.2.1. II Dünya Savaşı'na kadar güvenilirlik

Endüstri çağının başlangıç döneminde çalışmalar daha çok buharlı makineler ve demiryolları konusunda yani mekanik sistemlerde yoğunlaşmıştır. Elektriğin güçlü bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir duruma gelmesi ve yaşanan değişimler mühendisleri bu konu üzerinde çalışmaya yöneltti. İletim hatlarının ve transformatörlerin paralel bağlanmaları ve yüksek gerilim şebekelerinin bir birleri arasında bağlanmaları bu dönemdedir. Malzeme kalitelerinin iyileştirilmesi ve yedekleme tekniğinin kullanılması yaşanan güvenilirlik sorunlarının giderilmesine ve çözümüne yardım etmiştir.[6,7]

Hava taşımacılığının gelişme göstermesiyle güvenilirliğin başka bir boyutu ortaya çıkmıştır. Uçaklar üzerindeki farklı donanımların ve özellikle motorların arıza sıklığı konusunda istatistikî veriler elde edilmesi için kayıtlar tutulmaya başlanmıştır. 1930'lu yıllarda kayıt altına alınan bilgilere uçak kazaları



istatistikleri de eklenmiştir. Elde edilen veriler, bu alanda muhtemel iyileştirmelerin sağlanması ve bir hedefe yönelmeye imkân verecek olmasından dolayı önemlidir. Pugsley, 1939 ve 1942 yıllarında Londra Havacılık Araştırma Konseyinde yayınladığı raporunda bir uçak kazasına yol açabilecek olası muhtemel tüm hata sebeplerinin uçuş saati başına  $10^{-5}$ 'i geçemeyeceğini ve uçağın gövde yapısına bağlı sebepler için bu oranın  $10^{-7}$ 'den az olması gerektiğini söylemiştir. Havacılık emniyeti için ilk risk hedeflerini ortaya koymuştur.[8]

Genel anlamda 1940'lı yıllardan önceki dönemde, güvenilirlik tekniği ve emniyeti tasarımcıların yaşadıkları tecrübeler ve sezgilerine dayanan sübjektif bir yaklaşım gösteriyordu. Yaşanan çok sayıda ve önemli endüstriyel felaketlerin analiz edilmeye başlanması bu yaklaşımdan kurtulma konusunda eğitici olmuştur. Bunlardan birisi de 1912 yılında meydana gelen Titanic faciasıdır.[9] Batmayacağı konusunda yaygın bir kanı oluşmuş gemi ilk yolculuğunda bir buzdağına çarparak hasarlanmış ve gövde su alarak geminin batmasına neden olmuştur. Gerçekte geminin alt bölümü 16 kompartımana ayrılmıştı. Bu bölmeler birbirinden otomatik olarak açılıp kapatılabilen kapaklarla ayrılıyorlardı. Bölmeleri birbirinden ayıran kapaklar yeterince yüksek olmadığından bağımsız olarak hiçbir bölme tam olarak sızdırmaz değildi.[9,10] Buz dağına çarpmasının ardından hasarlı bölmede yükselen su diğer bölmelere de geçebilmiş ve geminin batmasına yol açmıştır.

Güvenirliğin sağlanması metotları bilimsel tekniklerden ziyade bir sanat ve yetenek konusu olarak görülüyordu. Sıkça kritik olduğuna inanılan elemanların güçlendirilmesi ile yetiniliyordu. Güvenilirlik konusuyla ilk olarak ilgilenmeye başlayan mühendislerin çıkış noktaları bir zincirin en zayıf halkası kadar sağlam olabileceğiydi.[6,7] Mantık olarak zincirin uçlarındaki yük kademeli şekilde arttırıldığında kopma zincirin elbette en zayıf halkasında beklenirdi.

### **2.2.2. 1940'lı yıllarda güvenilirlik**

II. Dünya Savaşı yılları mühendislik çalışmalarında rastlantılara daha az yer bırakılmaya çalışılan ve bu konuda seferber olunan yıllar olmuştur. Almanya'da yürütülen V1 füze projesi güvenilirlik öngörü modelinin kullanıldığı, bu alandaki ilk çalışmadır.[6,8] Başlangıç serisindeki sayıları 10 kadar olan

füzelerin, hedefe ulaşmadan fırlatma bölgesi yakınında ya da Manş Denizi'nde bir yerlere düşmesi güvenilirlik çalışmalarının başlatılmasına neden oldu. Bu alanda çalışmalar yapan ilk öncülerden birisi olan R. Lusser, V1 motorları konusundaki problemleri gidermek için ekibiyle nasıl çalıştıklarını şöyle anlatıyor;

‘Füzelerin işlevsel elemanları için sistemin en zayıf halka kadar güçlü olacağına inanıyorduk. Gerçekte motor çok basit sayılabileceği halde sürekli başarısızlık yaşıyordu.’

Kullanılan elemanların seçiminde çok büyük dikkat sarf edildiği halde V1'ler güvenilirlikten %100 uzaktılar;

‘Denemelerde en sağlam halka olarak kabul edebileceğimiz elemanın bile arızalandığını ve görevin başarısız olmasına neden olduğunu tespit ettik. Bir sistemin güvenilirliği onu meydana getiren elemanların ortalama güvenilirliğine eşit olduğunu düşünmeye başlamıştık ki denemelerin bunu da doğrulamadığını gördük. Sistemin güvenilirliği elemanlarının ortalama güvenilirliğinden açık şekilde daha azdı.’

Problem konusunda aynı projenin başka bölümünde çalışan E. Peruschka'dan yardım istendi. Peruschka'nın açıklamaları genel bir şaşkınlık yarattı. Sistemi oluşturan bir elemanın sağlam kalma olasılığı  $\frac{1}{x}$  ise birbirinin aynı  $n$  adet eleman bir araya geldiğinde bu olasılık  $\frac{1}{x^n}$  oluyordu. Elemanların seri montaj edilmesi durumunda güvenilirlik bugün Lusser kuralı olarak ta bilinen Denklem 2.2 biçiminde oluşmaktaydı.

$$R_s = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n \quad (2.2)$$

Sonuç olarak sistemi oluşturan bileşenler, sistemin gerektirdiğinden çok daha yüksek güvenilirlikte olmalıydılar. V1 füze projesi, geliştirme çalışmalarının son safhalarında beklenen güvenilirlik seviyesini yakalayabilmişti. Bu proje güvenilirliğin denemelerle doğrulanarak, geliştirildiği ve iyileştirildiği ilk endüstriyel sistem olarak tarihteki yerini almıştır.

Amerika Birleşik Devletleri'nde 1940'lı yıllar güvenilirliğin iyileştirilmesi

için kalitenin arttırılmasına yönelimin başladığı dönemdir. İstatistik tekniklerini de içine alan kalite kontrol kitapları yazımı katlanarak arttı.

Güvenilirliğin yetersizliği mühendislerin korkulu rüyasıydı. A.B.D.’de Edwards Hava Üssü’nde görevli uçak mühendisi Murphy, kendi adıyla anılan kanunlarla bilinir.[11] 1949 yılında bazı cihazlarda karşılaştıkları problemler için görevli teknisyenlere yönelik söylediği cümle önemlidir. Murphy;

‘Eğer bir işi yanlış yapmanın bir yolu varsa o iş yanlış yapılır’

demiştir. Gerçekte teknolojik hataların incelenmesinde bu kuralların kanıtlanmış başarısı vardır. Sonuçlar değerlendirildiğinde gerçekleşme ihtimali çok zayıf olan sebeplerin bile aslında tüm yaşananların nedeni olabileceği ve atlanmaması gerektiği işaret edilmektedir.

### **2.2.3. 1950’li yıllar**

Mühendisliğin bir dalı olarak güvenirliliğin ve bu konuda yürütülen çalışmaların merkezi bu yıllarda Amerika Birleşik Devletleri’dir. Özellikle elektronikte daha karmaşık sistemlerin ortaya çıkmasıyla bu donanımların kullanıma hazır olma oranlarında büyük düşüşler yaşanmış donanımların yeniden çalışabilir hale getirilebilmesi için yapılan harcamalar önemli miktarlarda artmıştır. Elektronik ekipmanların kullanıcıları, arızaların tespiti ve onarımları için önemli sayıda ve yetişmiş elemana ihtiyaçları olduğunu tespit etmişlerdir. Sözelimi 1937–1952 yılları arasında bir Amerikan destroyerinde elektronik tüpler kullanan donanımların sayısı 60’dan 3200’e çıkmıştı. Bu cihazların herhangi bir anda kullanıma hazır olma oranları incelendiğinde bu değerler %30’dan fazla olmadığı belirlenmiştir. 1952 yılında Amerikan Savunma Departmanı ve Elektronik Endüstrisi Kurumu bir araya gelip AGREE teşkilatını (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment) kurmuştur. Kore Savaşı teknik problemlerin ne kadar kaygı verici düzeyde olduğunu göstermiştir. Savunma departmanı incelemelerinde elektronik cihazların bakım maliyetlerinin boyutlarını ortaya koymuştur. 1 dolarlık elektronik donanımı çalışır halde tutabilmek için her yıl 2 dolar harcama yapılması gerektiği ortaya çıkmıştır.[12] AGREE komisyonu yetersiz güvenilirlik nedeniyle artan bakım onarım maliyetleri döngüsünün kırılabilmesinin bakım konusunun elektronik

ekipmanların ürün geliştirme evresi içine dâhil edilmesine bağlı olduğunu belirledi. Bu nedenle geliştirilecek ekipmanları belki de binlerce saat zorlu çalışma şartlarında (düşük ve yüksek sıcaklık, titreşim, nemli, tozlu ortamlar vb.) testlere tabi tutmak gerekmekteydi. Sistemlerin ancak bu şekilde maksimum miktarda en zayıf olduğu noktaların tespit edilip düzeltilebileceği ve ardından seri üretime geçmenin mümkün olabileceğini belirtilmiştir. AGREE iki konu hakkında ayrıca tavsiyelerde de bulunmuştur. Elektronik cihazlar için bir yandan arızalar arası ortalama geçen süre parametresinin (Mean Time Between Faults) hesaplanması ile güvenilirliklerinin tespitini öte yandan bu MTBF'nin ihtiyaç duyulandan az olmamasını öngörmüştür. Uygulama ilk olarak büyük miktarlarda seri şartlarda üretilen cihazlar için güvenilirlik şartı konulması yönüyle önemlidir. Yine bu dönemde havacılık ve nükleer enerji dallarında emniyet problemlerinin artan önemi için güvenilirlik parametrelerinin kullanımının yaygınlaştığı görülür. Hata oranı ( $\lambda$ ), MTBF gibi.

Diğer taraftan 1956 yılından itibaren her yıl uluslararası bir sempozyum tertip edilmektedir. 'Reliability and Maintainability Symposium' adıyla bilinen bu toplantı IEEE tarafından düzenlenir ve yüzlerce uzmanı bir araya getirir.

#### **2.2.4. 1960'lı yıllar**

Havacılık ve uzay programlarında güvenilirliğin yeni tekniklerinin ve uygulamalarının genişlediği görülür. Bileşenlerin arızaları ve bunların sistemin çalışmasına etkileri incelenmiştir. Mal ve can emniyetinin korunması için çalışmalar arttırılmıştır. Nükleer silahlar alanında hataların öngörü analizleri artan bir öneme sahip oldu. Karmaşıklaşan sistemlerde başarı diyagramı (Success Tree) metodu kullanılmaya başlandı. Hata ağacı kavramı (Fault Tree) Bell Laboratuvarları'nda geliştirildi ve Minuteman füzelerinin fırlatma kontrol sistemlerinin emniyet hesaplamalarında kullanıldı.[12] Ardından Boeing uçak imalatçısı bu kavramı geliştirerek 'sebeplere hata ağaçları' metodunu uygulamaya koydu. Bugün de Boeing geniş ölçekte düzenli olarak tasarımlarında bunlardan faydalanmaktadır.[6] Bir diğer Amerikan uçak üreticisi Mc Donnell Douglas aynı zamanlarda hata türü ve etkileri analizi (Failure Mode and Effect Analysis) metodunu geliştirmiştir. 1960'ların sonunda ABD de bu yöntem havacılık

talimatlarıyla zorunlu hale getirilmiştir. Avrupa da Fransa hata birleşimleri metodunu, Concorde ve ardından Airbus uçaklarının geliştirme programlarında kullanmıştır.[13] 1965'te Amerikan Savunma departmanı sistemler ve bileşenleri için güvenilirlik programları (Reliability Programs for Systems and Equipments) adı altında yeni bir norm yayınlamıştır. Bu doküman tasarım, geliştirme ve üretim aktivitelerindeki güvenilirlik çalışmalarının bütünlüğünün sağlanmasını önermekteydi. Güvenirlik problemlerinin ürün geliştirmenin ilk etaplarında tespit edilip giderilmesini öngörüyordu.

Emniyet ve Güvenilirliğin öngörü analizlerinin 1960'ların sonunda geniş gövdeli uçak projelerinde yer alması sağlanmıştır. NASA, Apollo uzay programında da aynı tekniği kullanılmıştır. Bu tekniğin projenin başarısındaki etkisi büyük olmuştur. Uzay çalışmalarında karşılaşılabilecek risklerle ilgili çok az şey bilinmekteydi. Güvenirlik teknikleri sayesinde bu risklere hakim olma kapasitesinin daha ilk prototiplerden itibaren yüksek olduğu görülmüştür.[10]

Hata analizlerine olasılıkçı bakış, tasarımlara daha çok katılmaya başlandı. Fransa'da olasılıkçı bakış talimatları Concorde'larda uygulanmıştır. Bu kurallar bir taraftan hataların boyutlarına göre sınıflandırılması ilkesini getirirken, önemsiz, az önemli, önemli, çok önemli gibi, diğer taraftan bu hataların her birisi için risk hedefleri belirlenmesini öngörüyordu. Uçak kazalarına neden olan hata oranının uçuş saati başına  $10^{-7}$ 'den küçük olması hedefinin 10 kat daha azaltılması öngörülmüştür. Paralelinde emniyet konusundaki çalışmalar nükleer santrallerin kurulmasında da yerini aldı. Tasarımdan itibaren kazalara neden olabilecek potansiyel hatalar üzerinde çalışmalar ve kazaların karşılaşıma sıklığı ve sonuçlarının ağırlığına göre sınıflandırma yapılmıştır.[14] Genel anlamda 1960'ların sonuna kadar güvenilirlik hesaplama metotları ve analizlerinin yoğun biçimde kullanımı bahsi adı geçen endüstri dallarıyla sınırlı kaldı. Diğer alanlarda güvenilirlikle ilgilenilmeye gelecek on yılda başlanmıştır. Bu endüstrilerde ürünlerin geliştirilip piyasaya verilmesi arasındaki zaman kısıtlaması ve yeni buluşların tam olgunlaşmadan hızlı biçimde kullanılmaya başlaması beraberinde güvenilirliği düşürdü. Japon ürünlerinin başlangıçtaki kalitesizliği onların büyük çabalar sarf ederek kalite ve güvenilirlik tekniklerini üretimlerine entegre etmelerini gerektirdi. Sonuçta tüm dünyaya örnek olan kalite düzeyine ulaştılar.

Kalite çemberleri kurulması bu döneme rastlamaktadır.[15]

Güvenilirlikle ilgili kitap ve yayınlar hızla çoğaldı. Bozovsky'nin güvenilirliğin bütününe kapsayan ve referans olarak kabul edilen kitabı bunlardan birisidir.

IEEE'nin 'Transaction on Reliability' dokümanlarına dönemin önemli matematikçileri hesaplama teknikleri boyutunda katkılar sağlamışlardır. Bunlar arasında Birnbaum, Barlow, Proschan, Easry ve Weibull gibi isimler sayılabilir.

### **2.2.5. 1970'lerde güvenilirlik**

Bir sanayi tesisinde risklerle ilgili bütün bir hesaplama ilk olarak bu dönemde gerçekleştirilmiştir. Profesör Rasmussen nükleer kaza riskini karakterize etmiştir. Sonuçları, insan ve çevre üzerine etkilerini dikkate alarak, hesaplamıştır. Amerikan Three Mile Island nükleer santralinde yaşanan kaza ölümlere neden olmamıştır ancak nükleer tehlikeler konusunda geniş bir kaygı uyandırmıştır. Kazayı araştıran komisyon Rasmussen'in raporunda benzer bir hata senaryosunu önceden öngörmüş olduğunu fark etmişlerdir. 1979 yılında incelemelerini tamamlayan komisyon risk olasılığı analiz metodunun benzer kazalar yaşanmaması için kullanılmasını tavsiye etmiştir. Güvenilirlik idaresi, risk etütlerinde insan faktörünün de dikkate alınması isteğini bildirmiştir.[16]

1980'lere gelindiğinde güvenilirlik, mühendisliğin artık olgunlaşmış bir kolu olarak diğer sanayi kollarında da yerini aldı. Kimya, petrol, demiryolu taşımacılığı ve otomotiv endüstrilerinin güvenilirlik yaklaşımlarını kullanmaya başladıkları görülmüştür. Çalışma alanlarının çeşitliliği ve sistemlerin teknolojik yapılarının farklılığı gecikmede etkili olmuştur. Ayrıca 70'li yıllarda bilgisayar yazılımlarında da güvenilirlik gündeme geldi.

Güvenlik ve güvenilirlik kavramlarının yanına bakım yapılabilirlik ve kullanılabilirliğin katılmasıyla mühendisliğin tam bir dalı olarak yerini almış oldu.

### **2.2.6. Günümüzde güvenilirlik**

Yasal düzenlemeler ve resmi üretim onayları biçiminde ortaya çıkan zorlayıcı şartların iki alanda etkisi olmuştur. Bunlar güvenilirlik araçlarının kullanımının gelişmesi ve yayılması ayrıca risklerin ortaya konulmasına olan

katkılar olarak sayılabilir. Önleme, koruma, kurtarma sistemlerinin gelişmesine rağmen risk her zaman mevcuttur. Paralelinde şirketler arası rekabet edebilirliğin şartları arasında; üretim verimliliğini arttırmak dolayısıyla üretimde duruşları azaltıp, ekipmanların kullanıma hazır olma oranlarını en yukarıya çıkartmak zorunluluğu vardır.

Geniş halk kitlelerinin mal ve can güvenliği konusundaki genel hassasiyet çağımızda hiç olmadığı kadar önem kazanmıştır. Yayın organları ve çevreci kuruluşların baskıları altında şirketlerin sorumlu oldukları faaliyet alanlarındaki hatalarından doğabilecek ağır sonuçlara katlanmaları gereklidir.[7]

### 3. GÜVENİLİRLİKTE TEMEL KAVRAMLAR ve YÖNTEMLER

#### 3.1. Temel Kavramlar

Güvenilirlik, belirlenen normlara göre bir ürünün çalışma emniyetinin ya da çalışma olasılığının ölçüsüdür.[6] Pratikte pek çok tanımın kullanıldığı görülmektedir. Genel anlamda güvenilirlik kullanıcısının kullandığı materyale olan güveninin bir ifadesidir.[6,17] Dar anlamda güvenilirlik bir sistemin ya da gerecin belirlenen kullanım şartları altında belirli bir süre içinde istenilen fonksiyonları gerçekleştirmeye elverişliliğidir (AFNOR X06–501). Matematiksel yönüyle güvenilirlik; bir gerecin kendisinden beklenen fonksiyon ya da fonksiyonları verilen şartlarda belirlenen bir süre boyunca yerine getirmesi olasılığı biçiminde ölçülür ve karakterize edilir. Zaman ifadesi, özelliğine göre çevrim sayısı, kat edilen mesafe gibi değerler olabilir. Güvenilirliğin en iyi tanımı bir ürünün zaman içindeki performansdır.[18]

##### 3.1.1. Kalite ve güvenilirlik

Kalite bir ürün için kullanıcısının isteklerine uygunluk derecesidir. ISO 8402 ise kaliteyi; bir ürün veya hizmetin belirlenen veya olabilecek ihtiyaçları karşılama kabiliyetine dayanan özelliklerinin toplamı biçiminde tanımlamaktadır. KOSGEP 2000 kaliteyi güvenilirliğe yakın biçimde tarif etmiştir; belirlenen şartlar altında ve belirlenen bir zaman süresi içinde istenilen fonksiyonları yerine getirebilme kabiliyetidir. O zaman kalite ile güvenilirlik arasındaki fark nedir sorusu sorulabilir. AFNOR'da (Fransız Standart Kurumu) kaliteyi bir ürünün ya da servisin kullanıcısının ihtiyaçlarını karşılamaya elverişliliği olarak belirtilmiştir. En geniş kabul gören tanım bir yapının, ürün, sistem gibi, belirlenen şartlar altında belirli bir süre ya da çevrim süresince çalışma kabiliyetidir.[17,18] Eğer kalite teknik bir ürün için düşünülürse, ürünün fabrikasından çıktığı andaki uygunluğudur. Güvenilirlik ise kullanım ömrü boyunca bu uygunluğunun devam etmesidir. Güvenilirlik o halde kalitenin zamana yayılmış durumu olmaktadır.[6] İki kavramda bir biriyle sıkı ilişki içindedir. Kalite ve kalite güvencesinde kullanılan pek çok yöntemin doğmasına neden olmuş güvenilirlik teknikleri de aynı şekilde endüstriyel ürünlerde kalitenin sağlanmasına katkıda bulunmuştur.

Kalitenin zaman esaslı kavramına ihtiyaç duyulmuştur. İşletmelerin kalite



gözlemcileri zamana bağımlı kontrol yapmazlar. Ürün kalite için belirlenmiş testleri geçer veya bu testleri başaramaz. Ancak güvenilirlik problemleri zaman boyutunda incelenir.[17] Bu geleneksel kalite kontrol ile güvenilirlik arasındaki temel farktır.

### **3.1.2. Sağlamlık ve güvenilirlik**

Sağlamlık güvenilirliğin özel bir durumudur. Bir ürünün zaman etkisine dayanım kabiliyetiyle ilgilidir. Bu yine duruma göre geçilen mesafe, çevrim sayısı olabilir. Yorulma, yaşlanma, aşınma, korozyon ve elektriksel parametrelerdeki değişimler gibi etkilere bağlıdır. Sağlamlık eskimeye bağlı bozulma ya da hasarlanmaların gerçekleşmesinden önce geçen minimum süredir.[17]

### **3.1.3. Güvenilirlik mühendisliği (Reliability engineering)**

Güvenilirlik mühendisliği bir ürünün, işlevin veya servisin beklenen veya olması gereken güvenilirliğinin analiz edilmesi ve hataların en aza düşürülmesi veya bu hataların etkilerinin azaltılması için yapılması gereken işlemlerin belirlenmesi olarak ifade edilir.[19]

Öncelikleri bakımından güvenilirlik mühendisliğinin hedefleri şöyledir;

1. Mühendislik bilgileri ve özel tekniklerini kullanarak arıza olasılığını veya sıklığını ortadan kaldırmak veya azaltmak,
2. Tüm önleme çalışmalarına rağmen yinede meydana gelmesi durumunda arızaya yol açan gerçek sebepleri tanımlamak,
3. Eğer arıza sebepleri düzeltilemiyor (ortadan kaldırılamıyor) ise, problemin devam etmesi halinde bile sistemin beklenen fonksiyonları yerine getirmesi yollarını araştırmak,
4. Güvenilirlik verilerini, yeni tasarımların güvenilirliklerini tahmin etmek için uygulamaya koymak.

### **3.1.4. Güvenilirlik ihtiyacı nasıl doğdu**

İnsanoğlu kendi ürettiği araç gereçlerin uygun çalışmasına ihtiyaç duyduğundan beri güvenilirlik önemli bir konu olmuştur. Bir uzmanlık dalı olarak bu günkü mühendislikte yerini alması sanayi devrimi ile başlamıştır. Bu tarihe

kadar sistemlerin karmaşıklığı kontrol edilebilir seviyede idi. Mevcut günümüz sistemlerinin karmaşıklığı ise güvenilirliğin önemini arttırmıştır.

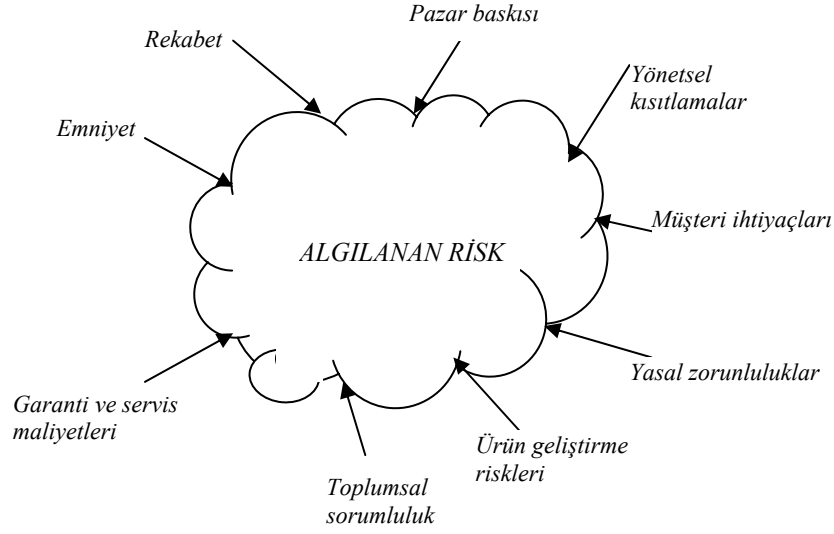
Geleneksel mühendislik eğitimi teknolojik ürünlerin nasıl çalıştığı ile ilgilenir. Ürünün ne şekilde arızalandığı, arızanın etkileri ve tasarımın, üretim sürecinin, bakımın ve kullanımın arıza olasılığından nasıl etkileneceği genellikle göz ardı edilmiştir çünkü arızaların hangi şartlarda meydana geldiği konusunda değil sistemlerin çalışma prensipleri üzerinde yoğunlaşılır.[18]

Mühendislik eğitimi esas olarak kesinlik yaklaşımında olduğundan değişkenliği yeterince dikkate almamaktadır. Diğer taraftan değişkenlik ve yaşanan olaylardaki rastlantılar çoğu ürünün güvenilirliğini belirlemede hayati rol oynar. Bununla birlikte temel parametreler örneğin kütle, boyut, sürtünme katsayısı, gerilme ve kuvvetler mutlak değildir. Malzeme, süreç ve insan faktörü içindeki farklılıklardan dolayı pratikte değişkenliğe maruz kalırlar. Bazı parametreler zamana bağlı olarak ta değişkenlik gösterirler. Rastlantı kurallarıyla, değişkenliğin neden ve sonuçlarının anlaşılması güvenilir ürünler yaratmak ve problemlerin çözümleri için önemlidir.

Bazı tasarım ve üretim grupları yüksek güvenilirlikteki ürünleri klasik metotları kullanarak üretmeyi başarmış olduklarından, güvenilirlik konusunda uzman kişilere şüphe ile yaklaşırlar.[18] Günümüz tasarımlarındaki, ürün geliştirme konusunda karşılaşılabilecek risklerden bazıları şöyle sıralanabilir;

- Zaman kısıtlaması,
- Programa yetişme baskısı,
- Muhtemel yüksek arıza maliyetleri,
- Yeni malzeme, metot ve karmaşık sistemlerin kullanılması,
- Maliyetleri azaltmak,
- Emniyet konusunda getirilen şartlar.

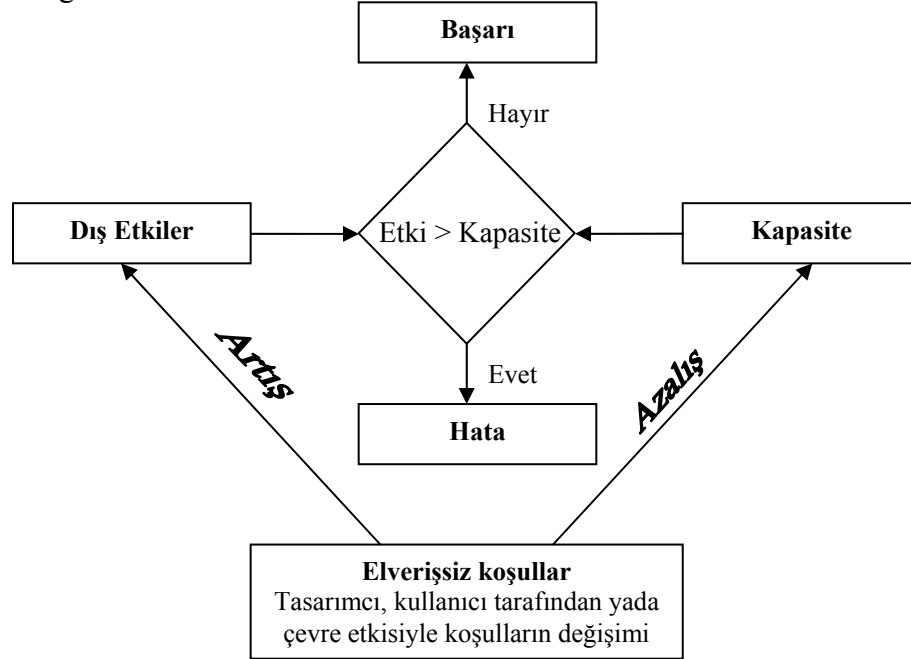
Güvenilirlik mühendisliği bu riskleri azaltmak ve kontrol altına alabilmek için geliştirilmiştir. Şekil 3.1 ürün geliştirme konusunda tüm bu risklere yol açan baskıları göstermektedir.



Şekil 3.1. Algılanan risk

### 3.1.5. Mühendislik ürünleri için arızalar

Arıza özel bir hata senaryosunun gerçekleşmesi ve sistemin dengesinin içeriden ya da dışarıdan gelen etkilerle bozulmasıyla meydana gelir.[17] Sistem sahip olduğu kapasitesi ile bunlara karşı koymaya çalışır. Özel iç ve dış etkilerle bu kapasite azalabilir. Bu etkiler sistemin kapasitesini aştığında bozulmalar ya da arızalar ortaya çıkar. Şekil 3.2 bu etkileri ve hatanın ortaya çıkabilme şartlarını göstermektedir.

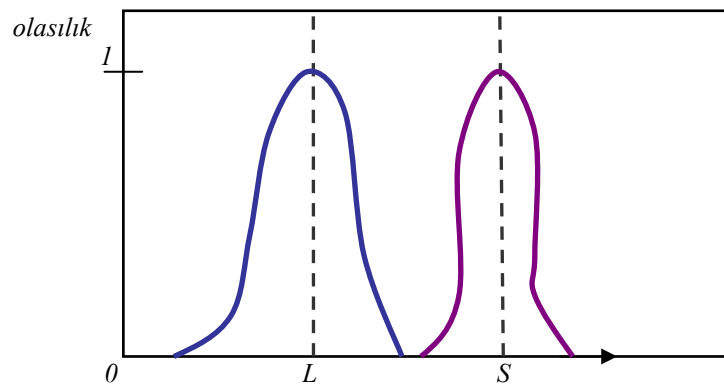


Şekil 3.2. Sisteme gelen dış etkiler ve sistemin iç kapasitesi

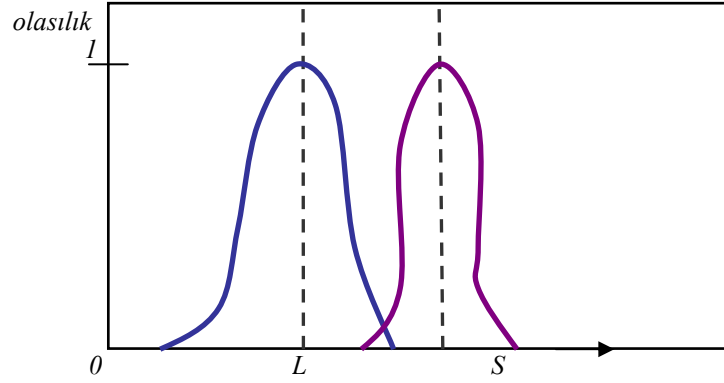
Pek çok nedenle arıza meydana gelebilir. Ana nedenler belli başlı başlıklar altında açıklanabilir. En başta tasarımdan kaynaklanan yetersizlikler gelmektedir. Tasarım çok zayıftır. Sözelimi çok enerji harcar, uygun olmayan frekanslarda rezonansa girer gibi oldukça uzun bir liste verilebilir.

Bundan başka sisteme bir şekilde aşırı yüklenilmiştir. Eğer yük sistemin dayanabileceği sınırların üzerine çıkarsa arıza meydana gelecektir. Sözelimi elektronik cihazların yüksek gerilime maruz kalması sonucu devrelerinden yüksek akım çekilmesi buna örnek verilebilir. Normal koşullarda bu tür hatalar mühendislik ürünlerinde çok fazla görülmez çünkü tasarımda bir emniyet payı bırakılmıştır. Elektronik cihazlara uygulanacak elektrik enerjisinin değerleri kullanım kılavuzlarında belirtilmiştir. Elektronik devre tasarımcıları bu tür aşırı yüklemeler için devrelere gerekli korumaları öngörürler. Mekanik sistem tasarımcıları da benzer biçimde çalışırlar. Kullandıkları malzemelerin özelliklerini ve limitlerini bilirler. Maksimum uygulanacak yük ve dayanım limitleri arasında pay bırakırlar.

Arıza, değişkenlikler sonucu oluşmuştur. Sisteme uygulanan yükün sınırları belirlenmiş ve dayanımı sabitlenmiş olması durumunda sistemde hata oluşmaması beklenir. Sistemin bilinen dayanım sınırı uygulanan yük ile aşılmadığı durumda hata oluşmaz. Ancak bazen her ikisi içinde şüpheler olabilir. Bir grup benzer ürünler içerisinde dayanımlar farklılık gösterebilir. Sürüm içindeki ürünlerden bazıları nispeten daha dayanıklı bazıları ise daha zayıf olabilir. Aynı şekilde uygulanan yükte değişebilecektir. Şekil 3.3a ve Şekil 3.3b bu değişiklikleri göstermektedir.



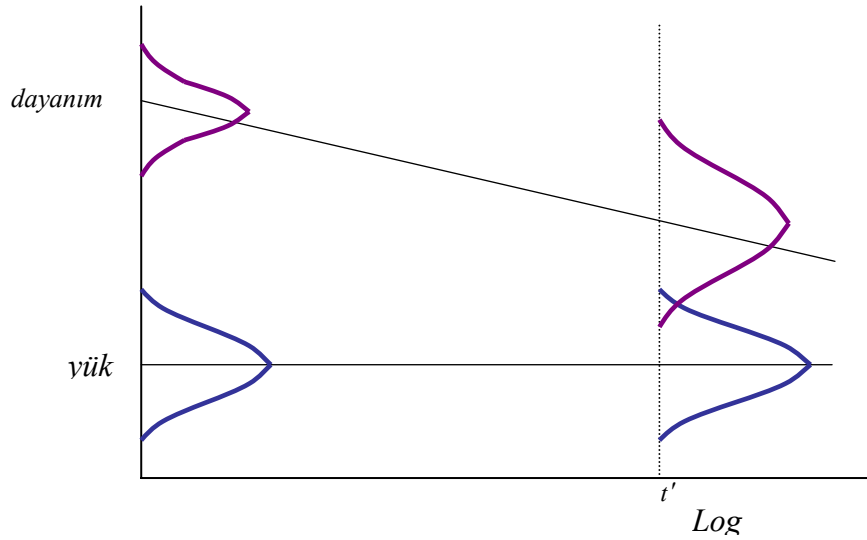
(a)



(b)

Şekil 3.3. a-b. Yük-dayanım dağılım fonksiyonları

Yük ve dayanım fonksiyonlarında çakışan bölge varsa, bu durumda arıza (hasar) meydana gelebilecektir. Sistemde hasarlanma ya da arızalar yaşanmadan dolayı da oluşabilir. Ürün başlangıçta yeterince sağlam iken zamanla bu özelliğini kaybedebilir. Malzeme yorulması buna bir örnektir. Temas halindeki yüzeylerde zamanla meydana gelen aşınma, korozyon, yalıtkanlığın bozulması gibi. Şekil 3.4'de bu durum grafik ile gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Yük ve dayanımın zamana bağlı değişimi

Arızalar diğere zamana bağlı bir etkiyle meydana gelebilir. Bataryaların kalıcı boşalması, gerilme kuvvetleri ve termik etkilerle örneğin jet motorlarındaki türbin disklerinin zaman içinde hasarlanması gibi. Hata gizlenmiş olarak sistemin içinde bulunduğu arıza meydana gelebilir. Bu durum incelendiğinde sistemin

tüm elemanlarının görevlerini normal olarak yerine getirdiği görülmektedir. Çalışma esnasında buna rağmen sistemde anormallik gözlenebilir. Bir elektronik sistem bazen uygun olmayan çalışma durumları gösterebilir. Arıza hatalardan kaynaklanabilir. Uygun olmayan kullanım talimatları, hatalı tasarım ya da yazılım kodlamaları, hatalı birleştirmeler ve testler, elverişli olmayan şartlarda ve hatalı gerçekleştirilen bakımlar, kullanım hataları. Diğer arıza kaynakları; gürültülü dişliler, anlaşılması zor kullanım talimatları, elektronik devrelerin elektrik alanlarından etkilenmesi gibi. Arızaların sebepleri de sonuçları da çok çeşitlidir. Ne tür bir olayın arıza olarak sınıflandırılacağı konusunda farklı algılamalar da vardır. NASA uzay mekiği projesinde Booster roketlerindeki yuvarlak sızdırmazlık keçesi için bir hata senaryosu öngörülmemiştir. Ancak bu hata Challenger mekik kazasına yol açmıştır.[10]

Hataların prensipte tümü pratikte ise çoğu öngörüldüğü takdirde giderilebilir. Riskleri öngörebilmek başarılı tasarımların yolunu açar.

### **3.1.6. Risk**

Risk kalitatif ya da kantitatif olarak görülebilir. Kalitatif manada bir tehlike kaynağı var olduğunda ve bu tehlike karşısında koruma yoksa bu durumda bir kayıp veya zarar görme olasılığı vardır. Bu olasılık risk olarak tanımlanır. Bu çeşit kayıplar; iş hayatı, sosyal yaşam, askeri faaliyetler, sistem elemanlarının çalışması, ya da yatırımlar gibi çok geniş konularda olabilir.[18] Risk, tehlikeye maruz kalındığında ortaya çıkan malzeme, insan, çevre kayıpları gibi olguların kaybedilme potansiyeli olarak tanımlanır. Karmaşık mühendislik ürünlerinde tehlikelerden korunmak için önlemler alınır. Koruma düzeyi yükseldikçe risk düşer. Bu aynı zamanda yüksek güvenilirlikteki koruma sistemlerinin önemini de işaret eder ki; güvenilirlik analizleri ve risk analizleri arasındaki ilişkiyi gösterir.

Kantitatif risk analizi kayıp olasılığının derecesinin tahmin edilebilmesini içerir.[6] Gerçekleştirilecek bir risk analizinin basitçe şu üç soruya cevap vermesi gerektiğini belirtir;

- Tehlikeye maruz kalınmasına yol açacak yanlış olan şey nedir?
- Bu durum hangi sıklıkla meydana gelebilir?

- Eğer meydana gelirse, hangi sonuçlar beklenir?

Birinci soruya yanıt verebilmek için çıktıların bir listesi ya da bu çıktılara yol açan hata senaryoları tanımlanmalıdır. İkinci sorunun yanıtı bu hata senaryolarının olasılıklarının tanımlanmasıdır. Son soruya verilecek yanıt ise her bir senaryonun sonuçlarının belirlenmesidir. Böylece Denklem 3.1' deki üç faktörün sayısal değerlerinin hesaplanmasıyla riskler belirlenir.

$$R = (S_i, P_i, C_i) \quad i = 1K n \quad (3.1)$$

Burada;

$S_i$  : tehlikeyi yaratabilecek olayların hata senaryosu,

$P_i$  :  $i$  hatasının gerçekleşme olasılığı,

$C_i$  :  $i$  senaryosunun sonuçları ya da hesaplama değerleri

olarak tarif edilmektedir.

### 3.1.7. Arıza tanım ve sınıflamaları

Arıza, bir sistemin beklenen fonksiyonlarını yerine getirmeye elverişliliğinin kesilmesi olarak tanımlanabilir.[19]

#### 3.1.7.1. Arızanın ortaya çıkma hızı bakımından sınıflandırılması

Kademeli ilerleyen arıza, bir elemanın karakteristiklerinin zaman içinde değişmesiyle ortaya çıkar.

Ani arıza ise önceden bir kontrol ya da izlemeyle tespit edilemeyen ve birden bire ortaya çıkan arızadır.

#### 3.1.7.2. Etki büyüklüğüne göre sınıflama

Kısmi arıza, bir ya da birden fazla karakteristiğinin belirlenmiş limitlerinden sapması sonucu ortaya çıkan arızalardır. Beklenen fonksiyonun tamamen ortadan kalkmasına neden olmazlar.

Komple arıza, bir ya da birden fazla karakteristiğinin belirlenmiş limitlerinden sapması sonucu ortaya çıkan arızalardır. Bu durumda sistem beklenen fonksiyonu gerçekleştiremeyecek şekilde arızalanmıştır.

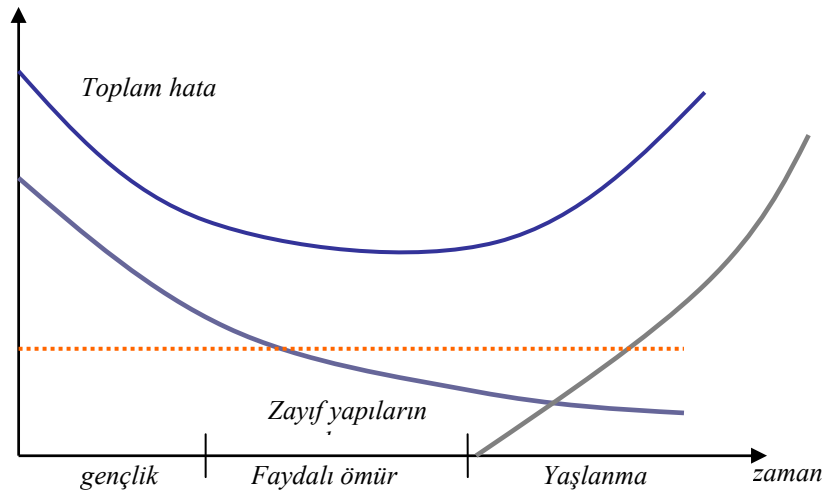
### 3.1.7.3. Hatanın yayılma hızı ve genliği ile ilgili sınıflama

Kataleptik arıza, çoğunlukla birden bire ortaya çıkan ve komple bir arızadır.

Bozulmayla arızalanma da çoğunlukla dereceli ve parçalıdır. Zaman içinde komple bir arızaya dönüşebilir.

### 3.1.7.4. Sistemin değişik yaşam profilinde oluşan arızaların sınıflaması (arıza karakteristiği)

Bir hata oranı tanımlanmış olsun. Hata olasılığı birim zamana taşınmış yani sistemin  $t$  anında çalıştığı fakat  $t+\Delta t$  anında arızalı olduğu düşünülmüştür. Çoğu durumda bir elemanın zamanın bir fonksiyonu olarak hata oranı değişimi Şekil 3.5 ile gösterilen grafiğe uymaktadır.



Şekil 3.5. Bir ürünün zamanın fonksiyonu olarak farklı yaşam periyotları

Üç farklı zaman dilimi şu şekildedir. Gençlik dönemi, ürünün yaşam ömrünün başlangıcındaki zaman dilimidir. Bir sonraki yaşam dilimiyle kıyaslandığında hata oranı hızla azalmaya başlar. Sabit hata oranı bölgesi de denilen olgunluk döneminde ürünün hata oranı çok az değişikliğe sahiptir. Bu zaman dilimine faydalı kullanım ömrü de denilir. Yaşlanma döneminde ise bir önceki faydalı kullanım ömrü zaman dilimiyle karşılaştırıldığında hata oranı hızlanarak artar.

Yaşam süresinin başlangıcı için farklı tanımlamalar vardır. Tanımlanmış



bir anda başlar. Bu zaman ürünün banttan çıkışı, fabrikadan ayrılması veya teslim anı zamanlarından herhangi biri olabilir.

Sabit hata oranı döneminde karşılaşılan hatalar genellikle katalektik, beklenmeyen hatalardır.

Yaşlanma dönemi hataları ise ürünün iç özelliklerindeki değişmelere bağlıdır. Karakteristiklerin bozulma sürecine girmesi ve korozyon etkisi gibi.

### 3.1.7.5. Arızaların etkileri bakımından sınıflandırma

Bir sistemde meydana gelen arızaların farklı etkileri olabilir. Bazı arızalar sistemin işlevini yerine getirmesini doğrudan etkilemez. Bir düzeltici aksiyondan fazlasını gerektirmez. Diğer bazı arızalar sistemin kullanıma hazır olma ve emniyet bileşenlerini etkileyebilir. Hatanın etkileri hesaplanmalıdır. Hatalar için bir ağırlık puanlama tablosu Çizelge 3.1 ile verilmiştir. Güvenilirlik analizlerindeki alışkanlıklar nedeniyle 5 farklı kategoriye ayrılması yaygın biçimde kullanılır. Havacılıkta da aynı sınıflamadan yararlanılmaktadır.

Çizelge 3.1. Hata etkileri ağırlık tablosu

Puanlama	Olayın etkisi
S0	Etkisi yok
S1	Çok az etkili
S2	Etkili
S3	Kritik
S4	Tehlikeli

### 3.1.7.6. Hatanın sebepleri bakımından sınıflama

Bir sistemin arızalanması hata nedenlerinin varlığı durumunda söz konusudur. Nedenler tasarıma, üretime ve kullanıma bağlı olan ve hatayı başlatan şartlar olarak tanımlanır.[20]

Nedenlerin hatayı meydana çıkarması bir hata mekanizması (düzeneği) yoluyla gerçekleşir. Fiziksel, kimyasal ve diğer biçimlerde hataya yol açan

durumlar olarak ifade edilir.[20]

Nedenleri bakımından hatalar üç gruba ayrılır. Birincil hatalar, bir elemanın arızalanması doğrudan ya da dolaylı olarak diğer bir elemanın arızalanmasına yol açmaz biçiminde tanımlanabilir. Genellikle arızalı eleman üzerinde gerçekleştirilecek bir bakım işlemi sistemi yeniden çalışır hale getirmek için gereklidir. Sözgelimi bir otomobilin egzozunda tasarımda belirlenen normal basıncın altında kaldığı halde oluşan, sistem elemanlarının yaşlanmasına bağlı, bir arıza birincil bir hatadır. Egzozun doğrudan değiştirilerek arızanın giderilmesi mümkündür ve yeterlidir. Bu kavramı daha iyi anlamak için arızalanan elemanın sistemin bir bileşeni olduğunu düşünmek gerekir. Bu bileşende meydana gelen birincil hatanın elemanın kendisinden kaynaklandığının, başka bir elemanın bu hataya neden olmadığına anlaşılması gereklidir. İşletimdeki bir bileşen için birincil hata bir aşınmadan, tasarım hatasından, üretimdeki hatalardan ya da teknik özelliklerden kaynaklanabilir.

İkincil arıza ise bir elemanın arızalanması doğrudan ya da dolaylı olarak diğer bir elemandaki hasarlanma sonucu meydana geldiğinde ortaya çıkan arıza durumudur. Genel olarak arızalı eleman üzerinde gerçekleştirilecek bir bakım işlemi sistemi yeniden çalışır hale getirmek için gereklidir. Diğer elemanların arızalanması, çevre şartlarında oluşan özel bir durum ve insan hataları bir elemanın ikincil biçiminde arızalanmasına neden olabilir. Yine bir otomobilin egzoz sistemi örneği ele alınacak olursa tanımlanmış üst basınç sınırının üzerine çıkılması sonucu kopmanın nedeni eğer başka bir elemandaki arıza ise bu ikincil bir hatadır.

Kumanda arızaları, bir elemanın arızalanması doğrudan ya da dolaylı diğer bir elemanın hasarlanmasının sonucu ise meydana gelir. Genel olarak arızalı eleman üzerinde gerçekleştirilecek bir bakım işlemi gereksizdir. Elemana gönderilecek düzgün bir kontrol sinyali ya da hatalı kontrol sinyalinin düzeltilmesiyle bu durum aşılabılır.

### **3.1.8. Güvenilirlik karakteristikleri (RAMS)**

Güvenilirliğin dört bileşeni olduğundan söz edilebilir. Güvenilirliğin dört bileşeninden asıl bileşen ya da büyük parçası güvenilirliğin kendisidir.[6]

Bakım yapılabilirlik (Fransızca maintabilite) sistemin arızalanması sonucunda hızlı şekilde yeniden çalışabilir hale getirilmesidir.[20] Sistem bileşenlerinin kolay değiştirilebilir olması diğer sistemlere göre daha hızlı bakım yapılabilirlikte avantaj sağlar. Uçaklarda arıza sonucu onarım ve bakım sürelerini azaltabilmek için motorların özellikle modüler yapıda tasarlanmaları bu nedenledir.

Kullanıma hazır olabilirlik (Fransızca disponibilite) ise bir sistemin kullanılmak istendiği bir anda çalışabilir durumda olmaya elverişliliğidir.[20]

Son bileşen olarak bahsedilebilecek güvenlik (Fransızca securite) de bir sistemin belirli bir süre boyunca tehlike yaratacak hatalara yol açmamasına olan elverişliliğidir.[20]

İngilizler ise güvене bilmek, dayanabilmek anlamında ‘dependability’ ifadesini kullanırlar. Bu terim güvenilirlik, kullanıma hazır olma ve bakım yapılabilirlik ifadelerini kapsar. Emniyet ayrıca değerlendirilir. Güvenilirliğin dört bileşenini içinde barındıran ve bu kelimelerin ilk harflerinden oluşan RAMS (reliability, availability, maintainability, security) tercih edilen ifadedir.[7] Fransızcada yerleşmiş ‘sureté de fonctionnement’ güvenilirliğin tüm bileşenlerini kapsayan ifadedir[7].

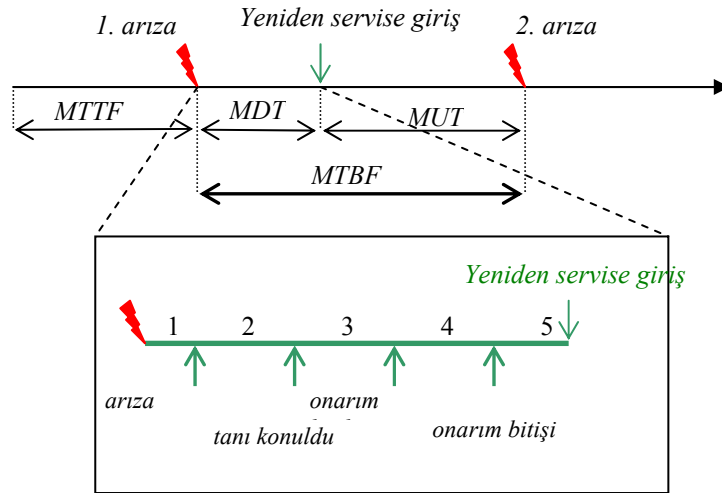
### 3.1.9. Güvenilirliğin bazı göstergeleri

Sistemin işlevini karakterize eden bazı göstergeler arasında MTTF, MDT, MUT, MTBF sayılabilir. Bu değerler Şekil 3.6 üzerinde tarif edilmiştir.

MTTF (Mean Time to Failure): Bir sistemin servise konduğu ilk andan ilk arızanın yaşandığı ana kadar geçen zamandır.

MDT (Mean Down Time): Sistemde bir arızanın meydana geldiği an ile sistemin yeniden çalıştırılmaya başlandığı zaman arasında geçen süredir. Farklı etaplardan oluşur. Bunlar;

- hatanın fark edilmesine kadar geçen süre,
- hatanın tespit edilmesi için geçen süre,



Şekil 3.6. Güvenilirliğin temel göstergeleri

- onarıma başlanana kadar geçen organizasyon süresi,
- onarım süresi,
- sistemin yeniden başlatılması için geçen süre

olarak sayılabilir.

MUT (Mean Up Time): Sistemin bir arızanın ardından yeniden çalıştırıldığı anda başlayıp, takip eden arızanın meydana geldiği zamana kadar geçen süredir. Son iki tanım onarım yapılabilir sistemler için geçerli tanımlardır.

MTBF (Mean Time Between Failures) ise  $MDT+MUT$  olarak tanımlanabilecek, iki arıza arasında geçen toplam süredir.

### 3.1.10 Sistem

Bir sistem belirlenmiş işlevleri yerine getirmek için birbirine bağlı veya etkileşim halindeki ayırık elemanların bir bütünüdür.[21] Belirlenmiş ifadesi sistemin belli bir amaç için düşünülmüş ve yaratılmış olduğunu gösterir. Tüm sistemler belli bir amaç için yaratılmıştır. Sadece insan düşüncesinin basitçe bir buluşu değildir. Tanımdaki ayırık ifadesi de aynı zamanda sistemin tanımlanabilirliği ile ilgilidir. Ayırık elemanların kendileri de bir sistem olarak görülebilir. Eğer bir denizaltı bir sistem ise, güç sistemi, seyrişer sistemi ve gövde de ayrı birer sistemdirler. Bunların her birisi yine alt ve alt-alt sistemlere ayrılabilir. Aynı şekilde söz konusu sistemin tanımlanabilir olduğunu açıklar.

Açık ve net bir biçimde tanımlanamayan bir şey için analiz yapmaya girişmek tamamen boşunadır. Tanımda sistemin etkileşim içindeki bileşenlerden meydana geldiği görülmektedir. Buradan hareketle sistemin basit olarak sadece alt sistem ve elemanlardan meydana geldiğini düşünmeyip, diğer taraftan bir arıza sonucu bir eleman ya da alt sistemde meydana gelecek değişikliğin sistemi etkileyeceği unutulmamalıdır. Ek olarak bir parçanın fiziksel yapısındaki değişiklik söz konusu olduğunda (sözgelimi bir arıza sonucu) sistemde değişecektir. Bu önemli bir noktadır. Çünkü tasarım, sistem analizinin sonuçlarından hareket ederek değiştirilir. Yeni sistem bu şekilde değişime uğramış sisteme göre, yeni yapısının analiz sonuçlarına göre değişikliğe maruz kalacaktır. Sözgelimi dört motorlu bir uçağın motorlarından birinin arızalanarak devre dışı kalması durumunda, artık üç motorlu yeni bir sistem ortaya çıkar ve bu öncekinden farklıdır. Yere iniş için yeni bir yapılandırma meydana gelmiştir. Aynı uçakta ikinci bir motor arızası söz konusu olduğunda bu 6 değişik ihtimalden biri olarak gerçekleşir. Bu durumda geriye iniş için dikkate alınması gereken 6 farklı yeni yapılandırmadan (konfigürasyondan) birisi söz konusu olacaktır.

### 3.1.10.1. Sistem, Alt sistem, Sistem Bileşenleri, Parça Zinciri

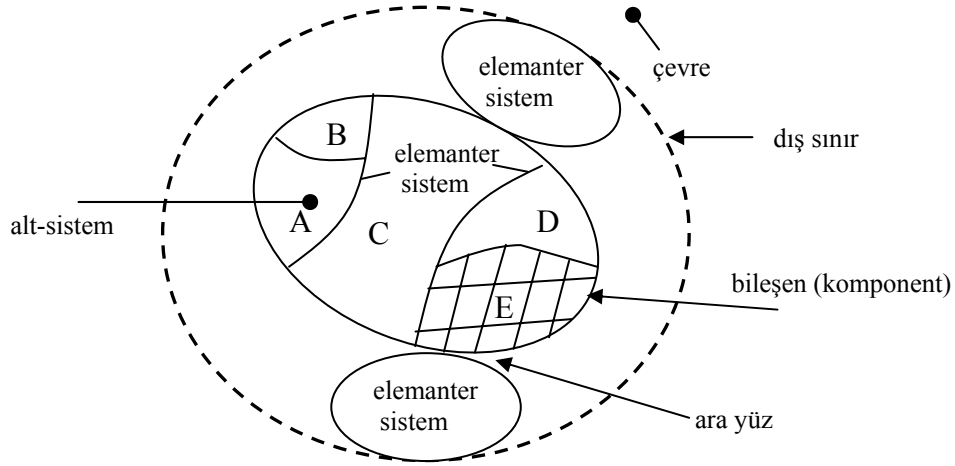
Literatürde sistemi ve alt yapısını tanımlayan farklı ifadeler vardır.

$$\text{Eleman (parça)} \subset \text{bileşen} \subset \text{alt sistem} \subset \text{ayrık sistem} \subset \text{sistem} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de verilen yapıya göre bir nükleer santral ya da bir uçak sistemdir. Bu sistemlerde kullanılan kumanda kontrol ya da emniyet sistemleri ayrık sistemlerdir. İki bağımsız yolla birbirine paralel bağlanarak yedeklenmiş emniyet sisteminin yollarından her biri alt sistemdir. Bir valf, röle bileşendir. Rölenin bir bobini ise bir eleman ya da parçadır.

Şekil 3.7 söz konusu kavramları göstermektedir. Sistemi A, B, C gibi alt sistemlere bölmek faydalıdır. Örneğin F alt sisteminin arızalandığı kabul edilirse, analiz amacıyla uyumlu olarak  $F_i$  incelenecek en küçük parçalara (alt-alt sistemlerine) ayrılabilir. Bu sistemin iç sınırlarını belirler. Bu F içindeki a, b, c en küçük alt sistemler sistemin genel tanımında verilen ayrık elemanlardır. Güvenilirlik analizi çalışması eleman seviyesine kadar yapılır. Sistem analizinin detaylaması elemanlar düzeyine kadardır. Ayrık sistemler arasındaki sınır ise ara

yüz olarak adlandırılır.



Şekil 3.7. Bir sistemin ve bileşenlerinin gösterimi

Sistem kesikli çizgi ile gösterilen dış sınır içerisinde yer alır. Bu bölgenin dışında sistemi çevreleyen dış çevre bulunur. Sistemin yapısının ve çalışmasının analiz edilebilmesi bu bölgenin içerisindeki elemanların yapısının bilinmesini ve meydana gelen olaylar ve diğer elemanlarla aralarındaki etkileşimlerinin anlaşılmasını gerektirir. Belki de bir sistemi tanımlarken en hayati karar dış sınırların nasıl belirlendiğidir. Masa üzerindeki bir telefon için sistem sadece telefon cihazıyla mı sınırlanmalıdır? Duvardan cihaza gelen telefon hattı buna dahil edilmeli midir? Telefona gelene kadar bağlı dış telefon hatları, bağlantı kutuları, anahtarlama ekipmanları, santral donanımları sistemin içinde yer almalı mıdır?

Bir sistem tanımlanırken sistemin ne kadar detaylandırılacağına belirlenmesi önemlidir. Analiz sırasında temel parçalar seviyesine kadar mı incelenecek yoksa moleküler ya da atom seviyesine kadar incelenmeli midir? Burada yeniden sistemin ilgilenilen görüntüsüne bağlı olarak bir karara varılmalıdır. Bu noktaya kadar sistemin sınırlarının çizilmesi fiziksel sınırlama boyutuyla düşünülmüştür. Çoğu halde geçici durumları ya da zaman bağımlı sınırları göstermek zorunludur. Bazı durumlarda sistemin fiziksel sınırları zamanın bir fonksiyonu olabilir.

### 3.1.10.2. Sistemleri doğası yönüyle sınıflama

Bu sınıflama da sistemin kullandığı teknoloji önem kazanmaktadır.

Elektrik ya da elektronik sistemler, sayısal ya da analog sistemler, kumanda ve kontrol sistemleri; mekanik sistemler; programlanabilir sistemler ya da veri işleme sistemleri gibi.

### **3.1.10.3. Sistemin temel karakteristikleri**

Tüm sistemler genel olarak bir veya birden fazla işlevi ile tanımlanır. Bulunduğu çevrede ve belirlenmiş şartlarda (performans talebi) bu işlevini yerine getirmelidir. Bir sistemin en önemli karakteristikleri; ana fonksiyon ve işlevleri, ikincil işlevleri ve bu fonksiyonların önem dereceleridir.

Sistemin yapısı; farklı bileşenlerin görevleri, karakteristik ve performansları; bileşenler arasındaki ilişki (nasıl bağlandıkları gibi) ve bileşenlerin yerleşimlerini kapsar.

Sistemin çalışma şartları içinde çalışma durumları, bileşenler ve sistemin çalışma şartları ile konfigürasyon değişiklikleri yer alır.

Sistem işletim koşulları, alarm, izleme, periyodik testler gibi sistem izleme şartlarını, koruyucu ve düzeltici bakımlar gibi sisteme müdahale şartlarını, kullanırken uyulması gerekli kurallar gibi teknik işletim kurallarını içerir.

Sistemin çevresini ise tesisin diğer ayrık sistemleri (yardımcı sistemler), sisteme müdahale eden operatörler, olumsuz çevre şartları (toz, nem), özel meteorolojik koşullar (kar, buz), tabii kaynaklı dış olumsuz etkenler (deprem) ya da tabii olmayan dış etkiler (tesis üzerine uçak düşmesi) belirler.

Bir sistemin geliştirilmesi döneminde farklı proje etaplarında bu verilerin hepsi bilinmeyebilir. Ancak hipotez ve tahminlerde bulunmak gerekmektedir.[6] Zaman geçtikçe sistemde gelişmeler yaşanır ve bu bilgiler netleşmeye başlar. Güvenilirlik analizi bilgileri tekrar tekrar düzeltilmeli, güncellenmelidir.[6]

## **3.2. Analitik Yaklaşım Metotları**

Biçimsel süreç ve modellerle ilgilendiğinden bu model ve süreçlerin insanın karar alma sürecindeki şekliyle sınıflandırılabilceği sürpriz gelmemelidir. İnsanın beyninde ulaştığı sonuçlar bakımından iki tip analitik yöntem vardır. Bunlar özel durumlardan genel sonuçlara ulaşmak (endüktif) ve genel durumlardan özel sonuçlara ulaşmak (dedüktif) olarak adlandırılır. Bu

yaklaşımların ayrı ayrı karakteristiklerini belirtmek gereklidir.

### **3.2.1. Endüktif yaklaşımlar**

Özel olaylardan ya da durumlardan genel sonuçlara ulaşmak şeklinde düşünce biçimidir. Bir sistem için düşünüldüğünde bir özel hata durumu ya da başlatma durumu dikkate alınır. Sistemin çalışması üzerindeki durumu ya da hatanın etkisi soruşturulur. Bu durumda girilen analiz endüktif bir analizdir. Bir uçağın bazı uçuş kontrol yüzeylerinin devre dışı kalması halinde uçağın bundan nasıl etkileneceğini sorgulamak buna bir örnektir. Bu çeşit sistem analizi için geliştirilmiş PFA, FMEA, FMECA, FHA, “Event trees” gibi pek çok teknik vardır.

Bir endüktif yaklaşımda bazı olası bileşen durumları ve başlatıcı olaylar düşünülür. Sistemin bütünü üzerine karşılık gelen etkiler belirlenmeye çalışılır.

### **3.2.2. Dedüktif yaklaşımlar**

Bu yaklaşım genelden özele doğrudur. Bu yaklaşımda sistemin kendisinin bir şekilde arızalandığı kabul edilir. Sistemin bileşenlerinin hangi hata türlerinin bu arıza davranışına katıldığı bulunmaya çalışılır. Gerçek hayatta bu yaklaşıma tipik örnekler kaza araştırmalarıdır. Sözelimi ne tür bir hata süreci, uçuş aletleri, ya da insan faktörü, bir ticari uçağın düşmesine neden olmuştur? Hata ağacı analizi (FTA) dedüktif sistem analizine bir örnektir. Bu teknikte genellikle bir hata durumu olan bazı özel durumlar için kabuller yapılır. Sistemik biçimde temel hatalar zincirinin istenmeyen olayın meydana gelmesine katkıları incelenir. Özet olarak endüktif yöntemler hangi sistem durumlarının (genellikle başarısızlık durumu) mümkün olduğunu, dedüktif yaklaşımlar ise verilen sistem durumu için (genellikle başarısızlık durumu) nasıl mümkün olabileceğinin tespiti için uygulanır.

### **3.2.3. Endüktif yaklaşımlara genel bakış**

Bu tekniklere kısaca da olsa değinmekte fayda vardır. Bunun iki nedeni vardır. Birincisi bu teknikler FTA analizinin anlaşılmasına ve faydalı bir karşılaştırma yapılabilmesine imkân verir. İkincisi çoğu sistemde hata ağacı analizlerden elde edilen bulguların işlenebilirliği garanti değildir. Endüktif



metodlar geçerli ve sistematik bir bağlantı kurarlar.[21] İstenmeyen ya da tehlikeli şartların tanımlanabilmesini ve düzeltilebilmesini sağlarlar. Bu nedenle FTA analizini yapanların bu alternatif metodlara başvurabilir olması özellikle önemlidir. Günlük kullanılan dildeki anlamıyla endüktif teknikler şu soruya cevap bulunmasını sağlar. Eğer ..... olursa ne olur?[21] Daha biçimsel olarak, bu teknik bileşen ya da bileşenlerin mevcut özel durumlarının kabulü ile oluşturulur. Sistem şartlarındaki etkinin belirlenebilmesi ve analizinden oluşur. Belli derecede karmaşıklık sergileyen sistemler için ki çoğu sistemde böyledir olası tüm sistem tehlikelerinin ya da tüm bileşen başarısızlık türlerinin (mode) hem tekil hem de birleşimleri şeklinde belirlemeye çalışmak basitçe imkansız olmaya başlar. Bu nedenle endüktif teknikler genelde zaman, para, insan gücünün dikkate alındığı haliyle sınırlandırılır.

### 3.2.3.1. Parça sayımı yaklaşımı

Muhtemel en basit ve karamsar ya da yaygın deyişle en temkinli kabul bu yöntemdir. Sistemdeki tekil bir bileşen başarısızlığının tüm sistemin hata vermesine neden olacağı kabul edilir. Bu kabul altında sistem hata olasılığının üst sınırını elde etmek özellikle açık biçimdedir. Basitçe tahmin edilen hata olasılıkları boyunca bileşenlerin bir listesi yapılır. Ardından tekil bileşen hata olasılıkları eklenir ve toplam sistem başarısızlık olasılığı üzerinde bir üst sınır bulunması sağlanır.

**Çizelge 3.2.** Parça sayımı yaklaşımında (PCA) bileşenler ve arıza olasılıkları

Bileşen	Arıza olasılığı
A	$f_A$
B	$f_B$
.	.
.	.
.	.

Çizelge 3.2'deki verilen değerlerle F sistemin hata olasılığı

$f_A + f_B + \Lambda$  toplamına eşittir. F sistemin hata olasılığı  $F_A$ ,  $F_B$  vb. başarısızlık olasılıkları, hata oranları uygulamanın durumuna göre değişir. Bir sistem için parça sayımı yaklaşımı sistem hata olasılığının oldukça kötümser bir tahminlemesi olarak kabul edilir. Kötümserliğin derecesi genellikle hesaplanamazdır. Parça sayımı yaklaşımı oldukça temkinli bir tekniktir. Eğer kritik bileşenler mevcutsa, bunların genellikle yedeklemesi yapılır. Bu nedenle tekil hatalar sistem için felakete yol açabilecek sonuçlar yaratmaz.

### 3.2.3.2. FMEA tekniği

Parça sayımı yaklaşımı basiti seçen ve çok temkinli (en kötümser odaklı) sonuçlar verdiğinden dolayı başkaca daha detaylı teknikler tasarlanmıştır. Sistemin farklı biçimlerde hata verebileceği kabul edilir. İlk iş bu farklı hata türlerinin belirlenmesidir. A ve B gibi yedeklemeli ve aktif 2 sistem bileşeninden meydana gelmiş bir elektronik devre için iki ana hata türü belirlenmiştir. Bunlar devrenin açık ve kısa devre olma durumlarıdır. Ayrıca analizlerde çok sayıda ancak karşılaşılma olasılıkları çok seyrek diğerleri başlığı altında üçüncü bir hata türü olsun. Açık devre durumu %90 olasılıkla karşılaşılan ancak kritik sonuçlar doğurmayan bir hata türüdür. Kısa devre %5 ihtimalle karşılaşılabilecek bir hata türüdür. Ancak meydana gelmesi kritik sonuçlar yaratabilecektir. Diğerleri çok sayıda ve karşılaşılması çok ender hata türleri grubudur. Geriye kalanlar %5 olasılıkla görülebilir. Etkileri çok farklı olabileceğinden sistem üzerindeki etkileri tedbir olarak kritik kabul edilmiştir. Sistem konusunda açıklanan detayların genel olarak tablo biçiminde gösterimi Çizelge 3.3 ile verilmiştir.

Tablonun ilk sütununda bileşen gösterimi yer almaktadır. İkinci sütun hata olasılıklarını, üçüncü sütun bileşenlerde oluşan hata türlerini göstermektedir. Toplam hata olasılıkları yüzdesinin her bir hata türüne atfedilen değeri dördüncü sütunda verilmektedir. Son sütunda ise sistemin bütünü üzerine etkileri değişik kategorilerle anlatılmaktadır. Burada en basit sınıflamaya göre kritik ve kritik olmayan hatalar biçiminde iki kategori oluşturulmuştur.

Sistem konusundaki geçmiş tecrübeler esas alındığında bu tür bir elektronik sistem için bileşen hataları %90 oranında açık devre hata türüne bağlanır. %5 kısa devre ve geriye kalan %5 diğer hata türleriyle ilişkilendirilir.

Kritiklik hanesine yerleştirilen kritik ibaresinden dolayı tekil hataların sistemin arızalanmasına yol açacağı söylenebilir. Her hangi bir A veya B bileşenin açık devre durumunda olması halinde paralel konfigürasyondan dolayı sistem üzerine bir etkisi olmaz.

**Çizelge 3.3.** Elektronik bir devre için hata türlerinin gösterilişi

1	2	3	4	5
Bileşen	Arıza olasılığı	Hata türü	hata türü % olasılığı	Etkisi Kritik Kritik değil
A	$1 \times 10^{-3}$	Açık devre	90	X
		Kısa devre	5	X
		diğer	5	X
B	$1 \times 10^{-3}$	Açık devre	90	X
		Kısa devre	5	X
		diğer	5	X

FMEA analizinde yeterli bir doğrulukla bileşen hataları belirlenebilir. Örnekte olduğu gibi bileşen hata türlerinin olası sayılarının gerçekçi olarak sınırlanmış olduğu düşünülebilir. Analizin amacı tekil hata türlerinin belirlenmesi ve bunların etkilerinin hesaplanmasıdır.

### 3.2.3.3. FMECA tekniği

Temelde FMEA ya benzemekle beraber sadece arızaların kritikliği daha detaylı incelenir. Güvenceler ve kontrollerin bu gibi hataların meydana gelme olasılığını sınırlayacağı düşünülür. FMECA sistemdeki tehlikelerin incelenmesi için optimal bir metot olmasa bile, sistem emniyeti analizlerinde yaygın olarak kullanılır. Bu yaklaşımın dört temel aşaması hatanın tanımlanması, hatanın potansiyel etkileri, düzeltme ve kontrollerin varlığı ve bulguların özetlenmesi biçiminde tanımlanır.

Bu dört aşama FMECA sayfa düzeninde sütunların başlıkları olarak

karşımıza çıkmaktadır. İlk sütun olası tehlike şartlarını tanımlar. İkinci sütun bu durumun neden bir problem olduğunu açıklar. Üçüncü sütun durumu kontrol etmek için ne tür bir düzeltici eylem yapıldığını anlatırken dördüncü sütun içinde bulunulan durumun kontrol altında olup olmadığını değilse ilave başkaca basamaklara geçilip geçilmeyeceğini belirler.

Eğer etüt edilen proje bir analizi gerçekleştirmek yerine sadece formları doldurmak biçiminde yapılırsa çalışma faydasız olacaktır.[21] Bu nedenle analizi gerçekleştirenlerin kendilerini hazırlanmış dokümanlarla sınırlamamaları daha uygun olacaktır. Diğer bir önemli noktada eğer sistem karmaşıksa tek bir analizcinin kendi başına tüm sistem hataları ve etkilerini gözleyip anlaması ve bunu düzeltecek çalışmaları yapabilmesi güç olacaktır. Bu teknikler çok iyi koordine olmuş takım yaklaşımıyla çözülebilir.[18]

#### **3.2.3.4. PHA analiz tekniği**

Bu ana kadar verilen teknikler, çoğu bakımdan sistem yönelimli tekniklerdir. Etkiler sistem çalışması ile ilgili hatalardır. PHA ise sistem tarafından personel ve diğer insanların maruz kalacağı potansiyel tehlikeleri belirleme tekniğidir. PHA'nın amacı sistemin içinde kendinde var olan potansiyel tehlike durumlarını tanımlamaktır. Kritiklik düzeyi ve meydana gelebilecek potansiyel kaza risklerinin ağırlıkları belirlenir. PHA çalışması mümkün olduğu kadar ürün geliştirmenin ilk etaplarında yapılmalıdır. Bu aynı zamanda tasarımın ilk evrelerinde yapılırken tehlikeli durumları kontrol altına almak için emniyet yaklaşımlarının hazırlanmasına yardım edecektir. Böylece daha sonraları ortaya çıkması muhtemel yüksek maliyetli tasarım değişikliklerinin önlenmesi amaçlanır.

PHA'nın ilk basamağı sistemdeki potansiyel tehlike kaynağı eleman ve bileşenleri belirlemektir. Bu süreç mevcut mühendislik tecrübeleri, farklı zamanlarda geliştirilmiş çok sayıda kontrol listesinin kullanımı ile olur. PHA içinde ikinci basamak potansiyel kazalara dönüşebilecek özel tehlikeli durumlarını ve olayları belirlemektir. Ardından bu potansiyel kaza risklerini önleyici ölçümlerine gerek olup olmadığı konusunda karar verilir.

En basit bir PHA analizi için oluşturulacak tablonun ilk sütununda bileşen, alt sistem ve tehlike türleri, ikinci sütununda bunların olası etkileri, üçüncü

sütunda etkilerin azaltılması ve kontrolleri ve son sütunda da bulgular, açıklamalar ve öneriler yer almalıdır.

### **3.2.4. Hata ağacı analizi (Fault Tree Analysis - FTA)**

Sistem iki karşıt bakış açısı yönüyle değerlendirilebilir. Bunlar hata ağacı (fault tree) ve başarı ağacı (success tree) yöntemleridir.[18] Sistemin farklı arızalanma yolları ve farklı çalışabilme yolları incelenir. Başarı ağacı yöntemi sistemin tasarım aşamasında istenen tüm fonksiyonları yerine getirebilmesi için gerekli şartların belirlenmesinde kullanılır. Fonksiyonel analizin yardımcı bir tekniğidir.[22] Hata ağacı yöntemi ise sistemin hangi durumlarda hata vereceğinin belirlendiği yöntemdir. Yine tasarımda yararlanılabileceği gibi kullanım sırasında ortaya çıkabilecek sorunlar için de mantıksal çözümler sunar. Ağacın oluşturulmasında izlenecek yol prensipte her iki yöntem içinde aynıdır. Son bölümdeki örnekte hata ağacının bir türevi olan tam (perfect) hata analiz yöntemi (P-FTA) kullanılacağından bu bölümde başarı ağacı yöntemi yerine hata ağacı analizinden bahsedilecektir.

#### **3.2.4.1. Hata ağacı metodolojisi**

Hata ağacı analizi kavramı, 1962 yılında Bell Telefon Laboratuvarlarında, Minutemen kıtalararası balistik füze hedefleme kontrol sisteminin güvenlik değerlendirmesini gerçekleştirmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu yönüyle bir güvenilirlik/emniyet analizi tekniğidir. Hata ağacı tekniği sistem hatalarını, sistem ve bileşenlerinin hatalarındaki sakıncalı olaylar arasındaki bağıntıyı gösteren mantıksal diyagramlardır. Sakıncalı olay ya da zirve olay (top event) denilen sistemin istenmeyen ancak şüphelenilen arıza durumu, hata ağacının zirvesinde yer alır. Bu olayın meydana gelmesine neden olan alt olaylar bir bütün halinde diyagramın altında yer alır. Ortaya çıkması muhtemel hataların izlediği yol, hata mekanizması, arıza ağacının üzerinde görülebilir.[6,21] Zirve olayın meydana gelmesine neden olan alt olayların hepsi, eğer hata ağacı iyi hazırlanmışsa, şeklin üzerinde görülmelidir. Hata ağacı hatanın ortaya çıkmasına neden olan kök karakteristiklere kadar detaylandırılır. Her bir sistem bileşeninin, zirve olayın ortaya çıkmasına neden olacak hata türlerini içerecek şekilde, insan etkisi ve sözcülemi yazılım hataları için içine katılabilir. Bir hata ağacının sistem

bileşenlerinin olması muhtemel tüm hatalarını içermesi gerekmez. Sadece modellenmiş zirve olayın meydana gelmesine neden olacak hata türlerinin eksiksiz belirtilmesi gerekli ve yeterlidir.[21]

Hata ağacı analizi, sistemde tehlike olarak kendini gösteren olası tüm problem veya hataların tanımlanmasında ve analizinde kullanılan sistematik bir yolu temsil eder. FTA her düzeyde tehlike oluşturan hataların analizini yapar ve bir mantık diyagramı aracılığı ile en büyük olayı (kayıbı) yaratan hataların ve problemlerin olası tüm birleşimlerini gösterir. Ayrıca hatanın belirlenmesinde söz konusu aşamalara yol göstererek karmaşık ve karşılıklı ilişkiler sonucu ortaya çıkan olumsuzluğun belirlenmesini ve bu olumsuzluğun oluşma olasılığını değerlendirmeyi amaçlar.[21] Bu yönüyle FTA, FMEA tekniği ve diğer risk değerlendirme yöntemleri ile amaç birliği içinde uygulanabilir.[21] FTA'da oluşması istenmeyen olayın kökündeki sebebe kadar inilerek istenmeyen diğer olası hatalar ve onların sebepleri ortaya çıkarılır.

Ağaçlar hiyerarşik modellerdir ve bu modeller güvenlik dayanabilirlik ve risk değerleri açısından performans değerlendirmede önemli rol oynar.

Hata ağacı analizinin ana hedefleri herhangi bir sistemin güvenilirliğinin tanımlanması, herhangi bir probleme etki eden karmaşık ve biri birleri ile karşılıklı ilişki içinde bulunan olumsuzlukların belirlenmesi ve bu olumsuzlukların karşılaşıma olasılıklarının değerlendirilmesi ve herhangi bir sistemde kendini tehlike olarak hissettiren tüm problem veya olumsuzlukların sistematik olarak ortaya konulmasıdır.

#### **3.2.4.2. FTA temel kavramları**

Sistemin çalışması iki farklı bakış açısıyla değerlendirilebilir. Sistemin başarılı olması veya hata vermesinin pek çok yolu bulunmaktadır. Analitik bakış açısıyla, arıza bölgesini esas alıp analiz yapmanın bazı avantajları vardır.

Başarı kıstasları, çok sayıda ancak çeşitli nedenlerle bir uğraşmanın sonucu olması gerektiğinden, sonuç ürün üzerinde başarının arzu edilenle kıyaslaması zordur. Ancak bir başarısızlığı değerlendirmek daha kolaydır.

Başarı, sistem verimliliği ile ilişkili olma eğilimindedir. Çıktı sayısı,

faydalılık derecesi, üretim ve pazarlama özellikleri bu karakteristik değişkenlerin sürekliliği ile ifade edilebilir. Fakat basit ayrık olaylar olarak modellenmesi zordur. Böylece hata özellikle tüm hata daha kolay tanımlanabilir. Arada bağıntı kurmak için başarı yöntemini kullanmak daha zordur. Bu durum hata bölgesi çalışmalarının, başarı bölgesi kullanımını analizlerinde daha değerlidir.

Karmaşık sistemlerin ağaç hazırlama için yapılan çizimlerinde zaman harcamak gereklidir ve masraflıdır. Hata dikkate alındığında önemli hata türlerini kapsayan bir model olmalıdır. Başarı diyagramı dikkate alındığında ise önemli ve ilgilenilen hata türlerini kapsayan bir model yeterlidir. Başarı diyagramı dikkate alındığında değişik başarı tanımlarını içeren belki yüzlerce sistem modeli tasarlanmalıdır. Hata durumunun kullanıldığı örneklerden birisi olan Minuteman füze sistemlerin de sadece istenmeyen üç olay için hata ağacı oluşturulmuştur. Bunlar dikkatsizlik sonucu sistemin aktif hale getirilmesi, kaza ile motorun ateşlenmesi ve hatalı fırlatmadır. Karmaşık bir sistemin tüm durumları için analiz yapmak yerine, üzerinde dikkatlice analiz yapılacak, kritik üç olay için çalışmak yeterlidir.

### 3.2.4.3. İstenmeyen olay kavramı

Hata ağacı analizi gerçekleşmesi istenmeyen özel bir durum üzerinde odaklanan ve bu olayın sebeplerini belirlemeyi hedefleyen dedüktif bir analiz tekniğidir. Meydana gelmesi arzu edilmeyen olay sistem için hazırlanan diyagramdaki zirve olayı gösterir. Bütünüyle hata ya da felaketle sonuçlanabilecek olaya bağlanır. Analizin başarılı olabilmesi için zirve olayın seçimi önemlidir. Eğer ifade çok genel ve kapalı ise analizin yönetilebilirliği çok güç olur. Eğer çok detaylı olursa analiz sisteme yeterince geniş bir bakış açısı getirmez. FTA zaman harcamayı gerektiren ve pahalı bir çalışma olabilir. Maliyetin istenmeyen bir olayın ortaya çıkması durumunda karşılaşılabilecek sonuçların ağırlığı ile kıyaslanabilir olması gerekir.

Hata ağacına başlamak için seçilen bazı zirve olaylara örnek olarak; çok sayıda can kaybının yaşanabileceği ticari bir uçak kazası, uzay keşif programında mekiğin ve astronotların kaybedilmesi, bir denizaltıda düşman saldırısı sırasında meydana gelebilecek bir arıza ya da rutin çalışma durumunda oluşabilecek bir

arıza, kontak anahtarı çevrildiğinde otomobilin çalışmaması durumları verilebilir.

#### **3.2.4.4. Hata ağacının temel elemanları**

Bir hata ağacı analizi basitçe bir analitik teknik olarak tanımlanır. Burada sistemin arzu edilmeyen karşılaşılması istenmeyen durumu belirtilir. Genellikle bu emniyet yönünden kritik bir durumdur. Sistem genel durumda bulunduğu çevrede analiz edilir. İstenmeyen durumun meydana gelebileceğine inanılan tüm yolların bulunmasına çalışılır. Hata ağacının kendisi bir grafik modeldir. Birçok paralel ve sıralı hataların bir birleşimidir. Hatalar sistem bileşenlerinin donanım arızalarından, insan hatalarından ve istenmeyen olayların ortaya çıkmasına neden olan diğer elverişsiz olaylarla ilişkili olabilir. Bir hata ağacı bu nedenlerle istenmeyen olaylara yol açan temel olaylar arasındaki mantıksal ilişkileri açıklar.


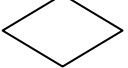










Hata ağacının muhtemel tüm sistem arızaları ya da sistem arızalarının muhtemel tüm sebepleri için bir model olmadığına anlaşılması önemlidir. Hata ağacı zirve olaya göre biçimlenir. Bu zirve olay bazı özel sistem hata türlerine uygun gelişir. Hata ağacı böylece yalnızca zirve olaya katılan bu hataları içerir. Ayrıca bu hatalar ayrıntılı değildir. Bunlar sadece sistem analizi yapanın takdir ettiği ve inandığı hataları kapsar. Belirtmek yine önemlidir ki; hata ağacının kendisi bir kantitatif analiz değildir. Kalitatif bir modeldir. Ancak sık sık kantitatif olarak değerlendirilebilir. Modelin kalitatif tabiatı değişmez. Hata ağacı kapılar (gates) olarak bilinen elemanlar arasındaki karmaşık ilişkileri düzenleyen semboller kullanır. Kapılar hata mantığının üste doğru geçişine izin verir ya da kullanımını yasaklar. Kapılar daha üst seviyede bir olayın meydana gelmesi için gerekli olaylar arasındaki ilişkileri gösterir. Daha üst olay mantık kapısının çıkışıdır. Daha alt seviye olay ise mantık kapısının girişidir. Lojik kapı sembolü çıkış olay için gerekli giriş olayları arasındaki ilişki tipini gösterir. Bu nedenle kapılar bir bakıma elektrik devrelerindeki anahtarları ya da boru hatlarındaki valfleri andırır.

#### **3.2.4.5. Semboller ve hata ağacının blok yapısı**

Hata ağacı sembolleri Çizelge 3.4 ile verilmiştir.



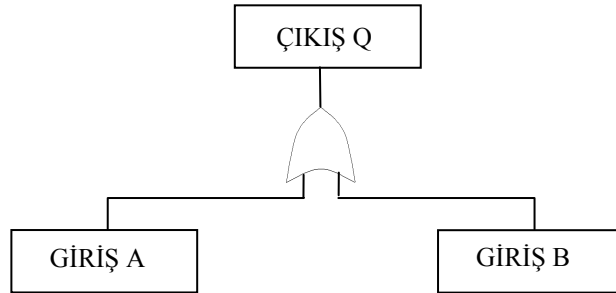
Çizelge 3.4. Hata ağacı sembolleri

Birincil olay sembolleri	
	Ana olay
	Şartlı olay
	Gelişmemiş olay
	Dış olay
	Ara olay
Kapı sembolleri	
	Ve
	Veya
	Özel Veya
	Öncelikli Ve
	Yasaklı
Aktarma sembolleri	
	İçeri Aktarma
	Dışarı Aktarma

Hata ağacındaki birincil olay bir nedenle daha fazla geliştirilemeyen olaydır. Dört tip birincil olay vardır. Çember sembolü temel hatayı başlatan olaydır. Daha fazla geliştirilmesine gerek duyulmaz. Diğer deyişle olayın elverişli incelenebilir detaylamasına ulaşılmış demektir. Elmas sembolü özel hata olayının daha gelişmediğini belirtir. Bunun anlamı olayın yetersiz sonuçların bir olayı

olması ya da olay hakkında başkaca mevcut bilginin bulunmamasıdır. Elips sembolü ise bir kapıya herhangi bir şart ya da sınırlama getirmek için kullanılır. Öncelikle yasaklı ve öncelikli ve kapılarıyla kullanılmaktadır. Ev sembolü normalde olması umut edilen olayı işaret etmek için kullanılır. Sözgelimi dinamik sistemde faz değişikliği olabilir. Bu nedenle ev sembolü hata olmayan olayları gösterir. Ara olay yani dikdörtgen sembolü ise lojik kapılardan gelen bir hata olayı ya da daha önceki sebepler nedeniyle meydana gelen hata olayıdır. Tüm ara olaylar bir dikdörtgen sembolü ile gösterilir.

Hata ağacında kullanılan mantık kapılarının iki temel türü vardır. Bunlar Ve ve Veya kapılarıdır. Diğer kapıların hepsi bu temel iki kapının farklı özel durumlarıdır. Veya kapısı çıkış olayının meydana gelmesi bir veya daha fazla giriş olayının gerçekleşmesiyle olabilir. Bir Veya kapısına çok sayıda giriş olayı bağlanabilir. Şekil 3.8’de iki girişli bir Veya apısı verilmiştir. Girişler A ve B çıkış ise Q’dur. Q olayı A, B ya da A ve B’nin olmasıyla gerçekleşebilir. Giriş olayları asla çıkış olaylarının bir sonucu değildir.



Şekil 3.8.Veya kapılı hata ağacı olayı

Ve kapısı çıkışında olay tüm giriş olaylarının gerçekleşmesi durumunda ortaya çıkabilir. Ve kapısına da çoklu sayıda giriş olayı bağlanabilir. Bu durumda Q çıkış olayı A ve B giriş olaylarının aynı anda gerçekleşmesiyle meydana gelir.

Üçgen biçiminde gösterilen aktarma sembolleri bir hata ağacında aşırı tekrarları önlemek için avantaj sağladığından kullanımı elverişlidir. Bir kapıya bağlanmış içeri aktarma onun uygun dışarı aktarma sembolüne bağlanır. Bu dışarı aktarma başka bir sayfada kapıya gelen ağacın ilave bir bölümünü gösterecektir.

Bu noktada sistem hatası ve sistem başarısızlığı arasındaki farkı açıklamak gereklidir. Tüm başarısızlıklar hatadır. Ancak her hatanın başarısızlık yaratması

gerekmez. Başarısızlık temel anormal oluşumlardır. Hata daha üst düzeyden olaylardır. Hatanın özgün tanımı içinde sistem bileşeninin istenmeyen durumunun ne olduğu, özelliği yanında ne zaman olduğu da bulunmalıdır. Bu, ne ve ne zaman kavramları hata ağacına girilen olay tanımlarının bir parçası olmalıdır.

Hata oluşumu ve hata varlığı açısından, FTA analizeci için, hatayı üç kategoriye ayırmak faydalıdır. Birincil kategori de hata sistem bileşeninin tanımlı çevresi içinde meydana gelmiştir. İkincil kategori de hata sistem bileşeninin tanımlandığı çalışma ve çevre koşulları dışında meydana gelmiştir. Birincil ve ikincil hatalar bileşen düzeyinde meydana gelir. Üçüncü kategori olan kumanda hataları ise bileşenin uygun çalışmasını, yanlış zaman ve yanlış yerde kullanılmaktan kaynaklanır.

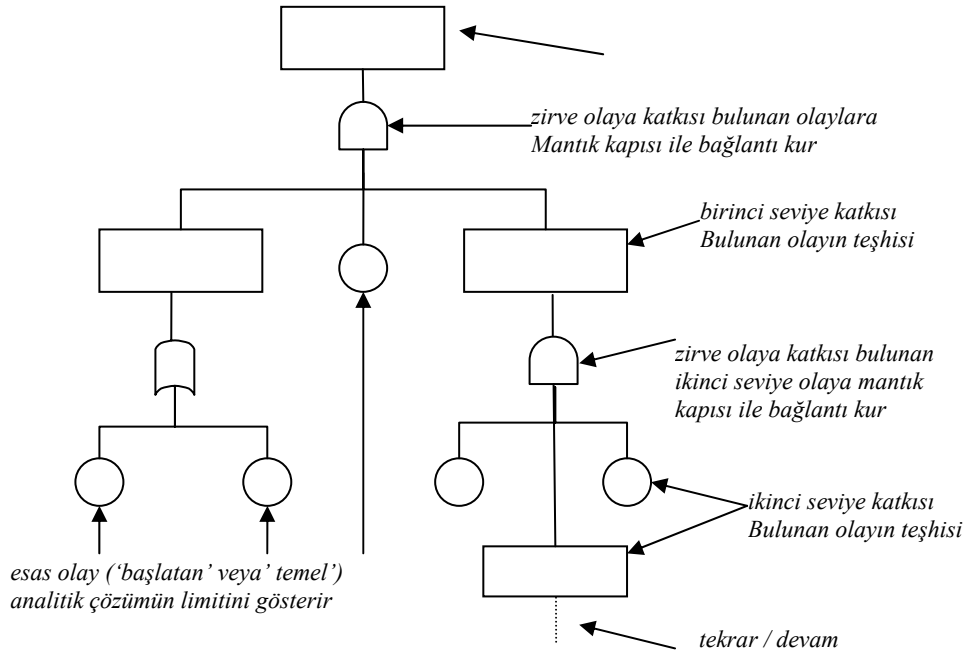
#### **3.2.4.6. Hata ağacı hazırlamak için temel kurallar**

Hata ağacı hazırlama süreci yaklaşık 15 yıl gibi bir süre boyunca kademe kademe gelişmiştir. İlk başlangıç zamanlarında bir yetenek işi olarak düşünülmekteydi. Fakat başarılı ağaçların hepsinin bazı temel kurallara uyularak çizilmiş oldukları dikkati çekmiştir. Kurallara uyulması başarılı hata ağacı hazırlamaya yardımcı olacaktır. Bu nedenle bir yetenek olmaktan daha çok bilimsel bir çalışmadır. Özel bir hata durumu için hata ağacı hazırlanacaksa olay kutucuklarının içine tam ifadelerle olay tanımlanmalıdır. Birinci kural ‘kutucukların içine hataları açıklayan ifadeler yazılır’ biçimindedir. Burada oldukça geniş bir ifadenin kullanılması gerekebilir. İfadeyi açıklayan cümleyi kutucuğun içine sığdırmaya çalışılmamalı gerekirse kutucuk büyütülmelidir. Kelimeler kısaltılabilir. Fakat ifadeleri kısaltmamaya özen gösterilmelidir. Bazı örnek ifadeler şöyle olabilir;

- Bobin uçlarına EMK uygulandığında normalde kapalı olan röle kontakları açılmıyor.
- Güç uygulandığında motor çalışmıyor.

Sonraki aşama her bir kutucuktaki ifade için ‘bu hata bileşen hatasından kaynaklanabilir mi?’ sorusunun sorulmasıdır. Bu sorunun cevabı evet ise olay bileşen hata durumu olarak sınıflanır. Bu şekilde sınıflanacaksa altına Veya kapısı

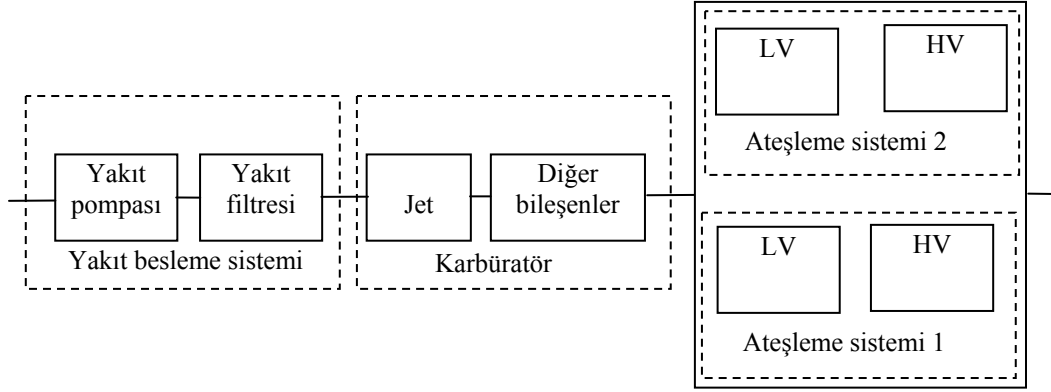
ilave edilmeli ve birincil, ikincil ve kumanda hata türlerinden hangisine ait olduğu incelenmelidir. Eğer sorunun cevabı hayır ise sistem hata durumu olarak kabul edilmelidir. Bu durumda minimum gerekli, yeterli ve hemen arakasından gelen sıradaki sebep veya sebepler araştırılmalıdır. Bu araştırma hata olayı kutucuğun altına herhangi bir mantık kapısı gerektirebilir ya da gerektirmeyebilir. Bir kapının tüm girişleri herhangi birinin daha ileri bir analizine girişmeden önce tam olarak belirlenmelidir. Bu kural hata ağacının kademeli şekilde geliştirilmesi gerektiğini daha alt seviyede kabuller yapmadan önce bulunulan seviyenin tamamlanması gerektiğini gösterir. Kapı girişleri, dikkatlice tanımlanmış hata olayları olmalıdır. Kapılar doğrudan diğer kapılara bağlanmamalıdır. Uygun bir hata ağacı hazırlama mantığı Şekil 3.9 ile verilmiştir.



Şekil 3.9. Hata ağacı hazırlama mantığı

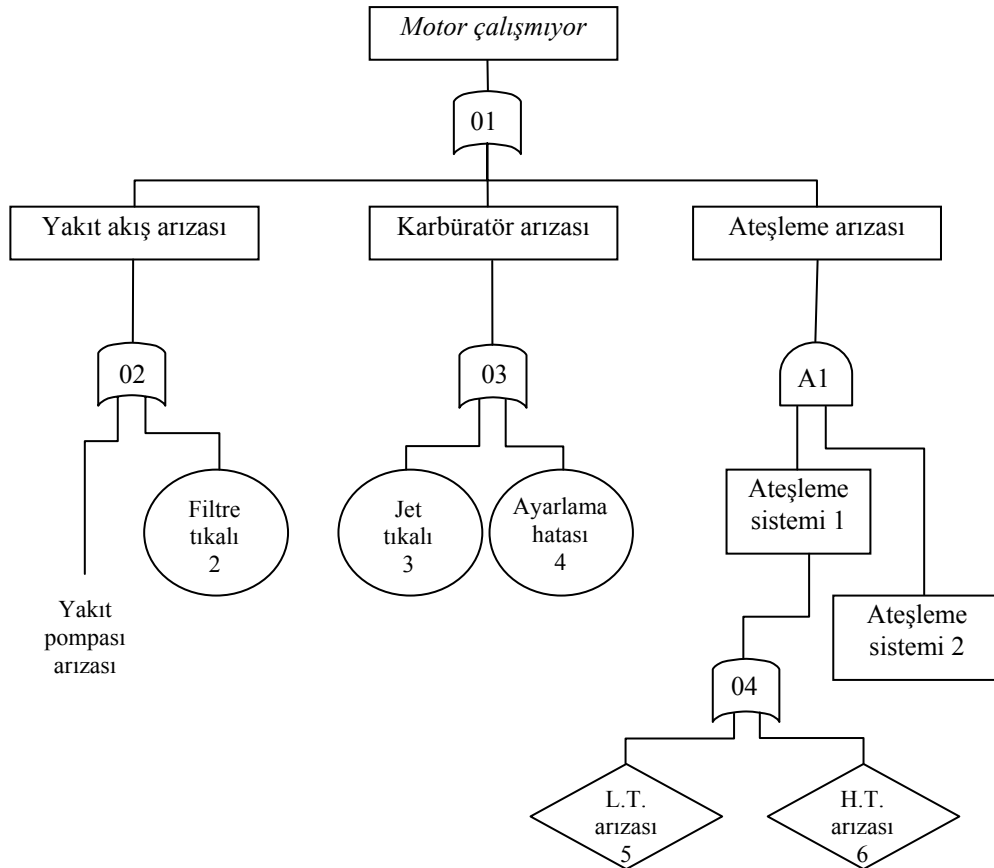
#### 3.2.4.7. Pistonlu motorlu uçağın ateşleme sistemi için hata ağacı

Bir içten yanmalı uçak motoru için basit bir blok diyagram Şekil 3.10'da görülmektedir. Burada iki ateşleme sistemi vardır. Bunlar sistemde aktif halde bulunan bir birine paralel ve yedeklemeli yapılarıdır.



Şekil 3.10. Pistonlu motorlu uçak için güvenilirlik blok diyagramı

Şekil 3.11’ de ise bu sistemde belirlenmiş bir zirve olay için çalıştırma esnasında ateşleme problemine neden olabilecek yakıt akışı arızası, karbüratör arızası ve ateşleme devresi arızası biçiminde 3 hata durumu için verilmiş hata ağacı görülmektedir.



Şekil 3.11. Ateşleme sistem arızası için hata ağacı

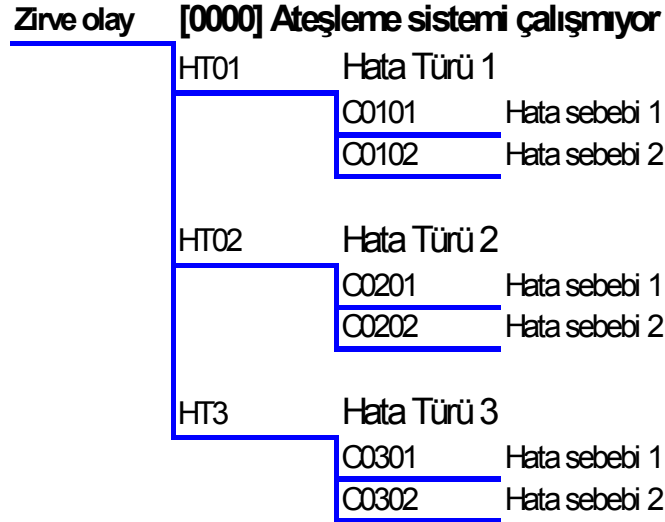
Bunlar üç girişli Veya kapısı ile ana olaya bağlanmıştır. Alt seviyede ateşleme arızası 1 numaralı ya da 2 numaralı ateşleme devrelerindeki arıza nedeniyle ortaya çıkabilir. Bunlarda blok diyagramda aktif ve paralel yedeklenmiş olarak tasarlandıklarından hata ağacında Ve kapısı ile bağlanmışlardır. Unutulmamalıdır ki belirlenen her bir zirve olay için farklı bir hata ağacı oluşturulacaktır. Uçak motoru örneğinde eğer uçuş emniyetsizliği zirve olay olarak kabul edilirse, bu durumda kalkış öncesinde her iki ateşleme sisteminin de çalışır durumda olması gerekecektir. Bu durumda A1 kapısının Veya kapısına dönüştürülmesi gerektir. Hata ağacı gösteriminin görece az karmaşık sistemler için hazırlanması da incelenmesi de kolaydır. Ancak tüm sistem bileşenlerinin hata türlerini gösteren, karmaşık sistemlerin sözcümlü bir yolcu uçağının uçuş kontrol sistemleri için hazırlanan bir hata ağacı analizi zor ve zahmet verici olacaktır. Endüstrinin diğer dallarında, bir kimya fabrikasının ürün elde etme süreci ya da nükleer bir santral için hazırlanmış hata ağacı da yine aynı şekilde ekonomiklik ve etkinlik açısından elle hazırlanması durumunda oldukça yorucudur. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için hata ağaçlarının oluşturulması ve mantık hesaplamalarının yapılabilmesi için bilgisayar programları geliştirilmiştir.

#### **3.2.4.8. PFTA tam hata ağacı**

Tam hata ağacında olaylar arasındaki mantıksal bağıntıları gösteren semboller kullanılmaz. Zirve olay hata ağacının sol üst tarafında bağlanır. Sağa ve aşağı yönde öncelikle hata türleri ve onların altındaki kök sebeplere kadar inen alt olaylar yerleştirilir. Bu alt olaylar zirve olayının meydana gelmesine neden olan hata sebepleridir. Hatanın ortaya çıkması arıza ağacı üzerinde izlediği yol üzerinde gerçekleşir. Basit bir PFTA mantıksal diyagramı Şekil 3.12’de verilmiştir.

PFTA konusu üzerinde, örnek uygulamanın da yer aldığı, dördüncü bölümde daha detaylı olarak durulacaktır. Renault Merkez’de tasarım aşamasında ve üretim sonrası karşılaşılan problemlerin çözümünde bu teknik yaygın olarak kullanılmaktadır. Problemlerin çözümüne standart yaklaşımlar getirmek için Renault Merkez’e bağlı tüm fabrikaların da bu yaklaşımı kullanması tavsiye

edilmiştir.



Şekil 3.12. Ateşleme sistemi için hazırlanmış tam hata ağacı

### 3.3. Kalite Fonksiyon Yayılımı (Quality Function Deployment – QFD)

Değişen ve gelişen iletişim teknolojileri nedeniyle müşteri beklentileri de sürekli değişmektedir. Müşteri beklentilerini doğru algılayarak, bunları ürün ve ürünün üretildiği süreçlere doğru aktaran firmalar, yeni rekabet ortamında başarıyı yakalamakta avantaj sağlamaktadırlar.[23] Şirketlerde var olan her bir sürecin temel varlık nedeni müşteri beklentilerinin karşılanmasıdır. Müşteri beklentilerini doğru algılamak ve bu beklentiler doğrultusunda ürün ve hizmet bileşenlerinin değişkenlerini, maliyetlerini ve güvenilirliklerini belirlemek iyi bir tasarım için kritik bir noktadır.[24] İşletmeler kaynaklarını müşteri açısından önemsiz bir ürün bileşeni için değil, müşteri ve/veya ürün için kritik alanlarda harcamak isterler. Bu odaklanma anlayışı ile müşteri beklentilerini ürün, süreç, parça, işlem, kontrol, maliyet ve güvenilirlik alt bileşenlerine doğru aktarabilmede Kalite Fonksiyon Yayılımı, etkinliğini göstermiş sistematik bir yaklaşımdır. Tanım olarak müşteri isteklerini ölçülebilen performans değişikliklerine dönüştüren ve takım çalışmasını gerektiren bir kalite tekniği olarak da bilinir.[25] Müşterinin ihtiyaçlarını kalite ihtiyaçlarına dönüştürmekte, imal edilen bir ürün için tasarım kalitesini belirlemekte ve her bir parçanın kalitesiyle süreç elemanları arasındaki ilişkileri sistematik bir şekilde yaymaktadır.[26] Daha iyi veri toplamaya ve süreç esnasındaki iletişime ağırlık verilerek, özellikle kritik kalemler üzerindeki yeniden

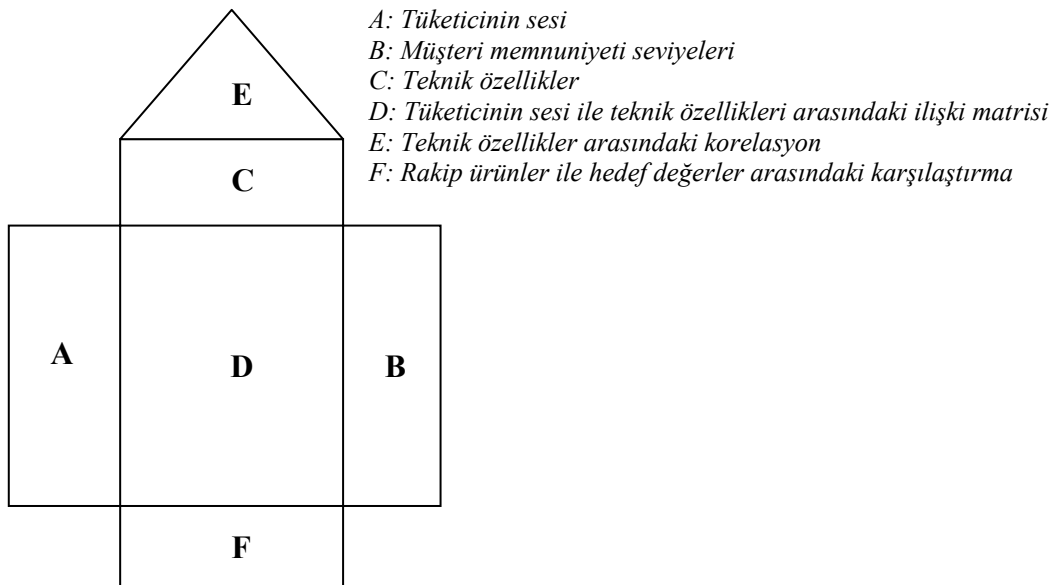
tasarım ihtiyacını ortadan kaldırır.[27]

Kalite fonksiyon yayılımı tanımı basit bir teknik için yetersiz bir ifadedir. QFD güvenilirliğin ötesine geçer.[18] Tasarım kabiliyetini etkileyen tüm faktörleri tanımlayabilmek ve ürün kullanıcı tatminini sağlamak ve kaliteyi arttırmak için etkili bir yöntemdir. Aynı zamanda kullanıcısının ürün için hissettiklerini ve tercihlerini gösterir. Tasarım ve süreç aktivitelerinin altını çizen ve güvenilirliği sağlamak için gerekli kontrolleri kapsayan faydalı ve sistematik bir yoldur.

Kalite fonksiyon yayılımı çalışması tasarım, üretim, pazarlama, güvenilirlik ve kalite servislerince kullanılabilir. Bu teknik yeni bir ürün, yeni bir servis, mevcut bir ürün, yatırım planlama, süreç yönetimi gibi geniş bir yelpazede kullanılabilir.[18] Riskler, zorlayıcı ve kısıtlayıcılar ile gerekli kaynaklar tanımlanır. Bu aşamada detaylı analiz ya da detaylı planlama yapılmaz. Ancak uygulanması muhtemel yöntemler tanımlanır.

### 3.3.1. Yöntem ve araçlar

Fonksiyonlar arası planlama ve iletişimi sağlayan bir tür kavramsal harita olan kalite evi gösterimi kullanılır. QFD tablolarının Şekil 3.13 ile verilen biçimi onların kalite evi olarak adlandırılmasına yol açmıştır.



Şekil 3.13. Kalite evinin temel bölümleri



Değişik problemlerin çözümleri için çalışan ve sorumluluk alan insanlar, evin çatısı altındaki bilgi motiflerinden tasarım önceliklerini kolayca belirlerler.[28]

### 3.3.2. Kalite evinin kurulma aşamaları

Bu aşamalar aşağıdaki biçimde sıralanabilir.

1. Hedef tüketici özelliklerinin ve rakip ürünlerinin belirlenmesi: Hedef pazarın belirlendiği aşamadır. Anket çalışmalarıyla müşteri istek ve ihtiyaçları belirlenir.
2. Tüketici ihtiyaçlarının belirlenmesi: Önem sırası ve ağırlığına göre, müşterilerin kullandıkları ifadelere uygun gelecek şekilde belirtilir ve listelenir. Gösterilen ihtiyaçlar önem derecesine göre sözgelimi 1 ile 5 arasında puanlanır. Elde edilen sıralamaya göre en önemli tasarım kıstasları belirlenir.
3. Teknik özelliklerin belirlenmesi: Müşteri ihtiyaçlarının teknik ihtiyaçlara dönüştürülmesidir. Teknik ihtiyaçlar proje ekibinin yaptığı beyin fırtınası toplantıları ile belirlenir. Tabloda çok sayıda teknik ihtiyaç belirtilmesi, matrisin sütun sayısını arttıracaktır. Bu durum gerek duyulan deneme sayısını artırır ve karar almayı zorlaştırıcı karışıklıklara yol açar.
4. İlişkilerin belirlenmesi yada korelasyon matrisi: Müşteri istekleri ile teknik özellikler arasındaki ilişkiler matrisin hücrelerine geçirilir. İlişkinin varlığı ve ne kadar güçlü şekilde bağlandıkları belirlenir.
5. Teknik ihtiyaçların bağıl ve mutlak önem derecelerinin hesaplanması: Her bir sütunun mutlak önem dereceleri tespit edilir. Hangi sütunlara ait teknik ihtiyaçlar daha yüksek önem derecesine sahipse onlar üzerinde daha fazla yoğunlaşılır.
6. Teknik özellikler arasındaki ilişkinin ya da korelasyonların belirlenmesi: Teknik ihtiyaçlardan birinin geliştirilmesi için yapılan çalışma, ilgili ihtiyaca olumlu ya da olumsuz etkide bulunabilir. Korelasyon matrisinde sembollerle ilişkinin kuvvet derecesine göre

bağıntı kurulur.

7. Rakiplerle karşılaştırma ve hedeflerin belirlenmesi: Rakip firmaların piyasadaki benzer ürünleriyle kıyaslama yapılır. Kalite evinde bu çeşit bir kıyaslama ile rakipler karşısında durum belirlenmiş olur. İyileştirilmesi gereken yönler ortaya çıkarılır. Güçlü ve zayıf noktalar tespit edilmiş olur.

Şekil 3.13 tüm aşamalarda elde edilen veri ve bulguların yerleştirildiği kalite evini göstermektedir. Bu kalite yayılım fonksiyonu tablosu üst seviye bir tablodur. Daha detaylı görüntüleri için alt seviyeden tablolar hazırlanabilir. Belirlenmiş aynı kıstaslar eşliğinde sözcelimi tasarım detayları, bileşen karakteristikleri, üretim ve süreç ya da toleranslar için hazırlanabilir. Tasarım ve üretimin detay bölümleri, analizler, testler, üretim süreç kontrolü, son kontroller, ambalajlama, bakım ve onarım daima ürünün tüm önemli ihtiyaçlarıyla ilintili olarak sistematik şekilde planlanır ve hesaplanır. Amaç tüm teknik gereksinimlerde en iyi olmak değil hedeflere ulaşmaktır. Nispeten önemli olmayan ihtiyaç ve özellikler aynı şekilde gösterilir. Bunlar üzerinde çalışmak aynı şekilde önemlidir. Maliyetlerin azaltılmasına ve güvenilirliğin artırılmasına katkı sağlayabilirler.[18]

### **3.4. Geri Dönüş Bilgileri ve Uzman Görüşleri**

#### **3.4.1. Bilginin birikimi**

Son yıllarda Avrupa ve Amerika'da araştırma ve geliştirme, endüstride şirketlerin bilgi birikimi ve bilgi yönetimi konularında önemli bir hareketlilik görülmektedir. İşlerin paylaşılması şirketler arasında bilginin paylaşımını gerektirmektedir. Bu sadece sahip oldukları bilgi birikimini daha iyi yönetmek değil yeni bilgiler yaratmak için de gerekmektedir. Ayrıca bilginin gerçek paylaşımı şirket çalışanlarının çalışma koşullarını da iyileştirmelidir.[29]

Bilgi bankası, veri bankası yada veri tabanı bilgi birikiminin sağlanması ve bilginin yönetimi için bir araç olarak endüstride kabul görür. Aynı şirketin servisleri arasında geri dönüş çalışmaları, şirketin dünya üzerinde farklı coğrafyalarda faaliyet gösteriyor olması, şirket içinde yetişmiş uzmanların zamanla görevlerinden ayrılmaları geri dönüş bilgilerine hâkim olmayı ve

kalcılığının sağlanmasını gerektirir.

Bilgi birikimi bir organizasyon içinde büyümeyi, bilginin iletimi ve mevcut bilginin korunmasına yardımcı olma amacını güder. Bu şirket içerisinde ulaşılabilirliği ve yeniden kullanılabilir olması için bilgi kaynaklarının yönetimini gerektirir. Şirket içinde bilgi birikimi bir organizasyon içinde bilginin açık biçimde gösterimi, sürekliliği ve yorumlanması olarak adlandırılır. Ürün hakkında bilgiler, üretimden kaynaklanan bilgiler, müşteriler, satış stratejileri, finansal sonuçlar, stratejik plan ve hedefler olabilir.[29] Bilgi birikimi süreci bilginin uygun biçimde yeniden kullanımına izin verir. Amaç, şirketin sahip olduğu bilgilerin yeniden görülebilir olması, uygun biçimde yerleştirilmesi, onları korumaya hakim olunması, ulaşılmasını, güncellenmesini, nasıl dağıtılacağına ve daha iyi kullanılabilmesinin bilinmesini, sinerji yaratılmasını ve değerlendirilmesini sağlamaktır. Tecrübe birikimi şirketin sahip olduğu az sayıda uzman bilgisinin belli bir düzen içinde tutulmasını, dağıtımını sağlamayı gerektirir.

#### **3.4.2. Bilgi birikimi metotları**

Bilgi birikimine yardımcı olmak için pek çok yöntem tanımlanmıştır. Temel prensip herhangi bir aktiviteden çıkan tecrübe bilgi elemanlarının oluşturulmasıdır. Sözelimi REX metodu Super Phenix reaktörlerinin çalıştırma tecrübelerini biriktirme amacıyla tasarlanmıştır.[29] Bir kullanıcının değerlendirmek ve faydalanmak istediğinde bu bilgileri kullanabilmesi için bir hafıza içinde stoklanır ve yönetilir.

#### **3.4.3. Bilgi bankaları**

Bir bilgi bankası bilgiyi korumayı ve potansiyel kullanıcıların kullanımına hazır hale getirmeyi amaçlar. Bilgi bankası geri dönüş bilgileri ile başlar. Tasarımcılar, mühendisler ve bakımcılar için bilgilerin korunması ve kullanılabilir hale getirilmesi amaçlanır. Faydaları bilgiyi depolamak, bilgiler için biçimsel yapıları sağlamak, analiz raporları ya da uzman görüşleri biçiminde bilgi tekniklerinin bütünleşmesini sağlamak, bilgiyi organize etmek, yönetmek, güncellemek ve zaman içindeki geri dönüş bilgileriyle birleştirmek, kullanıcıya geçmiş dönem bilgilerini vermek ve arşivlenmiş bilgilere ulaşılmasını ve

dökümanite edilebilir olmalarını sağlamak, kolaylıkla yeni bilgilerin eklenebilmesini sağlamak, bilginin kalıcılığı ve sürekliliğini sağlamak olarak sıralanabilir.

#### **3.4.4. Veri tabanı yönetim sistemi**

Veri tabanı yönetim sistemleri, brüt (ham) verileri yapılandıran ve kullanıcıya kolay araştırma ve veri işleme olanağı sağlayan enformatik uygulamalardır. Bilgisayar alanında son dönemdeki gelişmeler farklı seçenekler sağlamışlardır. Bilgiyi toplama yöntemi, tabiatı, veri işleme ihtiyacı, enformatik yöntemler, bütçe kısıtlamaları ve uygulama ömür süreleri dikkate alınmalıdır.

#### **3.4.5. Güvenilirlik veri bankaları**

Veri bankaları aynı bilim ve teknik alanıyla ilgili bir araya getirilmiş veri bütünüdür. Bilgisayar ortamında ve her yönde hızlı olarak sorgulanabilir. Bilgisayar ortamında ve her yönde hızlı olarak sorgulanabilir.

Temelde otomatize edilmiş dökümantasyon aracıdır. Biyoloji, tıp, doğal bilimler gibi tüm temel bilimlerde, 150 – 200 kadar veri bankası mevcuttur. Bunların yaklaşık yarısı tek başına Amerika Birleşik Devletleri'ndedir. Bunlar bilgisayarlar üzerinden ulaşılan ortamlarda tutulur. Veri bankalarının yaklaşık %70'i resmi kurumlara, %20'si özel teşebbüslere aittir. Geriye kalan %10'luk dilim ise üniversiteler ve bilimsel kurumların yönetimindedir.[30]

Metalurji alanında malzemelerin mekanik özellikleri, çeliklerin özellikleri, kesme ve kaynak aletleri için veri tabanları bulunur. Fransa'da Thermodata isminde metallerin termodinamik özellikleri hakkında kurulmuş bir veri bankası mevcuttur. En kapsamlı çalışmalar jeofizik alanında bulunur.[31] Meteoroloji, iklim bilimi, enerji kaynakları, hidrolik, okyanus bilimi gibi. Endüstrideki hızlı gelişme ve zorlu rekabet şartlarından dolayı bakım mühendisliğinin çalışma konusu içinde bazı araçları kullanması gerekmektedir. Son 20 yıl içerisinde MBF, REX, TPM, SLI gibi veri tabanları can ve mal kaybı riski taşıyan nükleer, havacılık ve uzay, petrol gibi konularda faydalanılan kaynaklar olmuştur.[31]

Verilerin kalitesi konusunda ihtiyatlı olmak gereklidir. ECRADA (European Safety and Reliability Data Center) güvenilirlik veri tabanları konusundaki problemlerin çözümü için tecrübelerin değişimine ve bunların tartışılmasına izin verir. Veri bankaları arasındaki ayırım bilginin uzun

ömürlülüğü ile ilgilidir. Endüstride farklı veri tabanları arasında farklar şöyle sıralanabilir;

- Tarihsel yapıda olayların veri bankaları; olaylar ve kazalar,
- Güvenilirlik veri bankaları daha karmaşıktırlar. Olay hataların derlenmesi, bozulmaların derlenmesi, yürütülen bakım faaliyetleri, çalışma istatistikleri, malzemeye bağlı tüm durumlarla ilgili bilgiler,
- Tamamıyla istatistik veri bankaları; kronolojiye bağlı basit olaylar, üretim istatistikleri, kullanılabilirlik katsayıları,
- Deneme ve test veri bankaları; denemeler sonucunda elde edilen veriler toplanır,
- Daha bütün bilgi bankaları; daha çok kodlanmış geçmiş zaman bilgileri bulunur. Bilirkişi çalışmaları, analiz raporları, genel metin bilgileri gibi.

Elektronik materyallerin veri bankaları kısa ömürlüdür. Güncelliği 3-5 yıl arasında değişir. Bu elektronik malzemelerin değişim ve eskimişlik hızları ile ilgilidir. Mekanik malzemeler hakkındaki verilerin kalıcılığı ise daha uzun sürelidir. 30-40 yıl bazen daha uzun süreli olabilir. Bunlar tasarım aşamasından kullanımdan kaldırıldıkları servis ömrünün sonuna kadar geçen zaman süresinde önemli miktarda bilgi toplanmasını gerektirebilirler.

Bilgi bankaları yönüyle elektronik ve mekanik sistem bileşenleri arasında önemli farklılıklar ortaya çıkar. Elektronik sistem bileşenleri için kaydedilmiş geçmiş istatistiksel veriler daha önemlidir. Aynı şekilde bulunan MTBF daha anlamlıdır. Diğer taraftan hata oranı genellikle sabittir ve bu tablolarda belirtilen değerlere karşılık gelir. Mekanikte ise aynı değildir. Gerçekte teorikte verilen sabit hata oranı doğrulanamaz. Mekanikte istatistiksel veriler daha azdır.[30] Malzemelerin kullanım şartları tabloların hazırlanmasına hizmet etmiş olanlardan çoğunlukla farklıdır. Montaj şartları, titreşim, sıcaklık, tozlu nemli ortam, korozyon gibi çevresel şartlara bağlı katsayılar her zaman hesaba alınmaz.

#### **3.4.6. Güvenilirlikte bir veri tabanının genel amaçları**

Güvenilirlik konusu açısından bir veri tabanının amaçları; sistem elemanlarının ve bileşenlerinin hata oranlarını hesaplamak, arızanın hata türleri ve

sebeplerini bulmak ve devamında sistem çalışma emniyetinin iyileştirilmesini sağlamak, sistem ve bileşenlerinin kullanılabilirliğini hesaplamak ve iyileştirmek, hata oranları hakkında genel bilgiler sağlamak biçiminde ifade edilebilir.

Bu hedeflere ulaşabilmek için bir hata veri bankası en az şu bilgileri içermelidir; ilgili materyallerin net tanımlamaları; limitler, teknik karakteristikler, tasarım parametreleri, çalışma koşulları; maruz kalınan olayların bilgileri; olayların derlenmesi, bakım faaliyetlerinin takibi; materyallerin işletme ya da çalışma bilgileri; toplam çalışma saati, çalışma sayısı.

#### **3.4.7. Bilgi birikimi ve yönetimi konusunda karşılaşılan güçlükler**

Bu güçlükler toplanan bilgilerin tekrar riski (toplanan bilginin veri bankasında önceden varolmasına rağmen yeni bir olay biçiminde yeniden kayıt altına alınması), bilginin farklı kullanıcı servisler tarafından birbirinden habersiz aynı anda güncelleme problemi ve bilginin homojenliğini yitirmesi, özel programlar gerektiren verilere giriş zorluğu, farklı servisler arasında bilginin paylaşımı, kullanıcı tarafından yapılan değişikliklerin tutarlılığı ve uygunluğu, bilgilerin gizlilik düzeyi, uygulamaların stoklama biçimleri veya işletim sistemi değiştirildiğinde erişebilirlik problemleri, işlenmiş verilerin doğası değiştiğinde bakım konusunda karşılaşılan problemler şeklinde karşımıza çıkmaktadır.

Bu güçlükler esas olarak verilerin ve onların işletim sistemleri arasındaki ayrımın yapılmamasından kaynaklanır.

#### **3.4.8. Güvenilirlik hataları veri bankası**

Bu biçimdeki veri bankaları az bilinir ve kullanılır. Bazı veri bankaları, veri toplama sistemleri listelenir. Sabit hata oranları, onarım oranları ve güvenilirlik parametreleri hakkında bilgi verir. Pek çok bilgi kaynağı vardır. Veri bankaları, veri tabanları, sistemlerin performans verileri, uzman yargıları, laboratuvar testleri gibi.

Arıza verileri yeterli değildir. Bakım konusunda veriler gereklidir. Bir materyalin güvenilirliği koruyucu bakım işlemleri dikkate alınmadan hesaplanamaz.

### 3.4.9. Tarihsel olarak temel endüstriyel veri tabanları

Havacılık ve uzay alanında, ICAO, UKAA, Bureau Veritas olay veri bankaları biçiminde kaza ve olaylarla ilgili tüm bilgileri kayıt altına almaktadır. 1970'lerden itibaren ki bakım maliyetlerinin fazlalığı altında Güvenirlilik Merkezli Bakım (RCM) kavramı Boeing, NASA, AIRBUS'ta yerleşmiştir.[30] Gerekli bilgiler, arızalar, bozulmalar, bakım faaliyetleri, düzeltici ve önleyici bakım bilgileri hata veri bankaları içinde saklanır.

Askeri materyallerde kumanda kontrol sistemlerinin gelişimi (denizcilik, havacılık, füze sistemleri, telekomünikasyon) elektronik bileşenler için veri bankalarının doğmasına neden olmuştur. İlk güvenilirlik veri bankaları Amerikan kaynaklıdır. MIL HANDBOOK (MIL SPEC 217 A B C D E) gibi. Bunu bio-tıp, ilaç endüstrisi, nükleer enerji, petro-kimya, tarım gibi diğer endüstri kollarında oluşturulan veri bankaları izlemiştir.

### 3.4.10. Geri dönüş bilgileri

Geri dönüş bilgilerinin rolü, bir endüstri dalından diğerine çok farklı biçimlerde olabilir. Buna karşın her yerde bulunabilen çok belirgin ihtiyaçları yerine getirir. Ana karakteristikleri; hafızalama, analiz etme ve iletimdir.

Endüstriyel sistemlerin geri dönüş bilgilerinin ana amacı hatanın görünme sıklığına, hata türlerine, hata sebeplerine ve etkilerine bağlı bilgileri bir araya getirmektir.

Geri kazanım bilgileri tecrübî bir veri tabanını kullanıcının hizmetine koymaya katkı sağlar ki bu donanımların güvenilirliğinde kullanılan belli sayıda modelin onaylanmasına izin verir.

Hafızalama, yeniden yaşanması ve oluşması istenmeyen kayıt altındaki durumlardır. Bu aynı şekilde uzmanların bilgilerinden oluşur ki malzemenin davranışları konusunda tahmin edilemeyecek bilgiler uzmanların kişisel yorumlarıyla ortaya konur. Malzemelerin davranışlarını iyileştirmek için yeniden kullanılabilmesi amacıyla tüm bu tecrübelerin saklanma ihtiyacından doğmuştur. Bu bilgileri hafızaya almak için yaygın olarak kullanılan bir yöntem bu bilgilerin toplanması ve sonra bir veri tabanı yaratılmasıdır. Bilginin toplanma ve veri

tabanı organizasyonu belirlenen hedeflere bağılı olarak önceden tanımlanmıştır. Elde edilen faydalı bilgilerin geri verilebilir olması asıl amaçtır. Günümüzün enformatik yöntemleri bir seri ve her bir olaya adapte edilmiş performanslı araçlar geliştirmiştir.

Yaşanan tecrübeler ve bunların eklenerek çoğalması genellikle karmaşık ve çözümlenmesi zor bir veri tabanı oluşmasına yol açar. Bu durumda yeniden kullanılmak istenen bilgiler saklı olarak kalabilir. Bu, belirlenmiş ihtiyaca göre, hafızanın uygun şekilde analiz edilmesini gerektirir. Veri tabanındaki ham bilgilerden, materyalin davranışı üzerine sentetik sonuçlar sunmak amacıyla analiz yapılır. Bu ihtiyaca cevap verebilmek için çoğunlukla mevcut veri tabanının tipine göre verilerin işlenmesini gerektirir.

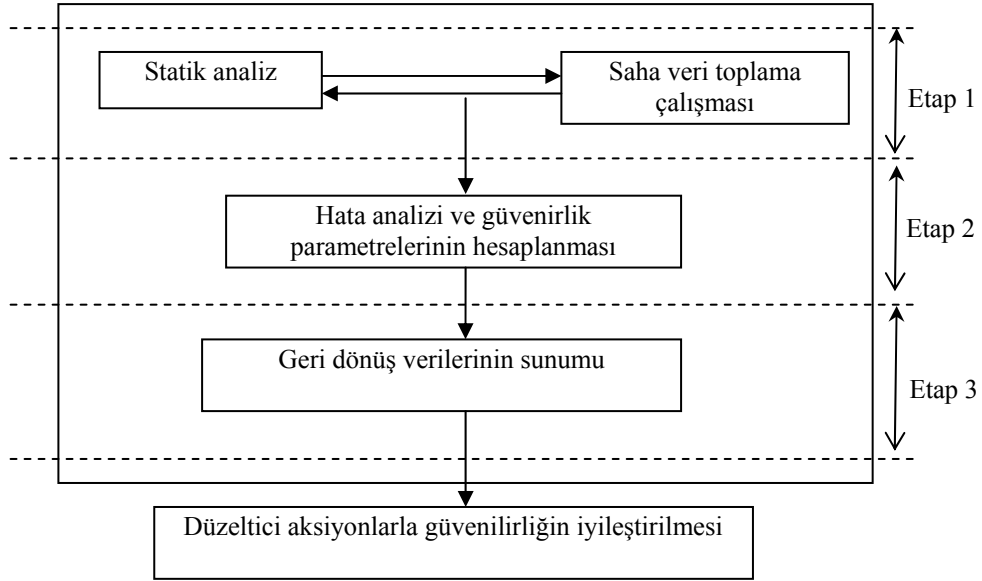
İki tip veri analiz sürecinin olduğu kabul edilebilir. Bunlardan istatistik yaklaşım, bir tecrübeler bütününden alınan bilgilerden oluşur. Öncelikli hedefleri açıklayıcı faktörler ve tecrübeler arasında muhtemel korelasyonun araştırılması ile ilgilidir. Klinik yaklaşım ise dikkate alınan bir tecrübeden daha derin bir yolla bilgi çıkarılmasından oluşur. Böylece sıklıkla noktasal toplama sürecine bağlanır. Sonuçlar veri tabanının içinde biriktirilebilir. Olay tabanı şeklinde yeniden kolayca ulaşılabilecek şekilde bulunabilir.

Şirketin yapısı ve ölçeği itibariyle tasarım, kalite, işletme, bakım servisleri gibi farklı iş gruplarından birçok ekip bulunabilir. Bunlar geri dönüş bilgilerinin sonuçlarının içeriğiyle ilgilenebilir. Geri dönüş bilgilerinin kullanımlarında kendilerince önemli özel konularıyla ilgilenebilirler. Bilginin dolaşımı hayati bir ihtiyaç olabilir. Bilginin iletimi aynı bir ham veri tabanının paylaşımıyla gerçekleştirilebilir. Bu durumda her servis bilgi işleme konusunda kendi özel araçlarını geliştirebilir. Bu iletim oldukça standart hazırlanmış veriler biçimini alabilir. Hata oranının hesaplanması, kullanıma hazır olmama süreleri göstergelerdir.

Veri toplama, geri dönüş bilgileri konusundaki çalışmalarda en önemli aşama olarak kabul edilir. Çünkü ana hammaddeyi verir. Verilerin toplanması işletim bilgilerinden, denemelerde elde edilen verilerden, geçmiş dönem müdahale ve arıza bilgilerinden ve kayıtları tutulan önemli ana olaylardan elde edilebilir.



Geri dönüş bilgilerinin yapısı esas olarak verilerin bir araya getirilmesi, işlenmesi ve kullanılabilir hale getirilmesi olarak tanımlanabilir.



**Şekil 3.14.** Güvenilirlikte geri dönüş bilgilerinin ana etapları

Şekil 3.14 güvenilirlikte geri dönüş bilgilerinin kullanılabilir hale getirilme aşamalarını göstermektedir. Birinci etap tecrübe verilerinin toplanması ve hafızaya alınmasıdır. Sistemin çalışmama durumları sırasında bilirkişi çalışmalarında toplanan veriler incelenir ve teknik bir veri tabanında saklanır. İkinci etap ise teknik olarak gerçekleştirilen analiz işlemleridir. Bu etapta sağlanan veriler izlenen sistem donanımların davranışlarının anlaşılmasında çok kullanışlıdır. Hata oranı hesapları, kaynaklardaki verilerle karşılaştırma bu etaptaki analiz işlemlerine örnek gösterilebilir. Üçüncü etap yeniden kullanım geri dönüş bilgilerinin ulaştığı son noktadır. Bu etap ilgili servislere donanımlarının tasarımlarını iyileştirmek için bilgiler sağlar.

### 3.4.11. Uzman görüşleri

Güvenilirlikte diğer alanlarda olduğu gibi uzman görüşlerinin teknik bir problem için muhtemel bir cevap olabileceği düşünülür. Zayıf geri dönüş bilgilerine ilave bir katkı, karar almaya yardımcı bir destektir. Gerçekte söz konusu problem hakkında mevcut, muhtemel, objektif verileri tamamlayan ve düzenleyen pozisyonundadır. Bu veriler az sayıda ve dağınık olduğunda, mevcut olmadığında ya da eldeki veriler şüpheli ve uygulanamaz olduklarında bir karar

verme sürecinde kullanılabilir tek bilgi kaynağıdır.[32] Aynı zamanda uzman yargıları ve objektif geri dönüş bilgilerinin birleştirilmesine izin verir. Sonuç olarak uzman yargıları zor, karmaşık, yeni ve az anlaşılabilir bir konuda karar almaya yardımcı olur. Böylece bilginin zenginleştirilmesine katkı sağlar. Bilirkişi çalışması bir uzman tarafından gerçekleştirilir. Uzmanın bilirkişilik düzeyi zaman içinde konu hakkında yeni bilgiler topladıkça değişir.

Teknik alanda bilirkişilik (uzmanlık) bir veri kaynağı olarak ifade kabul edilir. Çoğunlukla kalitatif, bazen kantitatifdir. Fakat tüm veriler gibi uzman bilgileri de eksiksiz ve belirsiz değildir. Verilerin kalitesi mevcut kullanılabilir bilgiye, uzmana ve uzmanın eğitimine bağlıdır. Eğitim geçmişi, kültürü, mesleği, konu üzerinde teorik ve pratik eğitimi, tecrübesi, çevresi, kişiliği yani genel olarak uzmanın özünden gelen kalitesi aynı şekilde konu üzerindeki motivasyonu, ciddiyeti, bilgileri seçip alabilme ve bilgi toplama yöntemi, çekinceleri, iletme ve düzeltme özellikleri verilerin kalitesi üzerinde etkilidir. Problemin görece karmaşıklığı, konu hakkında genel bilgi düzeyi ve sistemin karmaşıklığına rağmen uzmanın düşüncesinde nasıl modellendiği de veri kalitesini belirler. Bundan başka uzman ve analist arasındaki iletişim kurma yöntemleri de kritik role sahiptir. Bilirkişi çalışmalarının başarısı böylece sadece uzmana bağlı değil aynı zamanda bilgiyi toplayan (anket sorumlusu) ya da analize (anket yapan çoğunlukla analizcidir) ve kullanıcıya (karar verici) bağlıdır.[32]

Son olarak bilgi toplama, analiz etmek ve uzman yargılarının modellemesini yapmak yorucu çalışmalar, uzun zaman, dikkat harcamak ve bilgi sahibi olmayı gerektirir. Sonuç olarak pahalı ve hassas bir çalışmaya hazır olunmalıdır. Ancak bu süreç ile her zaman konu hakkında bilginin zenginleştirilmesi söz konusudur.

#### **3.4.12. Bilirkişi çalışmasına karar verilmesi**

Uzman yargıları düşünme sürecidir. Sonunda bilgi edinilmesini sağlar. Bu yargılar zihinsel yeteneğe bağlıdır. Birey üzerine esas teşkil eden onun eğitimi, konu hakkındaki bilgi durumu ve bilirkişi çalışma zamanıdır. Bu yaklaşım bir problemi ortaya çıkarır. Bu da uzman tarafından ortaya konulan görüşün objektif değil sübjektif olmasıdır. Bu nedenle uzman çalışmanın amacını açık ve net

biçimde anlamalıdır. Sorulan soruların ne anlama geldiğini kestirebilmelidir. İncelenen alanda mevcut bilgi ve bilgilendirmeleri yorumlayabilmelidir. Görüşlerini istenen düzeyde detaylandırarak ifade etmeli, analizci için ulaşılabilir ve anlaşılır olmalıdır. Yanıtını ulaştığı mantığı açıklarken biçimlendirebilmelidir. Bir uzman incelemesine başlanırken istenen bilirkişilik düzeyi ve gerekli uzman sayısı belirlenmelidir.

Bilirkişi çalışmasının bozulma nedenleri ya da uzmanın gerçeğe göre tahmin farkı iki nedenden olabilir. Bunlar kişisel algılama farkları ve aşırı güvenden dolayı tahmin hataları olarak sayılabilir. İnsan gerçeği düşünce süzgecinden geçirdikten sonra kalan olarak algılar. Bu tüm durumlar da subjektifliği yaratır. Aşırı güven ise uzmanın hassasiyetine fazla değer biçme ya da belirsizliği gözden kaçırma (değerinin altında) anlamına gelebilir. Bilirkişi çalışmaları bilgi toplama ve analiz sürecinde, belirsizlikler farklı kaynaklardan veri gelmesi ve belirsizlikleri azaltmaya çalışırken doğan hatalardan kaynaklanır. En azından bunları tahmin edebilmek gereklidir. Bunun için gerçekleştirilecek bir anket çalışması bu tahmin için gerekli bilgileri sağlamalıdır.

### **3.5. Yük Dayanım Çakışması**

Yük ve dayanım kavramları geniş anlamda kullanılan genel terimlerdir. Yük incelenen sisteme göre örneğin mekanik gerilme yükleri, elektriksel gerilim ya da malzemedeki iç gerilmeler sonucu ortaya çıkan ısı artışı olabilir. Dayanım ise sertlik, gerilme, erime noktası, adezyon gibi malzemenin iç özelliklerinden, iç yapısından kaynaklanan fiziksel özellikleridir. Bu özelliklere bazı örnekler verilebilir. Bir hareketli makineyi oluşturan malzemenin içerisinde akışkan eksikliğinden ya da yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak üretilen yükler bölgesel dayanım limitlerini aşarsa makinenin yataklarında hasarlanma görülür. Bu etkiler çatlama, aşırı ısınma ya da yatakların formunun bozulmasına neden olabilir. Elektronikte kullanılan bir entegre içindeki transistörün kapı girişine uygulanan gerilim yerel akım yoğunluğu meydana getirirse sıcaklık yükselir. İletkenin ya da yarı iletkenin erime noktası seviyesine ulaştığında hasarlanma meydana gelir. Bir hidrolik valf de sızdırmazlık contası uygulanan yüksek basınca uzun süre sızdırmazlığı sağlayacak şekilde karşı koyamayabilir. Bir mile uygulanan

döndürme kuvveti dayanım sınırını aştığında milde kırılma meydana gelebilir.

Genellikle eğer dayanım, uygulanan yükü aşıyorsa sistemde hasarlanma ya da bozulma beklenmez.[33] Bu tasarım için normal bir yaklaşımdır. Tasarımcılar olası muhtemel yükün ve dayanımın aşırı değerlerini belirlemelidirler. Elverişli bir güvenlik payının sağlandığından emin olunmalıdır.

Çoğu arıza ve bozulmalar yük dayanımı modeliyle temsil edilebilir.[18] Arızalanma ya uygulanan yükün çok yüksek olmasından ya da sistemin dayanımının çok zayıf olmasından kaynaklanır.

### 3.5.1. Yük dayanım fonksiyonları dağılımı

Çoğu ürün için ne yük ne de dayanım sabit değildir. Fakat istatistiksel olarak bir dağılım gösterirler. Bu durum Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Her dağılımın bir ortalama değeri vardır. Bu değerler  $\tilde{L}$  ve  $\tilde{S}$  olarak gösterilir. Standart sapmaları ise  $\sigma_L$  ve  $\sigma_S$  olarak belirtilir. Eğer bir şekilde iki dağılım fonksiyonunun birbiriyle çakışan bölgeleri varsa bu çakışan uç kuyruk bölgelerinde arızalanma meydana gelecektir. Bu şekil 3.15b' de gösterilmiştir. Yük ve dayanım fonksiyonlarının dağılımları için iki faktör tanımlanır. Bunlardan emniyet payı

$$SM = \frac{\tilde{S} - \tilde{L}}{(\sigma_S^2 + \sigma_L^2)^{1/2}} \quad (3.1)$$

olarak verilir. Yük şiddeti faktörü ise

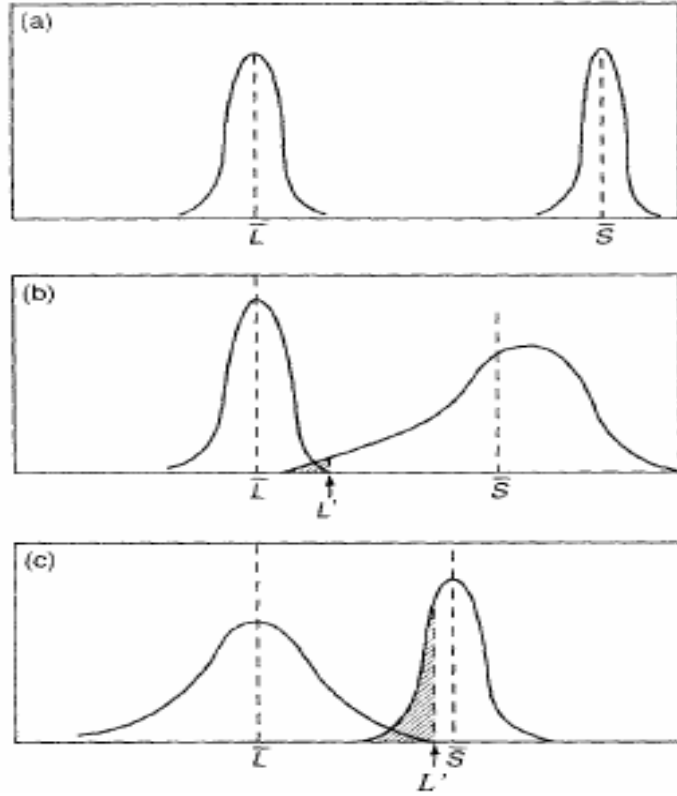
$$LR = \frac{\sigma_L}{(\sigma_S^2 + \sigma_L^2)^{1/2}} \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir.

Emniyet payı, yük ve dayanım fonksiyonları ortalama değerlerinin birbirinden ayrıklığıdır. Yük şiddeti ise yükün standart sapmasıdır. Her iki faktörde yük ve dayanım dağılım fonksiyonlarının standart sapmalarının göreceli bileşkesidir.

Bu iki faktör teoride yük ve dayanım dağılım fonksiyonlarının birbiriyle girişim halinde oldukları bölgede analiz yapılabilmesine olanak sağlar.[18] Sıkça

karşılaşılan haliyle yük ve dayanım özellikleri hakkında güvenilir veriler hazırda bulunmaz. Teoride karşılaşılan bir diğer zorluk insan, malzeme, çevre ile ilgili verilerin kullanılan istatistiksel modellere uyumunda karşılaşılan zorluklardır.[33]



Şekil 3.15. Emniyet payı ve yük şiddetinin etkileri

Şekil 3.15a yüksek düzeyde güvenilir bir duruma örnek vermektedir. Yük ve dayanım fonksiyonları dar bir aralıkta dağılım göstermektedir. Yük şiddeti düşük ve emniyet payı yüksektir. Eğer yük ve dayanım dağılımları kontrol altında tutulabilirse tasarım arızalanmaz olacaktır. Karakteristiklerin zamanla değişmedikleri kabulünün yapıldığı göz ardı edilmemelidir. Çoğu durumlarda beklenen ve istenen durumlar bunlardır. Tecrübelerle elverişli olduğu düşünülen bir emniyet payı seçilir. Bu amaçla üretimde kalite kontrolü, boyutsal ve karakteristik uygunluğun, malzeme uygunluğunun sağlanması ile dayanımdaki farklar giderilmeye çalışılır. Yük değişimleri değişkenlikleri ise doğal ve yapay biçimde yaratılan sınırlayıcılarla kontrol altına alınmaya çalışılır.[18]

Şekil 3.15b'de yük şiddeti faktörü düşüktür. Fakat dayanım fonksiyonunun standart sapmasının büyük olması nedeniyle emniyet payı düşüktür. Aşırı yük

durumu zayıf materyallerin arızalanmasına neden olacaktır. Sadece küçük miktarlarda materyal bu yüklere maruz kaldığında hasarlanacaktır. Bu, kalite kontrolün standart sapmayı azaltmayacağı ve elektronik cihazlar için görsel ve mekanik incelemelerin yetersiz kalacağına tipik bir göstergesidir. Bu durumda kasıtlı olarak zayıf elemanların arızalanmasını sağlamak için aşırı yük uygulanır. Böylece dayanım fonksiyonunun sağ tarafında kalan zayıf elemanların budanması amaçlanır. Yük ve dayanım fonksiyonlarının çakışmaları böylece önlenmiş olur. Kalan parti malzemelerin güvenilirliği bu sayede artırılır. Elektronik elemanlara test şartlarında maksatlı yüksek gerilim verilip bölgesel ısınmalar yaratılması ya da sızdırmazlık testleri uygulanması bunlara örnektir.[18] Aşırı yükleme testleri sadece zayıf elemanları hasarlar. Sağlıklı elemanların dayanım karakteristiklerini bu testler bozmamalıdır. Azalan hata karakteristiği bu duruma örnektir. Zayıf elemanların arızaları test edilebildiğinden kalan tüm parti malzemelerin dayanımları artar, hata oranları azalır.

Şekil 3.15c düşük emniyet payı ve yüksek yük şiddet faktörü durumunu göstermektedir. Yük şiddet faktörü yük dağılım fonksiyonunun geniş bir aralıkta dağılım göstermesindedir. Güvenilirlik bakış açısıyla zor bir durumdur. Aşırı yük durumu grup içinde önemli miktarda elemanın hasarlanmasına yol açacağı için bu durumda hata olasılığı yüksek elemanları taratmak ekonomik değildir.[18] Geriye kalan seçenek ortalama dayanımı artırarak emniyet payını yükseltmektir ki bu maliyetleri yükseltmekle eş anlamlıdır. Bir diğer seçenek olarak yük dağılım fonksiyonunun sağ uzantısının budanması yolları araştırılır. Bu pratikte sözcülemi elektronik devreler için aşırı akım sınırlayıcıların kullanılmasını ya da pnömatik ve hidrolik sistemler için basınç tahliye valfleri ve yük sönümleyicilerin kullanılmasını gerektirir.[18]

#### 4. GÜVENİLİRLİK DUYARLIK ANALİZİ ÖRNEK UYGULAMASI

Bu bölümde Bölgesel Güvenilirlik Duyarlık Analizi (Sensitivity Analysis) yapılabilmesi için kullanılacak yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra bu analiz tekniği içerisinde, belirlenen bir hata türüne bağlı olarak, FTA ve QFD birleştirilmiştir. **Matematik hesaplamalar ağırlıklı olarak güvenilirlik fonksiyonunun gradyan vektörünün bulunması yöntemidir.** Kalitatif ve kantitatif analizlerin birleşimleri bu şekilde sağlanmaya çalışılmıştır. Bir bütün olarak bu analiz tekniği somut bir örneğe uyarlanmaya çalışılmış ve mekanik sistemlerin güvenilirliği konusunda elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

##### 4.1. Giriş

Bölgesel duyarlık analizi bir modele giren parametrelerdeki küçük değişimlerin ya da bozulmaların etkilerini inceler.[34] Giriş parametrelerindeki bu değişikliğe modelin verdiği cevap elde edilir. Dolayısıyla giriş parametrelerindeki değişime modelin ya da tam uyarlanabildiyse sistemin gösterdiği hassasiyet ölçülür.

Duyarlık analizi ekonomi, fizik gibi alanlarla sözelimi araştırma geliştirme, sanayi gibi dallarda da kullanılmaktadır. Karmaşık sistemlerin vereceği yanıtlar matematiksel yaklaşım ve benzetimlerle karakterize edilir. Gerçekte bir sistemin çıktılarını elde edebilmek için gerçekleştirilen fiziki denemelerde çoğu zaman iki olumsuzluğa katlanmak gerekmektedir. Bunlar önemli maliyetleri göze almak ve uzun zaman harcamaktır. Bu kısıtlamalar ise endüstriyel bir ürünü tasarlama ve üretimine başlama maliyet/zaman faktörlerini daha da arttırıcı yöndedir.

Duyarlılık analizine güvenilirlik mühendisliği yönüyle bakıldığında tasarım parametrelerini nominal değerleri çevresinde değiştirerek başka bir deyişle nominal değer çevresinde az miktarda bozarak tasarımın güvenilirliği incelenebilir. Sistemin etkilenen çıkış değerleri bu şekilde daha az maliyetle daha az zaman harcayarak değerlendirilebilir.

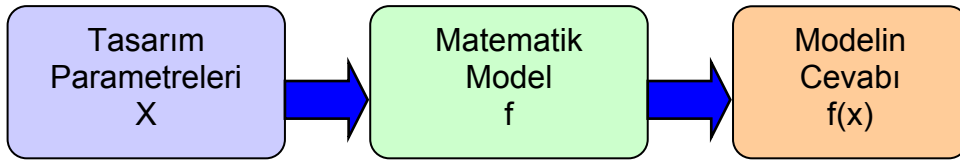
##### 4.2. Duyarlık Analiz Matematiği

Denklem 4.1 ile verilen  $f$  fonksiyonu  $\mathbb{R}^n$  de tanımlı olsun.

$$f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad x \alpha f(x) \quad (4.1)$$

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T \quad (4.2)$$

$x$  denklem 4.2 ile verildiği biçimde bir vektör yada bir nokta olarak alınabilir. Aynı zamanda  $x$  tasarım parametreleri ya da giriş parametrelerini temsil eder.  $x_i, i = 1K n$  faktörler olarak isimlendirilir.



Şekil 4.1. Sistem prensip şeması

Eğer tasarım parametreleri  $f$  fonksiyonunun içerisinde doğrudan görülebiliyorsa,  $f$  fonksiyonunun bu parametreler karşısında açık, aşıkâr olduğu söylenebilir. Temel parametrelerle  $f$  fonksiyonu arasındaki ilişki daha karmaşıkça yani ara parametrelerin bulunması biçimindeyse bu parametreler karşısında  $f$  fonksiyonu örtülüdür. Eğer  $f$  fonksiyonunun  $\tilde{x}$  noktası için  $x_i, i = 1K n$  değişkenlerine göre parçalı türevi alınabiliyorsa,  $\tilde{x}$  noktasında  $x_i$  değişkenlerine göre  $f$  fonksiyonunun gradyan vektörü denklem 4.3 ile verilmiştir.

$$\nabla f(x) = \left\{ \frac{\partial f(\tilde{x})}{\partial x_1}, \frac{\partial f(\tilde{x})}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f(\tilde{x})}{\partial x_n} \right\}^T \quad (4.3)$$

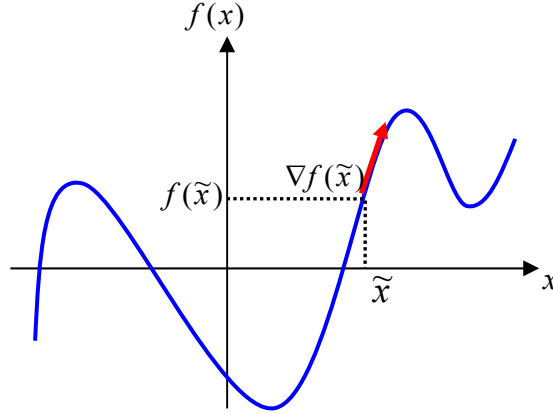
Eğer  $f$  fonksiyonunun  $\tilde{x}$  noktasındaki  $x_i$  ve  $x_j$  değişkenlerine göre ikinci mertebeden parçalı türevi alınabiliyorsa bu fonksiyonun  $x_i$  ve  $x_j$  değişkenlerine göre  $n \times n$  boyutlu matrisi denklem 4.4 ile gösterilmiştir.

$$\nabla^2 f(x) = \left[ \frac{\partial^2 f(\tilde{x})}{\partial x_i \partial x_j} \right]_{i,j=1\dots n} \quad (4.4)$$



$f$  fonksiyonunun  $\tilde{x}$  komşuluğunda Taylor serisi açılımı ise denklem 4.5 biçimindedir.

$$f(x) = f(\tilde{x}) + \nabla f(\tilde{x})^T \cdot (x - \tilde{x}) \quad (4.5)$$



**Şekil 4.2.** Tek değişkenli bir fonksiyonun gradyan vektörü

Şekil 4.2 tek değişkenli bir fonksiyonun oluşturduğu gradyan vektörünü grafik biçiminde göstermektedir.

$x^*$ ,  $\mathbb{R}^n$  in bir vektörü ise ve eğer

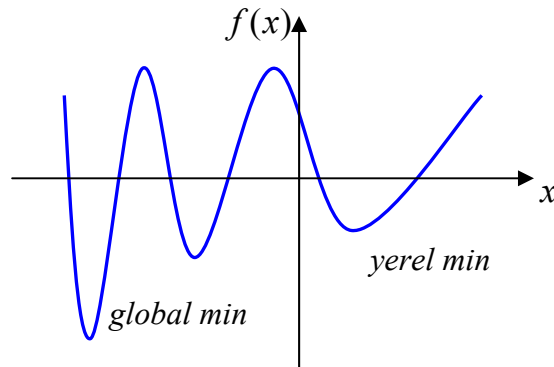
$$f(x^*) \leq f(x) \quad \forall x \in \mathbb{R}^n \quad (4.6)$$

ise  $f$  fonksiyonunun bir global minimumu olarak adlandırılır.

$x^*$ ,  $\mathbb{R}^n$  in bir vektörü ise ve eğer

$$f(x^*) \leq f(x) \quad \forall x \in B(x^*, \epsilon) \quad (4.7)$$

ise  $f$  fonksiyonunun bir yerel minimumu olarak adlandırılır.



**Şekil 4.3.** Tek değişkenli bir fonksiyonun yerel ve global minimumları

Teorik olarak 4.3 denkleminin yazılması kolay görünse de,  $f$  fonksiyonunun  $\tilde{x}$  noktasındaki türevinin hesaplanması zor olabilir. Gerçekte  $f$  fonksiyonunun karmaşık, açık yada örtülü olması ve tasarım parametrelerinin sayısının fazla olması fonksiyonun türevinin alınmasını zorlaştırabilir. Bu durumda nümerik çözümler kullanılabılır. Yaygın olarak kullanılan yöntem sonlu farklar yöntemidir.[35] Parçalı türevler için en basit yöntemdir. Parçalı türevin matematiksel tanımından hareketle yazılabilecek bir hesaplama yöntemi şöyledir denklem 4.8 ile verilmiştir.

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(\tilde{x}) \approx \frac{f(\tilde{x}_1, K, \tilde{x}_i + \Delta\tilde{x}_i, K, \tilde{x}_n) - f(\tilde{x}_1, K, \tilde{x}_i - \Delta\tilde{x}_i, K, \tilde{x}_n)}{2\Delta\tilde{x}_i} \quad (4.8)$$

Denklem 4.8 ortaya konulması basit bir denklemdir. Fonksiyonun örtülü formülasyonunun kullanılmasını gerektirmez. Sadece  $x \pm \Delta x$  noktalarında fonksiyonun parçalı türevinin hesaplanabilmesi için nümerik değerleri gereklidir. Bu yöntemi sınırlayan ana etmen  $\Delta x$  in değişim değerinin seçilmesi ile ilgilidir. Çok büyük seçilen değerler yaklaşımda önemli hatalara neden olur. Çok küçük değer seçilmesi durumunda ise  $f(\tilde{x} \pm \Delta x)$  ve  $f(\tilde{x})$  arasında çok az fark yaratan bölünme hesabına neden olur. Sonuç olarak  $\Delta x_i$  nin nasıl seçildiği çok etkilidir.

Duyarlık güvenilirlik analizinde elde edilen sonuçlar incelenmek üzere seçilen  $\tilde{x}$  noktası komşuluğunda geçerlidir. Diğer taraftan denilebilir ki modelin giriş parametrelerine göre yanıt hassasiyeti faktörlerin seçildiği değişim bölgesine bağlı olarak değişir.[36] Duyarlık analizinin incelenecek eğimi yada gradyanının hesaplanması ve yorumu esas alınır. Gradyan bulunduğu iki tip sonuçla karşılaşabilir. Biri  $\tilde{x}$  noktası çevresinde  $f$  fonksiyonunun değerleri içindeki parametrelerin görece önemleridir. İkincisi ise  $\tilde{x}$  noktası çevresinde  $f$  fonksiyonunun artan, azalan, durağan olması şeklinde belirtilebilecek değişim tabiatıdır. Mevcut duyarlılık ölçümünün ne kadar devam ettirileceği etüdü gerçekleştirilen matematik modeline ve elde edilecek sonuçların nasıl kullanılacağına bağlıdır.

### 4.3. Determinist Bölgesel Duyarlık Ölçümü

f fonksiyonunda,  $\tilde{x}$  bir tasarım noktası olsun.  $\tilde{x}_i, i = 1, K, n$  in her bir bileşeni  $x_i, i = 1, K, n$  in nominal değerleri olarak adlandırılır.

#### 4.3.1. Duyarlığın birinci ölçümü

Duyarlığın birinci ölçümü denklem 4.9 biçimindedir.

$$s^{(1)}(\tilde{x}) = \nabla f(\tilde{x}) \quad (4.9)$$

Denklem 4.10 ile verilen tanım eğer fonksiyon faktörlerine göre açık ise geçerlidir.

$$s_i^{(1)}(\tilde{x}) = \frac{\partial f}{\partial x_i}(\tilde{x}), i = 1, K, n \quad (4.10)$$

Temel faktörlere göre fonksiyon kapalı ise zincirleme türev alma metotları kullanılır.  $s_i^{(1)}$  nin ölçümü fonksiyonun  $x_i, i = 1, K, n$  parametrelerinin birim değişmelerinden doğan fonksiyonun değerlerinin değişiminin doğrusal tahminidir.[36]

Bu birinci ölçüm sonuçlarının asıl sınırlayıcısı, model içindeki farklı parametrelerin fiziksel birimlerinin farklı olabilmesinden kaynaklanmaktadır. Eğer f fiziksel bir olayı temsil eden fonksiyon ise tasarım parametreleri ve gradyan vektörü bileşenlerinin fiziksel birimleri her zaman aynı değildir. Tasarım parametrelerinin tanım bölgeleri ve nominal değerleri  $\tilde{x}$  noktasında gradyan vektörün değişim değerleri üzerinde önemli farklar yaratabilir. Bu farklı değerler arasında karşılaştırma yapmanın bir anlamı kalmaz.[37]

Fonksiyonun gradyanı fonksiyonun artan değerleri yönünde olduğunda diğer deyişle  $\tilde{x}$  tasarım parametrelerine dx bozulması (ya da değişimi) etkirse  $\nabla f(\tilde{x})dx > 0$  durumunda fonksiyonun dx çok küçük bozulma vektörü yönünde artan bir fonksiyon olduğunu,  $\nabla f(\tilde{x})dx < 0$  durumunda ise fonksiyonun dx çok küçük bozulma vektörü yönünde azalan bir fonksiyon olduğunu gösterir. Bu bilgi  $\tilde{x}$  komşuluğunda fonksiyonun davranışlarını bilebilmek için son derece faydalı

olabilir. Diğer yandan  $s_i^{(1)}$ ,  $i = 1K, n$  işareti,  $x_i, i = 1K, n$  in çok küçük değişimleri etkisi için bilgi verir.  $x_i, i = 1K, n$  artan (azalan) değerleri için fonksiyonun artan (azalan) olması gibi.

### 4.3.2. Duyarlılığın ikinci ölçümü

$s^{(2)}$  duyarlılığın ikinci ölçümü olarak tanımlanır.

$$s_i^{(2)}(\tilde{x}) = \frac{\tilde{x}_i}{f(\tilde{x})} \frac{\partial f}{\partial x_i}(\tilde{x}), i = 1, K, n \quad (4.11)$$

Denklem 4.11 ile ifade edilir. Eğer fonksiyon faktörlerine göre açık bir fonksiyon ise  $s_i^{(2)}$  ikinci duyarlık ölçümü  $x_i, i = 1K, n$  giriş parametrelerindeki %1 değişimlerinden dolayı fonksiyondaki yüzde değişikliği gösterir. Bu duyarlık katsayısı modelin farklı parametrelerinin nominal değerlerinin fiziksel birimlerinden bağımsızdır. Aynı zamanda modele giren parametrelerdeki yüzde değişimlerin sistem için ne kadar önemli olduğunu görmeye yardımcı olur.

Bölgesel duyarlık analizi modele giren parametrelerden aynı anda sadece bir faktörün değiştiği ve bunun incelendiği yöntemdir. Bir  $\tilde{x}$  parametresinin değişimi diğer parametreler nominalde tutulurken incelenir. Bununla beraber kimi zaman iki ya da daha fazla sayıda parametreyi aralarındaki etkileşimi görmek için birlikte değiştirmek gerekebilir. Yapılacak hesaplama sayısı hızlı şekilde sınırlayıcı olmaya başlar.[32]

Tasarım parametrelerinin nominal değerleri çevresindeki değişimleri %10 un altında iken kullanılır. Bu nedenle analiz tekniğinin adı yereldir. Tüm faktörlere etkiyen değişim aynı ve normalleştirilmiş duyarlık ölçümü söz konusu iken parametrelerin nispi önemleri elde edilebilir. Bu duyarlık ölçümüyle fonksiyon değerlerindeki ihmal edilebilir ya da etkili parametrelerin belirlenmesi sağlanır. Fonksiyonun  $\tilde{x}$  noktasında durağanlık koşulu, bölgesel optimallik için gerekli koşuldur. Durağanlık giriş parametrelerindeki bozulma ya da değişimlere göre denge durumunu sağlar.

## 4.4. Tasarım Parametreleri Karşısında Hata Türlerinin Duyarlık Analizi

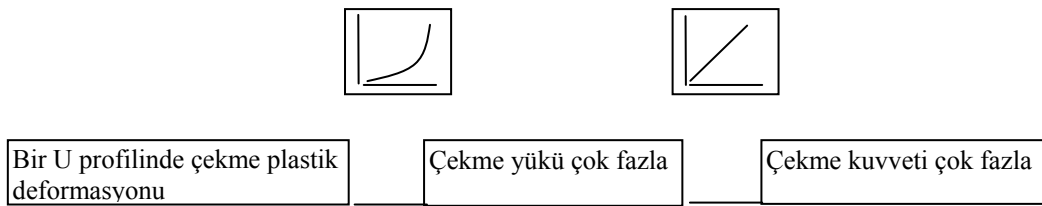
Bu kısımdan önce Hata Ağacının (FTA) özellikleri verilmiştir. Bundan

sonra mekanikte bir olaya ve elde edilebilecek sonuçlara Bölgesel Duyarlık Analizinin nasıl uyarlanabileceğini gösterilmiştir.

#### 4.4.1. PFTA ve QFD ile bölgesel duyarlık analizi

Bu aşamada hata ağacının oluşturulması gerekir. Ana olaya yol açan hatanın ağaç üzerinde izlediği yola göre kritiklik puanlamasının (değerlendirmesi) yapılması ilk aşamadır. Karakteristiklerin kritiklik değerlendirilmesi iki yöntemle yapılabilir. Bunlardan biri 1 ve 4 arasında değerlendirilmesidir. Ana olaya yol açan hatanın izlediği her bir yolun uzman bilgilerinden yararlanılır ve her bir kök sebebin hatanın oluşumuna hangi oranda katıldığı değerlendirilir. İkincisi ise ( $\Theta, O, \Delta, \times$ ) şeklinde puanlamadır. Yine hatanın izlediği yol üzerinde hataya neden olabilecek karakteristikler uzman bilgileriyle değerlendirilir. Bu duyarlılık analizinde görüleceği gibi değerlemeye kalitatif olarak katılır. Puanlamalar hata ağacındaki her bir sebep-sonuç ilişkisi olan noktaya çizilen güvenilirlik grafiğini esas alır. Her bir kök karakteristik ve ana olaya neden olan hatanın izlediği yol üzerindeki bağlantı noktaları için uzmanların kapasitesi parametreler hakkında bilgilenmeyi sağlar.

Şekil 4.4 ile verilen eğilim grafikleri etüdünde değişkenin artışı, azalışı, yavaş ya da hızlı değişimi ya da durağanlığı yayılma yolu üzerinde uzman bilgileri ile karşılaştırmaya olanak verir.



Şekil 4.4. Hatanın yayılma yolu üzerinde eğilim grafiklerinin gösterilmesi

Bu kalitatif yaklaşım üç noktada sorun yaratabilir. İlki ihmal edilebilir, az önemli, önemli, çok önemli biçiminde sadece dört seviyede ele alındığı için duyarlık puanlaması kabacadır. İkincisi parametrelerin puanlaması subjektiftir. Uzmanların kendi yargılarından elde edildiğinden, farklı görüşlerin ortaya

atılmasına elverişlidir. Bundan başka hatanın tüm yayılım yolu üzerinde eğilim grafikleri çizmek bazen zordur. Olayın karmaşıklığı her zaman değerlendirme yapmaya uygun olamayabilir. Uzman bilgileriyle karşılaştırmada sorun yaşanabilir. Sonucusu duyarlılık analizi gerçekleştirilmesinde kesin matematik yaklaşımları temel alındığından, ortaya çıkan olumsuzlukları bu şekilde giderebilmek mümkün olabilecektir. Analizden elde edilen sonuçları puanlamadaki değerlerle karşılaştırıp bir dengelemeyle müdahalede bulunmak söz konusudur.

#### **4.4.2. PFTA ve QFD uygulaması**

Bu yöntem ile güvenilirlik analizi çalışmasında kullanılacak genel bir akış şeması Şekil 4.5'teki gibidir. Etaplar sırası ile ele alındığında;

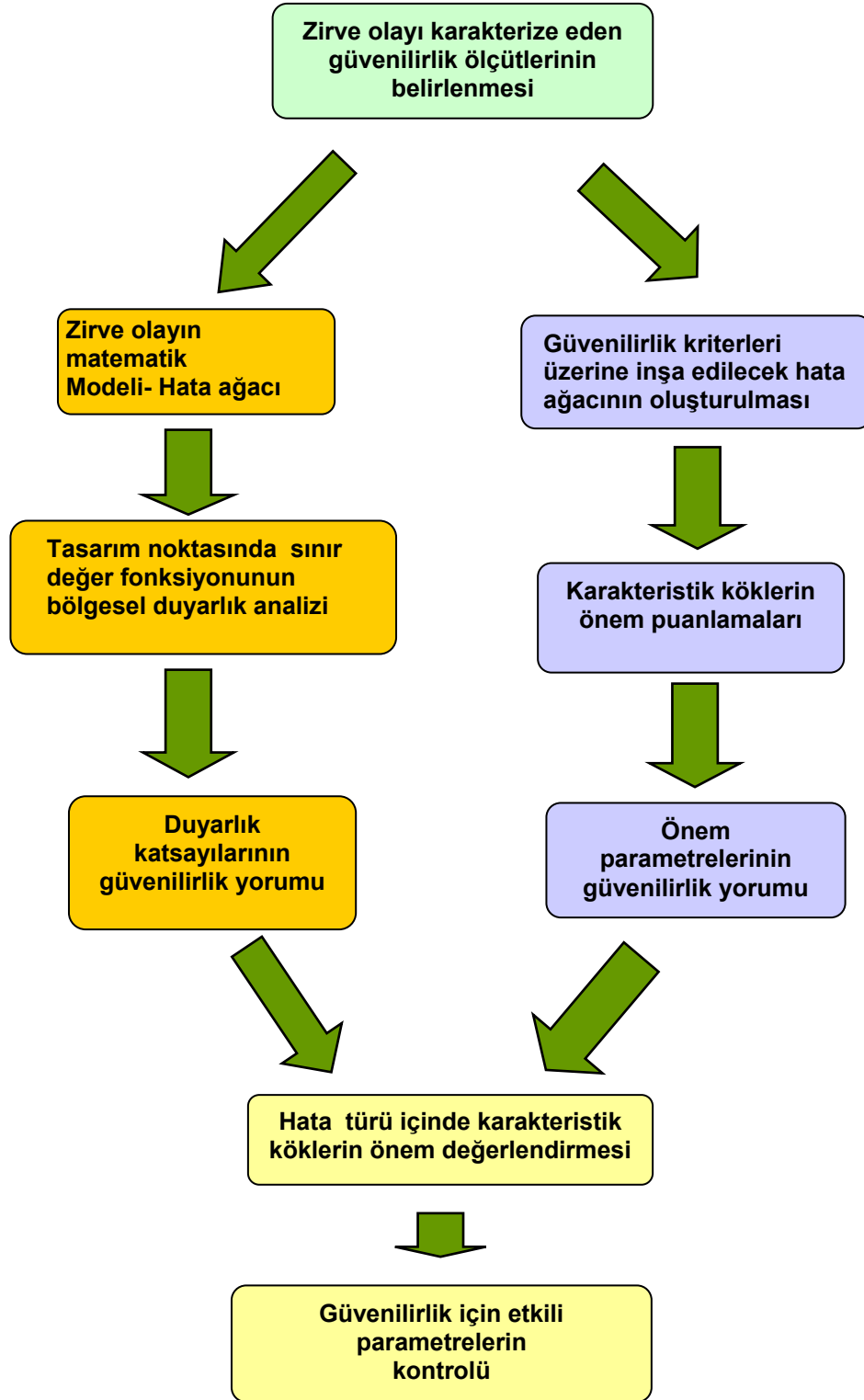
##### Etap 1 Güvenilirlik ölçütlerinin bulunması

Bir hata türü konusunda duyarlılık analizli gerçekleştirebilmek için elverişli bir mekanik model tanımlamak gerekir. Modelin aşağıdaki kriterlere uyması beklenir.

- Modelin incelenen hata türünün ortaya çıkmasına neden olan fiziksel olayı temsil edebilmesi,
- Tasarımda kullanılan modelle uyumlu olması,
- Modelin kalitatif hata ağacıyla gerçekleştirilen yaklaşıma uyarlanabilir olması.

Birinci maddedeki ana güçlük incelenen sistemdeki doğrudan hata türünün yada ana olayın karmaşıklığından kaynaklanır. Gerçekte ana olaylar hatanın temel fiziksel mekanizmasının farklı kombinasyonlarından ortaya çıkar. Bu nedenle incelenecek olayda temel fiziksel hata mekanizması ve basit hata türü tercih edilecektir.

İkinci madde, seçilecek model için konunun uzmanlarıyla birlikte hareket edilmesini gerektirir. Eğer mümkün olabilirse tasarımda kullanılan modelin aynısının kullanılması tercih edilir.



Şekil 4.5. Kalitatif ve kantitatif analiz metodolojisi

Üçüncü maddenin sağlanması özellikle sistem karmaşıksa ya da sözelimi mekanik sistemler için düşünüldüğünde parçanın formu zor ve çok eksenli yüklere maruz kalması söz konusuysa oldukça zorlayıcı olabilir.

Bu belirtilen ölçütlere uymanın yanında basit bir model seçimi, analitik olması, karakteristik köklerin doğrudan bir fonksiyonu olması çalışmayı basitleştirecektir. Sonlu elemanlarla nümerik modelleme, ölçütler ağırlaştıkça gündeme gelebilecektir.

### Etap 2 Modelleme ve ana olay matematiği

Bir  $G$  sınır değer fonksiyonu tanımlanarak gerçekleştirilir. Performans fonksiyonu olarak da bilinir. Sınır değer fonksiyonu matematiksel bakış açısı yönüyle, incelenen hata türüne göre sistemin cevabının ve dış ortam tarafından uyarılan sistemin davranışının dikkate alınması olarak düşünülebilir.

Eğer ana olay çok genel tanımlanıyorsa, sözgelimi dişlinin kopması, pistonda çatlak oluşması vb. hata noktalarının yerlerinin hassas olarak belirlenmesi demektir ki hataya yol açan eleman ya da hata yolu üzerinde daha kolay gösterilebilir olması anlamına gelir. Yanma odasının termo-mekanik etkisiyle piston üzerinde yüksek çevrim sayılarında yorulma nedeniyle çatlak oluşumu gibi bir ana olay söz konusu olabilir. Böyle bir durumda birden çok  $G_j, j = 1K n$  performans fonksiyonu aynı hata ağacı üzerinde belirtilmesi gerekir.

İncelenen  $G$  fonksiyonu sistemin belirlenen tasarım parametrelerinin ya da dışardan sisteme etkileyen parametrelerin bir fonksiyonudur.  $G$  hata türünün bir modeli olarak denklem 4.12 ve 4.13 şeklindedir.

$$G : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad x \alpha G(x) \quad (4.12)$$

$$x = \{x_1, x_2, K x_n\}^T \quad (4.13)$$

$x_i, i = 1K n$  incelenen güvenilirlik problemi için sistemin yada bir elemanının geometrik karakteristikleri, malzemenin mekanik ya da fiziksel özellikleri, sisteme ya da bir elemanına dışarıdan etkileyen yükler olabilir.

$G$  fonksiyonu, tasarım parametrelerine göre açık ya da örtülü olabilir. Güvenilirlik problemi karmaşık olmaya başladığında nümerik hesaplama programlarının kullanılması kaçınılmaz olur.

Hata türü karşısında sistem ya da bir elemanı iki durumda bulunabilir.

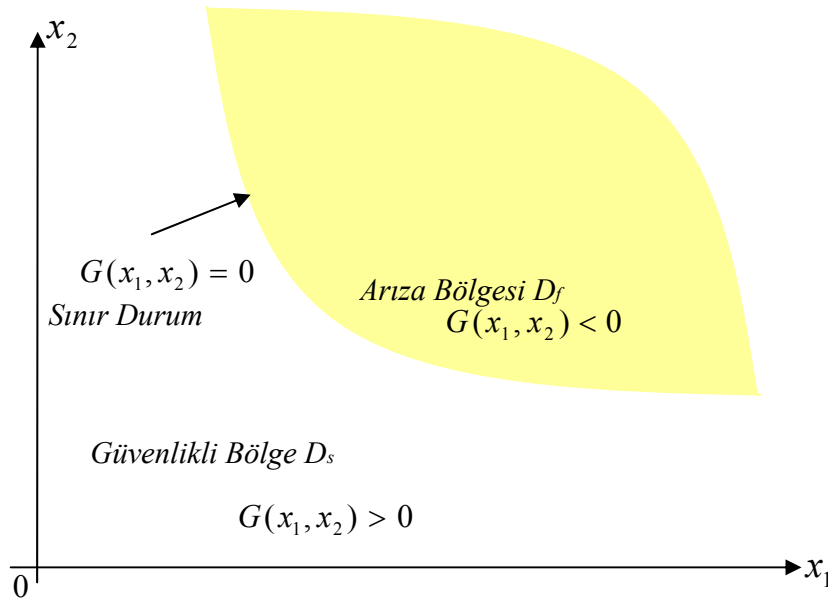


$G(\tilde{x}) > 0$  olması durumunda  $\tilde{x}$  tasarım noktasında, sistemde hata oluşmamaktadır.  $\tilde{x}, D_s$  güvenli bölgesinde kalmaktadır.  $G(\tilde{x}) \leq 0$  olması durumunda ise  $\tilde{x}$  tasarım noktasında, sistemde hata oluşmaktadır.  $\tilde{x}, D_f$  arıza bölgesinde kalmaktadır.

G fonksiyonu genellikle

$$G(x) = R(x) - S(x) \quad (4.14)$$

denklem 4.14 ile ifade edildiği biçimdedir.  $R$  sistemin dayanımı yada direnci ile ilgili değerlerdir.  $S$  ise sisteme etkiyen yüklerdir.[33]



**Şekil 4.6.** İki parametreye bağlı bir güvenilirlik problemi için güvenlik ve arıza bölgeleri

Karmaşık bir hata türü için, performans fonksiyonu örtülü olabilir. Ara değişkenler aynı zamanda başka ara değişkenlerin fonksiyonudur. Bu ayrışım kök karakteristiklere kadar devam edebilecektir. Eğer hata ağacı iyi hazırlanmışsa ayrışım ağacın içerisinde görülecektir.

Ana olayın birden fazla fiziksel hata mekanizmalarının birleşimi olması halindeki sınır durum fonksiyonu ya da çevresi tarafından uyarılan sistemin davranışlarını betimleyen fiziksel büyüklükler ara fonksiyon olabilirler. Bu durumdaki ara fonksiyonların her birisi için duyarlık analizi gerçekleştirilebilir.

### Etap 3 ve 4: Karakteristik kökler karşısında hata türünün duyarlılık analizi

Mevcut kalite fonksiyon yayılımı yaklaşım tekniği (QFD) kalitatif bir güvenilirlik analizi metodudur. Ara fonksiyon biçiminde sunulan her bir etki için şu iki soru sorulmalıdır:

- Farklı karakteristiklerin (sebeplerin) önemi nedir? (bir parametrenin önemini belirlemek için yapılan çalışma, bu karakteristik dışındaki tüm karakteristiklerin nominal değerlerinde tutulmasıyla bulunur)
- Sebep ve sonuçların güvenilirlik grafiklerindeki davranışları nasıldır? (sebeplerin değişikliğinden etkilenme durumu; artan, azalan, durağan olması)

Bu sonuçlar uzmanlar tarafından verilir. Güvenilirlik grafiklerinin yayılma yolu boyunca birleşimleri, ana olayın gerçekleşmesinde kök karakteristiklerin önemlerinin belirlenmesine izin verir. Amaç, incelenen hata türü için sistemin yanıtını etkileyen kök karakteristiklerinin etkilerini ölçebilmek ve hata türündeki kritik olan karakteristikleri ve tanımlandığı bölgeleri belirlemeye çalışmaktır. Böylece tasarım parametrelerinin optimal olduğu değer incelenir. Elde edilen bulgular gerçekleştirilmesi muhtemel bir eylem planının konusu olur. Bu şekilde uzman bilgilerinden doğan kritiklik puanlamasıyla hata ağacında gerekli düzeltmeleri yapmak mümkün olacaktır.[38]

Bir sistemin tasarımında belirlenmiş hedeflere ulaşmak bir uzlaşma gerektirir. Bu hedefler sistemin sözcümlü performanslı, çevreye zarar vermeyen, sağlam, güvenilir olması olabilir. Bu amaçlar sıklıkla birbiriyle çelişir. Önerilen çözüm bir grup hedeflerin gerçekleşmesine yardımcı olurken bazılarının bozulmasına neden olabilir. Asıl olan vazgeçilmez zorunlu önceliklerin sağlanmasıdır. Böyle bir tercih yapılması halinde çoğu durumda sistem hata bölgesine çok yaklaşır. Tasarımcılar buna rağmen tüm hata türleri için  $\tilde{x}$  tasarım noktasında  $G(\tilde{x}) > 0$  olması konusunda dikkatli davranırlar.

$G$  hata türünün bir modellemesi ve  $G : IR^n \rightarrow IR$  ve  $n \in IR$  olsun.  $G$  fonksiyonu için güvenilirlik probleminde duyarlılığın birinci ölçümü denklem 4.15 biçiminde yazılır.

$$s_i^{(1)}(\tilde{x}) = \frac{\partial G}{\partial x_i}(\tilde{x}), i = 1K n \quad (4.15)$$

G fonksiyonu içindeki parametrelerin farklı fiziksel birimlerde olması bu faktörlerin nispi önemlerini hesaplamaya imkân vermez. Eğer  $S_i^{(1)}, i = 1K n$  değerleri sıfır yada sıfıra yakınsa, G fonksiyonunun durağanlık gerek şartı sağlanmış olur. Tasarım noktası  $\tilde{x}$ , fonksiyonun bir bölgesel ya da yerel minimumu olabilir.  $G(\tilde{x}) > 0$  olduğu için sistemin incelenen bu hata türü karşısında güvenilirliğini garanti eder.  $dx$  giriş faktörleri üzerindeki küçük bozulma vektörünü temsil eder.  $\nabla f(\tilde{x})dx$  skaler çarpımının işareti  $dx$  yönünde  $\tilde{x}$  komşuluğunda G fonksiyonun artan olup olmadığını incelememize yardım eder. G fonksiyonu  $dx$  yönüne bağlı azalan bir fonksiyon ise sistemi hatalı olacağı bölgeye yaklaştırabilir.  $S_i^{(1)}, i = 1K n$  deki her bir duyarlık katsayısının işareti  $dx_i, i = 1K n$  bozulma etkisi altında G fonksiyonunun değişimini gösterir.

G fonksiyonu için duyarlığın ikinci ölçümü

$$s_1^{(2)}(\tilde{x}) = \frac{\tilde{x}_i}{G(\tilde{x})} \frac{\partial G}{\partial x_i}(\tilde{x}), i = 1\Lambda n \quad (4.16)$$

denklem 4.16 biçiminde ortaya çıkar.  $S_i^{(2)}, i = 1K n$  değerleri hata türündeki etkili ve ihmal edilebilir parametrelerin ortaya konulmasını sağlar.

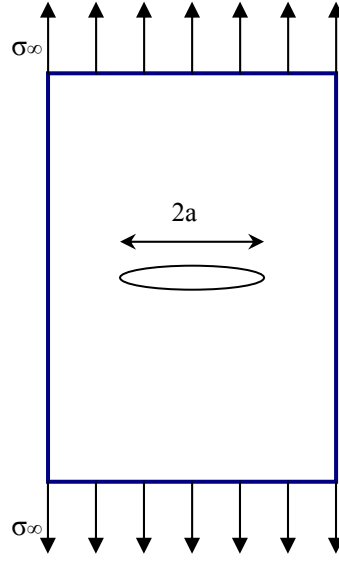
#### Etap 5 - Hata türü içindeki karakteristik köklerin kalitatif ve kantitatif nispi önemlerinin bulunması

Bölgesel duyarlık analizi ve FTA-QFD analizleri birlikte, sistemin hata türündeki karakteristik köklerin göreceli önemlerinin elde edilmesini sağlar. Ölçümler kritik parametreleri nominal değerleri çevresinde kontrol etmek, değişimlerini sınırlamak ya da kaldırmak için kullanılabilir.

#### **4.5. Çatlak Açılmış Bir Plakanın Kopma Riski İçin Duyarlık Analizi**

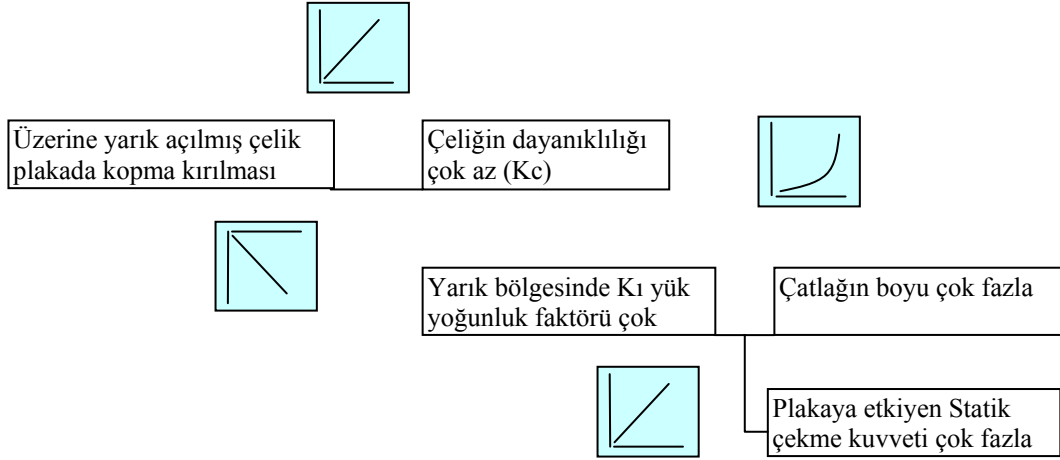
30CD2B sertleştirilmiş çelik plakanın merkezinde Şekil 4.7’de görüldüğü gibi bir çentik açılmıştır. Çelik plakaya statik çekme kuvveti uygulanmıştır. Bu statik yük altında plaka üzerinde kaba kırılma kopması riskinden

şüphelenilmektedir.



Şekil 4.7. Mekanik güvenilirlik problemi şeması

Problem için basit bir hata ağacı Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Üzerine yarık açılan çelik plakada kopma kırılması için hazırlanmış tam hata ağacı

Plakada meydana gelme riski olan kopma problemi için hata ağacı gösteriminden sonra, hata ağacına uygun matematik modelleme denklem 4.17 ile verilmiştir.

$$G(K_C, a, \sigma_\infty) = K_C - K_I(a, \sigma_\infty) \quad (4.17)$$

Yarık açılan noktadaki yük yoğunluk faktörü ise denklem 4.18’deki formülle ifade edilebilir.

$$K_I(a, \sigma_\infty) = \sigma_\infty \sqrt{\pi a} \quad (4.18)$$

$K_c$  malzemenin dayanıklılığı ve  $\sigma_\infty$  uygulanan statik yüküdür. Sistemin yani plakanın bu şartlar altında  $D_f$  hasarlı bölgesinde kalması (kopması)  $G(K_c, a, \sigma_\infty) \leq 0$  olduğu durumda meydana gelebilecektir ve  $(K_c, a, \sigma_\infty)$  bileşenlerine (faktörlerine) bağlıdır. Güvenilirlik probleminin nominal değerleri aşağıda verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Tasarım kriterlerinin nominal değerleri

$\tilde{K}_c$	$110 \text{ Mpa}\sqrt{m}$
$\tilde{\sigma}_\infty$	$1300 \text{ MPa}$
$\tilde{a}$	$2 \text{ mm}$

Tasarımın nominal değerleri için,  $G(\tilde{K}_c, \tilde{a}, \tilde{\sigma}_\infty) = 6,95 \text{ Mpa}\sqrt{m}$  ' dir. Ancak  $(\tilde{K}_c, \tilde{a}, \tilde{\sigma}_\infty)$  tasarım noktası hasarlanma bölgesine yakındır.

$G$ ' nin  $(\tilde{K}_c, \tilde{a}, \tilde{\sigma}_\infty)$  noktasındaki gradyanı

$$s^{(1)} = \nabla G(\tilde{K}_c, \tilde{a}, \tilde{\sigma}_\infty) \quad (4.19)$$

$$S^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 \\ -\pi\sigma_\infty / 2\sqrt{\pi\tilde{a}} \\ -\sqrt{\pi\tilde{a}} \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

$$\nabla G(110, 0,002, 1300) = \begin{pmatrix} 1 \\ -25761,63 \\ -0,0793 \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

denklem 4.21'de verildiği şekilde bulunmuştur. Birinci bileşen boyutsuzdur. İkinci bileşen  $\text{Mpa}\sqrt{m}$  değeridir. Üçüncü bileşen ise  $\sqrt{m}$  B değerini belirlemektedir.

Büyükliklerin fiziksel tanım bölgesine bağlı ölçek etkisiyle bileşenler arasında önemli farklar görülmektedir. Parametrelerin nispi önemleri için elverişli

bir bilgi buradan elde edilemez. Yine de güvenilirliğin ilk ölçümünden elde edilen bulgularla şu sonuçlara ulaşılabilir;

- $K_c$  'nin artan yöndeki değerleri için  $G$  fonksiyonu da artandır.  $\tilde{K}_c$  nominal değeri artarsa kopma riski karşısında sistemin güvenilirliği artacaktır.
- $a$  'nın artan yöndeki değerleri için  $G$  fonksiyonu azalandır.  $\tilde{a}$  nominal değeri artarsa kopma riski karşısında sistemin güvenilirliği azalacaktır.
- $\sigma_\infty$  'nin artan yöndeki değerleri için  $G$  fonksiyonu azalandır.  $\tilde{\sigma}_\infty$  nominal değeri artarsa kopma riski karşısında sistemin güvenilirliği azalacaktır.

Bu sonuçlar hata ağacındaki eğilim grafiklerinin çizilmesine yardımcı olur.

Duyarlığın ikinci ölçümü değerleri denklem 4.22'de yerine konduğunda denklem 4.23 ile verilen değerler bulunur.

$$S^{(2)}(\tilde{K}_c, \tilde{a}, \tilde{\sigma}_\infty) = \begin{pmatrix} \frac{\tilde{K}_c}{G(\tilde{K}_c, \tilde{a}, \tilde{\sigma}_\infty)} \\ -\frac{\tilde{a}}{G(\tilde{K}_c, \tilde{a}, \tilde{\sigma}_\infty)} \frac{\pi\sigma_\infty}{2\sqrt{\pi\tilde{a}}} \\ -\frac{\tilde{\sigma}_\infty}{G(\tilde{K}_c, \tilde{a}, \tilde{\sigma}_\infty)} \sqrt{\pi\tilde{a}} \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

$$S^{(2)}(110, 0, 002, 1300) = \begin{pmatrix} 15,82 \\ -7,41 \\ -14,82 \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

Hatanın yani kopmanın ortaya çıkmasında etkili iki parametre çeliğin sağlamlığı ve plakaya uygulanan kuvvetin büyüklüğüdür. Buradan hareketle  $K_c$  ve  $\sigma_\infty$  'in  $(\tilde{K}_c, \tilde{a}, \tilde{\sigma}_\infty)$  noktasında %1 değişimlerinin hata türü için verilen  $G$  fonksiyon değeri üzerinde sırasıyla %15,82 arttırıcı ve %14,82 azaltıcı etki meydana getirdiği görülmektedir. Fonksiyondaki  $K_c$  ve  $\sigma_\infty$  değerlerinin

$(\tilde{K}_c, \tilde{a}, \tilde{\sigma}_\infty)$  noktasında küçük değişiklikleri güvenilirlik üzerinde önemli değişikliklere neden olmaktadır. Her ne kadar bu iki parametreye göre etkisi daha zayıf olsa da, çelik plaka üzerine açılan yarığın  $\tilde{a}$  değeri ihmal edilemez. Plaka üzerine açılan yarığın boyu %1 arttırıldığında G fonksiyonu %7,41 oranında etkilenmektedir.

G hata türü fonksiyonunun  $(\tilde{K}_c, \tilde{a}, \tilde{\sigma}_\infty)$  noktasındaki değeri  $6,95 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$  gibi zayıf bir değerdir. Muhtemelen çelik plaka bu hata türü için tasarlanmamıştır. Bu seçime boyutlandırma denilmektedir. Dolayısıyla çelik plaka bu hata türü için boyutlandırılmamış denilebilir. Tasarım parametrelerinden  $\tilde{K}_c$  malzeme seçimi ve  $\tilde{\sigma}_\infty$  uygulanan yük, diğer başka hata türleri için boyutlandırılmış ve bir çatlağın varlığı dikkate alınmamış olabilir. Bu çalışmada  $\tilde{\sigma}_\infty$  uygulanan çekme kuvvetinin değerindeki %7'lik değişim, aynı şartlarda çelik plakanın hasarlı bölgede kalması yani kopması için yeterlidir.

$$(G(\tilde{K}_c, \tilde{a}, \sigma_\infty + 0,07\sigma_\infty) < 0) \quad (4.17)$$

Bölgesel duyarlık analizi hata türündeki her bir tasarım parametresinin nispi önemleri konusunda bizi doğrudan bilgilendirmektedir.

## 5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Örnek uygulamanın yer aldığı bir önceki bölümde, güvenilirliği incelenecek sistem için bir modelleme yapılmıştır. Fiziki gerçekliği doğru yansıtabilecek bir modellemenin yapılması en önemli aşamalardan biridir. Elde edilen bulguların geçerliliği aynı zamanda modelleme başarısına bağlıdır. Ancak sistem karmaşıklıkça modelleme kapasitesinde düşüş görülmektedir. Güvenilirlik duyarlık analizi uygulamalarının karmaşık sistem ve yapılar için halen geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca matematik modelde yer alan sistem fonksiyonu ve tasarım parametreleri arasındaki ilişki boyutuyla fonksiyonun açık bir fonksiyon olma ihtiyacı (explicite) uygulamaları sınırlandırmaktadır. Geçerli hesaplama yöntemlerinin daha fazla denenmesi ve geliştirilmesi gerekmektedir. Yöntem tasarımı etkili ve nispeten ihmal edilebilir ihtiyaçların ortaya konmasına yardımcı olur. Ancak tasarımda belirlenmiş hedeflere ulaşmak birbiriyle çelişebilen bir grup öncelikler arasında uzlaşının sağlanmasını gerektirir. Bazı kriterlere daha fazla önem vermek dolayısıyla bir grup ihtiyaçlardan da tavizler vermek gerekebilir. Örneğin otomobil için egzoz gazlarının emisyonu konusundaki çevre normlarına uyum şartı motorun performans kriterlerini etkileyecektir. Öncelik her zaman sistemin vazgeçilemeyecek ihtiyaçlarının karşılanmasıdır. Yinede her bir hata türü için tasarımda emniyetli kabul edilen bölge içinde kalınmasına özen gösterilmelidir. Çelik plakada kopma riski problemi için geliştirilen yöntem daha karmaşık otomobil parçaları içinde kullanılmaktadır. Örneğin krank mili ve yataklarında kırılma analizi için bu teknik geliştirilmiştir. Bu durumda sonuçları değerlendirirken sistemi sadece mekanik parça için düşünmeyip güç sistemini çevresel bir bütün olarak değerlendirmek ihtiyacı söz konusudur. Bu değerlendirme otomobil motoru içindeki incelenen bir mekanik parça konusunda elde edilen bulguları değerlendirmek için önemlidir.

Otomobil parçasının üretim sürecinde uygulanan kalite prosedürleri, malzeme iç özellikleri ve bileşenlerin geometrik karakteristiklerindeki değişim ve dağılımları sınırlamaya olanak sağlar. Bu şekilde üretilen çok sayıda eş parçanın benzer performansı göstermesi beklenir.

Çoğu mekanik sistemleri kontrol etmek için otomobil motorlarına



yerleştirilen elektronik donanımlar ve beyinler nominal tasarım değerlerine göre sisteme etkiyen dış kuvvetleri sınırlamak için kullanılır. Böylece sistemin güvenilirliği bir bütün halinde i dayanım parametreleri ve değişmesi muhtemel dış etkilerin kontrol altına alınmasıyla arttırılmaya çalışılır.

**KAYNAKLAR**

- [1] Dagen-Laneyrie, N., *Les grands proces*, Edition Larousse, Paris, Fransa, 1995.
- [2] Finet, A., *Le code d'Hammmourabi*, Edition du Cerf, Paris, Fransa, 1983.
- [3] Decroches, A., *Concepts et methodes probabilistes de base de la securite*, Editions Lovisier, Paris, Fransa, 1995.
- [4] Lemaire, M., *Fiabilité des structures mecanique. Couplage mecano-fiabiliste statique*. LARAMA Institut Français de Mecanique avancée, Aubiere, Fransa, 2001.
- [5] Peterson, I., *Le chaos dans le système solaire* pour la science, 1995.
- [6] Villemeur, A., *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*. Collection de la direction des études et recherches d'Electricité de France, Edition Eyrolles, Fransa, 1988.
- [7] Anonim, *Guide de la Sûreté de fonctionnement*, Magasin Intersection Schneider Electric, Fransa, 2004.
- [8] Bozovsky, I., *Reliability theory and practice*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., A.B.D., 1961.
- [9] Lagadec, P., *Le risqué technologique majeur*, Pargamon Pres, Fransa, 1981.
- [10] Lawson, D., *Engineering disasters; lessons to be learned*, Professional engineering, N.J., A.B.D., 2005.
- [11] Bloch, A., *Murphy's Law and other reasons why things go wrong*, Publishers Inc., Los Angeles, A.B.D., 1982.
- [12] Henley, J. ve Kamamoto, H., *Reliability engineering and risk assessment*, Prentice Hall Inc., Englewood, N.J., A.B.D., 1981.
- [13] Lievens, C., *Sécurité des systèmes*, Edition Cepadies, Fransa, 1976.
- [14] Levine, S. ve Stetson, F., *Applying the lessons of PRA (Probabilistic Risk Assessment)*, An American Perspective Nuclear Engineering International, A.B.D., 1984.

- [15] Japanese Union of Scientists and Engineers (JUSE), *Principes généraux des cercles qualité*, AFNOR, Fransa, 1981.
- [16] US Nuclear Regulatory Commission, *Safety goals for nuclear power plant operation*, Nureg, No. 0880, A.B.D., 1983.
- [17] Modarras, M. ve arkadaşları, *Reliability engineering and risk analysis*, Edition Marcel Dekker, N.Y., A.B.D., 1999.
- [18] O'Connor, P.D., *Practical Reliability engineering*, Wiley&Sons, A.B.D., 2002.
- [19] Norm Anonim, *Processus de la sûreté de fonctionnement*, RENAULT S.A., Paris, Fransa, 1999.
- [20] Anonim, Commission Electrotechnique internationale, *Liste des termes de base, définitions et mathematics applicable a la fiabilité*, Publication 271C, Paris, Fransa, 1985.
- [21] U.S. Nuclear Regulatory Commission, *Fault tree handbook*, NUREG-0492, A.B.D., 1981.
- [22] Catry, F., *Pré analyse technique sur véhicule*, RENAULT S.A. eğitim notları, Paris, Fransa, 2005.
- [23] Akao, Y., *Quality Function Deployment integrating customer requirement into product design*, Productivity Pres., Massachusetts, A.B.D., 1990.
- [24] Anonim, Eğitim notları, *Formation design for quality*, Alstom, Paris, Fransa, 2004.
- [25] Sevük, A., *QFD yaklaşımına bir örnek*, Tüsiad-Kalder 7. Ulusal Kalite Kongresi, Tebliğler, İstanbul, 1998.
- [26] Akao, Y., *General concept of QFD*, Eğitim notları, 1999.
- [27] Cengiz, Y.B., Yayla Y. *Rekabet üstünlüğü için modern yaklaşımlar*, Tüsiad-Kalder 6. Ulusal Kongresi, Tebliğler, 1997.
- [28] Güllü, E., Ulcay, Y., *Kalite fonksiyon yayılımı ve bir uygulama*, Rapor, Uludağ üniversitesi Müh-Mim. Fakültesi Dergisi, Cilt 7, Bursa, 2002.

- [29] Dieng R., Méthodes et outils pour la gestion des connaissances, Edition Dunod, Paris, 2000.
- [30] Poncet, A., *Fiabilité expérimentale: dimensionnement optimale d'essais sous contraintes*, Doktora Tezi, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, Fransa, 2005.
- [31] Sellali B., Intégration du retour d'expérience d'exploitation dans une approche MBF pour optimiser la fiabilité des matériels, Doktora Tezi, Université Henri Poincaré de Nancy1, Fransa, 1998.
- [32] A. Lannoy, H. Procaccia., *L'utilisation du jugement d'expert en sûreté de fonctionnement*, Editions Tec& Doc, Fransa, 2001.
- [33] Anonim, *Probabilistic Methods, uses and abuses in structural integrity*, Bovel Limited Contract Research Report 398/2001, Berkshire, İngiltere, 2001.
- [34] Ditlevsen, O., ve Madsen, H.O., *Structural reliability methods*, Technical University of Denmark, Maritime Engineering, Lyngby, Danimarka, 2004.
- [35] Kreyszig, E., *Advanced engineering mathematics*, Wiley and Sons Inc., Ohio, A.B.D., 1993.
- [36] Rapor Anonim Lageron S.A., *Management et maitrise des risques*, Saint Aubin, Fransa, 2003.
- [37] Note Technique Hahnel, A., *Fiabilité dynamique; enjeux, potentiel et futurs développements*, Renault S.A. Service 66101, Paris, Fransa, 2005.
- [38] Prince, O., *Prévoir la fiabilité en clientele à partir de données du réseau de resultat d'essais ou de calculs*, Documents Renault S.A. Paris, Fransa, 2003.