

PETROL TANKERLERİNDE RİSK DEĞERLENDİRMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Serdar KUM
(512021006)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 Mayıs 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Mayıs 2005

Tez Danışmanı : Doç.Dr. İsmail Deha ER
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Osman Kamil SAĞ (İ.T.Ü.)
Doç.Dr. Osman Azmi ÖZSOYSAL (İ.T.Ü.)

MAYIS 2005

ÖNSÖZ

Bu çalışma ile gemi yönetiminde mevcut olan riskler ve bunların kontrol yöntemleri araştırılarak, tam olarak anlaşılamamış denizcilik risk değerlendirme yaklaşımlarının anlaşılması, uygulanması ve risklerin yönetilmesi konusunda ilgili altyapı hedeflenmiştir. Sadece tankerlere uygulanmasının yanı sıra diğer tipteki gemilere, denizcilik şirketi işletme ve idari birimlerine kolayca uygulanabilir niteliktedir.

Bu çalışmada IMO (Uluslararası Denizcilik Organizasyonu)'nun kural koyma sürecinde faydalandığı “Düzenli Emniyet Değerlendirmesi (FSA)” risk değerlendirme sürecinin yanı sıra, ileriki yıllarda benzer çalışma yapacak araştırmacılara fayda sağlayacak diğer değerlendirme yöntemlerine de yer verilmiştir. “Gemi Teknik İşletmeciliğinde Risk Değerlendirme Konusu” olarak da adlandırabileceğimiz bu çalışma; donanım, insan ve çevre faktörlerini tek tek ve birbirlerine olan etkileriyle beraber ele alarak, ortaya çıkabilecek riskleri tespit etme, ölçme, değerlendirme ve yönetmede ve ayrıca risk değerlendirmesi sonucunda elde edilen verilere göre, önleyici tedbirlerin zamana bağlı olarak, nasıl ve ne şekilde alınmasında yol gösterici olacaktır.

Çalışmamın başlangıcında, risk analizinin temelini oluşturan istatistik konularında bilgi, yardım ve eleştirilerini sunan sayın ders hocam Prof. Dr. Burç ÜLENGİN’e, ayrıca çalışmalarım sırasında göstermiş olduğu özveri, rehberlik ve anlayıştan dolayı tez danışmanım Doç. Dr. İsmail Deha ER’e ve desteklerinden dolayı tüm İ.T.Ü. Denizcilik Fakültesi’ndeki hocalarıma teşekkür ederim.

Mayıs, 2005

Serdar KUM

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Güvenilirlik Tanımlaması	1
1.2. Hata Modelleri	2
1.3. Performans Ölçümleri	3
1.4. Güvenilirlik Tanımı	4
1.5. Olabilirlik Tanımı	5
1.6. Risk Tanımı	6
2. TEMEL GÜVENİLİRLİK MATEMATİĞİ	10
2.1. Olasılığın Temel Kavramları	10
2.1.1. Kümeler ve boolean matematiği	10
2.1.2. Olasılık kuralları	11
2.2. Olasılık Dağılımları	15
2.2.1. Rasgele değişkenler	15
2.2.2. Süreksiz rasgele değişkenlerin olasılık dağılımları	15
2.2.3. Sürekli rasgele değişkenlerin olasılık dağılımları	18
2.2.4. Joint ve marjinal dağılımlar	21
2.3. Rasgele Değişkenlerin Karakteristikleri	23
2.4. Tahminleme ve Hipotez Testi	26
2.4.1. Nokta (tek değer) tahminleme	26
2.4.2. Aralık tahminleme	29
2.4.3. Hipotez testi	30
2.5. Güvenilirlik Testleri	31
2.5.1. Ki-Kare testi	31
2.5.2. Kolmogorov testi	32
2.6. Regresyon Analizi	33
2.6.1. Basit lineer regresyon	34
3. GÜVENİLİRLİK ELEMANLARI	36
3.1. Güvenilirlik Kavramı	36
3.1.1. Güvenilirlik fonksiyonu	36
3.1.2. Hata oranı	38

3.2. Genel Güvenilirlik Dağılımları	40
3.2.1. Üstel dağılım	40
3.2.2. Weibull dağılımı	41
3.2.3. Gama dağılımı	43
3.2.4. Normal dağılım	44
3.2.5. Lognormal dağılım	45
3.2.6. Aşırı Değer dağılımları	47
3.3. Bileşen Güvenilirlik Modelleri	51
3.3.1. Parametrik olmayan grafik yöntemleri	51
3.3.2. Olasılık haritası	53
3.3.3. Test üzerinde toplam zaman pilotlamaları	55
3.4. Klasik Parametrik Tahminleme	56
3.4.1. Üstel dağılım ile tek değer tahminlemesi	59
3.4.2. Üstel dağılım ile aralık tahminlemesi	61
3.4.3. Lognormal dağılım	62
3.4.4. Weibull dağılımı	63
3.4.5. Binomial dağılım	63
3.5. Parametrik Olmayan Dağılım Tahminlemesi	64
3.5.1. Bütün ve kendi başına sansürlü verilerin kümülatif dağılım ve güvenilirlik fonksiyonları için güven aralıkları	64
3.5.2. Çoğalan sansürlü verilerin kümülatif dağılım ve güvenilirlik fonksiyonları için güven aralıkları	66
3.6. Baysen Tahminleme Prosedürü	66
3.6.1. Apriori dağılım parametrelerinin seçilmesi	69
3.6.2. Uniform apriori dağılımı	70
3.6.3. Binom dağılım parametresinin baysen tahmini	72
3.7. Hata Oranı Tahminleme Metotları	76
4. SİSTEM GÜVENİLİRLİK ANALİZİ	77
4.1. Güvenilirlik Blok Diyagramı	78
4.1.1. Seri sistemler	78
4.1.2. Paralel sistemler	79
4.1.3. Yedek-gereksiz sistemler	81
4.1.4. Yük paylaşım sistemleri	83
4.1.5. Kompleks sistemler	85
4.2. Hata Ağacı Modeli (FTA)	88
4.2.1. Mantık ağaçlarının değerlendirilmesi	91
4.3. Başarı Ağacı Modeli (STA)	103
4.4. Olay Ağacı Modeli (ETA)	104
4.4.1. Olay ağacının oluşturulması	104
4.4.2. Olay ağacının değerlendirilmesi	105
4.5. Ana Mantık Diyagramları (MLD)	107

4.6. Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik Analizi (FMECA)	110
4.6.1. Hata şekilleri, etki ve kritiklik analiz çeşitleri	111
4.6.2. Hata şekilleri, etki ve kritiklik analiz prosedürü	111
4.6.3. Hata şekilleri, etki ve kritiklik analizi uygulaması	117
5. DENİZCİLİK SEKTÖRÜNDE RİSK KAVRAMI	119
5.1. Düzenli Emniyet Değerlendirmesi (FSA)	127
5.1.1. Tehlikelerin belirlenmesi	129
5.1.2. Risk değerlendirme	130
5.1.3. Emniyet önlemlerinin belirlenmesi (risk kontrol seçenekleri)	134
5.1.4. Fayda maliyet değerlendirme	137
5.1.5. Karar verme için tavsiyeler	140
5.2. FSA'nın Uygulanması	141
5.2.1. I. Adım: tehlikeleri belirlemek	141
5.2.2. II. Adım: riski değerlendirmek	142
5.2.3. III. Adım: risk kontrol önlemlerini tanımlamak	146
5.2.4. IV. Adım: fayda-maliyet analizi	147
5.2.5. V. Adım: tavsiyeler	148
5.3. İnsan Faktörü	149
5.3.1. İnsan hatası	150
5.3.2. Kaza karakteristikleri	151
5.3.3. Bilgi süreci	151
5.3.4. Gözlem ve his	153
5.3.5. Algılama ve karar verme	155
5.3.6. Çalışma şartları	156
5.3.7. Deniz hareketinin etkisi	159
5.4. İnsan Güvenilirlik Değerlendirmesi	160
6. ÖRNEK SİSTEM MODELLEMELERİ	166
6.1. Flap Dümen Sisteminin Modellenmesi	166
6.1.1. Flap dümen kullanımında risk kontrol seçenekleri	168
6.1.2. Seçilen risk kontrol seçeneğinin hata dağılımı	176
6.1.3. Seçilen risk kontrol seçeneğinin faydası	177
6.2. Seyir Sisteminin Modellenmesi	179
6.2.1. Güç ile karaya oturma	181
6.2.2. Sürüklenme ile karaya oturma	187
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	190
KAYNAKLAR	196
ÖZGEÇMİŞ	201

KISALTMALAR

PRA	: Olasılıklı Risk Analizi
PrHA	: Öncelikli Tehlike Analizi
FMEA	: Hata Şekilleri ve Etki Analizi
FMECA	: Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik Analizi
FTA	: Hata Ağacı Analizi
ETA	: Olay Ağacı Analizi
MTTF	: Ortalama Hata Zamanı
MTBF	: Hatalar Arasındaki Ortalama Zaman
MLE	: Çarpım Sınır Tahmini (Kaplan-Meier)
MOCUS	: Elde Edilen Kesme Kümeleri Metodu
RRW	: Risk Küçültme Değer Önemi
RAW	: Risk Kazanma Değer Önemi
STA	: Başarı Ağacı Analizi
MLD	: Ana Mantık Diyagramları
FSA	: Düzenli Emniyet Değerlendirmesi
IMO	: Uluslararası Denizcilik Organizasyonu
ALARP	: Düşük Olduğu Kadar Makul Şekilde Uygulanabilir
MARPOL	: Gemilerden Kirlenmenin Önlemesi Uluslararası Sözleşmesi
ICAF	: Önlenecek bir Ölümün Anlaşılan Maliyeti
LSA	: Uluslararası Can Kurtarma Gereçleri
MSC	: Denizde Güvenlik Komitesi
FN	: Ölüm Frekansı
RCO	: Risk Kontrol Seçeneği
PLL	: Potansiyel Yaşam Kaybı
SMA	: Toplanma ve Filika Alanının Korunması
LA	: Gemiye Su Girişinin İzlenmesi ve Su Seviye Alarmı
IS	: Tüm personel için Kişisel Su Geçirmez ve Isı Korumalı Giysi
FF	: Serbest Düşme Filikaları
MES	: Can salları için Deniz Tahliye Sistemleri
RTP	: Üst Seviyede Eğitilmiş Personel
MSI	: Hareket Tutma Sıklığı
VI	: İstiğfar Sıklığı
MIF	: Yorgunluk Yaratan Hareket
MII	: Kesinti Yaratan Hareket
RMS	: Kareler Toplamı Ortalaması Karekökü
THERP	: İnsan Hatası Tahmin Tekniği
LMIS	: Lloyd's Deniz Bilgi Servisi
NPV	: Şimdiki Net Değer
VTs	: Gemi Trafik Hizmeti

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Risk analizi metotları	8
Tablo 2.1. Kümeler cebri kuralları	11
Tablo 2.2. Beklenti denklemleri	24
Tablo 2.3 Hipotez testinde yapılan hatalar	31
Tablo 3.1. λ , MTTF ve R(t) için %100(1 - α) güvenirlilik sınırları	62
Tablo 3.2. Gama apriori dağılımının değişim katsayısı ve parametreleri	70
Tablo 4.1. Bir yıllık (336 gün) seyir için hesaplanan hata bilgisi	98
Tablo 4.2. En üst olay için hata olasılık hesaplaması	102
Tablo 4.3. En üst olay için kesme kümelerinin hata olasılıkları	102
Tablo 4.4. Fussell-Vesely önem ölçütüne dayalı önem sıralaması	102
Tablo 4.5. Baskın hata kombinasyonları ve özdeş olasılıkları	109
Tablo 4.6. Sistemi hataya götürecek kombinasyonlar	110
Tablo 4.7. Hata şekilleri tespit sınıflandırması	114
Tablo 4.8. Şiddet sınıflandırması	115
Tablo 4.9. Şiddetin değerlendirmesi	115
Tablo 4.10. Frekans sınıflandırması	116
Tablo 4.11. Hata modu, ekti ve kritiklik analizi formu	118
Tablo 5.1. Gemi sistemleri ve gemi fonksiyonları	120
Tablo 5.2. Genel kaza sebepleri	120
Tablo 5.3. Deniz kazalarının karakteristikleri	123
Tablo 5.4. 1599 grt üstü gemilerin karaya oturma kazaları ile ilgili nedensel grupları ve frekansları	124
Tablo 5.5. Risk faktör sınıflandırması	125
Tablo 5.6. Risk etki sınıflandırması	126
Tablo 5.7. Gemi işletmecisinin riske bağlı olan hedefleri	127
Tablo 5.8. Geçmiş veri kayıtlarından elde edilen kaza çıktıları	130
Tablo 5.9. Jenerik kaza nedenleri	130
Tablo 5.10. ISO 17776 risk matrisi	134
Tablo 5.11. Risk kontrol önlemlerinin karakteristikleri	138
Tablo 5.12. Gemi terk frekansı ve ölüm oranı	143
Tablo 5.13. Can kurtarma araçları hazırlanana kadar bir gemi kazasına neden olacak istenmeyen olaylar için olay ağacı dal olasılıkları	145
Tablo 5.14. Gemiye terk etmede ölüm olasılıkları	146
Tablo 5.15. Risk kontrol seçeneklerinin uygulanması ile ölüm olasılıklarındaki (%) azalma	146
Tablo 5.16. “Toplanma ve filika alanının korunması (SMA)” risk kontrol seçeneği için Δ PLL hesaplanması	147
Tablo 5.17. Risk kontrol seçenekleri için ICAF değerleri	148
Tablo 5.18. Bir gemi kazasının zaman ölçek karakteristiği	151
Tablo 5.19. Gemiler üzerinde termik iklim faktörü	156
Tablo 5.20. Gemilerdeki gürültü	158

Tablo 5.21.	Deniz hareketi işletilebilme kriterleri	160
Tablo 5.22.	Köprüüstü işletilebilme kriteri	160
Tablo 5.23.	İnsan faktörü kontrol listesi	165
Tablo 6.1.	Bireysel (kişisel) risk kabul kriteri	166
Tablo 6.2.	Flap dümen hatasından kaynaklanan risk ve maliyetler	167
Tablo 6.3.	Flap dümen kullanımı için risk kontrol seçenekleri	168
Tablo 6.4.	Bir numaralı risk kontrol seçeneğinin fayda-maliyet değerlendirmesi	169
Tablo 6.5.	Tüm risk kontrol seçenekleri için fayda maliyet değerleri	169
Tablo 6.6.	Dümen hatasındaki toplam azalma	176
Tablo 6.7.	Risk kontrol seçeneklerinin tasarım maliyetleri	178
Tablo 6.8.	Risk kontrol seçeneklerinin fayda maliyet değerlendirmesi	179
Tablo 6.9.	Risk kontrol seçeneklerinin derecelendirilmesi	179
Tablo 6.10.	Seyir planlaması için insan hata olasılıkları	181
Tablo 6.11.	Pilotlama hataları için insan hata olasılıkları	185
Tablo 6.12.	Farklı kontrol seviyelerine göre pilotlama hata olasılıkları	186
Tablo 6.13.	Karaya oturma olasılıkları	189

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Hata modeli	2
Şekil 1.2 : Performans gelişimi için kavramsal hiyerarşi	5
Şekil 1.3 : Risk analizi ve risk değerlendirme süreci	7
Şekil 1.4 : Sürekli ve sürekli olmayan risk ölçekleri	9
Şekil 1.5 : Risk yönetimi	9
Şekil 2.1 : Venn diyagramı	10
Şekil 3.1 : Küvet eğrisi	39
Şekil 3.2 : Küvet eğrisi üzerinde gerilimin etkisi	40
Şekil 3.3 : Weibull olasılık pilotlaması	54
Şekil 4.1 : Seri sistem güvenilirlik blok diyagramı	78
Şekil 4.2 : Paralel sistem blok diyagramı	79
Şekil 4.3 : Yedek gereksiz sistem	81
Şekil 4.4 : Kompleks paralel-seri sistem	85
Şekil 4.5 : Kompleks paralel olmayan-seri sistem	85
Şekil 4.6 : R_s (t bileşen 6 iyi $\cap$ bileşen 3 kötü) blok diyagramı	87
Şekil 4.7 : Hata ağacı oluşturulmasındaki prensipler	89
Şekil 4.8 : Mantık devrelerinde kullanılan olay, kapı ve tümleyen sembolleri	90
Şekil 4.9 : Basitleştirilmiş yangın hata ağacı	91
Şekil 4.10 : “Tanker için makine gücünün kaybedilme” en üst olayının hata ağacı	99
Şekil 4.11 : Bir hata ve başarı ağacı arasındaki benzerlik	103
Şekil 4.12 : Olay ağacı modeline yaklaşım	105
Şekil 4.13 : Başlangıç olay ağaç diyagramı	106
Şekil 4.14 : Olay bağımlılığını değerlendirmek için etki diyagramı	106
Şekil 4.15 : Başlangıç olay ağaç diyagramı	107
Şekil 4.16 : Ana mantık diyagramı	108
Şekil 4.17 : Tanker itici güç (pervane) sisteminin işlevsel blok diyagramı	113
Şekil 5.1 : Deniz kazaları çeşitleri ve sonuçları	119
Şekil 5.2 : Gemi tipine göre ciddi kaza frekansları	121
Şekil 5.3 : Gemi tipine göre toplam kayıp frekansları	121
Şekil 5.4 : 1980-1989 gemi tiplerine göre dünya filosu için kayıp ve ciddi kaza oranı	122
Şekil 5.5 : FSA metodolojisi akış diyagramı	128
Şekil 5.6 : FSA metodolojisinin ikinci adımı	130
Şekil 5.7 : Bir çatışmanın kazasal çıktısı için risk profili	131
Şekil 5.8 : Etki diyagramı yapı taslağı	132
Şekil 5.9 : FSA’nın kullandığı sayısal risk değerlendirme süreci	133
Şekil 5.10 : FSA metodolojisinin üçüncü adımı	135
Şekil 5.11 : Denizcilikte risk azaltma müdahaleleri	136
Şekil 5.12 : FSA metodolojisinin dördüncü adımı	139

Şekil 5.13	: Gemi tiplerine göre gemi personeli ölüm riski	141
Şekil 5.14	: Farklı gemi tipleri için ölüm frekans (FN) eğrisi	142
Şekil 5.15	: Geleneksel filikalar için gemi terk modeli	143
Şekil 5.16	: Can kurtarma araçları hazırlanana kadar bir gemi kazasına neden olacak istenmeyen olaylar için olay ağacı	144
Şekil 5.17	: İnsan hatalarının kaynakları	149
Şekil 5.18	: Alternatif insan performans seviyeleri	152
Şekil 5.19	: Gemi insan-makine kontrolü	152
Şekil 5.20	: Karanlığa alışma eğrisi	154
Şekil 5.21	: Etkili sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hataların izlenmesi	157
Şekil 5.22	: Zarar görmemiş zihinsel performans için üst sınır değeri	157
Şekil 5.23	: Maruz kalma süresinin fonksiyonu olarak titreşim tolerans sınırları	158
Şekil 5.24	: İnsan güvenilirlik analizi değerlendirilmesi	161
Şekil 5.25	: Arka arkaya iki alt işlev için insan güvenilirlik analizi olay ağacı	163
Şekil 6.1	: Flap dümen yapısı	167
Şekil 6.2	: Çatışma ve karaya oturma sonucu oluşan maliyetler	167
Şekil 6.3	: Flap dümen hata ağacı	170
Şekil 6.4	: Çatışma olasılık hata ağacı	180
Şekil 6.5	: Güç ile karaya oturma hata ağacı	182
Şekil 6.6	: Seyir planlaması olay ağacı	184
Şekil 6.7	: Pilotlama olay ağacı	186
Şekil 6.8	: Sürüklenme ile karaya oturma hata ağacı	188
Şekil 6.9	: Gemi yardım olay ağacı	188

SEMBOL LİSTESİ

R	: Güvenilirlik
t	: Belirli bir zaman dilimi
T	: Hata zamanı
c₁, c₂, . . . c_n	: Belirlenen şartlara ait parametreler
Pr(x)	: Olasılık
A	: T zamanı dahilindeki ortalama olabilirlik
u	: T zamanı dahilindeki hizmet süresi
d	: T zamanı dahilindeki aksaklık süresi
S_i	: Olay senaryoları
C'_i	: Senaryo sonucu veya değerlendirme ölçüsü
E	: Olay
S	: Örneklem uzayı
 	: Şartlı olasılık
p	: İstenilen sonucu verme olasılığı
q	: İstenmeyen sonucu verme olasılığı
D	: Elverişli durum sayısı
N	: Ana kütle mevcudu
n	: Örneklem mevcudu
λ	: Dağılım parametresi (Poisson-meydana gelme yoğunluğu)
ρ	: Dağılım parametresi (Poisson-olayın ortalama meydana geliş sayısı)
α	: Dağılım ölçek parametresi (Weibull-Gama)
β	: Dağılım şekil parametresi (Weibull-Gama)
θ	: Dağılım konum parametresi (Weibull-Gama)
δ	: En küçük aşırı değer dağılımı ölçek parametresi
f(t)	: Sürekli olasılık yoğunluk fonksiyonu
F(t)	: Kümülatif dağılım fonksiyonu
I_t(α, β)	: Tamamlanmamış beta fonksiyonu
E(X)	: Merkeze göre ilk moment (beklenen değer)
var(X), σ²(X)	: Varyans
μ	: Ana kütle ortalaması
σ	: Standart sapma
F(S)	: Olasılık yoğunluk fonksiyonunun laplas dönüşümü
cov(X₁, X₂)	: Kovaryans
ρ(X₁, X₂)	: Korelasyon katsayısı
$\bar{x}$	: Örneklem ortalaması
S²	: Örneklem varyansı
L(x₁, x₂, x_n; θ₀)	: Olabilirlik fonksiyonu
θ_l	: Güven aralığı alt güven sınırı
θ_u	: Güven aralığı üst güven sınırı
z	: Standart normal dağılım
χ²	: Ki-kare dağılımı
e_i	: Beklenen frekans

o_i	: Gözlemlenen frekans
W	: Ki-kare istatistik değeri
H_0	: Geçersiz (sıfır) hipotez
H_1	: Alternatif (karşıt) hipotez
$K - S$	: Kolmorov güvenilirlik test istatistiği
$S'_n(t)$	: Kolmorov hipotezlenen kümülatif dağılım fonksiyonu
D_n	: Kolmorov güvenilirlik testi için kritik değer
$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$	: Regresyon katsayıları (parametreleri)
ε	: Regresyon denkleminin rasgele hatası
τ	: Bileşenin sürdürülebilirliği
$h(t)$	: Hata oranı
$H(t)$	: Kümülatif hata oranı
$\langle h(t) \rangle$	: Ortalama hata oranı
Δ	: Kısmi değişim
$\Gamma(\alpha)$	: Gama fonksiyonu
$x_{i:n}$	: Sıralı istatistik
$F_{r:n}$	: Sıralı istatistik kümülatif dağılım fonksiyonu
H	: Maksimum
L	: Minimum
$N_s(t_i)$	: Sürdürülebilir aktivite bileşenlerin sayısı
$N_f(t_i)$	: Gözlemlenen hataların sayısı
Φ^{-1}	: Standart normal kümülatif dağılım fonksiyonunun tersi
$\tilde{T}(t_i)$	: Test üzerinde ölçekli toplam zaman
$S_n(t)$	: Hataya uğrayan örnekleme birimleri
λ_a	: Gerçek hata oranı
λ_g	: Jenerik esas hata oranı
K_E, K_D, K_O	: Kısmi olarak çevre, tasarım ve operasyon için düzeltme faktörleri
SS	: Anahtarlama aygıtı
Q	: Boolean eşitliği çıktısı
C_i	: Kesme kümesi
I^{FV}	: Fussell-Vesely önem ölçütü
I^{RRW}	: Risk küçültme değer önemi
I^{RAW}	: Risk kazanma değer önemi
$\bullet$	: Ana mantık diyagramında bağımlılık
C_r	: Hata şekilleri kritiklik sayısı
$dB(A)$	: Desibel
Hz	: Hertz – Ses frekansı
m/s^2	: İvme
g	: Yer çekimi ivmesi
HEP_{EA}	: Belirli bir hareketin ana kullanıcı (operatör) hatası olasılığı
PSF	: Performans şeklini veren faktörün sayısal değeri
W_i	: PSF'nin ağırlığı (sayısal sabit)
s	: Gemi hızı

ALT-ÜST İNDEKS

—	: Tümüleyen
n	: Örnekleme mevcudu
N	: Ana kütle mevcudu
^	: Tahmin değerleri
t	: Belirli bir zaman dilimi
T	: Toplam zaman
i	: i'inci terim
j	: j'inci terim
k	: k'inci terim
m	: m'inci terim
r	: r'inci terim
l	: Güvenilirlik alt sınırı
u	: Güvenilirlik üst sınırı
s	: Sistem

PETROL TANKERLERİNDE RİSK DEĞERLENDİRMESİ

ÖZET

Denizcilik sektöründe risk kavramı ve önemi günden güne artmaktadır. Eğer bir gemi işleticisi ticaretini daha verimli devam ettirmek istiyorsa, sadece emniyet, gemi ve şirket yönetimi ile ilgili riskleri değil aynı zamanda bunların etkileşimde bulunduğu limanlar, brokerler, Klas Kuruluşları, Bayrak Devleti ve Liman Devleti gibi taraflarla ilgili olan riskleri de göz önünde bulundurmalıdır. Bu sebepten dolayı denizcilik gibi riski yüksek olan endüstrilerde risk değerlendirme tekniklerinin kullanımı artmaktadır.

Risk değerlendirmesi, gemi yönetiminde tehlikeleri tanımlamak ve risklerin maliyet etkili durum içinde uygun seviyeye indirgenmesini temin etmek için yapısal zemin sağlar. Bu çalışmanın hedefi; denizcilikteki risklerin belirleyici faktörlerinin analizinin gerçekleştirilmesi ile denizde emniyeti arttırmaktır.

Bu çalışma, kullanıcıların/yöneticilerin uygun ve yeterli risk değerlendirmesini geliştiren teknikler yardımı ile nasıl gerçekleştirebileceklerini ve bu risklerin nasıl “Düşük Olduğu Kadar Makul Şekilde Uygulanabilir (ALARP)” olduğunu gösterir. Tanker gemilerinde, gemi üzerindeki operasyonlardaki risklerin değerlendirilmesi ve tahmini, ALARP prensibi yaklaşımıyla potansiyel risk azaltma önlemleri için öneriler, çalışmanın içeriğinde yer almaktadır.

Risk kavramı ve risk parametrelerinin anlamı çalışmanın ilk bölümünü oluşturmaktadır. Riskleri bulmanın ve anlamının bir çok farklı (sayısal olmayan, yarı sayısal ve sayısal) yolları vardır. Bu çalışmada sistem riskinin elde edilmesi için sayısal yaklaşım kullanılmış ve bu risklerin yönetim yolları gösterilmiştir. Sistem riskinin anlaşılmasında “güvenilirlik” ve “hata” kavramları ve bunlara ait hata ağacı, olay ağacı, mantık diyagramları ve tehlike analiz teknikleri gibi modeller sorgulanmıştır.

Çeşitli kurumlar deniz kazaları hakkında veri tabanı oluşturur ve düzenli istatistiksel güncellemeler yayınlarlar. Bu istatistiksel bilgiler, faktörlerin anlaşılmasında oldukça önemli rol oynar. Bundan dolayı risk kontrolü ve izlenmesi için temel istatistiksel bilgiler çalışmanın başlangıç bölümlerinde verilmiştir. Daha sonra en fazla kullanılan metotlar ve bunların gemi fonksiyonlarına uygulanması açıklanmıştır. Denizcilik sektöründe genel resmi görmek ve etkili denizcilik risk değerlendirmesine uygun yaklaşımları seçmek için sayısal örnekler verilmiştir.

IMO stratejisine uygun Düzenli Emniyet Değerlendirmesine (FSA) dayalı karar alma süreçlerine girdi sağlayan risk değerlendirmesinin sonuçları çalışmada tanımlanmıştır. Düzenli Emniyet Değerlendirmesi, ALARP yaklaşımı dahilinde fayda maliyet analizini ve risk kriterlerinin kullanımını içermektedir. FSA'yı takip eden bölümün konusu insan faktörüdür. Sistem güvenilirliğinin artırılmasında veya sistem hatasının azaltılmasında insan hatasının anlaşılması önemli olduğundan, tüm sistemlerde ortak anlayış olarak insan merkezli bir yapı sergilemektedir. İnsan

davranışlarını değerlendirme yöntemleri sınırlıdır ve emniyet yönetim sistemi bileşenlerinin tüm parametreleri arasında insanın modellenmesi oldukça güçtür. Bunun sonucu olarak denizcilikteki “insan faktörü” incelenmiş ve insanın, sistemin kontrolünde “eğitimin” önemine işaret edilmiştir.

Sonuç olarak, “Gemi Teknik İşletmeciliğinde Risk Değerlendirme Konusu” olarak da adlandırabileceğimiz bu çalışma; insan, donanım ve çevre faktörlerini tek tek ve birbirlerine olan etkileriyle beraber ele alarak, ortaya çıkabilecek riskleri tespit etme, ölçme, değerlendirme ve yönetmede ve ayrıca risk değerlendirmesi sonucunda elde edilen verilere göre, önleyici tedbirlerin zamana bağlı olarak, nasıl ve ne şekilde alınmasında yol gösterici olacaktır.

RISK ASSESSMENT ON TANKER SHIPS

SUMMARY

The importance of the risk concept in the maritime sector increases day by day. If a shipping company wants to continue its trading effectively, it should take not only risk on the ship, company and safety management but also the risks related to ports, brokers, classification societies, flag state and port state etc into consideration. That's why the use of risk assessment techniques in major hazardous industries such maritime industry has grown significantly.

Risk assessment provides a structured basis for managing of ships to identify hazards and to ensure risks have been reduced to appropriate levels in a cost-effective manner. The purpose of this study is to improve maritime safety by analysing of the factors determinants of maritime risk.

This study demonstrates how the wider range of techniques can help users/managers perform a suitable and sufficient risk assessment, and demonstrate that risks are As Low As Reasonably Practicable (ALARP). The subjects in this study are to estimate and assess the risk of operations on board Tankers and propose potential risk reducing measures in accordance with the ALARP principle.

In the earlier chapters, the meaning of the risk and risk parameters is researched. There are different ways for finding and understanding of risk; qualitative, semi quantitative and quantitative. In this study, the quantitative approaches are used for getting the system risk and then the study shows the way of managing these risks. Understanding of system risks, "reliability" and "failure" concept and their model, such as fault tree, event tree, logic diagrams and hazard analysis techniques, were investigated.

Several organizations maintain databases of maritime casualties and publish regular statistical updates. This statistical information is very important to understand the factor, that's why basic statistical knowledge was described in the beginning chapters for risk monitoring. After that the most frequent methods and their implementations for the functions of ship were explained. The quantitative examples were given for seeing the general picture of the maritime sector and to choose an approach to marine risk assessment that will be sufficient.

The risk assessment results can be used to provide input to a decision making process depend on Formal Safety Assessment (FSA) according to IMO strategy was described in the study. This includes the use of risk criteria and cost-benefit analysis within an ALARP approach. The subject following the FSA was the human factors. All systems are constructed around the human due to understanding of human errors are so important that to increase the system reliability or to decrease of the system faults. Evaluation methods of the human behaviours are restricted and it is very difficult to model it among all parameters of the components in the safety management system. As a result of that, the "human factors" on the maritime safety

were researched and points out the impact of the “training” on controlling of human, system.

Consequently, this study which is also identified as “Risk Assessment Subject in Ship Technical Management”, discusses the factors of man, machine and media both individually and from an aspect of their interrelated effects. So it facilitates to detect measure, assess and manage these risks. Furthermore, it can guide the users how to take the preventive measures timely concerning the results of the risk assessment.

1. GİRİŞ

1.1 GÜVENİLİRLİK TANIMLAMASI

Mühendislik sistemleri, gerçekleştirilen mekanizmalar, makineler hatta ekipmanlar kullanım ömürleri ile birlikte düşünüldüğünde hiçbir parçanın sıfır hatalı ve mükemmel olarak nitelendirilemezler. Güvenilir bir tasarım, operasyonun devamını sağlamalı ve kullanım sürecinde olası en az hata veya sapmalar ile sistemin amacını temin etmelidir. Bu yaklaşım, mühendislik sistemleri için deterministik (belirleyici) yaklaşım olarak kabul edilir. Güvenilir bir tasarımda mükemmele ulaşabilmek için; imalat, planlama, üretim ve operasyon konusunda teknolojik sınırlar olmadığı kabul edilse bile; malzeme uygunluğu iyileştirme, test, kontrol ve gerçekleştirilecek mühendislik analizlerinin maliyetleri bir sistem için belirlenen finansmanı ekonomik, dolayısıyla rekabetçi olmaktan uzaklaştıracaktır. Bu nedenle, pratikte ekonomik sınırlamalar nedeniyle yapılan optimizasyon ve rekabetçiliğin getirdiği şartlar, mükemmel olmayan tasarımların kullanımını zorlamaktadır ki, tasarımcılar, üreticiler ve kullanıcılar hataların meydana gelmesini ve tekrarlamasını en aza indirmeye çalışmaktadırlar. Hataların en aza indirgenmesinde tasarımcının bilmesi gereken en önemli unsur, hataların “neden” ve “nasıl” meydana geldiğidir.

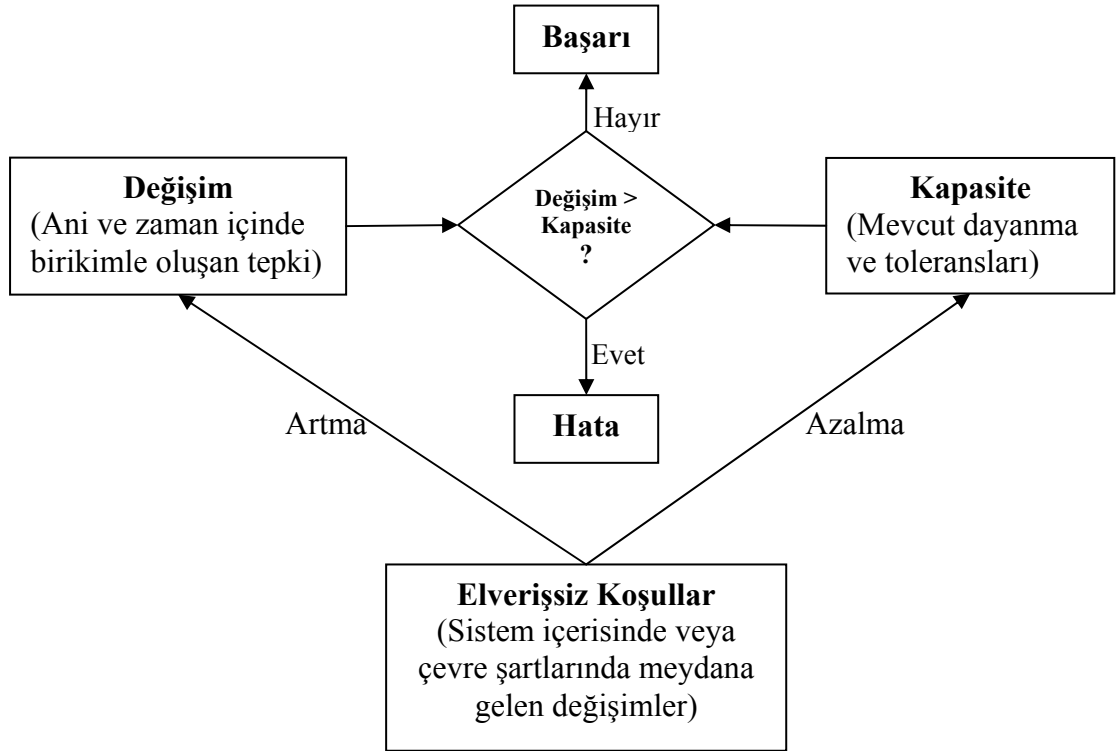
Hatanın fiziksel anlamı, hatanın önlenmesi ve neden, nasıl ilişkisi olduğunun anlaşılmasını zorunlu kılar. Hata mekanizması, hatayı oluşturan bileşenler ve etkileri anlamındadır. Bu mekanizma bilinmedikçe hataların azaltılması olanaksızdır. Hata mekanizmasının bilinmesi ve bunun tasarım, üretim ve operasyon üzerinde kullanılması ile en aşağı indirgenme süreci “Belirleyici Güvenilirlik Analiz” olarak tanımlanır.

Bir tasarımda potansiyel tüm hatalar genellikle bilinmemekte veya iyi anlaşılmamaktadır. Hataların tahmin edilmesi olasılık problemi ile ilgilidir. Bu sebeple güvenilirlik analizi bir olasılık metodudur. Belirleyici Güvenilirlik Analizi’nde sıklıkla kullanılan hata modelleri aşağıda özetlenmiştir.

1.2 HATA MODELLERİ

Hata, bir sistem veya bileşenlerin özünde beklenmeyen değişimlerin varolmasının sonucudur. Sistem veya bileşenleri bu değişimlere karşı özgün bir kapasiteye sahiptir ve bu kapasite sistem veya bileşen içerisinde veya çevre şartlarındaki değişimler ile azaltılabilir. Değişimler sistem kapasitesini aştığı zaman hata meydana gelir.

Muhtelif modeller, kapasite ve değişimler için değişik tanımlar ve ölçüm mekanizmaları kullanmaktadır. “Elverişsiz Şartlar” yapay veya doğal, dahili veya harici olarak meydana gelebilir ve sistemdeki değişimleri azaltabilir veya arttırabilir veya değişimlere özgün var olan kapasiteyi azaltabilir. Şekil 1.1’de bir hata modeli taslağı oluşturulmasındaki bileşenler gösterilmektedir.



Şekil 1.1: Hata Modeli

Gerilim-Potansiyel Modeli; bir sistem veya bileşeninde oluşan değişimin (gerilim), sistem veya bileşenin kapasitesini (potansiyel) aştığında hata oluşmasına neden olur. Burada kullanılan gerilim terminolojisi, değişimlerin ve çevresel şartlarda meydana gelen olumsuzlukların toplamını temsil eder. Bu hata modelinde çoğunlukla yapılan kabul, zaman bağımlılığından daha çok çevresel şartlara veya

kritik olaylara bağımlılıktır. Potansiyel kendisine tepki verecek tüm şartların etkisini temsil eden bir değişken olarak davranır.

Hasar-Dayanma Modeli; mühendislik sistemi operasyonunda olumsuz değişimler ve çevresel şartların getirdiği olumsuz etkilerin, kümülatif hasarını belirler. Kümülatif hasar performansı azaltılabılır, ancak kümülatif hasar dayanmayı aştığında, hataya neden olur. Bir sistemdeki bileşenin kapasitesi o bileşenin hasara dayanma toleransı ile ölçülür. Dayanma genelde rasgele değişken olarak davranmaktadır. Buradaki en önemli etkenler sistem bileşenlerinin meydana getirdiği olumsuzluklar ve çevre şartlarının bunlar üzerinde meydana getirdiği olumsuzluklardır. Bu sebeple kümülatif hasar üzerinde odaklanma gereği ortaya çıkar.

Etki-Tepki Modeli; bu model Şekil 1.1’de gösterilen taslağı andırmaktadır. Sistemin bir bileşeni hataya sahip olabilir, fakat bileşenin etkisi sistemde bir hasar meydana getirmeyebilir. En geçerli örnek bir arabanın acil fren sistemidir, bir çok bilgisayar program hatası da bu tiptedir.

Tolerans-Gereksinim Modeli; bir sistem performans karakteristiği sadece ve sadece kabul edilebilir tolerans limitleri dahilinde başarılıdır. Bir fotokopi makinesi veya performans kalitesi kabul edilmeyen kullanıcı kararlarında, sonuçların dereceli indirmesinde kullanılan bir ölçüm aracı, bu modele örnektir.

1.3 PERFORMANS ÖLÇÜMLERİ

Bir bileşenin performansı dört temel karakteristik ile açıklanmaktadır.

- ✓ Kapasite: bir sistemin veya bileşenin fonksiyonel gerekleri sağlayabilme yeteneğidir.
- ✓ Verim: bir sistemin veya bileşenin etkili ve kolayca hedefleri gerçekleştirebilme yeteneğidir.
- ✓ Güvenilirlik: bir sistemin veya bileşenin işleve başlama ve devam edebilme (fonksiyonlarını sürdürebilme) yeteneğidir.
- ✓ Elde edilebilme: bir sistemin veya bileşenin bir hata sonrasında en kısa sürede işlevine geri dönebilme yeteneğidir.

İlk iki ölçümün tasarım, inşaa, imalat veya üretimden etkilendiği açıktır. Kapasite ve verim, bir sistemin veya bileşenin tasarım düzeyini yansıtmaktadır. Diğer taraftan güvenilirlik operasyonla ilgili bir kavram olup, sistemin veya bileşenin işlevde

kalış potansiyelince etkilenmektedir. Bu tanımlara göre bir sistemin veya bileşeninin yüksek güvenilirliği olması onun tek başına yüksek performansa sahip olduğunu göstermez. Performansta etkili bileşen insan; birimin tasarım süreçleri, inşaa veya imalat, operasyon, düzenli bakım ve tutumda büyük rol oynar. Bahsedilen bu önemli roller performans ölçüm değerinde anlam kazanır. İnsan faktörü değişik programlar ve aktiviteler ile belirlenmektedir ki, bu durum da kalite ve yönetim kavramları üzerinde yoğunlaşmak demektir.

Tüm faktörleri yüksek performanslı ürün geliştirme için geniş perspektifte bir çatı altında toplayan yaklaşıma “Baklava Ağaç” denir. Yapıya yukarıdan aşağıya doğru baktığımızda, bir kısmı değişik hedefleri ve alt hedefleri nasıl elde edeceğimizi tanımlar ve bir kısmı da niçin bir hedef veya görev gerekliliğini saptar. Bu şekilde güvenilirlik ve elde edilebilme anahtar roller oynamaktadır [1].

Özetle, güvenilirlik bir sistemin veya bileşenlerinin performansı ve ömür çevrim maliyeti ve ekonomisine direkt ve anlamlı etkiye sahip olduğundan beri, yüksek performans elde edilmesi konusunda en önemli etkidir. Düşük güvenilirlik direkt olarak garanti maliyetlerinin, sorumlulukların, bakım ve onarım masraflarının artmasına neden olur ve düşük kalite de zayıf performans eğilimi yaratır.

1.4 GÜVENİLİRLİK TANIMI

Güvenilirlik; bir sistemin veya bileşenin, belirlenen şartlar altında ve belirli bir zaman sürecinde, istenilen fonksiyonları yerine getirebilme kabiliyetidir. Güvenirlik terimi, aynı zamanda başarı ihtimalini veya başarı oranını gösteren güvenilirlik özelliği olarak da kullanılır ve aşağıdaki gibi tarif edilir.

$$R(t) = \Pr(T \geq t \mid c_1, c_2, \dots, c_n) \quad (1.1)$$

t : Belirli bir zaman dilimi veya çevrim

T : Hata zamanı veya birim hata çevrimi

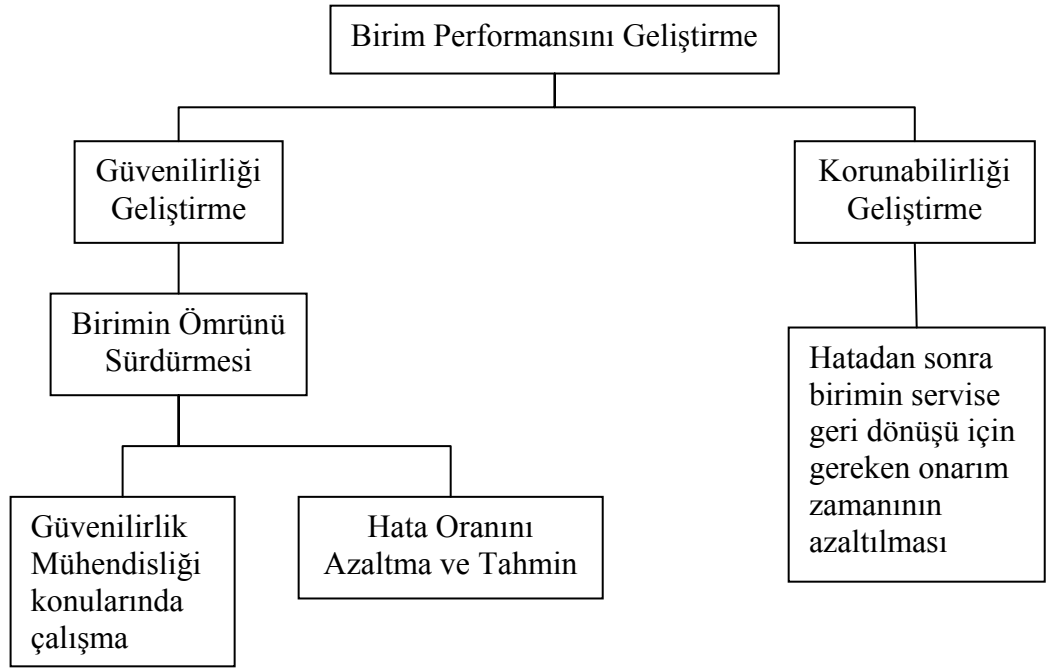
$R(t)$: Bir sistemin veya bileşenlerinin güvenirliliği

$c_1, c_2, \dots, c_n$: Belirlenen çalışma şartları, çevresel koşullara ait parametrelerdir, pratikte bunlar dolaylı olarak düşünülmektedir ve formül şöyle indirgenebilir;

$$R(t) = \Pr(T \geq t) \quad (1.2)$$

1.5 OLABİLİRLİK TANIMI

Olabilirlik (elde edilebilme) analizi bir sistemin veya bileşenin (bundan sonra birim tanımıyla kullanılacaktır) operasyonu için yeterli olasılığa sahip olduğunu doğrulamak için yapılmaktadır ve böylece planlanan hedef gerçekleştirilebilir. Şekil 1.2, bir birimin olabilirliğini, birimin güvenilirliği ve korunabilirliğinin birleşimi olarak göstermektedir. Şekil 1.2’den de görüleceği üzere korunabilirlik olmadığında, güvenilirlik elde edilebilme olarak düşünülebilir.



Şekil 1.2: Performans Gelişimi için Kavramsal Hiyerarşi

Olabilirliğin matematiksel tanımı, birimin operasyon durumundaki zamanının toplam zamana oranıdır. Olabilirliğin birçok ölçümü vardır; öz elde edilebilme, kazanılan elde edilebilme ve işlemsel elde edilebilme, temel kavramlar olarak tanımlanabilir.

Bir birimin, T zaman aralığında ortalama olabilirliği şöyle açıklanabilir;

$$A = u / (u + d) \quad (1.3)$$

u: T zamanı dahilindeki hizmet süresi

d: T zamanı dahilindeki aksaklık süresi

T: u + d

1.6 RİSK TANIMI

Bir tehlike kaynağı olduğu zaman ve tehlikeye maruz kalmaya karşı koruyucu hiçbir şey olmadığında, burada zarar veya kayıp olasılığı vardır. Bu olasılık riski tanımlar. Genel anlamda risk bir olayın beklenenden farklı olarak gerçekleşebilme olanağıdır. Bu çerçevede olabilecek sonuçların sayısı artması ile riskinde artması anlamına gelir. Risk mevcut ise bir olayın sonucu tam olarak tahmin edilemez.

Risk sayısal ve sayısal olmayan şekilde gözlemlenebilir. Sayısal olmayan risk analizinde, bir tehlikenin sonucunun ve olasılığının değerlendirilmesinde ve tanımlanmasında uzman görüşlerinden faydalanılır. Sayısal yaklaşım ise istatistiksel verilere ve metotlara dayanmaktadır.

Risk analizi üç soruya yanıt arar;

- ✓ Tehlikenin ortaya çıkması için “ne” yanlış gitmeli?
- ✓ Bunun olmasına ne kadar yakınız?
- ✓ Eğer meydana gelirse, beklenen sonuçlar nelerdir?

Birinci sorunun yanıtı için öncelikle oluşabilecek tehlikeler tanımlanmalıdır. İkinci soru için bu senaryoların olabilirlikleri tahmin edilmelidir ve son soru için de her senaryo için sonuçlar tanımlanmalıdır. Bundan dolayı risk şöyle tanımlanır;

$$Risk = \langle S_i, Pr_i, C'_i \rangle \quad i: 1, 2, 3, \dots, n \quad (1.4)$$

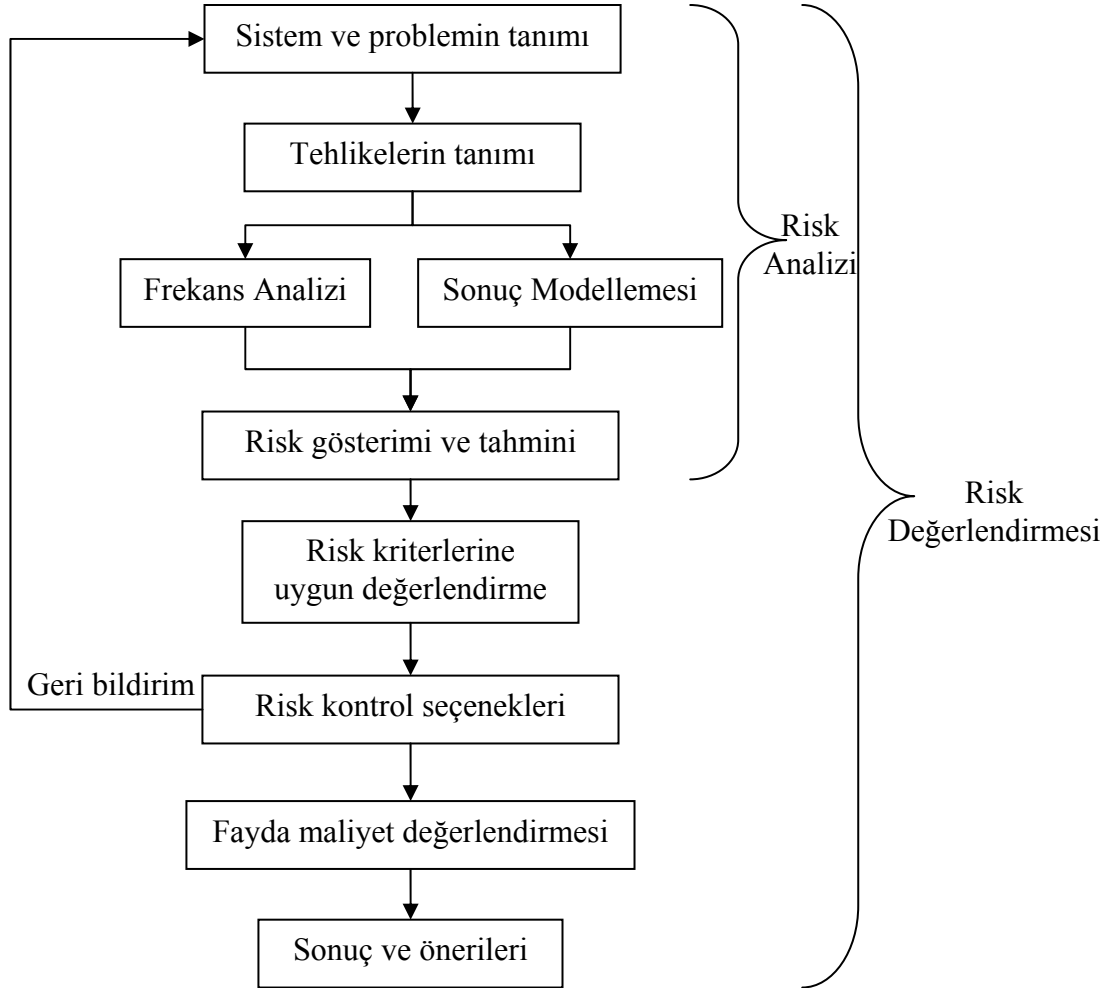
S_i : Tehlikeye maruz kalmaya götüren bir olay senaryosu

Pr_i : i senaryosunun olabilirliği

C'_i : i senaryosunun sonucu veya değerlendirme ölçüsü

Her hangi bir tehlike için, bu tehlikenin meydana gelme olasılığı yüksek ve oluştuğunda sonuçları yüksek ise bu tehlike için risk yüksektir ve sistemin emniyeti için kabul edilemezdir. Diğer taraftan olabilirliğin ve sonucun düşük olması riski azaltmaktadır ve bu da emniyet sistemleri içerisinde kabul edilebilir. Bu amaca uygun olarak emniyetin artırılması için riskin azaltılması gerekir ve riskin azaltılması; meydana gelme olasılığının ve sonuçların şiddetinin veya her ikisinin birlikte azaltılması ile gerçekleşir.

Risk analizi, tanımlanan tehlikeler için riskin hesaplanma sürecidir. Risk değerlendirmesi ise riski azaltma yolunda bir sistemin emniyetini geliştirmek için risk analizinden elde edilen sonuçların kullanıldığı süreçtir. Şekil 1.3 risk analizi ve risk değerlendirmesi süreçlerini göstermektedir.



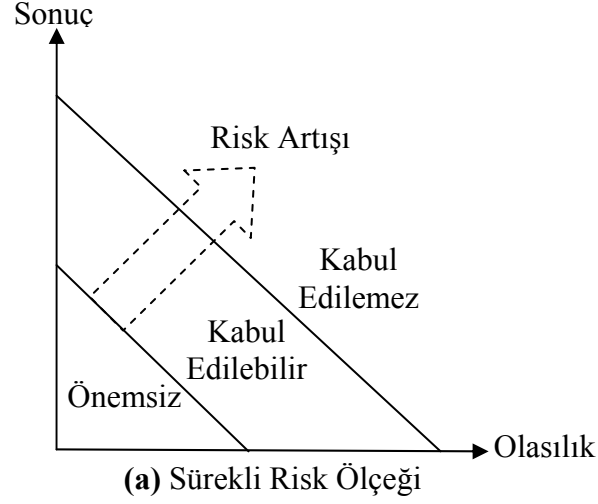
Şekil 1.3: Risk Analizi ve Risk Değerlendirme Süreci

Buna göre; risk analizi ve risk değerlendirmesinin ilk adımı sistemin ve problemin tanımını yapmaktır. İkinci olarak, sonucu her hangi bir şiddet oluşturabilecek olası olayları ve şartları içeren tehlikeler tanımlanır. Tehlikeler tanımlandıktan sonra risk analizine geçilir ve riskin sayısal veya sayısal olmayan hesaplanması (tahmini) yapılır. Tablo 1.1’de risk analizinde kullanılan farklı metotlar gösterilmektedir. Frekans analizinde tehlikelerin meydana gelme olasılıkları hesaplanır. Buna paralel olarak bu tehlikenin gerçekten oluşması halinde bunun etki ve sonuçları için sonuç modelleri değerlendirilir. Bu hesaplamalar sonucunda sistem için elde edilen risk neticesi değerlendirilir.

Tablo 1.1. Risk Analizi Metotları [2]

Metot	Kapsam	Analiz Çeşidi
Emniyet/Yeniden Denetleme	Bir ölüm/yaralanma veya mala hasar veya çevreye etki yaratma eğilimindeki ekipman koşullarını veya işletimsel prosedürlerini tespit etmek.	Sayısal olmayan
Kontrol Listeleri	Organizasyonların standart uygulamaları yerine getirdiğinden emin olmak.	Sayısal olmayan
“Eğer-Ne” Analizi	Sonuçları istenilmeyen neticeler oluşturabilen tehlikeleri, tehlikeli durumları veya özel kazaları tespit etmek.	Sayısal olmayan
Tehlike ve İşletilebilme Çalışması	Sistem sapmalarını ve istenmeyen sonuçlara eğilimde olan nedenlerini tespit etmek, sapma sonuçlarını ve/veya frekansını azaltmak için tavsiye edici hareketleri belirlemek.	Sayısal olmayan
Olasılıklı Risk Analizi (PRA)	Nükleer Mühendisler Birliğince geliştirilen riskin sayısal hesaplanma metodudur. Diğer risk analiz metotları ile birlikte kapsamı genişletilir.	Sayısal
Öncelikli Tehlike Analizi (PrHA)	Bir sistem ömründe istenmeyen sonuçlar yaratma eğiliminde olan tehlikelere öncelik tanımak ve tespit etmek. Öncelik tanınan tehlikelerin sonuçlarını ve/veya frekansını azaltmak için tavsiye edici hareketleri belirlemek.	Sayısal olmayan
Hata Şekilleri ve Etki Analizi (FMEA)	Bileşen hata şekillerini ve bunların sistem ve bileşen çevresindeki etkilerini tespit etmek.	Sayısal
Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik Analizi (FMECA)	Bileşen hata şekillerini ve bunların sistem ve bileşen çevresindeki etkilerini tespit etmek.	Sayısal
Hata Ağacı Analizi (FTA)	Sonucu kaza oluşturan, insan ve ekipman hatalarının bileşimlerini tespit etmek.	Sayısal olmayan Sayısal
Olay Ağacı Analizi (ETA)	Tüm hata ve başarıları ile birlikte kaza oluşturma eğilimindeki değişik olay serilerini tespit etmek.	Sayısal

Sistem riskinin değerlendirilmesi üç kategoride yapılır; “önemsiz”, “kabul edilir” ve “kabul edilemez”. Elde edilen sistem riskinin, sürekli risk ölçeği ve sürekli olmayan risk ölçeği ile gösterimi şekil 1.4’te verilmektedir.

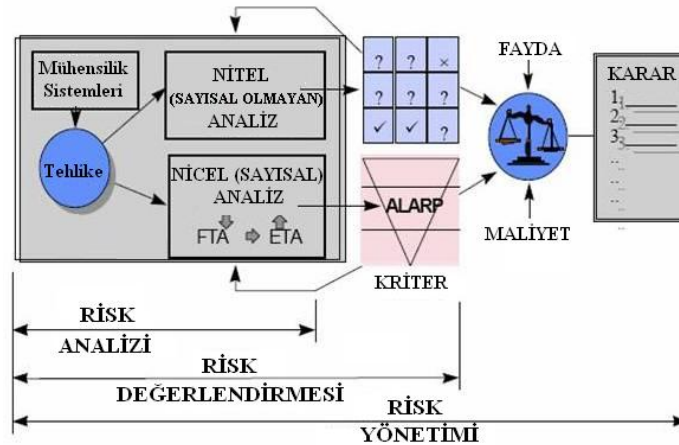


Sonuç	Felaketli	T	T	I	I	I
	Kritik	N	T	T	I	I
	Önemli	N	N	T	T	I
	Önemi az	N	N	N	T	T
I : Kabul Edilemez		Olası değil	Seyrek	Ara sıra	Muhtemel	Sık sık
T : Kabul Edilebilir		Olasılık				
N : Önemsiz						

(b) Sürekli Olmayan Risk Ölçeği

Şekil 1.4: Sürekli ve Sürekli Olmayan Risk Ölçekleri

Sistem riskinin kabul edilemez olduğu durumlar da kabul edilebilirliğin sağlanması için uygun kontrol önlemlerinin alınması gerekmektedir. Uygulanması düşünülen önlemlerin değerlendirilmesi için fayda maliyet analizleri yapılır. Sistem için optimum faydayı sağlayacak durum tespit edildikten sonra geri dönüş yapılarak, sistemin bu hali için kabul edilebilir sınırlar dahilinde olduğundan emin olunur. Bu ve benzer şekilde risklerin kontrol altına alındığı (idare edildiği) süreç “risk yönetimi” denilir. Şekil 1.5’de risk yönetimi ve bileşenleri özetlenmektedir.



Şekil 1.5: Risk Yönetimi

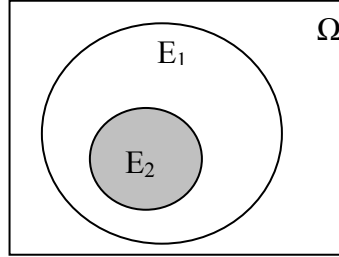
2. TEMEL GÜVENİLİRLİK MATEMATİĞİ

2.1 OLASILIĞIN TEMEL KAVRAMLARI

Olasılık, hem günlük hayatta hem de değişik bilim dallarında çok sık kullanılır. Bugün olasılığın ekonomi, temel bilimler, milli savunma, meteoroloji ve denizcilikte geniş uygulama alanları vardır.

2.1.1 Kümeler ve Boolean Matematiği

Birlikte ele alınan belirli nesneler topluluğuna küme, kümenin içerdiği nesnelere de öge veya üye denir. İlgili tüm birimleri içeren kümelere evrensel küme denir ve Ω ile gösterilir. Bir evrensel küme içinde her bir toplanmış birimler alt kümeleri oluşturur. Eğer E kümesinin her elemanı Ω 'nın da üyesi ise; E, Ω 'nin bir alt kümesidir veya Ω kümesi E kümesini içermektedir. $E \subset \Omega$ veya $E \in \Omega$ şeklinde gösterilir. Kümeler arası ilişki Venn Diyagramı ile gösterilmektedir. Şekil 2.1 E_1 , E_2 ve Ω kümelerini gösterir.



Şekil 2.1: Venn Diyagramı

Bir E olayının dışında kalan olayların kümesine E'nin tümleyeni denir ve $\bar{E}$ ile gösterilir.

$E_1 \cup E_2$ veya $E_1 + E_2$ ile gösterilen E_1 ve E_2 kümelerinin birleşimi E_1 'e ya da E_2 'ye bağlı elemanların kümesidir, " E_1 veya E_2 " şeklinde söylenir.

$E_1 \cap E_2$ veya $E_1.E_2$ ile gösterilen E_1 ve E_2 kümelerinin kesişimi E_1 ve E_2 kümelerinin her ikisine de bağlı elemanların kümesidir, " E_1 ve E_2 " şeklinde söylenir.

Hiç bir elemanı olmayan kümeye boş küme denir ve $\emptyset$ ile gösterilir. Evrensel kümenin tümleyeni boş kümedir, $\overline{\Omega} = \emptyset$ ve ya tersi durumunda $\Omega = \overline{\emptyset}$.

Eğer $E_1 \cap E_2 = \emptyset$ ise, yani E_1 ve E_2 'nin ortak elemanı yoksa; E_1 ve E_2 'ye ayrık kümeler denir.

Tablo 2.1. Kümeler Cebri Kuralları

$X \cap Y = Y \cap X$ $X \cup Y = Y \cup X$	Yer Değiştirme Özelliği
$X \cap (Y \cap Z) = (X \cap Y) \cap Z$ $X \cup (Y \cup Z) = (X \cup Y) \cup Z$	Birleşme Özelliği
$X \cap (Y \cup Z) = (X \cap Y) \cup (X \cap Z)$	Dağılma Özelliği
$X \cap X = X$ $X \cup X = X$	Özdeşlik Kuralı
$X \cap (X \cup Y) = X$ $X \cup (X \cap Y) = X$	Yutan Eleman Özelliği
$X \cap \overline{X} = \emptyset$ $X \cup \overline{X} = \Omega$ $\overline{\overline{X}} = X$	Tümleme Kuralı
$\overline{(X \cap Y)} = \overline{X} \cup \overline{Y}$ $\overline{(X \cup Y)} = \overline{X} \cap \overline{Y}$	De Morgan Kuralı

2.1.2 Olasılık Kuralları

Gözlenebilen somut sonuçların ortaya çıktığı iyi tanımlanmış bir sürece “deney” denir. Bir deneyin bütün sonuçlarının kümesine Örneklem Uzayı (S) denir. Özel bir sonuca yani S’deki bir öğeye “Örneklem Noktası” denir. Olasılık kuramında bu örneklem noktalarının birleşimine “Olay” (E) denir ve örneklem uzayının herhangi bir alt kümesidir.

Örneklem uzayındaki herhangi bir E olayının olasılığı $[\Pr(E)]$;

$$\Pr(E) = [E\text{'nin eleman sayısı}] / [S\text{'nin eleman sayısı}] \quad (2.1)$$

$$\Pr(E) = m(E) / m(S) \quad (2.2)$$

olarak tanımlanır. Bu tanımda, her sonucun ortaya çıkması şansının aynı olduğu kabul edilmektedir. Tanıma göre $Pr(S) = 1$ 'dir. Ayrıca, $E = \emptyset$ için $Pr(\emptyset) = 0$ 'dır. Bir olayın olasılığı en az sıfır, en çok bir olabilir ve olasılık negatif veya birden büyük olamaz.

$$0 \leq Pr(E) \leq 1 \quad (2.3)$$

Olasılık kavramı aşağıdaki gibi farklı açılardan tanımlamaktadır.

✓ Klasik Olasılık Tanımı; (2.2)'de gösterilen denklem olasılığın klasik tanımıdır. Bir olayın ortaya çıkış sayısı toplam haller sayısına bölündüğü zaman elde edeceğimiz oran, E olayının olasılığıdır. $m(S) = N$, toplam mümkün haller, $m(E) = n$, elverişli haller, E olayının meydana gelme miktarı ise $Pr(E) = n / N$ dir. Fakat bu tanım mühendislik uygulamalarında yetersiz kalmaktadır.

✓ Olasılığın Nisbi Frekans Olarak Belirlenmesi; çok defa tekrarlanan bir deneyle elde edilen sonuçlardan elverişli olanların sayısının, bütün deneyler sayısına oranıdır. Deney sayısı sonsuza yaklaştıkça bu oranda belirli bir limite yaklaşır, bu limite de “ bu deneyden elverişli bir sonuç elde etme olasılığı” adı verilir. Herhangi bir olay için, elverişli hallerin bütün mümkün haller sayısına oranına, “Olasılık Nisbi Frekansın Limit Değeridir” denilir.

$$Pr(E) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{N} \right) \quad (2.4)$$

✓ Sübjektif Yaklaşım; tekrarlanması mümkün olmayan veya sadece bir defa ortaya çıkabilen olayların olasılıklarını konu alan sübjektif yaklaşım bazı olay olasılıklarının, örneğin işletme alanında verilecek kararların başarı olasılıklarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Diğer yaklaşımların başarılı olmadığı hallerde, örneğin bir oylamanın sonucu veya ilk defa gerçekleştirilen bir uzay denemesinin başarısı ile ilgili tahminlerde sübjektif olasılığa başvurulmaktadır.

Bir olay yalnız bir elemandan (sonuçtan) oluşuyorsa buna “basit olay” denir. İki veya daha çok olayın birlikte veya birbiri ardınca meydana gelmesine “bileşik olay” adı verilir. Bileşik bir olayın meydana çıkma ihtimali o olayı meydana getiren basit olayların olasılıkları toplamına eşittir.

$$Pr(E) = Pr(E_1) + Pr(E_2) + \dots + Pr(E_n) \quad (2.5)$$

Bileşik olayın gerçekleşme olasılığı şu şekilde gösterilir; $\Pr (E_1 \cap E_2)$.

Olaylardan birinin sonucu diğerini etkilemiyorsa bu olaylara “bağımsız olaylar” denir. Herhangi bir olayın gerçekleştirme şekli, diğer bir olayın sonucuna göre değişebiliyorsa böyle iki olaya “bağımlı olaylar” adı verilir.

Bir bileşik olayı oluşturan olayların her biri birbirinden bağımsız iseler, bu olayların birlikte gerçekleşme olasılığı şöyle hesaplanır.

$$\Pr (E_1 \cap E_2 \dots \cap E_n) = \Pr (E_1) \cdot \Pr (E_2) \dots \Pr (E_n) = \prod_{i=1}^n \Pr (E_i) \quad (2.6)$$

Bağımlı olaylardan birinin önceden gerçekleşmiş olduğu bilindiğine göre, diğerinin ona bağlı olarak meydana gelme ihtimaline “şartlı (koşullu) olasılık” denir. Şartlı olasılık $\Pr (E_2 | E_1)$ şeklinde ifade edilir. E_1 ve E_2 bağımlı olaylarından E_2 , E_1 ’den sonra meydana geliyorsa, bu olayların her ikisinin de gerçekleşme olasılığı şu şekilde hesaplanır;

$$\Pr (E_1 \cap E_2) = \Pr (E_1) \cdot \Pr (E_2 | E_1) \quad (2.7)$$

n tane bağımlı olay için şartlı olasılık hesabı ise şöyledir;

$$\Pr(E_1 \cap E_2 \dots \cap E_n) = \Pr(E_1) \cdot \Pr(E_2 | E_1) \cdot \Pr(E_3 | E_1 \cap E_2) \dots \Pr(E_n | E_1 \cap E_2 \dots \cap E_{n-1}) \quad (2.8)$$

Eğer E_1 ve E_2 olayları birbirinden bağımsız ise, E_1 olayının şartlı olasılığı, bir diğerine bağlı olmadığından kendi olasılığına eşit olacaktır.

$$\Pr (E_1 | E_2) = \Pr (E_1) \quad (2.9)$$

Karşılıklı olarak birinin meydana gelmesi diğerininkini önleyen olaylara “birbirini engelleyen olaylar” denir ve bu olaylardan herhangi birinin (E_1 veya E_2 ’nin) gerçekleşme ihtimali, bu olayların ayrı ayrı meydana gelme olasılıkları toplamına eşittir.

$$\Pr (E_1 \cup E_2) = \Pr (E_1) + \Pr (E_2) \quad (2.10)$$

$$\Pr (E_1 \cup E_2 \dots \cup E_n) = \Pr (E_1) + \Pr (E_2) \dots + \Pr (E_n) \quad (2.11)$$

Denklem (2.11)’e “Ender (Seyrek) Olay Yaklaşımı” denilir ve tüm $\Pr(E_i)$ ’lerin küçük olduğu zaman [örneğin $\Pr (E_i) < (50n)^{-1}$] tercih edilir [3].

E_1 ve E_2 bağımlı olayları birbirlerini engelleyen türden olmadıklarında, E_1 veya E_2 'nin gerçekleşmesi ihtimali, ayrı ayrı meydana gelme olasılıkları toplamından, birlikte meydana gelme olasılıklarının çıkartılması ile elde edilir.

$$\Pr (E_1 \cup E_2) = \Pr (E_1) + \Pr (E_2) - \Pr (E_1 \cap E_2) \quad (2.12)$$

$$\Pr (E_1 \cup E_2) = \Pr (E_1) + \Pr (E_2) - \Pr (E_1) \cdot \Pr (E_2 \mid E_1) \quad (2.13)$$

Eğer E_1 ve E_2 olayları birbirini engellemeyen ve ayrıca birbirinden bağımsız olaylar ise E_1 veya E_2 olayının gerçekleşme olasılığı denklem (2.6) ve (2.12)'den yararlanılarak şöyle hesaplanır;

$$\Pr (E_1 \cup E_2) = \Pr (E_1) + \Pr (E_2) - \Pr (E_1) \cdot \Pr (E_2) \quad (2.14)$$

(2.14) denklemini daha da basitleştirirsek;

$$\Pr (E_1 \cup E_2) = 1 - [1 - \Pr (E_1)] \cdot [1 - \Pr (E_2)] \quad (2.15)$$

Eğer bu denklemi n tane bağımsız değişkene uygularsak,

$$\Pr (E_1 \cup E_2 \dots \cup E_n) = 1 - [1 - \Pr (E_1)] \cdot [1 - \Pr (E_2)] \dots [1 - \Pr (E_n)] \quad (2.16)$$

✓ Bayes Kuralı

Şartlı olasılıkların hesaplanmasında kullanılan bir tekniktir. Kuralın amacı bir olayın ortaya çıkmasında birden fazla bağımsız sebebin etkili olması halinde bu sebeplerden herhangi birinin, o olayı yaratmış olması olasılığını hesaplayabilmektir.

$\Pr (A)$ ile bir olayı etkileyen olayın olasılığı, $\Pr (E)$ ile de sonuç olarak ortaya çıkan olayın olasılığı gösterildiğinde (2.7) denklem yardımı ile şu şekli alır;

$$\Pr (A \cap E) = \Pr (A) \cdot \Pr (E \mid A), \quad \Pr (A \cap E) = \Pr (E) \cdot \Pr (A \mid E)$$

$\Pr (A) \cdot \Pr (E \mid A) = \Pr (E) \cdot \Pr (A \mid E)$ bu denklemden $\Pr (A \mid E)$ 'yi bulunmasını sağlayan denkleme “Bayes Kuralı” denir.

$$\Pr (A \mid E) = \Pr (A) \cdot \Pr (E \mid A) / \Pr (E) \quad (2.17)$$

Eğer E 'yi etkileyen n sayıda birbirini engelleyen olayın veya sebebin ($A_1, A_2 \dots A_n$) bulunduğunu varsayarak Bayes kuralına göre E olayının A_j sebebinden kaynaklanmış olması olasılığı;

$$\Pr (A_j | E) = \Pr (A_j) \cdot \Pr (E | A_j) / \sum_{i=1}^n \Pr (A_i) \cdot \Pr (E | A_i) \quad (2.18)$$

Formülde $\Pr (A_i)$ 'ler “apriori olasılık” veya “matematiksel olasılık”, $\Pr (E | A_i)$ 'ler ise “aposteriori olasılık” olarak tanımlanmaktadır. Denklemin tümüyle sağ tarafı “nisbi olabilirlik” veya kesin gözlemler üzerinde apriori olasılığın etkisini değiştiren faktör olarak isimlendirilmektedir.

2.2 OLASILIK DAĞILIMLARI

Olasılık dağılımlarının tanımlanmasında ana kavram rasgele değişkenlerdir. Rasgele değişken kavramı açıklandıktan sonra güvenilirlik analizinde yer alan olasılık dağılımları anlaşılabilecektir.

2.2.1 Rasgele Değişkenler

X değişkeni $x_1, x_2, \dots, x_n$ gerçek değerlerini sırasıyla $p_1, p_2, \dots, p_n$ olasılıkları ile alıyorsa X'e “rasgele değişken” adı verilir. Bir rasgele değişkenin alacağı değerlerden her birine karşılık gelen olasılıkların oluşturacağı topluluk ise o rasgele değişkenin olasılık dağılımını verir, olasılık fonksiyonu da aynı anlamda kullanılır.

Rasgele değişkenler süreklilik kriterine göre ikiye ayrılırlar; süreksiz rasgele değişkenler ve sürekli rasgele değişkenler.

2.2.2 Süreksiz Rasgele Değişkenlerin Olasılık Dağılımları

Süreksiz rasgele değişkenimiz X ve olasılık dağılımı $\Pr (x_i)$ ile gösterildiğinde x_i , rasgele X değişkeninin bir değeridir. Rasgele X değişkeni örnekleme uzayında (S) sayılabilir değerlerden oluşursa, $S = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ k değerinin sonlu veya sonsuz değerleri için, elde edilecek dağılıma “süreksiz olasılık dağılımı” veya “süreksiz olasılık fonksiyonu” denir.

Herhangi bir fonksiyonun süreksiz bir X rasgele değişkeni için olasılık fonksiyonu olabilmesi şu şarta bağlıdır;

$$\Pr (x_i) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad \text{ve} \quad \sum_{i=1}^n \Pr(x_i) = 1 \quad (2.19)$$

Rasgele X değişkeninin sayılabilir her değerinin olasılığı sıfır veya sıfırdan büyük olmalı ve tüm olasılık değerleri toplamı bire eşit olmalıdır.

2.2.2.1 Süreksiz Uniform Dağılım

Bir deneyin tüm olası k sonuçlarının eşit olduğu varsayılır. Buna göre örnekleme uzayında, $S = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$, (2.20) denklemi yazılabilir.

$$\Pr(x_i) = p = 1/k, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (2.20)$$

2.2.2.2 Binom Dağılımı

İki seçenekli sonuçlara sahip ve olasılıkları bir deneyden diğerine değişmeyen deneylerin, Bernoulli deneyleri, incelenmesinde kullanılır [4]. Bir deneyin bir defa istenilen sonucu verme olasılığı p ise istenmeyen sonucu verme olasılığı $q=(1-p)$ 'dir. Bu deneyin n defa tekrarlanması haline X defa istenilen sonucu vermesi binom dağılımı ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Pr(x) = \binom{n}{x} \cdot p^x (1-p)^{n-x}, \quad x = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2.21)$$

Bu formül bir olasılık fonksiyonu için gerekli şartlara sahiptir. Çünkü olasılıklar negatif olmadığı gibi, ayrıca aşağıdaki şartı da yerine getirmektedir.

$$\sum_{x=0}^n \binom{n}{x} \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x} = 1 \quad (2.22)$$

✓ Binom dağılımının özellikleri

- o Verilen bir olayla ilgili deney sayısı n gibi sonlu bir rakama varmaktadır.
- o Yapılan her deneyden sonra p ve q olasılıklarında herhangi bir değişiklik meydana gelmemektedir.
- o Deneyler birbirinden bağımsız olacak şekilde yapılmaktadır.
- o Binom dağılımının şekli p ve q değerlerine bağlıdır, n değeri ne olursa olsun $p = q$ olduğu zaman dağılım simetriktir. Ancak $p \neq q$ olsa bile, eğer p ve q değerleri sabit tutulup n arttırılırsa, binom dağılımı simetriye yaklaşır.
- o Binom dağılımının aritmetik ortalaması $(n.p)$ 'ye, varyansı ise $(n.p.q)$ 'ya eşittir.

2.2.2.3 Hipergeometrik Dağılım

x sayıda özel elemanı kapsayan n hacimli bir örnekleme uzayından rasgele alınan N hacimli bir örnekte, D sayıda özel eleman bulunma olasılığına “Hipergeometrik Olasılık” denir.

Örneğin ana kütleyle oranla büyük olduğu (%5’in üzerinde) hallerde Bernoulli deneylerinin varsayımından uzaklaşmakta ve her birimin seçilmesi ihtimali bir önceki seçimin sonucuna bağlı olmaktadır. Bu ve benzeri durumlarda binom yerine hipergeometrik dağılım olarak adlandırılan ve özellikle kalite kontrolünde yaygın olarak kullanılan bir başka süreksiz olasılık dağılımına başvurulmaktadır [4].

$$\Pr(x; N, D, n) = \frac{\binom{D}{x} \binom{N-D}{n-x}}{\binom{N}{n}} \quad x = 0, 1, 2, \dots, n ; \quad x \leq D ; \quad n - x \leq N - D \quad (2.23)$$

D : kütle içindeki elverişli durum sayısı

N : ana kütle mevcudu

n : örnekleme mevcudu

$N-D$: kütle içindeki elverişsiz durum sayısı

x : elverişli durumun meydana geliş sayısı

2.2.2.4 Poisson Dağılımı

Çok kısa bir zaman diliminde veya küçük bir alanda oluşan tek bir olay zaman veya alanın büyüklüğüyle orantılıdır, fakat verilen zaman veya alanın dışında meydana gelen olay sayısına bağlı değildir. Çok küçük bir zaman aralığı içinde veya küçük bir alanda meydana gelen ikiden fazla olayın olasılığı, tek olayın meydana gelme olasılığıyla kıyaslandığında önemsiz kalır, yani ihmal edilebilir. Bu ve benzeri durumlarda; n ’nin büyük, p ’nin küçük değerleri için binom dağılımı yerine poisson dağılımı kullanılmaktadır. Bir imalatta kusurlu mamullerin, çok az görülen bir hastalıktan ölenlerin, 100 yaşından fazla yaşayanların, bir ülkede meydana gelen toprak kaymalarının veya sel baskınlarının dağılımları ve bunlara benzer bir çok olaya ait dağılımlar için Poisson eğrisi, uygun bir matematik model olarak kullanılmaktadır.

Rasgele x değişkeni bazı hallerde belirli bir zaman aralığı içinde veya belirli bir yerde süreksiz (seyrek) olarak meydana gelecek olayların sayısını göstermek üzere, bu değişken için “Poisson Olasılık Fonksiyonu” aşağıdaki gibidir.

$$\Pr(x) = \frac{\rho^x \cdot e^{(-\rho)}}{x!} \quad \rho > 0, x = 0, 1, 2, \dots \quad (2.24)$$

ρ dağılımın parametresidir ve olayın ortalama meydana geliş sayısını gösterir. Örneğin X , kesintisiz bir zaman aralığında (t), gözlemlenen olay sayısı ise, $\rho = \lambda \cdot t$ olur ve λ , Poisson olayının sıklığı veya meydana gelme yoğunluğu olarak adlandırılır.

✓ Poisson dağılımının özellikleri;

- o Meydana gelen ortalama olay sayısı belirlidir, λ , kesirli bir değere sahip olabilir fakat x süreksiz değişken olduğundan kesirli değer alamaz.
- o λ 'nın değeri küçük ise dağılımın asimetrisi yüksek olmakta buna karşılık, λ büyüdükçe dağılımın şekli simetrik normal dağılıma yaklaşmaktadır.
- o Poisson dağılımı Binom dağılımının özel bir halidir. Binom dağılımında olasılık $\Pr < 0,05$, deney sayısı $t \rightarrow \infty$ olursa $\lambda \cdot t \rightarrow \rho$ gibi sabit bir değere varırsa Poisson dağılımına geçilmiş olur.
- o Poisson dağılımının hem aritmetik ortalaması hem de varyansı λ 'dır.

2.2.2.5 Geometrik Dağılım

Başarı olasılığını p olan bir binom deneyler serisi varsayıldığında ve rasgele değişkeni, X , ilk hata gözlemlenmeden önce başarı deney sayısına eşit olarak tanımlanırsa, rasgele X değişkeninin geometrik dağılımı aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\Pr(x) = p(1-p)^{x-1}, \quad x = 1, 2, \dots \quad (2.25)$$

$(1-p)^{x-1}$ terimi, $(x-1)$ deneme sonucu oluşmayan hatanın olasılığıdır, bunu p ile çarparsak x 'inci denemede hatanın meydana gelme olasılığını elde ederiz.

2.2.3 Sürekli Rasgele Değişkenlerin Olasılık Dağılımları

Sürekli rasgele değişkenler sınırsız sayıda muhtemel değer alabilen değişkenlerdir. Sürekli rasgele değişkenlerde $\Pr(X = x) = 0$ yani tek bir nokta için olasılık sıfırdır. Belirli bir sayı aralığı için olasılık söz konusudur ve bu olasılık “kümülatif dağılım

fonksiyonu” olarak adlandırılır. Süreksiz değişkenler için kümülatif olasılık dağılımı şöyle iken;

$$F(x_i) = \Pr(X \leq x_i) = \sum_{\text{tamamı } x_i \leq x} \Pr(x_i) \quad (2.26)$$

Sürekli değişkenler için aşağıdaki gibidir;

$$F(t) = \Pr(T \leq t) \quad (2.27)$$

Bir sürekli rasgele değişkenin alacağı değerlerden her birine karşılık gelen olasılıkların oluşturacağı topluluğa o rasgele değişkenin “sürekli olasılık dağılımı” veya “sürekli olasılık yoğunluk fonksiyonu, $f(t)$ ” denir. Süreksiz değişkenlerdeki olasılık fonksiyonu yerine burada olasılık yoğunluk fonksiyonu söz konusu olmaktadır, aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.28)$$

$$F(t) = \Pr(T \leq t) = \int_0^t f(\xi) d\xi \quad (2.29)$$

Sürekli rasgele T değişkenin küçük dt aralığında olasılığını gösteren $f(t)dt$ olasılık elementi olarak adlandırılır.

Herhangi bir sürekli rasgele değişkeninin kümülatif dağılım fonksiyonu olabilmesi için aşağıdaki şartları gerçekleştirmesi gerekmektedir.

$$F(-\infty) = 0 \quad (2.30)$$

$$F(\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) d\xi = 1 \quad (2.31)$$

$$0 \leq F(t) = \int_{-\infty}^t f(\xi) d\xi \leq 1 \quad (2.32)$$

$$F(x_1) = \int_{-\infty}^{x_1} f(\xi) d\xi \leq F(x_2) = \int_{-\infty}^{x_2} f(\xi) d\xi, \text{ eger } x_1 \leq x_2 \quad (2.33)$$

Kümülatif dağılım fonksiyonu sürekli rasgele T değişkeninin (a, b) aralığında bulunma olasılığını hesaplamak için kullanılır.

$$\Pr(a < T < b) = \int_{-\infty}^b f(\xi) d\xi - \int_{-\infty}^a f(\xi) d\xi = \int_a^b f(\xi) d\xi \quad \text{veya} \quad (2.34)$$

$$\Pr(a < T < b) = F(b) - F(a) \quad (2.35)$$

Sürekli bir X rasgele değişkenin de kümülatif dağılım fonksiyonu aynı şekilde tanımlanabilir;

$$\Pr(c < X < d) = \sum_{x_i \leq d} p(x_i) - \sum_{x_i \leq c} p(x_i) = F(d) - F(c) \quad (2.36)$$

Sürekli rasgele değişkenlerin olasılık fonksiyonları olan Normal, Lognormal, Üstel, Weibull ve Gama dağılımlarının özellikleri Bölüm 3.2 güvenilirlik olasılık dağılımlarında açıklanmaktadır.

2.2.3.1 Beta Dağılımı

Rasgele değişkenlerin belirli aralıkta dağılımları için uygun bir modeldir. Sıfır ile bir $(0, 1)$ aralığında isimlendirilen Standart Beta Dağılımı'nın olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$f(t; \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^t t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dx, & 0 \leq t \leq 1, \alpha > 0, \beta \geq 0 \\ 0, & \text{Aksi halde} \end{cases} \quad (2.37)$$

Gama dağılımında olduğu gibi beta dağılımının kümülatif dağılım fonksiyonu da kapalı formda yazılamaz. Bundan dolayı tamamlanmamış beta fonksiyonu, $I_t(\alpha, \beta)$, olarak adlandırılır, örneğin;

$$f(t; \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^t t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dx, & 0 \leq t \leq 1, \alpha > 0, \beta \geq 0 \\ 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases} \quad (2.38)$$

Beta dağılımının ortalaması ve varyansı;

$$E(t) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad \text{var}(t) = \frac{\alpha}{(\alpha + \beta)^2 (\alpha + \beta + 1)} \quad (2.39)$$

$\alpha = \beta = 1$ özel durumunda beta dağılımı standart uniform dağılıma indirgenir. Pratik olarak dağılım, hata zaman dağılımı olarak kullanılamaz. Genellikle beta dağılımı, parametrik olmayan sınıflamalarda istatistiksel dağılım tahminlerinde yardımcı dağılım olarak kullanılmaktadır.

2.2.4 Joint ve Marjinal Dağılımlar

2.2.4.1 Sürekli Değişkenler için

X ve Y olarak iki tane rasgele değişken (bağımsız olmaları şart değil) tayin edelim. $f(x, y)$ ile gösterilen olasılık yoğunluk fonksiyonu, X ve Y 'nin “joint olasılık yoğunluk fonksiyonu” olarak adlandırılır. $f(x, y)$ fonksiyonun, sürekli rasgele X ve Y değişkeninin bir joint olasılık yoğunluk fonksiyonu olabilmesi için aşağıdaki şartları sağlaması gerekmektedir.

$$f(x, y) \geq 0, \quad -\infty \leq x, y \leq \infty$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dx dy = 1 \quad (2.40)$$

İki veya daha fazla joint rasgele değişkenlerin olasılıkları örnekleme uzayının özel bir alt kümesi şeklinde oluşturulabilir.

$$\Pr(x_1 < X \leq x_2, y_1 < Y \leq y_2) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} f(x, y) dx dy \quad (2.41)$$

Sürekli rasgele değişkenler için, X ve Y 'nin “marjinal olasılık yoğunluk fonksiyonları” aşağıdaki gibidir.

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy \quad h(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dx \quad (2.42)$$

Eğer x ve y arasında koşullu olasılık söz konusu ise, sürekli rasgele değişkenler için “koşullu olasılık yoğunluk fonksiyonu” şu şekilde hesaplanır.

$$f(x|y) = \frac{f(x, y)}{h(y)}, \quad h(y) > 0 \quad f(y|x) = \frac{f(x, y)}{g(x)}, \quad g(x) > 0 \quad (2.43)$$

Eğer X ve Y rasgele değişkenleri bağımsız iseler, (2.9) denkleminde faydalanılarak aşağıdaki denklem yazılır.

$$f(x, y) = g(x) \cdot h(y) \quad (2.44)$$

Bağımsız sürekli değişkenler için (2.44) denkleminin en genel formu;

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \cdot \dots \cdot f_n(x_n) \quad (2.45)$$

$X_1, X_2, \dots, X_n$ rasgele değişkenleri için denklemin sol tarafı, $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, joint olasılık yoğunluk fonksiyonu; denklemin sağ tarafındakiler ise, $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)$, marjinal olasılık yoğunluk fonksiyonlarıdır.

2.2.4.2 Süreksiz Değişkenler için

Eğer X ve Y rasgele değişkenleri süreksiz iseler, joint olasılık fonksiyonu $\Pr(x, y)$ olarak gösterilir. $\Pr(x, y)$ fonksiyonun, süreksiz rasgele X ve Y değişkeninin bir joint olasılık fonksiyonu olabilmesi için süreklilerde olduğu gibi aşağıdaki şartları sağlaması gerekmektedir.

$$\begin{aligned} \Pr(x, y) &\geq 0, \quad \text{her } x \text{ ve } y \text{ için} \\ \sum_x \sum_y \Pr(x, y) &= 1 \end{aligned} \quad (2.46)$$

İki veya daha fazla süreksiz rasgele değişkenler için joint olasılık (2.41) denkleminde bezer şekildedir;

$$\Pr(x_1 < X \leq x_2, y_1 < Y \leq y_2) = \sum_{x_1 < x \leq x_2, y_1 < y \leq y_2} \Pr(x, y) \quad (2.47)$$

Süreksiz rasgele değişkenler için, X ve Y 'nin “marjinal olasılık fonksiyonları” şu şekildedir.

$$\Pr(x) = \sum_y \Pr(x, y) \quad \Pr(y) = \sum_x \Pr(x, y) \quad (2.48)$$

Süreksiz rasgele değişkenler için “koşullu olasılık fonksiyonu” ;

$$\Pr(Y = y | X = x) = \frac{\Pr(X = x \cap Y = y)}{\Pr(X = x)} = \frac{\Pr(x, y)}{\Pr(x)}, \quad \Pr(x) > 0 \quad (2.49)$$

Eğer X ve Y rasgele değişkenleri bağımsız iseler;

$$\Pr(x, y) = \Pr(x) \cdot \Pr(y) \quad (2.50)$$

Şeklinde yazılır.

2.3 RASGELE DEĞİŞKENLERİN KARAKTERİSTİKLERİ

Sürekli veya süreksiz rasgele değişkenlerin temel karakteristiği, rasgele X değişkeninin “beklenen değeri” veya “beklenti” dir. Süreksiz rasgele X değişkeninin $\Pr(x_i)$ olasılıkla x_i değerlerini alır ise, X 'in beklenen değerleri $E(X)$ aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$E(X) = \sum_i x_i \Pr(x_i) \quad (2.51)$$

Benzer şekilde $T, f(t)$ olasılık yoğunluk fonksiyonu ile bir sürekli rasgele değişken ise, beklenti T ;

$$E(T) = \int_{-\infty}^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (2.52)$$

$E(X)$ veya $E(T)$, istatistikte “ortalama” veya mekanikte merkeze göre momentler olarak bilinen ve çoğunlukla μ ile gösterilen, geniş kullanım alanına sahip bir kavramdır. $E(X)$, “merkeze göre ilk moment” olarak da isimlendirilmektedir [4]. Merkeze göre k 'nıncı moment aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$E(T^k) = \int_{-\infty}^{\infty} t^k \cdot f(t) dt \quad \text{tüm tamsayılar için } k \geq 1 \quad (2.53)$$

Bir rasgele değişkenin herhangi gerçek değer fonksiyonunun beklenen değerlerini elde edilebiliriz ve bu durumda bir süreksiz dağılım, $\Pr(x_i)$, için $g(x_i)$ fonksiyonunun beklenen değerleri tanımlanır ise;

$$E[g(X)] = \sum_{i=1}^k g(x_i) \cdot \Pr(x_i) \quad (2.54)$$

Sürekli rasgele T değişkeni için, $g(T)$ 'nin beklenen değerleri,

$$E[g(T)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(t).f(t)dt \quad (2.55)$$

olur.

Dağılımın ölçümü veya rasgele değişkenin ortalamaya göre değişmesi “varyans” olarak tanımlanır ve $\text{var}(X)$ veya $\sigma^2(X)$ ile ifade edilir. Varyans, ortalamaya göre ikinci moment veya merkezi moment olarak da ifade edilir.

$$\text{var}(X) = \sigma^2(X) = E[(X - \mu)^2] \quad (2.56)$$

σ^2 , varyansı ve σ ise standart sapmayı gösterir. Ortalamaya göre k 'nıncı moment (2.53) denkleminde benzer hesaplanmaktadır.

$$E[(X - \mu)^k] \quad \text{tüm tamsayılar için } k > 0 \quad (2.57)$$

Tablo 2.2’de temel beklenti kuralları verilmektedir.

Tablo 2.2. Beklenti Denklemleri

1.	$E(a.X) = a.E(X) \quad , a = \text{sabit}$
2.	$E(a) = a \quad , a = \text{sabit}$
3.	$E[g(X) \pm h(X)] = E[g(X)] \pm E[h(X)]$
4.	$E[X \pm Y] = E[X] \pm E[Y]$
5.	$E[X.Y] = E[X].E[Y] \quad , X \text{ ve } Y \text{ bağımsız}$

Bir dağılımın merkeze göre momentlerini hesaplamada yararlı bir yöntem Laplas dönüşümüdür [3]. Olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(t)$ 'nin laplas dönüşümü $F(S)$ ile gösterirsek, aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$F(S) = \int_0^{\infty} f(t) \exp(-St)dt \quad (2.58)$$

$$\frac{-dF(S)}{dS} = \int_0^{\infty} t.f(t) \exp(-St)dt \quad (2.59)$$

$S = 0$ için (2.59) denkleminin sağ tarafı $E(T)$ beklentisine indirgenir.

$$E(T) = - \left[\frac{dF(S)}{dS} \right]_{S=0} \quad (2.60)$$

Genel form olarak (2.60) denklemi yazılabilir ve laplas dönüşümü ile olasılık yoğunluk fonksiyonlarının momentlerinin hesaplanmasında kullanılabilir veya kolayca türevi alınabilir.

$$E(T^k) = \left[(-1)^k \frac{d^k F(S)}{dS^k} \right]_{S=0} \quad (2.61)$$

Beklenti kavramı joint olasılık dağılımları için de kullanılır. $X_1, X_2, \dots, X_n$ süreksiz rasgele değişkenlerinin gerçek-değer fonksiyonu h için, beklenti aşağıdaki gibidir.

$$E[h(X_1, X_2, \dots, X_n)] = \sum_{x_1} \sum_{x_2} \dots \sum_{x_n} h(x_1, x_2, \dots, x_n) \Pr(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.62)$$

Denklemdeki $\Pr(x_1, x_2, \dots, x_n)$, süreksiz rasgele X_i değişkenlerinin joint olasılık yoğunluk fonksiyonudur. Denklemde toplam terimleri integralle değiştirildiğinde sürekli X_i değişkenlerinin joint olasılık yoğunluk fonksiyonu, $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, elde edilir.

$$E[h(X_1, X_2, \dots, X_n)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h(x_1, x_2, \dots, x_n) f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (2.63)$$

X_1 ve X_2 gibi rasgele değişkenlere sahip bir iki değişkenli dağılımın beklenti fonksiyonuna, X_1 ve X_2 rasgele değişkenlerinin “kovaryansı” denir ve $\text{cov}(X_1, X_2)$ ile gösterilir. Kovaryans, iki rasgele değişken arasındaki bağımlılık hakkında bilgi verir.

$$h(X_1, X_2) = [X_1 - E(X_1)][X_2 - E(X_2)] \quad (2.64)$$

Tablo 2.2’e göre aşağıdaki denklem yazılır.

$$\text{cov}(X_1, X_2) = E(X_1 \cdot X_2) - E(X_1) \cdot E(X_2) \quad (2.65)$$

İki değişken arasındaki lineer ilişkiyi hesaplamada genel ölçüm “korelasyon katsayısı”dır. Korelasyon katsayısı, ilişkinin iki açısı ile ilgili bilgiyi taşır.

- ✓ Kuvvet, 0’dan 1’e skala ile ölçülür,
- ✓ Yön, artı veya eksi işaret ile gösterilir.

$\rho(X_1, X_2)$ ile gösterilen X_1 ve X_2 rasgele değişkenlerinin korelasyon katsayısı;

$$\rho(X_1, X_2) = \frac{\text{cov}(X_1, X_2)}{\sqrt{\text{var}(X_1) \cdot \text{var}(X_2)}} \quad (2.66)$$

Eğer X_1 ve X_2 bağımsız değişkenler ise, $\text{cov}(X_1, X_2) = 0$ ve $\rho(X_1, X_2) = 0$ 'dır. Bir çok rasgele değişkenlerin lineer bir fonksiyonu için beklenti ve varyans değerleri aşağıdaki formüller ile hesaplanır.

$$E\left(\sum_{i=1}^n a_i X_i\right) = \sum_{i=1}^n a_i E(X_i) \quad (2.67)$$

$$\text{var}\left(\sum_{i=1}^n a_i X_i\right) = \sum_{i=1}^n a_i^2 \text{var}(X_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_i a_j \text{cov}(X_i, X_j) \quad (2.68)$$

Değişkenler birbirinden bağımsız olduklarında (2.68) denklemi aşağıdaki gibi daha basit hale gelir.

$$\text{var}\left(\sum_{i=1}^n a_i X_i\right) = \sum_{i=1}^n a_i^2 \text{var}(X_i) \quad (2.69)$$

2.4 TAHMİNLEME ve HİPOTEZ TESTİ

Bir dağılımdan elde edilen gözlemler kümesine “örnekleme” denir. Bir örnek içinde yer alan gözlem sayısına “örnekleme boyutu” denir. İstatiksel olarak bir örnekleme, rasgele bağımsız ve tanımlanmış dağılım gözlemlerinden oluşur.

Belirlenmiş bir dağılımın uygulanabilirliğini kontrol edilmek ve dağılım parametrelerinin tahmin etmek için, “hipotez testi” ve “tahminleme” olarak bilinen özel istatistiksel prosedürlere ihtiyaç vardır.

2.4.1 Nokta (Tek Değer) Tahminleme

Nokta ve aralık tahminleme istatistikte kullanılan iki temel yöntem çeşididir. Nokta tahmini ile, dağılım fonksiyonunun bir parametresini veya ilgilenilen diğer karakteristiğini temsil eden bir örnekleme üzerinde sağlanan tek bir sayı elde edilmektedir. Bunun karşısı olarak, aralık tahmininde tek bir değer yerine “güven aralığı” belirlenmektedir.

Bir rasgele örnekleme, $x_1, x_2, \dots, x_n$, üzerinde tek parametrelili bir $F(X, \theta)$ dağılımını tahmin ettiğimizi varsayalım. $t(x_1, x_2, \dots, x_n)$, örnekleme tek değeri (basit) fonksiyonu olsun. Ayrıca $t(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 'nin, istatistik olarak başvuru bir rasgele değişken olduğu açıkça ortadadır. Bir nokta tahmini, uygun istatistiğin kullanımı ve örnekleme verisine bağlı değerinin hesaplanması ile elde edilir. Bu istatistiğe (fonksiyon olarak) "tahmin edici fonksiyon" denir, bunun sayısal değerine de "tahmin değeri" denir.

Nokta tahmin edicilerinin temel özellikleri; tarafsızlık, tutarlılık, etkinlik ve yeterliliktir. Eğer tahmin edicinin beklentisi ilgilenilen θ 'nın parametre değeriyle çıkıyor ise, bu tahmin edici için θ 'nın tarafsız tahmin edicisi denir. Örneğin; θ 'nın her değeri için $E[t(x_1, x_2, \dots, x_n)] = \theta$. Tarafılığı az olan tahmin edici en iyi tahmin edicidir.

Bir tahmin ediciden istenilen diğer özellik de tutarlılıktır. Eğer her $\varepsilon > 0$ değeri için aşağıdaki şart sağlanıyor ise t tahmin edicisi için tutarlıdır denir.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|t(x_1, x_2, \dots, x_n) - \theta| < \varepsilon) = 1 \quad (2.70)$$

Bu özellik örnekleme boyutu n arttıkça, tahmin edicinin θ 'nın gerçek değerine yaklaştığını ifade etmektedir. Bazı durumlarda bir çok tarafsız tahmin edici bulunabilir. Tarafsızlık konusunda en iyi tahmin edici seçimi, en küçük varyansa sahip olanıdır. θ 'nın en küçük varyansa sahip tarafsız tahmin edicileri etkinlik olarak nitelendirilir.

Eğer bir tahmin edici, θ hakkında tüm bilgiyi içeriyorsa, $x_1, x_2, \dots, x_n$ örneklemeindeki θ parametresi için bir $t(x_1, x_2, \dots, x_n)$ tahmin edicisi yeterlilik özelliğine sahiptir. Diğer bir ifade ile, θ parametresi yerine tahmin edicinin kullanımı bilgi kaybı meydana getirmeyecektir [3].

Tahmin yapmakta birçok matematiksel istatistik metodu kullanılmaktadır, bunlardan en genel olanları momentler yöntemi ve en çok olabilirlik metotlarıdır [3].

2.4.1.1 Momentler Yöntemi

Sürekli bir rasgele X değişkeninin ortalaması X 'in beklenen değeri ve varyansı $(x-\mu)^2$ nin beklenen değeri olarak tanımlanır. Örnekleme boyutu n olan X dağılımının

beklenen değerleri “örnekleme ortalaması” ve “örnekleme varyansı” olarak tanımlanır.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.71)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.72)$$

$\bar{x}$ ve S^2 , dağılımın ortalamasının, μ , ve varyansının, σ^2 , tek değer tahminleri olarak kullanılabilir. $\bar{x}$ ile aynı örneklemeden tahmin edildiğinden varyans tahmincisi (2.72) denkleminde taraflıdır. Bu taraflılığı ortadan kaldırmak için denklem $n/(n-1)$ ile çarpılır [3].

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.73)$$

2.4.1.2 En Çok Olabilirlik Metodu

θ_0 parametresine sahip $f(X, \theta_0)$ olasılık yoğunluk fonksiyonu ile birlikte sürekli bir rasgele X değişkeni varsayalım. X rasgele değişken dağılımından örnekleme boyutu n olan bir örnek $x_1, x_2, \dots, x_n$ ele alalım. En çok olabilirlik yaklaşımına göre, θ 'nın tahmini, gözlemlenen $x_1, x_2, \dots, x_n$ özel kümesinin olasılık yoğunluk fonksiyonuna en çok yaklaşan θ_0 'ın değeri olarak bulunur. Sürekli bir dağılımın olabilirlik fonksiyonu şöyle tanımlanır;

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta_0) = f(x_1, \theta_0) f(x_2, \theta_0), \dots, f(x_n, \theta_0) \quad (2.74)$$

Olabilirlik fonksiyonu; n olayın, $X = x_1, x_2, \dots, x_n$, birlikte meydana gelebilme olasılığı (sürekli rasgele değişkenler için) veya olasılık yoğunluk fonksiyonu (sürekli rasgele değişkenler için) şeklinde tanımlanmaktadır. En çok olabilirlik yaklaşımı ile olabilirlik fonksiyonunu, $L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta_0)$, θ_0 'a göre maksimum yapan $\hat{\theta}_0$ 'ın seçilmesi sağlanır. Maksimum parametrenin bulunmasının yolu denklemin birinci türevinin alınıp sıfıra eşitlenmesidir. Birinci türev değeri, ikinci türevde yerine konur ve sonuç negatif ise parametrenin maksimumdan geçtiği görülür.

$$\frac{\partial L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta_0)}{\partial \theta_0} = 0 \quad (2.75)$$

$$\frac{\partial \log L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta_0)}{\partial \theta_0} = 0 \quad (2.76)$$

2.4.2 Aralık Tahminleme

$\theta_l(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ve $\theta_u(x_1, x_2, \dots, x_n)$ olan iki istatistik varsayalım ve θ_0 parametresi de $[\theta_l, \theta_u]$ aralığında bulunuyor ise olasılık aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\Pr[\theta_l(x_1, \dots, x_n) < \theta_0 < \theta_u(x_1, \dots, x_n)] = 1 - \alpha \quad (2.77)$$

Rasgele $[l, u]$ aralığı, θ_0 parametresi için $\%100(1-\alpha)$ “güven aralığı” olarak isimlendirilir. l ve u ’nun bitim noktaları, θ_0 ’ın $\%100(1-\alpha)$ alt ve üst güven sınırlarını gösterir; $(1-\alpha)$, “güven katsayısı” veya “güven seviyesi”dir. α ’nın genel kullanılan değerleri 0.10, 0.05 ve 0.01’dir [3]. Bir (1) olasılık ile $\theta_0 > \theta_l$ olduğu zaman; θ_u, θ_0 için “tek taraflı üst güven sınırı” olarak adlandırılır. Bir (1) olasılık ile $\theta_0 < \theta_u$ olduğu zaman; θ_l, θ_0 için “tek taraflı alt güven sınırı” olarak adlandırılır.

Güven sınırlarının anlaşılması için; bir normal dağılımın ortalamasının güven sınırlarının ne olduğunu araştırılırsa, bir normal dağılımın, $N(\mu, \sigma^2)$, rasgele örnekleme $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ olsun. Burada μ ’nün bilinmediği ve σ^2 ’in bilindiği varsayılır ise, bu normal dağılımın, $N(\mu, \sigma^2/n)$, örnekleme ortalaması $\bar{X}$ ile gösterilir.

Standart normal dağılımı ise; $\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}$ olur ve aşağıdaki olasılık yazılabilir.

$$\Pr\left(-z_{1-\alpha/2} \leq \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \leq z_{1-\alpha/2}\right) = 1 - \alpha \quad (2.78)$$

$z_{1-\alpha/2}$ standart normal dağılımın $100(1-\alpha/2)$ ’inci (standart normal dağılım tablosundan elde edilen) oranıdır. (2.78) denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\Pr\left(\bar{X} - z_{1-\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + z_{1-\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha \quad (2.79)$$

Denklem (2.79), $(1-\alpha)$ simetrik güven aralığını vermektedir. Genellikle iki taraflı güven aralığı bir yüksek güven seviyesi, $(1-\alpha)$, için geniştir. Örnekleme boyutu n arttığında, aynı güven katsayı $(1-\alpha)$ için güven aralığı azalmaktadır.

Varyansın bilinmediği durumda ise benzer şekilde güven aralığı tayin edilebilir.

$$\Pr\left(\bar{x} - t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha \quad (2.80)$$

$t_{\alpha/2}$; $(n-1)$ özgürlük derecesine sahip t dağılımının oranıdır. Özgürlük derecesinin değişik değerleri için t_{α} değerleri, “ t dağılımı oranları tablosundan” elde edilir. Bir normal dağılım için varyans güven aralığı aşağıdaki denklemle bulunur.

$$\frac{(n-1)S^2}{\chi^2_{1-\alpha/2}(n-1)} < \sigma^2 < \frac{(n-1)S^2}{\chi^2_{\alpha/2}(n-1)} \quad (2.81)$$

$\chi^2_{1-\alpha}$ $(n-1)$, $(n-1)$ özgürlük derecesine sahip χ^2 dağılımının oranıdır, “ χ^2 dağılımı oranları tablosundan” elde edilir.

2.4.3 Hipotez Testi

Aralık tahminleme ve hipotez testi ters uygulama olarak düşünülebilir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(x; \theta)$ olan bir rasgele X değişkeni varsalım. Bu dağılımın rasgele bir örneklemeden θ parametresinin tek değer tahmini $\hat{\theta}$ elde edilebilir. θ 'nın hipotez değeri $\theta = \theta_0$ olsun, bu durumda $\hat{\theta}$ tahmini, θ_0 hipotez değeri ile bağdaşır mı sorusu, H_0 ile gösterilen “geçersiz (sıfır) hipotez” testi kavramı ile aşağıdaki gibi cevaplandırılır.

$$H_0: \theta = \theta_0$$

Geçersiz hipotez testinin karşıtı, H_1 , “alternatif (karşıt) hipotez” dir.

$$H_1: \theta \neq \theta_0$$

İstatistiksel hipotezlerin test edilmesi için test istatistikleri kullanılır. Bir çok durumda test istatistiği bilinmeyen dağılımın tek değer tahmin edicisidir. Normal dağılım incelenirse (ana kütle ortalaması bilinmiyor, varyansı biliniyor ise) hipotez testi;

$$H_0: \mu = \mu^* \quad H_1: \mu \neq \mu^*$$

$N(\mu, \sigma^2/n)$ normal dağılımın örnekleme ortalaması $\bar{x}$ (2.79) denkleminde güven aralığına sahiptir, buna göre μ^* bu güven aralığında yer alıyorsa yapılan sonucunda test geçersiz hipotezdir ve eğer μ^* güven aralığında ise geçersiz hipotez anlamlılık seviyesi α 'da red edilemez.

Hipotez testinde güven aralığına “kabul alanı” denir ve kabul alanının alt ve üst sınırlarına, I. Tip hata olasılığı olarak anlamlılık seviyesi α 'ya başvurulduğunda, “kritik değerler” denir. Geçersiz hipotez testinin red edilip-edilemeyeceğine karar verilmesiyle ilgili yapılan hatalar;

Hipotez doğru, H_0 ; RED – I. Tip Hata

Hipotez yanlış, H_0 ; RED EDİLEMEZ – II. Tip Hata

II. Tip Hata olasılığı β ile gösterilmektedir ve Tablo 2.3 hataları tanımlamaktadır. Kabul alanın artması; α 'yı azaltır, β 'yı artırır. Probleme en iyi yaklaşım I. Tip Hata olasılığını, α , en düşük seviyede (0.01, 0.05 veya 0.10) tutmak ve II. Tip Hata olasılığını olabildiğince küçültmektir. II. Tip Hata yapmama olasılığına $(1 - \beta)$, “testin gücü” denir. Testin gücü ne kadar artarsa o derecede gerçeği yakalama kabiliyeti fazla olur.

Tablo 2.3. Hipotez Testinde Yapılan Hatalar

KARAR	Gerçek Durum	
	H_0 DOĞRU	H_0 YANLIŞ
H_0 ; RED	I. Tip Hata	Hata Yok
H_0 ; RED EDİLEMEZ	Hata Yok	II. Tip Hata

2.5 GÜVENİLİRLİK (UYGUNLUK) TESTLERİ

Bir örnekleminin, hipotezlenen teorik dağılıma ait olup olmadığının hesaplanmasında ihtiyaç olan; gözlemlenen bir örneklemeden gelen rasgele bir değişkenin meydana gelme frekansı ile hipotezlenen dağılımdan elde edilen tahmini frekanslar arasındaki farkı hesaplayarak bir güvenilirlik (uygunluk) yeterliliği tahmini yapılmasını sağlayan, test performansına “güvenilirlik testi” denir.

2.5.1 Ki-Kare Testi

Testin performansının ölçülebilmesi için; ana kütleden alınan ve rasgele X değişkeni ile gösterilen, gözlemlenmiş bir örnekleme, k 'ya ($k \geq 5$) bölünebilmelidir [3]. Daha

sonra varsayılan (hipotezlenen) dağılım modeli, rasgele X değişkenin her i ($i=1,2,..., k$) aralığına düşebilecek p_i olasılıklarının hesaplanmasında kullanılır. p_i 'nin örnekleme boyutu n ile çarpılmasıyla her aralık için beklenen frekans elde edilir. Beklenen frekans e_i ile gösterilirse, $e_i = n \cdot p_i$ olur. Eğer örneklemin her i aralığı için gözlemlenen frekans o_i ile ifade edilirse, e_i ile o_i arasındaki fark uygunluğun (güvenirliliğin) yeterliliği olarak nitelendirilebilir.

χ^2 istatistiği olarak kullanılan ki-kare testi aşağıdaki biçimde tanımlanmaktadır [3].

$$W = \chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i} \quad (2.82)$$

Gözlemlenen frekanslar beklenen frekanslardan çok fazla olur ise W büyür, güvenilirlik zayıflar. Test şu şekilde özetlenebilir;

Adım 1. Verilen örnekleme için uygun hipotezlenen dağılım tercih edilir.

Adım 2. α ile ifade edilen, testin özel anlamlılık seviyesi seçilir.

Adım 3. $\chi^2_{1-\alpha}(k-m-1)$ 'in, $k-m-1$ özgürlük derecesine sahip ki-kare dağılımının $100(1-\alpha)$ oranı olduğu zaman, kabul alanı $R \geq \chi^2_{1-\alpha}(k-m-1)$ tanımlanır (k , aralıkların sayısı ve m , örneklemedeki tahminleme yapılan parametrelerin sayısıdır). Eğer dağılımın parametreleri verilen örnekleme kullanılmadan tahmin ediliyorsa, $m = 0$ olur.

Adım 4. Ki-kare istatistik değeri, W , hesaplanır.

Adım 5. Eğer $W > R$ ise; hipotezlenen dağılım RED, aksi halde red edilemez.

2.5.2 Kolmogorov Testi

Örnekleme bileşenleri, aralıklar dahilinde kümelenmeden bireysel davranıyorlarsa bu test uygulanabilir. Ki-kare testine benzer şekilde hipotezlenen bir kümülatif dağılım fonksiyonunun tahmini deneysel (veya örnekleme) kümülatif dağılım fonksiyonu ile karşılaştırılmasıdır.

$$S'_n(t) = \begin{cases} 0 & -\infty < t < t_{(1)} \\ \frac{i}{n} & t_{(i)} \leq t \leq t_{(i+1)} \\ 1 & t_{(n)} \leq t < \infty \end{cases} \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (2.83)$$

İstatistik $K - S$; $S'_n(t)$ ile hipotezlenen kümülatif dağılım fonksiyonu, $F(t)$, arasındaki maksimum fark ölçümü olarak aşağıda tanımlandığı şekilde Kolmogorov testi olarak kullanılır.

$$K - S = \max_i \left[|F(t_i) - S'_n(t_i)|, |F(t_i) - S'_n(t_{i-1})| \right] \quad (2.84)$$

Testi yapmak için aşağıdaki adımlar izlenmelidir;

Adım 1. Verilen örnekleme uygun hipotezlenen kümülatif dağılım $F(T)$ tercih edilir.

Adım 2. α ile ifade edilen, testin özel anlamlılık seviyesi seçilir.

Adım 3. “Kolmorov güvenirlik testi için D_n kritik değerleri tablosundan” edinilen $D_n(\alpha)$ değeri için kabul alanı $R \geq D_n(\alpha)$ tanımlanır.

Adım 4. Eğer $K - S > D_n(\alpha)$ ise; hipotezlenen dağılım RED ve veri için $F(T)$ uygun değil olarak devam edilir, aksi halde hipotez red edilemez.

2.6 REGRESYON ANALİZİ

Değişkenler arasındaki ilişkiler ya birlikte değişme ya da sebep-sonuç ilişkileri şeklinde olabilir. Değişkenin hangisinin sebep hangisinin sonuç olduğu ile ilgilenmeyen analiz ögesine “korelasyon” denir. Buna karşılık değişkenler arasındaki sebep-sonuç ilişkileri “regresyon” ile analiz edilir. Diğer bir ifade ile bağımlı değişkenin, bağımsız değişkenlerle açıklanmasıdır. Korelasyon da ise değişkenlerin birbirleri ile (karşılıklı) ilişkileri açıklanmaktadır. Regresyon ile korelasyon yakın ilişkisi olan konulardır ve regresyon analizi yapılırken korelasyona atıfta bulunmak çoğu zaman gerekmektedir [5].

Y ile gösterilen “bağımlı değişken”; $x_1, x_2, \dots, x_k$ ile belirtilen “bağımsız değişkenler”, “açıklayıcı değişkenler” veya “faktörler” olarak adlandırılan değişkenlere bağımlı değişken şeklinde ifade edilir. Bağımsız değişkenler, rasgele veya rasgele olamayan, değerleri bilinen veya deneyci tarafından seçilen, değişkenler olabilirler. $x_1, x_2, \dots, x_k$ ’nin her verilen değeri için Y ’nin şartlı beklentisi, $E(Y | x_1, x_2, \dots, x_k)$ ile ifade edilen, $x_1, x_2, \dots, x_k$ üzerinde Y ’nin “regresyonunu” tanımlar.

Y ’nin regresyonunu, $x_1, x_2, \dots, x_k$ bağımsız değişkenleri açısından lineer bir fonksiyon ise aşağıdaki denklem yazılır.

$$E(Y | x_1, x_2, \dots, x_k) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k \quad (2.85)$$

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ katsayıları “regresyon katsayıları” veya “regresyon parametreleri” olarak adlandırılırlar. Y ’nin beklentisi rasgele değil ise, denklemdeki ilişki, belirleyici bir yapıdadır. Rasgele Y değişkeni için regresyon modeli şu şekilde yazılır;

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.86)$$

Denklemdeki ε , “rasgele hata” olarak isimlendirilir ve ortalaması $E(\varepsilon) = 0$, varyansı σ^2 olan rasgele değişken dağılımı üzerinde düşünülen tüm x bileşenleri için bağımsız olduğu varsayılır. Eğer ε normal olarak dağılmış ise regresyon, normal regresyon olarak isimlendirilir.

2.6.1 Basit Lineer Regresyon

Regresyon modelinde basit belirleyici ilişkisi olmasıdır.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 \quad (2.87)$$

$(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ gözlemlerinin n çift ve x ’e verilen her değer için bağımlı değişken Y ’nin x değeri ile aşağıdaki denklemdeki gibi, ε ’nın ortalaması “0” ve varyansı σ^2 olarak normal dağılmış olduğu durumda, ilişkili olduğunu düşünülürse,

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon \quad (2.88)$$

olur. Rasgele Y değişkeni, verilen bir x için, $\beta_0 + \beta_1 x$ ortalama ve σ^2 varyans ile bir normal dağılıma sahiptir. Ayrıca $x_1, x_2, \dots, x_n$ ’e verilen her değer için rasgele $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ değişkenlerinin bağımsız oldukları varsayılır. Yukarıdaki n çift gözlemler için $y_1, y_2, \dots, y_n$ ’nin joint olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki denklemle tanımlanır.

$$f_n(y | x, \beta_0, \beta_1, \sigma^2) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{n/2}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 \right] \quad (2.89)$$

(2.89) denklemindeki fonksiyon, β_0 ve β_1 parametreleri için olabilirlik fonksiyonudur. β_0 ve β_1 açısından fonksiyonu maksimum yapmanın yolu kareler toplamını minimum yapmaktır.

$$S(\beta_0, \beta_1) = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 \quad (2.90)$$

β_0 ve β_1 parametrelerinin en çok olabilirlik tahmini, “en küçük kareler” metodunun tahminlenmesidir. $S(\beta_0, \beta_1)$ ’in küçültülmesi türev alınarak yapılır [3].

$$\frac{\partial S(\beta_0, \beta_1)}{\partial \beta_0} = 0 \quad \frac{\partial S(\beta_0, \beta_1)}{\partial \beta_1} = 0 \quad (2.91)$$

Yukarıdaki denklemlerin çözümünden β_0 ve β_1 parametrelerinin en küçük kareler tahminleri, $\hat{\beta}_0$ ve $\hat{\beta}_1$, elde edilir.

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad \hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.92)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.93)$$

Bağımlı değişkenlerin varyansının, σ^2 , tahminlenmesi ise;

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n - 2)} \quad (2.94)$$

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i \quad (2.95)$$

Denklemdaki $(n - 2)$ özgürlük derecesinin sayısıdır ve 2 sayısı modelin tahmin edilen parametrelerinin sayısından gelir. Y varyansının tahminine “artık varyans” da denilir ve model uygunluğunun doğruluk ölçüsü olarak da kullanılmaktadır. S^2 ’nin pozitif kökü, “ Y tahminin standart hatası”, (2.94) denkleminin paydası, $(n - 2)$, “artık kareler toplamı” olarak isimlendirilirler.

3. GÜVENİLİRLİK ELEMANLARI

3.1 GÜVENİLİRLİK KAVRAMI

Güvenilirlik genelde bir birimin planlanan fonksiyonda başarılı performans yeterliliğini gösterir. Sayısal olarak bir birimin güvenilirliğinin hesaplanmasında, bir birimin planlanan fonksiyonunun başarı kazanım olasılığı olarak güvenilirlik gibi davranan, olasılık metriği kullanılır. Güvenilirliğin matematiksel gösterimi olarak olasılıksal tanımı ilk bölümde ifade edilmiştir. Denklem (1.1)'in sağ tarafı belirlenmiş hata zamanı T 'nin, $c_1, c_2, \dots, c_n$ olarak karşılaşılan gerilim durumlarında belirlenmiş hedef zamanını geçtiğindeki olasılığı ifade etmektedir.

Pratik olarak rasgele T değişkeni birimi hataya götürecek zamanı (Hata Zamanı), $c_1, c_2, \dots, c_n$ ise birimin başarılı performansı için belirlenmiş durumları simgelemektedir.

3.1.1 Güvenilirlik Fonksiyonu

Denklem (1.1)'de güvenilirliğin en temel tanımlaması yapılmıştı, rasgele T değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(t)$ ile ifade edildiğinde, birimin hata olasılığı bir zaman fonksiyonu olarak şöyle tanımlanır;

$$\Pr(T \leq t) = \int_0^t f(\theta) d\theta = F(t) \quad , t \geq 0 \quad (3.1)$$

$F(t)$, birimin t zamanına kadar bazı başarısızlıklarının olasılığını ifade etmektedir. Denklem (1.2)'e göre yukarıdaki denklem (3.1) birimin güvenilmezliğidir. Bu sebepten $F(t)$ (hata zamanı kümülatif dağılım fonksiyonu), “güvenilmezlik fonksiyonu” olarak isimlendirilir. Ters olarak güvenilirlik fonksiyonu (sürdürülebilme veya hayatta kalma fonksiyonu) tanımlanır ise;

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau \quad (3.2)$$

Sürekli rasgele T değişkeninin p -seviye kartili (çeyrek), değer t_p ile tanımlanır, $F(t_p) = p$; $0 < p < 1$ [3].

$p = 0,5$ seviyesinin kartiline medyan denir. Ortalama konum parametresi olarak kullanılır, bir çeyreğin miktarı “100p yüzde noktası” veya “100p’ninci yüzdeliği” ifade eder. Güvenilirlikte Hata Zamanının 100p’ninci yüzdeliği birim hata olasılığının p ’ye eşit olduğu noktadır.

Hata Zamanı dağılımlarının ve temel güvenilirlik ölçümlerinin temel karakteristiği, olasılık yoğunlu fonksiyonu, $f(t)$, kümülatif dağılım fonksiyonu, $F(t)$, veya güvenilirlik fonksiyonu, $R(t)$, ile açıklanabilmesidir. “Ortalama Hata Zamanı, MTTF”, birim fonksiyonunun başarıyla performans sergileyeceğindeki beklenen zamanı örneklemektedir ve buna “beklenen zaman” da denilir. Denklem (2.52)’ye göre;

$$MTTF = E(T) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (3.3)$$

Eğer $\lim_{t \rightarrow \infty} t \cdot f(t) = 0$ ’a eşit olursa yukarıdaki denklemden (3.4) denklemi elde edilebilir.

$$E(T) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.4)$$

“Ortalama Hata Zamanı” ile “Hatalar Arasındaki Ortalama Zaman, MTBF” arasındaki fark aşağıdaki gibi açıklanabilir. Denklem (3.3)’teki olasılık yoğunluk fonksiyonunda, ilk hata ile ikinci hata arasındaki, ikinci hata ile üçüncü hata arasındaki ve bu şekilde devam eden hatalar arasındaki zamanın olasılık yoğunluk fonksiyonu hatalar arasındaki ortalama zamanı ifade eder. Eğer sistem veya bileşeni bakım, onarım veya değişim ile tamamen yenilenirse, ortalama hata zamanı ile hatalar arasındaki ortalama zaman aynı zamana rastlaşır. Bunun anlamı yenileme süreci mükemmel varsayılmaktadır. Pratikte bu yaklaşım her zaman doğru olmayabilir, bunun için sistemin veya bileşeninin her yenileme çevrimi için hatalar arasındaki ortalama zamanın hesaplanması gerekmektedir. Bu durum için güvenilirlikte kullanılan yaklaşım “yeni gibi oldu” varsayımdır.

Bir birimin t zamanındaki güvenilirlik fonksiyonu $R(t)$ olduğu varsayılırsa, sistemin veya bileşeninin devam edeceği (sürdürülebilir aktifliği) τ zamanı için olasılığı,

verilen t zaman için devam ettiğine (sürdürülebilir olduğuna) bağlı ise buna “koşullu (şartlı) güvenilirlik fonksiyonu” denir ve şöyle ifade edilir;

$$R(\tau|t) = \frac{R(t + \tau)}{R(t)} \quad (3.5)$$

Buna göre aynı zaman aralığındaki hatanın koşullu olasılığı şu şekilde ifade edilir;

$$F(\tau|t) = 1 - R(\tau|t) \quad (3.6)$$

3.1.2 Hata Oranı

Hata oranı veya riziko oranı, $h(t)$ ile gösterilir ve şu şekilde tanımlanır;

$$h(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \left(\frac{F(t + \tau) - F(t)}{R(t)} \right) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.7)$$

Yukarıdaki denklem $h(t)$ 'nin, koşullu Hata Zamanı olasılık yoğunluk fonksiyonu olduğunu göstermektedir. Ayrıca hata oranı güvenilirlik fonksiyonu ile açıklanır ise;

$$h(t) = -\frac{d}{dt} [\ln R(t)] \quad \text{veya} \quad (3.8)$$

$$R(t) = \exp \left[-\int_0^t h(x) dx \right] \quad (3.9)$$

Üstel değerdeki hata oranının integrali “kümülatif hata oranı” veya “kümülatif riziko fonksiyonu”, $H(t)$ olarak adlandırılır.

$$H(t) = \int_0^t h(x) dx \quad (3.10)$$

Ortalama Hata Zamanının olasılık yoğunluk fonksiyonu ile elde edilen beklenen değere “Artık Ortalama Hata Zamanı” denilir. Güvenilirlik ölçümüyle ilgili bir diğer açıklamada, belirlenmiş t zaman aralığında “ortalama hata oranı”, $\langle h(t) \rangle$ ile yapılmaktadır.

$$\langle h(t) \rangle = \frac{1}{t} \int_0^t h(x) dx \quad \text{veya} \quad (3.11)$$

$$\langle h(t) \rangle = -\frac{\log R(t)}{t} \quad (3.12)$$

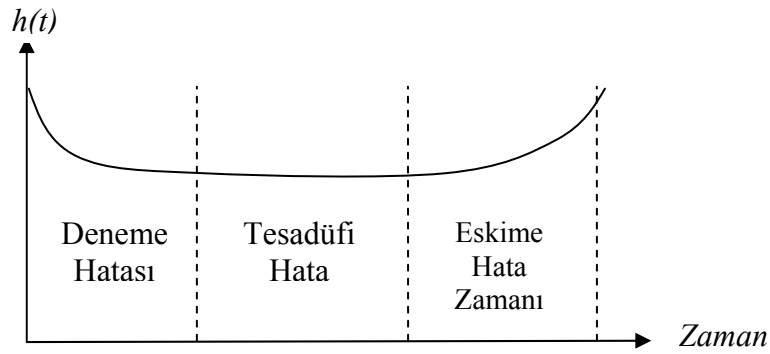
$$\langle h(t) \rangle = \frac{H(t)}{t} \quad (3.13)$$

Eğer zaman aralıkları, t , verilen (belirlenen) bir yüzdeliğe, t_p , eşit ise;

$$\langle h(t_p) \rangle = -\frac{\log(1-p)}{t_p} \quad (3.14)$$

Pratikte $h(t)$ fonksiyonu banyo küvetine benzer şekil göstermektedir ve bundan dolayı “Küvet Eğrisi” olarak isimlendirilir. Şekil 3.1’de bir küvet eğrisi gösterilmektedir.

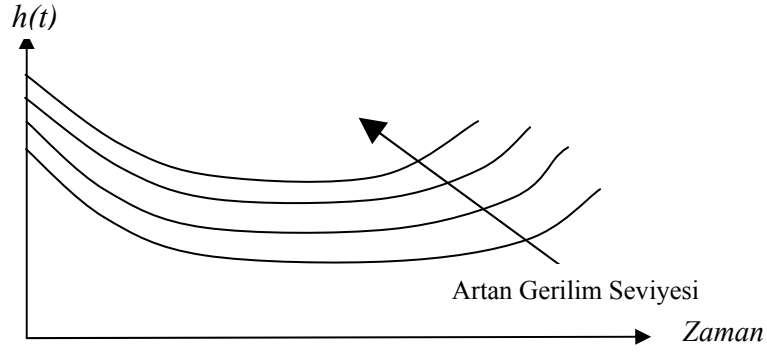
Küvet eğrisi üç bölgeye ayrılmaktadır. Deneme Süreci Bölgesi, ilk hata alanında azalan bir hata oranı sergilenir. Bunun karakteristiği tasarıma bağlı olarak ortaya çıkar. Azalan hata oranına sahip bir hata zaman dağılımı “Azalan Hata Oran Dağılımı” ismini alır ve buna benzer ortalama hata oranı ile azalan dağılıma ise “Azalan Hata Oran Ortalama Dağılımı” denir.



Şekil 3.1: Küvet Eğrisi

Küvet eğrisinin sabit hata oranı ile devam eden bölümü “Tesadüfi Hata Bölgesi”sini oluşturur. Üçüncü bölge ise artan hata oranını içeren “Eskime Bölgesi” olarak adlandırılır. Bu üç bölge farklı sistem ve bileşenleri için çok farklı olabilmektedir.

Örnek olarak Şekil 3.2’de, bir sistem veya bileşeni üzerindeki dayanımın değişik seviyelerdeki etkisini göstermektedir [3]. Dayanım seviyesi arttıkça, tesadüfi hata alanı azalmakta ve doğal olarak erken eskime meydana gelmektedir. Bu nedenle dayanım faktörlerini azaltmak için güvenilirliği arttırmak gerekmektedir.



Şekil 3.2: Küvet Eğrisi üzerinde Gerilimin Etkisi

Güvenilirliğin matematiksel teorisinde azalan hata oran dağılımı ve azalan hata ortalama dağılımlarının yanında “Artan Hata Oranı” ve “Artan Hata Ortalama Oranı” kavramları da önemli rol oynamaktadır.

3.2 GENEL GÜVENİLİRLİK DAĞILIMLARI

Bileşenler için çoğunlukla kullanılan Hata Zamanı dağılım modellerinin; üstel, normal, lognormal, Weibull, gama ve en küçük değer dağılımlarının temel güvenilirlik özellikleri aşağıda belirtilmektedir.

3.2.1 Üstel Dağılım

Bu dağılım hata zamanı modeli olarak kullanılan ilk dağılımdır. Dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu bir parametreye sahiptir. λ ile gösterilen parametre hata oranı olarak adlandırılmaktadır. Üstel dağılım, Poisson dağılımı ile yakın ilişki içindedir. Şu şekilde bir test varsayalım; $t = 0$ zamanında bir test süreci göz önüne alındığında, bir sistem veya bileşenin testte yer alması ve sistem veya bileşenin hataya uğradığında hızlı bir şekilde tanımlanmış yeni bir sistem veya bileşeni ile yer değiştirmekte ve bu sistem veya bileşeni de hataya uğradığında aynı şekilde yeni sistem veya bileşeni ile ani yer değişim olmakta ve bu şekilde devam etmektedir. Test rasgele olmayan T zamanında oluşturulsun. Deneydeki hata sayıları ortalaması λT ile Poisson dağılımı gösterirse ve iki hatanın meydana gelmesindeki zaman parametresi λ olan üstel dağılım gösterirse buna “Homojen Poisson Süreci” denir.

Bu dağılım, küvet eğrisi içeriğinde “tesadüfi hata bölgesi” olarak tarif edilir. Diğer iki bölgeye göre uzun tesadüfi hata alanına sahip olan bileşenler için bu dağılım yeterli olacaktır.

Üstel dağılım, Homojen Poisson Sürecinin kullanımıdır. Bu süreç içinde her hatanın rasgele bir şoktan kaynaklandığını ve şokların sayısının, şokların ortalama sayısı λt 'ye eşit olan bir Poisson dağılımınca tanımlanan t uzunluğundaki bir zaman aralığında meydana geldiğini kabul edilirse, $[0, t]$ aralığında meydana gelen rasgele şokların sayısı, n , aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Pr[X = n] = \frac{\exp(-\lambda t) \cdot (\lambda t)^n}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad \lambda, t > 0 \quad (3.15)$$

Denklemdaki λ , şokların meydana geldiğindeki orandır. Bu modele göre, ilk şok bileşen hatasına neden olur ve sonra bileşen, hiç şok olmadığı zamanca işlevine devam eder, örneğin $n = 0$. Buna göre denklem şöyle yazılır;

$$R(t; \lambda) = \Pr[X = 0] = \exp(-\lambda t) \quad (3.16)$$

Denklem (3.2)'den yararlanılarak, üstel olasılık yoğunluk fonksiyonu denklem (3.17)'deki hale dönüşür;

$$\begin{aligned} f(t) &= \lambda \exp(-\lambda t) & \lambda, t > 0 \\ &= 0 & t \leq 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Üstel dağılım en önemli özelliği “üstel dağılım ile temsil edilen bir hata sürecinin hafızası yoktur” şeklinde özetlenebilir [3]. Koşullu olasılığı göz önünde tutarak; birim bir t zamanı için operasyondan sonra devam edebilirliğe (sürdürülebilir aktifliğe) sahip ise, bazı t ve $t + \Delta t$ aralığında birimin hataya uğrayacağı olasılık;

$$\Pr(t \leq T \leq t + \Delta t \mid T > t) = \frac{\exp(-\lambda t) - \exp(-\lambda(t + \Delta t))}{\exp(-\lambda t)} = 1 - \exp(-\lambda \Delta t) \quad (3.18)$$

Yukarıdaki denklem t 'nin bağımsız olduğu durumlar için geçerlidir. Başka bir ifade ile t zamanına kadar çalışan, geçmiş ile ilgili hiç bir hafızaya sahip değildir. Kısaca bu, şok modeli olarak tarif edilebilir. t zamanı boyunca herhangi bir noktadaki oran, t zamanına kadar herhangi bir şokun meydana gelip; gelmediğine aldırmadan, vahim şok oluştuğundaki oran ile aynıdır.

3.2.2 Weibull Dağılımı

Hata zamanını temsil eden sürekli rasgele T değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi tarif edilirse, olasılık dağılımı Weibull dağılımı olarak adlandırılır.

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\beta \cdot (t)^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right], & \alpha, \beta > 0, \quad t > 0 \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (3.19)$$

Denklemdaki β dağılımın şeklini belirler ve şekil parametresi olarak isimlendirilir, α ise ölçek parametresidir. Buna göre $\beta = 1$ olduğu zaman Weibull dağılımı, $\lambda = 1/\alpha$ parametrelili üstel dağılıma indirgenir.

Weibull dağılımının kümülatif dağılım fonksiyonu aşağıdaki gibidir;

$$F(t) = \Pr(T \leq t) = \int_0^t \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{\tau}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{\tau}{\alpha}\right)^\beta\right] d\tau = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (3.20)$$

Güvenilirlik analizinde genişçe kullanım alanına sahip olan Weibull dağılımı ile kuvvet eğrisinin üç bölgesi de gösterilebilmektedir. Denklem (3.19)'da Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu dikkate alınarak hata oranı, $h(t)$ aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$h(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}, \quad t, \alpha, \beta > 0 \quad (3.21)$$

Genelde bu denklem $\lambda = \frac{1}{\alpha^\beta}$ dönüşümü ile kullanılmakta ve hata oranı,

$h(t) = \lambda \cdot \beta \cdot t^{\beta-1}$ denkleminde çevrilmektedir. Eğer denklem (3.21)'de beta parametresi, $0 < \beta < 1$ ise Weibull dağılımı deneme sürecindeki hata özelliği sergileyen azalan hata oranı dağılımı olur. Beta bire eşit ise, $\beta = 1$, Weibull dağılımı üstel dağılıma dönüşür. Beta parametresi birden büyük ise, Weibull dağılımı, kuvvet eğrisinin eskime bölgesi için artan hata oranı dağılımında olduğu gibi bir model olarak kullanılabilir.

“Konum parametresi” olarak isimlendirilen bir parametre, garanti edilmiş (özgür hata) ömür periyodunu açıklamak için kullanılmaktadır. Bu durumda hata oranı, olasılık yoğunluk fonksiyonu ve güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki gibi açıklanır [3].

$$h(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\theta}{\alpha}\right)^{\beta-1}, \quad \alpha, \beta > 0, \quad 0 < \theta \leq t \leq \infty \quad (3.22)$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\theta}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t-\theta}{\alpha} \right)^{\beta} \right], \quad t \geq \theta \quad (3.23)$$

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t-\theta}{\alpha} \right)^{\beta} \right], \quad t \geq \theta \quad (3.24)$$

3.2.3 Gama Dağılımı

Gama dağılımı, üstel dağılımın genel formu olarak kabul edilebilir. Örneğin; üstel dağılım gösteren bir sistemin başarılı hatalar arasındaki zaman T_i ise, rasgele T değişkeni $T = T_1 + T_2 + \dots + T_n$ ile gama dağılımı izler. Buradaki T , n 'inci hatanın kümülatif zamanını temsil eder. Bu durumda, β ve α parametreleri ile gama dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$f(t) = \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} t^{\alpha-1} \exp \left(- \frac{t}{\beta} \right), \quad \alpha, \beta, t \geq 0 \quad (3.25)$$

Denklem (3.25)'deki $\Gamma(\alpha)$ ile gösterilen, dağılımın gama fonksiyonu olarak isimlendirilir ve aşağıdaki gibi tanımlanır [3].

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} \exp(-x) dx \quad (3.26)$$

α pozitif tamsayı olduğu zaman gama fonksiyonu $\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)!$ 'e eşittir, ancak α parametresinin tamsayı olma zorunluluğu yoktur. Gama dağılımının ortalaması ve varyansı ise;

$$E(t) = \frac{\alpha}{\beta} \quad \text{var}(t) = \frac{\alpha}{\beta^2} \quad (3.27)$$

α , şekil parametresi ve β ise ölçek parametresidir. $\alpha = 1$ olduğu zaman dağılım üstel dağılıma indirgenir. Gama dağılımının diğer bir özel durumu da, $\beta = 2$ ve $\alpha = n/2$ (n pozitif tam sayı) olduğunda, özgürlük derecesini gösterir ki, bu durumda ki-kare dağılımına dönüşür.

Homojen Poisson sürecine göre gerçekleşen rasgele k başarılı şoklarından sonra bir bileşen başarısız olduğu zaman bileşenin Hata Zamanı dağılımı, gama dağılımı izler.

Gama kümülatif dağılım fonksiyonu ve güvenilirlik fonksiyonu kapalı biçimlere sahip değildir. Şekil parametresi alfanın tam sayı olduğu durumlarda, gama dağılımı “Erlangian Dağılım” olarak isimlendirilir. Bu durumda güvenilirlik ve hata oranı fonksiyonları Poisson dağılımının terimleri içinde aşağıdaki gibi olur.

$$R(t) = \sum_{k=0}^{\alpha-1} \frac{\left(\frac{t}{\beta}\right)^k \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right)}{k!} \quad (3.28)$$

$$h(t) = \frac{t^{\alpha-1}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha) \sum_{k=0}^{\alpha-1} \frac{(t/\beta)^k}{k!}} \quad (3.29)$$

Alfa, bir hata oluşmadan önce gereken şok sayısını gösterir ve beta bir şokun ortalama oluşma zamanını temsil eder.

Gama dağılımı; $\alpha < 1$ için bir azalan hata oranı dağılımı, $\alpha = 1$ için bir sabit hata oranı ve $\alpha > 1$ için ise bir artan hata oranı dağılımıdır. Bu çerçevede gama dağılımı ile kuvvet eğrisinin her üç bölgesi temsil edilebilir.

3.2.4 Normal Dağılım

Gauss Eğrisi veya Çan Eğrisi olarak da bilinen normal dağılım gerek teoride gerekse uygulamada en çok kullanılan bir matematik model durumundadır [4]. 1733'te De Moivre tarafından geliştirilen normal olasılık dağılım fonksiyonu şöyledir;

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_t^2} (t - \mu_t)^2\right], (-\infty < t < \infty), (-\infty < \mu, \sigma < \infty) \quad (3.30)$$

μ (ortalama) ve σ (standart sapma), dağılım parametreleridir.

Denklem (3.30)'a göre rasgele T değişkeninin, apsis $t = t_1$ ve $t = t_2$ aralığındaki olasılık değeri aşağıdaki gibi olur.

$$\Pr(t_1 < T < t_2) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (3.31)$$

Genelde normal dağılım yerine standart normal dağılım, ortalaması sıfır ($\mu=0$) ve standart sapması bir ($\sigma = 1$) olan normal dağılım, kullanılmaktadır. Bu dağılım rasgele değişkenlerin ortalama göre Z dönüşümü ile elde edilir.

$$Z = \frac{T - \mu}{\sigma} \quad (3.32)$$

Z dönüşümüne göre (3.31) denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} \Pr(t_1 < T < t_2) &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt \\ &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{z_1}^{z_2} \exp\left(-\frac{Z^2}{2}\right) dZ \\ &= \Pr(z_1 < Z < z_2) \end{aligned} \quad (3.33)$$

- ✓ Normal dağılımın özellikleri aşağıdaki şekilde tarif edilir [4];
 - o Binom olasılık fonksiyonunun $n \rightarrow \infty$ için limiti normal olasılık fonksiyonuna eşittir, simetrik binom dağılımının limiti olarak normal dağılım kullanılabilir.
 - o Normal eğri altında kalan alan 1'e yani %100'e, ayrıca $z = 0$ değerine karşılık geçen ordinatın iki tarafında kalan alanlar birbirine ve bütün alanın yarısına eşittir.
 - o Normal dağılımlarda toplam frekansın %68,27'si aritmetik ortalamadan ± 1 standart sapma, %95,4'i aritmetik ortalamadan ± 2 standart sapma ve %99,73'ü aritmetik ortalamadan ± 3 standart sapma uzaklıklar arasında bulunmaktadır.
 - o Dağılım μ etrafında simetriktir.
 - o Normal eğrinin dönüm noktalarının apsisleri $z = \pm 1$ 'dir.

Güvenilirlik analizinde “Merkezi Limit Teorem” olarak isimlendirilmesinin sebebi; bağımsız rasgele değişkenlerin büyük sayıdaki, n , toplamının normal dağılıma yaklaşmasıdır [4].

Hata zamanının standart sapması σ dır ve μ , ortalama hata zamanına eşittir. Hata oranı normal dağılımı daima t zamanının monoton artan fonksiyonu olduğundan normal dağılım da bir artan hata oranı dağılımıdır. Bu sebepten normal dağılım kuvvet eğrisinin eskime bölgesini temsil eden bir model olarak kullanılabilir.

3.2.5 Lognormal Dağılım

Pozitif tanımlanmış rasgele değişkenin normal dağılımı logaritmik ise bu tür dağılıma “lognormal dağılım” denir.

Eğer T rasgele değişkenin normal dağılımı ise, ortalaması μ_t ve standart sapması σ_t olan ve rasgele T değişkeni ile temsil edilen normal olasılık yoğunluk fonksiyonuna $Y = e^T$ dönüşümü yapılarak bir lognormal olasılık yoğunluk fonksiyonu, $f(y)$, elde edilir.

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_t y \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln y - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right), y > 0, (-\infty < \mu_t < \infty), \sigma_t > 0 \quad (3.34)$$

Lognormal olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(y)$ eğrisinin rasgele Y değişkenin y_1 ve y_2 değerleri arasındaki olasılığına eşit olan iki nokta, y_1 ve y_2 , arasındaki alanı normal dağılımdaki hesaplamaya benzer şekilde yapılır. Bunun için standart normal rasgele değişken, y değişkenlerinin logaritması alınarak $\ln(y)$ normal dağılım şekline döner ve logaritmalar monoton fonksiyon haline gelir.

$$z_1 = \frac{\ln y_1 - \mu_t}{\sigma_t}, \quad z_2 = \frac{\ln y_2 - \mu_t}{\sigma_t} \quad (3.35)$$

Olasılık için de aynı dönüşüm yapılır ise aşağıdaki kümülatif dağılım denklemi elde edilir.

$$\begin{aligned} \Pr(y_1 < Y < y_2) &= \Pr(\ln y_1 < \ln Y < \ln y_2) \\ &= \Pr(\ln y_1 < T < \ln y_2) \\ &= \Pr(z_1 < Z < z_2) \end{aligned} \quad (3.36)$$

Eğer normal dağılımın ortalama ve standart sapma değerleri bilinmiyorsa, μ_t ve σ_t , lognormal dağılımın ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak hesaplanabilir.

$$\mu_t = \ln \left(\frac{\mu_y}{\sqrt{1 + \frac{\sigma_y^2}{\mu_y^2}}} \right) \quad \sigma_t = \ln \sqrt{1 + \frac{\sigma_y^2}{\mu_y^2}} \quad (3.37)$$

Bu model bir çok küçük çok değişkenli hataların sonucu olduğundan hata sürecine kısmen uygundur. Baysen güvenilirlik analizinde yaygın olan lognormal dağılımı öncelikli dağılımların temsilcisi olarak adlandırılır. Bu dağılım iki parametrelili bir dağılımdır. Bir rasgele değişken, T , için lognormal olasılık yoğunluk fonksiyonu,

$\mu_t = E(\ln t)$ ve $\sigma_t^2 = \text{var}(\ln t)$ eşit olduğunda, denklem (3.34)'de açıklandığı üzere aşağıdaki denklemle elde edilir [3].

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_t t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_t^2} (\ln t - \mu_t)^2 \right], t > 0, (-\infty < \mu_t < \infty), \sigma_t > 0 \quad (3.38)$$

Lognormal dağılımda hata oranı, başlangıçta artmakta ve sonra azalmaktadır. Orandaki artma ve azalma μ_t ve σ_t parametre değerlerine bağlıdır.

3.2.6 Aşırı Değer Dağılımları

$x_1, x_2, \dots, x_n$ 'nin kümülatif dağılım fonksiyonu $F(X)$ olan, bağımsız olarak ve aynı şekilde dağıtılmış rasgele değişkenlerin bir örnekleme olduğunu kabul edildiğinde, aşırı değer teorisine göre $F(X)$ dağılımı, “ana dağılım” ismini almaktadır. Örnekleme boyutunu artan değerlere göre $x_{1:n} < x_{2:n} < \dots < x_{n:n}$ şeklinde sıralar ise, $x_{i:n}$ ($i=1,2,\dots,n$) istatistiğine “sıralı istatistik” denir [3].

r 'ninci sıralı istatistiğin ($X_{r:n}$), kümülatif dağılım fonksiyonu $F_{r:n}$ ile ifade edilirse, fonksiyon binom dağılımca aşağıdaki biçimde olur [3].

$$F_{r:n}(X) = \sum_{k=r}^n \binom{n}{k} F^k(X) [1 - F(X)]^{n-k} \quad (3.39)$$

n boyutundaki bir örneklemin maksimum istatistiği, en son sıra istatistiğidir ($r=n$) ve kümülatif dağılım fonksiyonu denklem (3.39)'dan yararlanılarak şu şekilde ifade edilir;

$$F_{n:n}(X) = F^n(X) \quad (3.40)$$

En son sıra istatistiğinin dağılımı “maksimum dağılım” olarak isimlendirilir. n boyutundaki rasgele bir örneklemin “minimum dağılımı” ise $r=1$, kısmi durumundan elde edilir.

$$F_{1:n}(X) = 1 - [1 - F(X)]^n \quad (3.41)$$

3.2.6.1 Rasgele Boyutlu Örnekleminin Sıralı İstatistiği

Örnekleme boyutu n ise; dağılım, $p_i = \Pr[n = n_i]$ şeklinde gösterilir.

Sabit bir n örnekleme boyutu için ilgilenilen x istatistiğinin, olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(x, n)$ ve kümülatif dağılım fonksiyonu $F(x, n)$ olduğunda, toplam olasılık kuralına göre x istatistiğinin olasılık yoğunluk fonksiyonu, $g(x)$, ve kümülatif dağılım fonksiyonu, $G(x)$ aşağıdakine eşit olur.

$$\begin{aligned} g(x) &= \sum_i p_i f(x, n_x) \\ G(x) &= \sum_i p_i F(x, n_x) \end{aligned} \quad (3.42)$$

Örnekleme boyutu n sonsuza gittiğinde, maksimum ve minimum dağılımlar aşağıdaki limitlere sahip olur;

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F^n(x) = 0, \quad F(x) < 1 \quad (3.43)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \{1 - [1 - F(x)]^n\} = 1, \quad F(x) \leq 1 \quad (3.44)$$

Limit dağılımları sadece sıfır ve bir değerleri alır. Bu tür dağılımlar için “bozulmuş” ifadesi kullanılmaktadır ve bu bozulmayı gidermek için lineer dönüşüm kullanılmaktadır.

$$Y = a_n + b_n x \quad (3.45)$$

Sabit değer olarak seçilen a_n ve b_n limit dağılımlarına uygulandığında denklemlerin bozulması giderilmiş olunur. Tüm x değeri için maksimum;

$$\lim_{n \rightarrow \infty} H_n(a_n + b_n x) = \lim_{n \rightarrow \infty} F^n(a_n + b_n x) = H(x) \quad (3.46)$$

Tüm x değeri için minimum;

$$\lim_{n \rightarrow \infty} L_n(c_n + c_n x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \{1 - [1 - F(c_n + c_n x)]^n\} = L(x) \quad (3.47)$$

şeklinde tanımlanır.

3.2.6.2 Minimum ve Maksimumun Asimptotik Dağılımları

Sabit ve rasgele örnekleme boyutları için minimum ve maksimum dağılımların nasıl elde edileceği denklem (3.46) ve (3.47)’de belirtildiği üzere aşırı değerlerin asimptotik dağılımları üç durum için kullanılır [6]. Bu durumlar;

- Örnekleme boyutu sonsuza doğru artıyor,
- Ana dağılım bilinmiyor,
- Örnekleme boyutu büyük fakat bilinmiyordur.

3.2.6.3 Limit Dağılımlarının Üç Çeşidi

Maksimum, H , ve Minimum, L , için limit dağılımlarının üç uygulanabilir çeşidi mevcuttur [7, 8, 9]. Denklem (3.46)'yı sağlayan, maksimum, $H(x)$, için bozulmamış dağılımların üç tipi aşağıdaki verilmektedir.

Tip I (Gumbel Dağılımı):

$$H_1(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x}{\delta}\right)\right], \quad \delta > 0, \quad -\infty < x < \infty \quad (3.48)$$

Tip II (Freshet Dağılımı):

$$H_2(x) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{x}{\delta}\right)^{-\gamma}\right] & \delta > 0, \gamma > 0, x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (3.49)$$

Tip III (Weibull Dağılımı):

$$H_3(x) = \begin{cases} 1 & x > 0, \\ \exp\left[-\left(-\frac{x}{\delta}\right)^{\gamma}\right] & \delta > 0, \gamma > 0, x \leq 0 \end{cases} \quad (3.50)$$

Minimum dağılımlarında da benzer teorem geçerlidir ve denklem (3.47)'yi sağlayan sadece üç tip bozulmamış dağılım mevcuttur.

Tip I (Gumbel Dağılımı):

$$L_1(x) = 1 - \exp\left[-\exp\left(\frac{x}{\delta}\right)\right], \quad \delta > 0, \quad -\infty < x < \infty \quad (3.51)$$

Tip II (Freshet Dağılımı):

$$L_2(x) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(-\frac{x}{\delta}\right)^{-\gamma}\right], & \delta > 0, \gamma > 0, x < 0 \\ 1 & x \geq 0 \end{cases} \quad (3.52)$$

Tip III (Weibull Dağılımı):

$$L_3(x) = \begin{cases} 0 & x < 0, \\ 1 - \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right)^\gamma, & \gamma > 0, \quad x \geq 0 \end{cases} \quad (3.53)$$

Güvenilirlik mühendisliğinde bu üç tüp dağılımın geniş kullanım alanı vardır. Minimum ve maksimum için Gumbel dağılımı, “en küçük aşırı değer dağılımı” ve “en büyük aşırı değer dağılımı” olarak da isimlendirilmektedir [10].

Üç parametrelili Weibull dağılımına (3.23) benzer şekilde çoğu zaman en küçük aşırı değer dağılımı ve en büyük aşırı değer dağılımı iki parametrelili dağılım olarak kullanılmaktadır. Bu durumda en küçük aşırı değer dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$f(t) = \frac{1}{\delta} \exp\left[\frac{1}{\delta}(t - \lambda) - \exp\left(\frac{t - \lambda}{\delta}\right)\right], \quad -\infty < \lambda < \infty, \quad \delta > 0, \quad -\infty < t < \infty \quad (3.54)$$

olur. λ , konum parametresidir ve her hangi bir değer olabilir. Ölçek parametresi δ ile ifade edilir ve daima pozitif değer olmalıdır. En küçük aşırı değer dağılımı için hata oranı ise;

$$h(t) = \frac{1}{\delta} \exp\left(\frac{t - \lambda}{\delta}\right) \quad (3.55)$$

olur. En küçük aşırı değer dağılımının hata oranı, zamanın artan bir fonksiyonu olduğundan en küçük aşırı değer dağılımı, eskimeden dolayı bileşen hataları için model olarak kullanılan bir artan hata oran dağılımıdır. Bu modelde bileşenin eskitme periyodu üstel artan hata oranı özelliği göstermektedir. Açıkça model Hata zamanını temsil ettiği zaman, t 'nin negatif değerleri anlamsız olur.

Weibull dağılımı ve en küçük aşırı değer dağılımı birbirleri ile yakın ilişki içindedir. Bu ilişki; eğer rasgele X değişkeni denklem (3.19) daki olasılık yoğunluk fonksiyonu ile Weibull dağılımı izler ise, dönüştürülmüş $T = \ln(X)$ rasgele değişkeni, λ ve δ parametreleri ile en küçük aşırı değer dağılımı izler, şeklinde ifade edilir.

$$\begin{aligned} \lambda &= \ln(\alpha) \\ \delta &= \frac{1}{\beta} \end{aligned} \quad (3.56)$$

En büyük aşırı değer olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$f(t) = \frac{1}{\delta} \exp \left[-\frac{1}{\delta} (t - \lambda) - \exp \left(-\frac{t - \lambda}{\delta} \right) \right], \quad -\infty < \lambda < \infty, \delta > 0, -\infty < t < \infty \quad (3.57)$$

En büyük aşırı değer dağılımı bileşen hata davranışı için uygun bir modelleme değildir [3].

3.3 BİLEŞEN GÜVENİLİRLİK MODELLERİ

Gözlemlenmiş hata verileri için uygun modelin tahminlenmesi veya seçilmesi için bir çok yöntem vardır. Bu yöntemler iki grupta toplanabilir: “parametrik olmayan metotlar” (özel bir dağılım fonksiyonu gerektirmeyen) ve “parametrik metotlar” (seçilmiş bir dağılım fonksiyonuna dayanan).

3.3.1 Parametrik Olmayan Grafik Yöntemleri

Parametrik olmayan yaklaşım, bir sistem veya bileşeni güvenilirlik karakteristiklerinin (örneğin; olasılık yoğunluk fonksiyonu, güvenilirlik ve riziko oranı) bir örneklemeden direk tahmin edilmesidir. Bu fonksiyonların ölçeği, uygun parametrik dağılımların göstergesi olarak kullanılabilir. Bu yöntemler, veri analizleri için hazırlık aracı olarak düşünülmektedir. Burada önemli olan, onarılmış bir sistem veya bileşeninden elde edilen hata verisi, ancak sistem veya bileşeni onarımının yeni gibi iyi olduğunun varsayılmasından sonra bir örnekleme olarak kullanılabileceğidir. Sonra her hata zamanı, önceki gözlemlenmiş hata zamanlarından bağımsız olan bir örnekleme gözlemi şeklinde düşünülür.

3.3.1.1 Küçük Örneklemeler

Hata zamanları (n), küçük bir örnekleme oluşturduğunda (örneğin; $n < 25$) ve veri seti $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$ şeklinde ise güvenilirlik fonksiyonları için parametrik olmayan tahmin edicileri aşağıdaki gibi tanımlamaktadır [11].

$$\hat{h}(t_i) = \frac{1}{(n - i + 0.625)(t_{i+1} - t_i)}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.58)$$

$$\hat{R}(t_i) = \frac{n - i + 0.625}{(n + 0.25)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.59)$$

$$\hat{f}(t_i) = \frac{1}{(n + 0.25)(t_{i+1} - t_i)}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.60)$$

0.625 ve 0.25 sayıları, Weibull dağılım tahmini için küçük eğilim ve ortalama kare hatası olarak varsayılan ikincil önemin düzeltme terimleridir [12].

3.3.1.2 Büyük Örneklemeler

Hata zamanları (n), büyük bir örnekleme oluşturduğu ve örneklemenin hata zamanı artışlarına eşit bir Δt sayısı ile gruplandırıldığında, güvenilirlik tanımına göre; güvenilirlik fonksiyonunun parametrik olmayan tahmini, $N_s(t_i)$ 'nin sürdürülebilir aktivite bileşenlerin sayısını temsil ettiği denklem;

$$\hat{R}(t_i) = \frac{N_s(t_i)}{N} \quad (3.61)$$

olur. Denklemdaki tahmin edici, deneysel (örnek) kümülatif dağılım fonksiyonu (2.83) ile kesinlikle uyumludur. Her aralığın üst sınır noktası olarak t_i zamanı kullanılmaktadır. Olasılık yoğunluk fonksiyonu benzer şekilde hesaplanmaktadır.

$$\hat{f}(t_i) = \frac{N_f(t_i)}{N\Delta t} \quad (3.62)$$

Denklemden yer alan $N_f(t_i)$, $(t_i, t_i + \Delta t)$ zaman aralığında gözlemlenen hataların sayısıdır. Yukarıdaki iki denklemden faydalanarak hata oranı tahmini elde edilir.

$$\hat{h}(t_i) = \frac{N_f(t_i)}{N_s(t_i)\Delta t} \quad (3.63)$$

Böylelikle; $i = 1$ iken $N_s(t_i) = N$ ve $i > 1$ için $N_s(t_i) = N_s(t_{i-1}) - N_f(t_i)$ 'e eşit olur. $N_s(t_i)$ sonsuza ve Δt sıfıra yaklaşırken, tahminleme gerçek riziko oranına ($h(t)$) yaklaşır.

Denklem (3.63) de; t_i zamanındaki işlevdeki bileşen sayısı $N_s(t_i)$ ile temsil edildiğinde, $(t_i, t_i + \Delta t)$ zaman aralığında hataya uğrayacak bileşenin olasılığı $N_f(t_i)/N_s(t_i)$ oranı ile tahmin edilir. Bu oranın Δt 'ye bölünmesi ile hata oranı tahmini elde edilir. Tahminin doğruluğu Δt 'ye bağlıdır, bunun için Δt 'nin küçük değerlerinin kullanılması ile iyi bir tahminleme yapılır.

3.3.2 Olasılık Haritası

Olasılık haritası, gözlemlenmiş verinin analiz edilmesinin ve gösterilmesinin basit bir grafik metodudur. Kümülatif dağılım fonksiyonunun dönüştürülmesi ile özel olasılık kağıtları üzerine pilotlanan (işaretlenen) veri, düz bir hat olabilir. Her dağılımın kendine özgü olasılık haritası vardır. Bir veri seti bilinen bir dağılıma göre hipotezlenir ise; grafik, hipotezin kabul edilip edilmemesi için kullanılabilir. Pilotlanmış hattan hipotezlenen dağılımın parametreleri de tahmin edilebilir. Bu metodun tercih edilme sebebi basit olması ve verinin görsel olarak değerlendirilmesidir. Bu yaklaşım resmi olmayan, sözel bir karar verme metodudur.

3.3.2.1 Üstel Dağılımın Olasılık Haritası

Üstel dağılımın güvenilirlik fonksiyonun açıklanmasındaki denklem (3.16)'nın logaritması alınır ise aşağıdaki denklem elde edilmiş olunur.

$$\ln R(t) = -\lambda t \quad (3.64)$$

Eğer $R(t)$ denklem (3.64)'e göre t zamanının bir fonksiyonu olarak yarı logaritmik pilotlama kağıdına pilotlanır ise pilotlamanın sonucu, eğimi $-\lambda$ olan düz bir hat olur.

Bir testten n hata zamanlarının gözlemlendiğini varsayalım: $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$. Denkleme göre her t_i zamanı için güvenilirliğin, $R(t_i)$, bir tahmini yapılabilir. $R(t_i)$ 'nin parametrik olmayan tahmini $(1 - i/n)$ 'e eşittir [denklem (3.61) ve (2.83) ile belirtilmiştir]. Denklem (3.59) Weibull dağılımında güvenilirlik için iyi tahminleme sağlamaktadır (üstel dağılım Weibull'un özel bir durumudur).

Grafiksel olarak y-ekseni $R(t_i)$ 'yi ve x-ekseni t_i göstermektedir. $\ln R(t)$ 'nin eğimi negatif olacağından, eğimi pozitif yapmak için $\ln (1/R(t))$ şeklinde işaretlenir. Pratikte kullanılan başka bir yol ise yarı logaritmik kağıt kullanılarak t_i 'ye karşılık gelen $(n - i + 0.625) / (n + 0.25)$ pilotlaması olan Kimbal güvenilirlik tahmin edicisidir [3]. Diğer $R(t_i)$ 'nin tahmin edicileri; ortalama derece, $(n - i + 1) / (n + 1)$ ve medyan derece, $(n - i + 0.7) / (n + 0.4)$ olarak isimlendirilen yöntemlerdir [12].

Pilotlama grafiğinden Ortalama Hata Zamanı'nın da tahmin edilmesi mümkündür. Bunun için $R = 0.368$ (veya $1/R = e \approx 2.718$) değerinde x-eksenine bir paralel hat çizilir. Bu hattın bağlı hat ile kesiştiği noktadan x-eksenine dikme inilir. Eksen üzerinde t' 'ye karşılık gelen değer Ortalama Hata Zamanı'nın bir tahminidir ve bunun tersi $\hat{\lambda}$ 'ye eşittir.

3.3.2.2 Weibull Dağılımının Olasılık Haritası

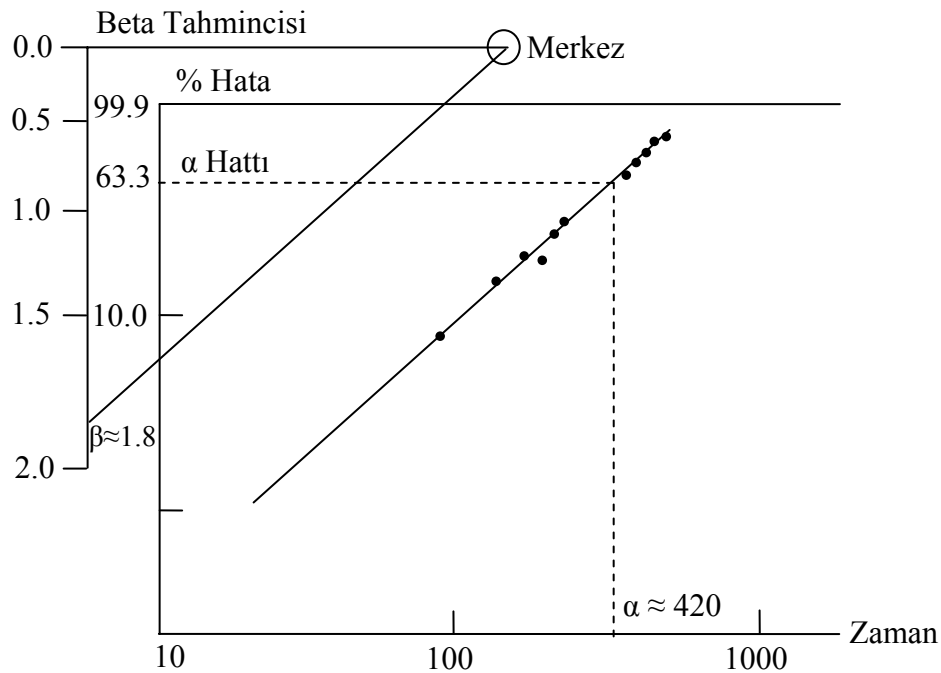
Weibull kümülatif dağılımı fonksiyonunun tanımından faydalananak güvenilirlik fonksiyonu için aşağıdaki ilişkiler belirlenir [3].

$$\frac{1}{R(t)} = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]$$

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{R(t)}\right)\right] = \beta \cdot \ln t - \beta \cdot \ln \alpha \quad (3.65)$$

$\ln(t)$ 'ye karşılık $\ln(\ln[1/R(t)])$ 'nin pilotlanması ile eğimi β ve $(-\beta \cdot \ln \alpha)$ 'nin y-yakalaması olan düz bir hat elde edilir.

$R(t_i)$ 'nin çok sayıda tahmin edicileri kullanılabilir. En çok kullanılanlardan biri denklem (3.60)'da belirtilmiştir. Şekil 3.3'te gösterilen özel Weibull kağıdı üzerinde, logaritmik x-eksenine, t_i pilotlanır ve y-eksenine, $F(t) = [(i - 0.375) / (n + 0.25)] * 100$ nin tahmini pilotlanır (genelde % hata olarak sınıflandırılır). Şekil 3.3'deki üçüncü ölçek $\ln(\ln[1/R(t)])$ içindir, fakat $F(t)$ 'nin tahmini olarak kullanılması daha uygundur.



Şekil 3.3: Weibull Olasılık Pilotlaması

Eğer veri pilotlaması olabildiğince düz hatta ile örtüşüyor ise Weibull dağılımı uygunluk gösterir, şekil parametresi β ve ölçek parametresi α yaklaşık olarak hesaplanabilir. Eğer küçük bir dairenin merkezinden, pilotlanan düz hatta bir paralel

çizilir ise “küçük beta tahmin edicisi” eksenini kestiği noktada β değeri elde edilir. α ’nın bulunması için kümülatif dağılım fonksiyonunun %63.2 değerinden yatay bir çizgi pilotlanan düz hat ile kesiştirilir ve bu noktadan x-eksenine inilen dikme α parametresinin değerini verir.

Verinin düz bir hat üzerine düşmediği fakat konkav veya konveks şekil üzerine düştüğü durumlarda, bir konum parametresi, θ , bulunabilir (denklem üç parametrelili Weibull dağılımı kullanılır, denklem (3.23)’de gösterilmiştir).

Eğer hata verileri gruplanırsa pilotlama için t_i yerine sınıf orta noktaları, t'_i , kullanılmalıdır ($t'_i = (t_{i-1} + t_i) / 2$).

3.3.2.3 Normal ve Lognormal Dağılım Olasılık Haritaları

Normal ve lognormal pilotlamaları için aynı özel olasılık haritaları kullanılabilir. x-eksenine normal dağılım için t_i lognormal için $\ln(t)_i$ pilotlanır, y-eksenine ise her ikisi içinde $(i - 0.375) / (n + 0.25)$ tahmin edicisi ile $F(t_i)$ pilotlanır. Normal kümülatif dağılım fonksiyonu şu dönüşüm ile doğrusallaştırılır [3];

$$\Phi^{-1}[F(t_i)] = \frac{1}{\sigma} t_i - \frac{\mu}{\sigma} \quad (3.66)$$

Denklemde Φ^{-1} ile gösterilen standart normal kümülatif dağılım fonksiyonunun tersidir. Ortalama μ parametresini tahmin etmek için x-ekseninin %50 değerinden, y-eksenine paralel bir çizgi pilotlanan düz hat ile kesiştirilir. Bu noktanın y-eksenindeki değeri normal dağılımın ortalaması veya medyanı ve lognormal dağılımın medyanı olan μ parametresinin tahminini verir. Benzer şekilde x-ekseninin %84 değeri ile y-ekseni kesişiminden normal ve lognormal dağılımın σ parametresi $\sigma \approx t_{84\%} - t_{50\%}$ veya $\sigma \approx t_{84\%} - \mu_t$ şeklinde tahmin edilebilir.

3.3.3 Test Üzerinde Toplam Zaman Pilotlamaları

Test üzerinde toplam zaman pilotlaması dağılımının artan bir hata oranı, sabit bir hata oranı veya azalan bir hata oranı gösterip göstermediğinin belirlenmesinde kullanılan grafiksel bir metodudur [13, 14]. n bileşenin gözlemlenmiş hata zamanlarının : $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$ şeklinde olduğunda, eğer t_i zamanında sürdürülebilir aktiviteye sahip bileşen sayısı $N_s(t_i)$ ile ifade edilir ise hayatta kalma olasılığı (güvenilirlik fonksiyonu) şu şekilde hesaplanır;

$$R(t_i) = \frac{N_s(t_i)}{n} \quad (3.67)$$

t_i zamanına kadar test üzerinde toplam zaman $T(t_i)$ ile ifade edilir ve aşağıdaki denklemden elde edilir.

$$T(t_i) = \int_0^{t_i} N_s(t) dt = n.t_1 + (n-1)(t_2 - t_1) + + (n-i+1)(t_i - t_{i-1}) \quad (3.68)$$

Bu denkleme göre; t_1 zamanına kadar (ilk hata oluşma zamanı) sürdürülebilir bileşen sayısı n 'dir, t_1 ve t_2 zaman aralığında ise sürdürülebilir aktiviteye sahip bileşen sayısı $(n-1)$ ve bu şekilde gitmektedir. Bu sebepten t_i zamanında “test üzerinde ölçekli toplam zaman” olarak isimlendirilir ve şu şekilde ifade edilir;

$$\tilde{T}(t_i) = \frac{\int_0^{t_i} N_s(t) dt}{\int_0^{t_n} N_s(t) dt} \quad (3.69)$$

Üstel dağılım için $\tilde{T}(t_i) = i/n$ şeklinde gösterilebilir. Test üzerinde toplam zamanın grafiksel gösteriminde x-eksenine i/n pilotlanır ve y-eksenine ise $\tilde{T}(t_i)$ pilotlanır. Daha sonra referans hattın sapmaları hesaplanır. Eğer veri $\tilde{T}(t_i) = i/n$ hattının üzerine düşüyor ise üstel dağılım kabul edilebilir. Eğer pilotlama iç bükeylik gösterir ise burada artan bir hata oranı olabilir ve tersi durumda pilotlama dış bükey şekil izlerse azalan bir hata oranından bahsedilebilir. Eğer pilotlama makul derecede bir düz hat üzerine düşerse ve iç bükeylik veya dış bükeylik ortaya koymaz ise üstel dağılım kabul edilir.

Test üzerinde toplam zaman pilotlaması diğer yöntemlere benzer biçimde sadece model yeterliliğini belirleyici test olarak kullanılamaz. Diğerlerine göre daha ayrıntılı riziko ve olasılık pilotlamasıdır.

3.4 KLASİK PARAMETRİK TAHMİNLEME

Hata Zamanı veya talep dağılımlarında hata parametrelerinin tahmin edilmesi özel güvenilirlik testlerinden elde edilen verilere dayanmaktadır. Sürdürülebilir aktivite

testinde; bileşenlerin hipotezlenen bir nüfusundan elde edilen bir örnekleme, işlevi beklenen bileşenler içindeki çevrenin kullanılmasıyla, test üzerine yerleştirilir ve bunların hata zamanları kaydedilir. Genellikle testin iki büyük tipi gerçekleştirilir. İlki hatalı birimlerin yerine kullanma-yenileme ile test etme ve ikincisi ise yerine kullanmadan-yenilemeden test etmektir.

Hata Zamanı veya Hatalar arasındaki Zaman örnekleme nadiren “tam (eksiksiz)” örnekleme türleridir. Tam bir örnekleme, tüm birimlerin verilen bir gözlem periyodu için bir test süresince hataya uğraması ve bütün hata zamanlarının bilinmesi anlamına gelmektedir.

➤ Sansürleme

Bir örneklemede yer alan birimlerin sayısının N olduğunu ve örneklemin tüm ünitelerinin eş zamanlı test edildiği durumda eğer T test periyodunca, hata zamanları bilinen ve hatalı birimleri değiştirilmeyen, r üniteleri hataya uğrar ise bu örnekleme “ T ’de sağ tarafı kendi başına sansürlenmiş” şeklinde isimlendirilir. Bu durumda hataya uğramayan $(N - r)$ bileşenleri hakkında sahip olacağımız tek bilgi hata zamanlarının, T test süresinden fazla olacaktır. “ T ’de sağ sansürlü” olarak isimlendirilen bir gözlemin kesin değeri bilinmese bile bunun T ’ye eşit veya daha büyük olacağı bilinmektedir [15].

Eğer bir birimin farklı hata zamanı bilinmiyor fakat hata zamanının verilen bir değerden daha az olduğu biliniyor ise hata zamanına “sol sansürlü” denir. Güvenilirlik veri toplamasında sansürlemenin bu çeşidi pratik olarak asla gözükmediğinden bu konu ile ilgilenilmez [3]. Eğer sadece bir birimin hatasının herhangi bir aralıkta olduğu bilinebiliyorsa ilgili veriye “gruplanmış” veya “aralık” verisi denir. Önemli olan sansürlenmiş verinin nasıl elde edileceğine karar vermektir. En temel ayırım rasgele ve rasgele olmayan sansürleme ile yapılır.

➤ I. Tip Sansürleme

Sağ sansürlü durumu göz önünde tutarak, eğer test rasgele olmayan bir T zamanında sonlandırılır ise test süresince gözlemlenen hataların sayısı, r , rasgele bir değişken olacaktır. Bu tür sansürlü veriye “I. Tip” veya “kendi başına sağ zaman sansürlü” veri denir ve ilgili test çoğu zaman “zaman-sonlandırmalı” olarak isimlendirilir.

n üniteli bir örneklemenin her ünitesi farklı zaman periyotlarında ($L_1, L_2, \dots, L_n$) gözlemlendiğinde her ünitenin t_i Hata Zamanı, ilgili zaman periyodundan küçük ise ($t_i < L_i$) Hata Zamanlarının farklı değerler olduğu varsayılır. Aksi halde t_i , i 'ninci birimin Hata Zamanının L_i 'den büyük olduğunu gösteren “Sansürleme Zamanı” olarak varsayılır. Bu “I. Tip çoğaltılmış sansürlü” veri durumudur; yukarıda varsayılan durumun, $L_1 = L_2 = \dots = L_n = T$ eşit olduğundaki özel halidir. Örneğin test, n örnekleme boyutu ile başlayabilir fakat verilen $L_1, L_2, \dots, L_k$ ($k > n$) zamanlarında bileşenlerin önceden belirlenmiş sayıları testten çıkarılabilir.

➤ II. Tip Sansürleme

Bir test, hata sayılarının rasgele olmayan sayılar (r) olduğu gözlemlendiğinde de sonlandırılabilir. Bu durumda test sayısı aralığı rasgele bir değişken olacaktır ve bu duruma “II. Tip sağ sansürlü” denir.

II. Tip sansürlemede en küçük r hata zamanları ($t_{(1)} < t_{(2)} < \dots < t_{(r)}$), hata zamanları N olan örneklemin dışında belli değerler olarak gözlemlenir. $t_{(i)}$ ($i=1, 2, \dots, r$) hata zamanları (I. tipteki duruma benzer şekilde) rasgele değişken dağılımları olarak kabul edilir.

Bir sürdürülebilirlik testinde, yenileme yapılan veya yapılmayan n bileşen yer aldığı zaman, kesin bileşenlerin uzun ömürlerinden dolayı testi sonlandırmak ve sonlandırma zamanına göre gözlemlenen veriye dayalı güvenilirlik analizi yapmak çoğu zaman gerekli olur. I. ve II. Tip sansürlemelerde bahsedildiği üzere olası sürdürülebilirlik testi sonlandırmanın iki temel çeşidi vardır. Birincisi I. Tip sağ sansürlü veri ile sonuçlanan “zaman-sonlandırmalı” ve ikincisi II. Tip sağ sansürlü veri ile sonuçlanan “hata-sonlandırmalı” sürdürülebilirlik testleridir. Zaman-sonlandırmalı sürdürülebilirlik testi üzerinde n bileşen yer alır ve önceden belirlenen zaman geçtiğinde test sonlandırılır. Test zamanı dahilinde hataya uğrayan bileşenlerin sayısı ve hata zamanları kayıt edilir. Hata-sonlandırmalı sürdürülebilirlik testinde ise önceden belirlenen hataya uğrayacak bileşenlerin sayısına ulaşıldığında test sonlandırılır. Hataya uğrayan her bileşenin (en son hatanın da zamanını kapsayan) hata zamanları kayıt edilir.

➤ Rasgele Sansürleme

Rasgele sansürleme genellikle güvenilirlik veri analizinde ayrı ayrı tahminlenmesi gereken bir kaç hata şekilleri (tarzları) olduğunda kullanılır. Tüm sistem “yarışan

riskler” veya “yarışan seri” olarak dikkate alınırken, hata zamanları her bir hata şeklinden dolayı farklı dağılımlara sahip rasgele değişkenler olarak dikkate alınır.

3.4.1 Üstel Dağılım ile Tek Değer Tahminlemesi

3.4.1.1 Yenileme ile I. Tip Sürdürülebilirlik Testi

Bir yenileme testinde n tane bileşenin yer aldığını ve testin belirlenmiş bir t_0 zamanında sonlandırıldığını varsayalım. Test üzerinde (tüm hatalı ve hatasız bileşenler tarafından) toplanmış zaman T ile gösterilirse;

$$T = n.t_0 \quad (3.70)$$

olur. Yukarıdaki denklem her zaman birimine uygun (örneğin dakikada), test başlangıcından t_0 zamanına kadar, n bileşenin tamamen teste girdiğini gösterir. Eğer t_0 zamanına kadar r kadar hata gözlemlenir ise, varsayılan üstel dağılım, bileşen hata oranının en çok olabilir nokta tahmini;

$$\hat{\lambda} = \frac{r}{T} \quad (3.71)$$

olur. Buna göre Ortalama Hata Zamanı;

$$MTTF = \frac{T}{r} \quad (3.72)$$

ve test sırasında test edilen birimlerin sayısı, n' , aşağıdaki gibidir;

$$n' = n + r \quad (3.73)$$

3.4.1.2 Yenilemeden I. Tip Sürdürülebilirlik Testi

Yenileme olmadan testte n tane bileşenin yer aldığını ve r hataları meydana gelirken testin belirlenmiş bir t_0 zamanında sonlandırıldığını varsayalım. Sürdürülebilir aktiviteye sahip olan ve olmayan bileşenler için test üzerinde toplam zaman, T , şu şekilde elde edilir;

$$T = \sum_{i=1}^r t_i + (n - r).t_0 \quad (3.74)$$

Denklemdaki $\sum_{i=1}^r t_i$, testteki r hatalı bileşenin toplanmış zamanını göstermektedir ve hayatta kalan bileşenlerin toplanmış zamanı ise $(n-r)t_0$ ile gösterilmektedir. (3.74) denkleminde faydalanarak, (3.72) ve (3.73) denklemleri yardımı ile hata oranı ve Ortalama Hata Zamanı elde edilebilir. Hiç bir yenileme olmadan test edilen toplam bileşen sayısı $n' = n$ dir.

3.4.1.3 Yenileme ile II. Tip Sürdürülebilirlik Testi

Yenileme ile n tane bileşenin test edildiği ve bir bileşenin hataya uğrar uğramaz (en son hata hariç) belirlenmiş bir bileşen ile değiştirildiği bir durumu için eğer test r 'ninci hata meydana geldiği zamandaki bir t_r zamanından sonra sonlandırılırsa, hatalı ve hatasız bileşenlerle ilişkili test üzerindeki toplam zaman, T ;

$$T = n.t_r \quad (3.75)$$

olur. Bu durumda t_0 'dan farklı t_r , bir değişkendir. Eğer hata zamanı üstel dağılım izler ise λ tahminlemesi;

$$\hat{\lambda} = \frac{r}{T} \quad (3.76)$$

olur. Ortalama Hata Zamanının tahmini ise;

$$\hat{MTTF} = \frac{T}{r} \quad (3.77)$$

ve test edilen birimlerin toplam sayısı, n' ;

$$n' = n + r - 1 \quad \text{dir.} \quad (3.78)$$

olur. Denklemdaki $(r - 1)$, hataların ve yenilenen bileşenlerin toplam sayısıdır. En sondaki hariç tüm hatalı unsurlar yenilenir çünkü en son unsur hataya uğradığında (örneğin; r 'ninci hata gözlemlendiğinde) test sonlandırılır.

3.4.1.4 Yenilemeden II. Tip Sürdürülebilirlik Testi

Yenileme olmadan n tane bileşenin test edildiği zaman (bir hata oluştuğunda) hatalı bileşen bir yenisi ile değiştirilmediği diğer bir durumda, test r 'ninci hata meydana

geldiği zamandaki t_r zamanında sonlandırılır. Hatalı ve hatasız bileşenlerin test üzerindeki toplam zamanının elde edilmesi;

$$T = \sum_{i=1}^r t_i + (n-r).t_r \quad (3.79)$$

olur. Denklemdaki $\sum_{i=1}^r t_i$, hatalı bileşenlerin toplanmış zamanıdır ve $(n-r).t_r$ sürdürülebilir aktiviteye sahip bileşenlerin toplanmış zamanını gösterir. Yukarıdaki denklemler yardımı ile hata oranı ve Ortalama Hata Zamanı elde edilir. Ayrıca bu testteki toplam bileşen sayısı $n' = n$ 'e eşittir.

3.4.2 Üstel Dağılım ile Aralık Tahminlemesi

Hata zamanı λ parametresi ile üstel dağılım gösteriyor ise, ikinci tip sansürlü veri (hata sonlandırmalı test) için $2r\lambda / \hat{\lambda} = 2\lambda T$ miktarının $2r$ özgürlük derecesiyle Ki-kare dağılımına sahip olur. Sansürlenmemiş veri, II.tip sağ sansürlü verinin ($r = n$ iken) kısmı durumu olarak, $2r\lambda / \hat{\lambda}$ 'nin dağılımından faydalanarak [16];

$$\Pr \left[\chi_{\alpha/2}^2(2r) \leq \frac{2r\lambda}{\hat{\lambda}} \leq \chi_{1-\alpha/2}^2(2r) \right] = 1 - \alpha \quad (3.80)$$

elde edilir. $\hat{\lambda} = r / T$ den yararlanarak tekrar uyarılma yapılırsa, λ 'nın gerçek değeri için iki taraflı güven aralığı;

$$\Pr \left[\frac{\chi_{\alpha/2}^2(2r)}{2T} \leq \lambda \leq \frac{\chi_{1-\alpha/2}^2(2r)}{2T} \right] = 1 - \alpha \quad (3.81)$$

olur. Üst güvenilirlik sınırı (tek taraflı güven aralığı) ise;

$$\Pr \left[0 \leq \lambda \leq \frac{\chi_{1-\alpha}^2(2r)}{2T} \right] = 1 - \alpha \quad (3.82)$$

olur. Bir $t = t_0$ zamanında Ortalama Hata Zamanı ve $R(t)$ için tek taraflı ve çift taraflı güven aralıkları denklem (3.81) ve (3.82)'den elde edilir. Sonuçlar tablo 3.1'de özetlenmektedir [17].

Tablo 3.1. λ , MTTF ve $R(t)$ için %100(1 - α) Güvenilirlik Sınırları

Parametre	I. Tip (Zaman Sonlandırılmalı Test)			
	Tek Taraflı Güvenilirlik Sınırları		Çift Taraflı Güvenilirlik Sınırları	
	Alt Sınır	Üst Sınır	Alt Sınır	Üst Sınır
λ	0	$\frac{\chi^2_{1-\alpha}(2r+2)}{2T}$	$\frac{\chi^2_{\alpha/2}(2r)}{2T}$	$\frac{\chi^2_{1-\alpha/2}(2r+2)}{2T}$
MTTF	$\frac{2T}{\chi^2_{1-\alpha}(2r+2)}$	∞	$\frac{2T}{\chi^2_{1-\alpha/2}(2r+2)}$	$\frac{2T}{\chi^2_{\alpha/2}(2r)}$
$R(t_0)$	$\exp\left[-\frac{\chi^2_{1-\alpha}(2r+2)}{2T}t_0\right]$	1	$\exp\left[-\frac{\chi^2_{1-\alpha/2}(2r+2)}{2T}t_0\right]$	$\exp\left[-\frac{\chi^2_{\alpha/2}(2r)}{2T}t_0\right]$
Parametre	II. Tip (Hata Sonlandırılmalı Test)			
	Tek Taraflı Güvenilirlik Sınırları		Çift Taraflı Güvenilirlik Sınırları	
	Alt Sınır	Üst Sınır	Alt Sınır	Üst Sınır
λ	0	$\frac{\chi^2_{1-\alpha}(2r)}{2T}$	$\frac{\chi^2_{\alpha/2}(2r)}{2T}$	$\frac{\chi^2_{1-\alpha/2}(2r)}{2T}$
MTTF	$\frac{2T}{\chi^2_{1-\alpha}(2r)}$	∞	$\frac{2T}{\chi^2_{1-\alpha/2}(2r)}$	$\frac{2T}{\chi^2_{\alpha/2}(2r)}$
$R(t_0)$	$\exp\left[-\frac{\chi^2_{1-\alpha}(2r)}{2T}t_0\right]$	1	$\exp\left[-\frac{\chi^2_{1-\alpha/2}(2r)}{2T}t_0\right]$	$\exp\left[-\frac{\chi^2_{\alpha/2}(2r)}{2T}t_0\right]$

Eğer bir testte hiç bir hata gözlemlenmez ise, biçimsel tahminleme $\hat{\lambda} = 0$ veya Ortalama Hata Zamanı (MTTF) = ∞ verir. Küçük veya sınırlı bir test için bu gerçekçi olarak doğru değildir. Testin devam ettirilmesinde mutlak bir hata gözlemlenecektir. λ için bir üst güven tahmini $r = 0$ iken elde edilir, ancak alt güvenlik sınırı $r = 0$ ile sağlanamaz.

3.4.3 Lognormal Dağılım

Genellikle zaman içinde meydana gelen kesin olayları tarif etmek için kullanılır. Örneğin bir donanımın bakımı için gereken zaman aralığı uzunluğu bir rasgele değişken ile temsil edilen lognormal dağılımdır. Çünkü lognormal dağılım iki parametreye sahiptir ve parametre tahminlemesi üstel dağılımına göre daha kullanışlıdır [3]. Verinin doğal logaritması alınarak analiz normal dağılıma indirgenir, böylece n boyutundaki bir örnekleme için lognormal dağılımın iki parametresinin nokta tahminlemeleri;

$$\hat{\mu}_t = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(t_i)}{n} \quad (3.83)$$

$$\hat{\sigma}_t^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [\ln(t_i) - \hat{\mu}]^2}{n-1} \quad (3.84)$$

olur. μ_t için güven aralığı ise;

$$\Pr \left[\hat{\mu}_t - \frac{(\hat{\sigma}_t) t_{\alpha/2}}{\sqrt{n}} \leq \mu_t \leq \hat{\mu}_t + \frac{(\hat{\sigma}_t) t_{\alpha/2}}{\sqrt{n}} \right] = 1 - \alpha \quad (3.85)$$

dir. σ_t^2 nin kendi güven aralığı ise aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\Pr \left[\frac{(n-1)\hat{\sigma}_t^2}{\chi_{1-\alpha/2}(n-1)} \leq \sigma_t^2 \leq \frac{(n-1)\hat{\sigma}_t^2}{\chi_{\alpha/2}(n-1)} \right] = 1 - \alpha \quad (3.86)$$

3.4.4 Weibull Dağılımı

Weibull dağılımı; artan, azalan veya sabit hata oranı dağılımlarından varsayılan veriler için kullanılır [3]. Test üzerinde tüm n ünitelerin yer alması durumunda veya gözlemlerin hataya uğramasında, Weibull dağılımının denklem (3.19) β ve α parametrelerinin en çok olabilirlik tahminleri lineer olmayan sistemin bir çözümü olarak,

$$\frac{\sum_{i=1}^n (t_i)^{\hat{\beta}} \ln t_i}{\sum_{i=1}^n (t_i)^{\hat{\beta}}} - \frac{1}{\hat{\beta}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i \quad \text{ve} \quad \hat{\alpha} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \ln(t_i)^{\hat{\beta}}}{n} \right)^{1/\hat{\beta}} \quad (3.87)$$

bulunur.

3.4.5 Binomial Dağılım

n denemede X hataların gözlemlenmesi burada hatanın sabit bir olasılığı olduğunu gösterir ve bu sebeple binomial dağılım uygun bir model olarak kullanılır. Bu yedek bileşenler veya sistemler için genel tercih edilen bir durumdur.

p için en iyi tahminci $\hat{p} = x / n$ denklemi ile ve p 'nin alt ve üst güvenilirlik sınırları tanımlanır [10].

$$p_1 = \{1 + (n - x + 1)x^{-1}F_{1-\alpha/2}[2n - 2x + 2; 2x]\}^{-1} \quad (3.88)$$

$$p_n = \{1 + (n - x)\{(x + 1)F_{1-\alpha/2}[2x + 2; 2n - 2x]\}^{-1}\}^{-1} \quad (3.89)$$

Denklem (3.89)'daki $F_{(1-\alpha/2)}(f_1; f_2)$, payı için özgürlük derecesi f_1 ve paydası için özgürlük derecesi f_2 olan F dağılımının $(1 - \alpha / 2)$ kartili veya $100(1 - \alpha / 2)$ yüzdeliğidir.

3.5 PARAMETRİK OLMAYAN DAĞILIM TAHMİNLEMESİ

Herhangi bir güvenilirlik ölçüsü veya indeksi, hata zamanı kümülatif dağılım fonksiyonu veya güvenilirlik fonksiyonun bir terimi olarak ifade edilebilir. Bu fonksiyonların tahminlemesi büyük önem arz etmektedir. Kümülatif dağılım fonksiyonun tahmilenmesinde en yaygın kullanılan Bölüm 2'de tanımlanan (2.83) deneysel (örnekleme) dağılım fonksiyonudur [10].

3.5.1 Bütün ve Kendi Başına Sansürlü Verilerin Kümülatif Dağılım ve Güvenilirlik Fonksiyonları için Güven Aralıkları

Bir örnekleme dağılım fonksiyonun çizimi için bütün bir örnekleme ihtiyaç vardır. Ayrıca sağ sansürlü örneklemelerin, gözlemlenen hatadan en son zamandan düşük olan $(t < t_{(r)})$ hata zamanları için örnekleme dağılım fonksiyonu çizimi yapılabilir. Örnekleme birimlerine bağlı olarak örnekleme dağılım fonksiyonu rasgele bir fonksiyondur. Herhangi bir t noktası için örnekleme dağılım fonksiyonu, t 'den önce hataya uğrayan örnekleme birimlerinin kesridir ve $S_n(t)$ ile ifade edilir.

Bir binomial deneme içindeki p olasılığının tahmini örnekleme dağılım fonksiyonudur ve bu olasılık $p=F(t)$ dir. Kümülatif dağılım fonksiyonu ve güvenilirlik fonksiyonu arasındaki ilişkiyi ve örnekleme dağılım fonksiyonunu denklem (2.83) kullanarak güvenilirlik fonksiyonunun kendi tahmini elde etmek kolay olur. Bu tahmine “deneysel (örnekleme) güvenilirlik fonksiyonu” denir ve

$$R_n(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < t_{(1)} \\ 1 - \frac{i}{n} & t_{(i)} \leq t \leq t_{(i+1)} \\ 0 & t_{(n)} \leq t < \infty \end{cases} \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (3.90)$$

Şeklinde ifade edilir. t zamanı içinde gözlemlenen hataların ortalama sayısı $E(r) = p.n = F(t).n$ eşittir, bundan dolayı t 'den önce hataya uğrayan örnekleme birimlerinin kesrinin ortalaması $E(r/n) = p = F(t)$ dir ve bu kesrin varyansı;

$$\text{var}\left(\frac{r}{n}\right) = \frac{p(1-p)}{n} = \frac{F(t)[1-F(t)]}{n} \quad (3.91)$$

olur. Denklem (3.91)'de pratik olarak $F(t)$ yerine $S_n(t)$ kullanılmaktadır. Örnekleme boyutu (n), aynı ortalama ve varyansa sahip [ör. $\mu = n.p$, $\sigma^2 = n.p(1-p)$] bir normal dağılım ile yaklaşılabilen, binomial dağılım şeklinde artar. Bu yaklaşım kullanılarak bilinmeyen kümülatif dağılım fonksiyonu, $F(t)$, için verilen herhangi bir t noktasında $100(1 - \alpha) \%$ güven aralığı;

$$S_n(t) - z_{1-\alpha/2} \left(\frac{S_n(t)[1-S_n(t)]}{n} \right)^{1/2} \leq F(t) \leq S_n(t) + z_{1-\alpha/2} \left(\frac{S_n(t)[1-S_n(t)]}{n} \right)^{1/2} \quad (3.92)$$

elde edilir. Denklemdeki z_α , standart normal dağılımındaki α seviyesinin kartilidir. Güvenilirlik fonksiyonunun tahmini $R_n(t) = 1 - S_n(t)$ olarak hesaplanır.

$S_n(t) = r / n$ ($r = 0, 1, 2, \dots, n$) iken t noktasında en alt güvenilirlik sınırı, $F_l(t)$, p 'nin en büyük değeridir ve değişkenliği;

$$I_p(r, n-r+1) \leq \frac{\alpha}{2} \quad (3.93)$$

olur. Aynı noktadaki en üst güvenilirlik sınırı, $F_u(t)$, ise en küçük p değerine eşittir.

$$I_{1-p}(n-r, r+1) \leq \frac{\alpha}{2} \quad (3.94)$$

Denklem (3.94)'de $I_t(\alpha, \beta)$ denklem (2.37) gibi tamamlanmamış beta fonksiyonudur.

Aynı özellikteki veriyi kullanarak, güvenilirlik fonksiyonunun alt güvenilirlik sınırı, parametrik olmayan yaklaşım ile tahmin edilebilmektedir. Denklem (3.94)'de $1-p = 1 - F(t)$ yer değişimi ile güvenilirlik fonksiyonu, $R(t)$, sağlanır.

$$I_R(n-r, r+1) \leq \alpha \quad (3.95)$$

3.5.2 Çoğalan Sansürlü Verilerin Kümülatif Dağılım ve Güvenilirlik Fonksiyonları için Güven Aralıkları

Nokta ve güvenilirlik tahminlemesi çoğalan sansürlü verilere uygulanamaz, bu tür örneklemelere “Kaplan-Meier veya Çarpım Sınır Tahmini (MLE)” olarak adlandırılan prosedür uygulanır [3].

Hata zamanları n olan bir örnekleme düşünüldüğünde ve sadece k hata zamanları bilinmekte ise, zaman dizini $t_{(1)} \leq t_{(2)} \leq \dots \leq t_{(k)}$ şeklinde sıralandığında ve $t_{(0)} \cong 0$ olduğunda, $t_{(i)}$ zamanından önce gözlemlenen birim sayısı n_j ile ifade edilirse, hata zaman kümülatif dağılım fonksiyonunun sürekli olduğu kabul edilir ise her $t_{(i)}$ zamanında sadece bir hata meydana gelir ve $n_{j+1} = n_j - 1$ olur. Bu koşullar altında çarpım limit tahmini;

$$S_n(t) = 1 - R_n(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_{(1)} \\ 1 - \prod_{j=1}^i \frac{n_j - 1}{n_j} & t_{(i)} \leq t < t_{(i+1)}, \quad i = 1, \dots, m-1 \\ 1 & t \geq t_{(m)} \end{cases} \quad (3.96)$$

m tamsayısı için; eğer $k < n$ ise $m = k$, eğer $k = n$ ise $m = n$ olur.

S_n (veya R_n)’nin varyansını tahmin etmek için;

$$\hat{\text{var}}[S_n(t)] = \hat{\text{var}}[R_n(t)] = \sum_{j: t_{(j)} < t} \frac{d_j}{n_j(n_j - d_j)} \quad (3.97)$$

Greenwood formülü kullanılır [15].

3.6 BAYSEN TAHMİNLEME PROSEDÜRÜ

Baysen yaklaşımında payın parametreleri rasgele değişken olarak davranır ve gerçek değerleri bilinmemektedir. Bu sebeple bir dağılım parametreyi temsil için atanabilir, dağılımın ortalaması (bazı durumlarda medyanı) parametrenin tahmini olarak kullanılabilir. Baysen terimi içinde bir parametrenin olasılık yoğunluk fonksiyonu apriori ve aposteriori olasılık yoğunluk fonksiyonundan elde edilir [3].

Baysen teoremi üç formun birleşimi olarak yazılabilir; ayrı, sürekli ve karışık. Güvenilirlik ve risk analizinde parametre tahmin edilmesinde çoğunlukla sürekli ve karışık formları kullanılır.

Payın bir parametresine θ ise ve θ 'nın sürekli bir rasgele değişken olduğunu kabulü ile θ 'nın apriori ve aposteriori dağılımları, sürekli olasılık yoğunluk fonksiyonlarını temsil edebilir. θ 'nın sürekli apriori olasılık yoğunluk fonksiyonu $h(\theta)$ ve örnekleme dayalı olabilirlik fonksiyonu, t , $l(\theta|t)$ ile temsil edilirse; θ 'nın aposteriori olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$f(\theta|t) = \frac{h(\theta)l(\theta|t)}{\int_{-\infty}^{\infty} h(\theta)l(\theta|t)d\theta} \quad (3.98)$$

olur. Bu durumda Baysen çıkarımı aşağıdaki üç safhayı kapsar;

1. Elverişli veri tipine ve payın dağılımına bağlı olarak olabilirlik fonksiyonu çizilmesi.
2. Bir apriori dağılım formunda payın parametresi ile ilgili apriori bilginin ölçülmesi.
3. θ parametresinin gerçek değeri ve onun tahmini $\hat{\theta}$ arasındaki farkın bir ölçümü olan kayıp fonksiyonun, $L(\theta, \hat{\theta})$, seçilmesi. En yaygın olanı θ ve onun tahmini $\hat{\theta}$ arasındaki mesafenin karesine eşit olan ikinci dereceden kareler hatasıdır.

$$L(\theta, \hat{\theta}) = |\theta - \hat{\theta}| \quad (3.99)$$

Baysen nokta tahmini, tahmini mümkün olduğu kadar azaltır ve Baysen risk, $G(\hat{\theta})$, olarak da adlandırılır. Baysen risk, aposteriori dağılıma uyan kayıp fonksiyonun beklenen değeri (ortalaması);

$$G(\hat{\theta}) = \int_{-\infty}^{\infty} L(\theta, \hat{\theta}) f(\theta|t) d\theta \quad (3.100)$$

şeklinde tanımlanır. Baysen güven aralığı Bayes olasılık aralığı olarak bilinir ve aposteriori dağılım ile ilişkisi

$$\Pr(\theta_l < \theta \leq \theta_u) = 1 - \alpha \quad (3.101)$$

olur. Klasik tahminlemeye bezer şekilde Baysen tahminleme prosedürü de parametrik ve parametrik olmayan olarak ayrılmaktadır. Parametrik Baysen tahminleri ise; N birimden oluşan bir test çözüme alındığında, test sonucunda r tane farklı hata zamanı, $t_{(1)} < t_{(2)} < \dots < t_{(r)}$, ve $N - r$ sansürleme zamanı, $t_{c1}, t_{c2}, \dots, t_{c(N-r)}$, ise test üzerindeki toplam zaman, T ;

$$T = \sum_{i=1}^r t_{(i)} + \sum_{i=1}^{N-r} t_{ci} \quad (3.102)$$

şeklinde olur [3]. Hata zamanının üstel dağılıma sahip olduğu varsayılır ise üstel dağılımın λ parametresi elde edilir. λ parametresinin apriori dağılımı yerine bir gama dağılımının kullanıldığını kabul edilirse, gama dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu bir hata zaman dağılımını verdiğinden olasılık yoğunluk fonksiyonunu λ 'nın bir fonksiyonu olarak tekrar ifade edilirse;

$$h(\lambda; \delta, \rho) = \frac{1}{\Gamma(\delta)} \rho^\delta \lambda^{\delta-1} e^{-\rho\lambda}, \quad \lambda > 0, \quad \rho \geq 0, \quad \delta \geq 0 \quad (3.103)$$

elde edilir. Baysen yaklaşımına göre ρ ve δ parametreleri apriori dağılım parametreleridir ve çoğunlukla “hiperparametreler” olarak adlandırılırlar [3]. Olabilirlik fonksiyonu uygun veri ve üstel hata zamanı dağılımı için;

$$l(\lambda|t) = \prod_{i=1}^r \lambda e^{-\lambda t_{(i)}} \prod_{j=1}^{N-r} e^{-\lambda t_{(j)}} = \lambda^r e^{-\lambda T} \quad (3.104)$$

yazılır. Apriori dağılım denklem (3.103), olabilirlik fonksiyonu denklem (3.104) ve Baysen teoremi denklem (3.98) kullanılarak λ parametresinin aposteriori olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$f(\lambda|T) = \frac{e^{-\lambda(T+\rho)} \lambda^{r+\delta-1}}{\int_0^\infty \lambda^{r+\delta-1} e^{-\lambda(T+\rho)} d\lambda} \quad (3.105)$$

bulunur. Gama fonksiyonundan yararlanarak paydadaki integral;

$$\int_0^\infty \lambda^{r+\delta-1} e^{-\lambda(T+\rho)} d\lambda = \frac{\Gamma(\delta+r)}{(\rho+T)^{\delta+r}}$$

formunda yazılır ve sonuç olarak λ 'nın olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$f(\lambda|T) = \frac{(\rho + T)^{\delta+r}}{\Gamma(\delta + r)} e^{-\lambda(T+\rho)} \lambda^{r+\delta-1} \quad (3.106)$$

olur. Apriori fonksiyon ile karşılaştırıldığında aposteriori fonksiyonunun $\rho' = r + \delta$ ve $\lambda' = T + \rho$ parametreleri ile bir gama dağılımı olduğu sonucuna ulaşılır. λ 'nın Baysen nokta tahmini, ρ' ve λ' parametresine sahip aposteriori gama dağılımının ortalamasıdır, bundan dolayı Baysen nokta tahmini, λ_B , bu iki parametre oranına eşittir.

$$\lambda_B = \frac{\rho'}{\lambda'} = \frac{r + \delta}{T + \rho} \quad (3.107)$$

Denklem (3.101) ile olasılık aralıkları elde edilebilir, örneğin λ için tek taraflı üst seviye 100 $(1-\alpha)$ Baysen olasılık aralığı, aposteriori dağılımına dayanarak (3.106) aşağıdaki denklemden elde edilebilir. λ için aynı tek taraflı üst olasılık aralığı $\Pr(\lambda - \lambda_u) = 1 - \alpha$ şeklinde açıklanabilir ve klasik güven aralığına benzer formda, örneğin Ki-kare dağılım formu biçiminde, aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\Pr[2\lambda(\rho + T) < \chi^2_{1-\alpha}[2(\delta + r)]] = 1 - \alpha$$

ve

$$\lambda_u = \frac{\chi^2_{1-\alpha}[2(\delta + r)]}{2(\rho + T)} \quad (3.108)$$

3.6.1 Apriori Dağılım Parametrelerinin Seçilmesi

Baysen nokta tahmini, λ_B , şu şekilde yorumlanabilir; test üzerinde toplam zamanı ρ olan bir Apriori test sırasında δ parametresi, gözlemlenmiş hataların Apriori sayısı olarak varsayılır. Bundan dolayı; δ/ρ oranı, λ 'nın apriori tahmini olarak seçilir ve aynı zamanda apriori gama dağılımının ortalama değerine eşittir. λ 'nın apriori tahminini bulmak için öncelikle δ ve ρ nin bulunması gereklidir. Apriori nokta tahmini λ_p ile ifade edilirse, sadece $\lambda_p = \delta/\rho$ oranı şeklinde tahmin yapılabilir. Bu iki parametrenin ayrı olarak tahmin edilebilmesi için bu apriori tahminin doğruluğu hakkında ilave bilgiye ihtiyaç duyulur. Gama dağılımının varyansı δ/ρ^2 oranına eşit olduğunda apriori dağılımın değişim (varyasyon) katsayısı $1/\delta^{1/2}$ değerine eşit olur. Değişim

katsayısı, λ_p nin apriori nokta tahmini için bir nisbi doğruluk ölçümü olarak kullanılabilir.

Apriori nokta tahmini, λ_p , ve tahmininin kısmi hatasından yararlanarak apriori gama dağılımının parametreleri tahmin edilebilir. Örneğin; λ_p apriori nokta tahmini 0.01 değerinde iken, δ ve ρ parametrelerinin değişik değerleri için değişim katsayıları Tablo 3.2’te gösterilmektedir.

Tablo 3.2. Gama Apriori Dağılımının Değişim Katsayısı ve Parametreleri (Ortalama değeri 0.01’e eşitken)

Şekil Parametresi, δ , (Hataların aprior sayısı)	Ölçek Parametresi, ρ , (Test üzerinde aprior toplam zamanı)	Değişim Katsayısı, %
1	100	100
5	500	45
10	1000	32
100	10000	10

Parametrelerin seçilmesinde diğer bir yöntemde apriori dağılımın kartili (çeyrek) tahminlemesidir [12, 17]. Apriori gama dağılımının kümülatif dağılım fonksiyonu $H(\lambda, \rho, \delta)$ ile ifade edilirse, seviye p ’nin bir kartilinin tanımı (λ_p) ve (3.103) denkleminde elde edilen $h(\lambda)$ hatırlandığında aşağıdaki denklem elde edilir.

$$H(\lambda_p, \rho, \delta) = \int_0^{\lambda_p} h(x) dx = p \quad (3.109)$$

İki farklı seviye için, p_1 ve p_2 , iki bilinmeyenli iki denklem oluşturulduğunda, parametreler aşağıdaki gibi bulunmaktadır;

➤ p_1, λ_{p1}, p_2 ve λ_{p2} değerleri belirlenir.

$$H(\lambda_{p1}, \rho, \delta) = \Pr(\lambda < \lambda_{p1}) = p_1$$

$$H(\lambda_{p2}, \rho, \delta) = \Pr(\lambda < \lambda_{p2}) = p_2$$

Örneğin; %90 olasılıkla λ parametresi 0.1’den küçük ve %50 olasılıkla 0.01’den küçük olduğu belirlenebilir.

➤ Yukarıdaki denklemde δ ve ρ parametreleri için sayısal çözüm yolları izlenir.

3.6.2 Uniform Apriori Dağılımı

Bu apriori dağılım aşağıdaki biçimde basit bir forma sahiptir.

$$h(\lambda; a, b) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a < \lambda < b \\ 0, & \text{Aksi halde} \end{cases} \quad (3.110)$$

Denklem (3.104) olabilirlik fonksiyonundan faydalanarak aposteriori olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f(\lambda|t) = \frac{\lambda^r e^{-\lambda T}}{\int_a^b \lambda^r e^{-\lambda T} d\lambda}, \quad a < \lambda < b \quad (3.111)$$

(3.111) denkleminde λT yerine y yazarsak ve tamamlanmamış gama fonksiyonu tanımından da faydalanarak, aposteriori olasılık yoğunluk fonksiyonu denklem (3.112)'deki forma dönüştürülür.

$$\begin{aligned} \int_a^b \lambda^r e^{-\lambda T} d\lambda &= \int_{aT}^{bT} \frac{y^r e^{-y}}{T^{r+1}} dy \\ \Gamma(c, z) &= \int_0^z y^{c-1} e^{-y} dy, \quad c > 0 \\ \int_a^b \lambda^r e^{-\lambda T} d\lambda &= \frac{1}{T^{r+1}} [\Gamma(r+1, bT) - \Gamma(r+1, aT)] \\ f(\lambda|t) &= \frac{t^{r+1} \lambda^r e^{-\lambda T}}{[\Gamma(r+1, bT) - \Gamma(r+1, aT)]}, \quad a < \lambda < b \end{aligned} \quad (3.112)$$

En çok olabilirlik nokta tahmini, r/T , aposteriori olasılık yoğunluk fonksiyonunun modu'na eşittir, ortalama değeri [17] tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\lambda_B = \frac{\Gamma(r+2, bT) - \Gamma(r+2, aT)}{T[\Gamma(r+1, bT) - \Gamma(r+1, aT)]} \quad (3.113)$$

Yoğunluk fonksiyonunun (3.112) integrali alınarak iki taraflı Baysen olasılık aralığı (λ_l ve λ_u) hesaplanır.

$$\begin{aligned}\Pr(\lambda < \lambda_l) &= \int_a^{\lambda_l} \frac{t^{r+1} \lambda^r e^{-\lambda T} dy}{\Gamma(r+1, bT) - \Gamma(r+1, aT)} = \frac{\Gamma(r+1, \lambda_l T) - \Gamma(r+1, aT)}{\Gamma(r+1, bT) - \Gamma(r+1, aT)} = \frac{\alpha}{2} \\ \Pr(\lambda > \lambda_u) &= \frac{\Gamma(r+1, bT) - \Gamma(r+1, \lambda_u T)}{\Gamma(r+1, bT) - \Gamma(r+1, aT)} = \frac{\alpha}{2}\end{aligned}\quad (3.114)$$

3.6.3 Binom Dağılım Parametresinin Baysen Tahmini

Belirlenmiş bir t zamanı için hatalı birimlerin yer değiştirmesi olmayan bir test üzerinde n tane özdeş birimin yer aldığını ve testte r tane hatanın mevcut olduğunu varsayalım. Hataların sayısı, r , parametreleri n ve $p(t)$ (t zamanı içinde tek bir birimin hata olasılığı) olan, binom dağılımına sahip süreksiz bir rasgele değişken olsun. Parametrik olmayan dağılım parametrelerinde de belirtildiği üzere $p(t)$ zamanın bir fonksiyonu olarak hata zaman kümülatif dağılım fonksiyonudur ve $1 - p(t)$ is güvenilirlik veya hayatta kalma fonksiyonudur.

p parametresinin en çok olabilirlik tahmini, r/n oranına eşittir ve klasik tahminlemede çoğunlukla bu tercih edilir. Güvenilirlik fonksiyonunda Baysen tahminleme prosedürü oluşturmak için, p 'yi tekli Bernolli denemesi içinde hayatta kalma olasılığı olarak varsayalım (bu durumda başarı, hayatta kalabilme anlamındadır). Eğer test üzerinde yer alan birimlerin sayısı, n , sabit tutulur ise test sırasında hataya uğramayan (başarılı) birimlerin sayısının (x) olasılık dağılımı, denklem 2.21'de gösterildiği gibi n ve x parametrelili binom dağılımı ile elde edilir.

$$f(x; n, p) = \frac{n!}{(n-x)!x!} p^x (1-x)^{n-x}$$

Buna karşılık olabilirlik fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$l(p|x) = c p^x (1-x)^{n-x} \quad (3.115)$$

Denklemdaki c , parametreye bağlı olmayan bir sabittir. $h(p)$ olasılık yoğunluk fonksiyonuna sahip herhangi bir sürekli aprior dağılımına karşılık aposterior olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$f(p|x) = \frac{p^x (1-p)^{n-x} h(p)}{\int_{-\infty}^{\infty} p^x (1-p)^{n-x} h(p) dp} \quad (3.116)$$

3.6.3.1 Standart Uniform Aprior Dağılım

Uniform dağılımın bir durumu olan $U(a, b)$ 'nin, Bayes kavramı içinde “toplam bilgisizliğin bir hali” ni temsil ettiğini varsayar isek, bu durum aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$h(p) = \begin{cases} 1, & 0 < p < 1 \\ 0, & \text{Aksi halde} \end{cases} \quad \text{ve}$$

$$f(p|x) = \frac{p^{(x+1)-1} (1-p)^{(n-x+1)-1}}{\int_0^1 p^{(x+1)-1} (1-p)^{(n-x+1)-1} dp} \quad (3.117)$$

Paydadaki integral aşağıdaki gibi açıklanabilir;

$$\int_0^1 p^{(x+1)-1} (1-p)^{(n-x+1)-1} dp = \frac{\Gamma(x+1)\Gamma(n-x+1)}{\Gamma(n+2)}$$

Böylece aposterior kümülatif dağılım fonksiyonunun, beta dağılımının, $f(p; x+1, n-x+1)$ olasılık yoğunluk fonksiyonu olduğu anlaşılır. Beta dağılımının ortalama değerinden faydalanarak (2.39), p parametresinin Bayes nokta tahmini aşağıdaki gibi yazılır.

$$p_B = \frac{x+1}{n+2} \quad (3.118)$$

Tamamlanmamış beta fonksiyonunun terimi şeklinde açıklanan beta dağılımının kümülatif dağılım fonksiyonu göz önüne alındığında, p parametresinin %100(1- α) iki taraflı Bayes olasılık aralığı aşağıdaki denklemlerin çözülmesi ile elde edilir.

$$\begin{aligned} \Pr(p < p_l) &= I_{p_l}(x+1, n-x+1) = \frac{\alpha}{2} \\ \Pr(p > p_u) &= I_{p_u}(x+1, n-x+1) = 1 - \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \quad (3.119)$$

3.6.3.2 Tepesiz Standart Uniform Aprior Dağılım

p parametresinin aprior olasılık yoğunluk fonksiyonunun aşağıdaki gibi olduğu varsayılır.

$$h(p|p_0, p_1) = \begin{cases} \frac{1}{p_1 - p_0}, & 0 \leq p_0 < p < p_1 \leq 1 \\ 0, & \text{Aksi halde} \end{cases} \quad (3.120)$$

Buna karşılık aposterior olasılık yoğunluk fonksiyonu kapalı formda açıklanamaz, fakat tamamlanmamış beta fonksiyonunun bir terimi biçiminde aşağıdaki gibi yazılabilir [17].

$$f(p|x) = \frac{\frac{\Gamma(n+2)}{\Gamma(x+1)\Gamma(n-x+1)} p^{(x+1)-1} (1-p)^{(n-x+1)-1}}{I_{p_1}(x+1, n-x+1) - I_{p_0}(x+1, n-x+1)}, \quad 0 \leq p_0 < p \leq 1 \quad (3.121)$$

Denklemdaki pay, $x+1$ ve $n-x+1$ parametrelerine sahip bir beta olasılık yoğunluk fonksiyonun formundadır. Aynı aposterior olasılık yoğunluk fonksiyonu, nokta tahmini hesaplarına daha uygun olan basit bir formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f(p|x) = \frac{p^{(x+1)-1} (1-p)^{(n-x+1)-1}}{\int_{p_2}^{p_1} p^{(x+1)-1} (1-p)^{(n-x+1)-1} dp} \quad (3.122)$$

Aposterior ortalama ise tamamlanmamış beta fonksiyonunun terimi içinde şu şekilde elde edilir;

$$p_B = \frac{x+1}{n+2} \left[\frac{I_{p_1}(x+2, n-x+1) - I_{p_0}(x+2, n-x+1)}{I_{p_1}(x+1, n-x+1) - I_{p_0}(x+1, n-x+1)} \right] \quad (3.123)$$

Aynı tahmin aposterior olasılık yoğunluk fonksiyonu (3.122) terimleri ile yapılabilir.

$$p_B = \frac{\int_{p_0}^{p_1} p^{(x+1)-1} (1-p)^{(n-x+1)-1} dp}{\int_{p_0}^{p_1} p^{(x+1)-1} (1-p)^{(n-x+1)-1} dp} \quad (3.124)$$

Aposterior olasılık yoğunluk fonksiyonundan yararlanarak, p parametresinin %100 $(1-\alpha)$ iki taraflı Bayes olasılık aralığı aşağıdaki denklemlerin çözümlenmesi ile elde edilir.

$$\begin{aligned}
I_{p_l}(x+1, n-x+1) &= \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) I_{p_0}(x+1, n-x+1) + \frac{\alpha}{2} I_{p_1}(x+1, n-x+1) \\
I_{p_u}(x+1, n-x+1) &= \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) I_{p_1}(x+1, n-x+1) + \frac{\alpha}{2} I_{p_0}(x+1, n-x+1)
\end{aligned} \tag{3.125}$$

3.6.3.3 Beta Aprior Dağılım

Dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu $n_0 > x_0 \geq 0$ olduğu durumlar için aşağıdaki uygun formda yazılabilir;

$$h(b; x_0, n_0) = \begin{cases} \frac{\Gamma(n_0)}{\Gamma(x_0)\Gamma(n_0 - x_0)} p^{x_0-1} (1-p)^{n_0-x_0-1} & 0 \leq p \leq 1 \\ 0, & \text{Aksi halde} \end{cases} \tag{3.126}$$

Denklemdaki x_0 bire, n_0 da ikiye eşit olduğu zaman olasılık fonksiyonu standart uniform dağılıma indirgenir.

Beta dağılımının ortalama değerini (2.39) göz önüne alırsak, aprior ortalamanın değeri x_0 / n_0 oranına eşit olur. Bundan dolayı bu parametreler, hayali t zamanı içinde n_0 birimin hayali testinden hayatta kalan (veya hatalı) özdeş birimlerin hayali sayısı olarak yorumlanabilir.

Aprior ortalama p_{pr} ve aprior beta dağılımının varyans katsayısı k ile ifade edilir ise, x_0 ve n_0 parametreleri aşağıdaki denklemlerin çözümü ile elde edilir.

$$p_{pr} = \frac{x_0}{n_0} \quad , \quad n_0 = \frac{1 - p_{pr}}{k^2 p_{pr}} - 1 \tag{3.127}$$

Aposterior olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda gösterildiği gibi aynı zamanda beta dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu olarak da kullanılmaktadır.

$$f(p|x) = \frac{\Gamma(n + n_0)}{\Gamma(x + x_0) \Gamma(n + n_0 - x - x_0)} p^{(x+x_0)-1} (1-p)^{(n+n_0-x-x_0)-1} \tag{3.128}$$

Buna karşılık olan aposterior ortalama aşağıdaki gibidir.

$$p_B = \frac{x + x_0}{n + n_0} \tag{3.129}$$

Denklemden n değeri sonsuza yaklaştıkça Baysen tahminlemesi en çok olabilirlik metoduna yaklaşmaktadır.

p parametresinin $\%100(1-\alpha)$ iki taraflı Bayes olasılık aralığı aşağıdaki denklemlerin çözümlenmesi ile elde edilir.

$$\begin{aligned} \Pr(p < p_l) &= I_{p_l}(x + x_0, n + n_0 - x - x_0) = \frac{\alpha}{2} \\ \Pr(p > p_u) &= I_{p_u}(x + x_0, n + n_0 - x - x_0) = 1 - \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \quad (3.130)$$

3.7 HATA ORANI TAHMİNLEME METOTLARI

Gözlemlenen veri eksikliğinden dolayı bileşen güvenilirlik hesaplaması, bir çok değişik faktör için jenerik hata veri düzenlemesi kullanımını gerektirebilir. Genellikle bu faktörler üç grupta toplanmaktadır.

1. Çevresel Faktörler: aşırı mekaniksel, elektriksel, nükleer ve kimyasal çevrelerden dolayı hata oranını etkileyen faktörlerdir.
2. Tasarım Faktörleri: işçilik ve kullanılan materyalin kalitesi, materyal bileşimi, fonksiyonel gerekler, geometri ve karmaşıklıktan dolayı hata oranını etkileyen faktörlerdir.
3. Operasyon Faktörleri: operasyondan kaynaklanan direnç, test edilme, bakım tutum gibi faktörlerdir.

İkinci derecede de yaş faktörü (erken ve eskitme periyotları için kullanılır) ve orijinal faktör (veri kaynağının doğruluğu için kullanılır) yer almaktadır. Bu açıklamalar altında hata oranı aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\lambda_a = \lambda_g K_E K_D K_O \dots, \quad (3.131)$$

λ_a : gerçek hata oranı

λ_g : jenerik esas hata oranı

K_E , K_D ve K_O : kısmi olarak çevre, tasarım ve operasyon için düzeltme faktörleri

4. SİSTEM GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

Bir sistem, özel koşullar ve zaman periyodunda bir görevi veya fonksiyonu yerine getirmek için birbirleri ile ilişki içinde olan bileşenlerin (alt sistemler, yazılım, insan operasyonları, vb.) sıralı düzenlenmesi olarak tanımlanmaktadır. Burada bir çok sistem seviyesi yer alabilir ve ilişki içindeki alt sistemler kompleks yapı oluşturabilir. Bu sebeple güvenilirlik analizinde, birimlerin kendi başlarına olan durumlarının yanı sıra birbirleri ile ve sistemin bütünü ile olan fiziksel ilişkileri önemlidir. Tezin bu kısmında tüm sistem güvenilirliğini hesaplamayı sağlayan, sistem bileşenleri arasındaki ilişkiyi modelleme metotları incelenecektir.

Denizcilikte bir sistemin tanımlanmasında aşağıdaki unsurlar dikkate alınır:

Coğrafik Alan: su yolları, özel rotalar veya limanlar

Çevresel Tanımlama: deniz durumu, meteorolojik şartlar, görüş vb.

Trafik: ulaşım miktarı, operasyon frekansı

Gemiler: sayı, kapasite, boyut ve teknik tanımlamalar

Diğer Aktiviteler: çevredeki trafik durumu ve tehlike yaratacak diğer olaylar

Bu çalışmada özellikle tanker ve tanker operasyonlarındaki risk değerlendirmesi temel alındığından, düzenli sefer yapan bir tanker operasyonu için aşağıdaki sistem seviyeleri tanımlanmaktadır.

- Kıyıdan uzak yükleme operasyonları
- Tanker trafiği ve diğer gemi hareketleri
- Özel su yollarındaki tanker trafiği
- Tahliye işlemleri
- Yük işlemleri ve elleçleme için gemi üzerindeki sistemler

Güvenilirlik blok diyagramları, bir sisteme ait bileşeninin sistem içindeki fiziksel konfigürasyonunda ve bileşen hatalarının sistem performansı üzerindeki etkisinin modellenmesinde kullanılır.

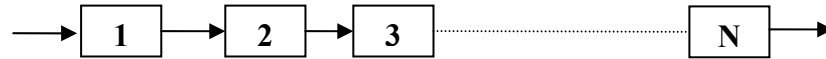
Güvenilirlik analizinde bir çok sistem modelleme planı mevcuttur. Aşağıda bahsedilecek modelleme planları: Güvenilirlik Blok Diyagramı, Hata Ağaç, Başarı Ağaç ve Olay Ağaç metotları ve Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik analizi ve Ana Mantık Diyagram analizleridir.

4.1 GÜVENİLİRLİK BLOK DİYAGRAMI

Güvenilirlik blok diyagramı sistem performansı üzerinde hataya uğrayan birimlerin etkisinin modellenmesi için kullanılır. Çoğunlukla bu, sistem içinde birimlerin fiziksel düzenlemesidir. Aşağıda sistem fonksiyonel konfigürasyonlarının bir çok çeşidi için sistem güvenilirliği gösterilmektedir.

4.1.1 Seri Sistemler

Bir seri konfigürasyonu içindeki güvenilirlik blok diyagramının, her hangi bir bloğun hataya uğradığı zamanki sonuçları, sistemin hatası içindedir. Buna göre bir seri sistemin fonksiyonel başarısı için, onun bütün blokları (birimleri), sistemin planlanan hedef zamanı süresince başarı ile fonksiyonuna devam etmelidir. Her hangi bir bileşenin işlevini yitirmesi tüm sistemin fonksiyonunu kaybetmesine neden olur. Şekil 4.1’de N bloktan oluşan bir seri sistemin blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Seri Sistem Güvenilirlik Blok Diyagramı

Şekil 4.1’deki sistemin güvenilirliği, tüm N bloğun planlanan t hedef zamanı süresince başarılı olmalarının, olasılığıdır. Bu olasılığa göre birbirinden bağımsız her blok için sistemin güvenilirliği, $R_s(t)$, aşağıdaki gibi elde edilir.

$$R_s(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_N(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (4.1)$$

$R_i(t)$: i ninci bloğun güvenilirliği

Bir seri sistem için riziko oranı (hemen veya anında meydana gelen hata oranı) da kullanılabilir tanımdır. $H(t) = -d\{\ln R(t)\}/dt$ ise denklem (4.1)’e göre sistemin riziko oranı olur ve $h_s(t)$ denklem (4.2)’de ifade edildiği gibi olur [3].

$$\lambda_s(t) = \frac{-d \ln \prod_{i=1}^N R_i(t)}{dt} = \sum_{i=1}^N \frac{-d \ln R_i(t)}{dt} = \sum_{i=1}^N \lambda_i(t) \quad (4.2)$$

Eğer her blok için sabit bir riziko oranı var ise (örneğin; her bloğun hata zamanı üstel dağılım gösteriyor), $\lambda_i(t) = \lambda_i$ ye eşit olur ve denklem (4.2)'ye göre sistemin hata oranı aşağıdaki denklemle elde edilir.

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad (4.3)$$

Ayrıca (4.3) denklemi, her blok için sabit hata oranı güvenilirlik modeli, $R_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$, denklem (4.1) ile aşağıdaki biçimde de elde edilir.

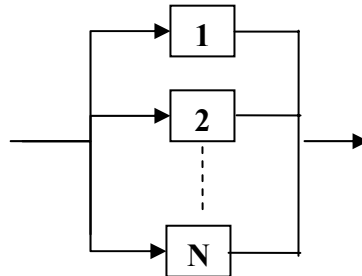
$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left(-t \sum_{i=1}^N \lambda_i\right) = \exp(-\lambda_s t) \quad (4.4)$$

Denklem (4.2) ve (4.3)'ten yararlanarak sistemin Ortalama Hata Zamanı (MTTF) şu şekilde hesaplanır;

$$\text{MTTF}_s = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} \quad (4.5)$$

4.1.2 Paralel Sistemler

Bir paralel konfigürasyonda sistem içindeki bir hata tüm blokların hatasının sonucudur. Buna göre her hangi bir bloğun başarısı sistemin başarısını garanti altına alır. Şekil 4.2, N bloktan oluşan bir paralel sistemi göstermektedir.



Şekil 4.2: Paralel Sistem Blok Diyagramı

N tane bağımsız blok seti için, hata zamanı kümülatif dağılım fonksiyonu;

$$F_s(t) = F_1(t) \cdot F_2(t) \cdots F_N(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (4.6)$$

$R_i(t) = 1 - F_i(t)$ olduğundan paralel sistemlerde güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$R_s(t) = 1 - F_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (4.7)$$

Sistemin riziko oranı da $h(t) = -d\{\ln R(t)\}/dt$ denklemi kullanılarak türetilir.

Sistemdeki özel bir durum için güvenilirlik analizi yaparsak; her blok için hata oranı sabit (üstel hata zaman modeli) ve sistem sadece iki bloktan mevcut olduğunda, $R_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$ olacağından denklem (4.7) aşağıdaki gibi yazılır.

$$R_s = 1 - [1 - \exp(-\lambda_1 t)][1 - \exp(-\lambda_2 t)] = \exp(-\lambda_1 t) + \exp(-\lambda_2 t) - \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t] \quad (4.8)$$

$h_s(t) = \frac{f_s(t)}{R_s(t)}$ ve $f_s(t) = \frac{d[R_s(t)]}{dt}$ olduğundan, eşit (4.8)'den faydalanarak, aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$f_s(t) = \lambda_1 \exp(-\lambda_1 t) + \lambda_2 \exp(-\lambda_2 t) - (\lambda_1 + \lambda_2) \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t] \quad (4.9)$$

$$h_s(t) = \frac{\lambda_1 \exp(-\lambda_1 t) + \lambda_2 \exp(-\lambda_2 t) - (\lambda_1 + \lambda_2) \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t]}{\exp(-\lambda_1 t) + \exp(-\lambda_2 t) - \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t]}$$

Sistemin Ortalama Hata Zamanı ise şu şekildedir;

$$\begin{aligned} \text{MTTF}_s &= \int_0^{\infty} R_s(t) dt = \int_0^{\infty} [\exp(-\lambda_1 t) + \exp(-\lambda_2 t) - \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t]] dt \\ &= \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Buna karşılık iki terimli Ortalama Hata Zamanı, N paralel bloklu sistem için genişletildiğinde aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{aligned} \text{MTTF}_s &= \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_N} \right) + \left(\frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_3} + \dots + \frac{1}{\lambda_{N-1} + \lambda_N} \right) \\ &+ \left(\frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} + \dots + \frac{1}{\lambda_{N-2} + \lambda_{N-1} + \lambda_N} \right) \dots + (-1)^{N+1} \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Tüm birimler sabit bir hata oranı λ ile tanımlanmış özel durumlar için (4.7) güvenilirlik fonksiyonunun genel formu aşağıdaki gibidir.

$$R_s(t) = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^N \quad (4.12)$$

ve denklem (4.11) için ise,

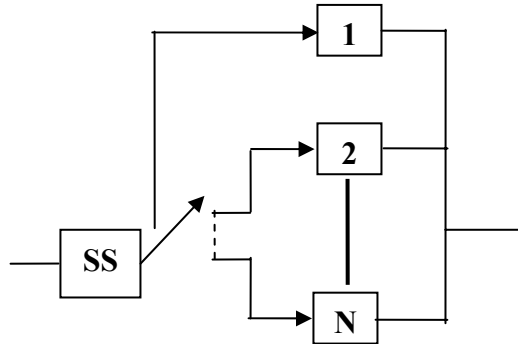
$$\text{MTTF}_s = \text{MTTF} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{N} \right) \quad (4.13)$$

Seri ve paralel sistemlerin genel bir biçimlendirmesi “ N sistemin K dışarısı” olarak adlandırılır. Bu tip sistemlerde, N bağımsız birimin K dışarı biriminin her hangi bir kombinasyonunun çalışması, sistemin çalışırılığını garantiler. Sistem fonksiyonları olasılıklarını Binom dağılımı kolaylıkla temsil etmektedir [3].

$$R_s(t) = \sum_{r=K}^N \binom{N}{r} [R(t)]^r [1 - R(t)]^{N-r} = \sum_{r=0}^{N-r} \binom{N}{r} [R(t)]^r [1 - R(t)]^{N-r} \quad (4.14)$$

4.1.3 Yedek-Gereksiz Sistemler

Bir sistemin bazı birimlerinin, bir his ve anahtarlama aygıtı (SS) ile servise alınana kadar boшта kalması (işlememesi) durumudur. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi bir birimin aktif olarak operasyonda olması ve diğerinin yedekte kalma durumudur.



Şekil 4.3: Yedek Gereksiz Sistem

Bu konfigürasyonda 1 numaralı birim hataya uğrayana kadar operasyona devam eder. Anahtar sistemde bir hata oluştuğu algıladığında diğer birim devreye girer ve bu süreç tüm yedek birimlerde hata oluşana kadar devam eder. 2'den N numaralı birime kadar olanlar, sabit operasyonda olmadıklarından (şekle göre paralel sistem olarak çalışmaktalar) birimlerden beklenen daha düşük oran ile hataya uğramalarıdır. Çünkü

bileşenler için, yedekte oldukları zamandan operasyonda olmalarına göre, hata oranı daha düşüktür.

Sistemin güvenilirliği, tamamen anahtarlama aygıtının güvenilirliğine bağlıdır. Yedek bir gereksiz sistemin güvenilirliği; hedef t zamanına kadar 1 numaralı birimin güvenilirliği (örneğin; tüm hedef zamanda başarı olasılığı) artı t 'den önceki t_1 zamanında 1 numaralı birimin hataya uğrama olasılığı ve anahtarın t_1 zamanında hataya uğramama olasılığı ve yedek 2 numaralı birimin t_1 zamanında hataya uğramama olasılığı (yedekte olma durumunda) ve yedek 2 numaralı birimin aktif operasyon modunda hedef zamandan artı kalan zaman için başarı ile operasyonunu devam ettirebilme olasılığı ve bu şekilde devam eden süreçtir. Bu tanıma göre iki bloklu (birimli) yedek, gereksiz sistemin güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$R_s(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(t_1) dt_1 \cdot R_{ss}(t_1) \cdot R'_2(t_1) \cdot R_2(t - t_1) \quad (4.15)$$

$f_1(t)$: 1 numaralı birimin hata zamanı için olasılık yoğunluk fonksiyonu

$R_{ss}(t_1)$: Anahtarlama aygıtının güvenilirliği

$R'_2(t)$: 2 numaralı birimin yedekte kalma modu için güvenilirliği

$R_2(t - t_1)$: 2 numaralı birimin t_1 zamanından sonra operasyon güvenilirliği

Eğer tüm birimlerin hata zamanları üstel dağılım izler ise denklem aşağıdaki şekli alır [3];

$$\begin{aligned} R_s(t) &= \exp(-\lambda t) + \int_0^t [\lambda_1 \exp(-\lambda_1 t_1)] [\exp(-\lambda_{ss} t_1)] [\exp(-\lambda'_2 t_1)] \{\exp[-\lambda_2(t - t_1)]\} dt_1 \\ &= \exp(-\lambda t) + \frac{\lambda_1 \exp(-\lambda_2 t)}{\lambda_1 + \lambda_{ss} + \lambda'_2 - \lambda_2} \{1 - \exp[-(\lambda_1 + \lambda_{ss} + \lambda'_2 - \lambda_2)t]\} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Yedekte hiç bir hata olmaması ve mükemmel anahtarlama gibi özel durumlarda, $\lambda_{ss} = \lambda'_2 = 0$ olacağından denklem (4.16) aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\begin{aligned} R_s(t) &= \exp(-\lambda_1 t) + \frac{\lambda_1 \exp(-\lambda_2 t)}{\lambda_1 - \lambda_2} \{1 - \exp[-(\lambda_1 - \lambda_2)t]\} \\ &= \exp(-\lambda_1 t) + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} [\exp(-\lambda_2 t) - \exp(-\lambda_1 t)] \end{aligned} \quad (4.17)$$

Eğer iki birimde özdeş olarak tanımlanmış ise (örneğin; $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$) denklem aşağıdaki gibi yazılır.

$$R_s(t) = \exp(-\lambda t) + \lambda t \exp(-\lambda t) = (1 + \lambda t) \exp(-\lambda t) \quad (4.18)$$

Anahtarlamanın mükemmel olduğu durumlarda, yedek sistem süreci ile aynı karakteristiğe sahip modele “Şok Model” ismi verilir. Bu modelde N ’inci şokun sistemde hata yaratması (N ’inci birimin arızalanması) varsayılmaktadır. Böylece sistemin hata zamanı bir gama dağılımı ile aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$R_s(t) = 1 - \int_0^t \frac{\lambda^N}{\Gamma(N)} x^{N-1} \exp(-\lambda x) dx = \exp(-\lambda t) \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{N-1}}{(N-1)!} \right] \quad (4.19)$$

Buna karşılık yukarıdaki sistemin ortalama hata zamanı ise;

$$\text{MTTF}_s = \frac{N}{\lambda} \quad (4.20)$$

şekilde hesaplanır. Yedek sistemde ikiden fazla birim olduğu zaman, denklem biraz daha karmaşık hal alır. Fakat kavram olarak yine aynıdır, örneğin; üç birimli mükemmel anahtarlama için denklem (4.21);

$$R_s(t) = R_1(t) + \int_{t_1=0}^t f_1(t_1) dt_1 \cdot R_2(t-t_1) + \int_0^t f_1(t_1) dt_1 \cdot \int_0^{t-t_1} f_2(t_2) R_3(t-t_1-t_2) dt_2 \quad (4.21)$$

şeklinde yazılır.

4.1.4 Yük Paylaşım Sistemleri

Yük paylaşım sistemleri hata modelini, birimleri eşit olarak sistem fonksiyonunu paylaşan paralel bir sisteme gönderir. Örneğin; bir gemide balast su pompaları $x \text{ m}^3$ ile su ileten tanımlanmış iki paralel pompadan oluşan bir sette, her pompa $x/2 \text{ m}^3$ balast suyu transfer etsin. Eğer her pompa için gereken iletim minimum $x/2 \text{ m}^3$ ve herhangi t_0 zamanında pompalardan biri hataya uğrar ise, diğer pompanın debisi $x \text{ m}^3/\text{dak}$ ’ı tek başına karşılayabilmelidir.

Yük paylaşım sistemlerinin güvenilirlik modelleri iki gruba ayrılmaktadır; zamandan bağımsız modeller ve zamana bağlı modeller. Zamandan bağımsız ilk yük paylaşım

sistem modeli Daniels (1945) tarafından geliştirilmiştir ve Daniel Modeli olarak bilinmektedir [3].

Tanımlanmış iki bileşenden oluşan basit bir paralel sistemi ele alarak bu tür modellerin temel özellikleri irdelenebilir [18]. Yüklenecek bileşen için zamandan bağımsız hata olasılığı $F(s)$ ile gösterilirse, iki bloklu paralel sistemin hata olasılığı $F_2(s)$ ile gösterilir. Sistemin güvenilirlik fonksiyonu, $R_2(s)$, da $1 - F_2(s)$ 'e eşit olur. Bir birim hataya uğradığında, hataya uğramayan birim tüm yükü ($2s$) üstlenir.

Sistemin hata olasılığı, $F_2(s)$, şu şekilde modellenir. A , ilk birimin s yükü altında hataya uğradığı zamanki ve ikinci birimin $2s$ yükü altında hataya uğradığı zamanki olayı temsil ederse ve B 'de, ikinci birimin s yükü altında hataya uğradığı zamanki ve ilk birimin $2s$ yükü altında hataya uğradığı zamanki olayı temsil ettiğinde, bu ikisinin kesişimi ($A \cap B$) s yükü altında her iki biriminde hataya uğrama olayını belirtir.

$$\begin{aligned} \Pr(A \cup B) &= \Pr(A) + \Pr(B) - \Pr(A \cap B) \\ \Pr(A) &= \Pr(B) = F(s)F(2s) \quad , \quad \Pr(A \cap B) = F^2(s) \\ F_2(s) &= 2F(s)F(2s) - F^2(s) \\ R_2(s) &= 1 - 2F(s)F(2s) + F^2(s) \end{aligned} \tag{4.22}$$

Üç bileşenli yük paylaşım sistemleri için benzer denklemler yazılabilir, bu durumda yedi terim ortaya çıkacaktır ve bileşen sayısı arttıkça problemin analizi daha da karmaşık hale gelir.

Zamana bağlı yük paylaşım sistemleri içinde basit bir örnek model göz önüne alırsak; iki bileşen bir yükü paylaşsın ve her iki bileşen içinde hata zaman dağılımı $f_h(s, t)$ olsun. Bir bileşen hataya uğradığında hata zaman dağılımı $f_f(2s, t)$ olur. Güvenilirlik fonksiyonu tam yük ve yarım yük operasyonu için de $R_f(2s, t)$ ve $R_h(s, t)$ ile ifade edilsin. Sistemin başarısı için; iki bileşeninde yarım yükü taşıması veya t_0 zamanında ilk bileşen hataya uğradıktan sonra ikinci bileşenin tüm yükü taşıması veya tersi durumun olması gerekmektedir. Buna göre sistemin güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir [12].

$$R_s(t) = [R_h(s, t)]^2 + 2 \int_0^t f_h(s, t_1) R_h(s, t_1) R_f(2s, t - t_1) dt_1 \tag{4.23}$$

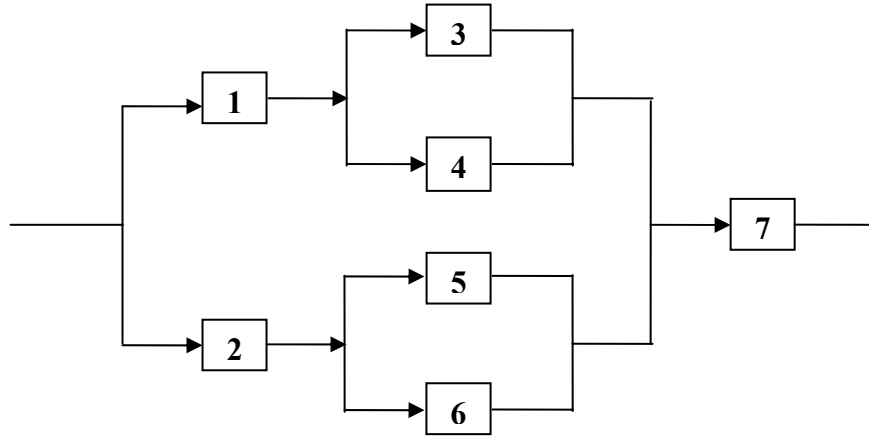
Denklem (4.23)'deki ilk terim, sistem veya bileşenin yarım yük taşıyarak başarı ile çalıştığını gösterir. İkinci terim ise iki eşit olasılığı, t_0 zamanında birinci bileşenin ilk arızasını ve ikinci bileşenin tüm yükü taşımasındaki veya tersi durumdakini, temsil eder.

Sistem veya bileşenin, λ_f ve λ_h hata oranları ile üstel zaman hata modeli gösterdiği özel durum için yarım ve tüm yükü taşımasında, denklem (4.23) aşağıdaki hale indirgenir.

$$R_s(t) = \exp(-2\lambda_h t) + \frac{2\lambda_h \exp(-2\lambda_f t)}{(2\lambda_h - \lambda_f)} \{ \exp[-(2\lambda_h - \lambda_f)t] \} \quad (4.24)$$

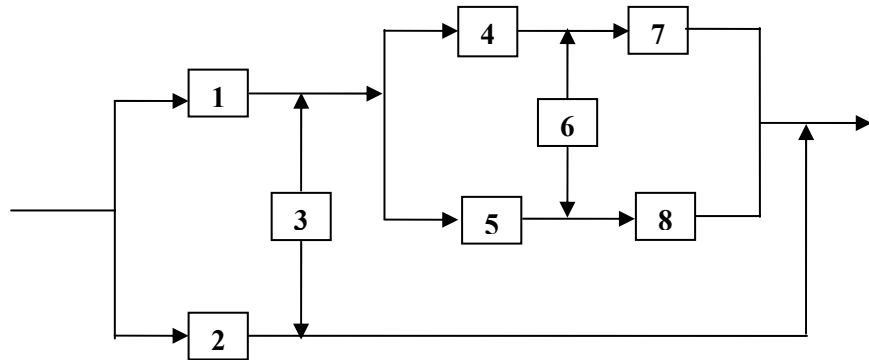
4.1.5 Kompleks Sistemler

Paralel ve seri sistemlere göre daha pratik olan bu sistemler, çoğu zaman iki sistemin karmasından oluştuğundan “Paralel Seri Sistemler” olarak da adlandırılmaktadırlar. Şekil 4.4 bu tip sistemlerin bir örneğini göstermektedir.



Şekil 4.4: Kompleks Paralel-Seri Sistem

Kompleks sistemlerin diğer bir çeşidi de paralel olmayan seri sistemlerdir. Şekil 4.5'te bu tip sistemlerin bir örneği gösterilmektedir.



Şekil 4.5: Kompleks Paralel Olmayan-Seri Sistem

Bir paralel seri sistemin analizi, basit olarak sistemi oluşturan paralel ve seri modüllere ayırmak ve her modül için kendi güvenilirlik fonksiyonlarını hesaplamakla yapılır. Bu süreç tüm sistem için bir güvenilirlik fonksiyonu bulunana kadar devam ettirilir. Kompleks sistemlerin tüm çeşitlerinin analizi için bazı analitik metotlar tanımlanmıştır [19]. Bunlar; kontrol metodu, olay alanı metodu, yol izleme metodu ve ayrıştırma metodu.

Ayrıştırma metodu, sistemi ayrıştırmadaki şartlı olasılıklara bağlıdır. Tüm sistemin güvenilirliği, seçilmiş bileşen (örneğin şekil 4.5'teki 3 numaralı bileşen) için iyi (çalışır) zamanlardaki bileşenin güvenilirliğindeki sistemin güvenilirliği ve kötü (çalışmayan) zamanlardaki bileşenin güvenilirliksizliğindeki sistemin güvenilirliği toplamına eşittir. 3 numaralı bileşen için durum, denklem (4.25) ile gösterilir.

$$R_s(t) = R_s(t | \text{bileşen 3 iyi}) \cdot R_3(t) + R_s(t | \text{bileşen 3 kötü}) \cdot [1 - R_3(t)] \quad (4.25)$$

Denklem (4.25) paralel olmayan seri sistemdeki tüm bileşenlere uygulandığında (örneğin 3 ve 6 numaralı bileşenlere), sistem basit bir paralel seri sisteme indirgenir ve şekil 4.5 ve (4.25) denklemindeki şartlı güvenilirlik terimleri için aşağıdaki denklemler yazılır.

$$R_s(t | \text{bileşen 3 iyi}) = R_s(t | \text{bileşen 6 iyi} \cap \text{bileşen 3 iyi}) R_6(t) + R_s(t | \text{bileşen 6 kötü} \cap \text{bileşen 3 kötü}) [1 - R_6(t)] \quad (4.26)$$

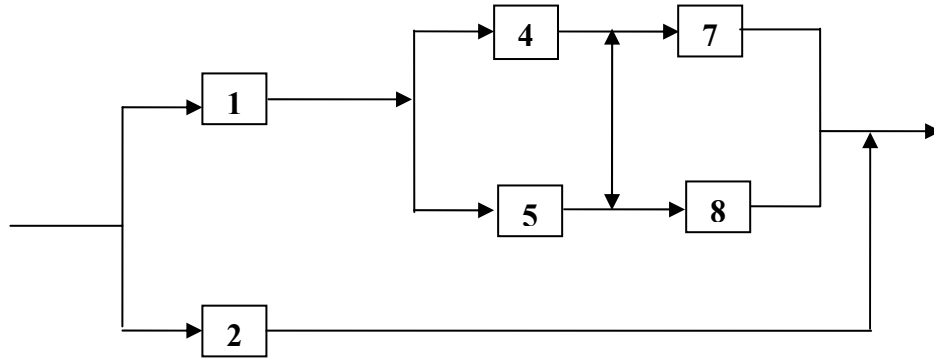
veya

$$R_s(t | \text{bileşen 3 kötü}) = R_s(t | \text{bileşen 6 iyi} \cap \text{bileşen 3 kötü}) R_6(t) + R_s(t | \text{bileşen 6 kötü} \cap \text{bileşen 3 kötü}) [1 - R_6(t)] \quad (4.27)$$

(4.26) ve (4.27) denklemlerindeki her bir şartlı güvenilirlik terimleri sadece bir paralel seri sistemi ifade eder ve bunun bu durumda güvenilirlik hesaplanması kolaylaşır. Örneğin; şekil 4.6'da $R_s(t | \text{bileşen 6 iyi} \cap \text{bileşen 3 kötü})$ durumu için güvenilirlik blok diyagramı gösterilmektedir.

Bir yol veri kümesi (veya bağlı veri), girdi ve çıktıların güvenilirlik blok diyagramı okları ile birbirlerine bağlanan bileşen setini ifade eder. Minimum yol kümesi ise girdi ve çıktı noktaları arasındaki bağlantıyı garanti altına alabilecek minimum sayıdaki bileşen sayısından oluşan yol demektir. Örneğin şekil 4.5'teki $P_1 = (1, 3)$

minimum yol kümesidir, fakat $P_2 = (1, 3, 6)$, 1 ve 3 numaralı bileşen için yolu yeterli olarak garanti etmemektedir.



Şekil 4.6: $R_s(t)$ bileşen 6 iyi $\cap$ bileşen 3 kötü) Blok Diyagramı

Girdi ve çıktı noktaları arasındaki olası tüm bağlantıları engelleyen bileşen kümesine “kesme kümesi” denir. Minimum kesme kümesi de akışı engellemeyi garanti eden minimum bileşeni ifade eder. Örneğin şekil 4.5 için minimum yol kümeleri; $P_1 = (2)$, $P_2 = (1, 3)$, $P_3 = (1, 4, 7)$, $P_4 = (1, 5, 8)$, $P_5 = (1, 4, 6, 8)$, $P_6 = (1, 5, 6, 7)$ dır ve minimum kesme kümeleri ise; $C_1 = (1, 2)$, $C_2 = (4, 5, 3, 2)$, $C_3 = (7, 8, 3, 2)$, $C_4 = (4, 6, 8, 3, 2)$, $C_5 = (4, 5, 3, 2)$ dir. Eğer bir sistemde m tane minimum yol kümesi var ise, sistemin güvenilirliği;

$$R_s(t) = \Pr(P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_m) \quad (4.28)$$

olur. Denklemdaki her P_i yol kümesi, hedef t zamanı dahilinde bileşenin yol kümesi içinde sürdürülebilirliğini temsil eder. Bu durumda sistemin başarısı garantidir. Bütün bu kümelerin bileşimi, sistemin başarılı operasyonu için tüm olasılıkları verir. Bu bileşimin olasılığı da sistemin güvenilirliğini temsil eder. Bu yol kümelerinin ayrık olduğu düşünülür ise sistemin güvenilirliğindeki bir üst sınır aşağıdaki şekilde;

$$R_s(t) \leq \Pr(P_1) + \Pr(P_2) + \dots + \Pr(P_m) \quad (4.29)$$

olur. Fakat pratik uygulamalarda bu durum sistemin üst sınırı için kullanışlı bir durum değildir.

Diğer taraftan sistemin güvenilirliği, minimum kesme kümelerinin hesaplanması ile bulunabilir. Eğer sistemde n tane minimum kesme kümesi var ise, sistemin güvenilirliği;

$$R_s(t) = 1 - \Pr(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_n) \quad (4.30)$$

olur. Denklemdaki her C_i kesme kümesi, hedef t zamanından önce bileşenin kesme kümesi içinde hatalarını temsil eder. Ayrık kümeler için yukarıdakine benzer bir durum düşünüldüğünde sistemin alt sınır güvenilirliği;

$$R_s(t) \geq 1 - [\Pr(C_1) + \Pr(C_2) + \dots + \Pr(C_m)] \quad (4.31)$$

olur. Yol kümesindeki her element bir bileşen operasyonunun başarısını temsil ederken, kesme kümesindeki her elementte bileşenin hatasını temsil eder. Pratikte güven sınırlaması için denklem (4.29) yerine (4.31) denklemi tercih edilmektedir. Çünkü bir çok mühendislik bileşeni hedef zaman üzerinde 0.9'dan büyük güvenilirliğe sahiptir [3].

Çok kompleks sistemler, her sistem veya bileşeni için çok yönlü hata biçimlerine sahip olabilir ve fiziksel ve işlevsel etkileşimler içerdiğinden dolayı güvenilirlik blok diyagramlarının kullanılması zorlaşmaktadır. Bu nedenle, aşağıda açıklanan mantık modellerine dayanan analizlerin kullanılması daha uygun bir yaklaşım olacaktır.

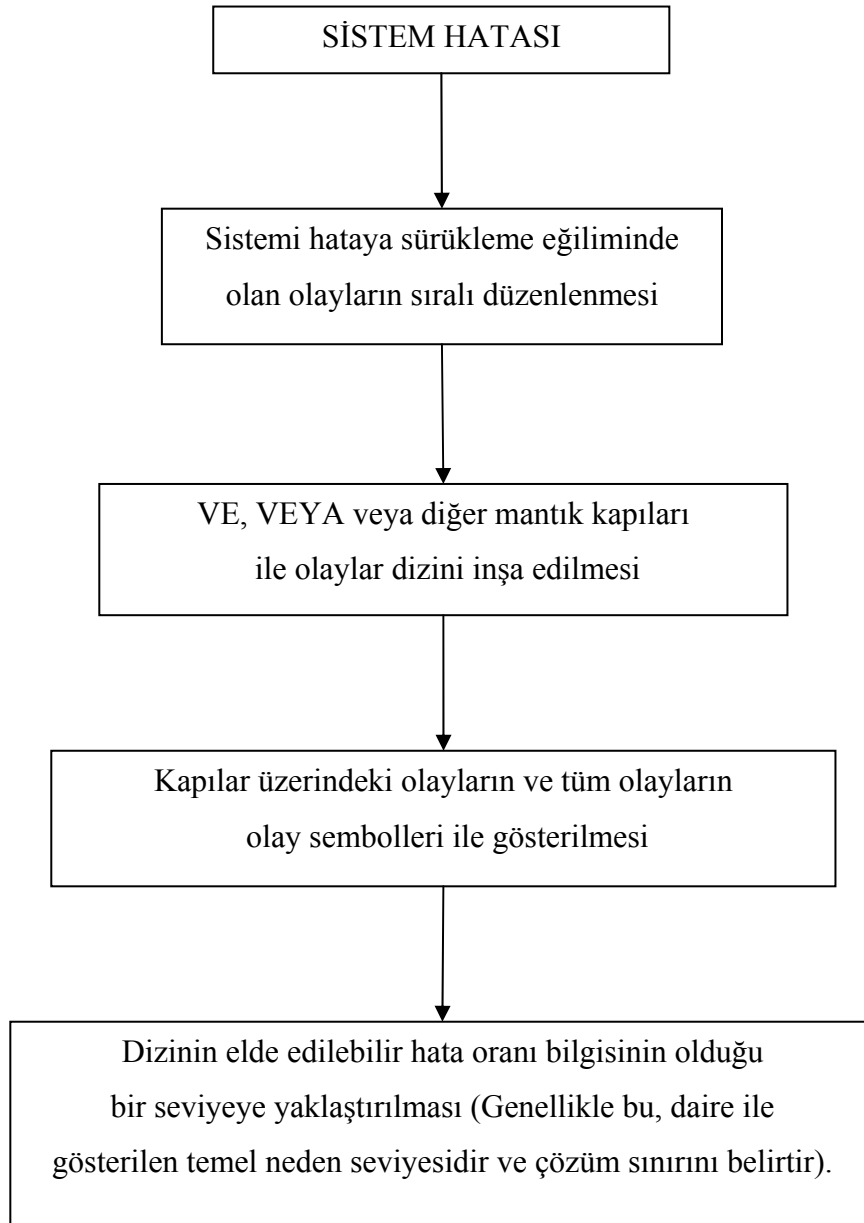
4.2 HATA AĞACI MODELİ (FTA)

Bir sistemin operasyonu iki farklı açıdan irdelenebilir: sistemin işlevini yitirme yolları veya sistemin başarı (operasyona devam) yolları. Hata ağacı yaklaşımı bir tündengelim süreci olarak, istenilmeyen (en üst olay olarak isimlendirilen) olayların varsayılmasını ve bu olay için olası yolların meydana gelmesinde sistematik sonuçların çıkarılmasını sağlar. Bir hata ağacı analizi, verilen bir sistemin kritikliği fazla olan operasyonları için alt sistemleri tanımlar. Modellemesi 1962 yılında H. Watson tarafından geliştirilmiştir [20].

Bir hata ağacı, sistem veya bileşenin tüm olası hata biçimlerini içermeyebilir. Sadece bu hata biçimleri, en üst düzey olayın veya olayların var oluşunun meydana gelmesine katkıda bulunma olarak biçimlendirilirler.

Varsayılan hata olayları hata ağacı yapısında ayrıntılı yer almayabilir. Sadece önemli olanlarına yer verilebilir. Ancak hangi olayların katılması kararı keyfi değildir, bunun için hata ağacı yapı prosedürü, sistem dizaynı ve operasyonu, geçmiş kullanım bilgileri, elverişli hata bilgileri ve analizcinin tecrübesi dikkate alınması gereken faktörlerdendir. Her bir ara noktada varsayılan olaylar, ara (veya en üst) olayların

oluşmasına neden olan “acil”, “gerekli” ve “yeterli” kavramları betimler. Şekil 4.7 hata ağacı analiz metodunun temel prensiplerini göstermektedir.



Şekil 4.7: Hata Ağacı Oluşturulmasındaki Prensipler

Hata ağacı kendi başına mantıksal bir modeldir ve sistem mantığının niteliksel olarak karakterize edilmesini tasvir eder. Ayrıca hata ağacının değerlendirmesinde de bir çok nicel algoritmalar kullanılabilir.

Bir ağaçtaki mantık sembollerinin gösterilmesi, şekil 4.8’de gösterildiği gibi, üç çeşittir; “Olaylar”, “Kapılar” ve “İleticiler (Tümleyen)”. Temel olaylar, gelişmemiş olaylar, şartlı olaylar ve çevresel olaylar “Öncelikli Olaylar” olarak adlandırılır.

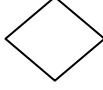
Öncelikli Olay Sembolleri



Temel Olay – Daha fazla gelişmeye ihtiyacı olmayan olaydır.



Şartlı Olay – Her hangi bir mantık kapsına uygulanan özel koşullar veya kısıtlamalar (“Öncelikli Ve” ve “Engelleme” kapıları ile kullanılır) için kullanılır.



Gelişmemiş Olay – İlerlemeyen olay çünkü yeterli sonucu olmayan veya bilgi elde edilemiyor olaylardır.



Çevresel Olay – Normal şartlarda oluşması veya oluşmaması beklenen olaydır.

Ara Olay Sembolü



Ara Olay – Mantık kapılarına doğru bir veya daha fazla oluşumdan önce meydana gelen olaydır.

Kapı Sembolleri



Ve – Girdi olaylarından tümü eş zamanlı oluşursa, çıktı oluşur.



Veya –Girdi olaylarından en az biri oluşursa, çıktı oluşur.



Öncelikli Ve – Girdi olaylarından tümü özel bir düzen dahilinde oluşursa, çıktı oluşur (düzen, kapının sağ tarafına belirtilen “Şartlı Olay” ile gösterilir).



Engelleme – Şartlı olaylar oluştuğu zaman girdi, çıktıyı üretir.



Ayrıcalık Veya – Girdi olaylarından aynen (tamamen) biri oluşursa, çıktı oluşur.



Tüve (Değil-Ve) – Girdi olaylarından tümü oluşmaz ise, çıktı oluşur.



Tüveya (Değil-Veya) – Girdi olaylarından en az biri oluşmaz ise, çıktı oluşur.

Tümleyen (İletici) Sembolleri



Tümleyen İçeri – Tümleyen Dışarıya karşılık uzakta oluşturulacak ağacın geliştirilmesini gösterir



Tümleyen Dışarı – Tümleyen İçeriye karşılık ağacın bu bölümünün ilave edilmesi gerektiğini gösterir

Şekil 4.8: Mantık Devrelerinde Kullanılan Olay, Kapı ve Tümleyen Sembolleri

4.2.1 Mantık Ağaçlarının Değerlendirilmesi

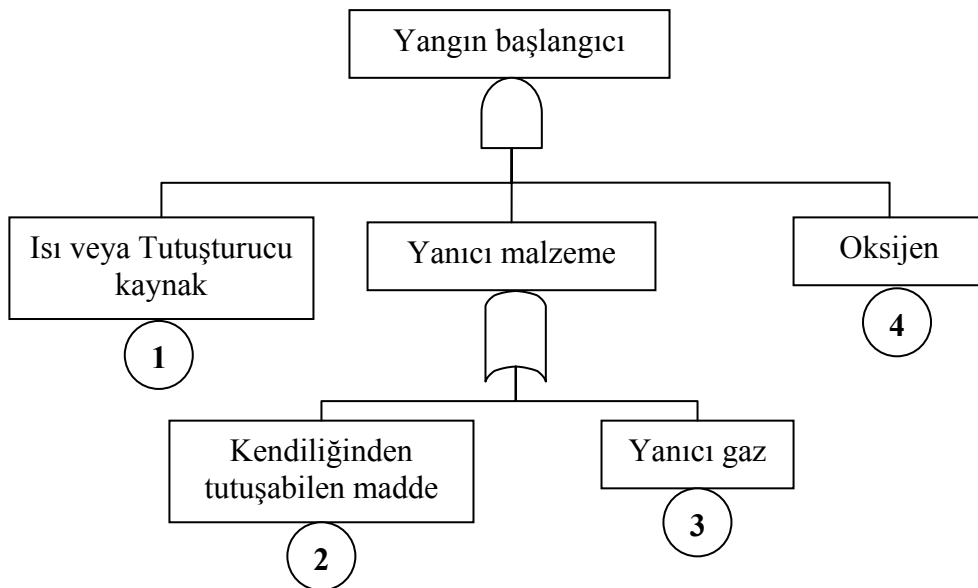
Mantık ağaçlarının değerlendirilmesinde iki farklı yaklaşım mevcuttur; nitel-sayısal olmayan (veya mantıksal) değerlendirme ve nicel-sayısal (veya olasılıklı) değerlendirme. Nitel değerlendirme kesme ve yol kümesinin hesaplanmasını içerir.

4.2.1.1 Nitel Yaklaşım

Hata ağacı analizinde ilk olarak sistem ve bileşenlerin/alt sistemlerin tanımlanması gerekmektedir. Tanımlanan sistem içinde istenmeyen sistem hataları için hata ağacı yapısı oluşturulur. Yapı içinde tüm hataların tanımının kesin bir şekilde verilmesi önemlidir. Analiz için istenmeyen hata en üst olay olarak tanımlanır ve en üst olay; olayın nerede ve ne zaman meydana geldiği ve ne olduğu sorularına yanıt verebilmelidir.

Olaylar tanımlandıktan ve biçimlendirildikten sonra nedenler arasındaki mantık ilişkisi değerlendirilmelidir. Genelde en üst olay ikinci seviyede bu nedenlerin oluşmasına eş zamanlı olarak bağlıdır veya bu nedenler üst olayı meydana getirme eğilimindedir.

Hata ağacı modeline nitel yaklaşımın hedefi, ağaç yapısını anlama ve sisteme genel açıdan bir bakış sağlamaktır. Bu nedenle şekil 4.9’da örnek olarak gemi güvenilirliğini direkt ilgilendiren temel yangın teorisinin hata ağacı incelendiğinde, yangının oluşması için üç temel şartın sağlanması gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.9: Basitleştirilmiş Yangın Hata Ağacı

Şekil 4.9’a göre bir yangının oluşumu için kesme kümesi; (kendiliğinden tutuşabilen madde, yanıcı gaz, oksijen, ısı veya tutuşturucu kaynak) yazılır. En üst olay (yangın başlangıcı) için dört nedenin oluşması gerekmektedir. Bu dört neden için iki tane minimum kesme kümesi oluşturulur; (kendiliğinden tutuşabilen madde, oksijen, ısı veya tutuşturucu kaynak) ve (yanıcı gaz, oksijen, ısı veya tutuşturucu kaynak).

Bir hata ağacında kesme kümelerini oluşturulma algoritmasına “Elde Edilen Kesme Kümeleri Metodu – (MOCUS)” denir. MOCUS algoritması dört basamak ile tariflenir;

1. En üst olay göz önüne alınır.
2. Üst olay ikinci seviyedeki olaylar ile şu kriterler dikkate alınarak yer değiştirir. Eğer alt seviyedeki olaylar VEYA kapısı ile bağlanmış ise ayrı sütunlarda yazılır, VE kapısı ile bağlanmış ise ayrı kolonlarda yazılır.
3. İkinci basamak, temel olaylar dışındaki tüm olaylar için tekrarlanır.
4. Tüm olaylar temel olay şeklini aldığı anda, her sütundaki olaylar ile bir kesme kümesi meydana getirilir.

MOCUS algoritmasına göre yangın hata ağacı aşağıdaki gibi oluşturulur.

Adım 1 – (Yangın başlangıcı); bu olay adım 2’deki bir alt seviyedeki olaylar ile yer değiştirir.

Adım 2 – Hata ağacının ikinci seviyesindeki olaylar VE kapısı ile bağlandığından üst olay yerine üçlü kolon alır.

Neden 1	Yanıcı malzeme	Neden 4
---------	----------------	---------

Adım 3 – Neden 1 ve 4 temel olaylardır ve daha fazla gelişime gerek duymazlar. Diğer taraftan (yanıcı malzeme) olayı için bir döngü daha oluşturulması gerekir ve VEYA kapısı ile bağlandığından sütun şeklinde yazılır.

Neden 2
Neden 3

Adım 4 – Her sütundaki olaylar ile bir kesme kümesi meydana getirilir ve bu örnek için iki kesme kümesi aşağıdaki gibi elde edilir.

C_1	Neden 1	Neden 2	Neden 4
C_2	Neden 1	Neden 3	Neden 4

Sonuç olarak bir yangının meydana gelmesi için 1, 2 ve 4 numaralı nedenlerin ve 1, 3 ve 4 numaralı nedenlerin eş zamanlı (aynı anda) oluşması gerekmektedir.

➤ Boolean Cebri

Sayısal değerlendirme, en üst olayın meydana gelme olasılığını hesaplamayı içermektedir. Kesme veya yol kümelerinin sayısal olmayan değerlendirmesinde VEYA kapısı girdi olaylarının bileşimini gösterir. Çıktı olayının oluşmaması için herhangi bir girdi olayının oluşmaması veya çıktı olayının oluşmasına neden olmak için tüm girdi olaylarının oluşması gereklidir. Örneğin; iki girdili bir VEYA kapısında, A ve B girdi olaylarını, Q 'da çıktı olayını Boolean eşitliği olarak ifade etmesi, $Q = A \cup B$ veya $Q = A+B$ şeklinde gösterilir. Q çıktısının oluşması için A veya B veya her ikisinin oluşması anlamına gelir. n girdili bir VEYA kapısı için çıktı, $Q = A_1 + A_2 + \dots + A_n$ tüm girdilerin toplamı ile elde edilir. VE kapısı kesişim devrelerini temsil eder, Boolean eşitliği olarak ifadesi $Q = A \cap B$ veya $Q = A \cdot B$ şeklindedir.

Kesme kümelerinin hesaplanmasında yukarıdakine benzer olası bir çok algoritma mevcuttur. Bu algoritmalarından bazıları; yukarıdan aşağıya veya aşağıdan yukarıya arka arkaya yer değiştirme metodu, modülasyon yaklaşımı ve Monte Carlo simülasyonudur. Arka arkaya yer değiştirme metodunda, mantık ağacı içinde her kapı eşdeğer Boolean ile temsile edilir ve sadece öncelikli olayların arta kalması için hesaplanır. Mantık ağacındaki minimum yol veya kesme kümesi için bir çok farklı Boolean cebrinden faydalanılır. Yer değiştirme süreci ağacın tepesinden aşağıya doğru veya tersi şeklinde yapılır.

Hedef t zamanı dahilinde en üst T olayının olasılığı aşağıdaki bileşim ile bulunur.

$$\Pr(T) = \Pr(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_n) \quad (4.32)$$

Sistem güvenilirliği içinde üst olayın olasılığı sistemin güvenilirliksizliği olarak düşünülebilir. Bunun için iki kesme kümesi; $C_1 = A \cdot B$, $C_2 = A \cdot C$ ele alınırsa, üst olay olasılığı;

$$\Pr(T) = \Pr(A \cdot B + A \cdot C) \quad (4.33)$$

olur. Denklem (2.14)'ya göre;

$$\begin{aligned} \Pr(T) &= \Pr(A \cdot B) + \Pr(A \cdot C) - \Pr(A \cdot B \cdot A \cdot C) \\ &= \Pr(A \cdot B) + \Pr(A \cdot C) - \Pr(A \cdot B \cdot C) \end{aligned} \quad (4.34)$$

yazılır. Eğer A , B ve C olayları bağımsız ise aşağıdaki denklem yazılır.

$$\Pr(T) = \Pr(A) \cdot \Pr(B) + \Pr(A) \cdot \Pr(C) - \Pr(A) \cdot \Pr(B) \cdot \Pr(C) \quad (4.35)$$

Denklemdeki $\Pr(A) \cdot \Pr(B) \cdot \Pr(C)$ gibi çarpım ürünlerinin hesaplanması kesme kümesinin sayısal değerlendirilmesinde özellikle veri kümesi sayısı büyüdüğünde bir ikilem yaratmaktadır. Genellikle kesme kümesi içinde bu terimlerden 2^{n-1} kadar vardır. Bunların hesaplanması yerine denklem (4.31)'da belirtilen sınırlama yaklaşımı yeterli olacaktır. Denklem (4.35)'te $\Pr(A) \cdot \Pr(B) \cdot \Pr(C)$ değeri, $\Pr(A) \cdot \Pr(B)$ ve $\Pr(A) \cdot \Pr(C)$ değerlerinden mutlaka küçük olacaktır. Bu sebeple sınırlama sonucu sistemin gerçek güvenilirlik değeri için bir yaklaşım olarak kullanılabilir ve buna “ender olay yaklaşımı” denilir.

4.2.1.2 Nicel Yaklaşım

Nicel yaklaşımı, temel olayların hata olasılıklarının ve kapıların kullanımı ile en üst olay olasılığının hesaplanmasıdır. Temel olayların hata olasılıklarının (veya güvenilirliklerinin) hesaplanmasında VEYA kapıları için seri sistem denklemleri, VE kapıları için de paralel sistem denklemleri kullanılır.

Nitel analiz ile hata ağacının kesme ve/veya yol kümeleri oluşturulur. Her bir kesme kümesi, en üst olay ile eş zamanlı oluşmasını tetikleyen temel olayların tek (yegane) kümesini içerir. Bu nedenle sistemin işlevini sağlamak için bu temel olayların (nedenlerin) engellenmesi gerekir. Bir çok kesme kümesindeki temel nedenler, bu nedenler için bir önem ölçütü hesaplanmasını sağlar. Hata ağaçlarında başvuru en genel önem ölçütü “Fussell-Vesely, I^{FV} , önem ölçütü” dür [20]. Bu önem ölçütü, t zamanında hataya uğrayan i temel olayını içeren, en az bir minimum kesme kümesindeki olasılıktır.

$$I_i^{FV}(t) = \frac{R_i[R(t)]}{R_s[R(t)]} \quad (4.36)$$

(4.36) denklemdeki $R_i[R(t)]$, sistemin güvenilirliğinde i temel olayının payını gösterir, buna benzer sistemin güvenilirliksizlik ve elde edilemezlik fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılır;

$$I_i^{FV}(t) = \frac{F_i[Q(t)]}{F_s[Q(t)]} \quad (4.37)$$

Denklem (4.37)'deki $F_i[Q(t)]$, sistemin hataya uğramasını veya riskini tetikleyen i temel olayının olasılığını belirtir. $F_s[Q(t)]$, en üst olayın meydana gelme olasılığıdır.

Eğer kesme kümesinin k 'nıncı teriminin önemi I_k ile gösterilirse, sistemin hatası aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$I_k^{FV}(t) = \frac{Q_k(t)}{Q_s(t)} \quad (4.38)$$

$Q_k(t)$: minimum kesme kümesi k oluştuğunda zamana bağlı olasılık

$Q_s(t)$: sistemin (tüm kesme kümelerinden dolayı) hataya uğramasında toplam zamana bağlı olasılık

Genelde I_k 'nın en büyük değeri ile minimum kesme kümesi en önemlisidir. Denklem (4.38) birbirine bağımlı kesme kümeleri içinde uygulanabilir. Eğer tüm minimum veya birbirine bağlı kesme kümelerinin olasılığı biliniyor ise bireysel bileşenlerin öneminin bulunmasında aşağıdaki yaklaşım kullanılabilir.

$$I_i^{FV}(t) \approx \frac{\sum_{j=1}^m Q_j(t)}{Q_s(t)} \approx \frac{1 - \prod_{j=1}^m [1 - Q_j(t)]}{Q_s(t)} \quad (4.39)$$

Denklemdaki $Q_j(t)$, i bileşeninin hatasını içeren j 'ninci kesme kümesinin olasılığını gösterir ve m de i bileşeninin hatasını içeren minimum kesme kümelerinin sayısıdır.

Fussell-Vesely önem ölçütünden başka faydalanılabilecek diğer önem ölçütleri ise şunlardır:

- Birnbaum Önem Ölçütü:

Başarı uzayında yer alan bileşenlerin Birnbaum önem ölçütü aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$I_i^B(t) = \frac{\partial R_s[R(t)]}{\partial R_i(t)} \quad (4.40)$$

Denklem (4.40)'deki $R_i(t)$ bileşenin güvenilirliğini temsil etmektedir ve sistemin güvenilirliği ise $R_s[R(t)]$ ile gösterilmektedir. Eğer sistem bileşenleri birbirinden bağımsız ise Birnbaum önem ölçütü şu şekilde elde edilir [21];

$$I_i^B(t) = R_s[R(t)|R_i(t) = 1] - R_s[R(t)|R_i(t) = 0] \quad (4.41)$$

Denklem (4.41)'deki $R_s[R(t) | R_i(t) = 1]$, i bileşeni 1'e eşit iken sistem güvenilirlik fonksiyonunun değeridir ve $R_s[R(t) | R_i(t) = 0]$ da i bileşeni 0'a eşit iken sistem güvenilirlik fonksiyonunun değeridir.

Sistem bileşeni için elde edilen Birnbaum önem ölçütü o bileşenin sistem güvenilirliği üzerinde ne derece etkili olduğunu belirtmektedir (değeri yüksek olan daha fazla etkiye sahiptir).

- Risk Küçültme Değer Önemi – RRW:

Sistemdeki bir girdi değişkeninin değeri sifıra (0) eşit olduğunda güvenilirliksizlikteki (elde edilemezlikteki veya riskteki) değişimin ölçülmesidir. Bu da bileşenin mükemmelliğini veya hata olasılığının sıfır olduğunu gösterir. Bu önem ölçütü, sistem bileşeninin gelişimi ile sistemin nasıl daha iyi olabileceğini gösterir.

Hata uzayında kullanılabilirliği olduğu gibi başarı uzayında da kullanılabilir. Hesaplanması bir oran veya fark biçiminde aşağıdaki gibidir;

$$I_i^{RRW} = \frac{F_s[Q(t)]}{F_s[Q(t)|Q_i(t) = 0]} = F_s[Q(t)] - F_s[Q(t)|Q_i(t) = 0] \quad (4.42)$$

i bileşeninin hata olasılığı (güvenilirliksizliği), $Q_i(t)$, sifıra eşit olduğunda sistemin riski (güvenilirliksizliği) $F_s[Q(t) | Q_i(t) = 0]$ olur.

- Risk Kazanma Değer Önemi – RAW:

Risk kazanma (arttırma) değer önemi risk küçültme değer öneminin tersine, girdi değişkeninin (örneğin; bileşen güvenilirliksizlik) değeri bire (1) eşit olduğunda, bunun sistem güvenilirliksizliği üzerindeki değişikliğinin ölçümüdür. Bileşen hata olasılığının bire eşitlenmesi ile risk kazanma değeri, sistem hata olasılığındaki artışın ölçütüdür ve denklem (4.42)'e benzer şekilde hesaplanır.

$$I_i^{RAW} = \frac{F_s[Q(t)]}{F_s[Q(t)|Q_i(t) = 1]} = F_s[Q(t)|Q_i(t) = 1] - F_s[Q(t)] \quad (4.43)$$

Sistemi hataya götürmedeki (veya sistem riskini arttırmada) önemli olan bileşenlerin belirlenmesinde faydalı bir ölçüttür.

➤ Değerlendirmede Kombinasyonel Teknik Kullanımı

Boolean indirgemesine dayanan yer değiştirme metodunun tersi olarak, bu metot bir Kombinasyonel algoritma üzerinde gerçekleştirilen gerçek tablo yaklaşımıdır ve hata ve başarı olaylarının tüm olasılıksal anlamlı kombinasyonlarını içerir. Hata ve başarılarından oluşturulan tüm kombinasyonlar birbirine bağımlıdır.

Boolean indirgemesi ve Kombinasyonel yaklaşım arasındaki sonuç farklarının görsel olarak anlaşılmasında Venn diyagramı kullanımı faydalıdır. Fakat olay sayısının artmasında gösterimlerindeki zorluklar nedeni ile bir algoritma için kombinasyonların oluşturulmasında olasılık değerlerinin aştığı bazı kesme sınırları (örneğin, 10^{-7}) belirlenmesi gerekmektedir [22]. Bu kombinasyonel algoritmada öncelikli olarak toplam olay sayısı hesaplanmalıdır. Her olay ortak bir hata oluşma olasılığına sahiptir. Bir kombinasyon, bütün mantık diyagramları içinde her olayın (örneğin; hata veya hatasız) durumunu gösterir. Bütün hata bloklarının bir kombinasyonla toplanması ile “hata kümesi” oluşturulur. Bu hata kümesinde hiç bir eleman olmayabilir ki bu kombinasyonda hatalı bir olay olmadığı anlamına gelir. Bu tür veri kümelerine “boş kombinasyon” denilir. Diğer olasılıksal anlamlı kombinasyonların oluşturulmasında iki unsura dikkat edilir; hata olayları birbirinden bağımsızdır ve boş kombinasyon anlamlı bir kombinasyondur.

Verilen bir C kombinasyonundaki bağımsızlık aşağıdaki olasılığı içerir.

$$Pr_C = \prod_{i \in FS} Pr_i \prod_{i \notin FS} (1 - Pr_i) \quad (4.44)$$

Denklem (4.44)’de hatalar F , başarılar S ile ve bir bireysel hata olayı olasılığı da Pr_i ile gösterilmektedir. C kombinasyonundan farklı olarak C' kombinasyonunun hata kümesine bir j olayı eklenmesi (örneğin; başarılı bir olayın hataya uğraması), aşağıdaki denklem ile gösterilir.

$$Pr'_C = Pr_C \times \frac{Pr_j}{1 - Pr_j} \quad (4.45)$$

Eğer bir olay yerine, j bloğu k gibi bir blok ile yer değiştirirse;

$$Pr''_C = Pr_C \times \frac{Pr_j}{1 - Pr_j} \times \frac{1 - Pr_k}{Pr_k} \quad (4.46)$$

olur.

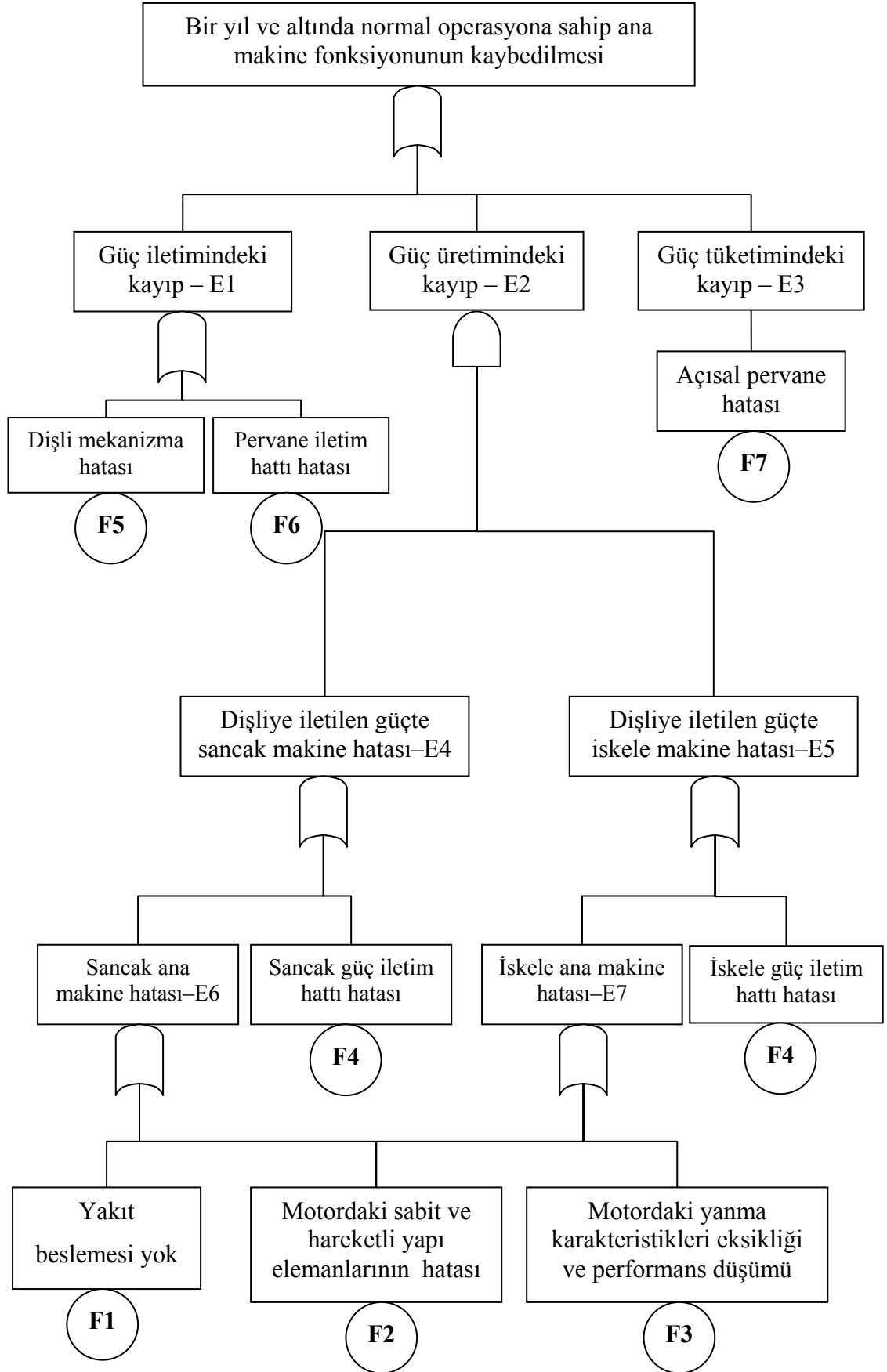
Örnek uygulama olması açısından düzenli sefer yapan bir tankerin ana makine sisteminde meydana gelebilecek gemi makine gücünün kaybedilmesi ile ilgili şekil 4.10’de gösterilen hata ağacı modeli irdelenmiştir.

En üst olay “Tanker ana makine gücünün kaybedilmesi” olarak tanımlanır. Pervane sistemindeki kayıpların en temel nedeni ana makine iletim gücündeki hataların meydana gelmesi olarak özetlenebilir. Üst olayın oluşmasına birbirinden bağımsız üç olay neden olmaktadır. Bunlar; şaft veya dişli mekanizma içinde “güç iletimindeki kayıp”, makineden kaynaklanan “güç üretimindeki kayıp” ve pervanede olası hatalardan kaynaklanan “güç tüketimindeki kayıp” dır. Bu olaylardan herhangi biri üst olayın oluşmasını tetikleyebilir, bu nedenle hata ağacında VEYA kapısı ile kullanılmıştır.

“Güç iletimindeki kayıp”, dişli mekanizma hatası ve/veya şaft iletim yolundaki hatalardan olabileceğinden VEYA kapısı ile ilişkilendirilmişlerdir. “Güç tüketimindeki kayıp” ise sadece pervane ve stern tube’de oluşabilecek hatalardan kaynaklanır. “Güç üretimindeki kayıp” için sancak ve iskele makinelerinin her ikisinin birden hataya sahip olması gerektiğinden VE kapısı ile ilişkilendirilmişlerdir. Her makinenin hataya uğraması için iki yol vardır; güç iletim hattı hatası veya kendi içindeki hata. Bu olaylar için VEYA kapısı kullanılmalıdır. Çünkü bunlardan birinin meydana gelmesi dişliye iletilen güçte hata yaratır. Sancak ve iskele makinelerindeki olaylar için 1, 2 ve 3 ile belirtilen temel hata olayları veya nedenlerinin (Tablo 4.1’de gösterilen) birinin meydana gelmesi yeterlidir ve bu nedenle VEYA kapısı ile bağlanmışlardır.

Tablo 4.1. Bir Yıllık (336 gün) Seyir için Hesaplanan Hata Bilgisi

Hata	Hata Tanımlaması	Güvenilirlik, R_i	Hata Olasılığı, F_i
F1	Yakıt beslemesi yok	0.730	0.270
F2	Motordaki sabit ve hareketli yapı elemanlarının hatası	0.973	0.027
F3	Motordaki yanma karakteristikleri eksikliği ve performans düşümü	0.984	0.016
F4	Güç iletim hattı hatası	0.948	0.052
F5	Dişli mekanizma hatası	0.764	0.236
F6	Şaft yolu üzerinde hata	0.971	0.029
F7	Pervane sistemi hatası	0.813	0.187



Şekil 4.10: “Tanker için Makine Gücünün Kaybedilme” En Üst Olayının Hata Ağacı

Hata ağacı için elde edilen kesme kümeleri metodu aşağıdaki gibi uygulanır.

Adım 1 – “Bir tanker için bir yıl ve altında normal operasyona sahip ana makine fonksiyonunun kaybedilmesi”

Adım 2 –

E1
E2
E3

Adım 3.1 - “Güç iletimindeki kayıp” olayı için (E1);

F5
F6
E2
E3

Adım 3.2 - “Güç üretimindeki kayıp” olayı için (E2);

F5	
F6	
E4	E5
E3	

Adım 3.3 - “Dişli donanımına iletilen güçte sancak makine hatası” olayı için (E4);

F5	
F6	
E6	E5
F4 _s	E5
E3	

Adım 3.4 - “Sancak makine hatası” olayı için (E6);

F5	
F6	
F1 _s	E5
F2 _s	E5
F3 _s	E5
F4 _s	E5
E3	

Adım 3.5 - “Dişli donanımına iletilen güçte iskele makine hatası” olayı için (E5);

F5	
F6	
F1 _s	E7
F2 _s	E7
F3 _s	E7
F4 _s	E7
F1 _s	F4 _p
F2 _s	F4 _p
F3 _s	F4 _p
F4 _s	F4 _p
E3	

Adım 3.6 - “İskele makine hatası” olayı için (E7);

C_1	F5	
C_2	F6	
C_3	F1 _S	F1 _P
C_4	F2 _S	F1 _P
C_5	F3 _S	F1 _P
C_6	F4 _S	F1 _P
C_7	F1 _S	F2 _P
C_8	F2 _S	F2 _P
C_9	F3 _S	F2 _P
C_{10}	F4 _S	F2 _P
C_{11}	F1 _S	F3 _P
C_{12}	F2 _S	F3 _P
C_{13}	F3 _S	F3 _P
C_{14}	F4 _S	F3 _P
C_{15}	F1 _S	F4 _P
C_{16}	F2 _S	F4 _P
C_{17}	F3 _S	F4 _P
C_{18}	F4 _S	F4 _P
C_{19}	F7	

Adım 4 – Pervane sistemi için temel nedenlerin (veya temel olay hatalarının) olası 19 kombinasyonu vardır. Buradaki her kesme kümesi için çoğunlukla iki ana neden mevcuttur. C_1 , C_2 ve C_{19} kesme kümeleri için sadece bir ana neden vardır. Bu ana nedenlerden herhangi biri üst olayın oluşumunu tetikler.

Aynı örneğin nicel yaklaşım ile çözümlenmesi ise şu şekilde gerçekleştirilir:

Özel olarak ilgilenilmesi gereken üst olay olasılığıdır ve her bir kesme kümesinin olasılıkları da hesaplanacaktır. Genelde bu tür hesaplamalar için tablo programlarının kullanımı büyük kolaylık sağlamaktadır. Diğer taraftan olayların elle hesaplanmasında seri ve paralel yapılarıdaki denklemlerden (VEYA kapıları için seri sistem denklemlerinden, VE kapıları için paralel sistem denklemlerinden) faydalanılır.

Tablo 4.1’deki hata bilgilerini kullanarak her küme setinin ve üst olayın hata olasılığı Tablo 4.2’deki gibi elde edilir. Buna göre; “Bir tanker için bir yıl ve altında normal operasyona sahip ana makine fonksiyonunun kaybedilmesi” olayının olasılığı 0.465’dir. İstenilmeyen bu olay % 46.5 gerçekleşecektir ki bu da potansiyel bir tehlike demektir.

Farklı ana nedenlerin önemini değerlendirmek için kesme kümelerinin hata olasılıkları incelenir. Tablo 4.3’te her bir kesme kümesinin hata olasılıkları gösterilir.

Tablo 4.2. En Üst Olay için Hata Olasılık Hesaplaması

F_{E7}	$= 1 - R_{E7} = 1 - (R_{F1} \cdot R_{F2} \cdot R_{F3}) = 1 - [(1 - F_{F1}) \cdot (1 - F_{F2}) \cdot (1 - F_{F3})]$	0.301
F_{E6}	$= 1 - [(1 - F_{F1}) \cdot (1 - F_{F2}) \cdot (1 - F_{F3})]$	0.301
F_{E5}	$= 1 - [(1 - F_{E7}) \cdot (1 - F_{F4})]$	0.337
F_{E4}	$= 1 - [(1 - F_{E7}) \cdot (1 - F_{F4})]$	0.337
F_{E3}	$= F_{F7}$	0.187
F_{E2}	$= 1 - R_{E2} = 1 - [1 - (1 - R_{E4}) \cdot (1 - R_{E5})] = F_{E5} \cdot F_{E4}$	0.114
F_{E1}	$= 1 - [(1 - F_{F5}) \cdot (1 - F_{F6})]$	0.258
T	$= 1 - [(1 - F_{E1}) \cdot (1 - F_{E2}) \cdot (1 - F_{E3})]$	0.465

Tablo 4.3. En Üst Olay için Kesme Kümelerinin Hata Olasılıkları

C_1	F5		$Q_1 = 0.236$
C_2	F6		$Q_2 = 0.029$
C_3	F1 _S	F1 _P	$Q_3 = 0.073$
C_4	F2 _S	F1 _P	$Q_4 = 0.0073$
C_5	F3 _S	F1 _P	$Q_5 = 0.0043$
C_6	F4 _S	F1 _P	$Q_6 = 0.014$
C_7	F1 _S	F2 _P	$Q_7 = 0.073$
C_8	F2 _S	F2 _P	$Q_8 = 0.0073$
C_9	F3 _S	F2 _P	$Q_9 = 0.00043$
C_{10}	F4 _S	F2 _P	$Q_{10} = 0.0014$
C_{11}	F1 _S	F3 _P	$Q_{11} = 0.0043$
C_{12}	F2 _S	F3 _P	$Q_{12} = 0.00043$
C_{13}	F3 _S	F3 _P	$Q_{13} = 0.00026$
C_{14}	F4 _S	F3 _P	$Q_{14} = 0.00083$
C_{15}	F1 _S	F4 _P	$Q_{15} = 0.014$
C_{16}	F2 _S	F4 _P	$Q_{16} = 0.0014$
C_{17}	F3 _S	F4 _P	$Q_{17} = 0.00083$
C_{18}	F4 _S	F4 _P	$Q_{18} = 0.056$
C_{19}	F7		$Q_{19} = 0.187$

Tablo 4.4'te Fussell-Vesely bileşen önem ölçütüne göre, ana nedenlerin (veya hataların) önem derecesi (sıralaması) gösterilmektedir. Bileşenlerin önem derecesi “bakım tutum derecesi” olarak isimlendirilmektedir. Tablo 4.4’e göre F5 ile belirtilen “dişli mekanizma hatası” birinci öncelikli bakım derecesine sahiptir. İkinci öncelikli bakım kanat açıları değiştirebilir pervane ile ilgili yapılmalıdır. Bu ve buna benzer bakım sıralamasına ilişkin önlemler tasarım safhasında uygulanmaya alınır.

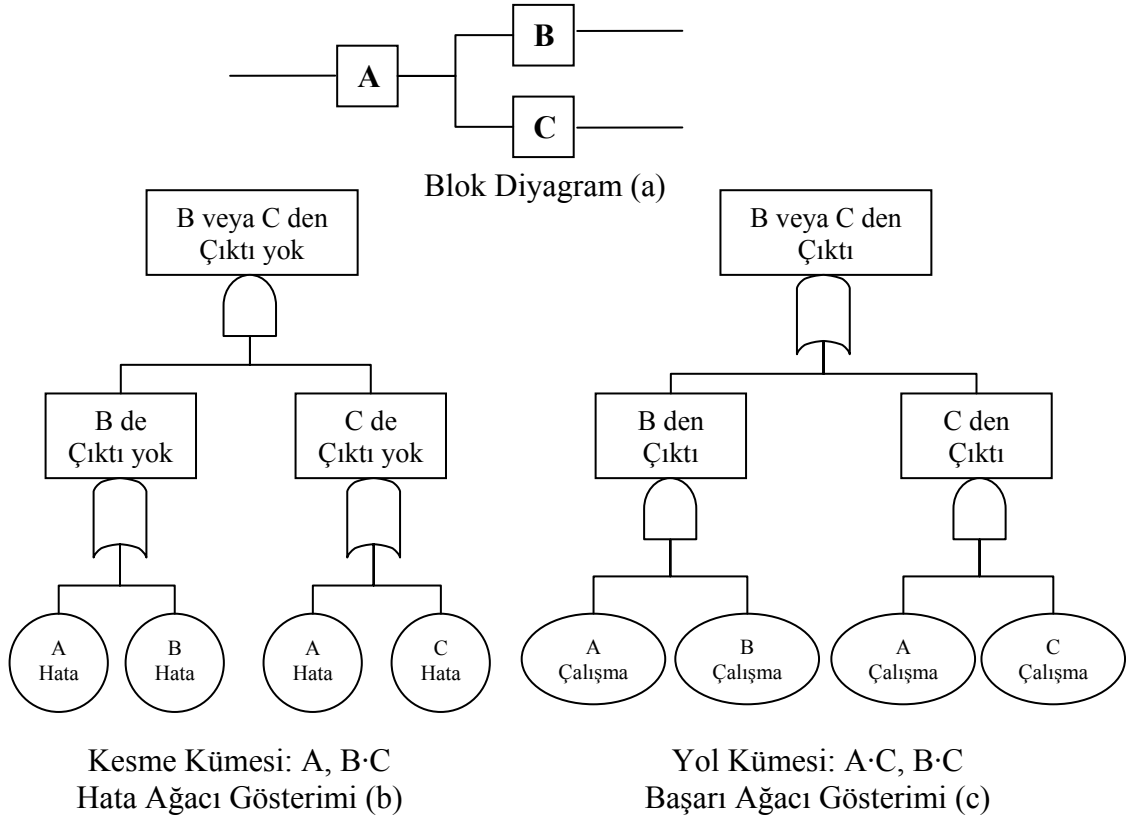
Tablo 4.4. Fussell-Vesely Önem Ölçütüne Dayalı Önem Sıralaması

	İlgili Kesme Kümeleri	$1 - \Pi (1 - Q_i)$	I^{FV}	Sıralama
F1	C_3, C_7, C_{11}, C_{15}	0.0966	0.208	3
F2	C_4, C_8, C_{12}, C_{16}	0.0098	0.021	6
F3	C_5, C_9, C_{13}, C_{17}	0.0061	0.013	7
F4	$C_6, C_{10}, C_{14}, C_{18}$	0.071	0.150	4
F5	C_1	0.236	0.507	1
F6	C_2	0.029	0.062	5
F7	C_{19}	0.187	0.402	2

4.3 BAŞARI AĞACI MODELİ (STA)

Kavramsal olarak hata ağacı modeline benzerdir. Burada en üst olay olarak arzu edilen olay tanımlanır ve tüm ara ve öncelikli olaylar istenilen bu olayın olmasını garanti edecek şekilde varsayılır. Özetle, bir hata ağacının üst olayının mantıksal bileşenleri başarılı olay için kurulmasıdır. Buradaki mantıksallık, kesme kümeleri ile değil de yol kümeleri ile gösterilir.

Şekil 4.11a'daki gibi basit bir blok diyagram oluşturulduğunda, bu sistemin hata ağacı şekil 4.11b'de ve başarı ağacı şekil 4.11c'deki gibi gösterilir.



Şekil 4.11: Bir Hata ve Başarı Ağacı Arasındaki Benzerlik

Başarı ağacının nitel ve nicel değerlendirmesi, hata ağacında olduğu gibi yapılmaktadır. Örneğin, yukarıdan aşağıya kapıları ile başarılı olaylar indirgenerek minimum yol kümeleri elde edilir. Buna göre denklem (4.28) ve (4.29) kullanılarak üst olay olasılığı (güvenilirlik) hesaplanır. Kompleks Boolean eşitliklerinin indirgenmesinde, özellikle yol kümeleri için, elverişli yöntem aşağıdaki gibidir [3].

$$\begin{aligned}
 \Pr(T) &= \Pr(P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_n) \\
 &= \Pr(P_1) + \Pr(\bar{P}_1 \cap P_2) + \Pr(\bar{P}_1 \cap \bar{P}_2 \cap P_3) + \dots + \Pr(\bar{P}_1 \cap \bar{P}_2 \cap \dots \cap \bar{P}_{n-1} \cap P_n) \quad (4.47)
 \end{aligned}$$

Başarı ağaçları, hata ağacının tersine bir sistemin nasıl başarıyla işlevini sürdürdüğünü anlamamızı sağlar. Sistemin minimum yol kümeleri, kullanıcıya sistemi nasıl başarı ile işleteceğini gösterir. Bu sebeple minimum yol kümesi “başarı yolu” olarak da isimlendirilir.

4.4 OLAY AĞACI MODELİ (ETA)

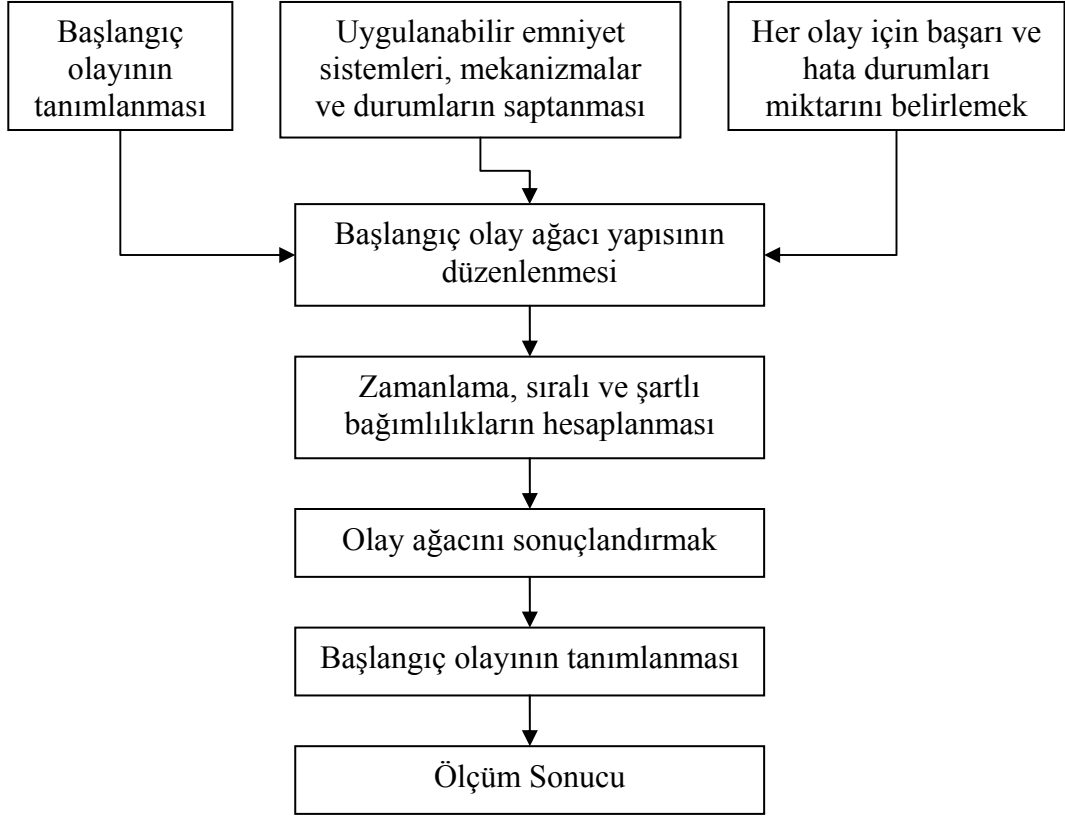
Eğer bir sistemin başarılı operasyonu yaklaşık olarak kronolojik (fakat süreksiz) alt sistemlere veya bileşenlerinin operasyonuna bağlı ise bu durumda olay ağacı modeli kullanılır. Diğer bir ifade ile bir olayın sonuçlarının analiz edilmesidir. Olay ağacı modelinde verilen bir olaydan başlatılarak ileriye doğru ayrıştırma yapılır. Bu nedenle bir tümevarım metodudur.

4.4.1 Olay Ağacının Oluşturulması

Olay ağacı analizi, olası olaylar zincirine dayanan mantıksal bir diyagramdır. Başlatılan olay ile bunun olası sonuçları arasındaki ilişki tanımlanır. Ana prensibi olaylar zincirinin her seviyesinde, birbirini etkilemeyen iki dikotomi olaydan oluşan bir sonuca, neden olunmasıdır (yol açılmasıdır). Tanımlanan iki olay birbirinden bağımsızdır (veya ayrık) ve mümkün ise aynı zamanda oluşurlar. Dikotominin anlamı bir olayın sadece iki farklı sonucu sahip olmasıdır. Örneğin, bir tankerin çatışma olayı, petrol yük tankları ile ilgili olarak iki olası sonuca sahip olabilir; yük tanklarının kırılmaması veya kırılması ve kırılmasının sonucunda petrol kirliliği ve olası bir yangının oluşması. Bu ve benzeri şekilde bir başlangıç olayı bir çok sonuç ile geliştirilebilir. Bir olayın olabilirliği kendi yapısının yanı sıra bir önceki olaya da bağlıdır.

Olay ağacı modeli oluşturulmasında ilk olarak tehlikeli bir duruma veya kazaya yol açan olaylar serisinin ilki olan başlangıç olayı tanımlanır. Daha sonra emniyet sistemleri, mekanizmalar ve engeller gibi sonuç geliştirme sürecinde fonksiyona sahip durum karakteristikleri kronolojik sırada belirlenir. Her dikotomi olayın çıktıları için olasılıkları tahmin edilir ve başlangıç olay ağacı kurulur. Bu aşamada her dikotomi olay için olasılık bir önceki olaydan bağımsızdır. Eğer bir olayın meydana gelmesi diğer bir olayın olup olmayacağı hakkında bir bilgi vermiyor ise iki olay birbirinden bağımsızdır, birbiri üzerinde hiç bir etkiye sahip değildirler. Diğer taraftan gerçeklikte olaylar birbiri üzerinde bazı derecede bağımlıdır. Şekil 4.12’de

olay ağacı modeline yaklaşımda gösterildiği gibi bu bağımlılık; zaman, olay sıralamasındaki yerleri ve önceki olayların koşullu ilişkileri ile ilgilidir. Bu bağımlılıklar için bazı düzeltme sıralamaları gerçekleştirilmelidir. Bu düzeltmeler için genel bir prosedür yoktur.



Şekil 4.12: Olay Ağacı Modeline Yaklaşım

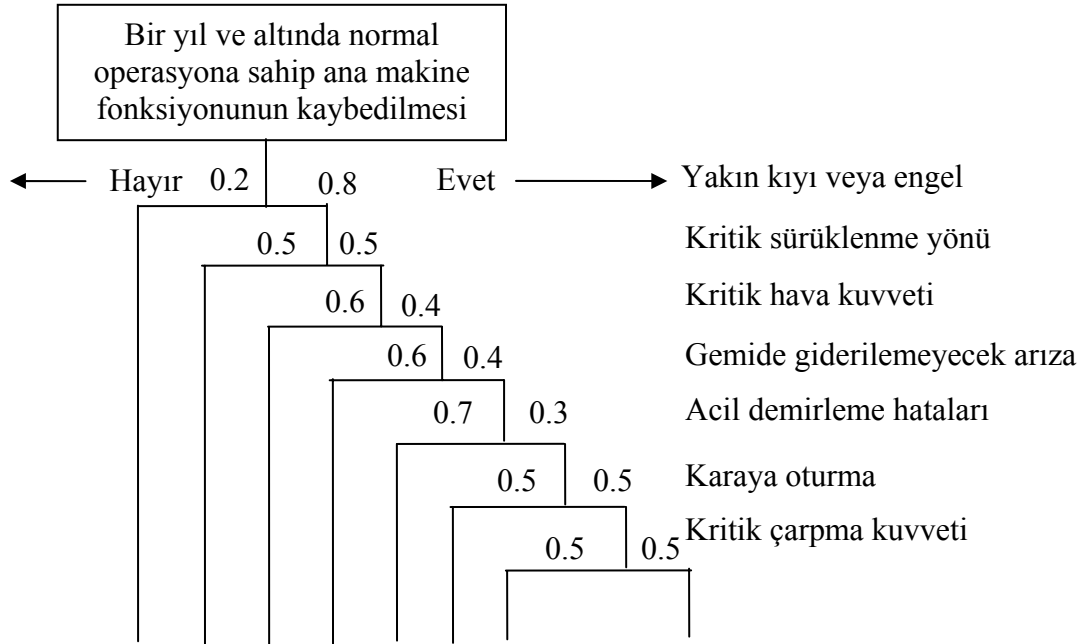
4.4.2 Olay Ağacının Değerlendirilmesi

Olay ağacı analizi başlangıç olayına dayalı sonuç olasılıklarının tahmini için sayısal (nicel) bir metottur.

Hata ağacı analizinde bir tankerin ana makine gücünü kaybetmesi olayı incelendi. Fakat makine gücünün kaybedilmesi neticesinde oluşabilecek potansiyel olaylar incelenmedi. Tankerin ana makine gücünü kaybetme sonucunda karşılaşılabilecek sonuçlar olay ağacı modeli ile aşağıdaki gibi incelenir.

Eğer bir tanker ana makine gücünü kaybeder ise ilgilenilmesi gereken en önemli etki deniz kirliliğine yol açan petrol yayılmasıdır. Tankerler büyük miktarda petrol taşır ve bunun sızmasının çevredeki yıkıcı etkisi bazı durumlarda felaket yaratabilir. Makine fonksiyonu yitirildiğinde petrol sızıntısı olabilirliğinin bulunması için öncelikli olarak makine fonksiyonunun olasılığının hesaplanması gerekir. Bunun için

hata ağacında bulunan sonucu kullanır isek, bir tankerin yılda ana makine gücünü kaybetme olasılığı 0.465’dir. Başlangıç olay ağacı, olaylar arasındaki olası bağımlılıklar değerlendirilmeden şekil 4.13’teki gibi oluşturulur.



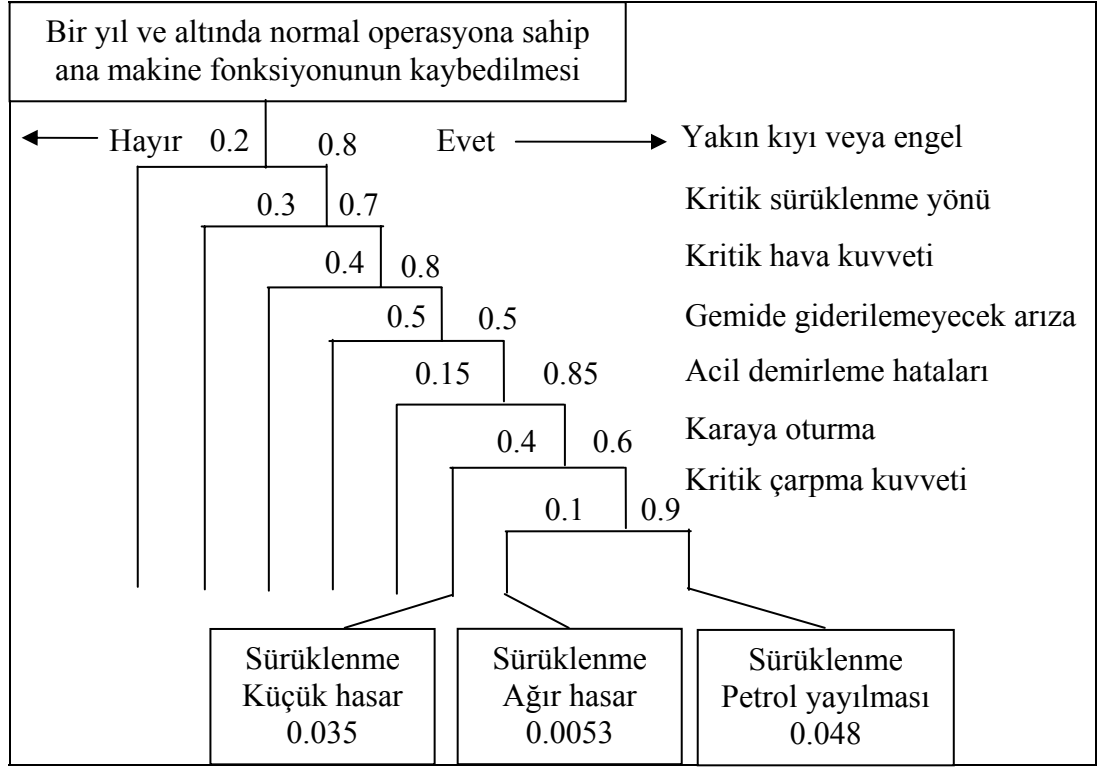
Şekil 4.13: Başlangıç Olay Ağaç Diyagramı

Başlangıç olay ağacında, olaylar arasındaki bağımlılık şekil 4.14’teki etki diyagramı içinde değerlendirilir. Örneğin, “kritik çarpma kuvveti” ve “acil demirleme hatası” olaylarının her ikisi birden “kritik hava kuvveti” olayına bağlıdır. Diğer taraftan “kritik hava kuvveti” olayı ise “kritik sürüklenme yönü” olayına bağlıdır.

Basit bağımlılık ve etki diyagramı	Kritik sürüklenme yönü	Kritik hava kuvvet	Gemide giderilemeyecek arıza	Acil demirleme hataları	Karaya oturma	Kritik çarpma kuvveti
Meydana gelme olasılığının artması: +						
Meydana gelme olasılığının azalması:						
Yakın kıyı veya engel	+	+		+		+
Kritik sürüklenme yönü		+				
Kritik hava kuvvet			+	+		++
Gemide giderilemeyecek arıza						
Acil demirleme hataları					+	+
Karaya oturma						++

Şekil 4.14: Olay Bağımlılığını Değerlendirmek için Etki Diyagramı

Etki diyagramına dayanarak olasılıkların değerlendirilmesi analizcinin takdirindedir. Sonuç olasılıkları tüm olay çıktılarının bulunması ile hesaplanır, bu hesaplama başlangıç üst olayının olasılığı da dahildir. Sonuçtaki olay ağacı şekil 4.15'te gösterildiği gibi makine gücünün yitirilmesinden ve kritik sürüklenmeden dolayı petrol yayılma olasılığı veya olasılığı yılda 0.048 olarak hesaplanır.



Şekil 4.15: Başlangıç Olay Ağacı Diyagramı

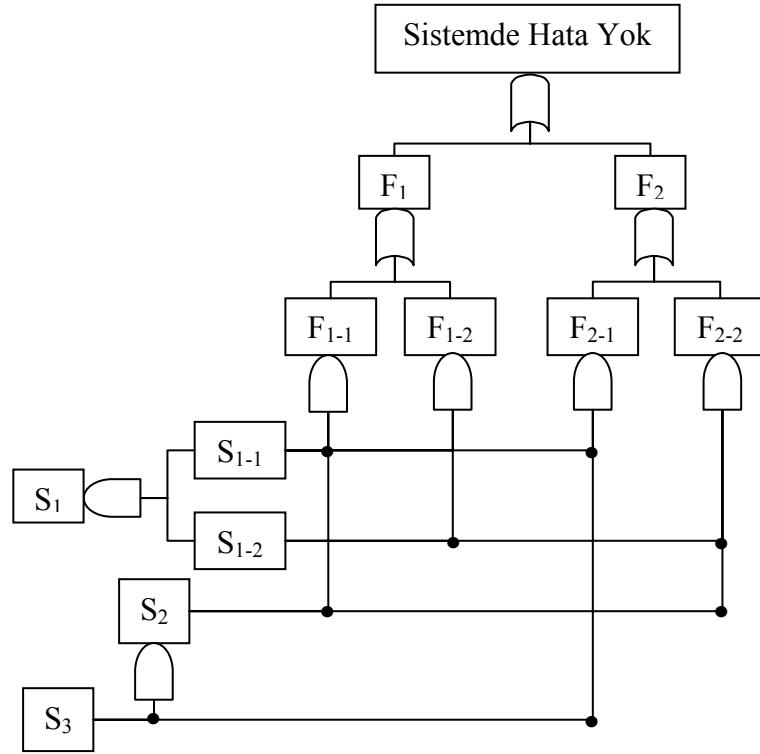
4.5 ANA MANTIK DİYAGRAMLARI (MLD)

Kompleks sistemlerde, işlevsel olarak birbirinden farklı bir çok alt sistemler birbirleri ile etkileşim içindedir ve her biri ayrı olarak modellenmektedir. Bu sebeple, alt sistemlerin etkileşimleri ile birlikte tüm sistemin mantıksal gösterimi ana mantık diyagramları ile gerçekleştirilir.

Ana mantık diyagramları, bağımsız fonksiyonların (veya sistemlerin) bağımsız destek fonksiyonlarının karşılıklı ilişkisini gösterir. Diğer taraftan bir hata uzayı içindeki ana mantık diyagramları, sistem hataları için nedenlerinin mantıksallıklarını da gösterir.

Ana mantık diyagramlarının hiyerarşi yapısı bağımlılık matrisi ile gösterilir. Ana mantık diyagramı üzerindeki her fonksiyon, alt fonksiyonlar ve alt sistemler için bileşenlerinin tüm kombinasyonlarının başarı veya hata etkileri tespit edilir ve “•”

sembolü ile açıkça gösterilir (bir bileşenin hatası bağlantılı bileşende hataya neden olur veya tersi olarak bileşenin başarısı diğer bileşeni başarıya sevk eder). Şekil 4.16 başarı uzayı içindeki ana mantık diyagramını gösterir.



Şekil 4.16: Ana Mantık Diyagramı

Şekil 4.16’da gösterilen ana mantık diyagramında iki ana fonksiyonu (veya sistemi), F_1 ve F_2 , vardır ve her ikisi sistem amacını gerçekleştirmektedir. Bu fonksiyonların her biri, kendi ebeveyn fonksiyonlarını gerçekleştiren özdeş iki alt fonksiyona ayrılmıştır. Bütün bu alt fonksiyonlarının kaybedilmesi F_1 ve F_2 fonksiyonlarının kaybına neden olur. Bu alt fonksiyonlarının geliştirilmesi, S_1 , S_2 ve S_3 ile gösterilen diğer destek fonksiyonları (veya destek sistemleri) ile arayüz oluşturan kendi özdeş donanımları ile temsil edilmektedir. Destek fonksiyonları ana fonksiyonlarının gerçekleşmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, S_1 fonksiyonu iki bağımsız alt fonksiyona ayrılmakta (S_{1-1} ve S_{1-2}), böylece her biri F_1 ve F_2 alt fonksiyonları ile bağımsız olarak etkileşimdedir. Ana mantık diyagramında bağımlılık “•” sembolü ile açıkça gösterilmektedir. Buna göre; S_3 ’ün hatası direk olarak S_2 ’nin hatasına, S_2 ’de sıra ile F_{1-1} , F_{2-2} ve F_{2-1} ’in hatasına neden olmaktadır.

Bir ana mantık diyagramının geliştirilmesinde en önemli unsur, bağımlılık matrisi için oluşturulacak bileşenlerin fiziksel olarak bağımsız olmalarıdır. Fiziksel olarak bağımsızlık, bileşenlerin her hangi bir diğer sistem parçaları ile paylaşılmadığını belirtir. Bazen ana fonksiyonlar ve destek fonksiyonları arasında öncelik belirlenmesi

zor olabilir. Bu durumda bağımlılık matrisi ana ve destek fonksiyonlarına bakılmaksızın oluşturulur. Diyagram haritasından faydalanarak bağımsız bileşenler için hatalarının olası 2^n kombinasyonları hesaplanır. Bu hesaplama Boolean indirgemesi ile yapılabileceği gibi kombinasyonel yaklaşımın kullanılması daha uygundur [3]. Tablo 4.5, şekil 4.16'daki ana mantık diyagramı için örnek kombinasyonları göstermektedir. Bu kombinasyonlar sistemi başarıya ulaştıracak son durum etkisidir. Verilen bir hedef için, S_{1-1} , S_{1-2} , S_2 ve S_3 bağımsız bileşenlerinin (veya alt sistemlerinin) hata olasılığının 0.01 olduğunu varsayar isek, F_{1-1} , F_{1-2} , F_{2-1} ve F_{2-2} 'nin bağımsız hata olasılığı da 0.01'e eşit olur.

Tablo 4.5, $1.0E-6$ 'dan büyük hata olasılığı ile ana mantık diyagramı içinde modellenen bileşenlerin, birbirini engelleyen olası tüm kombinasyonları göstermektedir. Sistemde bir hata oluşturma eğiliminde olan bu kombinasyonlar birbirini engelleyen kesme kümeleridir. Bunlardan birinin tercih edilmesi sistemi hataya götürür. Kombinasyonların meydana gelme olasılıklarının toplamı sistemin hata olasılığını verir. Sistemi başarıya ulaştıracak bir kombinasyon seçildiğinde, bunların meydana gelme olasılıklarının toplamı da sistemin güvenilirliğini verir.

Tablo 4.5. Baskın Hata Kombinasyonları ve Özdeş Olasılıkları

Kombinasyon Numarası (i)	Hatalı Bileşenler	Hatalı Bileşenlerin Olasılıkları (ve diğer bileşenlerin başarısı)	Son Durum
1	Yok	9.3 E-1	Başarı
2	S_3	9.3 E-3	F_{1-1} , F_2 , F_{2-1} , F_{2-2} , S_2 , S_3
3	F_{2-2} , S_3	9.4 E-5	F_{1-1} , F_2 , F_{2-1} , F_{2-2} , S_2 , S_3
4	S_2 , S_3	9.4 E-5	F_{1-1} , F_2 , F_{2-1} , F_{2-2} , S_2 , S_3
5	F_{1-1} , S_3	9.4 E-5	F_{1-1} , F_2 , F_{2-1} , F_{2-2} , S_2 , S_3
6	F_{2-1} , S_3	9.4 E-5	F_{1-1} , F_2 , F_{2-1} , F_{2-2} , S_2 , S_3
7	S_{1-2}	9.3 E-3	F_{1-2} , F_{2-2} , S_{1-2} , S_1
8	F_{1-2} , S_{1-2}	9.4 E-5	F_{1-2} , F_{2-2} , S_{1-2} , S_1
9	F_{2-2} , S_{1-2}	9.4 E-5	F_{1-2} , F_{2-2} , S_{1-2} , S_1
10	S_{1-1}	9.3 E-3	F_{1-2} , F_{2-2} , S_{1-2} , S_1
11	F_{2-1} , S_{1-1}	9.4 E-5	F_{1-1} , F_{2-1} , S_{1-1} , S_1
12	F_{1-1} , S_{1-1}	9.4 E-5	F_{1-1} , F_{2-1} , S_{1-1} , S_1
13	S_2	9.3 E-3	F_{1-1} , F_{2-2} , S_2
14	F_{1-1} , S_2	9.4 E-5	F_{1-1} , F_{2-2} , S_2
15	F_{2-2} , S_2	9.4 E-5	F_{1-1} , F_{2-2} , S_2
16	F_{2-2}	9.3 E-3	F_{2-2}
17	F_{2-1}	9.3 E-3	F_{2-1}
18	F_{1-2}	9.3 E-3	F_{1-2}
19	F_{1-1}	9.3 E-3	F_{1-1}
20	S_{1-2} , S_3	9.4 E-5	F_1 , F_{1-1} , F_{1-2} , F_2 , F_{2-1} , F_{2-2} , S_{1-1} , S_{1-2} , S_2 , S_3 , S_1

Tablo 4.6’da son durum etkilerinin olasılık sonuçları ve sistemi hataya ulaştıracak baskın kombinasyonları gösterilmektedir.

Tablo 4.6. Sistemi Hataya Götürecek Kombinasyonlar

Kombinasyon Numarası (<i>i</i>)	Hata Kombinasyonu	Durum Olasılığı
1	F ₁₋₂ , S ₁	9.4 E-5
2	S ₁₋₁ , S ₁₋₂	9.4 E-5
3	S ₁₋₂ , S ₃	9.4 E-5
4	F ₂₋₁ , S ₁₋₂ , S ₃	9.5 E-7
5	F ₂₋₂ , S ₁₋₁ , S ₁₋₂	9.5 E-7
6	F ₂₋₁ , S ₁₋₂ , S ₂	9.5 E-7
7	F ₂₋₁ , S ₁₋₁ , S ₁₋₂	9.5 E-7
8	F ₁₋₁ , F ₂₋₁ , S ₁₋₂	9.5 E-7
9	S ₁₋₁ , S ₁₋₂ , S ₃	9.5 E-7
10	S ₁₋₂ , S ₂ , S ₃	9.5 E-7
Sistem Hatasının Toplam Olasılığı		2.9 E-4

4.6 HATA ŞEKİLLERİ, ETKİ ve KRİTİKLİK ANALİZİ (FMECA)

Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik analizi; belirlenen ekipman fonksiyonları, işlevsel hata şekilleri, hata nedenlerinin değerlendirilmesi ve etkilerinin (veya sonuçlarının), hem ürün elde edilebilirlik ve güvenilirlik, maliyet, kalite vb. etkilerinin üzerinde hem de bir birleşen seviyesinde, tümevarımsal bir metot ile sistemleştirilmesidir. Bu tür bir analiz nicel özelliktedir.

Analizde standart hale getirilmiş basit formlar, olası hata şekillerinin ve tanımlanan etkilerinin gözden geçirilmesinde kullanılır. Bir hata şekli, hatalı bir sistem veya bileşeninde gözlemlenen bir hata olarak tanımlanır. Prensipde iki çeşit hata şekli vardır: koşuldaki (durumdaki) istenmeyen değişiklik ve istenilen değişikliklerin gerçekleşmemesi.

Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik modeli sistematik olarak en etkili risk azaltma önlemlerinin tanımlanmasını sağlar. Bu önlemler, erken bir tasarım safhasındaki uygun tasarım alternatiflerinin seçilme sürecine yardımcı olmaktadır [20]. Aynı zamanda ileri tasarım değişiklikleri için değerli bir doküman olabilir.

Analizin gerçekleştirilmesi; bir hata olduğu zaman hatanın potansiyel “etkisi” varsayılır ve bunun nedenleri tanımlanır. Her hata şekli ve bunun sonuç etkisi için “kritiklik” veya “risk öncelik sayısı” sınıflaması yapılır. Sınıflama, hatanın “meydana

gelme” olasılığına (veya “hata oranı”), hata etkisinin “şiddetine” ve “tespit edilebilirliğine” bağlıdır.

4.6.1 Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik Analiz Çeşitleri

Ürün gelişimindeki duruma göre Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik analizi ikiye ayrılmaktadır: “tasarım” ve “süreç” Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik analizidir.

Tasarım Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik analizi, ürün performansı üzerinde hata şekillerinin ve bunun etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılır ve alt sistemin, bileşenin ayırma seviyesinde uygulanır. Ana hedefi;

- Hata şekillerinin ve ürün performansı üzerindeki etkilerine göre bunların sıralanmasını sağlamak ve tasarım gelişimi için öncelikli bir sistem belirlemek.
- Potansiyel hata şekillerinin giderilmesi veya oluşumlarının azaltılması için tasarım hareketlerini tanımlamak.
- Ürün tasarımıdaki değişiklikler ve ilerideki aşamalara referans oluşturmak, yeni tasarımların değerlendirilmesi ve ileri tasarımların geliştirilmesi için doküman sağlamak.

Süreç Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik analizi, ürün montajı ve üretimi için kullanılır. Ana hedefi;

- Üretim ve montaj safhasında oluşabilecek uygunsuzlukları tanımlamak,
- Özel hata şekillerine neden olabilecek yüksek kritikliğe sahip süreç karakteristiklerini tanımlamak,
- Üretim veya süreç değişikliklerinin nedenlerini (kaynaklarını) tanımlamak ve bunların azaltımı için stratejiler oluşturmaktır.

4.6.2 Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik Analiz Prosedürü

Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik analizinin gerçekleştirilmesi altı basamakta özetlenmektedir.

Adım 1 – Bileşenlerin veya sistemin tanımlanması. Sistem içi ve arayüz sistem fonksiyonlarının ve sınırlarının tanımlanması.

Adım 2 – Olası hataların ve hata şekillerinin tanımlanması ve sistem blok diyagramının oluşturulması.

Adım 3 – Her hata şekilleri için hata etkilerinin tanımlanması ve en kötü potansiyel sonuçların değerlendirilmesi.

Adım 4 – Frekans terimleri ve sonuçların şiddeti içinde hata etkilerinin derecelenmesi.

Adım 5 – Hata şekillerini tespit edecek metotların değerlendirmesi ve belirlenmesi

Adım 6 – İstenmeyen hata etkilerinin nasıl azaltılacağı ve giderileceğinin tanımlanması ve analiz dokümanlarının oluşturulması.

Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik analizinin ana basamakları aşağıda açıklanmaktadır.

4.6.2.1 Sistemin Tanımlanması ve Blok Diyagramları

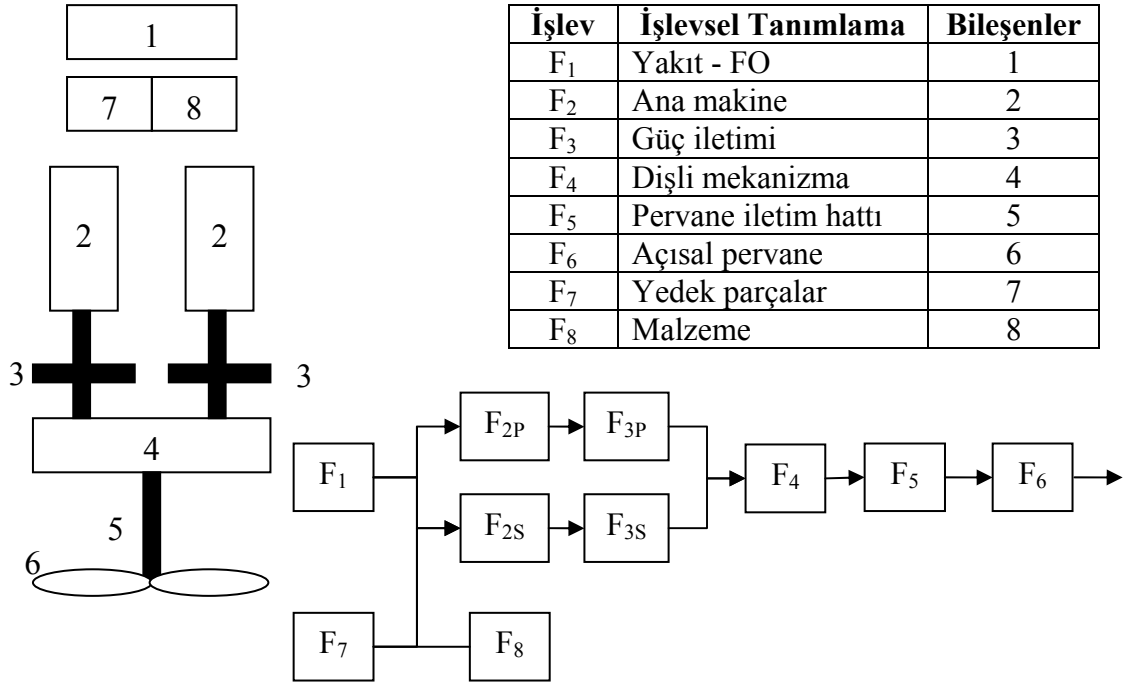
Öncelikle analizin etkili uygulanmasını ve diğer kullanıcılar tarafından anlaşılmasını sağlayacak şekilde sistem tanımlanır. Bu tanımlama ayırmanın farklı seviyeleri içinde yapılabilir. Örneğin; yüksek seviyede sistem “işlevsel blok diyagramı” ile gösterilebilir.

İşlevsel blok diyagramının güvenilirlik blok diyagramından farklı olduğu hatırlanmalıdır. İşlevsel blok diyagramları, bir sistemin işlevsel varlıklarının operasyonunu, karşılıklı ilişkisini ve karşılıklı dayanışmasını tasvir etmektedir. Güvenilirlik blok diyagramları ise sistem bileşenlerin fiziksel düzenlemesidir. Sistem blok diyagramlarının oluşturulmasında farkı yaratan analizcinin ilgilendiği sistem seviyesidir ve bu amaç ile sisteme yaklaşımdır. Sistem seviyesindeki ve yaklaşımdaki farklılıklar, diyagram ve ağaç oluşturulmasındaki yapılanma farklılığına neden olur.

Tanker ana makine gücünün yitirilmesi ile ilgili verilen örneğe ilişkin pervane sisteminin işlevsel blok diyagramı şekil 4.17’de gösterilmektedir.

4.6.2.2 Bileşen/Fonksiyonel Tanımlama

Analiz içindeki bileşenlerin adlandırılması veya bunlar için terminolojinin oluşturulması gerekmektedir. Eğer hatalar bir alt ayırma seviyesinde düşünülüyor ise, bu seviyelerde belirtilmelidir. Analizde yer alan ana bileşen için ayrı bir analiz düşünülebilir. Alt ayırma seviyeleri analiz için yüksek detay seviyesi gerektirir (bileşen alt bileşenlere/işlevlere ayrıldıkça, daha fazla detaylandırılır).



Şekil 4.17: Tanker İtici Güç (Pervane) Sisteminin İşlevsel Blok Diyagramı

4.6.2.3 Hata Şekilleri, Nedenler ve Operasyonel (İşlemsel) Safha

Her hata şekillerinin nedenlerinin tanımlandığı bölümdür (kolondur). Ayrıca fonksiyonun, alt sistemlerin ve bileşenlerin hata çeşitleri de tanımlanmaktadır. Elektronik bileşenler için hata şekilleri; açık, kısa devre, aşınma, sürüklenme, yanlış sıralama vb. kullanılmaktadır. Mekanik bileşenler için bazı hata şekilleri ise; deformasyon, çatlak, çatlama, sızdırma ve gevşemedir.

4.6.2.4 Hata Etkisi

Analizdeki hata etkisi kolonuna bileşen işlevi üzerindeki her hata şekillerinin sonuçları dikkatlice incelenmeli ve kayıt edilmelidir. Etkiler üç seviyede ele alınabilir; “yerel (sınırlı)”, “ileri yüksek ayırma seviyesi” ve “son etki”. Yerel etkiler belirli bir biçimde bileşenin işlevi ve operasyonundaki kabul edilen hata şeklinin etkisini gösterir. Bileşenin işlevselliğindeki ve operasyonundaki her hata şekli, sonucu kendi yerel etkisi içinde tanımlanır. Bazen bileşenin kendi hata şekli dışında hiç yerel etki tanımlanmayabilir. Bununla birlikte, bileşen çıktısındaki her hatanın sonuçları ikinci sıra etkileri olarak tanımlanabilir. Son etki, hatanın sistem üzerinde, işlevdeki ve operasyondaki kendi etkisi olarak tanımlanır. Son etki çoklu hataların tek bir sonucu olabilir.

4.6.2.5 Hata Şekillerinin Tespit Edilmesi

Her hata şekli için hata tespit özellikleri tanımlanır. Bu tespitler ölçüm cihazları ile yapılabileceği gibi bileşenin davranışının gözlemlenmesi ve daha önce kendisi için tanımlanan hata belirtilerinin oluşmaya başlaması şeklinde de olabilir. Tablo 4.7’de hata şekilleri için tespit edilme dereceleri gösterilmektedir [3].

Tablo 4.7. Hata Şekilleri Tespit Sınıflandırması

Tespit Etme	Derece	Ölçme (Kriter)
Kesin	1	Tasarım veya operasyonel kontrolünün kesin potansiyel bir neden veya hata şekli tespit etmesi
Çok Yüksek	2	Tasarım veya operasyonel kontrolünün potansiyel bir neden veya hata şekli tespit etme şansı çok yüksek
Yüksek	3	Tasarım veya operasyonel kontrolünün potansiyel bir neden veya hata şekli tespit etme şansı yüksek
Orta Dereceli Yüksek	4	Tasarım veya operasyonel kontrolünün potansiyel bir neden veya hata şekli tespit etme şansı orta dereceli yüksek
Orta	5	Tasarım veya operasyonel kontrolünün potansiyel bir neden veya hata şekli tespit etme şansı orta
Düşük	6	Tasarım veya operasyonel kontrolünün potansiyel bir neden veya hata şekli tespit etme şansı düşük
Çok Düşük	7	Tasarım veya operasyonel kontrolünün potansiyel bir neden veya hata şekli tespit etme şansı çok düşük
Pek Az	8	Tasarım veya operasyonel kontrolünün potansiyel bir neden veya hata şekli tespit etme şansı pek az
Çok Az	9	Tasarım veya operasyonel kontrolünün potansiyel bir neden veya hata şekli tespit etme şansı çok az
Belirsiz	10	Tasarım veya operasyonel kontrolü potansiyel bir neden veya hata şekli tespit edememektedir

4.6.2.6 Risk Azaltma Önlemleri (Telafi Edici Önlemler)

Risk azaltma önlemleri; tespit edilmiş bir hatanın, tüm sisteme yayılmaması ve giderilmesi için alınması gereken düzeltici fonksiyonların tanımlanmasıdır. Bu nedenle hatanın etkilerini hafifletmeye yönelik her ayırma seviyesi önlemleri tanımlanır. Bu önlemler şunları içerir; operasyonun devamı ve emniyeti için bazı parçaların (bileşenlerin) çıkarılması, emniyetli teçhizatların kullanılması ve alternatif operasyon biçimleridir (örneğin, yedek bileşenlerin kullanımı).

4.6.2.7 Şiddet Derecesi

Şiddet sınıflandırması, hata şeklinden kaynaklanan en kötü potansiyel etkinin nitel göstergesini belirtir. Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik analizinde şiddetin nitel gösterimi uzay bilimleri uygulamalarında kullanılmaktadır (örneğin; Birleşik

Devletler Savunma Bakanlığı (1980) tarafından Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik analizi için kullanılan Askeri Standartları MIL-STD1629A formu) ve genelde etkinin nihai sonucu olarak düşünülmektedir. Tablo 4.8’de şiddetin nitel sınıflandırılması gösterilmektedir. Buna göre şiddet derecesi ile etkinin niteliği zıt ilişki içindedir.

Tablo 4.8. Şiddet Sınıflandırması

Etki	Derece	Ölçme (Kriter)
Felaketli (Facia)	1	Ölüm veya yaralanma ile sonuçlanan her hata
Kritik	2	Sistemi, bir emniyet tehlikesi yaratması ve kabul edilir sınırlardan uzaklaştıran her hata
Önemli (büyük)	3	Sistemi kabul edilir sınırlardan uzaklaştıran fakat önlenabilir veya kontrol edilebilir her hata
Önemi az (küçük)	4	Performansı kabul edilir sınırlardan uzaklaştırmayan her hata

Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik analizinin ulaştırma ile ilgili uygulamalarında (örneğin; Otomotiv Mühendisleri Birliğinin tasarladığı ve otomotiv tedarikçileri tarafından kullanılan SAE J1739 formu) şiddetin nitel gösterimi tercih edilmemektedir, bunun yerine tablo 4.9’da belirtildiği gibi şiddetin değerlendirilmesi kullanılmaktadır. Nitel yaklaşıma göre, şiddetin değerlendirilmesinde şiddet derecesi arttıkça, hatanın etkisi artmaktadır ve dolayısı ile risk öncelik sayısı da artmaktadır.

Tablo 4.9. Şiddetin Değerlendirmesi

Etki	Derece	Ölçme (Kriter)
Etkisiz	1	Hiç bir etki yok
Çok Küçük	2	Hata şeklinin, uygunluk ve işlevini tamamlamada çok küçük kayıp ile sonuçlanması
Küçük	3	Hata şeklinin, uygunluk ve işlevini tamamlamada kısmi kayıp ile sonuçlanması
Çok Düşük	4	Hata şeklinin, uygunluk ve işlevini tamamlamada kayıp ile sonuçlanması
Düşük	5	Hata şeklinin, sistem veya bileşeninin performansının seviye azalması ile sonuçlanması
Orta	6	Hata şeklinin, sistem veya bileşeninin işlev kaybı ile sonuçlanması
Yüksek	7	Hata şeklinin, sistem veya bileşenin kaybı ve müşteri memnuniyetsizliği ile sonuçlanması
Çok Yüksek	8	Hata şeklinin, öncelikli sistem bileşenin işlevini kaybetmesi ile sonuçlanması
Ciddi	9	Emniyetle ilgili hata şekillerinin, uyarı ile kurallara uymamaya neden olması
Tehlikeli	10	Emniyetle ilgili hata şekillerinin, uyarı olmadan kurallara uymamaya neden olması

4.6.2.8 Hata Oranı

Özel bir hata nedeni veya hata mekanizmasının olasılığı olarak tanımlanır. Tahmin edilen veya beklenen hata frekansı tablo 4.10’da gösterilmektedir [3].

Tablo 4.10. Frekans Sınıflandırması

Frekans Sınıfları	Derece	Ölçme (Kriter)
Olası değil (Pek az)	1	1/150.000’den küçük veya 1000 yılda bir veya çok nadiren
Düşük (Seyrek)	2	1/150.000 veya 100 – 1000 yılda bir
	3	1/15.000
Orta (Ara sıra)	4	1/2000 veya 10 – 100 yılda bir
	5	1/400
Yüksek (Muhtemel)	6	1/80 veya 1 – 10 yılda bir
	7	1/20
	8	1/8
Çok yüksek (Sık sık)	9	1/3 veya bir yıldan daha sık
	10	½’den daha büyük

4.6.2.9 Risk Öncelik Sayısı

Risk öncelik sayısı; şiddet, hata frekansı ve tespit etme sınıflandırılmalarının bir ürünüdür ve potansiyel tasarım ilgilenişlerinin sıralama derecesi olarak kullanılır. Risk öncelik sayısı, şiddet, hata frekansı ve tespit etme değerlerinin çarpımı şeklinde elde edilir ve ulaştırma uygulamalarında önemli bir parametredir.

4.6.2.10 Düşünceler

Açıklayıcı veya geçerli her tür bilginin veya önemli notların belirtildiği kolondur.

4.6.2.11 Kritiklik Analizi

Kritiklik analizi, hata şekillerinin olasılıklı hesaplama kombinasyonudur. Kritiklik analizi beş parametre ile yapılır.

1. Hata Etki Olasılığı (β): hata şekillerinin meydana gelmesi ile oluşacak, kritiklik sınıflandırması belirlenmiş, hata etkisinin koşullu olasılığı β değeri ile gösterilir.
2. Hata Şekli Oranı (α): tanımlanmış hata şekilleri dahilinde hataya uğrayacak bileşenin olasılığıdır. Eğer bir bileşenin potansiyel tüm hata şekilleri listelenirse, bunlara dayanan α değerlerinin toplamı bire eşit olur.

3. Hata Oranı (λ): bileşenin hata şekilleri için elde edilen özel hata oranıdır. λ 'nın tahmini veri testinden elde veya Bölüm 3.7'de belirtilen hata oranı kaynaklarından elde edilir.
4. Operasyon Zamanı (T): sistem veya bileşenin saat veya operasyon çevrim sayısı olarak işlevini gerçekleştirdiği zamanı dilimini gösterir.
5. Hata Şekilleri Kritiklik Sayısı (C_r): potansiyel her hata şekli için, hata şeklinin meydana gelmesine ve sonuçlarına dayanarak yapılan sınıflandırılmalıdır (derecelendirilmez). Bir bileşenin kritiklik sayısı, C_r , aynı şiddet sınıflandırmasına sahip hata şekillerinin kritiklik sayıları (C_m) toplamına eşittir.

$$C_r = \sum_{i=1}^n (C_m)_i \quad (4.48)$$

$$C_m = \beta \cdot \alpha \cdot \lambda \cdot T$$

Denklem (4.43)'teki C_m bireysel bir hata şeklinin kritikliğini ve n ise aynı şiddet sınıflandırmasına sahip bir bileşenin hata şekilleri sayısını göstermektedir.

4.6.3 Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik Analizi Uygulaması

Analiz basamaklarının açıklanmasında değinildiği üzere Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik analizi uzay ve ulaştırma uygulamaları olarak ikiye ayrılmaktadır. Genelde uzay bilimleri uygulamaları için Birleşik Devletler Savunma Bakanlığı Askeri Standartları (MIL-STD 1629A) formu, ulaştırma uygulamaları için ise Otomotiv Mühendisleri Birliği (SAE J1739) formu kullanılmaktadır. Her iki uygulamada kullanılan formlar benzer özellikte olduğundan birbirlerinin yerine kullanılabilir. İki uygulama arasındaki en önemli fark, hata etkisi şiddetinin değerlendirilmesidir. Uzay uygulamalarında hata oranı ve risk öncelik sayıları kullanılmamakta sadece şiddet sınıflandırılmasından yararlanılmaktadır. Ulaştırma uygulamalarında ise hata oranları ve risk öncelik sayısı kullanılmakta ve risk öncelik sayısının belirlenmesi hata oranı, hatanın tespit edilme derecesi ve şiddetin değerlendirilmesi ile gerçekleştirilmektedir.

Şekil 4.10'da belirtilen ana makine gücünün kaybedilmesi olayının, devir düşürücü ve/veya pervane iletim hattı hatasının neden olduğunu “güç iletimindeki kayıp” ve açılmalı pervane hatasının neden olduğu “güç tüketimindeki kayıp” olayları için Hata Şekilleri, Etki ve Kritiklik analizi formuna işlenmesi tablo 4.11'de örnek olarak gösterilmektedir.

Tablo 4.11. Hata Modu, Ekti ve Kritiklik Analizi Formu

Sistem : Ana Makine
 Alt Sistem : Güç İletimi ve Tüketimi
 Bileşenler : Dişli Mekanizması, Pervane İletim Hattı ve Açısal Pervane

Analiz Numarası :
 Sayfa : /
 Gerçekleştiren :
 Tarih :

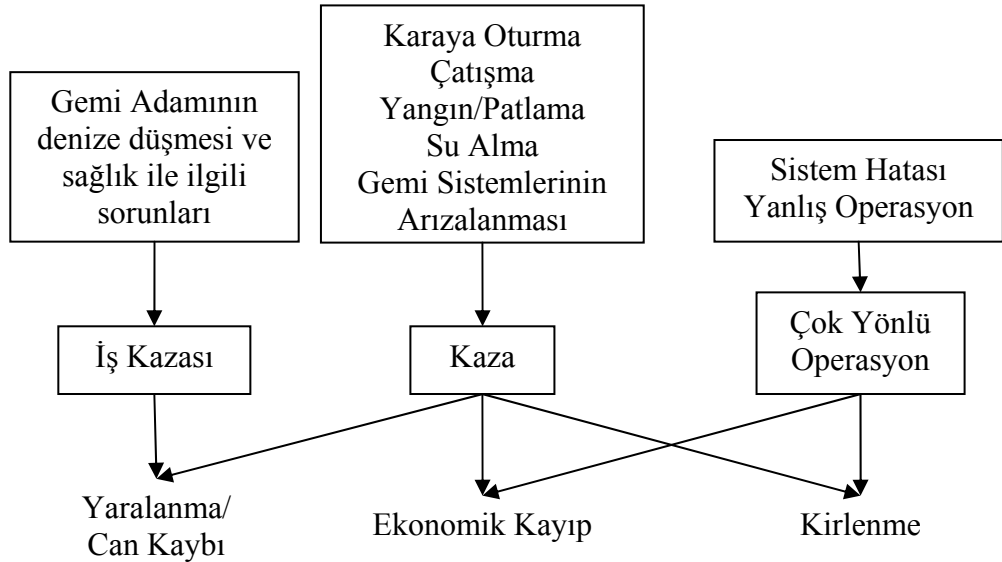
Bileşenlerin Tanımlanması			Hatanın Tanımlanması			Hata Etkileri			Hata Oranı	Şiddet Derecesi	Risk Öncelik Sayısı	Risk Azaltma Önlemleri	Düşünceler
Ref. No	Fonksiyon	Operasyon Biçimi	Hata Modu	Hata Nedeni	Hatanın Tespiti	Alt Sistemler	Sistem İşlevi	Son Etki					
1	Ana Makine	Normal operasyon	Stop	Yakıt beslemesi yok	Vardiya sırasında (ses uyarısı) 1	Devir düşürücüye fazla yüklenme	Yarım etki	Hız azaltışı	1	5 7	5 7	Devir azaltışı, Durma	2 nolu ana makine operasyona devam eder ve tamir gemide giderilir
			Stop	Sabit ve hareketli yapı elemanları hatası				Hız azaltışı	4	5 7	20 28	Devir azaltışı, Durma	
			İşlev azalması	Yanma karakteristikleri eksikliği ve performans düşümü				Azaltıcı etki	2	5 6	10 12	Devir azaltışı, Durma	
2	Dişli Mekanizması	Normal operasyon	Güç iletilemiyor	Diş kırılması	Vardiya sırasında (ses uyarısı) 1	Ana makineye fazla yüklenme	İtici güç olmaması	Manevra yeteneği kaybedilir	1 4	9	9 36	Durma, Şaftı kitleme	Birincil ve ikincil dişliler arızalanır, limanda tamir
3	Şaft	Normal operasyon	Güç iletilemiyor	Şaft kırılması	Ses uyarısı 1	Ana makineye fazla yüklenme	İtici güç olmaması	Manevra yeteneği kaybedilir	1	9	9	Durma, Şaftı kitleme	Havuzda tamir
4	Açısal Pervane	Normal operasyon	İşlev azalması	Kanat kırılması	Ses uyarısı 1	Ana makineye fazla yüklenme	Azaltıcı etki	Hız azaltışı	4	4	16	Makine gücü ve pervane açısı azaltışı	Sadece bir kanatta hasar, havuzda tamir

5. DENİZCİLİK SEKTÖRÜNDE RİSK KAVRAMI

Denizcilik sektöründe yer alan aktiviteleri aşağıdaki gibi özetleyebiliriz;

1. Deniz Ulaşımı:
 - a. Yakın Kıyısal Seferler
 - b. Okyanus Aşırı (Uzak yol) Seferler
 - c. Yolcu Taşımacılığı
 - d. Yük ve Yolcu Taşımacılığı
2. Balıkçılık
3. Kıtasal Operasyonlar (tarama, yüzer platformlar vb.)
4. Bilimsel İncelemeler ve Araştırmalar

Bu aktivitelerin gerek ekonomik, gerek sosyo-kültürel bir çok olumlu tarafları olmakla beraber, bunun yanında olumsuz veya tehlikeli boyutları da mevcuttur. Bunların başında deniz kazaları gelir. Deniz kazalarının sonuçları şekil 5.1’de gösterildiği gibi üç çeşittir; can, mal (gemi ve yük) ve çevresel zararlar.



Şekil 5.1: Deniz Kazaları Çeşitleri ve Sonuçları

Deniz kazalarının anlaşılması için, öncelikle Bölüm 4’de bahsedilen ilgili sistem veya bileşenin hata mekanizmalarının anlaşılması gerekir. Bir geminin istenen amacını gerçekleştirmesi için sahip olması gereken sistem ve fonksiyonlar tablo

5.1’de gösterilmektedir. Gemi güvenilirliği, tasarım, inşa ve bakım verimliliğinin bir fonksiyonudur. Güvenilirlik ve risk analizinin ana hedefi bu sistemlerinin işlevini devam etmesini sağlamak ve hata etkilerini en aza indirmektir.

Tablo 5.1. Gemi Sistemleri ve Gemi Fonksiyonları

Gemi-Sistemler	Gemi-Fonksiyonlar
Yaşamsal servisler	Demirleme
Haberleşme (İletişim)	Yük taşıma
Kontrol	Haberleşme (İletişim)
Elektrik	Acil durum kontrolleri
Balast	Yaşanabilir çevre
Kaldırma donanımları	Manevra
Sevk sistemi	Bağlama
İşletim Destek Sistemleri	Seyir
Yanışma, kalkma	Deniz kirliliğini önleme
Radar	Güç ve pervane
Pompa ve devreler	Yakıt tedariki
Basınç, hidrolik	Gemi dengesi
Emniyet ve Güvenlik	Gemi yapısı

Bir hata farklı ciddiyet dereceleri ile farklı sonuçlar oluşturma eğilimindedir. Hatanın meydana getireceği sonuçlar şunlardır;

1. Kaza: sonuçları insanlarda, geminin kendi yapısında ve yükünde veya çevrede zarar yaratan istenmeyen olay olarak tanımlanır.
2. Hadise: kazasal bir sonuç meydana getirmeden önce etkisizleştirilmiş veya kontrol altına alınmış, tespit edilen istenmeyen olaylardır. Eğer hadiseler sıklıkla meydana geliyorsa, bu emniyet seviyesinin yetersizliğini gösterir.
3. İşlevsel bozukluk: bir sistem veya bileşeni için operasyon kriterlerinin ihlal edilmesidir.
4. Uygunsuzluk: operasyon dışındaki nelerin kabul edilebilir olduğunu tanımlayan kesin kriterlerdir.

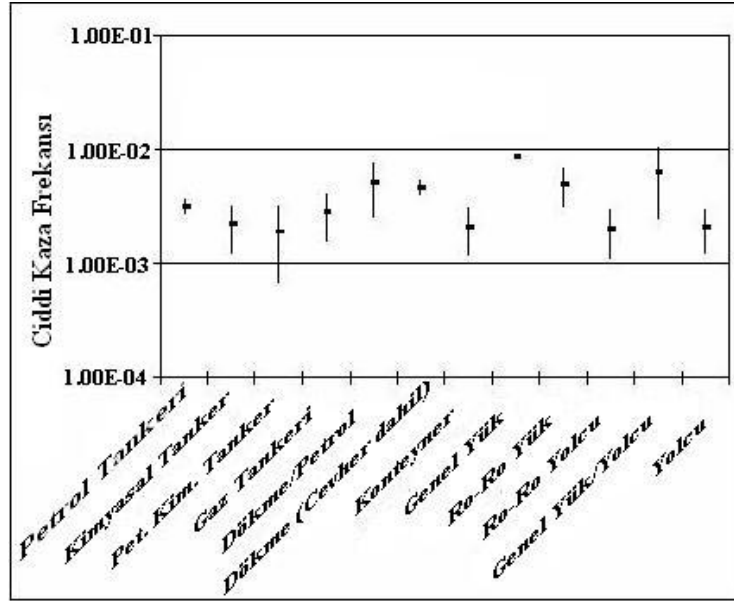
Kazaların nedenleri bir çok faktörün birleşmesi şeklinde olabilir. Tablo 5.2’de kaza nedenlerinin ana grupları gösterilmektedir.

Tablo 5.2. Genel Kaza Sebepleri

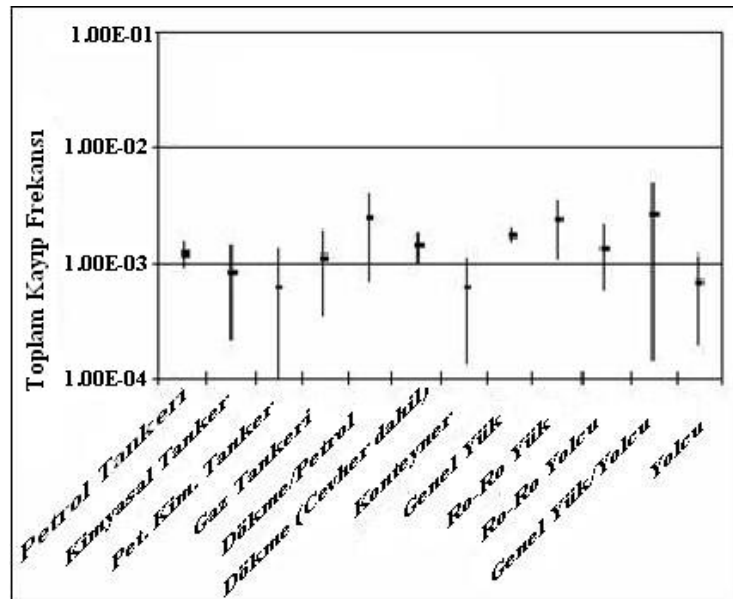
İnsan Hataları; örneğin seyir cihazlarını okunma hatası
Mekanik Hatalar; örneğin pompa arızası
Yangın ve Patlama; örneğin dumandan dolayı görüş kaybı
Yapısal Nedenler; örneğin tanker karina yapısı (tek cidar, çift cidar vb.)
Hava Sebepleri; örneğin kuvvetli rüzgar
Çok yönlü (birden fazla sebebin peşi sıra oluşması hali) sebepler

Risk yönetimi, kazanç ve mal varlığına gelen tehditlerin ve potansiyel tehlikelerin tanımlanması, kontrolü ve iyileştirilmesi için izlenen sistematik bir süreçtir [23]. Risk analizi yapmanın ana nedeni sistem veya fonksiyonu için olası nedenlerin öneminin ölçülmesidir ve bu nedenlerin oluşmasını önlemek veya oluştuğu zaman sonuçlarını azaltmaktır.

Şekil 5.2’de gemi tiplerine göre ciddi kaza frekansları ve şekil 5.3’de gemi kayıp frekansları gösterilmektedir [24].

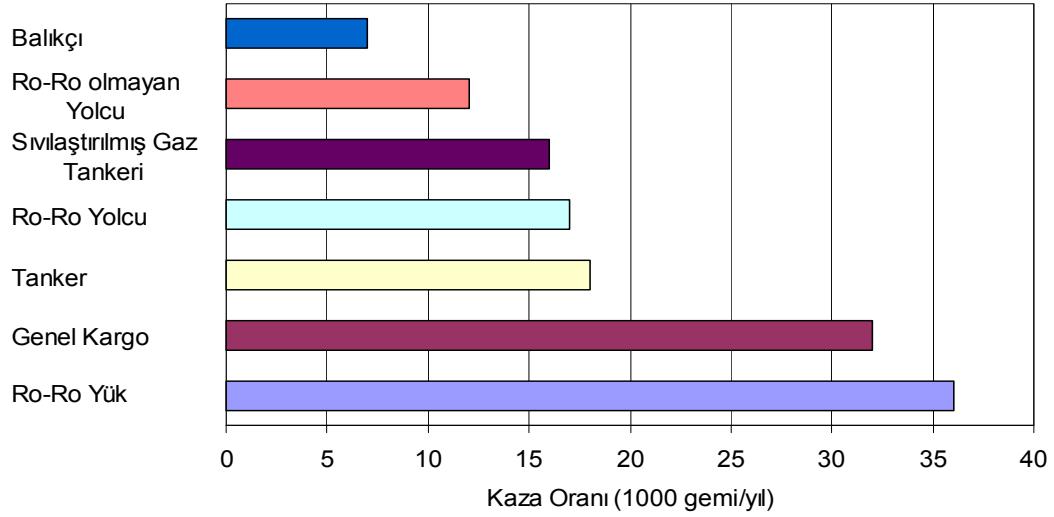


Şekil 5.2: Gemi Tipine Göre Ciddi Kaza Frekansları (standart sapmanın 6 ve 7 üyeleri arasında olmasındaki güven aralığı ile gösterilmiştir)



Şekil 5.3: Gemi Tipine Göre Toplam Kayıp Frekansları (standart sapmanın 6 ve 7 üyeleri arasında olmasındaki güven aralığı ile gösterilmiştir)

Şekil 5.4’de farklı gemi tipleri için ciddi kaza oranı dağılımları gösterilmektedir. Buna göre; tüm gemi tipleri içinde en fazla, sürekli kaza yapan Ro-Ro gemileridir [25]. Bunun nedeni; trafiğin yoğun olduğu kıyı seferlerinde çalışmaları, kısmen yüksek hızla işletilmeleri ve zayıf karınaya sahip olmalarıdır.



Şekil 5.4: 1980-1989 Gemi Tiplerine Göre Dünya Filosu için Kayıp ve Ciddi Kaza Oranı

Tankerler ve sıvılaştırılmış gaz taşıyıcıları, kuru yük gemilerine göre emniyet sistemleri daha çok güçlendirilmiş gemi tipleridir. Ticaret gemileri içinde en iyi kaza oranı performansına Ro-Ro olmayan yolcu gemileri sahiptir.

Burada şu yanlış anlaşılmanın da giderilmesi gerekir. En az kaza oranı balıkçı gemilerinde görülmekte fakat bu diğer gemi tiplerine göre yanıltıcı olmaktadır. Bunun sebebi bu tür gemilerin çalışma zamanları azdır, ticaret gemileri ise hemen hemen yılın her günü faaliyetlerine devam eder (ideal değer 365 gün içerisinde 8 gün çalışmamasıdır). Ayrıca, tankerler taşıdığı yük ve operasyon zorlukları, kalifiye personel tahsisi gibi etkenlere bakıldığında denizcilikte en riskli gemiler olarak düşünülebilir. Bundan dolayı, istatistiksel çalışmalarda gemi tiplerine göre yapılan ayrımlar tankerler ve tanker olmayan gemiler şeklinde yapılmaktadır.

Potansiyel olarak riskleri çok yüksek olmasına karşılık istatistikler incelendiğinde (şekil 5.4) en riskli geminin Ro-Ro olduğu görülmektedir (**Lloyd’s Register of Shipping, 1962-93, 1994-98**). Bunun en temel nedeni; olası tanker hatalarının ne denizcilik sektörüne ne de diğer endüstri dallarınca kabul edilemeyecek kadar vahim sonuçlara sahip olabilme potansiyelleridir. Bu sebeple tankerler için getirilen

standartlar ve kurallar diğer gemi tiplerinden ayrı tutulmakta ve diğer gemi tipleri ile karşılaştırıldığında şartların çok ağır olduğu gözlemlenmektedir.

Deniz kazalarının neden meydana geldiği konusunda bir çok teori vardır ve en yaygın olanları ise şunlardır; dikkatsizlik ve ihmal, normalden sapmalar, deniz ve hava şartlarında olağan üstülük, tehlikeli aktiviteler, pilota aşırı güven, sürekli kaza yapılması, eğitim eksikliği. Bu faktörlerin temelini insan hatası oluşturmaktadır. Deniz kazalarının karakteristikleri tablo 5.3’de gösterilmektedir.

Tablo 5.3. Deniz Kazalarının Karakteristikleri

Karakteristik	Tanımlama
Rutin	Anormal durumlardaki kazayı tetikleyici faktörler dışındaki rutin aktivite ve durumlar ile ilgili olan sapmalar veya hatalar.
Çoklu Nedenler	Kazayı sadece tek bir nedenin oluşturması enderdir. Genelde kaza bir çok sayıdaki hata sonucu oluşmaktadır.
Süreç	Nedensel faktörlerin diğerleri ile etkileşmesidir.
Dereceli İlerleme	Kazalar genelde hemen oluşmaz, zamana bağlı işlevsel azalma veya hata ile gelişir ve sonuçları kaza eğilimine ilerler.
Kullanıcı (İnsan) Hatası	Görev ve ihmal terimleri kullanıcı (insan) hatasını temsil eder.
İlgili Durum	Kazasal süreç içinde kaza ile ilgili (özellikle şartlı) durumların birleşimi veya sonucu daha da kritik hale getirir.
Sonuca Odaklanma	Hatanın en son kaza evresinde tanımlanması başlangıçta tanımlamaya göre daha kolaydır. Bu nedenle alınacak önlemler, kazayı tamamıyla önleme yerine sonuçları sınırlandırma biçiminde yapılır.

Örnek olarak, çatışma ve karaya oturma için nedensel faktörlerin tanımlanması ve sınıflandırılması tablo 5.4’de gösterildiği gibi altı ana faktöre bağlıdır [20]. Tablo 5.4’deki nedensel faktörler ile ilgili sayısal veriler 419 geminin karaya oturması sonucunda elde edilmiştir. Buna göre en fazla etkiye sahip nedensel faktör; çevre şartlarından kaynaklanan kanal ve sığ su etkisidir ki, 79 tane gemi bu neden sonucunda karaya oturmuştur ve bu da tüm nedenler için %18.9’luk paya sahiptir.

Denizcilik sektöründeki tüm kaza ve olağan dışı operasyonel senaryolar birlikte değerlendirildiğinde risk faktörlerinin aşağıda tanımlandığı üzere gruplandığı gözükmemektedir [23].

1. Yetersiz iş uygulamaları ve idari eksiklikler (%17.2)
2. Yönetim (%16.6)

3. Teknik eleman ve bilgi eksikliği (%14.6)
4. Ergonomi (%13.3)
5. Bireysel Faktörler (%11.7)
6. Alt yapı (%11.5)
7. Terminal, liman (%5.7)
8. Çevresel şartlar (%4.4)
9. Çalışma şartları (%0.5)

Bu faktörler için insan ve organizasyonel yapının %59 olduğu görülür. Bu risk faktörlerinin ve etkilerinin sınıflandırmaları tablo 5.5 ve tablo 5.6’de gösterilmektedir [23].

Tablo 5.4. 1599 grt üstü Gemilerin Karaya Oturma Kazaları ile İlgili Nedensel Grupları ve Frekansları

Nedensel Alan	Nedensel Gruplar	Frekans	
		Tam	Yüzde
Çevresel Şartlar % 39.9	Çevresel şartlardan etkilenen seyir cihazları	8	1.9
	Yetersiz işaret ve şamandıra	27	6.4
	Görüşün azalması	53	12.5
	Kanal ve sığ su etkisi	79	18.9
İşlevsel Hata % 8.8	Gemi sistemlerindeki işlevsel hatalar	24	5.7
	Seyir cihazlarındaki işlevsel hatalar	8	1.9
	Otomatik kontrol hataları	3	0.7
	Haberleşme cihazları hatası	2	0.5
Yeterli Kaynak Eksikliği % 18.9	Köprüüstü tasarımı	1	0.2
	Yetersiz harita, kılavuz kitaplar ve yayınlar	34	8.1
	Yetersiz mürettebat ve köprüüstü mürettebatı	35	8.4
	Köprüüstü haberleşme hatası	5	1.2
	Yetersiz kalan yeterliliklerde istihdam edilen gemi adamı ve eğitim eksiklikleri	4	1.0
Seyir Hatası % 22.9	Seyir ve manevra hatası	49	11.7
	Gözcülük hatası	35	8.4
	Cihaz gözlem hatası	10	2.4
	Trafik durumunu anlama veya algıma hatası	2	0.5
İhmalkarlık % 8.1	Vardiya performans hatası	24	5.7
	Bireysel şartlar	10	2.4
Diğer Gemiler % 1.4	İşlevsel hatalar ve kusurlar	-	-
	Seyirsel hatalar	6	1.4
Toplam		419	100

Tablo 5.5. Risk Faktör Sınıflandırması

Risk Faktörü	Açıklama
Bireysel Faktörler	Çalışma morali, motivasyon ve sorumluluğun eksikliği Tehlikeli ve stresli durumlarda çalışmanın idrakinde olma ve gereken davranışları bilmenin eksikliği
İş Uygulamaları	Yetersiz mürettebat istihdamı ve vardiya tutulması Seyir ve yük işlemleri için prosedür ve talimatların eksikliği Tamir bakım onarım sistemi ve prosedürleri eksikliği, pratik iş performansının yetersiz oluşu Acil ve özel durumlar için eğitim eksikliği
Yönetim, idare	Yetersiz bakım ve onarım işi Emniyet, çevre ve koruma prosedürlerinin eksikliği Acil durum hazırlık planlarının eksikliği Yük elleçleme ve seyir için prosedür eksiklikleri
Teknik Faktörler	Seyir araçlarının güvenilirliği Pervane ve dümen sisteminin güvenilirliği Yük elleçleme ve izlemenin güvenilirliği Atık gaz sisteminin güvenilirliği Mekanik parçalar ve makine sistemleri bakım yetersizliği Yağ ve gaz sızıntısının olduğu yerlerde tutuşturucu kaynaklarının bulunması Yangın söndürme sistemlerinin eksikliği/yetersizliği
Ergonomi, İnsan Makine İlişkisi	İş istasyonları ve çalışma mahalleri yerleşimi Kontrol cihazları İzleme ve görüntüleme sistemleri
Çalışma Koşulları	Yetersiz emniyet koruma araçları
Terminal	Sahildeki ekipmanların kalitesi ve teknik kapasitesi Yükleme/Boşaltma/Yakıt alma için yetersiz talimatlar
Altyapı	Klaslamanın yetersizliği Emniyet ve güvenlik denetimlerinin yetersizliği Kılavuz servisleri Trafik hizmetleri ve kontrolü Petrol kirliliği ile ilgili yetersizlikler
Çevre Şartları	Kötü hava koşulları Sığ su ve dar kanal etkileri Rüzgar ve deniz şartları Görüşün azalması
Dış Faktörler	Mürettebat istihdamındaki düzenleme eksiklikleri Yolların, seyir kurallarının eksikliği Liman ücretlerindeki düzenlemelerin eksikliği Yakıt alma, transfer ve kontrol yetersizliği

Tablo 5.6. Risk Etki Sınıflandırması

Risk Faktörü	Açıklama
Bireysel Faktörler	Seyir ve gemi operasyonları için artan yeterlilik gereksinimleri Personel yeterlilikleri için deneme ve doğrulama prosedürleri
İş Uygulamaları	Geleneksel gemi operasyonlarına yönelik eğitimler Simulatöre dayalı eğitim, seyir ve gemi operasyonları Acil durum ve yangınla mücadele eğitimleri Denetim eğitimleri
Yönetim, idare	Bakım planlaması ve operasyonda artan işler Çevre ve emniyet politikası, kalite yönetimi; seyir, makine dairesi, yük, sintine ve yakıt tankları için prosedürlerin oluşturulması
Teknik Faktörler	Yük mahali veya tankı, boru devreleri ve üzerindeki ekipmanların bakımı için kriterler Yapı elemanları, havalandırma ve yangın söndürme sistemlerinin tasarımı Geminin manevra kabiliyeti için kriterler oluşturulması Yük elleçleme için otomatik kontrol Seyir cihazları, makine sistemi, inert gaz sistemi, yakıt alma sistemi, ölçme, değerlendirme ve kontrol sistemleri için güvenilirliğin ve elde edilebilirliğin artırılması
Ergonomi, İnsan Makine İlişkisi	Köprüüstü sistemlerinin ergonomik tasarımı ARPA/Radar sistemlerinin ergonomik tasarımı Yük kontrol odasının ergonomik tasarımı Yangın alarm sisteminin ergonomik tasarımı Güverte üzerindeki elle kontrol edilen valflerin ergonomik tasarımı Hat planlaması için sistemlerin tanıtılması Gemi bünyesindeki streslerin ölçülmesi Elektronik harita sisteminin tanıtılması Uydu seyri Entegre köprüüstü sisteminin tanıtılması Emniyet fonksiyonlarının izlenmesi Yükün izlenmesi Yakıt alma işlemlerinin izlenmesi İlgili mahallerdeki zehirli gaz yoğunluğunun izlenmesi
Çalışma Koşulları	Yük mahalinde çalışma esnasında emniyet ve güvenlik ekipmanları
Terminal	Yük elleçleme, yakıt alma, gemi ile terminal arasındaki haberleşmede kullanılan ekipmanların teknik standartları Yükleme/Boşaltma/Yakıt alma için prosedürlerin uygulanması Hortumlardaki bakım onarımların yapılması
Altyapı	Klas kuruluşlarının kuralları ve denetim süreçlerinin güçlendirilmesi Emniyet ve güvenlik denetimlerinin güçlendirilmesi Kılavuz servislerinin iyileştirilmesi Gemi trafik hizmetlerinin düzenlenmesi Petrol kirliliği acil durum kontrol sisteminin geliştirilmesi
Çevre Şartları	Güverte hava koruma ve aydınlatma sistemlerinin geliştirilmesi
Dış Faktörler	Emniyet ve güvenlik kurallarının gözden geçirilmesi, yeniden düzenlenmesi Gemi adamı ve mürettebat alımlarında yeterliliklerin düzenlenmesi Liman ücretlerinde düzenlemeler yapılması Ekonomik şartların iyileştirilmesi

Bir gemi işletmecisinin riske bağlı olan hedefleri tablo 5.7’de gösterilmektedir.

Tablo 5.7. Gemi İşletmecisinin Riske Bağlı Olan Hedefleri

Riske Bağlı Olan Hedefler
Emniyet ve Güvenlik
Güvenilirlik
Çalışanların sağlığı ve fiziki çalışma koşulları
Çevresel Koruma
IMO Kurallarına Uygunluk
Bayrak Devleti Düzenlemelerine Uygunluk
Kıyı Devleti Düzenlemelerine Uygunluk
Klas Kuruluşlarının Kurallarına Uygunluk
Sigorta ve P&I Klüp Uygunluğu
Uluslararası Diğer Kurallara Uygunluk

5.1 DÜZENLİ EMNİYET DEĞERLENDİRMESİ – FSA

Bir sistem (veya probleme) daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere farklı bakış açılarından yaklaşılabilmekte ve bu farklı değerlendirme metotları neticesinde farklı sonuçlara ulaşılabilir. Bu sebeple sistem analizlerine yaklaşım (veya süreçleri) için bir genellemeye ve standardizasyona ihtiyaç vardır. Bu amaca yönelik önerilen standart analiz yaklaşımı “FSA” olarak isimlendirilir.

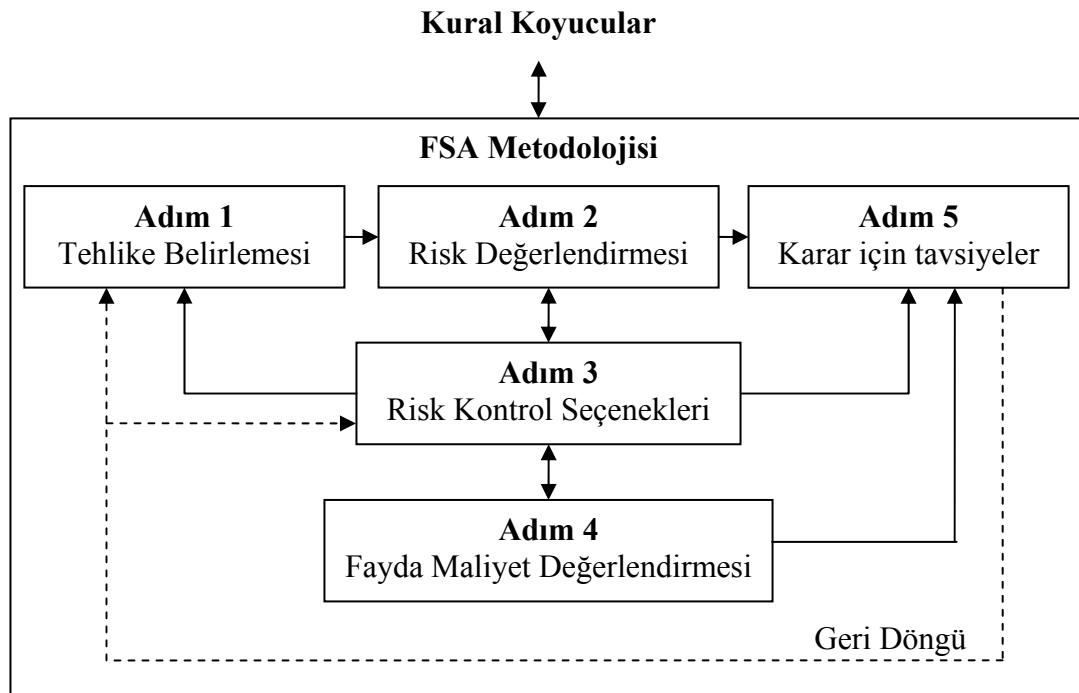
FSA, farklı endüstri alanlarında kullanılan bir rasyonel ve sistematik risk yaklaşıma dayanan emniyet değerlendirmesidir. Bu konunun denizcilik sektöründe gün geçtikçe önemi artmakta ve Uluslararası Denizcilik Organizasyonu (IMO) tarafından kuralların oluşum sürecince faydalanılan önemli bir metodolojidir. Uluslararası Denizcilik Organizasyonuna göre FSA’nın tanımı şu şekilde yapılmaktadır: her hangi bir etkinlik alanı ile bağdaşık risklerin hesaplanması ve bu risklerin azaltılmasında farklı düşüncelerin maliyet ve faydalarının değerlendirilmesi için rasyonel ve sistematik süreçtir. FSA metodolojisinin ana hedefi IMO kural oluşturma süreci (yeni kurallar oluşturulması, mevcut kuralların geliştirilmesi ve yenilenmesi) için sistematik ve proaktif temel oluşturmaktır [26].

FSA beş adımdan oluşmaktadır.

1. Tehlikelerin belirlenmesi (potansiyel nedenleri ve sonuçlarıyla birlikte tüm ilgili kaza senaryolarının listesi)
2. Risklerin (risk faktörlerinin) değerlendirilmesi

3. Emniyet önlemlerinin belirlenmesi – Risk kontrol seçenekleri (belirlenen riskleri azaltmak ve kontrol etmek için düzenli ölçümlerin alınması)
4. Fayda maliyet değerlendirmesi (her bir risk kontrol seçeneğinin maliyet etkisinin saptanması)
5. Karar verme için tavsiyeler (tehlikeler, bunlar ile ilgili riskler ve alternatif risk kontrol seçeneklerinin maliyet etkinlikleri hakkında bilgi temin edilmesi)

Beş adım birbirlerine bağımlıdır ve FSA yaklaşımı gerçekte şekil 5.5’deki gibi akış diyagramı ile ifade edilir [20, 27].



Şekil 5.5: FSA Metodolojisi Akış Diyagramı

FSA kural koyuculara yardımcı bir araçtır. Ortaya koyulan kuralların genel ilkesi tüm gemilere uygulanmasıdır. Bu nedenle FSA metodolojisinin önemli parametresi kuralların genel uygulanması için bir jenerik geminin kullanılmasıdır. Jenerik bir gemi, FSA süreci neticesinde ortaya konulan kurallar tarafından etkilenen tüm gemileri temsil eder. Marine Safety Agencies (1995) raporuna göre uluslararası ticaret yapan gemiler için jenerik gemi tanımı aşağıdakileri kapsamalıdır:

“Jenerik gemi, tek karınaya sahip 500 grt üstünde, yeterli personel ile donatılmış, ana makine sistemleri, karina arasındaki makine alanlarına yerleştirilmiş bir gemidir. Kamaraları, umuma açık alanları, mutfak ve soğutma depolarını kapsayan yaşam mahali makine dairesinin üst seviyesine yerleştirilir. Köprüüstü yaşam mahallinin en

üst bölümüdür ve geminin ana seyir kontrolü buradan sağlanır. Makineden sağlanacak bir kontrol pozisyonu makine dairesine yerleştirilir. Acil durumda güç, işlevini bağımsız gerçekleştiren ve acil durum, jeneratör odasına yerleştirilecek bir üniteden sağlanır. Jeneratör odası ana makine dışında bir yerdir. Fakat makineden bir girişe sahip olacaktır. Yakıt kapama valfları, havalandırma durdurmaları, yakıt servis pompası durdurmaları ve makine dairesi yangın denetim sistemleri gibi acil durum önleme aygıtları ana makineden uzak bir alana yerleştirilecektir. Yanaşma aparatları gemi başına ve kıçına yerleştirilecektir. Baş tarafta yer alan ırgat demirlemeyi sağlayacak niteliktedir.”

Jenerik bir geminin işlevsel dört durumu vardır;

1. Limana varma (girme), yanaşma, kalkma ve limandan ayrılma,
2. Yükleme ve boşaltma,
3. Sefer/seyir,
4. Tersane ve havuz.

5.1.1 Tehlikelerin Belirlenmesi

FSA’nın ilk basamağı gemi operasyonuna etki edebilecek ilgili tehlikelerin belirlenmesidir. Personelin yaralanması, yük ve/veya geminin hasarlanması ve çevre kirliliği emniyet kavramı içerisinde istenilmeyen çıktılardır. Tehlikelerin belirlenmesinde izlenecek yol; problemin tanımlanması, tehlikenin belirtilmesi ve tehlikenin gösterilmesidir.

Problemin kesin ve açıkça tanımlanması büyük önem arz eder ki, bu durum FSA sürecinin başlangıç noktasıdır. Bu şekilde FSA’nın hedefi de ortaya konmuş olunur. FSA metodolojisi için aşağıdaki ilgili bilgiler problem tanımlanmasında kullanılmaktadır;

1. Gemi tipi,
2. İlgili sistem ve fonksiyonlar,
3. Gemi operasyon bölümleri,
4. Çalışılacak kural ve kaideler,
5. Coğrafik sınırlamalar,
6. Uygulanacak risk önlemleri,
7. Kabul edilebilir kriterlerin çeşidi ve tanımı.

Problem tanımlandıktan sonra tehlikelerin belirlenme safhasında Bölüm 4’de bahsedilen risk analiz metotlarından faydalanılır. Bazı özel kaza sonuçları, nedenleri ve etkileme faktörleri, jenerik geminin karakteristiğine dayanan FSA metodolojisinin bir bölümünü belirler. Tüm gemileri etkilediği varsayılan bazı özel unsurlar tablo 5.8 ve 5.9’te gösterilmektedir. Ayrıca, tablo 5.8 kaza kategorilerine göre verilerin işleme biçimini de belirtmektedir.

Tablo 5.8. Geçmiş Veri Kayıtlarından Elde Edilen Kaza Çıktıları

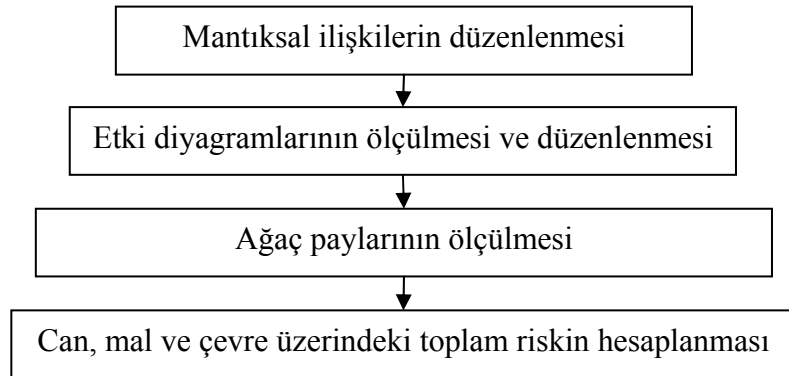
Çatışma
Sürtünme (Temas)
Yangın ve patlama
Su alma ve batma
Karaya oturtma ve oturma
Tekne ve makine arızası
Kayıplar
Diğerleri

Tablo 5.9. Jenerik Kaza Nedenleri

İnsan Hataları; örneğin seyir cihazlarını okunma hatası
Mekanik Hatalar; örneğin pompa arızası
Yangın ve Patlama; örneğin dumandan dolayı görüş kaybı
Yapısal Nedenler; örneğin tanker karina yapısı (tek cidar, çift cidar vb.)
Hava Sebepleri; örneğin kuvvetli rüzgar
Çok yönlü (birden fazla sebebin peşi sıra oluşması hali) sebepler

5.1.2 Risk Değerlendirmesi

Bu basamağın hedefi can, mal ve çevre hasar/kayıplarının risklerini ölçmektir. Risk değerlendirmesinde sürecin potansiyelini fark etmek için şekil 5.6’de sıralanan safhaların gerçekleştirilmesi gerekir.



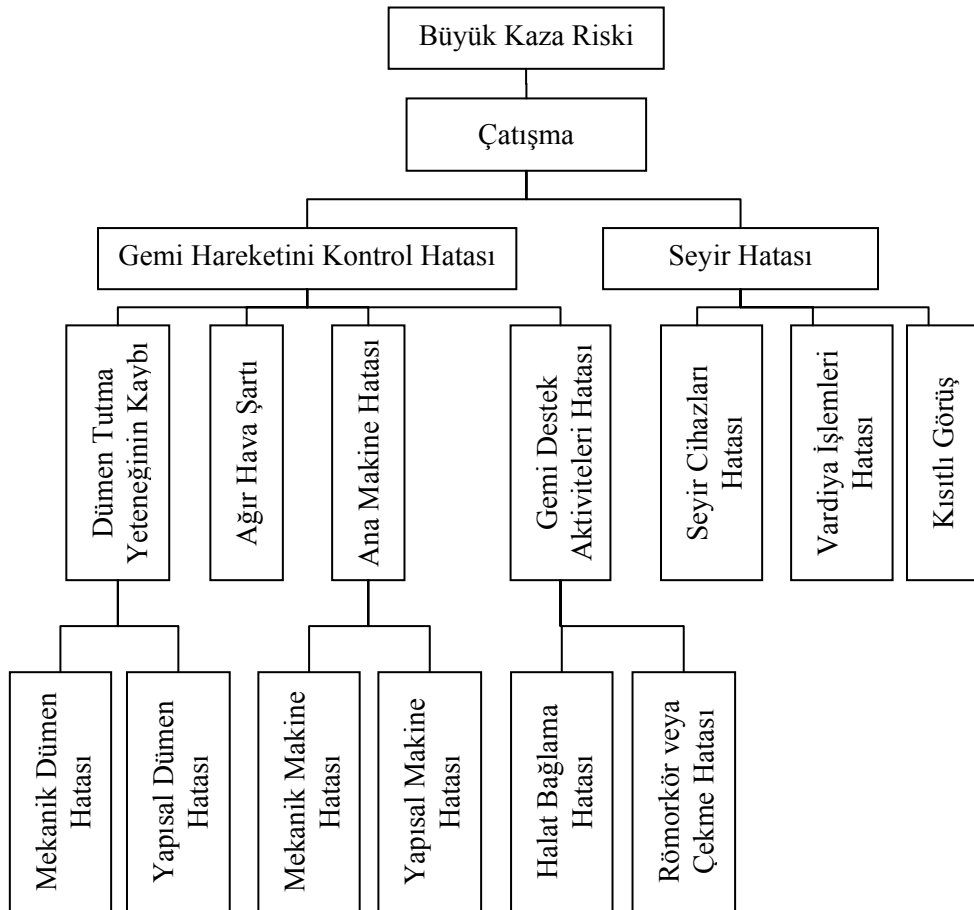
Şekil 5.6: FSA Metodolojisinin İkinci Adımı

Genelde risk; bir tehlikenin, meydana gelme olasılığının ve sonucunun eş zamanlı sınamasını kapsayan, önem ölçümü şeklinde tanımlanır ve risk değerlendirmesi ise

bir risk ölçeği üzerine yerleştirilen tehlikenin tespit edilme süreci olarak tanımlanır. Bu risk ölçekleri sürekli olan sayısal bir ölçek veya sürekli olmayan bir ölçek olabilir.

5.1.2.1 Sayısal Olmayan (Nitel) Risk Değerlendirmesi

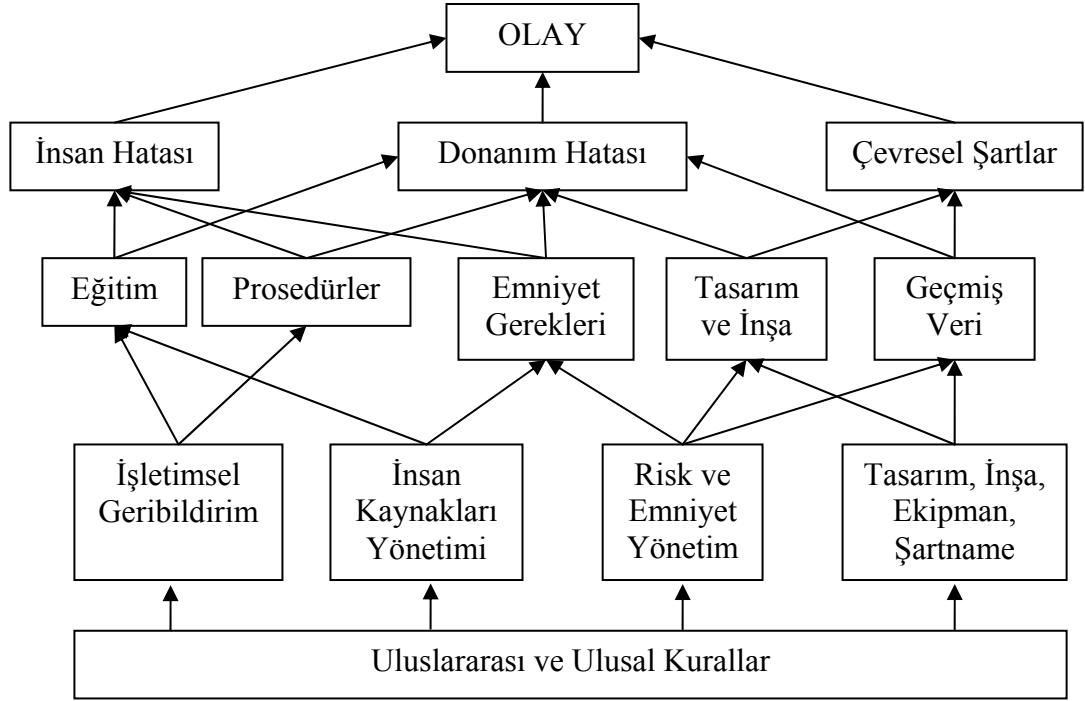
Nitel değerlendirme iki sayfayı içermektedir; yapısal mantık ilişkisi, yapısal ve ölçüm etki diyagramlarıdır. Mantık ilişkisi ağaç yapıları ile düzenlenir (örneğin hata ağacı). İstenmeyen çıktıların (kaza gibi) potansiyel nedenlerin tanımlanması için esaslı önceliklerde, neden ve etki diyagramlarından faydalanılır. Uluslararası Denizcilik Organizasyonu (IMO) risk profillerini (nitel risk analizi için hata ağacının sadeleştirilmiş, basitleştirilmiş biçimi) tavsiye etmektedir. Hata ağacına göre kolaylığı burada mantık kapılarının yer almamasıdır. Risk profilleri, neden ve hatalar yerine genellikle geçmiş kazasal çıktılar sonucundan elde edilir. Şekil 5.7 çatışmanın kazasal çıktısı için risk profili örnek olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.7: Bir Çatışmanın Kazasal Çıktısı için Risk Profili

Etki diyagramları, bir sistem ve işlev içerisindeki riskleri etkileyen faktörlerin yönetimini göstermek için düzenlenen diyagramlardır. Çoğunlukla kural etkileri,

şirket tarafından oluşturulan politikaların etkileri, organizasyonel etkiler, işlevsel etkiler vb. birbirlerinden ayrı tutulur ve buda etki diyagramlarını karmaşık yapıya götürür. Bazı etkiler ise sistem performansı üzerinde direk etkiye sahiptir. Şekil 5.8’de bir etki diyagramının taslağı gösterilmektedir.



Şekil 5.8: Etki Diyagramı Yapı Taslağı

Etki diyagramları, kural koyucu ve yönetim organizasyonunun kaza olabilirliğini ve çıktısını nasıl etkileyebileceğinin tespit edilmesinde güçlü bir araçtır. Nitel diyagramlar ile yapılandırılabilen gibi nicel diyagramlar kullanılarak her etkinin önem ve anlamlılık derecesi ile miktarının belirlenmesi de mümkündür.

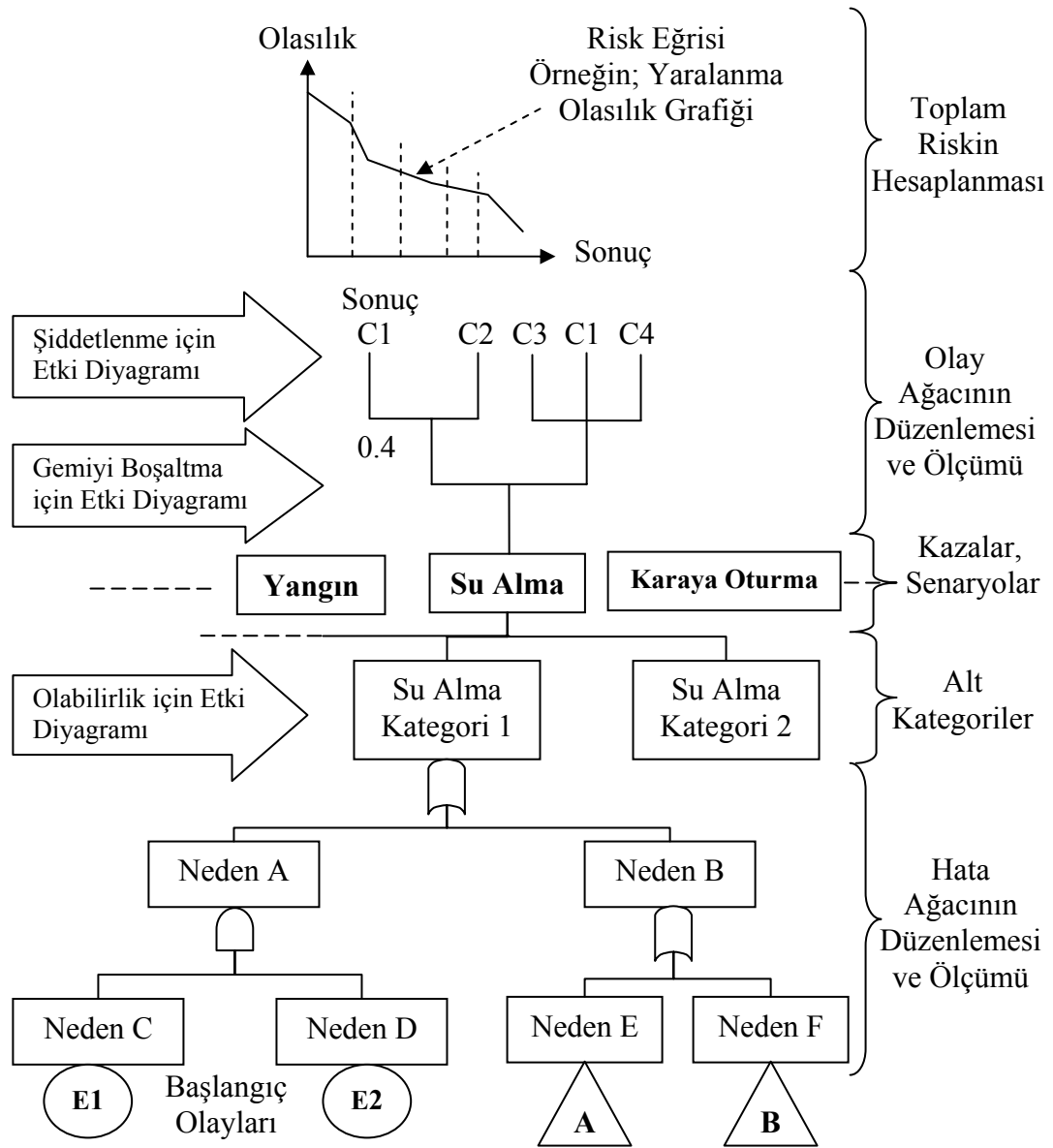
5.1.2.2 Sayısal (Nicel) Risk Değerlendirmesi

Yüksek risk alanları için mutlak risk seviyesi ve farklı nedenlerin kısmi önemlilikleri hesaplanmalıdır. Nicel risk değerlendirmesinin ana hedefi, altı çizilen nedenlerin kısmi ve mutlak önem ölçütlerini tespit etmektir. Hesaplamalar geçmiş veri ve bilirkişi teknikleri kullanılarak yapılır. Analiz geçmiş veri kullanarak yapıldığında, çoğunlukla altı çizilen nedenlerin meydana gelme olasılıklarının yeterli ölçümünü geliştiren ilgili birçok kazaların oluşması engellenmektedir.

Ölçüm, kazasal çıktı (veya senaryoya) bağlı olarak iki yönde yapılır: belirli kazasal çıktı (örneğin, iki geminin birbirleri ile çatışması) için farklı sonuçlarının frekansının

ölçümü için olay ağaçları kullanılır iken, çıktı veya senaryonun meydana gelme olasılığının hesaplanmasında hata ağaçlarının kullanılmasıdır. Potansiyel sonuçlar yaralanma veya ölümleri, çevreye ve gemiye olacak hasar ve ziyarı yansıtmalıdır.

Risk, meydana gelme olasılıkları ile sonuç şiddetlerinin çarpımı veya bileşimi olarak hesaplanır. Toplam riskin gösterilmesinde farklılıklar olabilir; örneğin, sayısal bir değer veya grafiksel gösterimdir. FSA tarafından kullanılan sayısal risk değerlendirme süreci şekil 5.9’de gösterilmektedir.



Şekil 5.9: FSA’nın Kullandığı Sayısal Risk Değerlendirme Süreci

Risklerin gösterimi için tablo 5.10’de gösterilen ISO tarafından tanımlanan uluslararası ISO 17776 risk matrisi formu kullanılabilir.

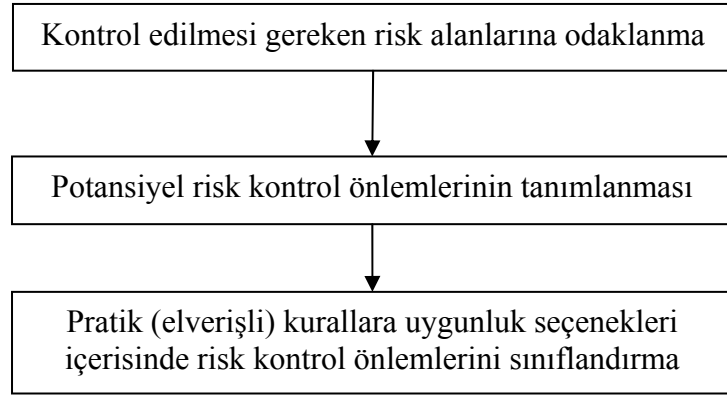
Tablo 5.10. ISO 17776 Risk Matrisi

SONUÇ					ARTAN OLASILIK				
Şiddet Derecesi	İnsan (Can)	Mal, Mülk	Çevre	Sembolik Etki	A	B	C	D	E
					Endüstride az meydana gelir	Endüstride yılda birkaç kez meydana gelir	Şirkette (işletmede) meydana gelir	Şirkette yılda birkaç kez meydana gelir	Mahalde yılda birkaç kez meydana gelir
0	Yaralanma yok	Hasar yok	Etki yok	Etki yok	Sürekli İlerleme Yönetimi				
1	Az Yaralanma	Az Hasar	Az Etki	Az Etki					
2	Ciddi Yaralanma yok	Küçük Hasar	Küçük Etki	Sınırlı Etki					
3	Çok Önemli Yaralanma	Sınırlı Hasar	Sınırlı Etki	Önemli Etki					
4	Ölüm	Büyük Hasar	Büyük Etki	Büyük Etki-Ulusal	Risk Azaltma Önlemlerini Birleştirme		Kabul Edilemez		
5	Çoklu Ölümler	Geniş Hasar	Kitlesel Etki	Büyük Etki-Uluslararası					

FSA metodunun bundan sonraki adımı emniyet önlemlerinin (risk kontrol seçeneklerinin) belirlenmesidir.

5.1.3 Emniyet Önlemlerinin Belirlenmesi (Risk Kontrol Seçenekleri)

Büyük tehlike kategorileri ve alt kategori prensipleri için riskleri gösteren bir risk profili Adım 2'nin (risk değerlendirmesinin) çıktısı ile temin edilir. Ayrıca risk değerlendirmesinin sonucu, kayıpların (sonuçların) diğer seviye olabilirliklerini ve direk yardımcı nedenlerin bilgisini de içermektedir. Bu bilgiler ışığında FSA'nın üçüncü adımının hedefi, yüksek risklerden dolayı kontrol edilmeye ihtiyaç duyulan aktivitelere, sistemlere odaklanma sağlanır. Bu durum, yeni emniyet önlemlerinin alınması yanı sıra mevcut risk yönetimi ve kuralların sistem tehlikelerini ne derece azaltılabileceğinin değerlendirmesini de içerir. Şekil 5.10, FSA metodolojisinin üçüncü adımın sürecini göstermektedir.



Şekil 5.10: FSA Metodolojisinin Üçüncü Adımı

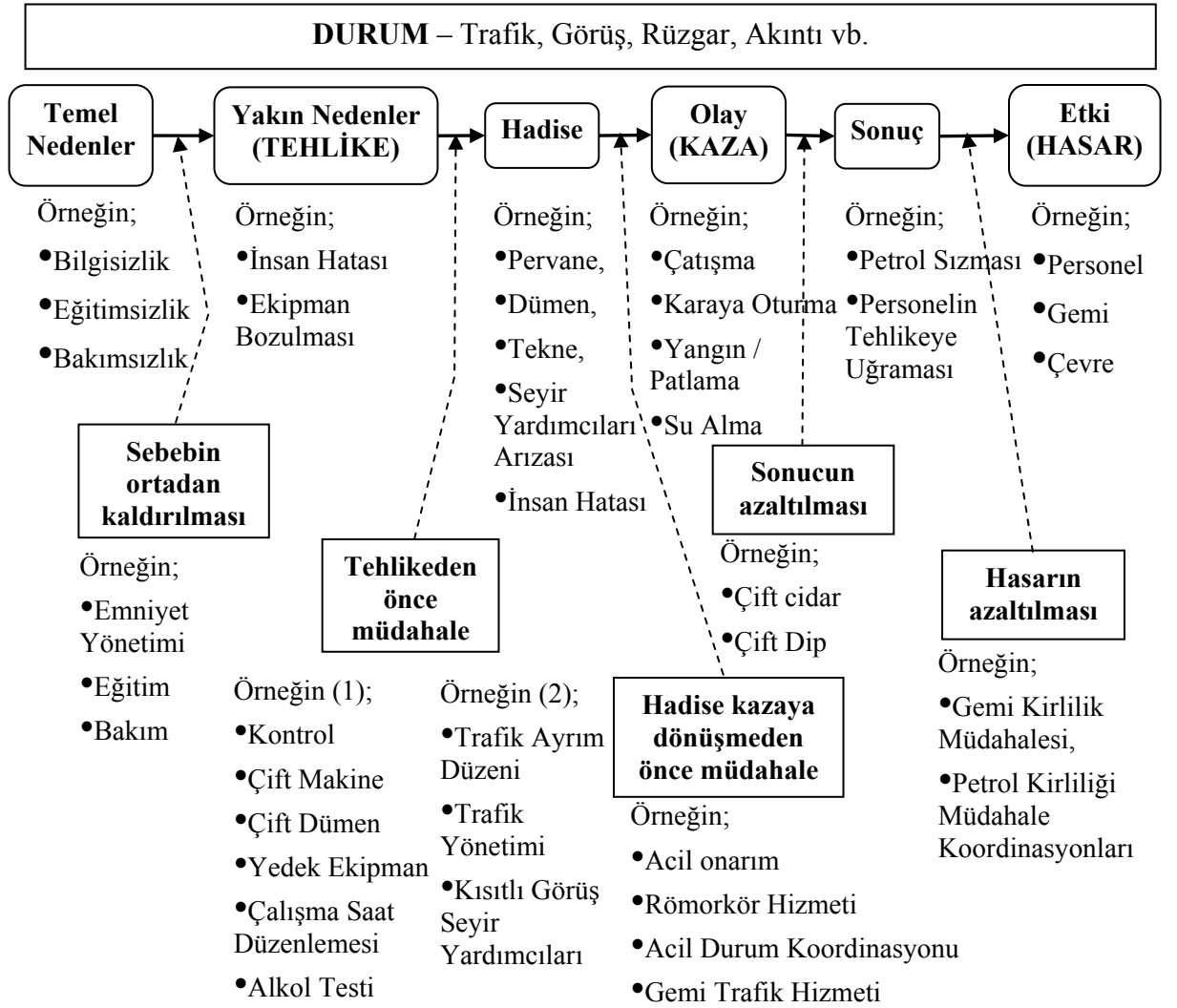
5.1.3.1 Kontrol Gerektiren Alanlar

Risk kontrolü gerektiren bir çok alan vardır. Risk kontrolü için temel kriterler aşağıdakilerini kapsamaktadır:

- Kabul Edilemez Risk Seviyeleri: eğer risk değerlendirme sürecinde tanımlanan bazı riskler kabul edilemez bulunur ise; risk kontrol seçeneği kullanılarak riski, kabul edilebilir veya “Düşük olduğu kadar makul şekilde uygulanabilir – ALARP (As Low As Reasonably Practicable)” seviyeye getirmeye çalışılır.
- “Düşük olduğu kadar makul şekilde uygulanabilir” Bölgesi İçindeki Riskler: bu bölgede yer alan riskler için maliyet etkili risk kontrol seçenekleri veya önlemleri uygulanmalıdır. Eğer bir fayda istenir ise bu bölgedeki riskler ele alınır ve eğer risk azaltımı elverişsiz ise veya maliyet kazanç gelişimi ile fena halde orantısız ise sadece ölçülü kabul edilir.
- Yüksek Olasılık: eğer bazı tehlike senaryoları düşük şiddete fakat yüksek olasılığa sahip ise kabul edilebilir bir risk seviyesine sahip olsalar bile işletimsel bakış açısından kabul edilemez bulunabilirler. Bu tür tanımlamalar için sayısal olmayan risk değerlendirilmesinin yapılması gerekir.
- Yüksek Şiddet: eğer bazı tehlikeler düşük olasılığa fakat yüksek şiddete sahip ise kabul edilebilir bir risk seviyesine sahip olsalar bile kabul edilemez bulunabilirler.
- Oldukça Belirsizlik (Epeyce Şüpheli): olasılık, şiddet veya her ikisi içinde oldukça belirsizlik, ilave veya gerekenden fazla risk kontrol seçenekleri/önlemleri uygulanması açısından tedbirler almanın bir sonucu olabilir.

5.1.3.2 Risk Kontrol Önlemlerini Tanımlama

Risk kontrol seçeneklerinin bir çok formu olabilir; teknik gönderme, operasyon bakımından insan ve yönetim (işleme tekniği) ve dikkate alınması önemli birkaç parametredeki kontrol seçenekleridir. Bazı kontrol seçenekleri tek bir veya az sayıdaki tehlike risklerini etkilemekteyken, bazıları da bir işlemin tüm bölümlerini etkileyebilir. Bundan dolayı nedensel (tehlike) zinciri içindeki farklı seçeneklerin etkisi değişebilir. Ayrıca risk kontrol önlemlerinin girişinden dolayı hata oluşumlarında değişiklikler olabilir. Örneğin; aşırı yüklenmeden dolayı hatalar ortadan kalktığında makine veya ekipman hata olabilirliği azalmaktadır. Tehlike zinciri içinde risk kontrol önlemlerinin giriş noktaları şekil 5.11’de gösterildiği gibi özetlenebilir.



Şekil 5.11: Denizcilikte Risk Azaltma Müdahaleleri

Tankerlerde yük basıncı kontrolünü sağlayan, her yük tankında bulunması gerekli olan kendiliğinden tahliye valfları için aşağıdaki risk kontrol önlemleri, bunlarla sınırlı olmamakla birlikte, örnek olarak verilebilir;

- Köprüüstünde ve yük kontrol odasında, basınç artmasını uyaracak düzeneğin olması ve valf açılmasının sesli uyarı ile ve otomatik olarak gerçekleşmesi.
- Gemi yönetim sisteminde valfların düzenli kontrolleri ve bakım tutumu için prosedürlerin mevcut olması.
- Deniz ve hava şartlarında özellikle dış atmosfer koşulları (vakum gibi) için havanın yük tankı içerisine girişini önleyecek düzeneğin olması.
- Çevre kirliliği yaratmamak ve çevrede tehlikeli gaz çıkışının oluşturabileceği tehlikeler için tankın inertlenmiş olduğu durumda valfların konumu ve fiziksel yapılarının öncelikli bu tür zararsız gaz çıkışına izin verebilecek düzeneğe olması.
- Herhangi bir aksaklık halinde, valfin çalışmaması durumunda, yedek valf sisteminin olması veya gaz çıkışını sağlayacak başka bir düzenek.

5.1.3.3 Risk Kontrol Önlemlerini Sınıflandırma

Pratik (elverişli) kurallara uygunluk seçeneklerine dayanarak farklı kategorilerde risk kontrol önlemlerini sınıflandırmak, gerek uygulama gerekse fayda maliyet değerlendirmesinde kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca sistem üzerindeki etkilerine göre yapılacak sınıflandırmanın da farklı faydaları vardır. Tablo 5.11’de bazı risk kontrol önlemlerinin karakteristikleri belirtilmektedir.

5.1.4 Fayda Maliyet Değerlendirmesi

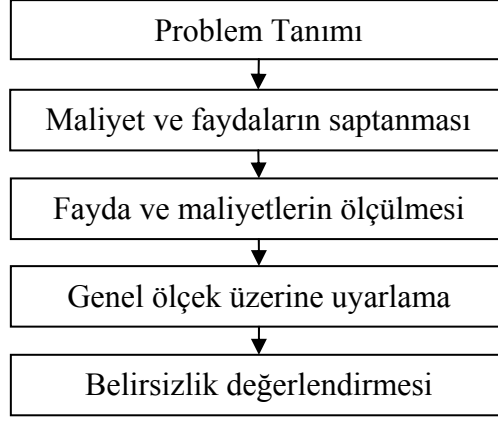
Fayda maliyet değerlendirmesi, tasarlanan risk kontrol önleminin uygulanabilirliğinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahiptir. FSA metodolojisinde kullanılan fayda maliyet değerlendirmesinin safhaları şekil 5.12’de gösterilmektedir.

FSA yaklaşımının başlangıcında analizin sınırları belirlenmişti. Fayda maliyet analizinde buna ilave olarak problemin tanımını geliştirmek üzere ve FSA’nın ilave sınır alanları olarak fayda maliyet analizinin coğrafi sınırları tanımlanır. Genelde uygulanan çoğu emniyet önlemleri ve temel (jenerik) olan bazı durumlar, örneğin;

MARPOL veya diğer IMO sözleşmeleri, coğrafi sınırlardandır. Coğrafi sınırlarının diğer bir yönü de maliyette meydana gelen sapmalar ve faydanın değişik halleridir.

Tablo 5.11. Risk Kontrol Önlemlerinin Karakteristikleri

Risk Kontrolü	Tanım
Engelleyici	İstenmeyen olayların olasılıklarını azaltmada kullanılan risk kontrol önlemleri engelleyici risk kontrolüdür.
Yatıştırıcı	İstenmeyen olay çıktısı veya takip eden olayların şiddetini azaltıcı risk kontrolleridir.
Mühendislik	Mühendislik risk kontrolü tasarımla birlikte emniyet özelliklerini içerir.
Esaslı (Asıl)	Potansiyel risk seviyesinin kısıtlanması için tasarım sürecinde uygulanan risk kontrolleridir.
İşlemsel (İşletimsel)	Tanımlanan işletimsel hareketlere bağlı riski kontrol etmek için ekipman veya sistemin kullanıcısının güvenine dayanan işlemsel risk kontrolleridir.
Gerekenden Fazla	Fazlalık ilkeleri uygulandığından risk kontrollerinin hata için sağlıklı (dinç) olmasındaki kontrollerdir.
Çeşitli veya Yoğun	Sistemin farklı yönleri için farklı risk kontrollerinin uygulanmasıdır.
Pasif veya Aktif	Pasif risk kontrolü, risk kontrol önlemini bırakmayı gerektirmeyen aktif risk kontrolü, emniyet cihazları veya kullanıcı eylemleri ile sağlanan risk kontrolüdür.
Bağımsız veya Bağımlı	Bağımsız risk kontrolü, risk kontrol önlemlerinin diğer gruplar üzerinde hiç bir etkisi olmaması iken, bağımlı risk kontrolü, bir risk kontrol önleminin risk hata ve olay ağaçlarının diğer gruplarını etkileyebilmesidir.
Kritik ve İnsan Faktörü içeren	İnsan faktörü, riski kontrol etmek için insani eylemlerin uygulandığında fakat insani eylemin hatası kendi başına bir kazaya neden olmadığı durumdur. İnsan kontrolünün hayatı önem taşıdığı ve eylemlerinin direkt kazaya neden olduğu durumda kritik risk kontrolü gerektirir.
Denetlenebilir (Kontrol Edilebilir)	Tasarlanan risk kontrol önleminin denetlenebilir olup olmasını belirtir.
Nitel veya Nicel	Tasarlanan risk kontrol önleminin sayısal veya sayısal olmayan risk değerlendirmesine dayandığını gösterir.
Kurulmuş veya Yeni	Mevcut teknoloji ve uygulamalarının belirtildiği risk kontrol önlemleri kurulmuş risk kontrolü iken, yeni önlemler yeni risk kontrol önlemleri olarak ifade edilir.
Gelişmiş veya Gelişmemiş	Maliyet göz önünde bulundurularak tekniksel etkililiğin geliştirilmesi ile birlikte teknolojinin kullanılması sonucu uygulanan risk kontrol önlemleridir.



Şekil 5.12: FSA Metodolojisinin Dördüncü Adımı

Fayda maliyet analizi sürecinin ikinci safhasında risk kontrol seçenekleri veya önlemlerinin her biri ile ilgili olan tüm potansiyel maliyetler ve faydalar tanımlanır. Ayrıca, risk kontrol seçeneklerinin sisteme uygulanmasında potansiyel negatif etkilerin de belirtilmesi önem arz eder ki, örneğin bir gemi için bu negatif etki; yükleme boşaltma zamanlarında artışa, hız azalmasına, denetim ve kontrollerden dolayı limanda tutulma zaman kayıplarına vb. neden olabilir. Risk kontrol seçeneklerinin (veya emniyet önlemlerinin) uygulanmasında maliyet ve faydalar farklı kalemlerde sınıflandırılabilir. Bir gemi işletmeciliğinde yer alan maliyetler aşağıdaki gibi gruplandırılır:

1. Sermaye ve faiz maliyetleri
2. Kurulum ve görevlendirme maliyetleri
3. İşletme veya yinelenen maliyetler
4. İş gücü maliyeti
5. Bakım, tutum ve onarım maliyetleri
6. Eğitim
7. Kontrol, sertifikalandırma ve denetim maliyetleri
8. Aksaklık veya gecikme maliyetleri
9. Ön görülme (hesaplanamayan) maliyetler

Risk kontrol seçeneklerinin uygulanması ile gemi işletmeciliğinde kazanılacak faydalar ise;

1. Yaralanma ve ölümlerin azaltılması,
2. Yük kaybı ve hasarını ve altyapı hasarlarını oluşturan gemi kazalarının azaltılması,
3. Temizleme maliyetlerini ve balıkçılık ve eğlence gibi ortak endüstri etkilerini içeren çevresel zararların azaltılması,

4. Arama, yardım ve kurtarma maliyetlerinin azaltılması,
5. Sigorta maliyetlerinin azaltılmasıdır.
6. Bakım ve onarım giderleri maliyetlerinin azaltılmasıdır.

Risk kontrol önlemleri uygulanmasına dayanan maliyet ve faydalar belirlendikten sonra bunların ölçülmesi gerekir. Fayda ve maliyetlerin ölçülmesinde en yaygın değerlendirme yaklaşımı, üretim faktörleri üzerinde sonuçların etkilerini değerlendirmektir [28]. Bu yaklaşıma örnek olarak verilebilecek bir gemi adamının hastanede kalma süresi ve bunun maliyetinden, sürekli sakatlık ve sakatlıktan dolayı kayıplardan türetilabilir insan olmadan kaynaklanan yaralanma maliyetleri için kullanılır.

Farklı risk indirgemeler dahilindeki değişik risk kontrol önlemleri ve her bir önlem ayrı maliyetler ve faydalar grupları ile ilgilendiğinden, uygulama için bunların içinden en efektif maliyet önlemlerinin seçimi yapılır ve birbirlerine karşı avantajlarının değerlendirmesi genel bir ölçek üzerinde gerçekleştirilir. FSA metodolojisinde en fazla kullanılan yöntem “Önlenecek bir ölümün anlaşılan maliyeti, ICAF (Implied Cost per Averted Fatality)” dir ve şu şekilde ifade edilir;

$$\text{ICAF} = \text{Yıllık Önlem Net Maliyet} / \text{Yıllık Ölüm Oranı Azalması} \quad (5.1)$$

ICAF’ın diğer bir hesaplanması da; emniyet önleminin sürdürülebilir ömrü için tüm maliyetlerin şimdiki net değerinin, zamanın özel bir periyodu için ölümlerdeki toplam azalmaya oranı ile yapılır.

Fayda maliyet analizinde her zaman bazı belirsizlikler (özellikle maliyet ve faydaların tanımlanma ve tespit edilme sürecinde) yer alır. Bu belirsizliklerin değerlendirilmesinin bir yolu; değişkenlik içeren belirli her bir maliyet (ve fayda) için bir aralık sınırının belirtilmesidir. Belirlenen aralıklar sonucunda fayda maliyet oranı için olası bir değer aralığı veya en çok olabilirlik değeri elde edilir.

5.1.5 Karar Verme için Tavsiyeler

FSA metodolojisinin bir adımı da kural koyuculara, düşük olduğu kadar makul şekilde uygulanabilir riskler için benimsenen risk kontrol seçenekleri üzerine tavsiyelerin önerilmesidir. Fayda maliyet analizinden elde edilen sonuca dayalı olarak bu tavsiyeler gerçekleştirilir.

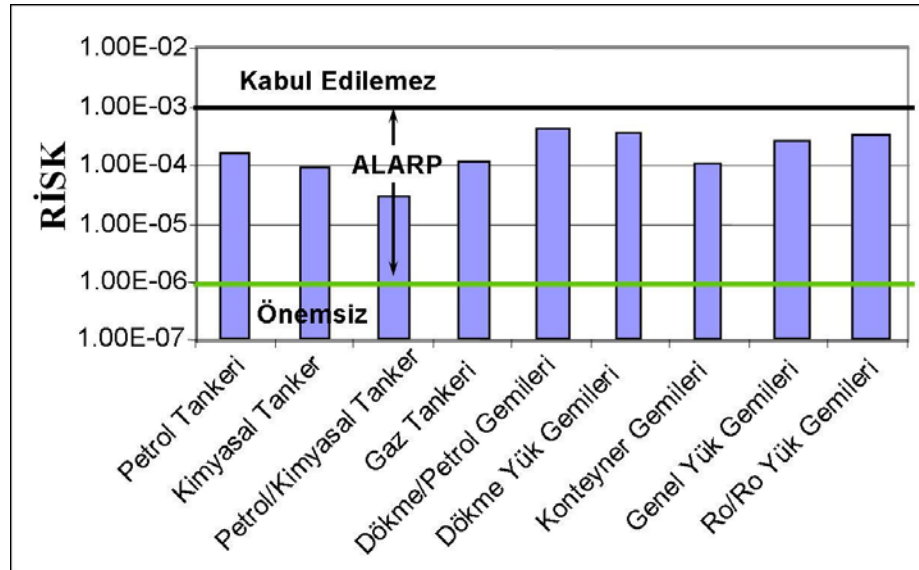
Tavsiyeler, maliyet etkili risk kontrol seçenekleri (veya önlemleri) öncelik listesi şeklinde verilebilir. Bu tür bir listeleme; seçeneğin tanımlanmasını, fayda maliyet oranını ve her bir seçenekle ilgili belirsizliklerin değerlendirmesini içerir. Ayrıca analizin geliştirilmesi için önerileri, geriye dönük iyi bir kaynağı ve ileriye yönelik çalışmalar için ise tavsiyeleri de içermelidir.

5.2 FSA'ın UYGULANMASI

500 grt'den büyük SOLAS'a tabi olan tankerlerde Can Kurtarma Araçları ile ilgili olarak FSA metodolojisinin uygulanması örnek olarak verilmektedir. Gemiler için gerekli olan can kurtarma araçları ile kararlar, FSA sürecinden yararlanılarak IMO'nun alt komitesi olan Deniz Emniyet Komitesi tarafından "Uluslararası Can Kurtarma Gereçleri – LSA Kod" olarak kabul edilmiştir.

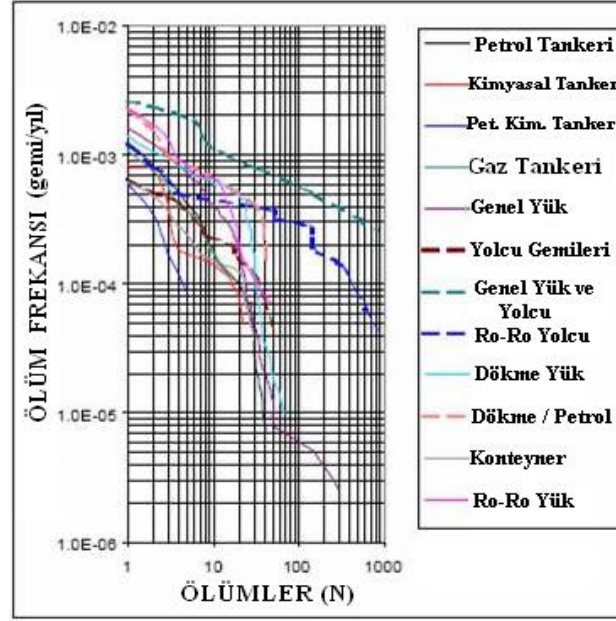
5.2.1 I. Adım: Tehlikeleri Belirlemek

Bu konu ile ilgili problem şu şekilde tanımlanır: tanker kazaları sonucunda gemiyi terk esnasında oluşabilecek ölüm ve yaralanma oranını azaltmak için etkili risk kontrol seçeneklerinin belirlenmesidir. IMO Denizde Güvenlik Komitesi (MSC) raporunda, şekil 5.13'de gösterildiği üzere tankerlerde ölüm ve yaralanma riskleri ALARP bölgesinin yüksek seviyesindedir ve azaltımı için maliyet etkili risk kontrol seçenekleri uygulanmalıdır.



Şekil 5.13: Gemi Tiplerine Göre Gemi Personeli Ölüm Riski (MSC 72/16)

MSC 72/16, [24]'e göre farklı tipteki jenerik gemiler için ölüm oranları şekil 5.14'de gösterilmektedir.



Şekil 5.14: Farklı Gemi Tipleri için Ölüm Frekans (FN) Eğrisi

Tehlike belirleme süreci, farklı eğitim dalları içindeki bilirkişi takımlarının “Olursa ne olur” tekniği kullanılarak gerçekleştirilir. Bu metotta bir potansiyel tehlikeler listesi, planlandığı gibi işlemeyen veya beklenmeyen (istenmeyen) olaylara “Olursa ne olur” sorusu sorularak, her bir sistem veya alt sistem için üretilir. Daha sonra tankerlerde kullanılan can kurtarma araçları çeşitlerine göre ayrılarak, tehlike derecelendirmesi (sıralama) yapılır. Tüm tehlikeler için gemiyi terk olayının her safhası, başlangıç olayının meydana gelmesinden toplanmaya, gemiyi boşaltmaya, denizde canlı kalmaya ve kurtarmaya kadarki süreç, analiz edilir. Bazı tehlikeler tüm can kurtarma araçları için jenerik olabilir ve bazıları da yalnızca denizde canlı kalma ve kurtarma ile ilgilidir.

Bir tehlikenin izlenmesi (canlandırılması), tehlikenin belirlenmesinin en son adımıdır. Bu kısmi analiz, risk kavramı içerisindeki tehlikelerin önemliliklerinin nicel değerlendirmesine dayanan sıralamasını içerir ve en önemli olanları risk değerlendirme sürecinde ele alınır.

5.2.2 II. Adım: Riski Değerlendirmek

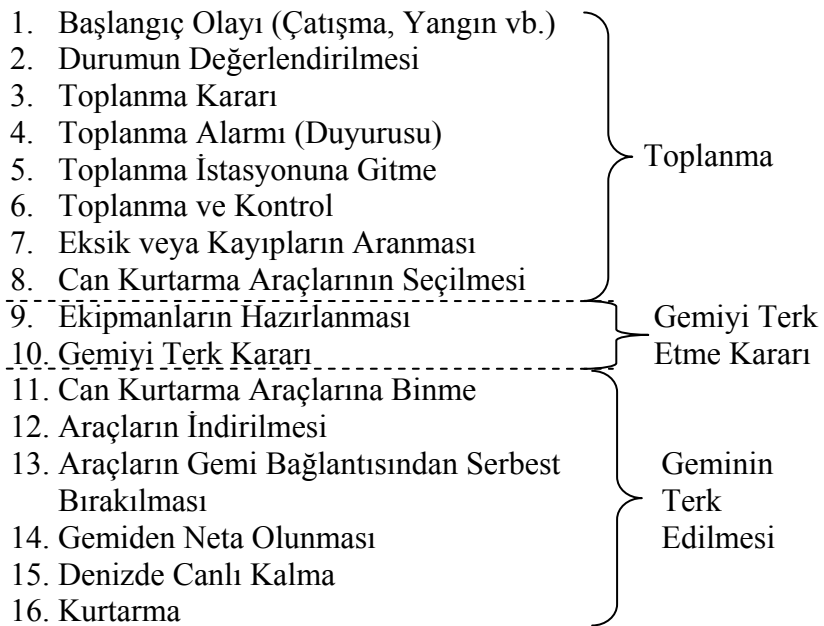
Değişik kaza senaryoları için olasılıklar, Lloyd’s Maritime Casualty Reports ve Lloyd’s Casualty Reports gibi kaza veri kaynaklarında tespit edilmiştir. Buna göre 1991’den 1998’e kadar toplam 115 gemide farklı nedenlerden dolayı gemilerin terk edildiği tespit edilmiştir. Lloyd’s Register Dünya Filo İstatistiklerine göre bu zaman diliminde yıllık ortalama gemi sayısı 44732’dir. Yılda bir gemi için gemiyi terk

sıklığı $2,6.10^{-3}$ olarak elde edilir. Genelde ticaret gemilerinde yaklaşık olarak aynı oranda gemi terk olayı görülmektedir. Tablo 5.12’de kaza nedenlerine göre gemi terk frekansları gösterilmektedir. Gemideki personel sayısı, olay sayısının her gemi için 23,7 ortalama personel sayısı ile çarpılması sonucunda elde edilmiştir.

Tablo 5.12. Gemi Terk Frekansı ve Ölüm Oranı

Kaza Çeşidi	Olay Sayısı	Gemi Terk Frekansı (gemi/yıl)	Ölümler	Gemideki Personel Sayısı	Ölüm Oranı (%)
Çatışma	14	$3,1.10^{-4}$	116	332	35
Sürtünme (Temas)	5	$1,1.10^{-4}$	54	119	45
Yangın ve patlama	16	$3,6.10^{-4}$	6	379	2
Su alma ve batma	51	$1,1.10^{-3}$	618	1209	51
Tekne arızası	5	$1,1.10^{-4}$	0	119	0
Makine arızası	1	$2,2.10^{-5}$	0	24	0
Karaya oturma ve oturtma	23	$5,1.10^{-4}$	0	545	0
Toplam	115	$2,6.10^{-3}$	794	2727	29

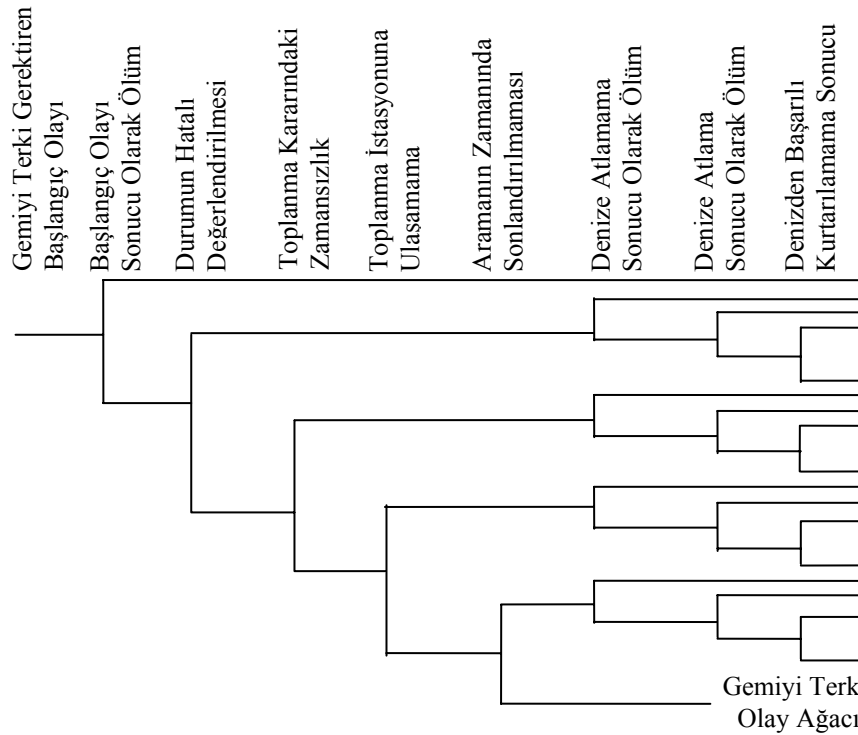
Faklı tipteki can kurtarma araçlarının nasıl kullanıldığının, gemiyi terk riskine etkilerinin incelenmesi için özellikle gemiyi terkle ilgili ölümlerde bir kaza başlangıç olayının nasıl geliştiğini modelleyen olay ağacı kullanarak, bir gemi terk modeli oluşturulmalıdır. Model, farklı tipteki can kurtarma araçlarını kullanarak gemiyi terk ile ilgili tipik olaylar serisinden oluşmaktadır. Şekil 5.15’de geleneksel (herhangi bir özelliğe sahip olmayan) filikaların kullanılarak gemiyi terk sırasında beklenen olaylar serisini göstermektedir.



Şekil 5.15: Geleneksel Filikalar için Gemi Terk Modeli

Gemi terk olayının sonuçları, oluşturulan bir olay ağacına göre nitelendirilir. Eğer gemiyi terk sonuçları şekil 5.15’deki gibi alt sonuçlara bölünmüş ise bir kaç olay ağacı ile nitelendirilir. Bu olay ağaçlarındaki dalların olasılıkları farklı kaza senaryoları için farklı derecelere sahip olacaktır. Örneğin; geminin çatışması veya yangın gibi bir başlangıç olayının sonucundaki ölüm olasılığı kayda değer iken tekne veya makine arızası kaza senaryosu için bu olasılık önemsiz olacaktır. Kaza istatistiklerine göre, başlangıç olayından daha ziyade gemiyi terk etmenin sonuçlarının, ölümlerdeki payı daha yüksektir. İstatistikler ve bilirkişi raporlarının değerlendirmesi sonucunda, can kurtarma araçlarının hazırlanmasına kadar, bir başlangıç olayının oluşmasına neden olacak istenmeyen olaylar için tablo 5.13 elde edilir [20]. İçinde bulunulan durumun hatalı (yanlış) değerlendirilmesi, toplanma kararı zamanının iyi ayarlanmaması, personelin toplanma istasyonuna ulaşamaması ve kayıp personel aramasının uygun zaman içinde sonlandırılmaması gibi durumlar, denize atlama, suda bekleme ve kurtarıma senaryosunu meydana getirmektedir.

Farklı tipteki can kurtarma araçları için ayrı tablolar ve olay ağaçları oluşturulur ve her biri için farklı dal olasılıkları elde edilir. Tablo 5.13’de verilenlere ilişkin olay ağacı şekil 5.16’de gösterilmektedir.



Şekil 5.16: Can Kurtarma Araçları Hazırlanana Kadar bir Gemi Kazasına Neden Olacak İstenmeyen Olaylar için Olay Ağacı

Tablo 5.13. Can Kurtarma Araçları Hazırlanana Kadar bir Gemi Kazasına Neden Olacak İstenmeyen Olaylar için Olay Ağacı Dal Olasılıkları

	Çatışma	Sürtünme (Temas)	Yangın ve Patlama	Su Alma ve Batma	Tekne ve Makine Arızası	Karaya Oturma ve Oturtma
Başlangıç olayı sonucu olarak ölüm	0,0001	---	0,007	---	---	---
Durumun hatalı değerlendirilmesi	0,31	0,31	---	0,37	---	---
Denize atlamama sonucu olarak ölüm – durum hatalı değerlendirilmiş	1	1	---	1	---	---
Toplanma kararındaki zamansızlık	0,03	0,03	0,015	0,03	0,03	0,03
Denize atlamama sonucu olarak ölüm – toplanmaya zamansız karar verilmiş	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,95
Toplanma istasyonuna ulaşamama	0,06	0,06	0,03	0,07	0,02	0,06
Denize atlamama sonucu olarak ölüm – toplanma istasyonuna ulaşamamış	0,95	0,95	0,95	1	0,95	0,95
Aramanın zamanında sonlandırılmaması	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Denize atlamama sonucu olarak ölüm – arama zamanında sonlandırılmamış	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625
Denize atlama ve kurtarılmayı bekleme sonucu ölüm	0,358	0,323	0,42	0,97	0,42	0,323
Denizden başarılı kurtarılamama sonucu ölüm	0,0016	0,0016	0,021	0,05	0,021	0,0016

İstatistiklere ve gemi terk modeline göre, tablo 5.14’de farklı tipteki kaza olayları için potansiyel yaşam kaybı (PLL) ve ölüm olasılıkları gösterilmektedir. Buna göre belirlenen gemi terk modeli, gerçek verileri oldukça iyi yansıtmaktadır. Bunun nedeni, olay ağacı dal olasılıklarında temel girdi olarak gerçek verilerin kullanılmasıdır. Modelin zayıflığı, sınırlı sayıdaki olayın istatistiksel değerlerinin kullanılması ile ilişkilidir ve model gemiyi terkteki zaman faktörünü yeterli tespit edememektedir (örneğin, bazı durumlarda personel daha elverişli zamana sahip olabilmektedir).

Tablo 5.14. Gemiye Terk Etmede Ölüm Olasılıkları

Kazasal Olay Tipleri	Gemi Terk Modeline Dayalı		İstatistiklere Dayalı	
	Ölüm Olasılığı (%)	PLL (gemi/yıl)	Ölüm Olasılığı (%)	PLL (gemi/yıl)
Çatışma	45,6	$3,392.10^{-3}$	35	$2,6.10^{-3}$
Sürtünme (Temas)	44,1	$1,173.10^{-3}$	45	$1,2.10^{-3}$
Yangın ve patlama	27,7	$2,347.10^{-3}$	2	$1,7.10^{-4}$
Su alma ve batma	55,4	$1,497.10^{-2}$	51	$1,3.10^{-2}$
Tekne ve Makine arızası	16,2	$5,180.10^{-4}$	0	0
Karaya oturma ve oturtma	20,2	$2,461.10^{-3}$	0	0

Tablo 5.14’de potansiyel yaşam kaybı, 1991-1998 yılları arasındaki ölüm sayısının bu periyottaki gemi sayısına oranı şeklinde verilmektedir.

5.2.3 III. Adım: Risk Kontrol Önlemlerini Tanımlamak

Bir çok disiplin dalındaki uzmanlar tarafından kabul edilen ve belirlenen risk kontrol seçeneklerinin ana hedefi, maliyet etkili bir yaklaşım sergilemesi ve can kurtarma araçlarının yetenek ve kabiliyetini ilerletmesi şeklindedir. Bu FSA çalışmasında aşağıdaki risk kontrol seçenekleri tanımlanmaktadır:

- Toplanma ve filika alanının korunması (SMA)
- Gemi baş tarafına ve tüm yük bölmelerine su girişinin izlenmesi ve su seviye alarmı (LA)
- Tüm personel için kişisel Su Geçirmez ve Isı Korumalı Giysileri (IS)
- Serbest Düşme Filikaları (FF)
- Can sallarını için Deniz Tahliye Sistemleri (MES)
- Üst seviyede eğitilmiş personel (RTP)

Bu risk kontrol seçeneklerinin uygulanmasına göre kazasal senaryolara dayalı, tablo 5.14’de mevcut ölüm olasılıklarındaki değişiklikler aşağıda gösterilmektedir.

Tablo 5.15. Risk Kontrol Seçeneklerinin Uygulanması ile Ölüm Olasılıklarındaki (%) Azalma

Kazasal Olay Tipleri	Mevcut	SMA	LA	IS	FF	MES	RTP
Çatışma	45,6	- 0,3	0,0	- 1,2	- 1,1	- 0,3	- 0,2
Sürtünme (Temas)	44,1	- 0,3	0,0	- 0,9	- 1,3	- 0,1	- 0,2
Yangın ve patlama	27,7	- 0,3	0,0	- 4,5	+0,4	- 1,0	- 0,2
Su alma ve batma	55,4	- 0,9	-14,8	- 2,0	- 4,9	- 0,1	- 0,4
Tekne ve Makine arızası	16,2	- 0,5	0,0	- 1,6	- 3,0	- 0,2	- 0,4
Karaya oturma ve oturtma	20,2	- 0,5	0,0	- 1,5	- 1,8	- 0,3	- 0,3

5.2.4 IV. Adım: Fayda-Maliyet Analizi

Genel ve karşılaştırmalı bir fayda maliyet oranı elde etmek için farklı risk kontrol seçenekleri ile ilişkili olan tüm potansiyel maliyetleri ve faydaları tespit etmek gerekir. Bu tür FSA çalışması için öncelikli olarak can kurtarma araçları tedarikçileri, eğitim kurumları, tersane ve gemi işleticileri açısından bir maliyet tahminlenmesi yapılır. Buna göre elde edilecek maliyetler şu kalemler ile ilgili olacaktır; ekipman yatırımı, ekipmanın kurulması (monte edilmesi), kontrol ve denetimler, bakım ve tutum, ekipmanı kullanacak personelin eğitimidir.

Maliyetlerin tespit edilmesi yanı sıra uygulanacak her risk kontrol seçeneği için elde edilecek faydalar belirlenir, özellikle ölümlerde meydana gelecek azalma ve potansiyel yaşam kaybı (PLL) azalmalarının hesaplanması. Her bir risk kontrol seçeneği için ölüm olasılığındaki toplam azalma ile o seçeneğin uygulanması sonucunda toplam potansiyel yaşam kaybındaki değişim (Δ PLL; risk kontrol seçeneği uygulanması ve uygulanmaması arasındaki potansiyel yaşam kaybı) hesaplanır. Tablo 5.16’de, “Toplanma ve filika alanının korunması (SMA)” risk kontrol seçeneği için Δ PLL hesaplanması örnek olarak verilmektedir.

Tablo 5.16. “Toplanma ve filika alanının korunması (SMA)” Risk Kontrol Seçeneği için Δ PLL Hesaplanması

Kazasal Olay Tipleri	Ölüm Olasılığındaki Azalma (%)	Ölüm Olasılığı (%)	Risk Kontrol Seçeneği Uygulanması Sonucu PLL (gemi/yıl)	Risk Kontrol Seçeneği Uygulanmaması Sonucu PLL (gemi/yıl)
Çatışma	- 0,3	45,4	$3,370.10^{-3}$	$3,392.10^{-3}$
Sürtünme (Temas)	- 0,3	43,8	$1,165.10^{-3}$	$1,173.10^{-3}$
Yangın ve patlama	- 0,3	27,4	$2,321.10^{-3}$	$2,347.10^{-3}$
Su alma ve batma	- 0,9	54,5	$1,473.10^{-2}$	$1,497.10^{-2}$
Tekne ve Makine arızası	- 0,5	15,7	$5,019.10^{-4}$	$5,180.10^{-4}$
Karaya oturma ve oturtma	- 0,5	19,7	$2,400.10^{-3}$	$2,461.10^{-3}$
Toplam PLL			$2,449.10^{-2}$	$2,486.10^{-2}$
Δ PLL = $3,7.10^{-4}$				

“Ölünecek bir ölümün anlaşılan maliyeti, ICAF” denklem (5.1)’e göre aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$ICAF = \text{Risk Kontrol Seçeneğinin Maliyeti} / \text{Potansiyel Yaşam Kaybı Azalması} \quad (5.2)$$

Tüm risk kontrol seçenekleri için 25 yıllık işlevini devam ettirme sürecindeki beklenen maliyet ve potansiyel yaşam kaybı azalması tablo 5.17’deki gibi elde edilir.

Tablo 5.17. Risk Kontrol Seçenekleri için ICAF Değerleri

Risk Kontrol Seçeneği	Δ PLL (gemi/yıl)	Δ PLL (gemi/25 yıl)	25 Yıllık Risk Kontrol Seçeneği Maliyeti (£.10 ³)		ICAF (£.10 ³)		Tavsiye Edilmesi ^a	Kuvvetle Tavsiye Edilmesi ^b
			Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek		
SMA	3,70.10 ⁻⁴	9,25.10 ⁻³	10	20	108,1	216,2	Hayır	Evet
LA	4,00.10 ⁻³	1,00.10 ⁻¹	14	21	140,0	210,0	Evet	Evet
IS	1,27.10 ⁻³	3,18.10 ⁻²	15	17,8	471,7	559,7	Evet	Evet
FF	1,72.10 ⁻³	4,30.10 ⁻²	-7,8 ^c	18,2	-181,4	423,3	Evet	Evet
MES	1,80.10 ⁻⁴	4,50.10 ⁻³	4,50 ^d		1 £ milyon kriteri		Bilinmiyor	
RTP	1,95.10 ⁻⁴	4,88.10 ⁻³	8	10	1639,3	2049,2	Hayır	Hayır

^a Bir risk kontrol seçeneği, 1£ milyon kriteri dahilinde eğer ICAF değeri (maliyet tahmini) düşük ise, tavsiye edilir.

^b ICAF değeri yüksek bir tavsiye, eğer ICAF değeri düşükken de verilebiliyor ise, sağlıklıdır.

^c Serbest düşme filikaları, geleneksel filikalardan daha düşük maliyete sahiptir.

^d Bir deniz tahliye sisteminin maksimum maliyeti 1£ milyon ICAF kriterini sağlar.

Burada her risk kontrol seçeneği için yüksek ve düşük ICAF değerleri gösterilmektedir. ICAF'ın değerlerine göre karar vermek için karar kriteri belirlenir. Bu çalışmada belirlenen karar kriteri, 1 milyon Pound'un bir ICAF'e eş değer olmasıdır.

5.2.5 V. Adım: Tavsiyeler

Tablo 5.17'ye göre, aşağıdaki risk kontrol seçenekleri can kurtarma kapasitesini ve yeteneğini arttırmaktadır.

- Gemi baş tarafına ve tüm yük bölmelerine su girişinin izlenmesi ve su seviye alarmı (LA)
- Tüm personel için kişisel Su Geçirmez ve Isı Korumalı Giysileri (IS)
- Serbest Düşme Filikaları (FF)

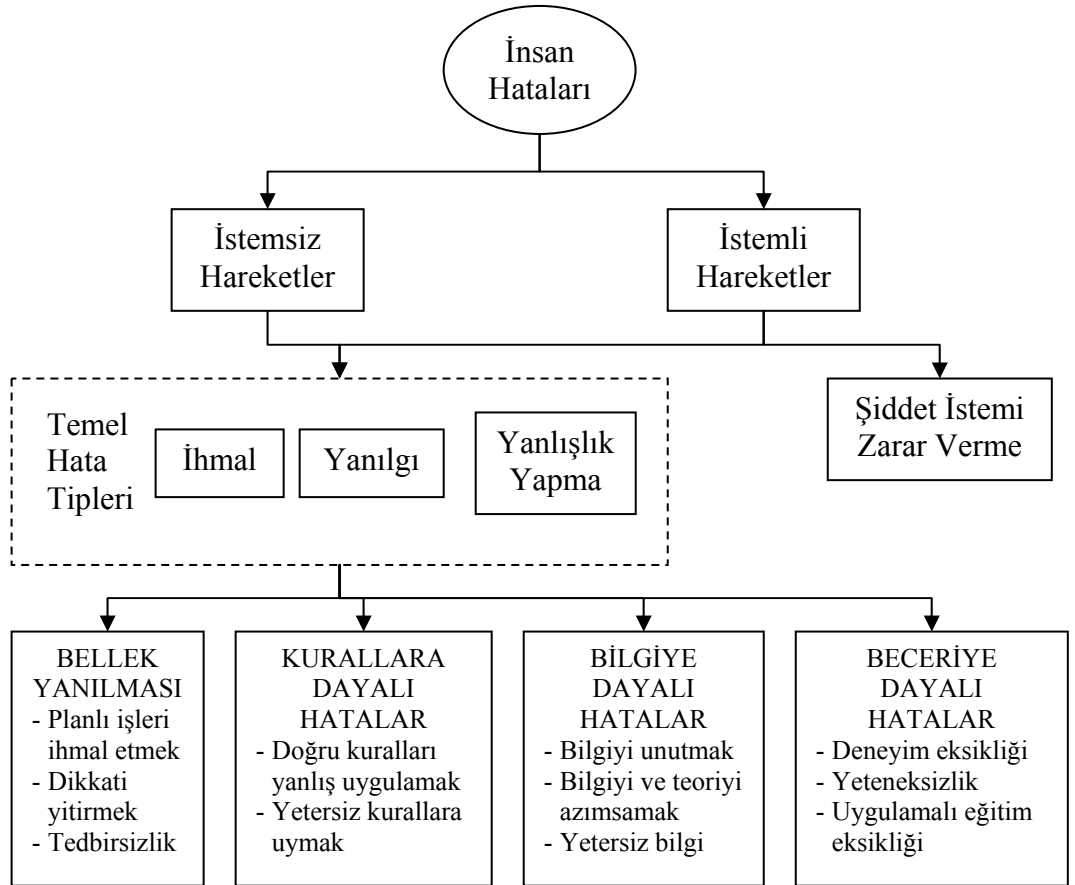
Serbest Düşme Filikaları risk kontrol seçeneği sadece yeni gemilere, geleneksel can kurtarma araçlarının bir alternatif olarak uygulanabilir, diğer ikisi ise hem yeni gemilere hem de mevcut gemilere uygulanabilir.

Eğer bu üç risk kontrol seçeneği tüm (mevcut ve yeni) tankerlere uygulanırsa, gemiyi terk etmede başarı oranı %44,6'dan %66,2'ye ulaşmaktadır.

5.3 İNSAN FAKTÖRÜ

Denizcilik alanına her geçen gün eklenen yeni tekniklerin ve teknolojilerin sağladığı olanaklar ile mevcut kullanılan yönetim uygulamalarının emniyet, güvenlik, ekonomiklik ve bilimsellik koşulları altında değerlendirilmesi, gemi fonksiyonlarını kullanıcısı olan gemi adamlarının niteliksel ve niceliksel özellikleri ile yakından ilgilidir [23].

Gemi fonksiyonlarının yerine getirilmesinde gemi adamlarına dayalı insan hatalarının mevcut olması kaçınılmazdır. İnsan hatalarını belirleyen ve şekil 5.17’de sıralanan bazı etkenler, başlangıçta iyi eğitildiği ve sınandığı varsayılan, fiziksel açıdan da yeterli bulunarak, gemide ilgili görevlere atanan gemi adamlarının, sonradan veya sefer süresince içinde olabilecekleri fiziksel, sosyal ve psikolojik zafiyetler, gemi kazaları başta olmak üzere gemi ve çevreye yönelik tehlikelerin meydana gelmesinde, denetimi zor bir boyutu oluşturmaktadır.



Şekil 5.17: İnsan hatalarının Kaynakları [23]

5.3.1 İnsan Hatası

Yıllardan beri gemi kazalarının insan hatalarından kaynaklandığı yolunda yapılan çalışmaların popülaritesi oldukça fazladır. Bu çalışmalar neticesinde herkesçe kabul gören ve yaygın bilgi, gemi kazalarının % 75-90 nedeninin insan hatası kaynaklı olduğudur. Bu çoğu zaman kınama veya ihmalkarlığın bir sonucu oluşan hata olarak düşünülür. Bu tür belirsiz kavramları anlamak için aşağıdaki önyargılar yapılabilir;

- Yasal: ihmalkarlık veya suça odaklanma.
- Teknik: operatörün (kullanıcının) sistemi yanlış kullanması.
- Psikolojik: operatörün travma veya sarsıntı sonucu duygularını dışa vuramaması.
- Sosyo-Teknik: operatörlerin birbirlerinden ayrılması.
- Ergonomik: iş yapamaz duruma gelme.

Yukarıdaki yargılara dayanarak “seyir hatasından” dolayı karaya oturma olayını aşağıdaki farklı yorumlar ile açıklayabiliriz;

- Düşük moralden dolayı ihmalkarlık
- Kontrol sisteminin geri bildirimde bulunmaması
- Yanlış değerlendirme
- Prosedür eksikliğinden kaynaklanan performans yetersizliği
- Elektronik karışıklık
- Algılama hatası

Kazayı meydana getiren sadece ve tek bir nedenin olması çok enderdir. Bir çok nedensel faktörün birleşmesi sonucunda bir kaza meydana gelir. Fukushima’ya (1976) göre kaza; aşağıdaki kompleks durumların bileşimidir.

- Doğal fenomen: hava ve deniz
- Rota: serbest geçiş yollarının durumu, engeller ve görüş
- Gemi: denge, manevra kabiliyeti ve teknik standartlar
- Trafik kalabalığı
- Denizci: bilgi, beceri ve sağlık

Yukarıdaki bilgiler sonucunda kazaların niçin meydana geldiğini kavrama gücüne sahip oluruz ve bu anlama; kullanıcıyı, teknolojiyi, çalışma şartlarını ve organizasyonu içerir. Buna rağmen tasarım ve operasyon planlamasında hala dar bir düşünce devam etmektedir. Bu bulguyu halen mevcut olan köprüüstü tasarım kusurları, emniyet eğitimlerinin eksikliği ve yönetimdeki bilgisizlik desteklemektedir.

5.3.2 Kaza Karakteristikleri

Emniyet ve güvenliği artırma ve insan hatasını asgariye indirmek için göstereceğimiz çabada, tablo 5.3’de belirtilen deniz kaza karakteristiklerini her zaman göz önünde bulundurmalıyız. Ayrıca bir kaza ile ilgili olaylar için, tablo 5.18’de gösterildiği gibi zaman ölçeğinin gerçekçi bir bakış açısına sahip olması önemlidir. İlerleyen zaman içinde kararlar tehlikeli durumları oluşturma eğiliminde olabilir. Kritik bir olay, bir gün veya bir saat içinde gelişebilir ve saniyeler dahilinde enerjinin serbest kalması dramatik bir hal alabilir. Bu davranış içinde geminin çökmesi ve çevresel hasar unsurlarının sonuçları dramatik bir yol izler fakat uzun süreli etkilere sahip olur.

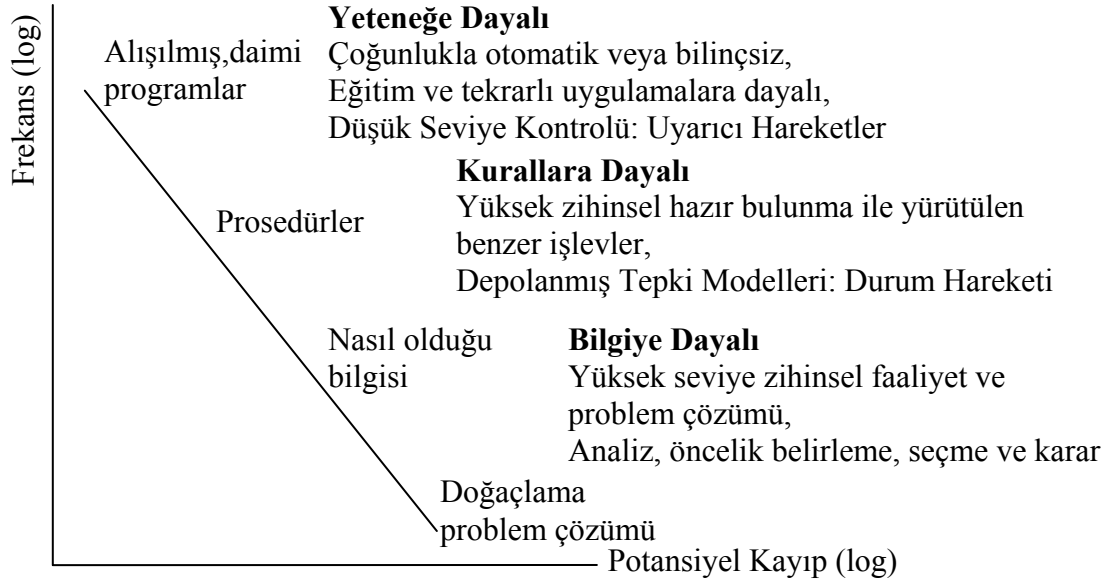
Tablo 5.18. Bir Gemi Kazasının Zaman Ölçek Karakteristiği

Zaman Ölçeği	Tipine Özgü Olaylar
1 yıl	Operasyonla ilgili yönetim kararları
1 gün	Emniyet fonksiyonunun kırılması
1 saat	Hata veya arıza başlangıcı
1 dakika	Tehdit eden kazayı önleme girişi
1 saniye	Enerjinin serbest kalması
1 dakika	Teknenin dağılması ve sistemlerin çökmesi
1 saat	Su alma ve yangın, geminin kaybı ve geminin tahliye edilmesi
1 gün	İnsanların ve geminin kurtarılması
1 hafta	Kirlenme, insanların hastaneye kaldırılması
1 yıl	Çevresel hasar, insanlar üstünde ileri travma etkileri

5.3.3 Bilgi Süreci

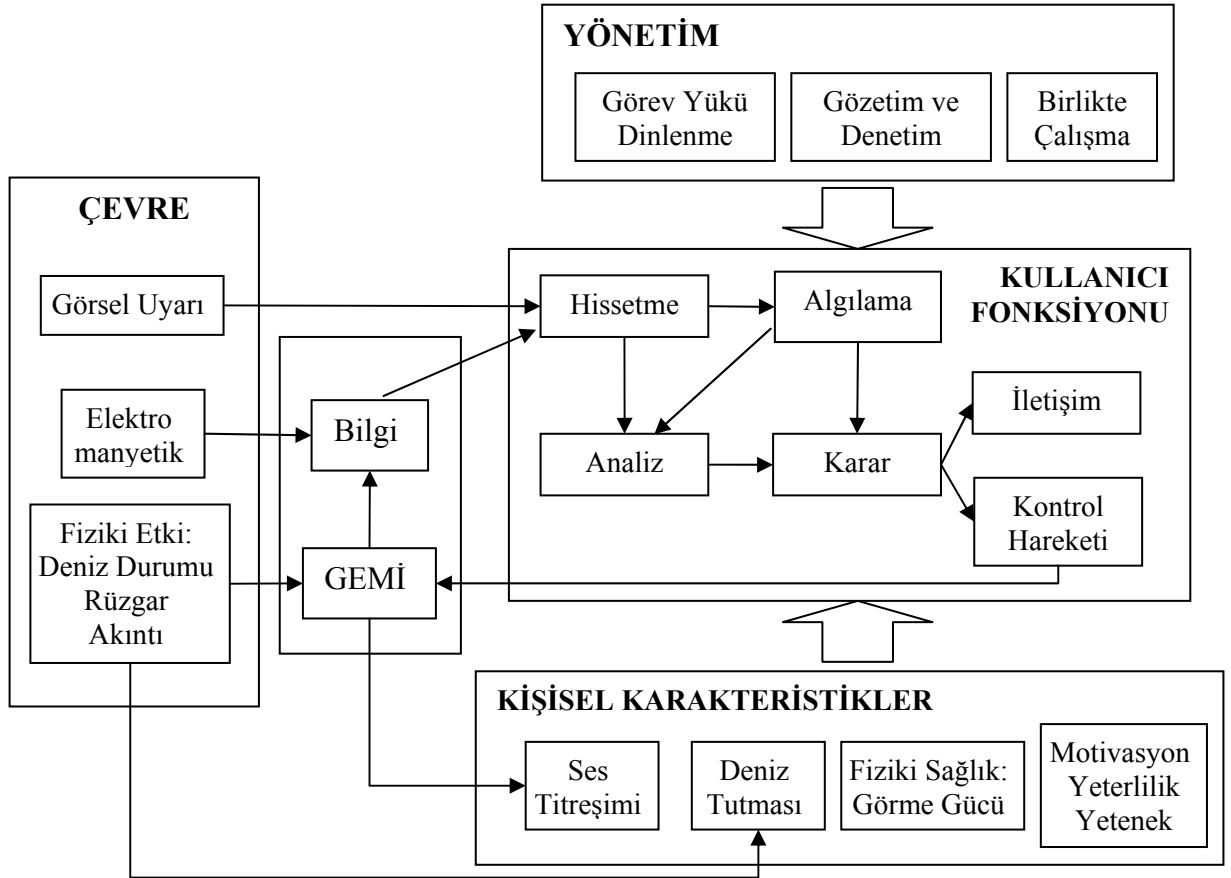
Test etme, kalibre etme, tamir veya değiştirme gibi rutin (alışılmış) olmayan görevler hata oluşturma eğilimindedir. Davranışsal mekanizmalar analiz edildiğinde, rutin olmayan görevlerdeki benzer şekilde, işlevsel olarak ayrılmış roller hata oluşturma eğilimindedir [29].

Rasmussen (1982), şekil 5.18’de belirtilen temel performans (beceri veya yetenek, kural ve bilgi) seviyeleri arasında önemli ayrımları ortaya koymuştur [30]. Yeteneğe dayalı davranışlar, öğretilerden kaynaklanan bilinç altı hareketleridir. Kurallara dayalı davranışlar da benzer şekilde, bilinen durumların önceden edinilen kesin bilgi ile yanıtlanmasıdır. Karmaşık durumları oluşturan bazı problemlerin çözümüne bilgiye dayanan davranışlar ile ulaşırız, yeni durumlarda analiz veya denemelere ihtiyaç duyarız. Günlük işlevlerin çoğunluğu yeteneğe dayalı davranışlar ile gerçekleştirilir. Diğer taraftan aşina ve kolay olmayan işlevlerde bilgiye dayalı davranışlardan faydalanılır.



Şekil 5.18: Alternatif İnsan Performans Seviyeleri

Gemilerin yönetim ve idaresi insan-makine kontrolüne dayanmaktadır. Şekil 5.19’de insan faktörü ile ilişkili olarak gemi kontrolünün kavramsal modeli gösterilmektedir [20]. Gemi ve kullanıcı fonksiyonunun etkileşimi, bu kontrol devresinin merkezini oluşturmaktadır.



Şekil 5.19: Gemi İnsan-Makine Kontrolü

Kullanıcı, gemideki bilgi görüntüleri ve görsel çevre verilerini kullanmaktadır. Bu veri işlemlerden geçirilerek, kontrol hareketlerini ve diğer gemi personeli ile iletişimi başlatır. Fiziksel çevre şartları, genelde gemi kontrolünü olumsuz etkilemektedir. Kişisel karakteristikler, amirler ve diğer personel ile etkileşim, kullanıcı performansını idare etmektedir.

5.3.4 Gözlem ve His

Geminin seyri ile ilgili görevler tamamen vardiyadaki zabitin sorumluluğundadır. Seyir ile ilgili temel bilgi kaynakları şunlardır:

- Deniz trafik hatları, kara parçaları, deniz işaretleri ve deniz trafiği,
- Köprüüstündeki görsel ve duyuşal görüntü üniteleri,
- Geminin hareketleri (manevra, hızlanma vb.)

5.3.4.1 Gece Görüşü

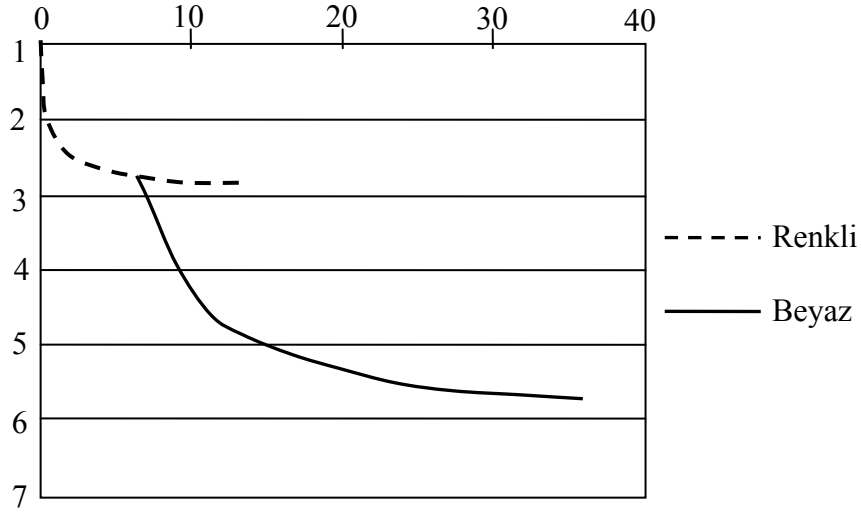
Tüm gemilerde radar cihazı bulunmasına rağmen, görsel gözcülük kısıtlı deniz yollarında gemi hareketinin değerlendirilmesinde ve trafiğin izlenmesi ve tespit edilmesinde önemli bir metottur. Ayrıca, uluslararası kurallar gereğince gözcülük yapılma zorunluluğu vardır. Özellikle gece (karanlık) şartlarında gözlem yapmanın kritikliği artmaktadır.

Bir çok gemi kazasının nedeni, vardiya değişiminden sonra sorumlu zabitin yeterince karanlık ortama alışamamasıdır. Bir kişinin, gün ışığı veya yapay ışığa maruz kaldıktan sonra, tamamen karanlığa alışması için 25 dakika geçmesi gerekmektedir [31]. Bunun sebebi, gözün iki farklı foto reseptöre (çubuk ve koni foto reseptörlerine) sahip olmasıdır;

- Konikler yüksek ışık seviyesine, ince detayların gözlenmesine ve renklerin algılanmasına tepki gösterir.
- Çubuklar, gece görüşü ve düşük yoğunluktaki ışıktaki etkilidir. Görüntü spektrumunun en düşük frekansı içindeki kırmızı ışığa duyarlıdır ve uyarıcı frekansı ne olursa olsun nesneler siyah ve beyazın gölgesi içinde görülür.

Şekil 5.20’de karanlığa alışma eğrisi gösterilmektedir [32]. Konikler 10 dakika içinde karanlığa alışmaktayken, çubukların hassasiyeti yüksek seviye aydınlatması

içinde hızla kaybolur ve bundan dolayı gözün karanlığa tamamen alışması için toplam 25 dakika geçmesi gerekmektedir.



Şekil 5.20: Karanlığa Alışma Eğrisi

5.3.4.2 Kırmızı Işık Etkeni

Gece düşük seviye aydınlatmasında göz çubuk foto reseptörlerine bağımlıdır ve bunlar kırmızı ışığa duyarlıdır. Bu sebeple, kırmızı renk gözlüklerin giyilmesi karanlık adaptasyonunu hızlandırmaktadır. Köprü üstünde gece görüşü altındaki ekipmanların etkilerinin azaltılması kırmızı renk aydınlatma ile sağlanabilir. Fakat bu çözümün bazı mahsurları vardır. Öncelikle görsel keskinlik, ince detayların ayrımı, zayıflar. Daha sonra görsel yorgunluk artmaktadır. Bunlara karşılık, görsel keskinliği arttırıcı mavi ışık (örneğin; radar görüntüsü) uygulaması karanlık adaptasyonunu azaltmaktadır. Kırmızı ve mavi ışığın kullanılması, haritaların okunmasını etkilemektedir. Ayrıca, kırmızı ışık altında kırmızı, turuncu ve sarı renkler görünmeme (kaybolma) eğilimindedir.

5.3.4.3 Gözcülük

Açık denizde az sayıda gözlenecek obje olması, kişideki dikkat ve ehemmiyeti azaltmaktadır. Dikkati arttırmak için görev sırasında yavaş hareketler ile gezerek çevreyi seyretmek veya geniş ayrılmış pozisyonlarda tespitlerin tekrarlanması gerekir. Düşük parlaklıktaki hedefler için sistematik arama etkili iken, görünürlüğü yüksek olan hedefler için serbest olarak gerçekleştirilecek aramalar yeterlidir. Gece, görüş merkezinden 15-20° uzaklıktan sonra karanlık hassasiyet etkili olmaktadır.

Gece körlüğü gözcülük işlevini azaltabilir. Gece körlüğünün derecesi veya mevcut olması, gündüz şartlarında ortaya çıkmadığından kişinin kendisi tarafından fark edilmeyebilir veya bilinmeyebilir. Gece körlüğünün kaynağı, nevroz, psikoz ve histeri ile ilgili olarak fizyolojik veya psikolojik olabilir. Ayrıca patolojik etkilerde, A vitamini eksikliği, diyabet, glokom veya doğuştan, gece körlüğü oluşturmaktadır. Yaşın ilerlemesi ile etkisi artmaktadır, özellikle 40 yaşından sonra etkisi %50 kadar olabilmektedir.

Gözcülük fonksiyonunu etkileyen diğer bir hususta gece miyopluğudur. Karanlık adaptasyonu ile ilerleyen zamanda meydana gelmektedir. Hipermetrop kişiler en iyi görüşlerini düzeltici gözlük kullanmadan sağlar, oysa normal görüşe sahip kişiler yaklaşık – 1,5 dioptri lensleri ile gece görüşünü düzeltmektedir. **Jayle (1959)**'a göre gece miyopluğunun düzeltilmesi ile gece görüşünde %50 oranında iyileşme olmaktadır [32].

5.3.4.4 Görsel Yanılsama

Durgun deniz, açık gökyüzü veya sisli gibi değişmeyen bir alanın devamlı izlenmesi sonucunda, can sıkıntısının artmasının yanında istenmeyen bazı fizyolojik etkiler de ortaya çıkmaktadır. 10-20 dakika sonra gözlem boş ve anlamsız bir hal almaktadır. Bunun sonucunda hareket koordinasyonu azalmakta ve işlevi devam ettirme kabiliyeti yitirilmektedir. Bu olgu “boş alan miyopluğu” olarak adlandırılabilir (izlenen alan dahilinde ilgilenilen obje var olmasına karşın, halen o alanın değişmeyen şekli ile algılanması). Bu sorunun; her 5 dakikada bir ilgi alanının değiştirilmesiyle (örneğin; gemi direğine veya diğer taraflara bakmakla) giderilebilir.

Vardiyadaki personel için görsellik bilginin ana kaynağını oluşturmaktadır. Kırılma, pus ve sis, özyapı veya karakter, nisbi hareket gibi faktörler görüşü etkilemektedir.

5.3.5 Algılama ve Karar Verme

Algılama, fark edilen ve gözlemlenen şeylerin hissedilmesidir. Gözlem için bir çok hata kaynağı mevcuttur. Genelde vardiyadaki personel kendine şu tipik soruları sorar: bir gemi veya hareketsiz bir obje mi görüyorum, bu ışık bir gemiden mi veya bir seyir alametinden mi geliyor, acaba obje geliyor mu yoksa gidiyor mu?

Algılama aşağıdaki etmenleri içerir;

1. Sinyalin anlaşılmasını ve uygulanmasındaki anlamını,

2. Görsel girdilerin bilinen resimler ile ilişki kurulması,
3. Nisbi hareketlerin zihinsel ve dinamik model ile değerlendirilmesi,
4. Alternatif bilgi kaynaklarına öncelik verilmesi.

5.3.6 Çalışma Şartları

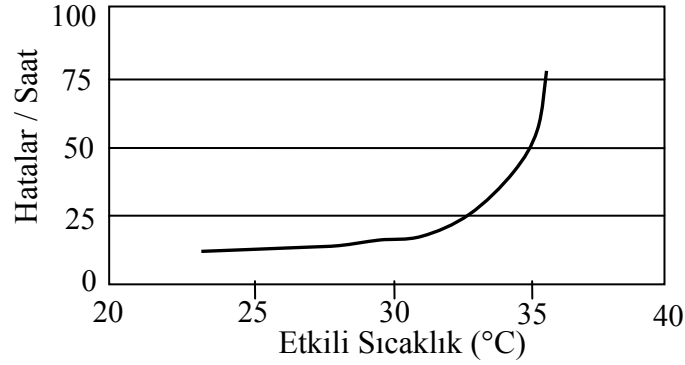
Gemi personelinin çalışma şartlarında performansını etkileyen çevresel faktörler; termik iklim, ses (veya gürültü), titreşim (veya vibrasyon) ve aydınlatmadır.

Termik iklim; sıcaklık, nem, hava sirkülasyonu ve ısı yayılması gibi çok sayıdaki faktörün bir fonksiyonudur, iş yükü ve kişisel giysiler ile ilişkilidir. Geminin farklı iklim bölgelerinde işletilmesi, geminin farklı bölümlerinde çok farklı iklim (hava) şartlarının mevcut olması (örneğin; makine dairesi ve mutfak sıcak iken yük kontrol odasının soğukluğu), personelin farklı ısı stres sergilemesi ve acil durumlarda personelin aşırı sıcaklık yüklenmesi sebeplerinden dolayı gemi üzerinde etkisi olmaktadır. Tablo 5.19’da geminin çeşitli bölümlerinde termik kontrol ile ilgili problemler özetlenmektedir.

Tablo 5.19. Gemiler Üzerinde Termik İklim Faktörü

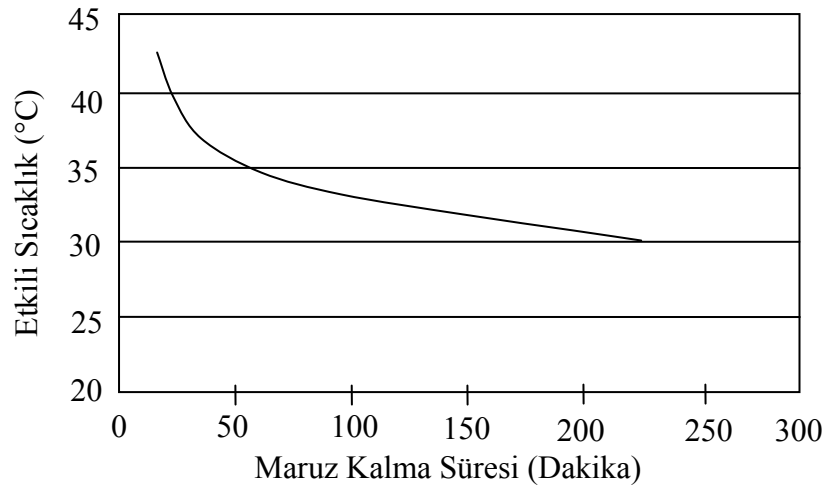
Bölüm	Durum	Çözüm
Yaşam Mahali	Orta dereceli kontrol	Standart havalandırma ve hava kondisyonu
Köprüüstü	22-28 °C’ye kadar termik kontrol, Isı Kaynakları: büyük pencere camları, elektronik ekipmanlar ve açık kapılar.	Standart havalandırma ve hava kondisyonu
Mutfak	Ocak gibi bir çok ısı kaynağı, Termik rahatlık kriterinden düşük uzun süreli durum.	Isı kaynaklarının izolasyonunun artırılması
Makine Dairesi	Makinelerin soğutulması, Dış atmosfer sıcaklığından 10-20 °C daha yüksek sıcaklık, Sıcak yüzeylerden dolayı ısı yayılması, Ağır bakım ve onarım işleri, Dar ve kapalı alanlarda yüksek nisbi nem.	Makine dairesinde çalışmak genelde dış termik rahatlık kriteri dahilindedir. Kış şartlarında aynı alan içinde büyük sıcaklık değişimleri.
Yük Bölümleri	Sıcak iklim altında temizleme işlemleri ve kontrollerinin zorlaşması ve gerileme neden olması, Koruyucu giysiler gerileme katkıda bulunabilir.	Devamlı kurulan ekipmanın temizlenmesi
Güverte	Coğrafi alan ve zamana bağlı düşük ve yüksek sıcaklıklar, Güneş ışıması, Kış koşullarında rüzgar etkisi.	Giyinme ve korunma

Mackworth (1946) sıcaklığın insan faktörü üzerinde etkisi ile ilgili yaptığı çalışmalar sonucunda, sıcaklığın 30°C aşmasından sonra hatalarda, şekil 5.21’de gösterildiği gibi şiddetli artış olduğunu belirtmiştir [33]. Bu da bize çalışma şartlarında üst sıcaklık sınırını geçmemesi gerektiğini veya elverişli sıcaklık aralığını göstermektedir.



Şekil 5.21: Etkili Sıcaklığın Bir Fonksiyonu Olarak Hataların İzlenmesi

Çalışma şartlarında sıcaklık değerinin yanı sıra etkili sıcaklığa maruz kalma süresi de önemli bir etmendir. Şekil 5.22’de gösterildiği gibi etkili sıcaklık değeri 30°C’yi geçtiğinde, zarar görmemiş zihinsel performans süresi hızla azalmaktadır [34].



Şekil 5.22: Zarar Görmemiş Zihinsel Performans için Üst Sınır Değeri

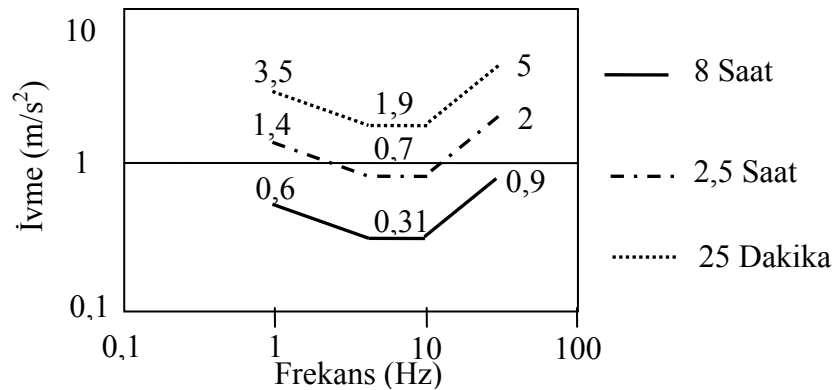
Gemilerdeki en önemli gürültü kaynakları; ana makine, pervane, yardımcı makineler ve makine havalandırmasıdır. Gürültü ses şiddeti ile ölçülmekte ve desibel [dB(A)] olarak ifade edilir. Tablo 5. 20’de ana gemi bölümleri için en çok (maksimum) kayıt edilen ve tavsiye edilen gürültü seviyeleri verilmektedir.

Tablo 5.20. Gemilerdeki Gürültü

Bölüm	Durum	Çözüm
Yaşam Mahali	En yüksek değer: dB(A) = 58-70 Makine dairesinden uzaklığına bağlıdır. Deneyimlere göre %28 can sıkıcıdır.	
Köprüüstü	En yüksek değer: dB(A) = 65-73 Direk iletişim etkisi ve dahili haberleşme cihazları.	Baş kasaralı gemilerde en alçak gürültü seviyesi (Yolcu ve Ro-Ro Gemileri)
Mutfak	Ortalama değer: dB(A) = 71-77 Tavsiye edilen değer: 65 dB(A) (arka planda gürültü artış olacağından)	
Makine Dairesi	En yüksek değer: dB(A) = 93-113 Tavsiye edilen değer: 100 dB(A) Faktörler: güç ve makine tipi. Fiziksel hasar riski (işitmenin azalması) Makine personelinin %50 can sıkıcı olduğunu düşünüyor.	Kulak koruma ekipmanlarının kullanılması, Makine dairesini bölmelere ayırma.

Frekansı 20 Hz'den az olan akustik ses dalgaları insanlar tarafından duyulamaz. Yüksek şiddete sahip olan infra-sesler insan üzerinde, yorgunluğu ve tepki süresini artırıcı negatif etkiye sahiptir. Gemilerde ölçülen infra-ses aralığı 4 Hz [55 dB(A)] ile 16 Hz [95 dB(A)] dir. Bu tür seslerin varlığı gemi emniyet işlemlerinde problemlere neden olabilmektedir.

Gemide bulunan kişileri en fazla etkileyen faktör titreşimdir. Titreşim, insanları hem çalışırken hem de dinlenme durumunda rahatsız etmektedir. Titreşim, seçilen frekans bandındaki ivme (m/s^2) ile ifade edilir. Ana makine ve pervane, titreşimin ana kaynağıdır. Ayrıca, geminin deniz ortamında yaptığı hareketler (yalpa ve baş-kıç) sonucunda, gemi bünyesinde meydana gelen değişimler (hagging ve sagging) neticesinde düşük de olsa titreşim oluşmaktadır. ISO, "iş performans azalması" ve "konfor (rahatlık) azalması" ile ilgili titreşime maruz kalma süresine dayalı olarak standart değerler vermektedir.

**Şekil 5.23:** Maruz Kalma Süresinin Fonksiyonu Olarak Titreşim Tolerans Sınırları

Şekil 5.23’de bakım ve tutum işlemi için ISO titreşim standardı gösterilmektedir [35]. Buna göre; en hassas frekans alanı 4-8 Hz, uzun zaman dahilinde dikey ivme değeri $0,31 \text{ m/s}^2$ ’i geçemez.

5.3.7 Deniz Hareketinin Etkisi

Deniz üzerinde devamlı hareket eden gemide bulunmanın zorlukları oldukça fazladır. Bunların başında hem gemide çalışan personeli hem de yolcuları olumsuz yönde etkileyen “deniz tutması” gelmektedir. Deniz tutması kişileri farklı şekillerde etkiler ve çoğunlukla bu etki mide rahatsızlığı, mide bulanması, uyuşukluk ve iştigfar şeklindedir. **Stevens ve Parsons (2002)**’e göre deniz tutmasının sonuçlarından biri de motivasyon bozulması ve gemide kritik emniyet işlemlerine duyulan endişenin artmasıdır [36]. Bununla birlikte, gemide bulunma zamanı ilerlediğinde bir çok kişide deniz etkisi, deniz şartlarına adaptasyon sağlanmasından dolayı ortadan kalkmaktadır.

Deniz tutmasının nedeni organlar arasındaki duyuşal hareketlerin çatışmasıdır; iç kulak içindeki iletişim sistemde salyangoz kanalı dönme hareketlerine cevap verirken, otolitler dönüşsel kuvvetleri algılar. Görme sistemi baş ve çevre arasındaki nisbi hareketi, vücudun hareket edip etmediği sonucuna göre algılar. Sinir sistemi organlar ve sistemler arasındaki algılayıcıları içerir ve kaslar hareketleri algılar.

Normal koşullar altında bu üç sistem hareketleri belirsizlik içinde algılar. Ancak, bazı durumlarda duyular çelişkili sinyaller iletir ve bu da deniz tutmasına neden olur. Gemi içindeyken deniz, ufuk ve kara ile ilgili görsel referansların olmadığı durumlarda; işitme sistemi hareketleri görme referansı olmadan algılar, böylece işlevini normal şekilde gerçekleştirir. Fakat gemiden deniz hareketleri izlendiğinde, görme ve işitme sistemleri arasında çelişki sinyalleri meydana gelebilir. Benzer durum Simulatör kullanımında ekrandaki deniz görüntüsünün hareket ettirilmesi ile gerçekleştirilebilir.

Hareketten dolayı meydana gelecek hastalıkların (hareket tutması) tahmin edilmesinde iki metot vardır [36]; Hareket Tutma Sıklığı (MSI) ve İştigfar Sıklığıdır (VI). Deniz tutmasının etkileri aşağıdaki gibi özetlenebilir;

1. Motivasyon: uyuşukluk ve ilgisizlik.
2. Yorgunluk Yaratan Hareket (MIF): mantık kapasite ve performansının azalması.
3. Fiziksel kapasitenin azalması.

4. Hareketi dengelemek için ilave enerji harcanması.
5. Sendeleme, kayma ve dengenin kaybedilmesi.

Kavramsal görevlerin (işlemlerin) etkilerini, fiziksel gerilim etkisinden ayırmak oldukça zordur. Köprüüstü işlemleri deniz hareketinden farklı şekilde etkilenen bir çok kavramsal süreçleri ve vasıfları içerir.

Deniz tutması riskini azaltmak için operasyonel (işletimsel) kriterlerin belirlenmesi gerekmektedir. Tablo 5.21’de NATO tarafından önerilen kriterler gösterilmektedir [37]. Farklı gemi tiplerine göre diğer bir alternatif kriter kümesi de tablo 5.22’de gösterilmektedir [38]. Her iki tabloda birbiri ile oldukça hem fikirdir.

Tablo 5.21. Deniz Hareketi İşletilebilme Kriterleri

Hareket Tutma Sıklığı (MSI)	4 saatte personelin % 20’si
Kesinti Yaratan Hareket (MII)	Dakikada bir hafifçe vurma
Yalpa genliği	4.0 ° RMS
Baş-Kıç genliği	1.5 ° RMS
Dikey ivme	0.2 g RMS
Yatay ivme	0.1 g RMS

RMS: Kareler Toplamı Ortalaması Karekökü
g: yer çekimi ivmesi

Tablo 5.22. Köprüüstü İşletilebilme Kriteri

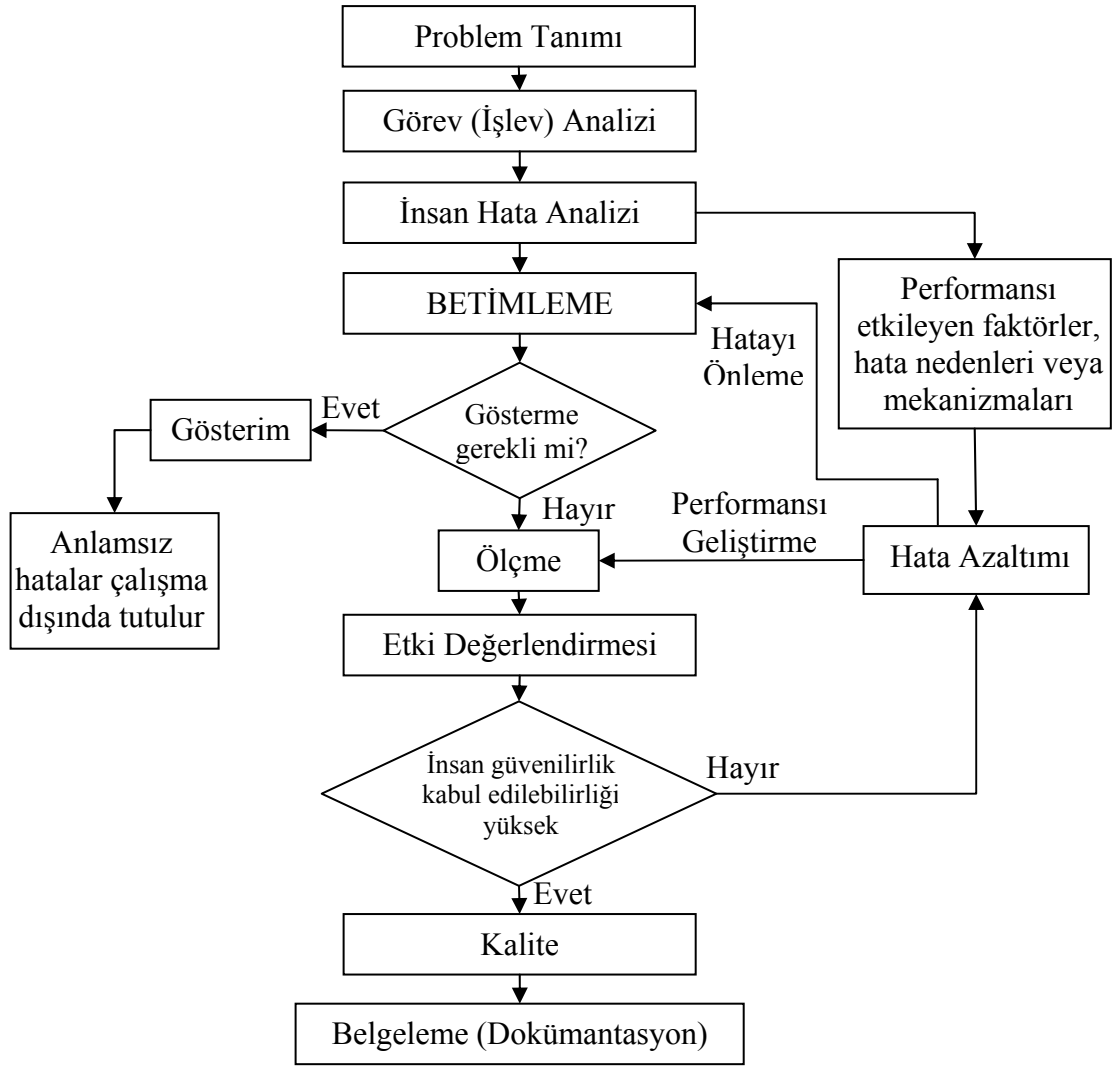
	Ticari Gemiler	Askeri Gemiler	Hızlı Tekneler
Dikey ivme (RMS)	0.15 g	0.2 g	0.275 g
Yatay ivme (RMS)	0.12 g	0.1 g	0.1 g
Yalpa (RMS)	6.0 °	4.0 °	4.0 °

5.4 İNSAN GÜVENİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİ

Kirwan (1992)’e göre insan güvenilirlik analizinin hedefi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [39];

1. İnsan hatasının belirlenmesi: ne yanlış gidiyor?
2. İnsan hatasının ölçülmesi: ne sıklıkla meydana geliyor?
3. İnsan hatasının azaltılması: nasıl önlenabilir veya etki nasıl azaltılabilir?

Şekil 5.24’de insan güvenilirlik analizi hedefinin metodolojik adımları gösterilmektedir.



Şekil 5.24: İnsan Güvenilirlik Analizi Değerlendirilmesi

İnsan Güvenilirlik Analizi tekniklerinden en fazla kullanılan ve bilineni “İnsan Hatası Tahmin Tekniği – THERP” dir. Temel hedefi, olasılık riski ve emniyet değerlendirmesi için insan güvenilirlik verisini sağlamaktır. İnsan Hatası Tahmin Tekniği beş adımdan oluşmaktadır.

1. Sistem Hatalarının Belirlenmesi; insan hatasından etkilenebilecek sistem fonksiyonlarının (işlevlerinin) tanımlandığı safhadır.
2. İnsani İşlemler ile ilgili Analiz; bu evre detaylı bir görev (işlev) analizinin yapılmasını ve personelle ilgili tüm anlamlı etkileşimlerin tanımlanmasını içerir. Bu evrede hedeflenen üçüncü adımdaki ölçümler için bir model oluşturulmasıdır.
3. İnsan Hatası Olasılıklarının Tahmini; uzman kişilerin değerlendirmelerinin ve elverişli verilerin kullanılmasıyla tahminler yapılır.

4. Sistem Hatası Üzerindeki Etkilerin Hesaplanması; insan hatalarının sistem hata olayları üzerindeki etkileri değerlendirilir.
5. Tavsiye ve Değişikliklerin Değerlendirilmesi; bu safhada ilgilenilen sistem için bazı değişikliklerin öngörülmesi ve bunun sonucu yeni sistem hata olasılıklarının tekrar hesaplanması önerilir. Çeşitli insan faktörü problemleri için olası çözümler iş tasarımı, birbirine bağımlılık uygulamaları, yönetimsel kontroller, eğitim ve sertifikalandırma uygulamalarını içermektedir.

Belirli bir hatalı hareketin (eylemin) olasılığı aşağıdaki denklemle elde edilir;

$$Pr_{EA} = HEP_{EA} \sum_{k=1}^m PSF_k \cdot W_k + C \quad (5.2)$$

Pr_{EA} : belirli bir hareket için bir hatanın olasılığı

HEP_{EA} : belirli bir hareketin ana kullanıcı (operatör) hatası olasılığı

PSF_k : k inci performans şeklini veren faktörün sayısal değeri

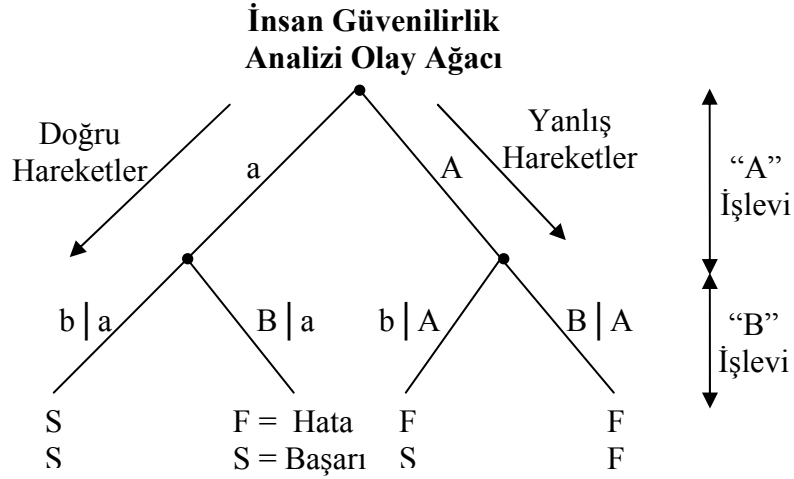
W_k : PSF_k 'nin ağırlığı (sayısal sabit)

C : sayısal sabit

m : PSF 'lerin sayısı

Görev (işlev) analizine dayalı olarak, hareketler ve eylemlerin modellemeleri olay ağaçlarıyla kurulur. İlerleyen safhada tanımlanan her hareketin detaylandırılması ve performans karakteristiklerinin kapsamlı betimlemesi yapılır. Operatörün (kullanıcı) her bir hareketi, işlevlere ve alt işlevlere ayrıldıktan sonra grafiksel gösterim oluşur ve bu da “insan güvenilirlik analizi olay ağacı” olarak isimlendirilir. Şekil 5.25’de insan güvenilirlik analizi olay ağacının bir örneği gösterilmektedir.

İnsan güvenilirlik analizi olay ağacı yaklaşımı, farklı sebep ve biçimlerden oluşabilecek hareketlerin tanımlanmasında yeterli değildir. Özellikle hareketlerin elle yapılan bir hareketten daha ziyade kavramsal bir fonksiyon veya mantıksal bir eylem olduğu durumlarda, olay ağacının kullanımı mantıklı olmamaktadır. Çünkü kavramsal hareketler kolayca ayrı ve arka arkaya alt işlevlere ayıramamaktadır. Bu sebeple teşhis ve karar verme gibi kavramsal fonksiyonlar insan güvenilirliğinde önemli rol oynamaktadır. Kavramsal fonksiyonların olay ağacı modellerinde kullanılmasının standart metodu, fonksiyonun bileşenleri veya alt işlevleri tahmin edilerek bunlara göre ayrıştırılmasıdır.



“A” İşlevi: Birinci işlev

“B” İşlevi: İkinci işlev

a = “A” işlevinin başarılı performans olasılığı

A = “A” işlevinin başarısız performans olasılığı

$b | a$ = “B” işlevinin a ’ya göre başarılı performans olasılığı

$B | a$ = “B” işlevinin a ’ya göre başarısız performans olasılığı

$b | A$ = “B” işlevinin A ’ya göre başarılı performans olasılığı

Şekil 5.25: Arka arkaya İki Alt İşlev için İnsan Güvenilirlik Analizi Olay Ağacı

İnsan güvenilirlik analizi yaklaşımlarında dikkat edilmesi gereken hususlar (kusurlar) aşağıda belirtilmektedir.

1. **Veri Yokluğu:** Hata veya yanlışların sayısal tahmini için elverişli veri yok denecek kadardır. Çoğunlukla bu veriler simülör çalışmalarından elde edilmektedir. Bu sebeple verilerin gerçeği ne derecede yansıttığı ile ilgili bir standart yoktur.
2. **Doğrulama Yetersizliği:** Gerçek hayat tahminleri için insan güvenilirlik analizi doğruluğunun gösterimi mevcut değildir (özellikle rutin olmayan işlevlerde).
3. **Psikolojik Gerçeklilik Yetersizliği:** Bir çok yaklaşım insan davranışları hakkında kesin olmayan varsayımlara dayanmaktadır.
4. **Performans Faktörlerinin Eksik İşleyişi:** Yönetim davranışları, kültür farklılıkları gibi faktörlerin yeterli işletilememektedir. Ayrıca, bu faktörlerin gerçekten performansı nasıl etkilediği konusunda yeterli bilgi edinilmemektedir.

5. Dinamik Durumların Yetersiz İşletilmesi: Analizler çoğunlukla statik durumları içerdikinden, dinamik şartlarda işlevler üzerinde yetersiz kalmaktadır.
6. Mekaniksel Düşünce: İnsan hareketleri üzerine mekaniksel sistemlerin güvenilirlik analizi kullanıldığından, başarılı veya hatalı gibi ikili ayrıştırmaların mevcut olması.
7. Belirsizliğin (Değişkenliğin) Yüksek Seviyesi: Hata olasılıklarının tespitinde farklı metotlardan faydalandığından, aynı işlev için çok farklı değerler elde edilmektedir.
8. Hata Nedenlerinin Anlaşılması ve Belirlenmesindeki Yetersizlik: Psikolojik gerçeklik yetersizliğinden ortaya çıkan insan güvenilirlik analizinin zayıflığıdır. Bir çok yaklaşımda problem, niçin insan hata yaparını açıklamaya çalışmaktadır.

Sonuç olarak gemi üzerinde belirli bir görev için atanmış personelin insan faktörü yönünden kontrolünün sağlanmasında, yapılan analizler altında aşağıda tablo 5.23’de gösterilen genel kontrol listesi kullanılabilir. Gemi personeli, gemide yer alan donanım ve araçlar ile etkileşimin yanı sıra çevresel olaylardan da etkilenmektedir. Personel, araçlar ve çevresel olayların birbiri ile etkileşimi sonucunda bir olay çıktısı meydana gelmektedir.

Tablo 5.23. İnsan Faktörü Kontrol Listesi

Çevresel Şartlar	Performans	Nedensel Mod		
		Personel	Donanım (Araç)	İşlev
Önceki olay(lar)	Tespit: Teknik arıza Personel Faktörü Destek Eksikliği	Tecrübesizlikten, alışmamaktan, yetersiz eğitimden, aşırı bilgilenmeden, habersiz olmadan dolayı bilgisizlik .		İşlev karakteristiği: Belirsiz işler Alışık olunmayan işler Dikkat dağılması Tavsiye edilmeyen kurallar
Diğer gemiler	Değerlendirme: Teknik arıza Personel Faktörü Destek Eksikliği	Yetersiz öğretimden, yetersiz eğitimden, eksik uygulamadan, yetersiz çalışmaktan dolayı yeteneksizlik .	Tasarım; Uyumluluk Tutarlılık Kontekst Yapı ve sistemoloji Geri bildirim İş yükü Kullanıcı kolaylığı	Personel karakteristiği: Personel seçimi Çalışma çizelgesi İş yükü Yetersiz eğitim Düşük motivasyon
Kötü hava	Karar: Teknik arıza Personel Faktörü Destek Eksikliği	Alkol, uyuşturucu ve ilaç kullanımından, duman ve gazlardan dolayı sarhoşluk .	Zayıf yapım ve bakımdan, ekipman eksikliğinden dolayı teknik problemler .	Yetersiz prosedürler: Operasyon prosedürleri İç idare prosedürleri Bakım prosedürleri İletişim prosedürleri Acil durum prosedürleri
Yasa dışı olaylar	Hareket (Eylem): Teknik arıza Personel Faktörü Destek Eksikliği	İş zamanı veya yükünden, dinlenememekten, aşırı bilgilenmeden, iklimden, zaman geriliminden dolayı yorgunluk ve stres . Fiziksel, mantıksal ve duygusal şartlardan dolayı kabiliyet düşmesi .	Eskimeden, yangın ve patlamadan, radyasyondan dolayı zarar .	Uyuşmayan amaçlar: Zaman sıkışması Bütçe Zayıf iletişim: Belirsiz bilgi Lisan problemi Bilgi eksikliği Aşırı (gereksiz) bilgi

6. ÖRNEK SİSTEM MODELLEMELERİ

6.1 FLAP DÜMEN SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Bu bölüme kadar anlatılan konuların bir uygulaması olarak, uluslararası sefer yapan ve 500 grt üstündeki FSA jenerik tanker gemilerinin seyir, çatışma ve karaya oturma konuları incelenerek, bunun sonucu oluşabilecek denizde kirliliğini (FSA metodolojisinden faydalananarak) önlemek amaçlı, uluslararası kurallar altında gemiler için gerekler ortaya konulmaya çalışılmıştır.

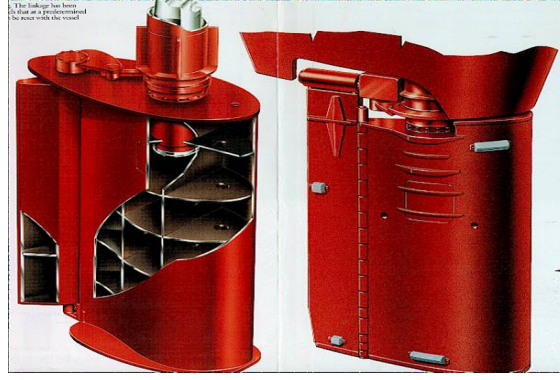
Geminin yapısal dizaynı ve ekipmanı ile ilgili kurallarda ana hedef, geminin amaca uygun donanım ile donatılmasıdır ve buda Klas Kuruluşları tarafından teknik detayları ile öngörülmektedir. Çatışma ve karaya oturma, basit teçhizat hatasından daha ziyade insan hatasının sıkça ortaya koyduğu sonuçlardandır. Bu hatanın da ana nedenini organizasyon ve yönetim eksikliği (Uluslararası Emniyet Yönetimi'ne göre) oluşturmaktadır.

Örnek uygulama sonunda yapılan tespit; çatışma ve karaya oturma riski artmasında insana dayalı kuralların etkisi, en fazla potansiyele sahip olanıdır. Fakat teknik kuralların etkisi, gemi işletici ve maliyetlerine karşın teknik gelişmelerdeki dengeyi sağladığından dolayı, kısmen de olsa mevcuttur. Tablo 6.1'de insan hayatı için kabul edilebilir risk seviyeleri gösterilmektedir.

Tablo 6.1. Bireysel (Kişisel) Risk Kabul Kriteri

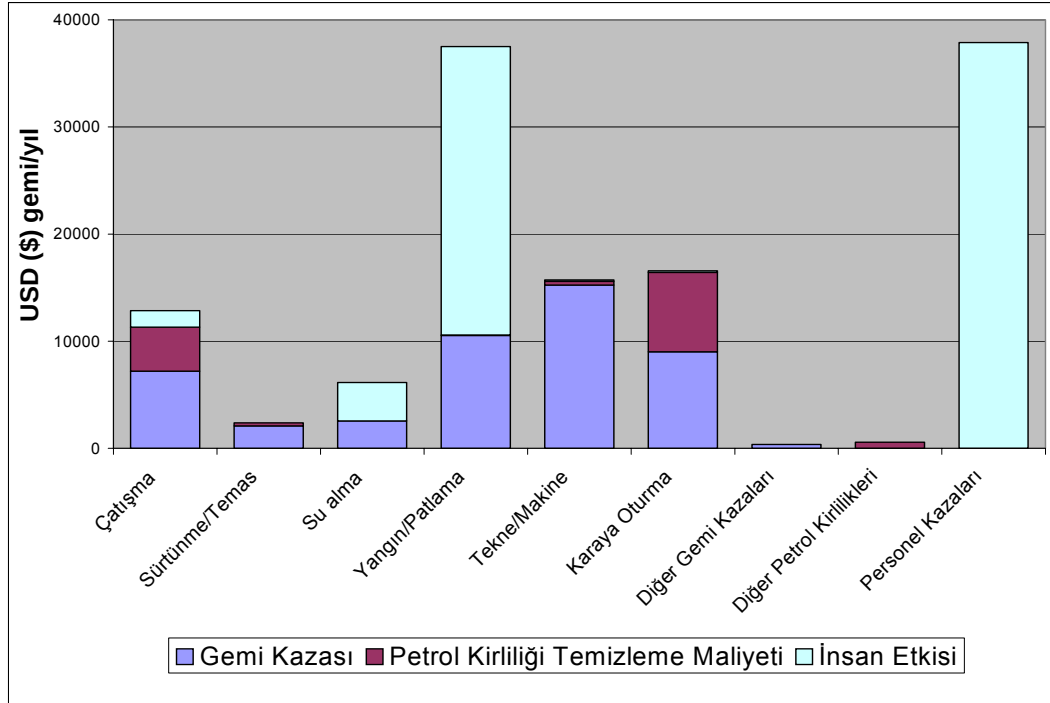
Personel için maksimum kabul edilebilir risk seviyesi	10^{-3} kişi/yıl
Yolcular için maksimum kabul edilebilir risk seviyesi	10^{-4} kişi/yıl
Kıyı personeli için maksimum kabul edilebilir risk seviyesi	10^{-4} kişi/yıl
Önemsiz risk seviyesi	10^{-6} kişi/yıl

Şekil 6.1'de gösterildiği gibi Flap (kontra) dümen, menteşe ile tutturulmuş düz ve geriye doğru eğimi artan bir yapıdan meydana gelir. Modern gemi dizaynlarında flap dümen kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Yürürlükteki Klas Kuralları sadece dümen ile ilgili olduğundan, flap dümen kullanımı konusunda iyileştirilmeler gerekmektedir.



Şekil 6.1: Flap Dümen Yapısı

Şekil 6.2’de örnek Tankerler için çatışma ve karaya oturmadan kaynaklanan katkıları da içererek, yıllık zarar tahminlerini göstermektedir.



Şekil 6.2: Çatışma ve Karaya Oturma Sonucu Oluşan Maliyetler

Tablo 6.2’de genel flap dümen hatalarının neden olduğu risk sonuçlarını ve maliyetlerini göstermektedir. En fazla maliyet iş kesintilerinden oluşmaktadır.

Tablo 6.2. Flap Dümen Hatasından Kaynaklanan Risk ve Maliyetler

Flap Dümen Hatasından Kaynaklanan Risk	Risk (Gemi/yıl)	Sosyal Maliyet (\$gemi/yıl)
Ölümler	$1.5 \cdot 10^{-6}$ Ölüm	\$ 5
Petrol Kirliliği	$2.5 \cdot 10^{-3}$ Ton	\$ 50
Faaliyet (İş) Yitirme	\$ 2410	\$ 2410
Toplam Maliyet		\$ 2465

6.1.1 Flap Dümen Kullanımında Risk Kontrol Seçenekleri

Tablo 6.3’de flap dümen kullanımı için tasarlanan risk kontrol seçenekleri gösterilmektedir.

Tablo 6.3. Flap Dümen Kullanımı için Risk Kontrol Seçenekleri

RCO	Risk Kontrol Seçeneği	Görüşler
1	Flap dümen bileşenlerinde geleneksel dümen sistemindeki aynı materyalin kullanılması	Bir kaç materyal bileşeni değiştirilmeli (örneğin; bronz cıvata kullanımının durdurulması.)
2	Tasarım için yeni prosedürlerin (hesaplamalar da dahil) geliştirilmesi	Birleşmiş onay prosedürlerinin düzenlenmesi (örneğin; yorgunluk faktörünün dahil edilmesi)
3	Elektrik devresi ile flap dümen açısının izlenmesi ve/veya gösterilmesi	Her şeyin planlandığı gibi devam ettiğini gösteren bir Köprüüstü bilgi sisteminin oluşturulması
4	Karina sürveylerinde tüm flap menteşe açıları ve mil/tekne/bağlantı halkalarının temizlik ölçümlerinin yapılması	Boyun bağlantısı için benzer sürvey uygulaması başlamıştır
5	Mil bağlantısı ve üst menteşenin yıllık gözden geçirilmesi, ilk periyodik yenileme sürveyi ve ara düzenli denetimler ve ilk yenileme sonrasındaki yenileme sürveyleri	Bu risk kontrol seçeneği ile flap dümenin faaliyete geçmesinden sonraki ilk periyodundaki ilginin artması sağlanır
6	Geminin Planlı Bakım Tutum Sistemi içinde, dümen flap açılarının /menteşe/ cıvata/bağlantı sistemlerinin düzenli kontrollerinin ve bakımının yer alması	Personel ve gemi işleticisi açısından dikkatin artması olası fark edilmeyecek bir hasarın azalmasına neden olabilir. Sıradan bakım planlanabilir ve böylece tipik hasarlar için onarım planlaması sağlanabilir
7	Flap dümen için rehberlik verici özel sürveylerin geliştirilmesi	Böylece eğitimsel amaç ve raporlama kalitesi artırılabilir

Flap dümen sisteminin fayda maliyet analizi, her bir risk kontrol seçeneği için düzenlenmiştir. Maliyetler şu kalemlerden oluşmaktadır; iç maliyetler olarak kural koyucunun yeni kural gelişimi kabul ve dağılım maliyeti, buna bağlı olarak dış maliyetler gemi sahibinin yatırım, bakım ve kontrol maliyetleridir. Faydalar ise zarar çeşide bağlı olarak dümen hata riskini azaltma yüzdesi şeklinde tahmin edilmiştir.

Tablo 6.4’de örnek olarak, fayda maliyet analizine dayalı bir risk kontrol seçeneğinin değerlendirmesi gösterilmektedir. Bu risk kontrol seçeneği için emniyet önlemi açısından gerekmemektedir ve ICAF değeri yüksek olduğundan risk veya maliyet için duyarlı ve kesinlik arz etmemektedir. Ayrıca, faydanın şimdiki değeri eksi, buda güvenilirlik açısından negatif etki oluşturmakta ve analizciyi bir başka risk kontrol seçeneğine yönlendirmektedir. Tablo 6.5’de geminin işletim süresi boyunca tüm risk

kontrol seçenekleri için fayda maliyet analizleri gösterilmektedir. Buna göre; bir çok önlem; FSA'nın ortaya koyduğu ICAF kriterinin (3 milyon \$) altındadır ve kabul edirliliği sağlamaktadır. Sadece 6 numaralı risk kontrol seçeneği emniyet önlemi olarak uygulanabilir. Dört kontrol seçeneğinin de şimdiki faydaları artıda olduğundan güvenilirliğe yardımcı olmaktadır.

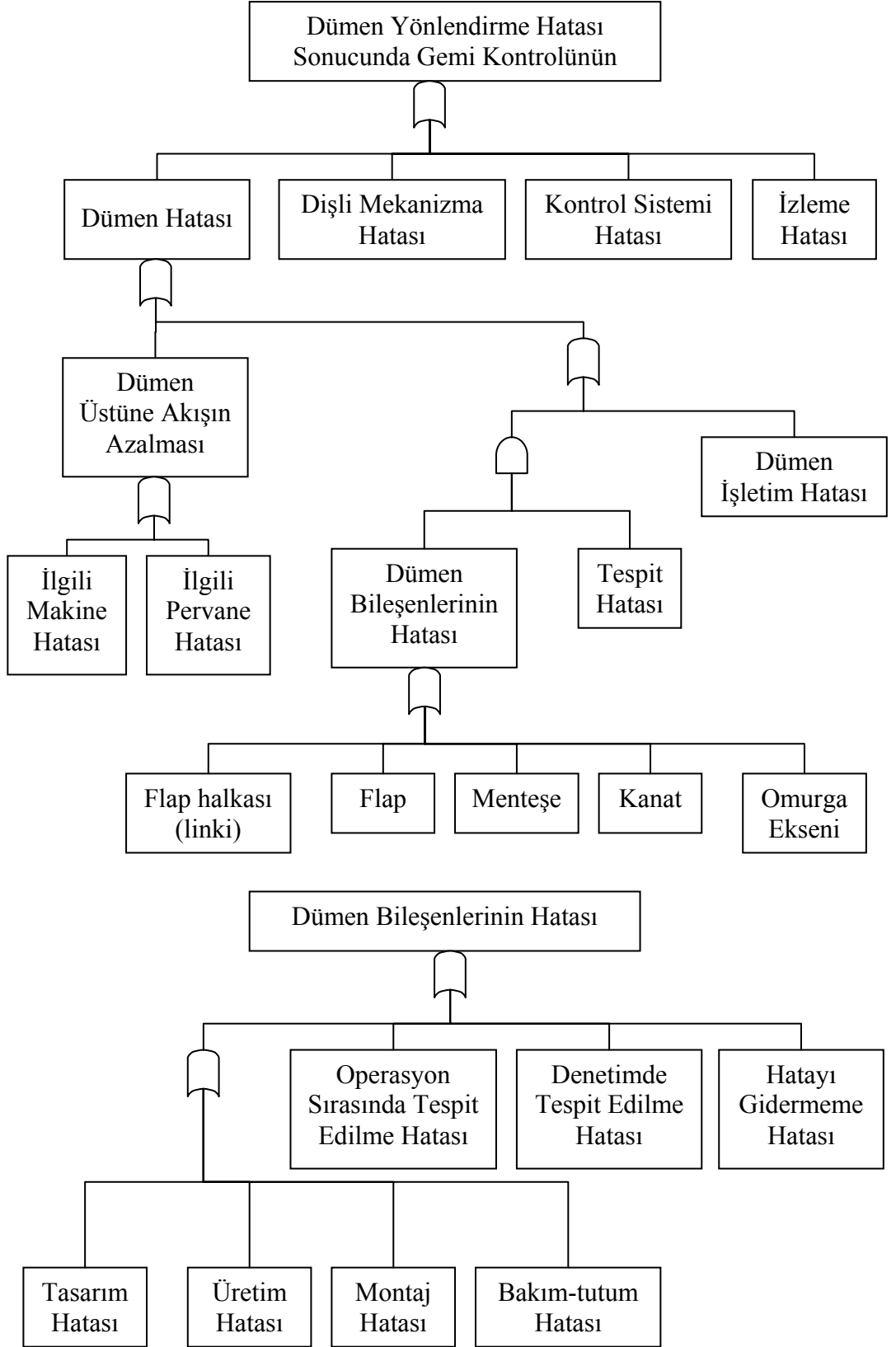
Tablo 6.4. Bir Numaralı Risk Kontrol Seçeneğinin Fayda-Maliyet Değerlendirmesi

RCO-1: Flap dümen bileşenlerinde geleneksel dümen sistemindeki aynı materyalin kullanılması		
Parametre	Değer	Belirsizlik (Şüphe)
Maliyet	2487 \$/gemi	\$ 1400 - \$ 4300
Fayda		
Risk Azaltımı	% 6	± 50
Ölümlerdeki Fayda	$1.8 \cdot 10^{-6}$ ölüm/gemi	$1.8 \cdot 10^{-7} - 1.8 \cdot 10^{-5}$
Ölüm Dışındaki Maliyetlerdeki Azalma	1844 \$/gemi	\$ 180 - \$ 18000
Emniyet Önlemi Değerlendirmesi		
Toplam ICAF	\$ 1560 m	\$ 160 m – 16000 m
Kabul Kriteri	< \$ 3 m	
Sonuç	Gereksiz	Hassas değil
Güvenilirlik Değerlendirmesi		
Net Fayda	- \$ 998 \$/gemi	\$ 160 m – 16000 m
Kabul Kriteri	> \$ 0	
Sonuç	Gereksiz	Hassas

Tablo 6.5. Tüm Risk Kontrol Seçenekleri için Fayda Maliyet Değerleri

RCO	Toplam ICAF [Her ölümü önleme miktarı (\$)]	Net Fayda [Gemi ömrünce miktar (\$)]	RCO Derecesi
1	\$ 1560 m	- 998	6
2	\$ 490 m	3966	2
3	\$ 4670 m	- 8751	7
4	\$ 568 m	1371	4
5	\$ 1130 m	- 896	5
6	\$ 3.3 m	3974	1
7	\$ 65 m	2580	3

Dümen sisteminin (bileşenlerinin) hatası, F, gemi başına yılda $6E-4$ 'dir (Flap dümen hata frekansları Lloyd's Deniz Bilgi Servisinden (LMIS) elde edilmiştir). Geminin faaliyet süresi boyunca elde edilen hasar kayıtları dağılımına göre; flap dümen hatası, geleneksel dümen hatasının yaklaşık üç katına denk olmaktadır. İncelemelerde flap dümen kontrolünün gerek armatör ve gemi personeli, gerekse geminin klass kuruluşu veya bayrak devleti tarafından yapılmadığı göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 6.3: Flap Dümen Hata Ağacı

Şekil 6.3’de flap dümen sisteminin hata ağacı gösterilmektedir. Buna göre her bir risk kontrol seçeneği için aşağıdaki bilgiler elde edilmiştir:

Risk Kontrol Seçeneği-1: Flap dümen bileşenlerinde, geleneksel dümen sistemindeki aynı materyalin kullanılması (cıvata, milden daha sert yapıdadır).

Menteşe; % 22 dümen hasarını temsil eder, hasarın %94’ünü cıvata veya mil oluşturur, bu sebeple aynı hasar çeşidi dağılımı varsayılır.

Uygulanmadan (etkisiz) ölçüm: %3

Uygulanan (etkili) ölçüm:

	Azalma (%)	Başlangıç Etkisi (%)	Genelde Etkisi (%)
Kırılma	65	6	2,1
Çatlama	65	10	3,5
Yıpranma	20	75	60
Bağlantı Kaybı	10	3	2,7
Toplam Kayıp	80	3	0,6
			68.9

Risk Kontrol Seçeneği-2: Tasarım için yeni prosedürlerin (hesaplamalar da dahil) geliştirilmesi (örneğin yük formüllerinin veya flapler için hesaplama metotlarının yayınlanması).

Dümen stoku ile ilgili olmayan ölçümler (örneğin; kazaların %17’si)

Kanat: Ölçüm yalnızca menteşe bağlantısı ile ilgilidir ve kanat hasarının %11’i olarak gösterilir.

Etkili ölçüm;

	Azalma (%)	Başlangıç Etkisi (%)	Genelde Etkisi (%)
Menteşe Bağlantısı	20	11	8,8

Menteşe; % 22 dümen hasarını temsil eder, hasarın %97’si ile ilgilidir, bu sebeple aynı hasar çeşidi dağılımı varsayılır.

Etkisiz ölçüm: %3

Etkili ölçüm:

	Azalma (%)	Başlangıç Etkisi (%)	Genelde Etkisi (%)
Kırılma	65	6	2,1
Çatlama	65	10	3,5
Yıpranma	20	75	60
Bağlantı Kaybı	20	3	2,4
Toplam Kayıp	90	3	0,3
			68.3

Flap Halkası: dümen hasarının % 34'ünü temsil eder.

Etkisiz ölçüm: %22 (örneğin; korozyon %9, diğerleri %13)

Etkili ölçüm:

	Azalma (%)	Başlangıç Etkisi (%)	Genelde Etkisi (%)
Kırılma	80	4	0,8
Çatlama	50	11	5,5
Yıpranma	20	38	30,4
Bağlantı Kaybı	50	17	8,5
Kıvrılma (deformasyon)	80	4	0,8
Toplam Kayıp	65	4	1,4
			47.4

Flap: dümen hasarının % 21'ini temsil eder.

Etkisiz ölçüm: %22 (örneğin; içsel %3, korozyon %3, aşınma %3, yıpranma %3, diğerleri %10)

Etkili ölçüm:

	Azalma (%)	Başlangıç Etkisi (%)	Genelde Etkisi (%)
Kırılma	50	17	8,5
Çatlama	50	44	22
Bağlantı Kaybı	50	3	1,5
Çökme (dağılma)	50	7	3,5
Toplam Kayıp	50	7	3,5
			39

Risk Kontrol Seçeneği-3: Elektrik devresi ile flap dümen açısının izlenmesi ve/veya gösterilmesi.

Menteşe; % 22 dümen hasarını temsil eder.

Etkisiz ölçüm: %91 (örneğin; çatlama %10, yıpranma %75, bağlantı kaybı %3, diğerleri %3)

Etkili ölçüm:

	Azalma (%)	Başlangıç Etkisi (%)	Genelde Etkisi (%)
Kırılma	80	6	1,2
Toplam Kayıp	99	3	0,03
			1.23

Flap Linki: dümen hasarının % 34'ünü temsil eder.

Etkisiz ölçüm: %92 (örneğin; çatlama %11, korozyon %9, yıpranma %38, bağlantı kaybı %17, kıvrılma %4, diğerleri %13)

Etkili ölçüm:

	Azalma (%)	Başlangıç Etkisi (%)	Genelde Etkisi (%)
Kırılma	99	4	0,04
Toplam Kayıp	99	4	0,04
			0.08

Flap: dümen hasarının % 21'ini temsil eder.

Etkisiz ölçüm: %76 (örneğin; çatlama %44, içsel %3, korozyon %3, aşınma %3, yıpranma %3, bağlantı kaybı %3, dağılma %7, diğerleri %10)

Etkili ölçüm:

	Azalma (%)	Başlangıç Etkisi (%)	Genelde Etkisi (%)
Kırılma	50	17	8,5
Toplam Kayıp	99	7	0,07
			8.57

Risk Kontrol Seçeneği-4: Karina sorveylerinde tüm flap menteşe açıları ve mil/tekne/bağlantı linklerinin temizlik ölçümlerinin yapılması.

Menteşe; % 22 dümen hasarını temsil eder.

Etkisiz denetim: %12 (örneğin; kırılma %6, toplam kayıp %3, diğerleri %3)

Etkili denetim:

	Azalma (%)	Tasarım Değişimi ile Menteşe Denetimini Kolaylaştırmadaki Azalma (%)	Başlangıç Etkisi (%)	Genelde Etkisi (%)	Genelde Etkisi ve Tasarımdaki Değişimi (%)
Çatlama	50		10	5	5
Yıpranma	20	90	75	60	7,5
Bağlantı Kaybı	80		3	0,6	0,6
				65.6	

Mil/Tekne/Halka Bağlantısı: mil-tekne yatağı ve mil-halka yatağı. Dümen hasarının % 8'ini temsil eder.

Etkisiz denetim: %21 (örneğin; kırılma %4, toplam kayıp %4, diğerleri %13)

Etkili denetim:

	Azalma (%)	Başlangıç Etkisi (%)	Genelde Etkisi (%)
Çatlama	40	11	6,6
Korozyon	50	9	4,5
Yıpranma	90	38	3,8
Bağlantı Kaybı	80	17	3,4
Dağılma	80	4	0,8
			19,1

Risk Kontrol Seçeneği-5: Mil bağlantısı ve üst menteşenin yıllık gözden geçirilmesi, ilk periyodik yenileme sorveyi ve ara düzenli denetimler ve ilk yenileme sonrasındaki yenileme sorveyleri.

Mil Halkası: Dümen hasarının %34'ünü temsil eder.

Etkisiz denetim: %21 (örneğin; kırılma %4, toplam kayıp %4, diğerleri %13)

Etkili denetim:

	Azalma (%)	Başlangıç Etkisi (%)	Genelde Etkisi (%)
Çatlama	40	11	6,6
Korozyon	30	9	6,3
Yıpranma	90	38	3,8
Bağlantı Kaybı	80	17	3,4
Dağılma	80	4	0,8
			20,9

Görsel denetim ve denetçi nereye baktığını bildiği zamanda, 2 saklı ve 1 görülür.

Menteşe; dümen hasarının % 22'sini temsil eder.

Etkisiz denetim: %12 (örneğin; kırılma %6, toplam kayıp %3, diğerleri %3)

Etkili denetim:

	Azalma (%)	Tasarım Değişimi ile Menteşe Denetimini Kolaylaştırmadaki Azalma (%)	Başlangıç Etkisi (%)	Genelde Etkisi (%)	Genelde Etkisi ve Tasarımdaki Değişimi (%)
Çatlama	50		10	5	5
Yıpranma	20	90	75	60	7,5
Bağlantı Kaybı	80		3	0,6	0,6
				65.6	

Yıpranma sadece dış çatlamalarda olmaktadır.

Risk Kontrol Seçeneği-6: Geminin Planlı Bakım Tutum Sistemi içinde, dümen flap açılarının /menteşe/ cıvata/bağlantı sistemlerinin düzenli kontrollerinin ve bakımının yer alması.

Menteşe; dümen hasarının % 22'sini temsil eder.

Etkisiz denetim: %12 (örneğin; kırılma %6, toplam kayıp %3, diğerleri %3)

Etkili denetim:

	Azalma (%)	Başlangıç Etkisi (%)	Genelde Etkisi (%)
Çatlama	10	11	9,9
Korozyon	20	9	7,2
Yıpranma	80	38	7,6
Bağlantı Kaybı	80	17	3,4
Dağılma	30	4	2,8
			30,9

Flap Halkası; dümen hasarının % 34'ünü temsil eder.

Etkisiz denetim: %21 (örneğin; kırılma %4, toplam kayıp %4, diğerleri %13)

Etkili denetim:

	Azalma (%)	Başlangıç Etkisi (%)	Genelde Etkisi (%)
Çatlama	20	10	8
Yıpranma	10	75	67,5
Bağlantı Kaybı	50	3	1,5
			77

Risk Kontrol Seçeneği-7: Flap dümen için rehberlik verici özel sürveylerin geliştirilmesi. Bu sürveyörlere talimatlar, rehber notları veya Klass notları gibi dokümanları içermektedir. Burada ana hedef; genel bir dil ve buradan birleştirilmiş raporlamaların elde edilmesidir. Ayrıca eğitim, onaylama, denetleme ve raporlamadaki maliyetlerin azalması ve hasar veri bankasının kalitesinin yükselmesi beklenmektedir.

Uzmanların değerlendirmesine göre:

Deneyim gelişimi geribildirimden kaynaklanan risk azalması : %3

Etkili denetimden dolayı kaza sayısının azalması : %1

Diğer önlemlerin gelişiminden dolayı risk azalması : %5

Toplam = %9

Yedi risk kontrol seçeneğine göre; flap dümen kullanımında uygulanmaları sonucunda meydana gelebilecek dümen hatasındaki toplam azalma oranları tablo 6.6'de gösterilmektedir.

Tablo 6.6. Dümen Hatasındaki Toplam Azalma

	Başlangıç	Tasarım Değişikliği ile Mentеше Denetimlerinin Kolaylaştırılması
RCO-1	6	
RCO-2	25	
RCO-3	8	
RCO-4	10	21
RCO-5	25	37
RCO-6	13	
RCO-7	9	

6.1.2 Seçilen Risk Kontrol Seçeneğinin Hata Dağılımı

Seçilen risk kontrol seçeneğinin hata dağılımları aşağıdaki denklemler yardımı ile saptanmıştır. Daha öncede belirtildiği üzere flap dümen hata frekanslarının tespit edilmesinde Lloyd's Deniz Bilgi Servisinden (LMIS) faydalanılmıştır.

$$F(\text{RCO-1}) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times (0.78 + 0.06 \times 0.22 + 0.94 \times 0.22 \times (0.03 + 0.689)) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times 0.94 = 2.82 \times F(\text{Lloyds})$$

$$F(\text{RCO-2}) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times (0.17 + 0.03 \times 0.22 + (0.06 \times 0.89 + 0.06 \times 0.088) + (0.22 \times 0.97 \times 0.03 + 0.22 \times 0.97 \times 0.683) + (0.34 \times 0.22 + 0.34 \times 0.474) + (0.21 \times 0.22 + 0.21 \times 0.39)) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times 0.75 = 2.25 \times F(\text{Lloyds})$$

$$F(\text{RCO-3}) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times (0.23 + (0.22 \times 0.91 + 0.22 \times 0.0123) + (0.34 \times 0.92 + 0.34 \times 0.0008) + (0.21 \times 0.76 + 0.21 \times 0.0857)) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times 0.92 = 2.76 \times F(\text{Lloyds})$$

$$F(\text{RCO-4}) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times (0.70 + (0.22 \times 0.12 + 0.22 \times 0.656) + (0.08 \times 0.21 + 0.08 \times 0.191)) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times 0.90 = 2.70 \times F(\text{Lloyds})$$

$$F(\text{RCO-5}) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times (0.44 + (0.34 \times 0.21 + 0.34 \times 0.209) + (0.22 \times 0.12 + 0.22 \times 0.656)) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times 0.75 = 2.25 \times F(\text{Lloyds})$$

$$F(\text{RCO-6}) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times (0.44 + (0.22 \times 0.12 + 0.22 \times 0.309) + (0.34 \times 0.21 + 0.34 \times 0.77)) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times 0.87 = 2.61 \times F(\text{Lloyds})$$

$$F(\text{RCO-7}) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times (1 - (0.03 + 0.01 + 0.05)) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times 0.91 = 2.73 \times F(\text{Lloyds})$$

Tasarım değişikliği ile menteşe denetimlerinin kolaylaştırılması mümkün olduğunda;

$$F(\text{RCO-4}) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times (0.70 + (0.22 \times 0.12 + 0.22 \times 0.131) + (0.08 \times 0.21 + 0.08 \times 0.191)) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times 0.79 = 2.36 \times F(\text{Lloyds})$$

$$F(\text{RCO-5}) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times (0.44 + (0.34 \times 0.21 + 0.34 \times 0.209) + (0.22 \times 0.12 + 0.22 \times 0.131)) = 3 \times F(\text{Lloyds}) \times 0.64 = 1.91 \times F(\text{Lloyds})$$

6.1.3 Seçilen Risk Kontrol Seçeneğinin Faydası

Seçilen risk kontrol seçeneğinin faydasının tespit edilmesinde, öncelikli bu seçeneğin uygulanması sonucunda oluşabilecek bir hasardan kaynaklanan maliyet hesaplanmış ve bu seçenekten dolayı insan hayatı açısından kazanılacak faydalar ölüm ve yaralanmalar olarak yıllık değerleri hesaplanmıştır. Buna göre;

Geleneksel dümen için dümen hasar maliyeti = 828 \$ gemi/yıl (Ölümler hariç = 825 \$ gemi/yıl)

Flap dümen için dümen hasar maliyeti = 2485 \$ gemi/yıl

RCO-1 için;

Risk kontrol seçeneği 1 uygulanması sonucunda dümen hasar maliyeti = 2336 \$ gemi/yıl

Fayda (Ölümler dahil) = 149 \$ gemi/yıl

Fayda (Ölümler hariç) = 139 \$ gemi/yıl

RCO-2 için;

Risk kontrol seçeneği 2 uygulanması sonucunda dümen hasar maliyeti = 1864 \$ gemi/yıl

Fayda (Ölümler dahil) = 621 \$ gemi/yıl

Fayda (Ölümler hariç) = 611 \$ gemi/yıl

RCO-3 için;

Risk kontrol seçeneği 3 uygulanması sonucunda dümen hasar maliyeti = 2286 \$ gemi/yıl

Fayda (Ölümler dahil) = 199 \$ gemi/yıl

Fayda (Ölümler hariç) = 189 \$ gemi/yıl

RCO-4 için;

Risk kontrol seçeneği 4 uygulanması sonucunda dümen hasar maliyeti = 2237 \$ gemi/yıl

Fayda (Ölümler dahil) = 249 \$ gemi/yıl

Fayda (Ölümler hariç) = 239 \$ gemi/yıl

RCO-5 için;

Risk kontrol seçeneği 5 uygulanması sonucunda dümen hasar maliyeti = 1864 \$ gemi/yıl

Fayda (Ölümler dahil) = 621 \$ gemi/yıl

Fayda (Ölümler hariç) = 611 \$ gemi/yıl

RCO-6 için;

Risk kontrol seçeneği 6 uygulanması sonucunda dümen hasar maliyeti = 2162 \$ gemi/yıl

Fayda (Ölümler dahil) = 323 \$ gemi/yıl

Fayda (Ölümler hariç) = 313 \$ gemi/yıl

RCO-7 için;

Risk kontrol seçeneği 7 uygulanması sonucunda dümen hasar maliyeti = 2261 \$ gemi/yıl

Fayda (Ölümler dahil) = 224 \$ gemi/yıl

Fayda (Ölümler hariç) = 214 \$ gemi/yıl

Tablo 6.7’de risk kontrol seçeneklerinin tasarım maliyetlerinin şimdiki değerleri ve 20 yıl işlevde kalma süresine bağlı maliyet oranları gösterilmektedir.

Tablo 6.7. Risk Kontrol Seçeneklerinin Tasarım Maliyetleri

Toplam Tasarım Maliyeti	RCO-1	RCO-2	RCO-3	RCO-4	RCO-5	RCO-6	RCO-7
NPV	2487,4	3720,7	11212,8	1704,0	8582,5	12,8	182,0
NPV/20Yıl	142,4	186,0	560,6	85,2	429,1	0,6	9,1

Sonuç olarak risk kontrol seçeneklerinin fayda maliyet değerlendirmesi tablo 6.8’deki gibi elde edilir.

Tablo 6.8. Risk Kontrol Seçeneklerinin Fayda Maliyet Değerlendirmesi

RCO	Maliyet (\$/yıl)	Fayda (\$/yıl)	Net Maliyet (\$/yıl)	Ölüm Oranı Flap Dümen Hatası	Azalma (%)
1	228	149	79	1,51E-06	6
2	299	621	-323	1,51E-06	25
3	900	199	701	1,51E-06	8
4	137	249	-112	1,51E-06	10
5	689	621	67	1,51E-06	25
6	1	323	-322	1,51E-06	13
7	15	224	-209	1,51E-06	9

Yukarıdaki bilgiler ışığında uygulanması gereken risk kontrol seçeneğinin altı (6) numaralı seçenek olduğu tespit edilmiştir. Tablo 6.9’de risk kontrol seçeneklerinin derecelendirilmesini göstermektedir.

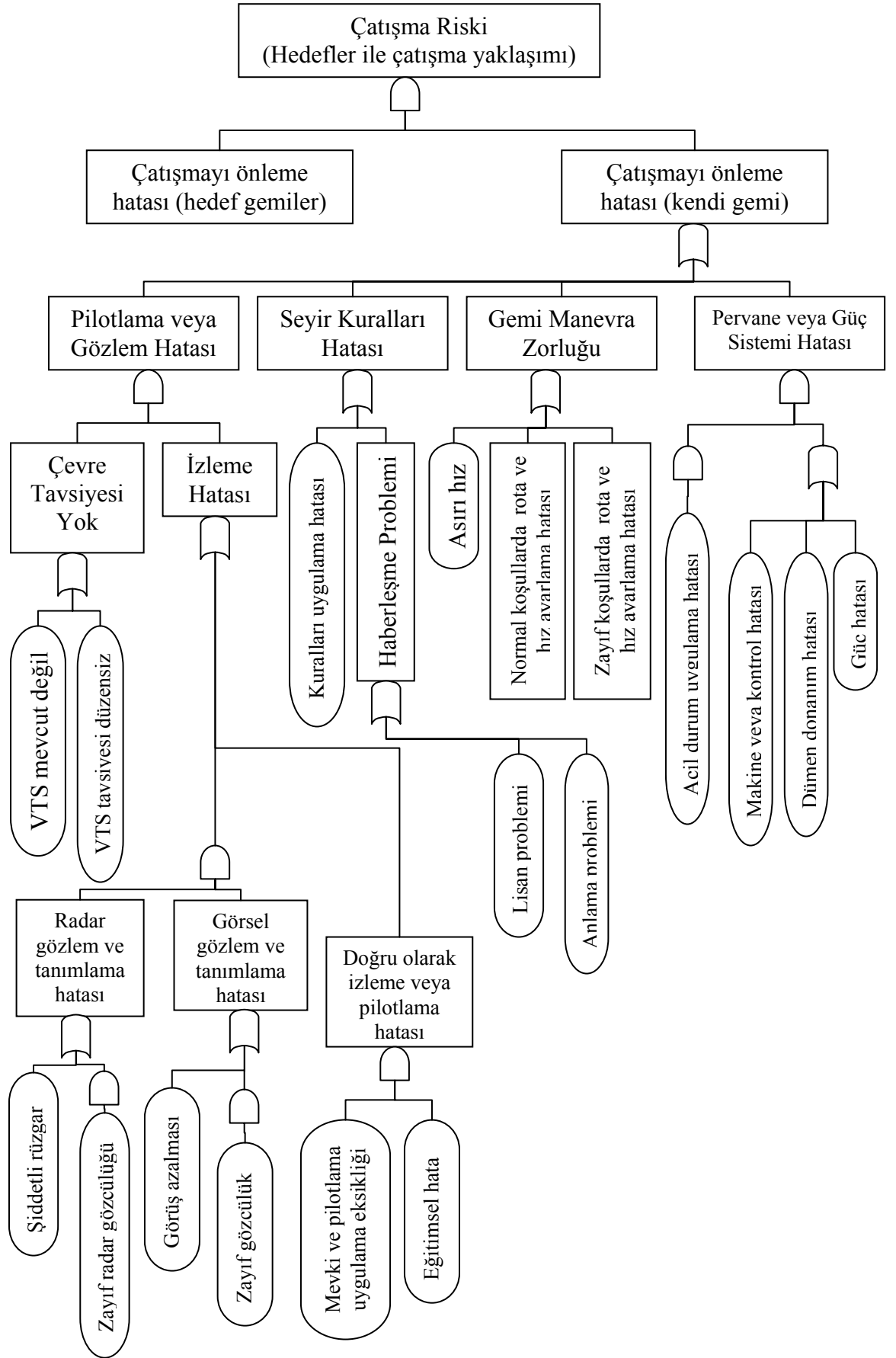
Tablo 6.9. Risk Kontrol Seçeneklerinin Derecelendirilmesi

Derece	Risk Kontrol Seçeneğinin Derecelendirilmesi	
1	RCO 6	Geminin Planlı Bakım Tutum Sistemi içinde, dümen flap açılarının /menteşe/ cıvata/bağlantı sistemlerinin düzenli kontrollerinin ve bakımının yer alması
2	RCO 2	Tasarım için yeni prosedürlerin (hesaplamalar da dahil) geliştirilmesi
3	RCO 7	Flap dümen için rehberlik verici özel sürveylerin geliştirilmesi
4	RCO 4	Karina sürveylerinde tüm flap menteşe açıları ve mil/tekne/bağlantı halkalarının temizlik ölçümlerinin yapılması
5	RCO 1	Flap dümen bileşenlerinde geleneksel dümen sistemindeki aynı materyalin kullanılması
6	RCO 5	Mil bağlantısı ve üst menteşenin yıllık gözden geçirilmesi, ilk periyodik yenileme sürveyi ve ara düzenli denetimler ve ilk yenileme sonrasındaki yenileme sürveyleri
7	RCO 3	Elektrik devresi ile flap dümen açısının izlenmesi ve/veya gösterilmesi

Yapılan modelleme sonucunda FSA yaklaşımının kısa vadede kuralların gelişimi açısından maliyetleri arttırıcı olduğu, fakat uzun zamana yayıldığında endüstriyi kurtarıcı etkiye bulunduğu tespit edilmiştir.

6.2 SEYİR SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Tanker kazalarından kaynaklanan petrol kirliliğinin temelini çatışma ve karaya oturma oluşturmaktadır. Örneğin; 1987-1991 tanker kayıplarının %20’si karaya oturmadan kaynaklanmaktadır [40]. Şekil 6.4’de çatışma hata ağacı gösterilmektedir. Gemi çatışmasının ana faktörünü insan hatası teşkil etmektedir.



Şekil 6.4: Çatışma Olasılık Hata Ağacı

Geminin karaya oturması iki şekilde olabilir; geminin kendi gücü ile karaya oturması veya sürüklenme neticesinde karaya oturmasıdır.

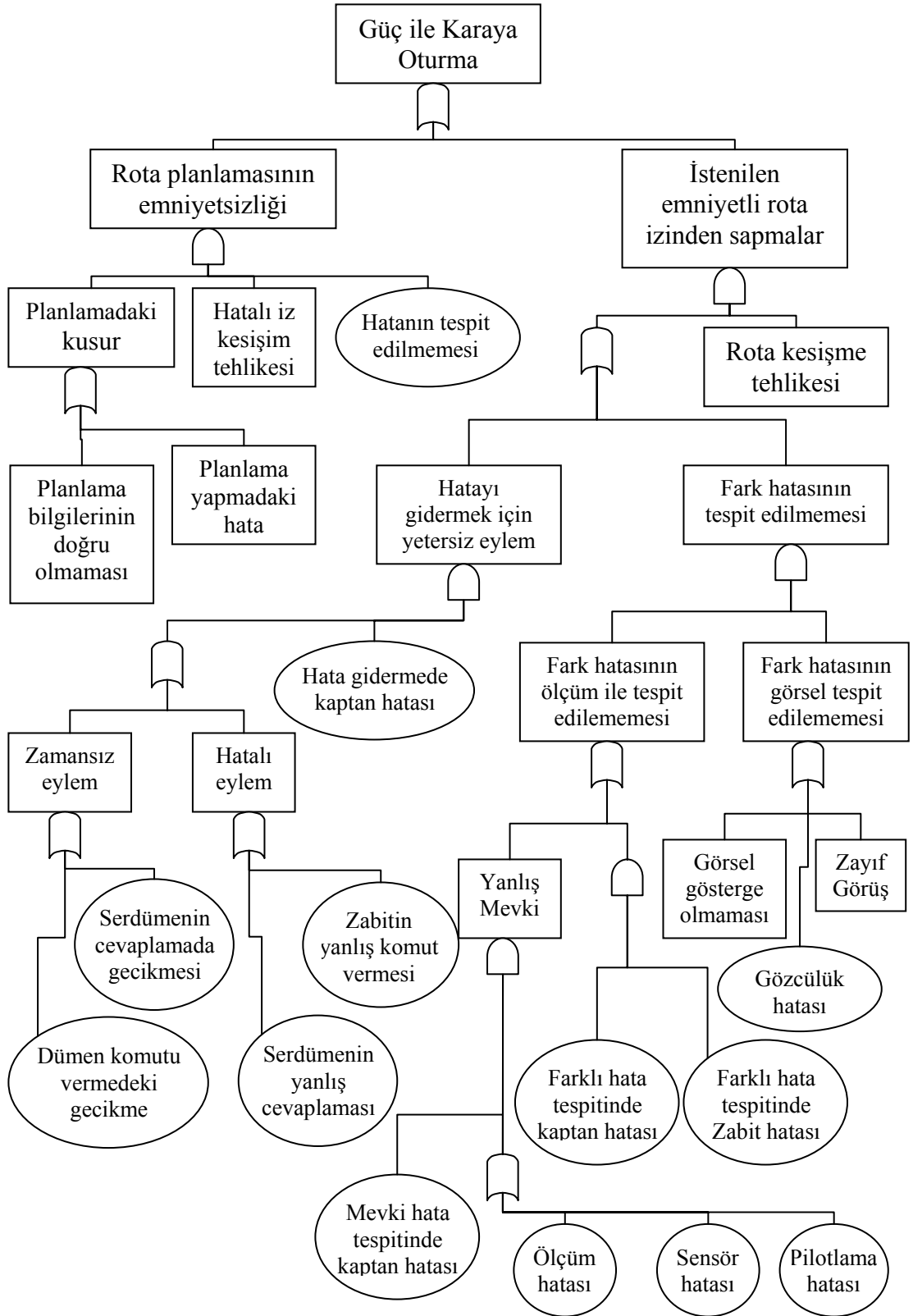
6.2.1 Güç ile Karaya Oturma

Şekil 6.5’deki güç ile karaya oturma hata ağacında gösterildiği üzere, güç ile karaya oturmanın ana nedeni seyir planlamasında ve pilotlamada yapılan hatalardır. Pilotlamadaki hatalar su yollarının karakteristiğinden ve rota izindeki zamanlama hatasından kaynaklanmaktadır.

Karaya oturma ile ilgili yapılan analizde olay ağaçları, hata ağaçlarında tanımlanan hata olasılıklarının hesaplanması için kullanılmıştır. Her bir hata olayının oluşum sürecine neden olan ana olayların sıralanması ile olay ağaçları geliştirilmiştir. Eğer olaylar insan eylemleri ile ilgili ise insan hata olasılıklarının hesaplanmasında **Swian (1983)** kaynağından yararlanılmıştır [41]. Tablo 6.10’de ilgilenilen veri hesaplanması için, bu veriyle benzeşen nükleer güç ile ilgili görevleri ve olasılıkları gösterilmektedir.

Tablo 6.10. Seyir Planlaması için İnsan Hata Olasılıkları

Denicilik Görevleri	Benzeşen Nükleer Güç ile ilgili Görevler	İnsan Hata Olasılıkları
Haritadaki değişimlerin düzenli kontrolleri	Koşulları işaretlemeden (kontrol etmeden) prosedürleri uygulama	0.003
Değişimlerin işlenmesi	Koşulları işaretleyerek prosedürleri uygulama	0.001
Rota dönüşlerinin hesaplanması	Prosedürel bir olgunun yanlış yazılması	0.003
Çizilen rotanın izlenmesi	Basit hesaplama gerektiren prosedürler	0.01
Yanlış izlemenin tespit edilmesi	Çizelge kayıtlarının kontrol edilmesi	0.002
Kaptanın onaylaması	Elle (manuel) kontrol etme biçimi	0.02



Şekil 6.5: Güç ile Karaya Oturma Hata Ağacı

6.2.1.1 Seyir Planlaması

Seyir planlaması analizi için şekil 6.6’de gösterilen olay ağacı kullanılmaktadır. Seyirci, emniyetli ve verimli seyir sağlamak için bir çok bilgi kaynağına sahiptir.

Örneğin sadece bir haritanın tam doğru seyir bilgilerini sağladığının doğrulanması için çok çeşitli yayınların kontrol edilmesi gerekir. Bu sebeple seyir ile ilgili düzenli gelen yayınların ilgili yerlere işlenmesi gerek kurallar nezdinde gerekse seyir için bir zorunluluktur. Bu süreç bazen zaman kısıtlamasından bazen de can sıkıntısından dolayı sekteye uğrar. Bu görev uygulanmasındaki insan hata olasılığının hesaplanmasında “Doğru Yazılan Prosedürlerde Hata Olasılıklarının Tahmini” tablosundan faydalanılır [41]. Düzenli gelen seyir uyarı ve mesajlarının kontrol edilmesindeki insan hatası nükleer güç ile ilgili koşulları işaretlemekten prosedürleri uygulama ile benzeştiği varsayılmaktadır.

Harita ve seyir yayınlarına düzeltmelerin işlenmesi ve diğer görevler için insan hata olasılığı aynı şekilde tespit edilir. Seçilen olasılıklar neticesinde seyir planlamasındaki hatanın meydana gelme olasılığı $7,0049 \cdot 10^{-5}$ olarak hesaplanır.

6.2.1.2 Planlama Bilgisi

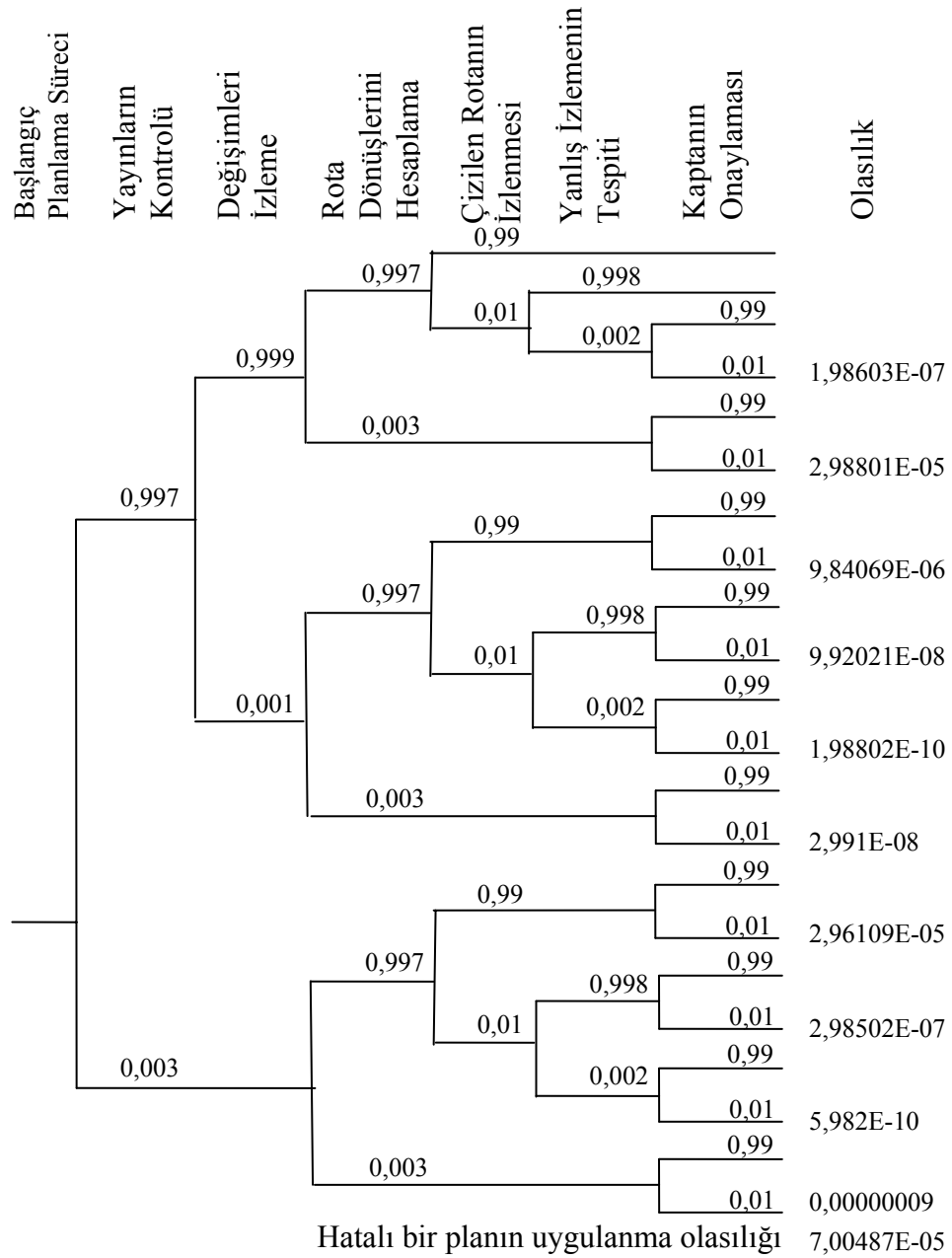
Seyir planlaması ve bu planlama sonucunda izlenecek rotanın takibi açısından öngörülen çevresel şartların gerçek çevre ile uyumda olması büyük önem arz etmektedir. Eğer su yolları ve seyir alametleri gibi çevresel şartlarda seyirciye ulaşan bilgide hata (örneğin; kanalın markalanmamış olması, su yolundaki tehlikelerin markalanmaması, yeterli hava bilgisinin ulaştırılmaması ve/veya markalamaların yanlış mevkide bulunması) var ise buda seyircinin rotayı izlemesinde bir hataya neden olabilmektedir. **Amrozowicz (1997)**'nin belirttiği üzere yanlış seyir bilgisinden dolayı, Amerika su yollarında 1980-1991 yılları arasında 1874 gemi (bunların 298 tanesi tanker) karaya oturmuştur [42].

6.2.1.3 Pilotlama

Pilotlama olay ağacında başlangıç olayı, planlanan rotada meydana gelen sapmalardır. Gerçek rotadaki değişimi izleyen olaylar aşağıda sıralanmaktadır;

1. Gerçekleşen (gerçek) rotanın, planlanan rotada değişimlere neden olması. Bu başlangıç olayıdır ve sonuç olasılıkları, başlangıç değişimlerine koşullu olarak bağlıdır.
2. Planlanan rota ile gerçek rota arasında bir fark hatası üretilmesi. Sapmayı tespit etmek mümkündür, bunun için gemi üstü sensörler veya bilgi verici sistemler kullanılabilir.

3. Sabit bir mevkiinin alınması ve haritaya pilotlanması.
4. Fark hatasının tespit edilmesi. Sabit mevki pilotlandıktan sonra tasarlanan mevki ile gerçek mevki arasındaki farkın belirlenmesi.
5. Bir düzeltme rota komutunun verilmesi. Geminin planlanan rotaya geçmesi için uygun dümen kumandasının verilmesi.
6. Dümenin komutu doğru yanıtlaması.



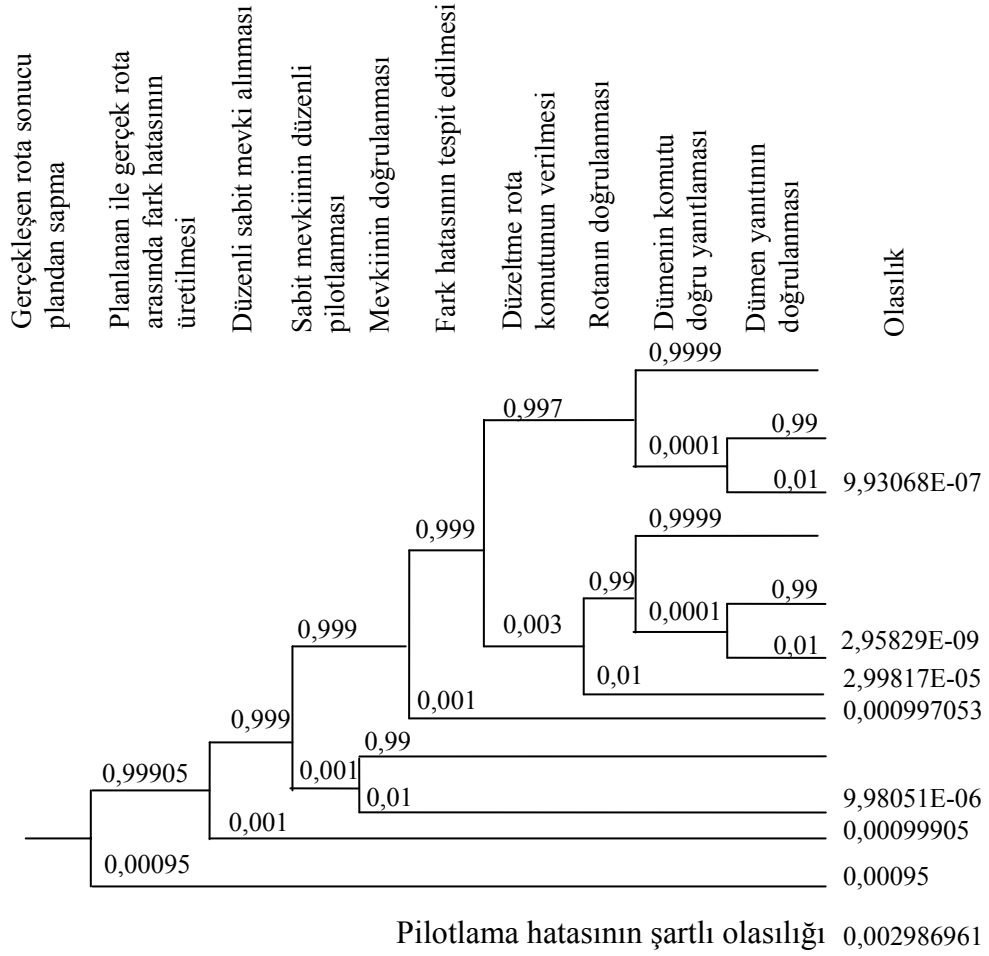
Şekil 6.6: Seyir Planlaması Olay Ağacı

Sabit mevkiinin belirlenmesi için en az iki radar mevki hattının alınması gereklidir. Burada radar kullanımının doğruluğu ve güvenilirliği önemlidir. Seyircinin aldığı referansları doğru okuması ve bunları haritaya doğru işlemesi sonucunda sabit mevki elde edilir ve böylece geminin planlanan rotada seyir edip etmediği (pilotlanmış mevkiilerin kabul edilebilir sınırlar dahilinde olması) değerlendirilir. Meydana gelmiş rota izindeki değişim için sorumlu vardiya zabiti uygun rota düzeltme komutunu verir. Serdümen kendisine verilen komutu derhal işleme sokar ve buda serdümenin komutu izlemesi, yeteneği ile doğru orantılıdır ve prosedür yeni komuta kadar devam eder. Yeni bir düzeltme ile bu döngü tüm seyir boyunca devam etmektedir. Şekil 6.7’de bu sürecin hata ağacı gösterilmektedir. İnsan hata olasılıklarının hesaplanmasındaki nükleer güç ile benzeşen görevler tablo 6.11’de gösterilmektedir. Buna göre birinci zabıt ve sorumlu zabitin doğrulaması sonucu oluşacak pilotlama hatası $2.98 \cdot 10^{-3}$ olarak tespit edilir. Unutulmamalıdır ki, geminin seyir emniyetinde kaptanın sorumluluğu bakidir. Bu sebepten dolayıdır ki, pilotlama sürecinde kaptan aktif rol oynar. Kaptanın yapacağı kontroller sonucundaki pilotlama hatasının olasılığı $1.95 \cdot 10^{-3}$ olarak bulunur.

Tablo 6.11. Pilotlama Hataları için İnsan Hata Olasılıkları

Denicilik Görevleri	Benzeşen Nükleer Güç ile ilgili Görevler	İnsan Hata Olasılıkları
Radar referanslarının okunması	Dijital bir göstergenin okunması	0.001
Pilotlama aralıkları	Kayıtların okunması	0.001
Mevkiinin doğrulanması	Kontrolün manuel yapılması	0.01
Planlanan ve gerçek rota arasındaki fark hatasının tespit edilmesi	Sınırlar dahilinde okuma kontrollerinin yapılması	0.001
Rota değişimi için komut verilmesi	Eylemde pasif olamayan görev hatası	0.003
Rotayı doğrulama	Kontrolün manuel yapılması	0.01
Dümen komutunun yanıtlanması	Sözlü verilen iki maddenin hatırlanma hatası	0.003
Dümen yanıtının doğrulanması	Kontrolün manuel yapılması	0.01

Pilotlama olay ağacı köprüüstünde her bir vardiya zabtinin yapacağı kontrolün önemini göstermektedir. Değişik görev seviyelerine göre bu kontroller sonucunda ortaya çıkacak pilotlama hata olasılıkları tablo 6.12’de gösterilmektedir.



Şekil 6.7: Pilotlama Olay Ağacı

Tablo 6.12. Farklı Kontrol Seviyelerine Göre Pilotlama Hata Olasılıkları

Kontrol Seviyesi	Hata Olasılığı
Yok	$1.38 \cdot 10^{-2}$
Birinci Zabit ve Sorumlu Zabit	$2.98 \cdot 10^{-3}$
Birinci Zabit, Sorumlu Zabit ve Kaptan	$1.95 \cdot 10^{-3}$

Tablo 6.12'ye göre ilave yapılacak doğrulamalar hata olasılığını azaltmaktadır. Bu kontrollerde kaptanın rolü %30'dur. Güç ile karaya oturma olayının performansı, gemi zabitanın ve personelinin performansına bağlıdır. Gemi zabitanın performansı; mevki ölçümü ve bulunması, pilotlama, komut verme ve komut vermedeki gecikmeler olarak tanımlanır. Gemi personelinin performansı ise; komuta yanlış cevabın verilmesi ve cevaplamadaki gecikmeler şeklindedir.

Güç ile karaya oturma olasılığının Boolean eşitliği ile açıklanması ise aşağıdaki gibidir;

$$\Pr(\text{Güç ile karaya oturma}) = \Pr(\text{Seyir planlama hatası}) + \Pr(\text{Planlama bilgi hatası}) + \Pr(\text{Pilotlama hatası}) \quad (6.1)$$

6.2.2 Sürüklenme ile Karaya Oturma

Şekil 6.8’de geminin sürüklenme ile karaya oturma hata ağacı gösterilmektedir. Geminin planlanan emniyetli rotayı izleyememesi sonucunda sürüklenme ile karaya oturma olayı gerçekleşir. Bunun için dört etmeninde eş zamanlı olarak meydana gelmesi gerekmektedir:

1. Emniyetsiz rüzgar veya akıntı,
2. Yardım hatası,
3. Demirleme hatası ve
4. Dümen kullanımının kaybedilmesi.

Sürüklenme ile karaya oturma etmenleri birbirlerinden bağımsız parametreler olduğundan dolayı sürüklenme ile karaya oturma olasılığı aşağıdaki gibi hesaplanır:

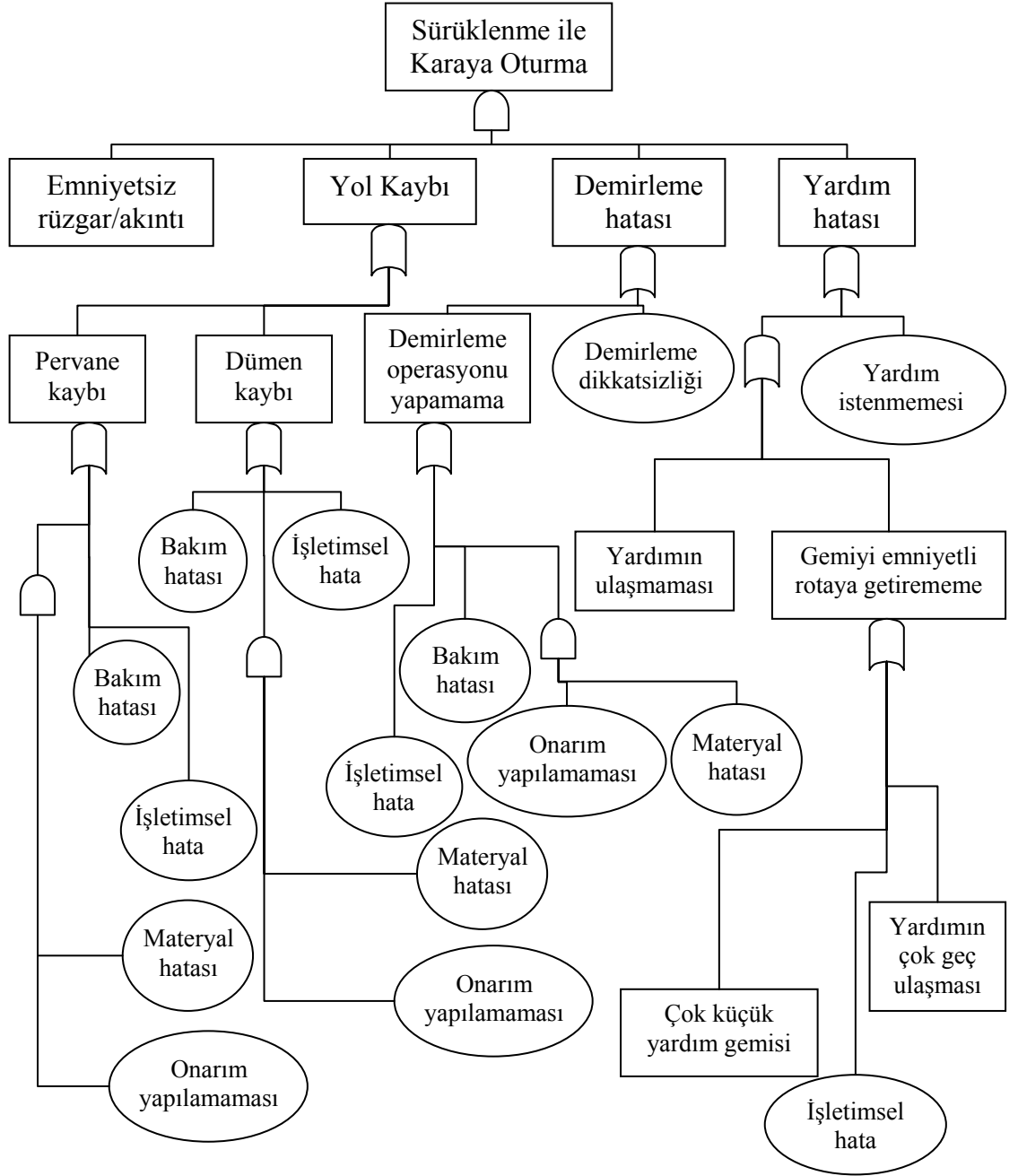
$$Pr_{(\text{Sürüklenme ile karaya oturma})} = Pr_{(\text{Emniyetsiz rüzgar/akıntı})} \cdot Pr_{(\text{Yol kaybı})} \cdot Pr_{(\text{Demirleme hatası})} \cdot Pr_{(\text{Yardım hatası})} \quad (6.2)$$

Rüzgar ve akıntının değerlendirmesinde o bölgedeki hakim rüzgar ve akıntı bilgilerinden yararlanılır, bu bilgiler ilgilenilen alana bağlı olarak farklılık gösterir. Rüzgar ve akıntı etkisi ile gemi sığınak alanlara doğru sürüklenir. Sürüklenmede direk etkiye sahip olduğundan, çoğu zaman rüzgar ve akıntı olasılıkları “1.0” olarak kabul edilmektedir [42].

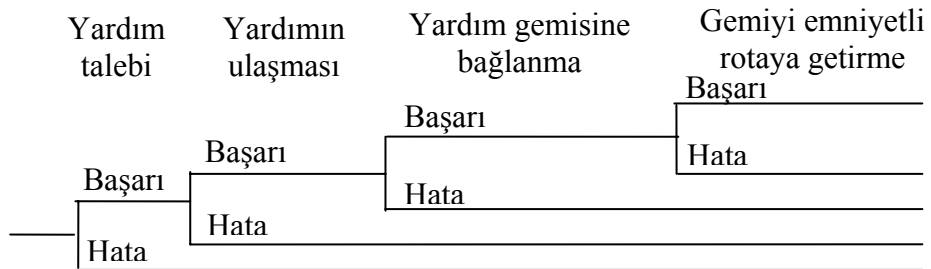
Kurtarma ve yardımda oluşabilecek hata, bunu gerçekleştirecek römorkörün temel özelliklerine ve yeteneğine bağlıdır. Yardıma gerek duyan bir gemi için ana olay ağacı şekil 6.9’de gösterildiği gibidir. Potansiyel olarak yardım hatasının temelini yardım talebinin zamanında yapılmaması oluşturmaktadır. Köprüüstü ekibi yardım gereğini anladığında, gerilim seviyesi en yüksek safhaya gelmektedir.

Tanker gemileri genelde iki demire sahiptir. Demirlerin ağırlıkları gemi tonajına göre değişmektedir. Geminin deniz dibi ile temasını sağlamada demirin kendi yapısının haricinde deniz dibine serilen demir zincir baklasının açısı ve uzunluğu da etkilidir. Demirleme yaparken gemi üstünde belirli bir hız olması (atalet nedeniyle), demirleme sistemini etkilemekte ve zorlamaktadır. Demirleme hataları ile ilgili yeterli veri bulunmamaktadır. Fakat demir taraması ve demir yapısından kaynaklanan kazalar incelendiğinde, demir hatasının yönetsel kontrol ile ilgili olduğu görülmektedir. İdare yapısı, operatörün doğru karar vermesini, politika ve prosedürleri izlemesini sağlamalıdır. Demirleme operasyonu gerilim gerektiren bir işlemdir ve yüksek stres seviyesinde olduğundan insan hata olasılık değeri 0.25’dir.

Demir hata olasılığında insan hatası hakim olduğundan, demir hatası olarak insan hatasının değeri kabul edilebilir.



Şekil 6.8: Sürüklenme ile Karaya Oturma Hata Ağacı



Şekil 6.9: Gemi Yardım Olay Ağacı

Bir geminin yol kaybı iki kategoride incelenebilir: gemi güç sisteminin kaybedilmesi ve gemi dümen sisteminin kaybedilmesi. Bu iki sisteminde hataya uğramasında yine insan hatası önemli etkiye sahiptir. Yol kaybı hata olasılığının bulunması için belirlenen zaman diliminde gerçekleşmiş yol kaybindan dolayı kaza değerleri elde edilir. Toplam kaza değeri, gemi sayısına bölündüğünde yol kaybı hata oranı elde edilir. Fakat bu oran, zamana ve gemi sayısına bağlıdır. Gemilerin gitmesi gereken yaklaşık seyir mesafe hesaplanır ve toplam hata olasılıklarına bölünür ise mesafeye dayalı kaza olasılığı elde edilir. Mesafe, geminin seyir süresi ve hızının çarpımına eşit olacağından, elde edilen kaza olasılığı hız zaman cinsinden ifade edilebilir. Örneğin; **Amrozowicz (1997)**'nin Valdez, San Francisco Koyu ve New Orleans alanındaki tanker yol kayıp kazalarına göre yol kaybı hata olasılığını $4.5 \cdot 10^{-6}$ olarak saptamıştır. Yol kaybı için bu değeri ele alırsak, olasılık değerleri tablo 6.13'deki gibi elde edilir.

Tablo 6.13. Karaya Oturma Olasılıkları (t = ilerleme zamanı, s = gemi hızı)

Güç ile Karaya Oturma	
Seyir Planlaması Hatası	$7.005 \cdot 10^{-5}$
Planlama Bilgisi Hatası	$1.0 \cdot 10^{-4}$
Pilotlama Hatası	$1.95 \cdot 10^{-4} t$
Sürüklenme ile Karaya Oturma	
Yeterli rüzgar/akıntı	1
Yardım Hatası	0,25
Demirleme Hatası	0,25
Yol kaybı	$4.5 \cdot 10^{-6} st$

Geminin karaya oturması; geminin kendi gücü ile karaya oturması veya sürüklenme neticesinde karaya oturma şeklinde olmaktadır. Buna göre karaya oturma olasılığı denklem (6.1) ve (6.2) yardımı ile aşağıdaki gibi elde ederiz;

$$Pr_{(Karaya\ oturma)} = Pr_{(Güç\ ile\ karaya\ oturma)} + Pr_{(Sürüklenme\ ile\ karaya\ oturma)} \quad (6.3)$$

Tablo 6.13'deki değerleri denklem (6.3)'e uygular isek;

$$Pr_{(Karaya\ oturma)} = [7.005 \cdot 10^{-5} + 1.0 \cdot 10^{-4} + 1.95 \cdot 10^{-4} (t)] + [1.0 \cdot 0.25 \cdot 4.5 \cdot 10^{-6} (st)]$$

$$Pr_{(Karaya\ oturma)} = 1.7 \cdot 10^{-4} + 1.95 \cdot 10^{-4} (t) \text{ olarak elde edilir.}$$

7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Risk analizi yapmak isteyen bir kullanıcı için; Petrol Tankerlerinde Risk Değerlendirmesi çalışmasından nasıl ve ne şekilde faydalanacağı aşağıdaki izleniş ile açıklanmaktadır ve istediğı alanlara kolaylıca uygulayabileceğı gösterilmektedir.

1. Yapılacak risk değerlendirmesi için öncelikle hedef tanımlaması yapılır. Bu amaç için hedef çok geniş tutulmamalıdır, örneğın; “geminin maruz kalacağı veya mevcut riskleri bulmak istiyorum” gibi. Bunun yerine daha özel hedefler koyarak genel hedefe ulaşma amaçlanmalıdır. Örneğın; gemi güvenlik sisteminin riskleri, can kurtarma teçhizatlarının oluşturduğu riskler veya gemi üzerinde verilen eğitimlerin gemi emniyeti ve güvenliğinde oluşturduğu riskler gibi.

2. Hedefin gerçekleşmesinde yer alacak sistem, alt sistemler ve bileşenler tanımlanır. Çalışma alanının sınırlarını çizebilmek için incelenecek sistemin özellikleri ve fonksiyonları hakkında yeterli bilgi ortaya konulmalıdır. Böylece gerçekleştirilmesi tasarlanan risk değerlendirmesinin hangi şartlara bağı olduğu tespit edilir ve ihtiyaç halinde bir ileriki analizlerde benzeşme veya tahminleme ile diğer konulara uygulanması sağlanır.

3. Tanımlanan hedefe ulaşmak için kullanılacak metot ve yöntemler genel şekli ile belirlenir; “bu sistemdeki durumların değerlendirmesinde hata/güvenilirlik/başarı kavramından faydalanılacak, böylece hedeflenen sistemin toplam hatası/güvenilirliği/başarısı ile riskleri tespit edilecektir.” Metot ve yöntemlerin genel şekli ile belirlenmesi için ya karşılaşılan veya karşılaşılabilecek problemlerin yada faydaların hangisinin seçileceğine karar verilmiş olunur. Kararın verilmesinde dikkate alınması gereken konular Bölüm 4’de ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Daha sonraki adımlarda yapılacak çalışmada “ağırlık sayısal/sayısal olmayan yöntemlere verilecektir” gibi kararlara ulaşarak çalışmanın fiziksel boyutları da tasarlanmış olunur.

4. Üçüncü adıma uygun olan problem tanımlanır ve bunların oluşması sonucu karşılaşılabilecek tehlikelerin tanımlaması yapılır.

5. Bu bölüme kadar olanlar düzenli bir biçimde evrak veya yazılı hale getirilir. Bu safhada kısa bir değerlendirme yapılarak çalışmada, ortaya çıkan problem veya başarılar için bu konu ile ilgili daha önce yapılmış genel geçer önlemler/prosedürler/yönetim şekilleri veya uzman kişi görüşleri dikkate alınarak sadeleşme sağlanabilir. Değerlendirme sonucu ortaya çıkan hususlar için doğrudan sonuca erişilebilir ve böylece bunları çalışma dışında tutarak bazı sadeleştirmeler sağlanmış olunur. Hatta bir sonraki adıma yardımcı olması açısından ara basamak olarak sistem (ve bileşenleri) için risk profilleri oluşturulması kullanıcıya büyük fayda sağlar.

6. Beşinci adımda çıkan sonuca uygun olarak ve üçüncü adım da dikkate alınarak, sistem için gereken, Bölüm 4'te anlatılan, ağaç yaklaşımları belirlenir. Çoğunlukla risk değerlendirmesi yapmak isteyenler öncelikle bu ağaç yaklaşımlarını veya benzer risk analiz metotlarını (Bölüm 1.6) doğrudan uygulamak isterler. Fakat, bu acelecilik sistemin tam anlaşılmasına, önemli noktalarda eksik işlev veya yapı taşlarının unutulmasına neden olur. Zaten bu adıma kadar anlatılanların gerçekleştirilmesi ile sistemin genel akış diyagramları kendiliğinden ortaya çıkmaktadır. Yapılması gereken bunları ilgili birimler ile ilişkilendirmek ve aralarındaki ilişkilerin uygun kapı veya semboller ile gösterilmesidir.

Burada şu önemli noktanın unutulmaması gerekir; başlangıçta belirlenen tüm birimlerin sisteme yerleştirilmesi ve aralarında var olan ilişkinin etki diyagramları ile oluşturulması. Bunun için tüm sistemi tek bir diyagram ile göstermekten kaçınılmalı hatta mümkün olduğunca ayrı parçalara bölmeli, gerekli ise sadece bir ağaç yaklaşımı yerine diğerlerine de yer verilmelidir. Bazı bölümler hata ağaçları ile açıklanırken, işlevler için olay ağaçlarının ve etkileşimleri için mantık veya etki diyagramlarının kullanılması gerekebilir. Seçimlerin nasıl yapılacağı ve bunların nasıl uygulanacağı hususu Bölüm 4'te ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır.

7. Altıncı adımda oluşturulan yaklaşımlardaki her birim veya işlev için olasılıklar (hedefe uygun olan olasılıklar; örneğin, hata olasılıkları veya güvenilirlikleri) tespit edilir ve yerlerine konulur.

Buradaki önemli sorun bu olasılıklara (veriye) ulaşabilmektir; bu sebep ile tezde konu uygulama alanı ve örnekler, diğer gemi tiplerine nazaran daha erişilebilir ve elverişli veri sağlanmasından dolayı Tanker gemilerinden seçilmiştir. Olasılık bilgileri için Bölüm 2'de tanımlanan olasılık kavram ve kuralları dikkate alınır. Eğer

elde mevcut veri var ise kullanılır, aksi halde tahminlemeler veya deneysel (simülasyon) çalışmalar yapılarak veri elde edilmeye çalışılır. Hiç bir şekilde ulaşılamayan veri var ise bunun değer tespiti için bu işleme benzer diğer sektörlerdeki veya uygulamalardaki veri benzeştirmelerinden faydalanarak bir değer bulmaya çalışılır. Bunların yanı sıra kabul edilen yaklaşım tarzında bazı sapmalar yapılabilir. Örneğin; elde edilemeyen bu veri topluluğu için derecelendirme yapılarak, kendisine uygun değer (uzman görüşleri veya tecrübeler doğrultusunda) atanabilir.

8. Sistem için sonuçlar tespit edilir (bu basamak daha önceki bir adımda da, dördüncü adım, yapılabilir. Tehlikeye karşılık sonuç belirlenmesinin aynı zamanda yapılmasıdır). Tehlikenin ortaya çıkması sonucunda, farklı alanlara farklı biçimde oluşacak etkileri belirlenir. Özellikle can, mal ve çevre etkisi dikkate alınmalıdır. Bu etkiler çok yönlü ve birbiri ile sıkı etkileşim içinde olabilir; ekonomik, yaralanma veya hayati, işlevsel bozukluk ve ilişkili diğer birim performansına olumsuz etki, sembolik veya rahatsız edici etki gibi.

9. Yedinci adımda elde edilen toplam olabilirlik ile olayın oluşması ve etki sonuçları karşılaştırılır, böylece kararlaştırılan sistem için risk tespit edilmiş olunur. Burada sistem risklerinin gösterimi için farklı yollar olabilir, bunun için Bölüm 5'te bahsedilen risk gösterme metotları tercih edilebilir.

10. Bütün olarak sistem riski veya fonksiyonları için riskler gösterildikten sonra bunların kullanıcı için ne seviyede olduğu konusunda değerlendirme yapılır. Genel olarak riskin üç seviyesinde (kabul edilemez, kabul edilebilir ve önemsiz) değerlendirme gerçekleştirilir.

11. Bu adımda elde edilen risk seviyesine göre riskin azaltılması istendiği alanlar belirlenir ve her biri için uygun emniyet önlemleri (risk kontrol seçenekleri) tanımlanır. Kontrol alanlarının tespit edilmesinde Bölüm 5.1.3'te bahsedilen ALARP yaklaşımından faydalanılabilir.

Risk kontrol önlemleri, tespit edilen riskin azaltılması için tasarlanır iken bunların uygulama noktaları da dikkate alınmalıdır. Bazı önlemlerin erken uygulanması (örneğin; yakın tehlike oluşmadan sebebin önlenmesine ilişkin alınacak önlem) daha sonraki evrelerde gerek uygulamada, gerekse etki ve maliyetlerde farklılaşmayı getireceğinden tercih edilebilir. Risk kontrol önlemlerinin uygulanmasına ilişkin tehlike zinciri içindeki etkilerinin dikkate alınması tavsiye edilir.

Bir sonraki adıma geçmeden önce riskin azaltılmasında belirlenen alanlar ve önlemler için (özellikle şüphe veya belirsizlik söz konusu ise) yeni sistem için tekrar bir risk gösteriminin yapılması gereklidir.

12. Sistem (kararlaştırılan konu) için mevcut ve olası tüm riskler kullanıcının istediği seviyeye getirildikten sonra belirlenen önlem ve uygulamalar için fayda maliyet değerlendirilmesi yapılır. Unutulmamalıdır ki, maliyeti yüksek ve faydası az olan önlemler öncelikli tercih edilmeyen niteliktedirler. Bazı durumlarda da riskin mevcut olması diğer alanlarda fazlaca fayda getireceği için istenen bir hal olmaktadır. Zaten risk yönetimi ile yapılmak istenende budur. Risk kabul edilir, çünkü o riski doğuran sebebin (faaliyetin) oluşturacağı faydalardan yararlanılabilir. Bu sebeplerden dolayı amaç riski değerlendirmek ve yönetmek olacaktır.

13. Son adım olarak, buraya kadar yapılanların genel değerlendirmesi ve bunun sonucu ortaya çıkan tavsiyeler gerçekleştirilir. Tüm yapılan işlem ve değerlendirmeler doküman haline getirilir ve ileride yapılacak çalışmalara ve geriye dönük analizlerde rehber olması için muhafaza edilir.

Yukarıda risk yönetimi için risk değerlendirmesinin gerçekleştirilmesindeki adımlar, tezin faydasını arttırmak amacıyla ve daha anlaşılır olması için ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Konuyu özetleme ve bu derece ayrıntılı bir değerlendirme yapmak istemeyen kullanıcı açısından en yalın hali ile aşağıdaki gibi ifade edilir;

- Tehlikelerin tanımlanması yapılır.
- Tehlikelerin meydana gelmesi ile ortaya çıkacak sonuçlar tanımlanır
- Tehlikelerin olabilirliği ve sonuçların etkileri belirlenir.
- Olasılık ve etkiler karşılaştırılarak risk seviyeleri tespit edilir.
- Riskin istenmediği durumlar için azaltıcı veya önleyici tedbirler tanımlanır.
- Risk kontrol önlemlerinin (farklı alanlar ile birlikte) uygulanması sonucu kabul edilebilirlikleri ortaya konulur.

Denizcilik sektöründe risk değerlendirmesi yaparak kazançlarını arttırmayı hedefleyen kurum ve kuruluşların sayısı her geçen gün artmaktadır. Bunun yanı sıra denizcilik için yeni bir kavram olması (ve bundan sonra vazgeçilemeyecek bir konudur ki; IMO tarafından yapılan açıklamalarda bu yöndedir), konunun çoğunlukla taraflarca tam anlaşılmasına ve uygulama çalışmalarının az olmasına

neden olmaktadır. Sektörde denizcilik riskleri konusunda yeterli uzman yoktur. Bu sebepten dolayı, araştırmaların arttırılması, uzman desteklerinin alınarak her şirketin kendi organizasyonun içinde risk değerlendirmesine yer vermesi gerekmektedir. Böylece sektörel ve toplumsal anlayışta istenilen ilerleme sağlanabilir. Bu konu ile ilgili öneri; gemi işletmelerinde konu hakkında yeterli bilgiye sahip kişilerin “Risk Yöneticisi” olarak belirlenmesidir. Şu an için şirketlere ilave bir maliyet gibi gözükebilir, fakat uzun vadede büyük fayda sağlayacaktır. Hali hazırda şirket organizasyonları içinde acil durumlar için kriz ve kalabalık yönetimi gibi birimler mevcuttur. Genelde bu birimlerin yönetiminden sorumlu olan kişilerin, başka birimlerde sorumlulukları da bulunmaktadır. Örneğin; şirketin genel müdürü, hem Uluslararası Emniyet Yönetimi için Atanan Kişi hem de Şirket Güvenlik Sorumlusu gibi görevleri yapmakta ve acil durumda da yönetim koordinatörlüğünü sağlamaktadır. Risk Yöneticisi’nin temel hedefi muhtemel kazaların azaltılması olduğundan, zaten önceden sistem için özellikle sonuçları istenmeyen nitelikteki acil durumlar için riskleri ortaya koyduğundan, bunun peşi sıra gelecek yönetimde de etkili olması gerektiği açıktır. Fakat şu yanlış anlamayı da engellemek gerekir; risk yönetimi sadece kaza, deniz kirliliği v.b. acil durumlar için gerçekleştirilmemeli bunun yanı sıra şirketin diğer rutin işlevleri için de gerçekleştirilmelidir.

Teknolojinin ilerlemesine bağlı olarak kazaların azalması ve bunun sonucu yaşam kayıplarının azalması beklenmektedir. Fakat aksine hayat kayıpları ve çevresel zararlar önemli derecede devam etmektedir. Denizcilik sektöründe kazaların %60’nın insan hatasından kaynaklandığı istatistiki bilgi olarak elde edilmiş ve teknolojinin bu ilerlemesi ile bu oran %80’e ulaşmıştır. Buna neden olan temel faktörler;

1. Gemi tasarım, bakım-tutum, operasyon ve yönetiminde önemli bir etkiye sahip olan organizasyon eksikliği.
2. Uluslararası standartlara, kurallara ve prosedürlere uyum, insan hatasının engellenmesindeki her ihtimal için yeterli olamaması.
3. Gemi personeli arasındaki sosyolojik ilişkiler ve gemide çalışma şartları; teçhizat, haberleşme sistemleri, eğitim, dokümantasyon ve emniyet yönetimini de içeren çevresel koşulların oluşturduğu kavramsal kargaşa.
4. Operatörlerin günlük görevleri esnasında tehlikeyi önleyici temel unsur olmaları ve ortaya çıkabilecek acil veya beklenmeyen durumlar için emniyet yönetiminin teminini sağlamaları.

5. Teknolojinin ilerlemesine duyulan aşırı güven ve bunun sonucunda personel istihdamında azaltmaya gidilmesi (gemi adamı sayısının düşürülmesi).

Bu derece ilerlemeler karşısında halen denizcilikte yaşanan ve yaşanması muhtemel tehlikelerin varolmasını şu şekilde açıklayabiliriz. Önceden de belirttiğimiz gibi temel hedefimiz riski sıfırlamak değil, bunları kabul edilebilir seviyeye getirmektir. Bu seviye dahilinde ana kontrolün insanda olması bir anda beklentilerin ve sonuçların hızlı değişimine neden olmaktadır. Burada bu denli öneme sahip kontrol mekanizmasının, tek kontrolünün de yine insan olmasıdır.

İnsan hatasının azaltılmasındaki en önemli aracın “eğitim” olduğu en temel gerçektir. Bunun yanı sıra insana dayalı yönetim sisteminin geliştirilmesi gerekmektedir. İnsan yönetiminde eğitim kalitesi en önemli faktördür. Bu sebepler neticesinde şirketlerin işletme programlarında veya gemi işletmeciliği maliyetlerinde eğitim yer almaktadır.

Artan dünya deniz ticaret filosu, her ne kadar yeni yapılan gemiler daha az personele ihtiyaç duysa da, beraberinde aynı oranda kalifiye personel ihtiyacı doğurmaktadır. Bugün gemilerde, özellikle tankerlerde en büyük sorun yetişmiş personel açığıdır. Tankerde çalışacak personele düşen iş yükü diğer gemilere göre fazladır, dolayısıyla personelin hata yapma riskini arttırmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Hunt, R., and Modarres, M.**, 1985. A Use of Goal Tree Methodology to Evaluate Institutional Practices and Their Effect on Power Plant Hardware Performance, American Nuclear Society Topical Meeting on *Probabilistic Safety Methods and Applications*, San Francisco.
- [2] **Ayyub, B. M., Beach, J. E., Sarkani, S., Assakkaf, İ. A.**, 2002. Risk Analysis and Management for Marine Systems, *Naval Engineers Journal*, pp. 181-206.
- [3] **Modarres, M., Kaminsky, M. and Krivtsov, V.**, 1999. Reliability Engineering and Risk Analysis, Marcel Dekker Press, New York.
- [4] **Köksal, B. A.**, 1985. İstatistik Analiz Metodları, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- [5] **Serper, Ö.**, 1980. İstatistik, Filiz Kitabevi, İstanbul.
- [6] **Castillo, E.**, 1988. Extreme Value Theory in Engineering, Academy Press, San Diego, CA.
- [7] **Fisher, R. A. and Tippet, L. H. C.**, 1928. Limiting Forms of the Frequency Distributions of the Largest or Smallest Member of a Sample, Proc. Cambridge Philos. Soc., 24, pp. 180-190.
- [8] **Frechet, M.**, 1927. Sur la loi de probabilité de l'écart maximum, *Ann. Soc. Polon. Math*, Cracow, 6, p. 93.
- [9] **Gnedenko, B. V.**, 1941. Limit Theorems for the Maximal Term of a Variational Series, Comptes Rendus de l'Academia des Sciences de l'URSS, 32, pp. 7-9.
- [10] **Nelson, W.**, 1982. Applied Life Data Analysis, John Wiley and Sons, New York.
- [11] **Blom, G.**, 1958. Statistical Estimates and Transformed beta Variables, John Wiley and Sons, New York.
- [12] **Kapur, K. C. and Lamberson, L. R.**, 1977. Reliability in Engineering Design, John Wiley and Sons, New York, NY.

- [13] **Barlow, R. E.**, 1978. Analysis of Retrospective Failure Data using Computer Graphics, *Proceedings of the 1978 Annual Reliability and Maintainability* , 113-116.
- [14] **Barlow, R. E. and Campo R. A.**, 1975. Total Time on Test Process and Applications to Failure Data Analysis, Reliability and Fault Tree Analysis, eds. Barlow, Fussel and Singpurwalla, *SIAM*, Philadelphia, pp. 451-481.
- [15] **Lawless, J. F.**, 1982. Statistical Models and Methods for Lifetime Data, John Wiley and Sons, New York.
- [16] **Epstein, B.**, 1960. Estimation from Life Test Data, *Technometrics*, 2, 447.
- [17] **Martz, H. F. and R. A. Waller**, 1982. Bayesian Reliability Analysis, John Wiley and Sons, New York.
- [18] **Crowder, M. J., Kimber, A. C., Smith, R. L., and Sweeting, T. J.**, 1991. Statistical Analysis of Reliability Data, Chapman & Hall, London, New York.
- [19] **Shooman, M. L.**, 1990. Probabilistic Reliability: An Engineering Approach, Kreiger, Melbourne, FL.
- [20] **Kristiansen, S.**, 2005. Maritime Transportation Safety Management and Risk Analysis, Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington.
- [21] **Hoyland, A., and Rausand, M.**, 1994. System Reliability Theory: Models and Statistical Methods, John Wiley and Sons, New York.
- [22] **Dezfuli, H.**, 1994. Application of REVEAL_W to Risk-based Configuration Control, *Reliability Engineering and System Safety J.*, 44(3).
- [23] **Bak, O. A.**, 1999. Denizcilik Sektöründe Risk Analizi ve Uluslararası Güvenlik Yönetim Kodu, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [24] **Eknes, M.L. and Kvien, M.**, 1999. Historical Risk Levels in the Maritime Industry, *DNV Report*, **99-2028**, Oslo.
- [25] **Lloyd's Register of Shipping**
- [26] www.imo.org
- [27] **Ayyub B. M., Beach J. E., Sarkani S., Assakkaf, I. A.**, 2002, Risk analysis and management for marine systems, *Naval Engineers Journal-Spring*, 114 (2), 181-206

- [28] **AEA**, 1995. MSA Project 388: Step Four Methodology “Cost-Benefit Assessment”, *Contract Draft Interim Report 1*, **388D2**, Hanscomb Air AEA Technology, Warrington, UK.
- [29] **RSS**, 1975. An Assessment of Accident Risk in US Commercial Nuclear Power Plants, WASH 1400 (NUREG 74/014), US Nuclear Regulatory Commission.
- [30] **Rasmussen, J.**, 1982. Human reliability in risk analysis, High Risk Safety Technology, John Wiley, Chichester.
- [31] **Madison, R. L.**, 1974. Human Factors in Destroyer Operations, *MSc Thesis, AD 775 011*, Naval Postgraduate School, Monterey.
- [32] **Jayle, G. E.**, 1959. Night Vision, Charles C. Thomas, Springfield, FL.
- [33] **Mackworth, N. H.**, 1946. Effects of Heat on Wireless Telegraphy Operators Hearing and Recording Morse Messages, *British Journal of Industrial Medicine*, Vol. 3, pp. 143-158.
- [34] **Wing, J. F.**, 1965. A Review of the Effective Ambient Temperature on Mental Performance, USAF, AMRL, TR 65-102.
- [35] **ISO-2631**, 1985. Guide to the Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration, *International Standardization Organization*.
- [36] **Stevens, A. D. and Parsons, M. G.**, 2002. Effects of Motion at Sea on Crew Performance, *Marine Technology*, Vol. 39 (1), pp. 29-47.
- [37] **NATO STANAG 4154**, 1997. Common Procedures for Seakeeping in the Ship Design Process, Chapter 7: Seakeeping Criteria for General Application.
- [38] **NORDFORSK**, 1987. Seakeeping Performance of Ships, Assessment of a Ship Performance in a Seaway, *The Nordic Cooperative Project*, Marintek, Trondheim.
- [39] **Kirwan, B.**, 1992. Human Error Identification in Human Reliability Assessment, Part 1 & Part 2, *Applied Ergonomics*, Vol. 23(6), 299-318, 371-381.
- [40] **Townsend R., Glazer M.**, 1994. Safe Passage: Preventing Oil Spills in our Marine Sanctuaries, Center for Marine Conservation, Inc., Pacific Region, San Francisco.
- [41] **Swain, A.D., Guttman, H.E.**, 1983. *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*, NUREG/CR-1278, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C..

- [42] **Amrozowicz, M., Brown, A.J., Golay, M.,** 1997. A Probabilistic Analysis of Tanker Groundings, 7th *International Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, Hawaii.
- [43] www.bimco.dk
- [44] **Andreassen, E., Kristoffersen, L., Spouge, J., Torhaug, R.,** 2001. Development of Classification Rules Using Formal Safety Assessment to Prevent Collision and Grounding, *DNV*, Oslo.
- [45] **Baş, M.,** 1999. Türk Boğazları'nda Risk Analizi ile Güvenli Seyir Modeli, *Doktora Tezi*, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [46] **Boydar, M.,** 2000. Risk Değerlendirilmesi, Ölçülmesi ve Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [47] **Brown, A., Tech, V.,** 2000. Optimum Risk Tanker, *A Systematic Approach to a TAPS Tanker Design*, Columbus, Ohio.
- [48] **Det Norske Veritas,** 2002. Marine Risk Assessment, *Offshore Technology Report, 2002-063*, London, UK.
- [49] **Ersarı, M. A.,** 1998. Risk Analysis and Cost Simulation of Coastal Project, *PhD Thesis*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [50] **Fukushima, H.,** 1976. Factors contributing to marine casualties, *Journal of Navigation*, Vol. 29(2), p. 135-140.
- [51] **Harilaos, N. P., George, P., Nicholas, D., Nicholas, V.,** 1998. An Analysis of Maritime Transportation Risk Factors, Department of Naval Architecture and Marine Engineering National Technical University of Athens, Greece, ISOPE-98-HKP-02.
- [52] **Harrauld, J. R., Mazzuchi, T. A., Spahn, J., Van Dorp, R., Merrick, J., Shrestha, S., Grabowski, M.,** 1998. Using System Simulation to Model the Impact of Human Error in a Maritime System, *Safety Science* 30 (1-2): 235-247.
- [53] **Judson, B.,** 1996. A Tanker Navigation Safety System, *Arctic Tanker Risk Analysis Project-3*, Geoinfo Solutions Ltd., Kanata, Ontario.
- [54] **İdil, O.,** 1988. Yönetimde İstatistik Teknikler ve Örnek Olaylar, Yön Ajans, İstanbul.
- [55] **Kimbal,** 1960. On the Choice of Plotting Position on Reliability Paper, *J. Amer. Stat. Assoc.* 55, pp. 546-560.

- [56] **Mert, Ö.**, 1995. Risk yönetimi, *Yüksek Lisans Tezi*, , İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [57] **Molak, V.**, 1997. Fundamentals of Risk Analysis and Risk Management, GAIA Unlimited, Lewis Publishers, Cincinnati, Ohio.
- [58] **Moralı, S.**, 1973. İstatistik Teorisine Giriş, *Çeviri*, Özarkadaş Matbaası, İstanbul.
- [59] **Moss, T. R. And Andrews, J. D.**, 2002. Reliability and Risk Assessment, Professional Engineering Publishing Limited, London.
- [60] **MSA**, 1995. Formal Safety Assessment: Draft Stage 1 Report, *Marine Safety Agencies, Project 366*, Southampton.
- [61] **Peacock, B., Hasting N., Evans, M.**, 2000. Statistical Distributions, John Wiley&Sons, Inc., New York.
- [62] **Soares, C. G.**, 1998. Risk and Reliability in Marine Technology, A. A. Balkema, Rotterdam.
- [63] **Soares, C. G., Teixeira, A. P.**, 2001. Reliability Engineering & System Safety 74 (3): 299-309. Balkema, Rotterdam.
- [64] **Vaughan, J. E.**, 1997. Risk Management, John Wiley&Sons, Inc., New York.
- [65] **Wilson, R. A.**, 1990. Environmental Risk: Identification and Management, Columbus, Ohio.
- [66] **Training**, 2005. Maritime Safety and Environmental Management: The Maritime Risk Assessment and Risk Analysis, *JICA-ITUMF Project*, Kobe University, Faculty of Maritime Sciences, Kobe, Japan.
- [67] **Ülengin, B.**, 2004. Kişisel görüşme.

ÖZGEÇMİŞ

18 Eylül 1979 yılında İstanbul'da doğdu. Lise öğretimini Küçükyalı Kadir Has Süper Lisesinde tamamladıktan sonra 1997 yılında İ.T.Ü Denizcilik Fakültesi Güverte Bölümü Lisans Eğitimine başladı. 2000-2001 Güz Yarıyılında lisans eğitimini Bölüm ve Fakülte birincisi olarak bitirmiştir. Çeşitli ticaret gemilerinde vardiya zabiti olarak görev aldıktan sonra İTÜ Denizcilik Fakültesi Güverte Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Görevi sırasında bir çok yurt içi ve yurt dışı eğitim programlarına ve konferanslarına katıldı. Ayrıca, çeşitli uluslararası makale ve bildirileri vardır.

Derslerde yardımcı öğretmenliğin yanı sıra, temel ve ileri denizcilik kurslarında öğretmenlik yapmaktadır. Denizcilik Emniyet ve Güvenlik Yönetiminde Risk Analizi ve Risk Değerlendirilmesi, Köprüüstü Simülatör Eğitimi ve Sıvılaştırılmış Gaz Taşıyıcıları konularında araştırma yapmaktadır. Halen İTÜ Denizcilik Fakültesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmakta ve aynı zamanda Fakülte eğitim gemilerinde zabıt olarak görevlerini sürdürmektedir. Evli ve bir kız çocuk babasıdır.