

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OLASILIKSAL METODLARLA YAPISAL VE
ÇATLAK İLERLEMESİ ANALİZLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Y. Müh. Bengüsu YALÇIN**

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KONSTRÜKSİYON MÜHENDİSLİĞİ

ŞUBAT 2005

**OLASILIKSAL METODLARLA YAPISAL VE
ÇATLAK İLERLEMESİ ANALİZLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Y. Müh. Bengüsu YALÇIN
(503011062)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 2 Mart 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Şubat 2005**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Ata MUĞAN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Alaeddin ARPACI (İ.T.Ü.)
Doç.Dr. Metin Orhan KAYA (İ.T.Ü)**

ŞUBAT 2005

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın amacı yapısal analiz ve yapıların güvenilirliği konusunda farklı bir yaklaşım olan olasılıksal metodolojinin uygulama esaslarını ve yöntemlerini açıklamak, uygulamalarla desteklemektir.

Bu tezi hazırlamamda, bana her konuda sabırla yardımcı olan ve değerli bilgisini benimle paylaşan danışmanım Sayın Doç.Dr. Ata Muğan'a, hiçbir konuda desteğini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

ŞUBAT 2005

Bengüsu Yalçın

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	
1.1. Mevcut Belirleyici Yapısal Tasarım Yaklaşımı	1
1.2 Farklı Bir Yaklaşım İhtiyacı	2
1.3 Olasılıksal Analiz Felsefesi	3
1.4 Genel Kavram	3
2. OLASILIKSAL TASARIMIN TARİHÇESİ	5
2.1 Olasılıksal Metodolojinin Gelişimi	5
2.2 Emniyet Faktörünün Tarihçesi	7
2.3 Havacılıkta Kabul Edilebilir Hasar Olasılığının Tarihsel Yönü	8
3. GENEL TEORİ VE YAKLAŞIM	12
3.1 Temel Yaklaşım	12
3.2 Olasılıksal Analizde Genel Aşamalar	13
3.3 Aşama 1- Potansiyel Hasar Şekillerinin Belirlenmesi	14
3.4 Aşama 2- Kabul Edilebilir Hasar Olasılığının Belirlenmesi	14
3.5 Aşama 3- Gerilme ve Mukavemet Modellerinin Geliştirilmesi	15
3.6 Aşama 4- Tasarım Değişkenlerinin İstatistiksel Olarak Nitelenmesi	15
3.6.1 Rastgele Değişkenin Tanımı	16
3.6.2 Sürekli Rastgele Değişkenler-Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF) ve İlişkili Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (CDF)	16
3.6.2.1 Normal Dağılım	18
3.6.2.2 Logaritmik Dağılım	19
3.6.2.3 Weibull Dağılımı	20
3.6.2.4 Beta Dağılımı	21
3.6.2.5 Uniform Dağılım	22
3.6.3 Süreksiz Rastgele Değişkenler ve Poisson Dağılımı	23
3.6.4 Malzeme Testi Numune Ebatları ve Kompozit Malzeme Özellikleri için Kabuller	24
3.7 Aşama 5- Yapısal Güvenilirliğin Değerlendirilmesi	26
3.7.1 Tek Değişkenli Hasar Olasılığının Belirlenmesi	28
3.7.2 İki Değişkenli Hasar Olasılığının Belirlenmesi	30
3.7.2.1 PDF Parametrelerinin Ayarlanması	30
3.7.2.2 Birinci Dereceden Güvenilirlik Metodu	31
3.7.2.3 Logaritmik-Logaritmik Durum	32
3.7.2.4 Diğer İki Değişkenli Durum	33
3.7.2.5 İki-Değişkenli Örnek Problemler	34

3.7.2.6 Senaryo 1 (Normal-Normal Durum)	35
3.7.2.7 Senaryo 2 (Logaritmik-Logaritmik Durum)	35
3.7.2.8 Senaryo 3 (Logaritmik-Normal Durum)	36
3.7.2.9 İki Değişkenli Örnek Problemlerin Özeti	37
3.7.2.10 İki Değişkenden Daha Fazlası İle Hasar Olasılığı	38
3.7.3 Monte Carlo Simülasyonu	39
3.7.3.1 Gerekli Deneylerin Doğruluğu ve Sayısı	40
3.7.3.2 PDF'lerden Rastgele Sayılar Üretme	41
3.7.3.3 İlişkili Rastgele Değişkenler	42
3.7.3.4 Simülasyon Etkinliğini Geliştirme Yaklaşımları	42
3.7.3.5 Özet	43
3.7.3.6 Monte Carlo Örnek Problemi	43
3.7.4 Cevap Yüzeyi Yaklaşımı	46
3.7.4.1 Aşama 1-Seçilen Değer İçin Yapının Analizi	47
3.7.4.2 Aşama 2-Regresyon Denkleminin Kurulması	49
3.7.4.3 Aşama 3- Cevap Değişkeni PDF'sinin Geliştirilmesi	49
3.7.4.4 Aşama 4-Hasar Olasılığının Değerlendirilmesi	49
3.7.4.5 Cevap Yüzeyi Metodu Örnek Problemi	50
3.7.5 Limit Durumu Yaklaşımı	52
3.7.5.1 "En Olası Nokta" Metodu	53
3.7.6 Limit Durumu Tahmin Metotlarının Genel Değerlendirmesi	56
3.7.7 Limit Durumu Yaklaşımı Örnek Problemi	56
3.8 Sistemin Hasar Olasılığının Belirlenmesi	60
4. OLASILIKSAL YÖNTEMLERLE YAPISAL YORULMA ÇATLAK İLERLEMESİ ANALİZİ	62
4.1 Yorulma Ve Çatlak İlerlemesi Konusuna Giriş	62
4.2 Yorulma Ve Çatlak İlerlemesi Konusuna Genel Bakış	63
4.2.1 Çatlağın Gerilme Analizi	64
4.2.2 Gerilme Yoğunluk Faktörü	65
4.2.3 Yorulma Çatlak İlerlemesi	68
4.2.4 Yorulma Çatlak Kapanması	73
4.2.4.1 Plastik Şekil Değiştirme Hattının Boyu	75
4.2.4.2 Çatlak Açılma Gerilmesi	77
4.2.4.3 Nasgro Yazılımında Çatlak Kapanması	77
4.2.5 Eşik Gerilme Yoğunluk Faktörü Değişimi (ΔK_{th})	80
4.2.6 Kırılma Dayanımı ve Kritik K	80
4.2.7 Hasar Kriteri	83
4.2.8 Akma Kontrolü	84
4.3 Yük Etkileşimi Altında Çatlak Büyümesi	85
4.3.1 Nasgro Yazılımında Yük Etkileşimi Altında Çatlak İlerlemesi Analizi için Kullanılan Modeller	87
4.3.1.1 Genelleştirilmiş Willenborg Modeli	88
4.3.1.2 Değiştirilmiş Genelleştirilmiş Willenborg Modeli (MGW:Modified Generalized Willenborg)	88
4.3.1.3 Walker-Chang Willenborg Modeli	88
4.3.1.4 Strip Yield Model	88
4.3.1.5 Sabit Kapanma Modeli	88

5. ÇATLAK İLERLEMESİ DURUMUNDA HASAR OLASIĞI ANALİZİ	90
5.1 Yük Aşımı Değerlerinin Olasılığı ve PDF'nin Bulunması	91
5.2 Aşırı Gerilme Sonucu Oluşan Çatlak Boylarının Belirlenmesi	93
5.3 Genel Kritik Çatlak Değerleri Olasılığının Elde Edilmesi	95
5.4 Bir Sene Sonunda Yapının Hasara Uğrama Olasılığı	97
5.5 Elde Edilen Verilerin Değerlendirilmesi	98
6. OLASILIKSAL TASARIM METODOLOJİSİ İLE İLGİLİ SONUÇLAR	99
KAYNAKLAR	101
EKLER	104
ÖZGEÇMİŞ	117

KISALTMALAR

FAA	: Federal Aviation Administration
PDF	: Probability Density function
CDF	: Cumulative Distribution Function
SPC	: Statistical Process Control
MPP	: Most Probable Point
PAND	: “Priority and Gate” yazılım.

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. ABD Havacılık Ölümcül Kaza Oranları: 1983-1992.....	10
Tablo 2.2. Normalleştirilmiş Risk Karşılaştırması.....	10
Tablo 2.3. ABD Büyük Havayolu Yapısal Hasarları-Her bir Uçuş için Olaylar.....	11
Tablo 3.1. Olasılık Dağılım Çeşitleri.....	18
Tablo 3.2. Havacılık Yapı Tasarımında Kullanılan Limit Durum Düzenlemeleri.....	27
Tablo 3.3. Olasılık Dağılım Dönüşümleri.....	31
Tablo 3.4. Normal Dağılımların Birleştirilmesi.....	31
Tablo 3.5. PDF Kombinasyonları İçin Hasar Olasılığı İfadeleri.	
Tablo 3.6. İki-Değişken Örnek Özeti.....	34
Tablo 3.7. Sonuç Hassasiyetini Gösteren İki Değişken Özeti.....	38
Tablo 3.8. Monte Carlo Simülasyon Sonuçları.....	38
Tablo 3.9. Box-Behnken Deneysel Tasarım Matrisi.....	44
Tablo 3.10. Çevresel Gerilme Tespiti İçin Olasılık Dağılım Tanımlaması.....	48
Tablo 3.11. Değişkenler İçin Düşük, Nominal ve Yüksek Tanımlamalar	50
Tablo 3.12. Üç Seviye Box-Behnken Tasarım Test Matrisi.....	51
Tablo 3.13. Verilen Girdi Değişken Seviyeleri İçin Femin Sonuçları	51
Tablo 5.1. Bir Senede Gerilmelerin Oluşma Olasılığı.....	92
Tablo 5.2. Aşırı Gerilmeler Sonucu Ulaşılan Son Çatlak Boyları....	94
Tablo 5.3. Kritik Çatlak Boyu Olasılıkları.....	96

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1. :Olasılıksal Analiz Kavramı.....	13
Şekil 3.2 :Normal Dağılım.....	19
Şekil 3.3 :Logaritmik Dağılım.....	20
Şekil 3.4 :Weibull Dağılımı.....	21
Şekil 3.5 :Beta Dağılımı.....	22
Şekil 3.6 :Uniform Dağılım.....	22
Şekil 3-7 :Poisson Dağılımı.....	24
Şekil 3-8 :Basitleştirilmiş (2-Boyutlu) Düzenleme.....	26
Şekil 3.9 :Problemin Üç Boyutlu Sunumu.....	27
Şekil 3.10 :Gerilme Altında 17-7PH Çelik Çubuk.....	28
Şekil 3.11. :Hasar Olasılık Belirlemesi.....	29
Şekil 3.12 :Rastgele Değişkene Dönüşen $U(0,1)$	41
Şekil 3.13 :Çekme Gerilmesi Altında 17-7PH Çelik Çubuk	43
Şekil 3.14 :Örnek Problem için Monte Carlo Simülasyonu.....	46
Şekil 3.15 :Tasarım Değişkenlerinin Üç Seviyesini Kullanarak Rsm Prosedürü.....	48
Şekil 3.16 :Standart Normal Alana Dönüşüm.....	54
Şekil 3.17 :Değişkenler R ve S ile Orijinal Parametre Alanı.....	57
Şekil 3.18 :R Ve S Değişkenleriyle İndirgenmiş Koordinatlar.....	58
Şekil 3.19 :Olasılıksal Hata Ağacı Analiz Metodolojisi.....	59
Şekil 4.1 :Yorulma Ömrünün Safhaları.....	63
Şekil 4.2 :Yüklemeye Şekilleri.....	65
Şekil 4.3 :Çatlak Bir Yapının Uzatılmış Hizmet Ömrü.....	69
Şekil 4.4 :Çatlak Büyüme Oranı Eğrisinin Bölümleri.....	70
Şekil 4.5 :A357 Dökme Alüminyum İçin Denklem (4.10)'un Çatlak İlerleme Eğrisine Uygunluğu.....	72
Şekil 4.6 :Plastik Deformasyona Uğramış Malzeme.....	74
Şekil 4.7 :Çatlak Ucu Etrafında Akma.....	74
Şekil 4.8 :Monoton Plastik Hattın Boyu.....	75
Şekil 4.9 :Ters Yüklemeye Durumunda Plastik Hattın Boyu.....	76
Şekil 4.10 :Çatlak Açılma Fonksiyonu – Gerilme Oranı.....	79
Şekil 4.11 :Kc- Kalınlık Ve R Etkisi- Alüminyum 2219-T87R.....	82
Şekil 4.12 :Yüzey Çatlağında Kırılma Dayanım Eğrisi.....	83
Şekil 4.13 :Aşırı Yüklemeye Sonrası Çatlak Yavaşlaması.....	85
Şekil 4.14 :Tek Bir Aşırı Bası Yükleme.....	86
Şekil 4.15 :Aşırı Yükleme Takip Eden Baskı Yükleme.....	86
Şekil 4.16 :Birden Fazla Aşırı Yüklemede Yüklemler Arasındaki Zaman.....	87
Şekil 4.17 :Yükteki Artışla Çatlak İlerleme Oranının Hızlanması.....	90
Şekil 5.1 :Parça Geometrisi.....	90
Şekil 5.2 :Bir Senede Yapının Maruz Kaldığı Aşırı Gerilme Adedi.....	91

Şekil 5.3 : Bir Senede Karşılaşılan Gerilmelerin Olasılığı.....	92
Şekil 5.4 : Yapının Bir Senede Kaldığı Gerilmelerin Olasılık Yoğunluk Dağılımı	93
Şekil 5.5 : Bir Senede Uygulanan Gerilme Sonucu Elde Edilecek Son Çatlak Değerlerinin Olasılığı.....	94
Şekil 5.6 : Düz Delik Etrafında İlk Çatlak Boyu ve Güvenilirlik.....	95
Şekil 5.7 : Yapının Kümülatif Hasar Olasılık Eğrisi.....	96
Şekil 5.8 : İki Olasılık Eğrisinin Çakıştığı Alan-Hasar Olasılığı.....	87

SEMBOL LİSTESİ

ag	:	Kritik çatlak boyu ilk tahmin
a₀	:	Asıl çatlak boyu
A₀,A₁	:	Çatlak açılma fonksiyonu sabitleri, (denk.4.12-4.15)
A₂,A₃	:	
An	:	Net kesit alanı
Ak,Bk	:	Uygunluk parametresi (denk. 4.28)
C	:	Çatlak büyüme oranı sabiti (denk. 4.10)
Cth	:	Eşik sabiti (denk. 4.10)
Ck	:	Uygunluk parametresi (denk. 4.30)
F	:	Çatlak açılma fonksiyonu
In	:	Net kesit atalet momenti
K	:	Gerilme yoğunluk faktörü (mod I)
Kc	:	Kritik gerilme yoğunluk faktörü
Kcr	:	Kritik gerilme yoğunluk faktör kırılma
K_{max,min}	:	Maks ve min. gerilme yoğunluk faktörü
Kopen	:	Açılma gerilmesi yoğunluk faktörü
KIc	:	Düzlem şekil değiştirmede kırılma sertliği (mod I)
KIe	:	Efektif kırılma sertliği
KIe(a)	:	KIe değeri- a ucu
KIe(c)	:	KIe değeri- c ucu
Keac	:	Çevre etkisinde çatlak gerilme yoğunluk faktörü
ΔK	:	Gerilme yoğunluk faktörü değişimi (K _{max} -K _{min})
ΔK_{eff}	:	Efektif gerilme yoğunluk faktörü değişimi (K _{max} -K _{open})
ΔK_{th}	:	Eşik gerilme yoğunluk faktörü değişimi
ΔK₀	:	Eşik gerilme yoğunluk faktörü değişimi at R = 0
M	:	Artık moment (denk.4.31)
n	:	Uygunluk parametresi (denk.4.30)
N	:	Yorulma tekrar sayısı
P	:	Artık güç (denk.4.31)
R	:	Gerilme oranı (K _{min} /K _{max})
S_{0,1,2,3}	:	Nominal uygulanan gerilme
S_{max}	:	Maximum uygulanan gerilme
S_n	:	Nominal net kesitte gerilme
g(x)	:	Performans fonksiyonu
μ	:	Normal /logaritmik dağılımlarda ortalama
σ	:	Normal/logaritmik dağılımda standart sapma
β	:	Weibull dağılımda şekil parametresi / olasılık güvenlik indeksi
θ	:	Weibull dağılımda ölçek parametresi
F_y	:	Akma mukavemeti

ÖZET

OLASILIKSAL METODLARLA YAPISAL VE ÇATLAK İLERLEMESİ ANALİZLERİ

Günümüzde yapıların tasarımında, geleneksel yapısal analiz yöntemlerinin yanı sıra, yapının emniyeti ile maliyeti arasında optimum dengeyi kurmayı sağlayan olasılıksal analiz yöntemleri gibi yeni yaklaşımların kullanılması ihtiyacı doğmuştur. Özellikle havacılık endüstrisi gibi emniyet toleransının son derece hassas olduğu ve güvenilirliğin ön plana çıktığı endüstrilerde, bazı aşamalarda olasılıksal analiz yöntemlerinin kullanılması kaçınılmaz olmuştur. Olasılıksal yapısal analiz yöntemleri geleneksel yöntemlerden farklı olarak tasarımın kendisinden kaynaklanan riskleri ve tasarım değişkenlerinin duyarlılıklarını tanımlamayı sağlar.

Bu tez, mühendislere istatistiksel temellere dayanan olasılıksal analizin konusunu tanıtmayı ve bu teknolojiye faydalanacaklara kaynak olmayı hedeflemektedir. Bu amaçla ilk bölümde geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı alanlar belirtilerek, olasılıksal analiz yöntemleri de kullanılarak potansiyel bir geliştirme imkanı açıklanmıştır. İkinci bölümde olasılıksal yöntemlerin kısaca tarihsel gelişimi özellikle havacılık endüstrisinde kullanımı anlatılmaktadır. Daha sonraki bölümde yöntemin temel teorisi, uygulamada takip edilecek aşamalar adım adım açıklanmış ve dört ana teknik (nümerik entegrasyon, simülasyon, cevap yüzeyi ve limit durum yaklaşımı) gerekli matematiksel formüllerle verilmiş ve örnek problemlerle desteklenmiştir. Dördüncü bölüm uygulama konusu olan çatlak ilerlemesi ile ilgili teorileri içermekte ve kırılma mekaniği yaklaşımları ile çatlak ilerleme analizleri açıklanmaktadır. Son bölümde, aşırı gerilme ve çatlak ilerlemesine maruz kalan uçak kanadına ait bir plakanın, olasılıksal analiz yöntemleriyle hasar olasılığının hesaplanmasını konu alan örnek uygulama yer almaktadır.

ABSTRACT

STRUCTURAL AND CRACK PROPAGATION ANALYSIS BY USING PROBABILISTIC METHODOLOGY

For the design of the structures in these days, a new approach like probabilistic methodology which provides optimum reliability and cost for the structure is needed as well as the traditional structural analysis. Especially in the fields such as aerospace industry where the reliability is essential, using this new approach is very important. Probabilistic structural analysis methods, unlike traditional methods, provide a means to quantify the inherent risk of a design and to quantify the sensitivities of design variables.

This study is intended to introduce the subject of probabilistic analysis which is based on the statistical principles and to be a reference to guide those applying this technology. Considering this purpose, in the first section, the shortcomings of the current structural analysis approach and a potential for improvement by using probabilistic methodology are explained. In the second section, the historical evolution and the implementation of the methodology especially in the aircraft industry are introduced. Later on, the basic theory and the general steps to be taken while applying the probabilistic method with the four main technical approaches including numerical integration, simulation, response surface and limit state approximation are given with the necessary mathematical formulations and explained by example problems. The Fourth section includes the basic theory about the crack propagation. In this section, the fracture mechanics approaches and crack growth analysis are explained. In the last section the failure probability of a plate which is a component of an aircraft wing and subjected to a load exceedance and attaining a critical crack length, is calculated.

1. GİRİŞ

Günümüzde tasarımdan kaynaklanan hataların bilinmesi hem üretici hem de müşteri için önemli hale gelmektedir. Tasarımcılar ve yöneticiler risklerin hesaplanabilirliği, risk taşıyan parametrelerin tanımlanması, diğer tasarım sınırlarından kaynaklanan risklerin en aza indirilmesi konuları ile ilgilenmelidir. Özellikle hava taşıtlarının yapısının olasılıksal yöntemlerle analizi tüm bu ihtiyaçları karşılayacak bir araçtır.

Bu bölümde mevcut yapısal analiz yaklaşımlarına genel bakış , bu yaklaşımların eksik kaldığı noktalar ve gelecek havacılık tasarımlarına uygulandığında yaratacağı olası sıkıntılar anlatılmıştır. Olasılıksal analiz yaklaşımının bu sorunları nasıl çözebileceğine değinilmiştir.

1.1. Mevcut Belirleyici Yapısal Tasarım Yaklaşımı

Yapıdaki her noktada en ciddi yük durumu uygulanan çeşitli yüklerden kaynaklanır. Bu yükün oluşturduğu gerilme, limit gerilme olarak adlandırılır. Limit gerilmeye neden olan yük ise limit yüküdür.

“Belirsizlik faktörü” yada yaygın olarak “emniyet faktörü” bu limit yük veya gerilmelerle çarpılarak, tasarımda göz önüne alınacak yük ve gerilme değerleri elde edilir. Böylece gerçek yük değerinin tasarımda kabul edilen yükten fazla olması veya gerçek mukavemet değerinin kabul edilen değerden az olması durumları da göz önüne alınmış olur.

Bir yapının tasarım kriteri, kullanılan farklı malzemelerin mukavemet değerlerini de belirler. İstatistiksel verilere dayanan lisanslı malzeme özellikleri, metaller ve kompozitler için çeşitli standartlarda bulunabilir. Yapının dayanım değeri temsili veya benzeri bir yapı üzerinde gerçekleştirilen test sonuçlarından elde edilir.

Müsaade edilebilir mukavemet değeri ile modellenmiş bir yapıya kopma sınırı yükü uygulanarak yapılan bir analiz, yapının her noktasındaki emniyet paylarını (ki bu paylar genelde sıfıra yakın pozitif değerler olarak optimize edilir) belirler.

Sıfır emniyet payı, kopma sınırı yükünün (tasarımda göz önüne alınacak yükün 1.5 katı) malzemenin dayanımına eşit bir gerilme meydana getirdiği anlamına gelir. Bu analiz, emniyet paylarının kabul edilebilir olduğunu gösterdiğinde, deterministik tasarım analizi başarılı kabul edilir.

Statik ve yorulma testleri yapının tümüne uygulanır ve yapının kopma sınırı yükü altında kırılmadığının ve belli sürede bir yük tekrarına dayandığının belirlenmesi için yapılır.

1.2 Farklı Bir Yaklaşım İhtiyacı

Mevcut havacılık tasarım analiz metotları, pek çok girdi parametresinin rastgele özelliklerini doğrudan hesaba katmaz. Malzeme özellikleri, geometri, çevre ve yük gibi parametreleri tek tip belirlenmiş değerler olarak almak, tasarımda belirsiz güvenilirlik ve belirsiz risk sorunlarını getirir. Burada risk zarara ve kayba uğrama ihtimalidir.

Gerçekte tüm aktiviteler –hava yolculuğu da dahil- risk taşır. Bir hava taşıtının riskini azaltmak için emniyet faktörü ve denemelerle sabit malzeme özellikleri kullanılır. Son 30 yıl içinde konstrüksiyon hatasından kaynaklanan kaza sayısı oldukça azdır.

Bilinmeyen bir riski taşıyan tasarım prosedürü, gelecek tasarımlar için şu sorunları yaratır:

- Tasarım kritik ve rekabetçi hale geldikçe, verilen diğer program sınırlamalarını ve güvenilirliği nicel olarak hesaplamak ve optimize etmek gerekmektedir (riski minimize etmek). Belirlenmiş güvenilirlik, hem ticari hem de askeri garantiler üzerinde önemi artan temel bir özelliktir.
- Yeni geliştirilen uçaklar, (örneğin tekrar kullanılabilen fırlatma araçları, yüksek hızda insan taşıyan araçlar) alışlagelen çevreden ayrılmaktadır. Belirsizlik faktörünün geçmişteki uygulamaları bu alanlarda yeterli emniyeti

sağlamayabilir. Tasarımı, karşılaşılabilecek tüm kritik koşullara uygun ve emniyetli yapmak ise, yapının ağırlığını kabul edilemez biçimde arttırabilir.

- Havacılık sanayinde, kompozit malzemeden iskelet yapılarının oranı artmaktadır. Bu malzemelerde heterojen yapıları sebebiyle metallere göre iç yapılarından kaynaklanan değişkenler daha fazladır ve imalat işlemleri sırasında oluşacak değişimlere daha açıktırlar. Belirsizlikleri hesaba katmak için, pek çok faktör hesaba katılmıştır. Bu, ağırlıkta önemli artışa neden olmuş ancak yapısal güvenilirlikte kayda değer bir artış sağlamamıştır.

1.3 Olasılıksal Analiz Felsefesi

Tüm tasarım parametreleri değişkenler olarak ele alınır ve analizin temel sonucu bir hasar olasılığı, yani risktir. Tasarım girdi parametrelerinin gerçekçi değişkenliğinin etkileri de böylece elde edilebilir. Özellikle uygulanan yük, geometri, malzeme davranışı ve öngörülen ortamın istatistiksel olarak belirlenmesi ile bağlantılı yapısal analiz metodolojisi ile olasıksal yapısal analiz metodolojisi şu sonuçları verir:

- Emniyetin (riskin) sayısal olarak tespit edilmesi
- Tasarım değişkenlerinin duyarlılık analizi
- Maliyet/ Ağırlık azaltma senaryoları
- Optimum inceleme aralığı

Açıkça istatistiksel olarak tanımlanan tasarım parametreleri dikkatli değiştirilmelidir. Özellikle risk duyarlılığı olan girdi değerlerinin oranları ve değişkenlikleri tam olarak anlaşılmalıdır.

Her bir tasarım parametresinin tüm riske katkısının ne olduğunu bilmek, mühendisin analizin gerçekçiliğini sağlayabilmek için nereye bakması gerektiğini bilmesini sağlar.

1.4 Genel Kavram

Olasılıksal tasarımın temeli, deterministik kriter yerine güvenilirlik hedeflerini temel alan tasarım kriterleri ile ilgilidir. Uygulanan yük, malzeme dayanımı, işletme parametreleri gibi tasarım parametreleri araştırılır, ölçülür ve daha sonra istatistiksel

olarak tanımlanır. Bir olasılıksal analiz modeli tüm sistem için kurulur ve hasar olasılığını temin etmek için çözdürülür.

Çözüm, çok sayıda konum ve hasar şekli içerir. Her bir konum için, ilişkili bir “uygulanan” gerilme-malzeme dayanımı dağılımı gerekir. Gerilme değerleri, geleneksel mukavemet yaklaşımları ile desteklenmiş sonlu eleman modellerinden elde edilir. Matematiksel olarak uygulanan gerilme ve malzeme dayanımı dağılımları bağımsız farz edilir. Genel yaklaşım ise, gerilme değerinin dayanımı aştığı bölgede gerilme ve dayanım değerlerinin bileşik olasılığının integralini almak şeklindedir. Bu integralin sonucu *Yapısal Hasar Olasılığıdır*.

Olasılıksal model elde edildikten sonra, duyarlılık analizi ve/veya optimizasyon uygulanabilir. Tasarımda öncü etmenler tanımlandıktan sonra, hasar olasılığını kabul edilebilir bir seviyede tutmak için, tasarım verilen sınırlamalarda optimize edilebilir. Duyarlılık analizi, riskin temel etmenlerini ortaya çıkarır. Bu da analizciye, örneğin en az ağırlıkla kabul edilebilir güvenilirliği elde etmek için tasarım parametrelerini değiştirme şansı verir.

2. OLASILIKSAL TASARIMIN TARİHÇESİ

Modern dönemi geçmişten ayıran devrimsel yaklaşım risk ile ilgilidir. Risk kavramı ile ilgili çalışmalar ciddi olarak 1600'lerin ortasında, Paskal ve arkadaşı Fermat'ın fikirlerinin gelişmesi ve olasılık teorisinin doğmasıyla başlamıştır. Gelecek yüz yıl boyunca Bernoulli ve Gauss olasılık teorisini düzenleme ve uygulamada kullanılacak bir araç olarak geliştirmişlerdir.

Olasılık her zaman iki anlam taşımıştır: Geleceğe bakmak ve geçmişi irdelemek. Biri görüşlerimizle diğeri ise şu anda bildiklerimizle ilgilidir. Bazı zamanlar düşündüğümüz ve geçmişten bildiğimiz geleceğe aktarılamaz. Hiç bir zaman elimizdeki örneğin ne kadar iyi olduğundan emin olamayız. Buna rağmen güvenilebilir ve gelecekte ortaya çıkacakları işaret edecek bir örnek veri oluşturmaya çalışılmalıdır.

Günümüzde uçak tasarımcılarının ve analizcilerinin sorunu, kesin olarak hangi verilerin temin edilebileceği, bu verilerin hangilerinin mevcut duruma uygulanacağını güvenilirliği, istatistiksel verileri belirleme ve performansı tahmin etmektir.

Şu kabul edilmelidir ki çok küçük de olsa her zaman bir hasar riski mevcuttur. Bu durumda yapılması gereken, üretim, ekonomi, performans ve diğer sınırlamaları göz önüne alarak ne kadarlık bir hasarın tolere edilebileceğinin ortaya konulmasıdır.

2.1 Olasılıksal Metodolojinin Gelişimi

Olasılıksal uçak yapısal risk hesabı kavramı, uzun bir süredir mevcuttur. A.G Pugsley 1942 yılında "A Philosophy of Airoplane Strength Factors" isimli kitabını yayımlayarak kayıtlı yapısal kaza oranları ile yük ve dayanım ilişkisine dikkat çekmiştir [3]. Bu prensiple ne tasarım yükleri ne de emniyet faktörü ve izin verilen gerilme değerleri keyfi seçilemeyecektir, sadece yetersiz tasarımların elenmesi değil, ciddi ekonomik kazanç da sağlanacaktır.

1945 Yılında Alfred Freudenthal, emniyet faktörü kavramının fiziksel kalitenin istatistiksel göstergesi olarak sınırlandığını, şekil değiştirme ve direnç değerlerinin özel olarak değil, genel bir frekans dağılımı olarak gösterildiğini belirterek olasılık teorisinin uygulanması ile emniyet kavramının daha doğru uygulanacağını söylemiştir. Böylece 1950’li yılların başına kadar yapısal güvenilirlik konusu tartışılarak formüller güncellenmiştir. Teori 1951 yılında Weibull’un malzeme dayanımıyla ilgili sağlam istatistiksel sunumlar gerçekleştirmesiyle sağlamlaşır. 1954 yılında Freudanthal “Safety and The Probability of Structural Failure” isimli kitabında hasar olasılığından bahseder [4]. Jose Carlo ve Larry Lawrence matematiksel olarak biraz daha ilerleyerek hasar olasılığı hesabını normal gerilme-dayanım dağılımı için basitleştirirler. Bu yaklaşım bir emniyet indeksini de kullanan Birinci Dereceden Güvenilirlik Metodu’nun temelini oluşturur.

1956 yılında bazı Amerikan kuruluşları emniyet faktörü kavramını netleştirmek, mevcut olarak çeşitli alanlarda kullanılan emniyet faktörünü denetlemek, gelecekte bu faktörün hangi değerlerde kullanılacağını tespiti için standartlar belirlemek için toplanmışlardır.

On yıllık çalışma sonucu hazırlanan son raporda, komitenin emniyet faktörü sorununu çözmekte başarılı olamadığı, olasılık yaklaşımın üzerinde durulması gerektiği belirtilmiştir.

Bu son rapor, başarılı bir yapısal güvenilirlik analizi için şu gerekleri ortaya koyuyordu:

- Yük sıralaması gösteriminin geliştirilmesi,
- Hasar oluşan koşulların daha gerçekçi bir şekilde belirlenmesi,
- Yük-Dayanım istatistiksel değişiminin daha güvenilir bir şekilde ortaya konması,
- Tasarım kriterlerinin güvenilirlik yaklaşımı göz önünde bulundurularak belirlenmesi.

Her ne kadar araştırmalar 1960’lı yıllarda devam ettiyse de kabul görmemesinin nedeni geleneksel yöntemler uygulandığında sorunun ortaya çıkmıyor olmasıydı. Dayanıklılık ve hasar toleransı yaklaşımı 1960’larda tanındı ve yorulma çatlak ilerlemesi tahmin kanunları baz alınarak 1970’lerde benimsendi. Böylece, emniyetle ilgili kaygılar hafiflemiş görünüyordu. Olasılıksal metotların, çok miktarda veri gerektireceği zannedildi ve çıkış noktası ikna edici değildi.

1967’de C.A. Cornell yapısal güvenilirliği değerlendirmek için ikinci moment formatını sundu. Bu yaklaşımda, parametre dağılımlarının ortalamalar ve varyanslarından hesaplanan bir emniyet indeksi mevcuttu (varyans bir dağılımın ikinci momentidir). Emniyet indeksi güvenilirliğin bir ölçütü olarak düşünülmüştü ve hasar olasılığını belirlemek için sayısal olarak bileşik olasılık yoğunluk faktörünün entegralini almak yerine, bu değerin kullanılması düşünülmüştü. 1973’de Lind, Cornell’in emniyet indeksinin uygulanan yük ve dayanım değerleri için bir emniyet faktörü türetmekte kullanılabileceğini buldu. Bu ilerlemeyle güvenilirlik analizi en sonunda mühendislik tasarımının kabul edilen yöntemlerinden biri oldu. Daha sonraları Hasofer ve Lind tarafından iyileştirmeler yapıldı ve bu iyileştirmeler olasılık tasarımı teorisinin temeli oldu.

2.2 Emniyet Faktörünün Tarihçesi

Daha öncede belirtildiği gibi emniyet faktörünün kullanılmasının amacı, tasarımdaki dayanımla işletme sırasındaki dayanım arasında emniyetli bir çalışma aralığı sağlamaktır. Bir yapının ne kadar emniyetli olacağının bilinmemesi, yapısal yüklerdeki belirsizlik, tasarım analizi, malzeme, işletim ve çevre etkilerinin de bilinmemesine bağlıdır.

1930’lu yılların başında, bir emniyet fikri oluşmuş ancak resmileşmemişti. Uçaklar limitin üçte ikisi ile uçuyorlardı. Kalıcı limit istenmiyordu ve limit taşıma yükleri sonuna kadar zorlanıyordu. Tasarım yük faktörü, maksimum aerodinamik manevra kapasitesi ve işletim manevra sınırları arasında bir bağlantı kuran hız – ivme diyagramının tanıtılması, emniyet faktörünün kullanılması için kriterlerin hayata geçmesini sağladı. Mart 1934’te 1.5 emniyet faktörünün kullanılması Amerikan havacılık şirketlerinde resmileşti.

Bu faktör kullanışlı bir faktörün ortaya çıkarılması için girişilmiş özel bir çalışma sonucu bulunmadı. Aksine, yapısal tasarım kriterini güncelleştirmek isteğinin bir parçası olarak diğer tasarım talepleri ile birlikte yavaş gelişti. Kullanımı, çoğu mühendis tarafından sorgusuz kabul edildi. Problemler çıktığında yada yapısal hasarlar oluştuğunda, yük tahmin teknikleri, üretim teknikleri, tasarım özellikleri v.b. değişiklikler yapıldı fakat güvenlik değeri faktörü asla değiştirilmedi.

1.5 faktörü rasyoneldir. Çünkü tasarım faktörlerinin; işletim, manevra, yük faktörlerine olan ve 1920'lerde ve 1930'larda denenilen oranı olduğu temelindedir. Ancak aynı zamanda keyfidir. Çünkü kesin tasarım, üretimde ve işletimdeki olası terslik veya sapmalar ve bu sapmaların miktarı bilinemez. Yada 1.5 faktörünün uçuş sırasında ne kadar emniyet sağladığı da nicelenemez fakat başarılı tarihçesi de gözardı edilemez.

Emniyet faktörü yaklaşımının yapısal güvenilirliğin olasılıksal yorumları ile değiştirilmesine ilgi, 1950'lerin sonunda başladı. Güvenlik yaklaşım faktörünün devam eden uygulamasına bazı mühendisler karşı çıktılar fakat tasarım felsefesinde büyük bir değişime, özellikle yasal karışıklığa yol açacağından tepki gördüler. Güvenlik faktörü, hala birçok belirsizlikleri içerdiğinden bazı mühendisler, bu faktöre her zaman ihtiyaç duyulacağını düşünmektedir.

Son zamanlarda, 'belirsizlik faktörü' güvenlik faktörü olarak adlandırılmaktadır. Sıradan uçaklar için değer, 1.5 olarak belirlenmiştir. Kontrol metotlarının doğruluğu, tasarım, analiz ve fabrikasyon metotlarında normalin üzerinde bir belirsizlik olduğu durumlarda azaldığında veya yeni malzeme kullanımı ve yeni fabrikasyon metotları sebebiyle sınırlandığında veya yeni hava aracı kullanımının büyük ölçüde farklı olduğu durumlarda, belirsizlik faktörünün seçilen değeri arttırılmalıdır.

Eğer tasarım, üretim ve çalışma çevrelerindeki değişkenlik azaltılabilirse, 1.5 emniyet faktörü de azaltılabilir. Örneğin eğer, yeni malzeme sistemlerinin tanıtılması, değişkenliği gerçekten yükseltirse, 1.5 emniyet faktörü uygun olmayabilir ve arttırmak gerekebilir.

Her durumda, olasılıksal analiz bu etkileri belirlemede kullanılabilir. Bir tasarım kriteri olarak güvenlik faktörünü muhakkak değiştirmeyecektir, fakat optimum emniyet faktörünü seçmeye yardım edecektir.

2.3 Havacılıkta Kabul Edilebilir Hasar Olasılığının Tarihsel Yönü

A. G. Pugsley'in kitabı "Yapıların Güvenliği" (1966), kabul edilebilir yapısal kaza oranını, 1930'ların sonlarında İngiliz askeri uçuş verilerinden geliştirilen değer olan 10^7 uçuş saatinde 1 olarak bildirir. Savaş şartları altında bu oran, yüklemde ve kullanımdaki değişikliklere göre oldukça yükselmiş zamanla 10^7 uçuş saatinde 5'e ulaşmıştır. Pilotlar ve mürettebat, yapısal olarak tehlikeyi fark etmeye başlamışlar ve

tasarım değişikliği talep etmişlerdir. Savaş sonrası sivil havayolu deneyimi, yapısal hasara karşı çok gl tepki göstermek için bu eğilimi teyit etmiş ve yapısal kaza oranının 10^7 saatte 1' i aşmaması gereken havayolu işletimi prensibine nc olmuştur.

1954 bildirisinde [4], inşaat yapıları ile ilgili olarak, hasarın kabul edilebilir oranını belirleyen A. M. Freudenthal, şöyle ifade etmiştir: “Hasar olasılığının seçimi, yapının önemine ve maliyetine olduğu kadar, hasarın sonuçlarına ve maliyetine bağlıdır. Havacılıkla ilgili olarak, çoğunlukla 10^7 uçma saatinde 2 değeri (riski) kabul edilir.” diye bildirmiştir.

1990’da piyasaya sürülen uçak yapıları için Birleşik Devletler Hava Kuvvetleri Genel şartnamesi (AFGS 87221 A), olasılıksal metotların hava taşıtı iskeletlerinin yapılarını tasarlamak için kullanıldığında, uçağın kaybıyla sonuçlanan yapısal hasarın maksimum kabul edilebilir sıklığının her bir uçuş için 1×10^{-7} olduğunu ifade eder. (yada 10^7 uçuşta 1 oluşum)

Tablo 2.1, ortalama 10 yıllık dönemde, 1983’ten 1992’ye kadar olan dönemde ABD havacılığındaki kaza oranlarını göstermektedir. Bu kazalardan sadece birinin, yapısal hasardan sonuçlandığı bilinir. Tablo 2.2, farklı birimler cinsinden meydana gelen farklı faaliyetlerin bir risk özetini gösterir, birim olarak her bir kişi başına ölüm, maruz kalınan her bir saat seçilmiştir. Bu, havacılık kazalarının ilgili riskinin günlük hayatta rastlanan risklere benzediğini gösterir. Bu havacılık kaza oranları, 1985’ten 1994’e kadar olan verilerden alınmıştır [5].

ABD’deki büyük havayolu şirketlerinin 1985-1994 dönemi için yaptıkları bir alışma, FAA (Federal Havacılık Dairesi) Internet Web sitesindeki FAA Olay Veri Tabanı’ndan veri alınarak uygulanmıştır. Yaklaşık 5,500 olay, yaklaşık 10^8 uçuşu temsil edecek şekilde belirtilmiştir. Bireysel incelemeden ve sonraki elemekten sonra, 5,500 olaydan 62’si yapısal hasarla sonuçlanmıştır. 62 yapıya bağlı olaydan biri ölümcül bir kaza ile, yani 1998’deki Aloha Havayolları kazası ile sonuçlanmıştır. Sonuçlanan oranlar, Tablo 2.3’te sunulmuştur.

Tablo 2.1. ABD Havacılık Ölümcül Kaza Oranları: 1983-1992.

	Ölümcül Kaza Oranları / Bir Milyon Uçuş										
	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Ort.
Tarifeli Hizmet ⁽¹⁾	0.57	0.17	0.66	0.29	0.41	0.27	0.69	0.38	0.40	0.26	0.41
Tarifesiz Hizmet ⁽¹⁾	0	0	8.40	3.65	0	0	5.32	0	0	0	174
Günlük Çalışanları Taşıyıcılar ⁽²⁾	0.43	2.61	2.37	0.71	3.56	0.69	1.77	0.95	2.94	2.43	1.85
Talep üzerine Telafi uçuşu ⁽³⁾	11.4	8.10	13.6	11.5	11.3	10.6	8.3	12.5	11.6	10.8	11.0
Genel Havacılık ⁽⁴⁾	19.4	18.7	17.5	17.5	16.5	16.8	15.3	15.6	15.2	15.0	16.8
Toplam oran	15.1	14.4	13.7	12.8	12.2	12.1	11.4	11.5	11.2	11.0	12.5

(1) Tarifeli 14 CFR 121 işlemlerindeki, kısıtlayıcı şartları kaldıran tüm kargo havayolu taşıyıcılarını ve ticari işlemcilerini kapsayan kazaları içerir.

(2) Tarifeli 14 CFR 135 işlemlerindeki tüm kargo havayolu taşıyıcılarını kapsayan kazaları içerir.

(3) Tarifeli 14 CFR 135 işlemlerindeki tüm hava taşıyıcılarını kapsayan kazaları içerir. 1st/hız olarak.

(4) 14 CFR 121 yada 14 CFR 135 altındaki o çalışmalardan başka tüm işlemler. 1st/hız olarak.

Tablo 2.2. Normalleştirilmiş Risk Karşılaştırması.

Neden	Ölüm Sayısı	Ölü/(Kişi-Saat Maruz kalma)
Motor Araç Kazası ¹	43,000	0.49 10 ⁻⁶
Ev kazası ¹	26,700	0.03 10 ⁻⁶
İş Kazası ¹	5,000	0.02 10 ⁻⁶
Havacılık Kazası ²		
- Büyük Havayolları	169	0.21 10 ⁻⁶
- Günlük Çalışan Havayolları	30	0.99 10 ⁻⁶

1- 1994 verileri baz alındı. Ulusal Güvenlik Konseyi ‘‘1995 Kaza Gerçekleri’’ yayını.

2- 1985-1994 verilerinden ortalama baz alındı. FAA İstatistiksel Havacılık El Kitapları, 1985-1994.

Tablo 2.3. ABD Büyük Havayolu Yapısal Hasarları-Her bir Uçuş için Olaylar ve Kazalar.

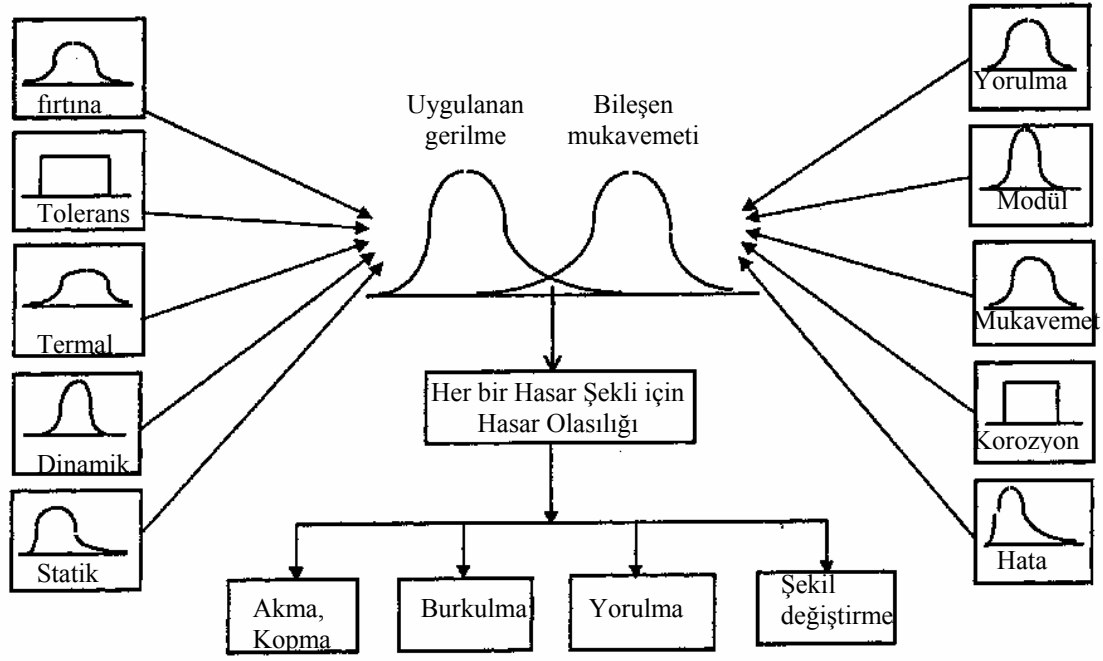
Tür	Sayı (1985-1994)	Olaylar (Kazalar) Her bir Uçuş için
Toplam Olaylar	5,497	5.5×10^{-5}
Yapısal Olaylar	62	6.2×10^{-7}
Yapısal Kazalar	1	1×10^{-8}

3. GENEL TEORİ VE YAKLAŞIM

Bu bölüm, olasılıksal metotların arkasındaki temel teoriyi, kavramları ve olasılıksal bir yapısal analizi uygulamasında bulunan genel aşamaları sunacaktır. Olasılıksal analizde dört ana yaklaşım (entegrasyon, Monte Carlo Simülasyonu, cevap yüzeyi yaklaşımı ve limit durum yaklaşımı) incelenecektir. Bir değişken ile başlayarak, normal/normal, logaritmik/logaritmik ve logaritmik/normal dağılımlarla iki değişkenli (entegrasyon) basit örnek problemler gösterilecektir. Monte Carlo simülasyonu, cevap yüzey yaklaşımı ve limit durumu yaklaşımının açıklamaları ile, üç değişkenli durum incelenecek ve bu metotları açıklayan örnek problemler sunulacaktır.

3.1 Temel Yaklaşım

Bu temel olasılıksal yaklaşım, yapısal analiz metotları için gerekli tüm girdi değişkenlerinin istatistiksel tanımlaması, tahmin edilen hasar şekilleri ile ilişkili yapısal dayanım ve gerilmenin istatistiksel tanımlaması ve elde edilen yapısal hasar olasılığının değerlendirilmesi olarak özetlenebilir. Şekil 3.1, bu işlemi açıklar. Sağ taraf yapının çeşitli kapasitelerini anlatırken, sol taraf, her biri bir istatistiksel dağılım ile uygulanan gerilme dağılımını belirlemek için girdi verilerini gösterir. Orta kısım, hasarın ilgili bir olasılığı ile, her bir hasar şekli için uygulanan gerilme ve bileşenin mukavemet dağılımı olarak işlem çıkışı gösterir.



Şekil 3.1. Olasılıksal Analiz Kavramı.

3.2 Olasılıksal Analizde Genel Aşamalar

1. Tahmin edilen yükleme durumları altındaki yapının potansiyel hasar şekilleri tanımlanır.
2. Yapı üzerindeki her bir hasar şekli ve/veya konumu için, kabul edilebilir bir hasar olasılığı (yada minimum güvenilirlik) belirlenir.
3. Mevcut yapısal analiz metotları, yapının sertliğini (kararlılığını) ve uygulanan yüklere yapının iç tepkisini (gerilmeleri) modellemek için kullanılır.
4. Hem gerilme değerleri, hem de mukavemeti etkileyen rastgele tasarım değişkenleri istatistiksel olarak tanımlanır.
5. Olasılıksal analiz metotları, önceden belirlenmiş konumlardaki hasar olasılığını belirlemek için uygulanır.
6. Sistemin hasar olasılığı, sistemdeki her bir konumun hasar olasılıklarının bir fonksiyonu olarak modellenir ve kabul edilebilir hasar olasılığı ile karşılaştırma yapılır.

3.3 Aşama 1- Potansiyel Hasar Şekillerinin Belirlenmesi

Mühendis, analiz edilen yapının genel durumunu anlamalıdır. Hasar şekli, yapı üzerinde birden fazla hasar şekline maruz kalan bazı alanlarda, konumdan konuma değişebilir. Bu, mühendislik bilgisinin gerekli olduğu bir durumdur.

Yapısal hasarın nedenleri, çoğunlukla iki kategoride gruplandırılır: a) Çoğunlukla kırılma veya burulma ile gerçekleşen statik hasar ve b) Yorulma ve çatlak ilerlemesi ile gerçekleşen tekrarlı (döngüsel) hasar. Olasılıksal metotlar, hem statik, hem de yorulma senaryoları için yapısal hasar olasılığını belirlemek için geliştirilmiştir. Mevcut bir çatlak ilerlemesinin kritik bir uzunluğa varması ile uygulanan yükün bir kombinasyonu sonucunda oluşan kırılma veya yük taşıma kapasitesini aşan bir yük uygulanmasından kaynaklanan aşırı gerilme, sabit yada sabit hızla artan statik yükleme altında hasara neden olabilir.

Tekrar eden (döngüsel) yüklemelere maruz kalan yapıların çalışma ömrü, üretim kusurlarının varlığı yada döngüsel işletim sıcaklık dereceleri, basınçları ve yükleri gibi bir çok faktör sebebiyle sınırlı olabilir. Metal malzemelerde yapısal döngüsel hasar çoğunlukla çatlak büyümesi ile ilişkili iken, kompozitlerde döngüsel hasar (tam olarak anlaşılmamasına rağmen), matris malzemesinin kırılması ve/veya tekrar eden yük sebebiyle delaminasyon büyümesi sonucu oluşmaktadır.

3.4 Aşama 2- Kabul Edilebilir Hasar Olasılığının Belirlenmesi

Hasarın kabul edilebilir olasılığı, tasarımın kabul edilebilirliğinin belirlenmesi için, olasılıksal analiz sonuçlarının karşılaştırılacağı kriterdir. Toplam yapı için kabul edilebilir yada hedeflenen hasar olasılığının belirlenmesi, genellikle olasılıksal analizi uygulayan mühendis tarafından karar verilmeyecek karışık bir konudur.

Yasal, teknik ve sosyoekonomik faktörleri kapsar. Yapıyı onaylayan kuruluş, yapı için bu şartnamenin hazırlanmasından sorumlu olmalıdır. Uçaklar için önerilen hasar olasılığı değerleri- yazılı kaynaklarda daha çok- her bir uçuş için 1×10^{-7} den 1×10^{-9} 'a kadar öngörülür, fakat bu konu günümüzde henüz tam olarak çözümlenmemiştir.

Eğer bir mühendis sadece yapının bir parçasında bir olasılıksal analiz yapıyorsa, o bileşen için toplam sistem hedef seviyesini de veren, hasarın bir hedef olasılığını

hazırlamak gerekir. Yapısal bileşenlerin karmaşıklığına (ve bağımlılığına) bağlı olarak, bu taslak, gereksiz yük yollarının hesaplanması için kusur ağacı analiz metotlarının kullanımını gerektirebilir veya tüm bileşenler eşit derecede kritik ve bağımsızlarsa basit ve düz olabilir.

3.5 Aşama 3- Gerilme ve Mukavemet Modellerinin Geliştirilmesi

Olasılıksal yöntem, geleneksel yapısal analizin ve sonlu elemanlar teorisinin yerine geçmemiştir. Aksine olasılıksal yöntem, tasarım işleminin bir parçasıdır. Olasılıksal yapı tasarımı, varolan yapısal analiz işlemi çevresinde inşa edilmelidir. En iyi yaklaşım, olasılıksal analiz kodlarının, bu yapısal analiz programlarına ve prosedürlerine ara yüz olarak kullanılmasıdır. Bu şekilde, yapısal analiz çıktısı, olasılıksal programa doğrudan veri sağlar .

3.6 Aşama 4- Tasarım Değişkenlerinin İstatistiksel Olarak Nitelenmesi

Çoğu olasılıksal uygulamada yapısal güvenilirliğin belirlenmesi için istenen iki olasılıksal yoğunluk fonksiyonu (PDF: Probabilistic Density Functions), yapının maruz kalacağı maksimum gerilmeyle, yapının maksimum uygulanan gerilmeye direnecek malzeme dayanımını gösterir. Ne yazık ki, bu PDF'ler, doğrudan elde edilemez, test verilerinden ve/veya analiz sonuçlarından alınır.

Bunu gerçekleştirmek için genel bir prosedür, teorik dağılım ve gerçek veriler arasındaki uygunluk derecesi testidir. Bazı durumlarda, uygunluk derecesi testi, birkaç dağılım tipini kabul etmeyecektir. Bu nedenle, mühendis onların arasından seçim yapmalıdır. Eğer olasılık, dağılımın son bölümlerine (dağılım eğrisinin son kısımları, uç değerlerdir) duyarlıysa, ki çoğunlukla uçak yapısal güvenilirliğinin konusudur, hesaplanan hasar olasılığı, dağılımın temel formuna duyarlıdır. Bu durumda uygun dağılımın seçimi çok önemlidir. Bu bölüm, tasarım değişkenlerinin uygun dağılımlarını belirlemek için faktörler vermeyi amaçlamaktadır. Uygun dağılımları tanımlamak için iki referans, (1) M. Evans tarafından yazılan “İstatistiksel Dağılımlar” başlıklı kitap [6] ve (2) E. Fox tarafından yazılan [7] “Olasılıksal Tasarım Analizi için Ömür Etkenlerinin İstatistiksel Nitelenmesi” başlıklı teknik bir bildiridir.

3.6.1 Rastgele Değişkenin Tanımı

“Rastgele değişken” yaygın kullanımda, bir değişkenin ne değer alacağını bilinmediğini ifade eder. Fakat, matematikçiler için bu terimin kesin bir anlamı vardır: verilen herhangi bir durumda bu değişkenin değeri bilinmemesine rağmen, alabileceği değerler ve bu değerlerin olasılıkları bilinir. Rastgele değişken ile ilişkili tek bir deneyin sonucu, bu verilerden tam olarak tahmin edilemez fakat çok sayıda deneylerin sonucundan daha yakın tahminler yapılabilir. Daha fazla deney (daha geniş örnek uzayı), daha doğru tahmin sağlar. Bu nedenle, rastgele bir değişkenin tanımlanması için alabileceği değerlerin ve bu değerlerin olasılıklarının belirtilmesi gerekir.

Tasarım değişkenleri, test edildikleri çevre yada tanımlandıkları sırada yapılan işlemlere göre farklılaşan değişkenlik sergilerler. Bazı değişkenler, istatistiksel işlem kontrolü (SPC) ile izlenenler gibi, çok miktarda veriye sahipken, diğer değişkenler sınırlı sayıda veriye sahip olabilir. Bazı değişkenler, uçak ağırlık merkezindeki maksimum normal yük faktörü gibi bir ortalama değerden sonra kayan bir eğri sergilerken, geometrik tolerans gibi bazı değişkenler bir ortalama değer etrafında simetrik olabilirler.

Rastgele değişkenlerin ilk ayrımı, değişkenin sürekli yada süreksiz olduğudur. Eğer rastgele bir değişken, (a,b) gibi herhangi belli bir aralıktaki herhangi bir değeri alabiliyorsa “sürekli”dir. Eğer belli aralıkta sadece sınırlı bir grup değer alabiliyorsa, rastgele değişken “süreksiz” olarak değerlendirilir.

3.6.2 Sürekli Rastgele Değişkenler-Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF) ve İlişkili Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (CDF)

Eğer, rastgele bir değişken (a,b) gibi belli bir aralıkta tanımlanırsa, değişkenin a’dan b’ye alabileceği olası değerlerin sınırsız sayısı olabilir. Bu sebeple değişkenin bu aralıkta x gibi net bir değere eşit olması olasılığı sıfırdır ve fiziksel bir anlamı yoktur. Fiziksel olarak anlamlı olan, değişkenin x’ten $(x + \Delta x)$ alt aralığına düşmesi olasılığıdır. Olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF), x’in bir fonksiyonu olarak bu olasılıkların dağılımını gösterir. PDF’lerin yaygın olarak rastlanan örnekleri, normal, logaritmik, Weibull, beta ve uniform dağılımlardır. Bunların her biri, aşağıda açıklanmaktadır. (Kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF), PDF fonksiyonunun $-\infty$ ’dan

argumanın sonlu bir değerine kadar entegralidir ve argümanın keyfi seçilen bir değerinin, CDF'nin o arguman için olan değerinden az olması olasılığını temsil eder.

Bazı dağılımlar en az bir tarafta serbest olduğundan, sıklıkla hiçbir verinin gözlenmediği uç bir bölgede beklenen frekans bilgisini belirtirler. Bu uç bölge, hasar olasılığını oldukça etkilediğinden, bu dağılımlar sadece elde çok miktarda veri (uç değerleri elde etmeyi sağlayacak kadar) mevcutsa yada denemeler dağılımın kesin bir şekli olduğunu göstermiş ise kullanılmalıdır. Potansiyel olarak geniş miktarda verisi olan değişkenlere örnekler, bir üretim işlemi için SPC değişkenleri ve uçak yapısı için ivme verileri olarak gösterilebilir.

Her iki tarafta sınırlı sürekli dağılımlar, beta ve uniform dağılımları kapsar. Bu dağılımların doğruluğu, öncelikle fiziksel sınırları belirlemeye bağlıdır. Normal olarak daha az miktarda veri gereklidir. Çünkü veriler sadece sınırlar arasındaki en muhtemel değerleri belirlemek için kullanılırlar, yani dağılımın sonlarında modellenmesi gereken hiçbir uç değer yoktur.

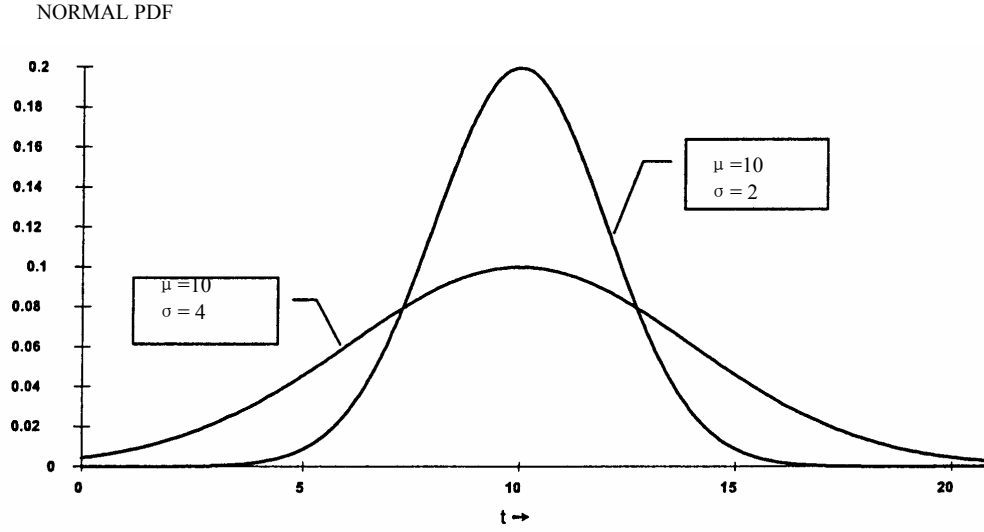
Eğer bir değer diğerinden daha “muhtemel” olarak tanımlanamıyorsa, uniform dağılım kullanılır. Eğer bazı değerlerin meydana gelme ihtimali diğerlerinden fazlaysa beta dağılımı kullanılabilir. Üiform ve beta'ya ek olarak, normal, logaritmik ve Weibull gibi sürekli dağılımlar, daha üst ve/veya daha alt limit değerlerinde kesilebilirler. Limitler, değişken ile ilişkili fiziksel sınırlamalar ve mühendislik kararı ile belirlenebilir. Tablo 3.1'de olasılık dağılım şekillerinin matematiksel tarifi görülmektedir.

Tablo 3.1. Olasılık Dağılım Çeşitleri.

Dağılım Tipi	Parametreler	Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF)
Normal	Ortalama: μ , Std.Sapma: σ	$f(t; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \} \quad -\infty < t < \infty$
Logaritmik	Ortalama: μ , Std.Sapma: σ Konum: t_0	$f(t; \mu, \sigma, t_0) = \frac{1}{\sigma(t-t_0)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t-t_0)-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \} \quad t > t_0$ $=0 \quad \} \quad t \leq t_0$
Weibull	Derece: θ , Şekil: β Konum: t_0	$f(t; \theta, \beta, t_0) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^\beta} \quad \} \quad t > t_0$ $=0 \quad \} \quad t \leq t_0$
Beta	Şekil Parametreleri: v, w	$f(t; v, w) = \frac{t^{v-1}(1-t)^{w-1}}{B(v, w)} \quad \} \quad 0 \leq t \leq 1$ $=0 \quad \} \quad t < 0, t > 1$
Uniform	Uç Noktalar: a, b	$f(t; a, b) = \frac{1}{b-a} \quad \} \quad a \leq t \leq b$ $=0 \quad \} \quad t < a, t > b$
Poisson	Ortalama: λ	$f(t; \lambda) = \frac{\lambda^t \exp(-\lambda)}{t!} \quad \} \quad t=0,1,2,3\dots \text{ ve } \lambda > 0$
Binomial	Deney sayısı, başarı : n, t Herbir deneyde başarı olasılığı: p	$f(t; n, p) = \binom{n}{t} p^t (1-p)^{n-t} \quad \} \quad t=0,1,\dots,n$

3.6.2.1 Normal Dağılım

Normal (Gauss) dağılım, en yaygın olarak bilinen dağılımdır. Normal dağılım, iki parametrelili bir dağılımdır: ortalama (μ) ve standart sapma (σ). Çoğu mühendisin bildiği gibi, ortalama (μ) ekseninden simetriktir. Şekil 3.2, farklı standart sapma (σ) değerleri için normal (μ) gösterir. σ azaldıkça PDF, ortalama doğrultusunda sıkışır ve yükselir. Standart sapma, ayrıca PDF'nin yükselip alçalma noktaları ve ortalaması arasındaki uzaklıktır.



Şekil 3.2. Normal Dağılım.

Normal rastgele değişkenlere çok çeşitli problemlerde rastlanılır. Merkezi limit teoreminden bilinmektedir ki, çok sayıda özdeş, bağımsız rastgele değişkenlerin toplamı, yaklaşık olarak normaldir. Gerçekten de bu teorem çok daha zayıf şartlar altında bile sağlanır, değişkenler özdeş ve bağımsız olmak zorunda değildir. Normal rastgele değişkenlere doğada neden çok sık rastlandığını açıklayan bu teoremdir. Çok sayıda küçük rastgele faktörlerin toplu bir etkisi varsa, sonuçta ortaya çıkan rastgele değişken normaldir.

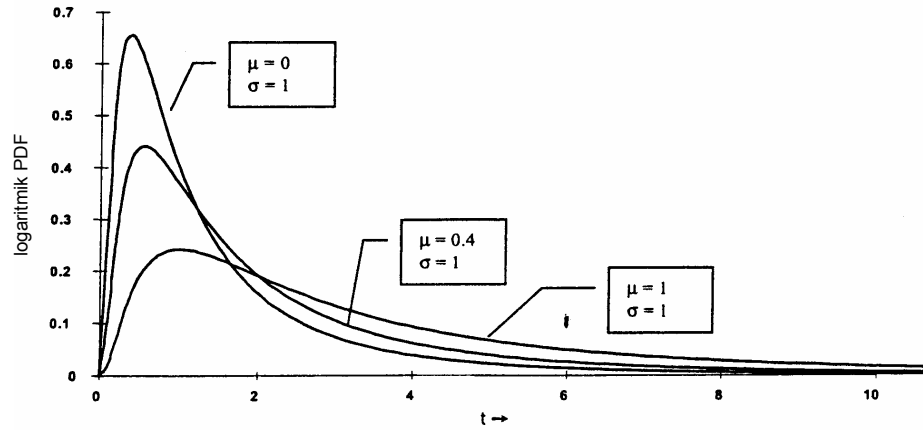
Doğada her şey normal dağılmamıştır. Normal dağılım, bazen hesaplamaların karışıklığına rağmen olasılıksal analizde kullanmak için uygunken, kullanılabilen en az ihtiyatlı dağılımlardan biridir. Bunun nedeni, fonksiyon değerlerinin, Weibull yada logaritmik eğrisinin sonuna kıyasla, ortalamadan çok daha çabuk olarak düşmeleridir. Bu, t 'nin dağılımda uç değerler sağlama ihtimalinin çok küçük olması demektir ve daha düşük hasar olasılığı olarak yorumlanır.

3.6.2.2 Logaritmik Dağılım

Eğer rastgele değişkenin doğal logaritması normal olarak dağıtılsa, rastgele bir değişken logaritmik dağıtılmıştır. Konum parametresi (yaygın olarak sıfıra ayarlıdır) olan t_0 'da başlar. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, logaritmik dağılım sağa doğru kayar. Bu kaymanın derecesi arttıkça, verilen bir ortalama değer için standart sapma artar. Aynı standart sapma için, Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, ortalama değer arttıkça eğrinin

kayması artar. Logaritmik dağılımın ortalama ve standart sapması, standart birimler cinsinden (logaritmik olmayan) ifade edilirse şöyledir:

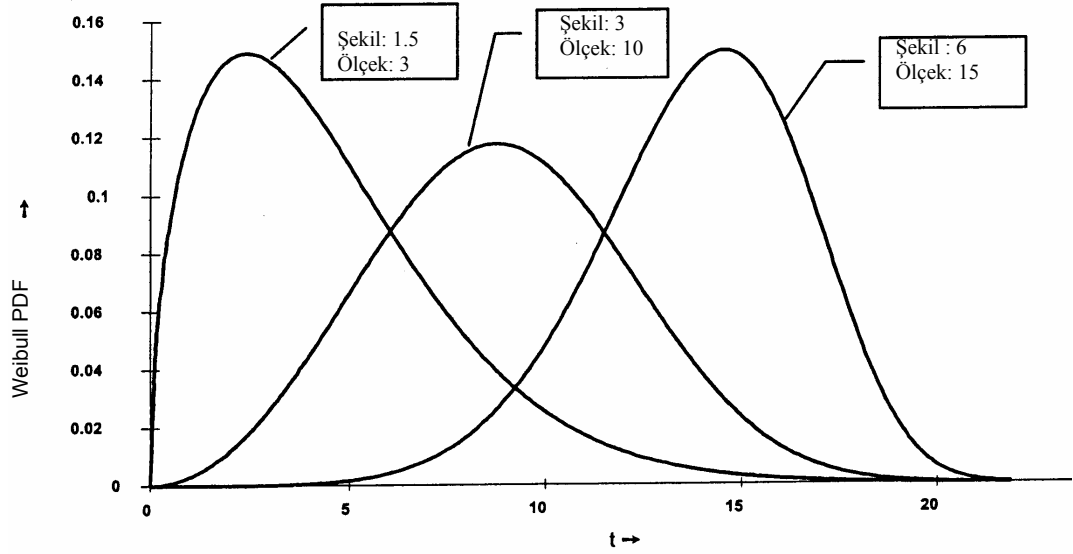
$$\text{ortalama} = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2} \quad \text{Standart Sapma} = \left[\left(e^{2\mu + \sigma^2} \right) \left(e^{\sigma^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$



Şekil 3.3. Logaritmik Dağılım.

3.6.2.3 Weibull Dağılımı

Waloddi Weibull, çok çeşitli problemlere uygulanabilen dağılımını yada dağılım ailesini, 1951’de yayınladı. İlk reaksiyon çoğunlukla negatifti fakat zaman onun doğru olduğunu gösterdi. Bugün, özellikle havacılık sanayinde ve farklı sanayilerdeki bir çok uygulamada kullanılmaktadır. Şekil 3.4’te görüldüğü gibi, bir yöne simetrik yükselerek değişen şekilli unimodal dağılımlar modellenebilir. Weibull dağılımı, karbon lifler ve seramikler gibi kırılğan malzemelerde yaygın olarak kullanılır çünkü bu tür malzemelerin, malzeme özelliklerindeki yayılmayı çok daha iyi temsil eder.

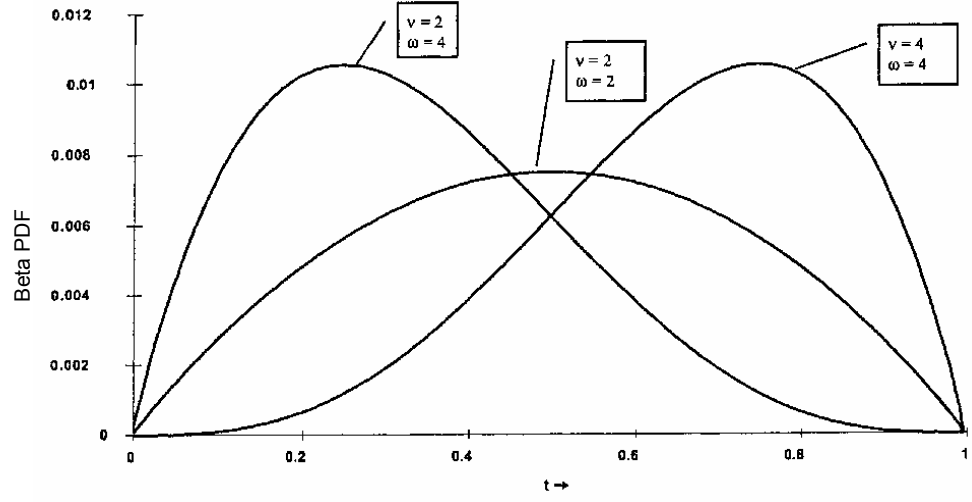


Şekil 3.4. Weibull Dağılımı.

Şekil parametresi (β) =1 için, iki parametrelili üstel dağılım olur ve $\beta > 1$ için, fonksiyon Şekil 3-4'te gösterilen şekilleri sağlar. 3'e yakın β (şekil) değerleri için, eğrilik (kayma) katsayısı sıfıra yaklaşır ve fonksiyon, normal dağılıma yaklaşıma eğilimindedir. Ölçek parametresindeki (θ) bir değişiklik, dağılım üzerinde, yatay koordinatın ölçüsündeki bir değişiklikle aynı etkiye sahiptir. Eğer, diğer iki parametre sabit tutulurken, θ yükselirse, dağılım, sağa kayar ve yüksekliği düşer. Konum parametresinden (t_o) ölçek parametresine (θ) kadar PDF altındaki alan (θ), 0.632'dir. Adından da anlaşıldığı gibi, t_o yatay koordinat boyunca dağılımı yerleştirir. t_o sıfır olduğunda, dağılım orijinde başlar.

3.6.2.4 Beta Dağılımı

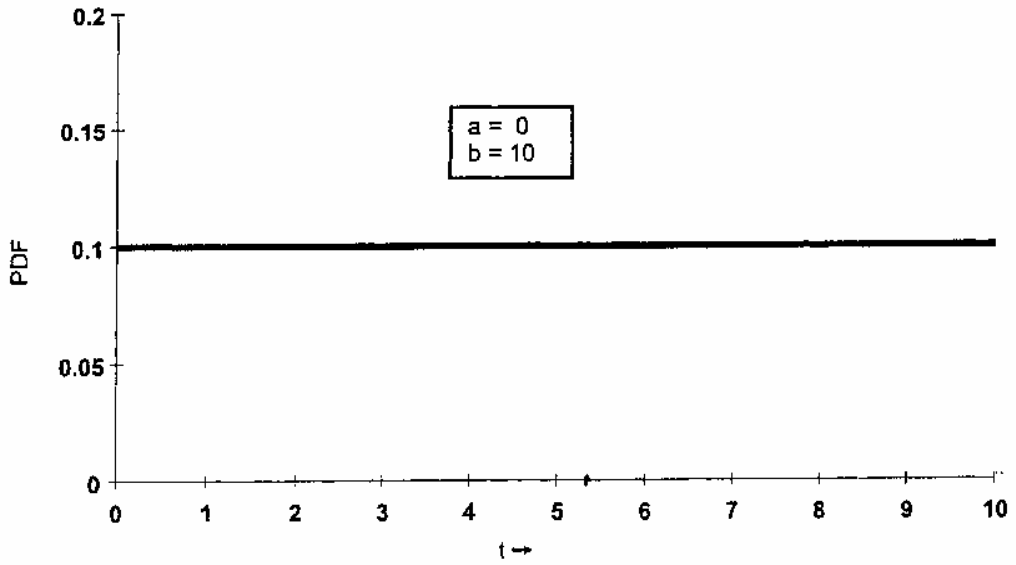
Bu dağılım, 0 dan 1'e kadar sınırlı bir aralıkta tanımlanır. Şekil 3.5'de görüldüğü gibi, dağılım, simetrik yada eğrilmiş bir şekil alma eğilimindedir. Bunun olasılıksal metot örneklerinde neden sık görülmediği net değildir ancak bu dağılıma uyguluk derecesi testlerinin uygulanabilir olmaması sebebiyle olabilir. Yaygın bilgisayar yazılımındaki istatistiksel kapasiteler, benzer uygunluk derecesi testlerinin değerini hızla sağlamaktadır (optimizasyon). Bu dağılımın kullanılmamasının başka bir nedeni, bilgi alanının sınırlı olmasıdır ve fiziksel sınırlamaları seçerken güvenilir olmadığı düşünülmesidir.



Şekil 3.5 Beta Dağılımı.

3.6.2.5 Uniform Dağılım

Daha önce ifade edildiği gibi, uniform dağılım, a dan b 'ye sınırlı aralıkta belirli bir değer ya da aralığa hiçbir ağırlık verilemediğinde kullanılır. Şekil 3.6'da, 0 ve 10 arasındaki herhangi bir değer, eşit meydana gelme ihtimaline sahip olacaktır.



Şekil 3.6 Uniform Dağılım.

3.6.3 Süreksiz Rastgele Değişkenler ve Poisson Dağılımı

X_i , değişkenin olası değerleri, p_i de bu değerlere karşılık gelen olasılıklar olmak üzere Süreksiz Rastgele Değişken, x_i , ve p_i 'nin bir tablosu ile tanımlanabilir. Değerler (x_i), keyfi olabilir fakat ilgili olasılıklar (p_i) negatif olmamalı ve toplamaları 1 olmalıdır. Olasılıklar tablosu, Poisson gibi süreksiz bir dağılımdan hesaplanabilir yada mühendisler tarafından önceden tanımlanabilir.

Poisson dağılımı, sabit bir bölge veya alanda yada sabit bir zaman süresinde bazı bilinmeyen olayların meydana gelme toplam sayısını modellemek için kullanılabilir. Northrop Grumman Metodolojisi, yapısal bir bileşende üretim kusurlarının sayısını modellemek için bu dağılımı kullanır. Poisson dağılımı, şu özdeşlikten sağlanabilir:

$$e^{-x} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 \quad (3.1)$$

Bu özdeşlik şu şekilde yazılabilir:

$$e^{-x} \left(1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots \right) = 1 \quad (3.1.a)$$

$$e^{-x} + \frac{x e^{-x}}{1} + \frac{x^2 e^{-x}}{2} + \dots + \frac{x^n e^{-x}}{n!} + \dots = 1 \quad (3.1.b)$$

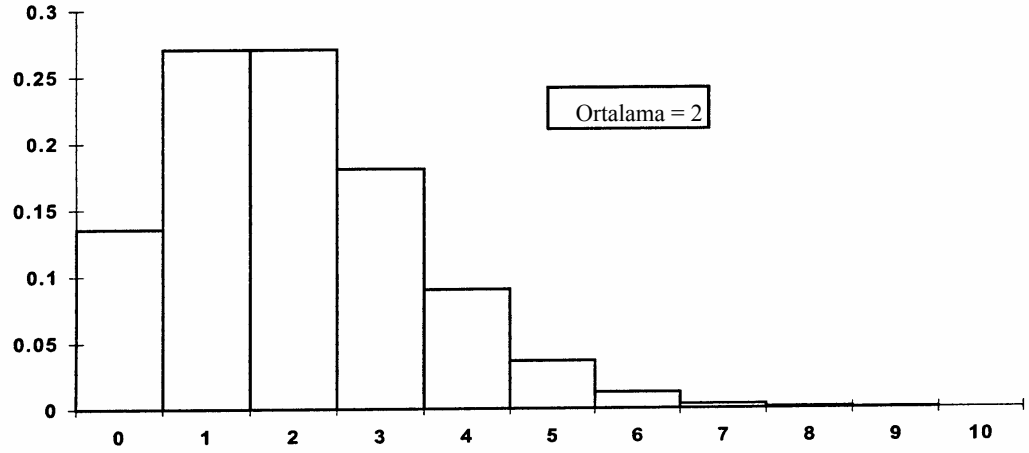
Bu dağılımın yorumu, aşağıdaki gibi yapılabilir. Her bir terim, bir olasılığı temsil eder. Eğer x , bir olayın beklenen yada ortalama meydana gelme sayısı olarak tanımlanırsa;

e^{-x} = oluşmayacak olay olasılığı

$x e^{-x}$ = kesinlikle bir kez oluşacak olay olasılığı

$\frac{x^2 e^{-x}}{2!}$ = kesinlikle iki kez oluşacak olay olasılığı ve bu şekilde gider.

Bir m^2 'deki kusur baz alınarak, kesin bir kusur için üretim kusuru oranı λ olsun. Öyleyse A alanına sahip bir yapısal bileşen için beklenen kusur sayısı $x = \lambda A$ olacaktır. Kusur oranı λ , her zaman sabit bir değer kabul edilir. Şekil 3.7'de x 'in 2 değeri için (beklenen veya ortalama kusur sayısı) bir Poisson olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) görülmektedir.



Şekil 3-7 Poisson Dağılımı.

3.6.4 Malzeme Testi Numune Ebatları ve Kompozit Malzeme Özellikleri için Kabuller

Kompozit malzeme testlerinde gözlemlenen saçılma miktarı, metallere kıyasla daha yüksek olma eğilimindedir. Kompozit malzeme özellik verilerindeki değişkenlik, ham maddenin partiden partiye değişkenliği, malzeme saklamadaki değişkenlikler, malzeme test yöntemleri gibi pek çok nedenden kaynaklanır. Ayrıca, kompozit malzemelerin özellikleri çevresel etkiler sebebiyle daha fazla bozulma (metallerle karşılaştırıldığında) gösterirler. Bu da farklı sıcaklık derecelerinde ve nem emme seviyelerinde test etmeyi gerektirir.

Partiden partiye değişkenlik nedeniyle, elde edilen veriler tüm partiye atfedilmemelidir. Tüm partiye atfetmek, değişkenliğin bu kaynağının (partiden partiye) göz ardı edilebilir olduğunu varsaymaktır. Malzeme özellik verileri, istisnai değerler (istatistiksel olarak diğer verilere ait olmayan değerler) için de test edilmelidirler. Amerikan askeri kompozit malzemeler el kitabı (MIL-HDBK-17); şüpheli bir değer için fiziksel nedenin araştırılmasını önerir (örneğin, test etmek yada ayarlama hatası). Eğer, bir neden bulunamazsa, değer saklanmalıdır.

Weibull dağılımı, kompozitleri de içeren, kırılma malzemelerin davranışını etkin olarak modellemek için kullanılmaktadır. MIL-HDBK-17, kompozit malzeme hata davranışını modellemek için, ilk seçim olarak, Weibull dağılımının kullanılmasını tavsiye etmektedir.

Önceden ifade edildiği gibi, Weibull'un bir avantajı, simetrikten yüksek derecede simetrik olmayan dağılımlara (yaklaşık olarak normal) kadar değişken şekillerle çalışabilmesidir.

Numune almanın amacı, eldeki miktarla ilgili bir veri edinmektir. Numune sayısı arttıkça, uç değerlerle sapma riski daha az, numune ve toplam miktar ortalaması ile standart sapma arasındaki yakınsama daha doğru olur. Pratik amaçlar için, numune sayısı en az otuz olduğunda numunelerin standart sapması, eldeki toplam miktarın standart sapmasına yeterli derecede yakındır.

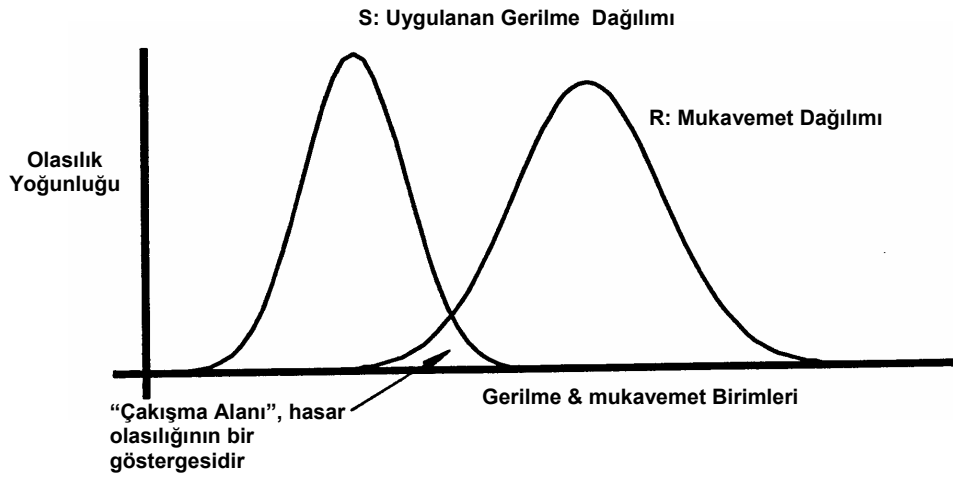
Mevcut uygulamada, olasılıksal tasarıma uygulamak için malzeme testinde optimum numune büyüklüğünün belirlenmesi konusunda hiçbir kriter yoktur. Özet olarak, numune sayısı arttıkça, dağılım parametrelerinin tahmin güvenilirlik aralıkları daralır. Numune büyüklüğü (sayısı) ile malzeme maliyeti ve hasarın tahmin edilen olasılığı arasında bağlantı kurmak için bir metot, referans [8]'de önerilmiştir. Bu yaklaşımda, belirlenen hasar olasılığı azaldıkça, optimum numune büyüklüğünün değeri artar. Optimum örnek büyüklüğü ile gösterilen dağılım tipi arasında da ilişki vardır.

Kompozit malzemelerle çalışırken, mümkün olduğu kadar az örneği test etmek hem maliyet hem de belirlenmiş zamana uymak açısından avantajdır, bu sebeple küçük numune büyüklükleri (çoğunlukla 30'dan daha küçük oldukları farz edilir) sıklıkla tasarım parametreleri için malzeme mukavemet değerlerini belirlemek için kullanılırlar. Buna neden olan başka bir faktör, yukarıda söz edildiği gibi, farklı ısı derecelerinde ve nem emme seviyelerinde bir çok farklı test yapılmasının gerekliliğidir. Örneğin, ticari bir uygulamada kullanılmak üzere kompozit bir maddeyi nitelemek için Amerikan federal havacılık dairesi, çevre şartlarına, sıcak-ıslak, soğuk-kuru ve oda sıcaklığı şartlarına maruz kalan üç ayrı parti malzeme için; çekme, basma ve kayma testlerindeki değerleri ister.

Numune büyüklüğünün olasılıksal tasarımda önemli bir konu olmadığı öne sürülmüştür, çünkü dağılım parametrelerinin ilk tahmini sınırlı verilerle yapılabilir. Sonra olasılıksal analiz, istenen malzeme özelliğinin hassasiyetini belirlemek için kullanılır. Eğer, hasar olasılığı malzeme özelliğine duyarlıysa, bu durumda daha fazla test etmek güvenli olacaktır. Eğer değilse, ek testler, para ve zaman kaybına sebep olur.

3.7 Aşama 5- Yapısal Güvenilirliğin Değerlendirilmesi

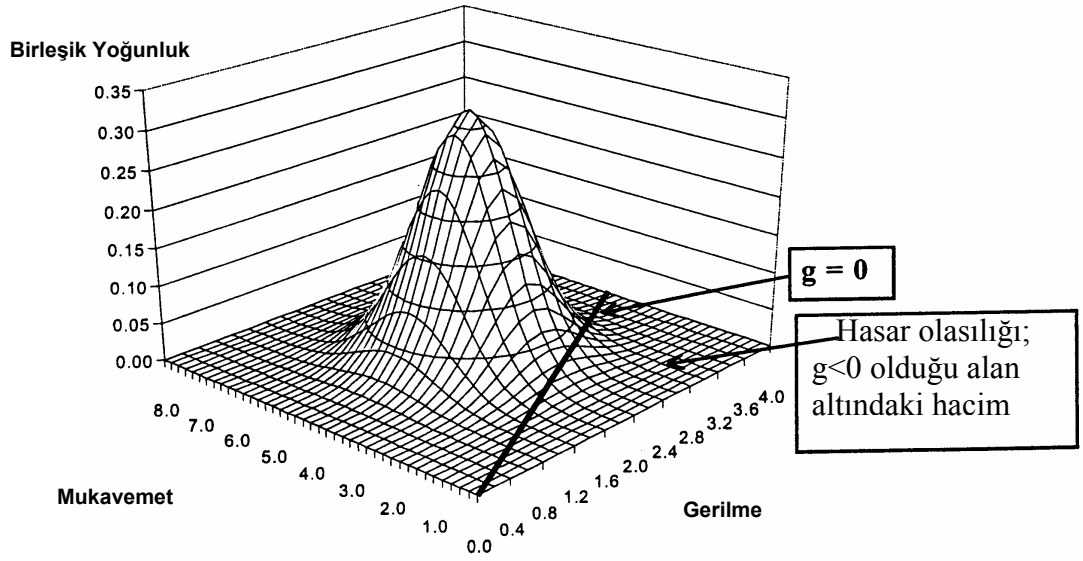
Olasılıksal analiz için temel problem, yapı üzerindeki yükü (yada gerilmeyi) ve yapının uygulanan yüke direncini (yani akma gerilmesi, yorulma dayanımı gibi mukavemet değerlerini) belirleyen ifadeleri düzenlemektir. Tipik bir tasarım şartı için hem gerilme hem de mukavemet, Şekil 3.8’de görüldüğü gibi aynı yatay eksende çizilebilir. Ortalama mukavemet değeri şekilde görüldüğü gibi uygulanan ortalama gerilmeden daha büyüktür. Fakat PDF’lerin üst üste binmesi şunu gösterir ki, mukavemet değerinin uygulanan gerilmeden daha az olması mümkündür; bu da hasar koşuludur. Bu örnek, olasılıksal yapısal analizin özünü açıklamaktadır: hasarın bir olasılığı vardır ve PDF eğrilerinin çakıştığı küçük bölgede tanımlanır.



Şekil 3-8 Basitleştirilmiş (2-Boyutlu) Düzenleme.

Gerilme-Mukavemet eğri çakışmasının teknik olarak tam bir tanıtımı, sırasıyla yatay ve dikey eksen boyunca gerilme ve mukavemeti gösteren, Şekil 3.9’da gösterilmektedir. Çizilen çizgi, gerilme = mukavemet yada $g(R,S) = R - S = 0$ olduğu senaryoları temsil eder. Bu durum, hasar alanını ($g < 0$) güvenli bölgeden ($g > 0$)’ı ayıran “limit durumu” olarak belirlenir.

Fonksiyon $g(R,S)$, yaygın olarak performans fonksiyonu olarak bildirilir. Hasar olasılığı, $g < 0$ olduğu hasar bölgesinde gösterilen alan altındaki hacim olarak tanımlanır.



Şekil 3.9 Problemin Üç Boyutlu Sunumu.

Hasar olasılığı, $PF = P[g(R,S) \leq 0]$ olarak tanımlanır. Uygulanan Gerilmeden ve malzeme direncinden başka, olasılıksal analizler için uygulanabilen, Tablo 3.2’de listeli, pek çok diğer R,S değişkenleri vardır.

Tablo 3.2 Havacılık Yapı Tasarımında Kullanılan Limit Durumu Düzenlemeleri.

Eğer R	$\leq S$ ise Hasar Oluşur.
Çalışma Boşluğu	$\leq$ Maksimum Yer değiştirme
Kırılma dayanımı	$\leq$ Gerilme yoğunluk faktörü
Kritik çatlak büyüklüğü	$\leq$ Oluşan çatlak büyüklüğü
Kritik malzeme kalınlığı	$\leq$ Korozyon derinliği
Dayanılabılır gürültü seviyesi	$\leq$ Ortam gürültü seviyesi

R’nin ve S’nin istatistiksel değişikliği sırasıyla olasılık yoğunluk fonksiyonları $f_R(r)$ ve $f_S(s)$ ile tanımlanır. Çakışma bölgesi (hacmi), nicel olarak aşağıdaki ifadelerden sağlanır:

$$P_f = \iint_{\Omega} f_{R,S}(r,s) dr ds \quad (3.2)$$

$f_{R,S}(r,s)$ birleşik yoğunluk fonksiyonu ve Ω hasar grubudur, yani $g(R,S) \leq 0$ sağlayan R’nin ve S’nin tüm değerler grubudur. Eğer R ve S değişkenleri istatistiksel olarak bağımsızlarsa (birini değiştirmek, diğeri üzerinde hiçbir etkiye sahip değilse; hiçbir

ortak değişken paylaşmıyorlarsa), o zaman birleşik yoğunluk fonksiyonu, aşağıdaki gibi bireysel yoğunluk fonksiyonlarının ürünü gibi ifade edilir:

$$f_{R,S}(r,s) = f_R(r)f_S(s) \quad \text{ve şu şekli alır:} \quad Pf = \iint_{\Omega} f_R(r)f_S(s)drds \quad (3.3)$$

Bu noktada, hasar olasılığını belirlemek için farklı ifadeler üreten 3 senaryoyu hesaba katmak gerekir: (1) hasar olasılığının, bir istatistik verileri ve hesap makinesi kullanarak bulunabildiği tek değişkenli durum, (2) hasarın olasılığının standart nümerik entegrasyon rutinleri kullanarak bulunabildiği iki değişkenli durum ve (3) olasılığı belirlemek için alternatif ortalamaların kullanılması gereken ikiden fazla değişkenli durum.

Örnek olarak, Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, tek eksenli çekme yüküne maruz kalan (P ile gösterilmektedir), kesit alanı A olan çelik bir çubuğu ele alalım. Hasar şekli kopma kabul edilmektedir ve uygulanan yük, çubuğun kabul edilen akma mukavemetini aşarsa (F_y ile gösterilmektedir), çubuk hasar görür.



Şekil 3.10. Gerilme Altında 17-7PH Çelik Çubuk.

Bu örnek düzenlemede üç farklı durum da kullanacaktır. Her bir durum, rastgele değişken olarak gözönünde bulundurulmuş farklı sayıda parametrelere sahip olacaktır. Bu örnek için performans fonksiyonu $g = F_y - P$ 'dir ve $g < 0$ hasarı gösterir.

3.7.1 Tek Değişkenli Hasar Olasılığının Belirlenmesi

Çelik çubuğa, bir çekme makinesinde laboratuvar testi yapılmış olsun. Yük, belirli bir P seviyesine kadar uygulansın. Bu seviyenin, makine kalibre edildiği için kesin olduğu (yada çok yakın olduğu) kabul edilebilir. Çubuğun boyutları, yüksek hassasiyette aletler kullanarak önceden ölçülmüş ve alanı 0.80 in^2 (516.1 mm^2) hesaplanmıştır. Böylece, P ve A parametrelerinin değişkenlikleri sıfır kabul edilecek ve tek olasılıksal değişken, akma mukavemeti olacaktır. Tüm parametreler bağımsız farz edilecektir. Yani kesit alanının ve akma mukavemetinin (σ_{akma}), uygulanan yükten etkilenmediği kabul edilecektir.

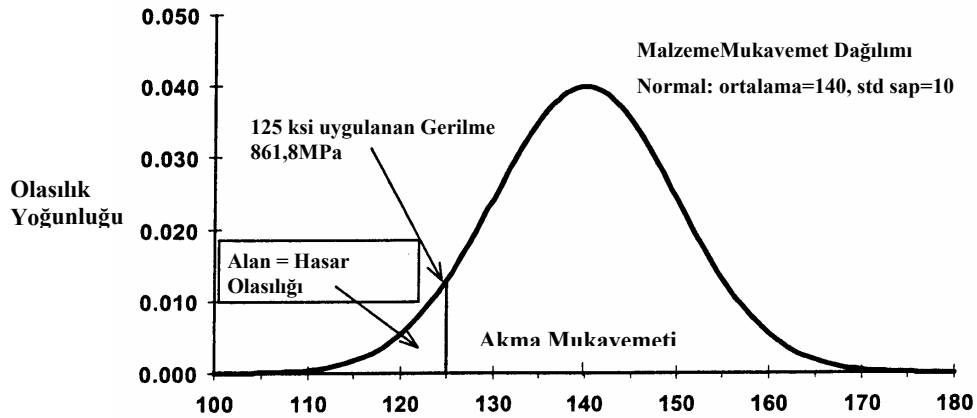
17-7PH çelik kuponu testinden alınan sonuçlar, uygunluk derecesi testi kullanılarak analiz edilmiş ve verilerin aşağıdaki parametrelerle normal bir dağılıma oldukça uyduğu belirlenmiştir.

Akma Gerilmesi, F_y : Ortalama = 140,000 psi = 965,3 MPa

Standart Sapma = 10,000 psi = 68,95 MPa

Problem: Eğer çubuk 100,000 lb (689,5 MPa) yüke maruz kalırsa, hasar olasılığı nedir?

Çözüm: Performans fonksiyonu $g = F_y \times 0.80 - 100,000$ şeklindedir. $g \leq 0$ olduğunda hasar oluşur ki hasar tanımımız olarak $F_y \leq 125,000$ psi, (861,8 MPa)'a dönüştürülebilir. Bu nedenle, teorik ortalama akma mukavemeti 140,000 psi ve standart sapması 10,000 psi olan malzemenin, akma mukavemeti 125,000'den az olacak şekilde üretilmiş olma olasılığını hesaplamak gerekir. Bu, Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Hasar Olasılık Belirlemesi.

Bu olasılık, bir hesap makinesi ve temel bir istatistik kitabı kullanarak bulunabilir. Önce gerilme değerleri, standart sapması 1 ve ortalaması 0 olan bir normal rastgele değişken z 'ye dönüştürülür. Standart sapması 1 ve ortalaması 0 olan rastgele bir değişkenin dağılımına, *standart normal dağılım* denir ve çoğu istatistik kitabında bu eğri (yada olasılıklar) altındaki alanların bir tablosu bulunur.

$$\text{Dönüşüm } z = \frac{\text{değer} - \mu}{\sigma} \text{ denklemi ile sağlanır.} \quad (3.4)$$

Böylece 125,000 değeri ; $z = \frac{125,000\text{ psi} - 140,000\text{ psi}}{10,000\text{ psi}} = 1.5$ değerine dönüşür.

Bir standart normal dağılım tablosuna bakarak, [s.104], $z = -1.5$ 'a kadar olan normal eğri altındaki alanın 0.0668 olduğu bulunur. Böylece malzemenin, 10,000 psi standart sapma ve 140,000 psi ortalama değerini sergilediğini bilerek, 125,000 psi'den daha az bir malzeme mukavemetine sahip olma olasılığı, yaklaşık olarak 0.067'dir. Böylece, çubuğun hasar olasılığı (Şekil 3-11'de gösterilen bölge) 0.067'dir.

3.7.2 İki Değişkenli Hasar Olasılığının Belirlenmesi

Çoğu durumda, iki PDF bulunduğunda hasar olasılığı, nümerik entegrasyon yolu ile belirlenir. Bu bölümde, çoğunlukla iki değişken durumunda ortaya çıkan ek bir faktörü hesaplamak amacıyla PDF parametrelerinin nasıl dönüştürüleceği anlatılmıştır. Nümerik entegrasyon uygulama gereksinimini gerektirmeyen, normal-normal ve logaritmik-logaritmik durumlar için bir açıklama verilmektedir. Bölüm, normal-normal ve logaritmik-logaritmik örnekleri ve nümerik entegrasyonun gerekli olduğu bir örnekle (logaritmik-normal durumu) sona erer.

3.7.2.1 PDF Parametrelerinin Ayarlanması

Performans fonksiyonunda ifade edilen tasarım değişkenlerinin yükseltilmesine (bir faktör ekleyerek) ve ölçeklendirilmesine (bir faktörle çarparak) genel olarak ihtiyaç duyulur ve PDF'lerin parametrelerini değiştirerek gerçekleştirilir. Çok nadiren, performans fonksiyonu, iki değişkenli durum için $g = x - y$ şeklinde olacaktır. Daha yaygın durum, $g = C_1x - C_2y + C_3$ olacaktır. Çünkü bir dağılıma uygun olan veriler, normal olarak x ve y 'dir. Bu nedenle, $[C_2y - C_3]$ 'yi tespit için bir PDF ve $[C_1x]$ 'i tespit için bir PDF'ye ihtiyaç duyulur. Çarpımsal ve toplamsal sabitler için hesaplama yapmak amacıyla x , y , PDF'lerin parametrelerini ayarlamak için prosedür, Tablo3.3'te gösterilmiştir.

Örneğin, Akma Mukavemeti değişkeni F_y 'yi tanımlamak için alınan ölçümler göz önünde bulundurularak, 10,000 psi'lik standart sapma (μ) ve 100,000 psi'lik ortalama (σ) ile bulunan bir normal dağılımın eldeki değerlere en uygun dağılım (eğri) olduğu kabul edilsin. Eğer performans fonksiyonu $g = 0.8 F_y - P$ ise, $0.8 X F_y$ değerinin standart sapmasını ve ortalamasını kullanmak üzerinde durulacaktır.

Böylece, yeni parametreler (Tablo3.3 için):

Ortalama: $0.8 \times 100,000 = 80,000$ ve

Standart sapma: $0.8 \times 10,000 = 8,000$ olur.

Tablo 3.3. Olasılık Dağılım Dönüşümleri.

Dağılım	Parametreler	Değişim	Yeni Parametreler
Normal	μ, σ	C_3 ile yükselt	$\mu + C_3, \sigma$
Logaritmik	μ, σ, t_0	C_3 ile yükselt	$\mu, \sigma, t_0 + C_3$
Weibull	Θ, β, t_0	C_3 ile yükselt	$\theta, \beta, t_0 + C_3$
Normal	μ, σ	$C_2 > 0$ ile çarp	$C_2 \mu, C_2 \sigma$
Logaritmik	μ, σ, t_0	$C_2 > 0$ ile çarp	$\mu + \ln C_2, \sigma, C_2 t_0$
Weibull	Θ, β, t_0	$C_2 > 0$ ile çarp	$C_2 \theta, \beta, C_2 t_0$

Bu parametreler, sonra hasar olasılığını değerlendirmek için kullanılacaktır.

3.7.2.2 Birinci Dereceden Güvenilirlik Metodu

İstatistiksel olarak bağımsız ve normal dağılımlı x ve y değişkenlerini varsayarak, değişken (performans fonksiyonu) $g = x - y$ yada $g = x + y$ normal dağılımlıdır. Şöyle ki, iki Gaussian değişkeninin doğrusal bir fonksiyonu olarak, g değişkeninin de Gaussian olduğu gösterilebilir. Tablo 3.4, normal PDF'lerin çıkarması ve toplaması ile ilişkili ortalamayı ve standart sapmayı göstermektedir.

Tablo 3.4. Normal Dağılımların Birleştirilmesi.

İşlem	Ortalama	Standart Sapma
$g = x + y$	$\mu_g = \mu_x + \mu_y$	$\sigma_g = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{1/2}$
$g = x - y$	$\mu_g = \mu_x - \mu_y$	$\sigma_g = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{1/2}$

Eğer, örneğin, performans fonksiyonu $g = x - y$ ise, daha sonra g 'nin ortalaması ve varyansı :

$$\mu_g = \mu_x - \mu_y \quad \text{ve} \quad (3.5)$$

$$\sigma_g = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{1/2} \quad (3.6)$$

denklemleriyle hesaplanır. Hasar durumu $g < 0$ 'dır. O zaman hasar olasılığı g cinsinden şu şekilde ifade edilir:

$$p(g|0) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_g \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{g - \mu_g}{\sigma_g} \right)^2} dg \quad (3.7)$$

$z = (g - \mu_g) / \sigma_g$ olsun. Bu takdirde $\sigma_g dz = dg$ dir. $g = 0$ olduğunda z 'nin üst limiti şöyle olur:

$$z = \frac{0 - \mu_g}{\sigma_g} = -\frac{\mu_g}{\sigma_g} = -\frac{\mu_x - \mu_y}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}; \quad (3.7.a)$$

Ve $g \rightarrow -\infty$ a giderken, z 'nin alt limiti $z \rightarrow -\infty$ dur.

Çıkarılan entegral, hasar olasılığıdır.

$$\text{Hasar olasılığı} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\mu_x - \mu_y}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}} e^{-z^2/2} dz \quad (3.8)$$

Rastgele değişken z , standart normal değişkendir. Bu nedenle, hasar olasılığı $-\infty$ 'dan $z = -\frac{\mu_x - \mu_y}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}$ 'a kadar olan eğrinin altındaki alan için standart normal tabloya

bakarak bulunabilir. Bu yaklaşım, Cornell tarafından geliştirilmiştir ve Birinci Dereceden Güvenilirlik Metodu'nun (FORM) [9] bir parçasıdır. Cornell, oranı, “emniyet indeksi” olarak adlandırmış ve onu β olarak ifade etmiştir.

$$\text{Emniyet indeksi ; } \beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = -\frac{\mu_x - \mu_y}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}; \quad P_f = \Phi\{-\beta\}$$

Burada Φ bir standart normal değişken için Kümülatif Dağılım Fonksiyonudur (Çoğu istatistik kitaplarında tablolar vardır). Bu denklem, hasar olasılığını hesaplamayı normal-normal durumu için son derecede basit ve hızlı hale getirmiştir.

3.7.2.3 Logaritmik-Logaritmik Durum

Tablo 3.1’de gösterilen PDF denkleminde μ ve σ parametreleri, verilerin doğal logaritmalarının ortalama ve standart sapmasıdır. Şöyle ki, eğer tüm test verileri doğal logaritmalara dönüştürülürse, daha sonra verilerin bir ortalama ve standart

sapması hesaplanırsa, o veriler μ ve σ olacaktır. Ortalama ve standart sapma, logaritmik olmayan birimlerde, aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$\text{ortalama} = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2} \quad \text{standart sapma} = \left[\left(e^{2\mu + \sigma^2} \right) \left(e^{\sigma^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

Hasar olasılığını hesaplamak için kullanılan denklem, normal-normal durumda kullanılanla özdeşdir fakat tekrar, μ ve σ 'nın yukarıdaki tanımı gözönüne alınırsa güvenlik indeksi:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = - \frac{\mu_x - \mu_y}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}} \quad (3.10)$$

şeklinde tanımlanır. $P_f = \Phi\{-\beta\}$; burada Φ bir standart normal değişken için Kümülatif dağılım Fonksiyonudur. Bu denklem, hasar olasılığını hesaplamayı Logaritmik-Logaritmik durumu için son derecede basit ve hızlı hale getirmiştir.

3.7.2.4 Diğer İki Değişkenli Durum

Tablo 3.5 normal, logaritmik ve Weibull PDF'lerinin dokuz farklı kombinasyonu için geliştirilen ifadeleri listeler. Sadece Logaritmik ve /veya Weibull dağılımlarını kapsayan kombinasyonlar için, gerilme dağılımının başlama noktasının (S_0), mukavemet dağılımının başlama noktasından (t_0) daha az olduğu farz edilir. Ticari olarak elde edilebilir matematik yazılım rutinleri yada nümerik entegrasyon tekniklerini kullanarak yazılabilen bir bilgisayar programı ile çözülebilirler.

Tablo 3.5. PDF Kombinasyonları İçin Hasar Olasılığı İfadeleri.

Gerilme-Dayanım Dağılımları	Hasar Olasılığı İfadesi
Normal - Normal (μ_s, σ_s) (μ_t, σ_t)	$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} z^2\right\} \Phi\left[\frac{\sigma_s z + \mu_s - \mu_t}{\sigma_t}\right] dz$
Normal logaritmik (μ_s, σ_s) (μ_t, σ_t, t_0)	$\int_{\frac{t_0 - \mu_s}{\sigma_s}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} z^2\right\} \Phi\left[\frac{\ln(\sigma_s z + \mu_s - t_0) - \mu_t}{\sigma_t}\right] dz$
Normal Weibull (μ_s, σ_s) (θ_t, β_t, t_0)	$\int_{\frac{t_0 - \mu_s}{\sigma_s}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} z^2\right\} \left[1 - \exp\left\{-\left(\frac{\sigma_s z + \mu_s - t_0}{\theta_t}\right)^{\beta_t}\right\}\right] dz$
logaritmik - Normal (μ_s, σ_s, s_0) (μ_t, σ_t)	$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} z^2\right\} \Phi\left[\frac{\exp(\sigma_s z + \mu_s) + s_0 - \mu_t}{\sigma_t}\right] dz$
logaritmik logaritmik (μ_s, σ_s, s_0) (μ_t, σ_t, t_0)	$\int_{\frac{\ln(t_0 - s_0) - \mu_s}{\sigma_s}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} z^2\right\} \Phi\left[\frac{\ln[\exp(\sigma_s z + \mu_s) + s_0 - t_0] - \mu_t}{\sigma_t}\right] dz$
logaritmik Weibull (μ_s, σ_s, s_0) (θ_t, β_t, t_0)	$\int_{\frac{\ln(t_0 - s_0) - \mu_s}{\sigma_s}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} z^2\right\} \left[1 - \exp\left\{-\left(\frac{\exp(\sigma_s z + \mu_s) + s_0 - t_0}{\theta_t}\right)^{\beta_t}\right\}\right] dz$
Weibull - Normal (θ_s, β_s, s_0) (μ_t, σ_t)	$\int_0^{\infty} \exp(-z) \Phi\left[\frac{\theta_s z^{1/\beta_s} + s_0 - \mu_t}{\sigma_t}\right] dz$
(θ_s, β_s, s_0) (μ_t, σ_t, t_0) Weibull logaritmik	$\int_{\left[\left(\frac{t_0 - s_0}{\theta_s}\right)^{\beta_s}\right]}^{\infty} \exp(-z) \Phi\left[\frac{\ln(\theta_s z^{1/\beta_s} + s_0 - t_0) - \mu_t}{\sigma_t}\right] dz$
(θ_s, β_s, s_0) (θ_t, β_t, t_0) Weibull Weibull	$\int_{\left[\left(\frac{t_0 - s_0}{\theta_s}\right)^{\beta_s}\right]}^{\infty} \exp(-z) \left[1 - \exp\left\{-\left(\frac{\theta_s z^{1/\beta_s} + s_0 - t_0}{\theta_t}\right)^{\beta_t}\right\}\right] dz$

3.7.2.5 İki-Değişkenli Örnek Problemler

Çekmeye maruz kalan çelik çubuk örneğini ele alalım. Çubuk önceden boyutsal olarak kontrol edilmiştir. Alan (A), bilinen sabit bir değerdir. Çubuk, iki sabitleme elemanı arasında bir bağlantı olarak kullanılmaktadır ve çubuk iç bölgesinde (bağlantı noktasında hasara direnerek) hasar oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Tek eksenli gerilme şeklinde modellenen yükleme, 50 yük ölçümünün yapıldığı benzer bir uygulamada ölçülmüştür. İleride üç durum tartışılacaktır: (1) normal – normal; (2) logaritmik-logaritmik ve (3) logaritmik-normal.

3.7.2.6 Senaryo 1 (Normal-Normal Durum)

50 ölçüm, istatistiksel olarak analiz edilmiş ve uygunluk derecesi testinden, verilerin aşağıdaki parametrelerle en çok normal dağılıma uyduğu belirlenmiş olsun:

$$\begin{aligned} P: \quad \text{Ortalama} &= 100,000 \text{ lb} \\ \text{Standart Sapma} &= 10,000 \text{ lb} \end{aligned}$$

17-7PH çelik akma mukavemeti kupon testi ve uygunluk derecesi testi analizinden verilerin, aşağıdaki parametreler ile en çok normal dağılıma uyduğu belirlenmiş olsun:

$$\begin{aligned} F_y: \quad \text{Ortalama} &= 140,000 \text{ psi} \\ \text{Standart Sapma} &= 10,000 \text{ psi} \end{aligned}$$

Çubuğun kesit alanı, 0.80 in^2 olarak ölçülsün.

Problem: Servisteki 0.80 in^2 kesit-alanına sahip 17-7PH çelik çubuğun hasar olasılığı nedir?

Çözüm: Performans fonksiyonu, $g = F_y \times 0.80 - P$ 'dir. Güvenlik endeksini aşağıdaki gibi hesaplarız: (0.80 ölçeğe göre μ_{F_y} ve σ_{F_y} parametrelerini ayarlamamız gerektiğini hatırlayarak):

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{0.8\mu_{F_y} - \mu_P}{\sqrt{0.8^2\sigma_{F_y}^2 + \sigma_P^2}} = \frac{12,000 \text{ lb.}}{12,806 \text{ lb.}} = 0.937$$

Standart normal olasılık tablolarından,[Tablo A.1.], $P_f = \Phi \{-\beta\} = \Phi \{-0.937\} = 0.1745$ olduğu bulunur.

3.7.2.7 Senaryo 2 (Logaritmik-Logaritmik Durum)

50 yük ölçümü sonucu, eğri sağa doğru kayma gösterdiğinden, normal olmayan dağılım gözlenmiş olsun. Bu veriler, istatistiksel olarak analiz edildiğinde ve uygunluk derecesi testinden de, aşağıdaki parametrelerle en çok , iki parametrelili logaritmik dağılıma uyduğu belirlenmiş olsun:

$$\begin{aligned} P: \quad \mu &= 11.508 \\ \sigma &= 0.10 \end{aligned}$$

17-7PH çelik malzeme akma mukavemeti kupon testinden alınan sonuçlar, uygunluk derecesi testi kullanılarak analiz edilsin ve aşağıdaki parametrelerle en çok iki parametrelili logaritmik bir dağılıma uyduğu belirlenmiş olsun:

$$F_y: \mu = 11.847$$

$$\sigma = 0.0713$$

Çubuğun kesit alanı, 0.80 in^2 olarak ölçülsün.

Not: μ ve σ 'nın değerleri, önceki normal-normal örneğinde kullanılan ortalamalara ve standart sapmalara karşılık gelir.

Tasarım değişkenleri F_y ve P 'ye karşılık gelen ortalama ve standart sapma değerleri:

$$F_y: \text{Ortalama} = 140,000 \text{ psi} \quad \text{ve} \quad P: \text{Ortalama} = 100,000 \text{ lb}$$

$$\text{Standart sapma} = 10,000 \text{ psi} \quad \text{Standart sapma} = 10,000 \text{ lb}$$

Problem: Servisteki 0.80 in^2 kesit alanı olan 17-7PH çelik çubuğun hasar olasılığı nedir?

Çözüm: Performans fonksiyonu, $g = F_y \times 0.80 - P$ 'dir. F_y dağılımı için μ parametresi ayarlanmalıdır. Çünkü uğraştığımız dağılım artık, $0.80 \times F_y$ 'dir. Tablo 3.3'e göre, sadece μ parametresi 0.80 ölçekten etkilenmektedir (σ aynı kalmaktadır). Ayarlanan μ parametresi:

$$\mu = 11.847 + \ln(0.8) = 11.624. \quad \sigma = 0.0713 \text{ (değişmedi).}$$

Güvenlik indeksi,

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{11.624 - 11.508}{\sqrt{0.0713^2 - 0.100^2}} = 0.945$$

Standart normal olasılık tablosundan, $P_f = \Phi \{-\beta\} = \Phi \{-0.945\} = 0.1724$ olduğu bulunur.

3.7.2.8 Senaryo 3 (Logaritmik-Normal Durum)

50 yük ölçümü sonucu eğri, sağa doğru kayma gösterebilir, bu veriler istatistik olarak analiz edilsin ve uygunluk derecesi testinden de aşağıdaki parametrelerle en çok 2 parametrelili logaritmik dağılıma uyduğu belirlenmiş olsun:

$$P: \mu_s = 11.508$$

$$\sigma_s = 0.1000$$

17-7PH çelik akma mukavemet testi sonuçları, uygunluk derecesi testi kullanılarak analiz edilsin ve verilerin aşağıdaki parametrelerle en çok normal dağılıma uyduğu belirlenmiş olsun.

$$F_y: \mu = 140,000 \text{ psi}$$

$$\sigma = 10,000 \text{ psi}$$

Çubuğun kesit alanı, 0.80 in^2 olarak ölçülsün.

Problem: Servisteki 0.80 in^2 kesit alanı olan bir 17-7PH çelik çubuğun hasar olasılığı nedir?

Çözüm: Performans fonksiyonu, $g = F_y \times 0.80 - P$ olur. F_y dağılımı için parametre μ 'nün ayarlanması gerekmektedir. Çünkü söz konusu dağılım artık, $0.80 \times F_y$ 'dir. Tablo 3-3'e göre, normal dağılımın ortalama ve standart sapması, 0.8 ile ayarlanır (çarpılır). Ayarlanan parametreler:

$$\mu_t = 140,000 \text{ psi} \times 0.8 = 112,000$$

$$\sigma_t = 10,000 \text{ psi} \times 0.8 = 8,000$$

Tablo 3-5'te verilen logaritmik-normal entegrasyon denklemini çözmek için FORTRAN yazılımı kullanılır.

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) \Phi\left[\frac{\exp(\sigma_s z + \mu_s) + s_0 - \mu_t}{\sigma_t}\right] dz$$

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) \Phi\left[\frac{\exp(0.1z + 11.508) - 112,000}{8,000}\right] dz$$

Programdan alınan sonuç 0.1734 olur.

3.7.2.9 İki Değişkenli Örnek Problemlerin Özeti

Aynı fiziksel problem kullanılarak normal- normal durum, güvenlik endeksi kısa yol metodunu içeren logaritmik-logaritmik durum ve sayısal entegrasyonu gösteren logaritmik-normal durumları üç ayrı senaryo şeklinde gösterilmiştir. Sonuçlar Tablo 3.6' da özetlenmektedir.

Tablo 3.6. İki-Değişken Örnek Özeti

Durum	Gerilme Dağılımı	Mukavemet Dağılımı	Hasar olasılığı
1	Normal $\mu = 100,000; \sigma = 10,000$	Normal $\mu = 112,000; \sigma = 8,000$	0.1745
2	Logaritmik $\mu = 11.508; \sigma = 0.1; S_0 = 0$	Logaritmik $\mu = 11.624; \sigma = 0.713; S_0 = 0$	0.1724
3	Logaritmik $\mu = 11.508; \sigma = 0.1; S_0 = 0$	Normal $\mu = 112,000; \sigma = 8,000$	0.1734

Bundan çıkan sonuç, dağılım seçiminin hasar olasılığı üzerinde göz ardı edilebilir etkiye sahip olduğudur. Bu durum örneklerdeki senaryolar gibi dağılımların birbirine yakın olduğu ve önemli oranda üst üste çakıştığı durumlarda geçerlidir, ancak dağılımların birbirinden farklı olduğu durumlar için geçerli değildir. Bunu daha iyi görebilmek için, akma mukavemeti ortalamasının 140 psi yerine 200 psi olduğu farz edilirse, dağılımlar arasındaki farkın önemli oranda arttığı görülür. Hasar olasılıklarının sonuçları, Tablo 3.7’de gösterilmektedir.

Tablo 3.7. Sonuç Hassasiyetini Gösteren İki Değişken Özeti.

Durum	Gerilme Dağılımı	Mukavemet Dağılımı	Hasar olasılığı
1	Normal $\mu = 100,000; \sigma = 10,000$	Normal $M = 160,000; \sigma = 8,000$	1.4×10^{-6}
2	Logaritmik $\mu = 11.508; \sigma = 0.1; S_0 = 0$	Logaritmik $\mu = 11.982; \sigma = 0.05; S_0 = 0$	1.1×10^{-5}
3	Logaritmik $\mu = 11.508; \sigma = 0.1; S_0 = 0$	Normal $M = 160,000; \sigma = 8,000$	1.4×10^{-5}

Tablo 3.7’den alınan sonuçlar, olasılıksal literatürde sıklıkla söz edilen sonuç hassasiyetini örnekle göstermektedir.

3.7.2.10 İki Değişkenden Daha Fazlası İle Hasar Olasılığı

Bir çok gerçek uygulamada, özellikle havacılık yapılarında, performans fonksiyonu tanımlanabilir bile değildir. Performans fonksiyonu belirlenebilir olsa bile, çoğunlukla ikiden fazla rastgele değişken vardır ve meydana gelen çoklu entegralin çözümü ve değerlendirilmesi çok zordur. Bu bölümde, bu gibi durumlarda faydalanılacak metotlar açıklanacaktır.

Monte Carlo simülasyon tekniği, aşağıda en basit şekliyle sunulmuştur. Simülasyonu hızlandırma tekniklerinde iyileştirmelerden kısaca bahsedilecektir. Bu, cevap yüzeyi

yaklaşımı metodunun detaylı bir açıklaması ile takip edilecek ve son olarak geçen 15 yılda basılan çoğu olasılıksal metot araştırmasının odağı olan limit durum yaklaşım metotlarının ayrıntılı bir açıklaması olacaktır.

3.7.3 Monte Carlo Simülasyonu

Bu metodun genel amacı, rastgele değişkenlerin simülasyonu ile matematik problemlerini çözmektir. İlk olarak 1949'da, "Monte Carlo Metodu" başlıklı bir yazı yayınlanmıştır. "Monte Carlo" adı, gazinoları ile ünlü Monte Carlo şehriden gelmektedir. Rastgele değişkenleri üretmek için en basit mekanik yöntemlerden biri, rulet tekerleğidir, böyle çağrışım yapar. Bu yöntemin teoriksel temeli, 1949'daki yazı basılmadan çok önce bilinmekteydi ve problemler, rastgele örnekleme yöntemleriyle çözülmekteydi. Rastgele değişkenlerin el ile simülasyonu, yorucu bir işlem olduğundan, evrensel bir sayısal teknik olarak Monte Carlo yönteminin kullanımı, bilgisayarların kullanımı ile kolay hale gelmiştir.

Bu metotla ne tür problemlerin çözülebilir olduğunu anlamak için metodun, gelişimi rastgele faktörlerden etkilenen herhangi bir durumun simülasyonunu sağladığını belirtmek önemlidir. Monte Carlo simülasyonu, olasılıksal yapısal analizler için yaygın olarak kullanılan ve iki ana amaca hizmet eden bir yöntemdir: (1) analitik metotları doğrulamak ve (2) analitik yaklaşımlar uygulanabilir olmadığında geniş, karışık sistemleri çözmek.

İkinci durum, performans fonksiyonu $[g(X)]$ bir çok değişkenlerin bir fonksiyonu olduğunda yada X_i rastgele değişkenleri cinsinden ifade edilemediğinde ortaya çıkar. Bu durumda, $g(X)$ sadece girdi değişkenlerinin grupları için sonlu elemanlar metodu gibi yapısal bir analizle sayısal olarak değerlendirilebilir. Şöyle ki, Monte Carlo simülasyonu, sistemin birden çok sonlu eleman analizini uygulamak için girdi sağlayabilir (girdi değişkenlerinin her bir grubu için bir analiz/sonuç) ve sonra hasar oluş sayılarını hesaplayabilir ve başarı tahmin edilir.

Bilinen bir performans fonksiyonuna $g(X)$, karşılık gelen hasar olasılığını değerlendirmek için Monte Carlo simülasyon metodu, aşağıdaki aşamalardan oluşur:

1. Performans fonksiyonundaki rastgele değişkenlerin önceden tanımlanmış PDF'leri verilir, her bir değişkenin tek bir değeri türetilir.
2. Performans fonksiyonu değerlendirilir: eğer $g(X) < 0$ ise, sistem hasarı oluşur.
3. 1 ve 2 no'lu aşamalar, N kez tekrarlanır.

4. N_f hasarların sayısı olmak üzere, P_f (hasar olasılığı) = N_f / N ile hasar olasılığı tahmin edilir.

Bilinmeyen bir performans fonksiyonuna karşılık gelen $g(X)$ hasar olasılığını değerlendirmek için Monte Carlo simülasyon metodu, aşağıdaki aşamalardan oluşur:

1. Deterministik yapısal analizde (örneğin sonlu elemanlar yöntemiyle) bulunan rastgele değişkenlerin önceden tanımlanan PDF'leri verilir, her bir değişkenin tek bir değeri türetilir.
2. Deterministik analiz uygulanır ve eğer hasar tahmin edildiyse kaydedilir.
3. 1 ve 2 nolu aşamalar N kez tekrarlanır.
4. N_f hasar olasılığı olmak üzere, $P_f = N_f / N$ ile hasar olasılığı tahmin edilir.

3.7.3.1 Gerekli Deneylerin Doğruluğu ve Sayısı

Bu P_f (hasar olasılığı) değeri, gerçek P_f 'nin bir tahminidir. Aslında, hasar olasılığının ortalama bir değeridir. Bu tahminin doğruluğu, numune büyüklüğüne yani simülasyon sayısına bağlıdır. N sonsuza yaklaşırken, tahmini P_f doğru değere yaklaşmış olacaktır (eğer rastgele sayı üretici iyiye). Elbette bulunacak P_f değeri, PDF'lerdeki, analizdeki, modellerdeki v.b.deki hatalara göre gerçek P_f 'nin bir tahminidir. Çözmek için tek bir anahtar konu, gerekli simülasyonların sayısının tespitidir.

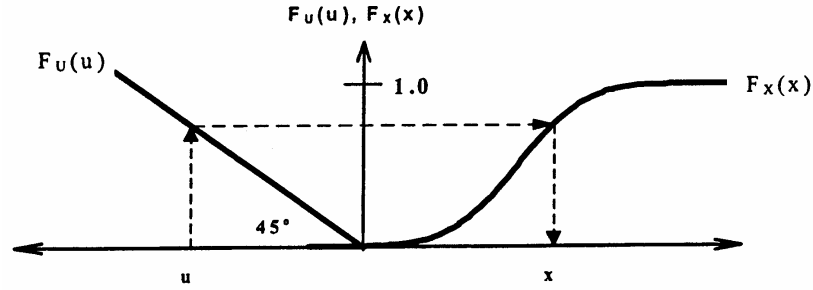
Hesaplama hatası, bir kural olarak N deney sayısı olmak üzere $(1/N)$ büyüklüğünün kare köküyle orantılıdır. Bu nedenle, 10 faktörü ile hatayı düşürmek, 100 faktörü ile N 'yi yükseltmek gereklidir. Tahmin edilen bir hasar olasılığı için gerekli kaç tane simülasyon olduğu sorusunu belirlemek için, Shooman yüzde hatası ve N simülasyon sayısı ile ilgili aşağıdaki formülü türetmiştir:

$$\% hata = 200 \sqrt{\frac{1 - P_f}{N \cdot P_f}} \quad (3.11)$$

Bu denklem % 95'lik bir güvenlik temel alınarak geliştirilmiştir. Bu nedenle hasar olasılığı tahminindeki hata, bu denklemle türetilen hatadan % 95 ihtimalle az olacaktır. Örneğin eğer 10 simülasyon uygulandıysa ve tahmini olasılık 0.01 ise, bu denklem %20 hata verir. Bu, gerçek hasar olasılığının 0.010 ± 0.002 arasında olacağından %95 emin olunduğunu göstermektedir.

3.7.3.2 PDF'lerden Rastgele Sayılar Üretme

Her bir girdi değişkeninin değeri, seçilen toplam grubun, o değişkenin karakteristik olasılığının göstergesi olacak şekilde seçilmelidir. Temel yapı bloğu, 0 ve 1 arasında uniform bir dağılımdan rastgele sayılar türetebilmektedir ve $U(0,1)$ olarak gösterilir. Aralıktaki her değer, eşit seçilebilme ihtimaline sahiptir. Rastgele sayı türeticiler, bilgisayar yazılımlarında genelde bulunan özelliklerdir. Rastgele bir sayı $U(0,1)$ 'den seçildikten sonra, ilgili PDF'nin rastgele bir değerini türetmek için kullanılır. Eğer, rastgele değişken X 'in CDF'si (Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonu) $F_X(x)$ ile gösterilirse ve u türetilen rastgele sayıysa, değişken (X)'e karşılık gelen değer $x = F_X^{-1}(u)$ dur. Prosedür, Şekil 3-12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Rastgele Değişkene Dönüşen $U(0,1)$.

Bu grafik sağ taraftaki rastgele değişken X 'in CDF eğrisini ve sol taraftaki U 'nun CDF eğrisini göstermektedir. U , uniform $(0,1)$ dağılımından seçilmiş olduğundan, U 'daki CDF değeri yine U 'nun kendisine eşittir. Şöyle ki, uniform PDF, $f_X(x) = \frac{1}{b-a}$ 'dır ve CDF'si ; $F_X(x) = \frac{x-a}{b-a}$ 'dır. $U(0,1)$ dağılımı için $a = 0$ ve $b = 1$ olduğundan, U 'nun CDF değerinin gerçekten U olduğu görülür.

Bu durumda, Şekil 3.12'ye göre, CDF değeri (U) alınır ve bu kısmi kümülatif olasılığa sahip olan rastgele değişken x 'in değeri bulunur. Bu kümülatif olasılık, hem istatistiksel bilgisayar yazılımlarından, hem de pek çok tablolardan bulunabilir. Şöyle ki, U değeri programa girilerek ve değişkenin dağılım parametrelerini de bilerek, kümülatif bir olasılık değeri elde edilir.

3.7.3.3 İlişkili Rastgele Değişkenler

Eğer değişkenlerin tamamı veya bir kısmı ilişkiliyse (birindeki bir değişim, diğeri üzerinde bir etkiye sahipse), bağımsızlarmış gibi her bir PDF den örneklemek hatalıdır. Genelde, ilişkili değişkenleri türetmek zordur. İlişkili olmayan değişkenlerde ilişkili değişkenlere dönüşüm yapmak için çeşitli prosedürler bulunmaktadır.

3.7.3.4 Simülasyon Etkinliğini Geliştirme Yaklaşımları

Açık bir Monte Carlo metodu, uygulamaların bir bölümü için çok kullanışlıyken, büyük sonlu eleman modellerinde oldukça fazla zaman almaktadır. Her bir sonlu eleman çözümü, yapısal hasar olasılığı çok küçük olsa bile, birkaç saat alabilir. Doğrudan Monte Carlo analizi, çoğunlukla uygulanabilir değildir. Bunu aşmak için yapılan araştırmaların sonucunda simülasyon etkinliğini yükseltmek için birtakım yollar saptanmıştır. Ana teknikler, aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

Kritik Örneklem: Bu teknik, her bir rastgele değişkenin tüm olası değerlerine dağılmış örnek noktalar yerine, hasar olasılığına katkıda bulunan bölgedeki örnek noktalarına yoğunlaşır. Çok sayıda hasarla sonuçlanmayan (performans fonksiyonu $g(X) > 0$) durumu) simülasyonu gerçekleştirmek yerine bu teknik, analiz etmek için hasarla sonuçlanabilecek az sayıda önemli simülasyonu arar. Önemli örnekleri oluşturmak için her bir değişkenin PDF'si değiştirilir. Değişiklikler, hasar olasılığı hesaplanırken dikkate alınır. Son zamanlarda, etkinliği yükseltmek için kritik olasılık bölgelerinde de örneklemeye odaklanan uyarlamalı kritik örneklem teknikleri geliştirilmiştir.

Dağıtılmış Örneklem: Beklenen hasar olasılığı baz alınarak, yapılması gereken simülasyon sayısı belirlendikten sonra, bağımsız oldukları varsayılan rastgele değişkenlerin etki alanı, toplamaları N ye eşit olan, eşit olasılıkta bölgelere ayrılır. Sonra, her bir bölgeden örnek bir rastgele değişken üretilir ve her bir örnek için bir g fonksiyonu bulunur. Toplam hasarla sonuçlanan simülasyon sayısının ($g < 0$ durumu) toplam simülasyona oranı hasar olasılığını verir.

3.7.3.5 Özet

Monte Carlo simülasyonu, tüm diğer metotlara göre büyük bir avantaja sahiptir. Çünkü analizde gerekli yöntemi kısıtlamaz. Monte Carlo, genellikle karşılaştırılan diğer metotlara göre temel çizgidir. Aslında, bir çok bildiride, Monte Carlo hata yüzdesi ifadeleri bulunmaktadır. Bunun nedeni verilen yeterli sayıda yapılan simülasyonlar sonucunda, Monte Carlo, her zaman aynı sonuca yakınsayacaktır. Daha önce belirtildiği gibi, hasarın elde edilen bu olasılığı, yakınsamaya rağmen, hala gerçek hasar olasılığının bir tahminidir.

3.7.3.6 Monte Carlo Örnek Problemi

Şekil 3.13'te görülen kesit alanı A ve akma mukavemeti F_y olan bir 17-7PH çelik çubuk tek eksenli bir gerilme yükü P 'ye maruz kalmaktadır. Benzer şekilde imal edilen diğer çubuklar gibi, A alanı 0.7in^2 ve 0.9 in^2 arasında uniform dağılırken, akma mukavemeti F_y , ortalama 140 psi ve standart sapma 10 psi olacak şekilde normal dağılım göstermektedir. Uygulanan yük P , lokasyon parametresi $\mu = 11.508$ ve şekil parametresi $\sigma = 0.1$ ile normal bir dağılım gösterir. Bu $\log(P)$ 'nin 11.508 ortalama ve 0.1 standart sapma ile normal dağılım takip ettiği anlamına gelir (Bu Logaritmik dağılımın ortalaması, yaklaşık olarak 100 psi ve standart sapması, 10 psi civarındadır).



Şekil 3.13. Çekme Gerilmesi Altında 17-7ph Çelik Çubuk.

Problem: Hasar olasılığı yani uygulanan yükün, çubuğun akma sınırını aşması olasılığı nedir?

Çözüm: Bu örnek için performans fonksiyonu, $g = F_y \times A - P$ olarak yazılır. Burada F_y , A ve P , yukarıda bahsedilen rastgele değişkenlerdir ve hasar, $g < 0$ koşulunu sağlayan F_y , P ve A değerlerinin herhangi bir kombinasyonu olarak tanımlanır. Her bir rastgele değişkenin olasılık dağılımı bilinmesine rağmen, g için sonuçlanan dağılımı nitelemek zordur (normal ve uniform bir dağılımın sonucundan çıkan bir logaritmik dağılım). g 'nin dağılımı belirlenebilseydi, hasar olasılığı basitçe kümülatif

dağılım fonksiyonunun sıfırda aldığı değer olacaktı. Ancak bu örnekte, Monte Carlo metodu, hasar olasılığını belirlemek için kullanılır.

Her bir Monte Carlo deneyi esnasında, her bir olasılık dağılımından rastgele bir örnek değer alınır (diğer ikisinden bağımsız olarak) ve ortaya çıkan performans fonksiyon değeri g hesaplanır. Nümerik deneyler tekrarlanır. g 'nin sıfırdan küçük değerler alarak sonuçlandığı deneme oranı, hasar olasılığının bir tahminidir. Deney sayısı sonsuza yaklaştığında, bu tahmin, doğal olarak doğru hasar olasılığına yaklaşır. Şekil 3.14, 100 deney için Monte Carlo simülasyonunu uygulamak için kullanılan program tablosunu gösterir. Tablo 3.8, simülasyonların çeşitli sayısı için tahmin edilen hasar olasılığını özetler.

Tablo 3.8. Monte Carlo Simülasyon Sonuçları.

Simülasyon Sayısı	Hasar Olasılığı
100	0.240
1,000	0.226
5,000	0.208
10,000	0.214
50,000	0.218
100,000	0.217

Monte	U (0.1) dan	Akma dayanımı: F _y	U (0.1) dan	Alan: A	U (0.1) dan	Uygulanan yük: P	G	Hasar
Carlo	Rastgele	Normal	Rastgele	üniform	Rastgele	logaritmik	Fonksiyonu	eğer < g
Deneyi	grafik	Parametreler	grafik	Parametreler	grafik	Parametreler	g=F _y *A-P	
		140000		0.700		11.508		1: hasar
		10000		0.900		0.100		0: hasarsız
1	0.1673	130352	0.5884	0.818	0.8242	109225	-2639	1
2	0.1583	129984	0.5636	0.813	0.7764	107367	-1725	1
3	0.1737	130602	0.6644	0.833	0.4411	98044	10732	0
4	0.7903	148076	0.0431	0.709	0.9024	113268	-8338	1
5	0.3319	135654	0.0604	0.712	0.0507	84472	12123	0
6	0.0402	122512	0.6516	0.830	0.4092	97250	4474	0
7	0.0514	123682	0.5770	0.815	0.9050	113443	-12593	1
8	0.1729	130571	0.8982	0.880	0.7669	107031	7825	0
9	0.1604	130070	0.1046	0.721	0.2749	93731	39	0
10	0.7289	146094	0.4067	0.781	0.5544	100880	13270	0
11	0.2377	132863	0.8092	0.862	0.2791	93851	20656	0
12	0.7407	146456	0.0777	0.716	0.5247	100127	4669	0
13	0.3369	135792	0.3491	0.770	0.6915	104611	-76	1
14	0.2182	132216	0.9454	0.889	0.5013	99540	18009	0
15	0.1175	128124	0.0799	0.716	0.9078	113632	-21898	1
16	0.5821	142073	0.3171	0.763	0.9144	114101	-5638	1
17	0.6285	143279	0.8526	0.871	0.9008	113164	11564	0
18	0.6181	143005	0.6654	0.833	0.8335	109622	9512	0
19	0.6119	142844	0.1382	0.728	0.9327	115570	-11630	1
20	0.4098	137718	0.4418	0.788	0.8182	108973	-402	1
21	0.8848	151992	0.5364	0.807	0.4462	98172	24529	0
22	0.3195	135309	0.9708	0.894	0.1178	88379	32608	0
23	0.9307	154812	0.9041	0.881	0.8298	109464	26899	0
24	0.0743	125554	0.7019	0.840	0.7970	108131	-2618	1
25	0.7281	146070	0.4832	0.797	0.9841	123330	-6964	1
26	0.7697	147379	0.7000	0.840	0.9042	113391	10407	0
27	0.6047	142656	0.2667	0.753	0.5445	100626	6843	0
28	0.3753	136822	0.3023	0.760	0.0876	86891	17157	0
29	0.1061	127526	0.4658	0.793	0.4974	99443	1705	0
30	0.8455	150172	0.6893	0.838	0.8010	108284	17540	0
31	0.5341	140855	0.3613	0.772	0.8793	111875	-3098	1
32	0.6344	143436	0.7464	0.849	0.8213	109101	12717	0
33	0.1156	128026	0.1835	0.737	0.9303	115357	-21041	1
34	0.4341	138341	0.6903	0.838	0.5804	101549	14389	0
35	0.5151	140379	0.1641	0.733	0.6301	102870	2	0
36	0.6410	143611	0.2850	0.757	0.9751	121080	-12367	1
37	0.8980	152703	0.5414	0.808	0.8387	109852	13573	0
38	0.6133	142880	0.8088	0.862	0.7822	107578	15552	0
39	0.2792	134147	0.1016	0.720	0.2107	91822	4807	0
40	0.8259	149379	0.9852	0.897	0.6452	103284	30714	0
41	0.7839	147855	0.2084	0.742	0.8482	110291	-629	1
42	0.3570	136335	0.4005	0.780	0.4802	99016	7339	0
43	0.2996	134744	0.5774	0.815	0.6223	102659	7222	0
44	0.2301	132616	0.4992	0.800	0.6081	102276	3795	0
45	0.0396	122444	0.9131	0.883	0.4850	99136	8935	0
46	0.7764	147602	0.4700	0.794	0.5627	101092	16105	0
47	0.8402	149955	0.2263	0.745	0.1144	88224	23532	0
48	0.3512	136180	0.5749	0.815	0.0817	86563	24420	0
49	0.6167	142968	0.7085	0.842	0.5223	109144	11193	0
50	0.1848	131026	0.6635	0.833	0.4522	98321	10784	0
51	0.3489	136118	0.1588	0.732	0.6828	104356	-4750	1
52	0.1943	131379	0.5613	0.812	0.3124	94760	11953	0
53	0.5086	140216	0.4789	0.796	0.9411	116358	-4775	1
54	0.9342	155080	0.1502	0.730	0.6314	102904	10311	0
55	0.0412	122631	0.8799	0.876	0.1703	90463	16961	0
56	0.4812	139530	0.5067	0.801	0.0725	86014	25796	0
57	0.3082	134992	0.4570	0.791	0.6580	103641	3192	0
58	0.1067	127556	0.7957	0.859	0.1227	88596	20993	0
59	0.2991	134730	0.5478	0.810	0.8221	109136	-65	1
60	0.2231	132383	0.3520	0.770	0.1262	88746	13242	0
61	0.2779	134108	0.2283	0.746	0.6922	104631	-4631	1
62	0.8310	149581	0.3778	0.776	0.4773	98943	17065	0
63	0.5940	142378	0.6433	0.829	0.6977	104797	13184	0
64	0.4524	138805	0.5261	0.805	0.1538	89858	21911	0
65	0.0220	119852	0.9286	0.886	0.7698	107133	-978	1
66	0.7485	146698	0.3370	0.767	0.1377	89228	23349	0
67	0.9856	161874	0.2055	0.741	0.1186	88413	31550	0
68	0.6115	142833	0.0523	0.710	0.4077	97212	4264	0

Carlo	Rastgele	Normal	Rastgele	Tek Şekil	Rastgele	Logaritmik	Fonksiyon	eğer < g
Deneyi	grafik	Parametreler	grafik	Parametreler	grafik	Parametreler	$g=F_y \cdot A \cdot P$	
		140000		0.700		11.508		1: hasar
		10000		0.900		0.100		0: hasarsız
69	0.0745	125568	0.7070	0.841	0.0213	81246	24408	0
70	0.3818	136992	0.8046	0.861	0.2752	93740	24199	0
71	0.9369	155293	0.5073	0.801	0.1885	91094	33366	0
72	0.1647	130246	0.5647	0.813	0.1826	90893	14989	0
73	0.2412	132975	0.9907	0.898	0.4728	98832	20598	0
74	0.4743	139355	0.1364	0.727	0.1667	90335	11016	0
75	0.7135	145638	0.9253	0.885	0.7997	108234	20664	0
76	0.0200	119458	0.4036	0.781	0.1314	88968	4295	0
77	0.0411	122621	0.0169	0.703	0.9044	113400	-27151	1
78	0.8623	150905	0.5004	0.800	0.9966	130406	-9668	1
79	0.5768	141938	0.3233	0.765	0.2240	92239	16295	0
80	0.5703	141771	0.0950	0.719	0.0968	87364	14569	0
81	0.1694	130434	0.6188	0.824	0.1430	89438	18007	0
82	0.5735	141853	0.7247	0.845	0.8992	113065	6794	0
83	0.5482	141212	0.4820	0.796	0.7923	107951	4510	0
84	0.0759	125671	0.0539	0.711	0.0298	82424	6902	0
85	0.9043	153064	0.2909	0.758	0.8226	109157	6892	0
86	0.3335	135698	0.8957	0.879	0.2138	91918	27381	0
87	0.5158	140397	0.1215	0.724	0.6837	104381	-2691	1
88	0.8147	148954	0.5718	0.814	0.6572	103620	17682	0
89	0.6217	143099	0.7544	0.851	0.8227	109162	12597	0
90	0.3105	135055	0.3717	0.774	0.6447	103269	1309	0
91	0.4650	139121	0.7581	0.852	0.6772	104192	14287	0
92	0.0693	125193	0.2231	0.745	0.2154	91969	1252	0
93	0.4847	139616	0.2294	0.746	0.5198	100003	4134	0
94	0.8902	152276	0.9535	0.891	0.9425	116493	19141	0
95	0.1851	131039	0.0424	0.708	0.2077	91725	1112	0
96	0.8552	150591	0.4652	0.793	0.0103	78940	40485	0
97	0.2762	134058	0.6126	0.823	0.1796	90790	19474	0
98	0.8945	152510	0.3946	0.779	0.2104	91810	26982	0
99	0.0757	125653	0.4947	0.799	0.8442	110105	-9715	1
100	0.1145	127969	0.4198	0.784	0.0707	85897	14425	0
							Toplam hasar	24
							Hasarolası lığı	0.24

Şekil 3.14. Örnek Problem İçin Monte Carlo Simülasyonu.

3.7.4 Cevap Yüzeyi Yaklaşımı

Kompleks yapılar için performans fonksiyonu, rastgele tasarım değişkenlerinin açık bir fonksiyonu olarak elde edilemez. Yapının performansı (yada cevabı), sadece sonlu eleman yöntemi gibi zaman alan yapısal bir analiz prosedürünün sonunda nümerik olarak değerlendirilebilir. Cevap yüzey metodolojisinin (RSM) amacı, girdi değişkenlerinin bir sayısına şekil değiştirme yada gerilme gibi tepkiyle ilgili tahmini bir denklem bulmaktır. Bir kez bunu sağladıktan sonra, denklem zaman kaybına yol açan deterministik yapısal analizi tekrar tekrar kullanmak yerine, girdi değişkenlerinin verilen değerleri için cevabı belirlemekte kullanılabilir.

Cevap yüzey, bu şekilde tüm girdi değerlerinin her makul kombinasyonunu (teoride) kapsayarak yapısal analizin sonucunu (yada çıktısını) sunar. Bundan, tüm tasarım değişkenlerinin kombinasyonlarının binlercesi (simülasyon yoluyla) yaratılabilir ve

basitçe karşılık gelen yüzey değerine bakarak (enterpolasyon yoluyla), her bir değişken grubu için sahte bir yapısal analiz uygulanabilir. Yapısal analizin yakınsaması, mili saniyelerde gerçekleşir. Sonuç, bir gerilme yada mukavemet PDF'sinin ortaya çıkmasıdır.

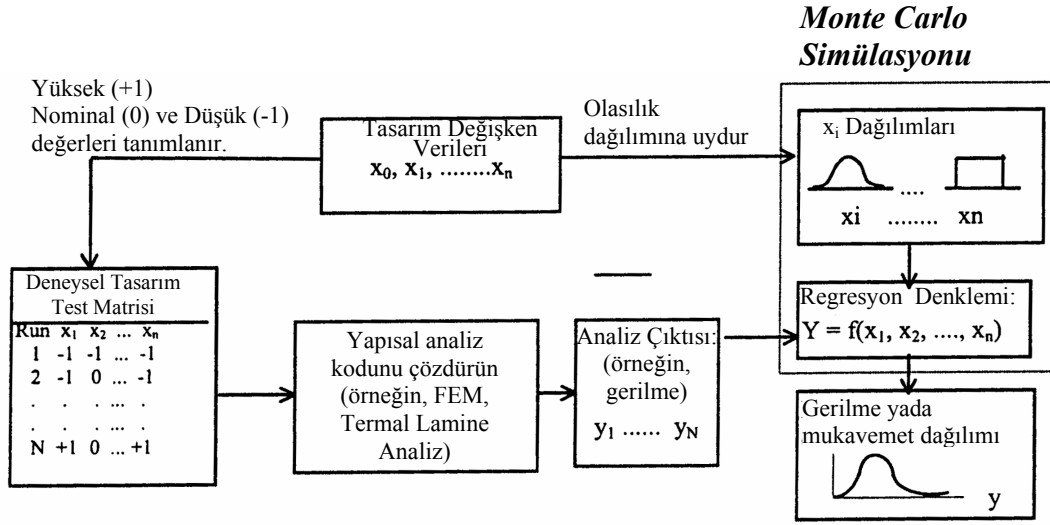
Bu, son aşamadır. Bir kez gerilme ve mukavemet PDF'leri tanımlandıktan sonra, diğer metotlar (nümerik entegrasyon, Monte Carlo, limit durumu yaklaşımı), hasar olasılığını belirlemek için kullanılabilir. RSM'yi (response surface method) kullanmak için Şekil 3.15'te grafiksel olarak gösterilen genel aşamalar aşağıdaki gibidir.

1. Rastgele değişkenlerin stratejik olarak önceden belirlenen değerlerinde, deterministik analizi (örneğin Sonlu Eleman Analizi) uygulanır.
2. Aşama 1'in sonuçlarından, regresyon tekniklerini kullanarak cevap değişkeni için (gerilme yada mukavemet olabilir), tasarım değişkenleri cinsinden yaklaşık kapalı bir ifade kurulur.
3. Regresyon denklemini kullanarak tasarım değişkenlerinin simülasyonundan bir cevap PDF'si yaratılır (örneğin uygulanan gerilme).
4. Nümerik entegrasyon, Monte Carlo simülasyonu (Bölüm 3.7.3) yada tahmin metotları kullanılarak cevap PDF'lerinden hasar olasılığı bulunur.

3.7.4.1 Aşama 1-Seçilen Değer İçin Yapının Analizi

Bir temsili çıktı (cevap) üretmek için tasarım değişkenlerinin temsili kombinasyonlarını tanımlamak gerekir. İstatistiksel deney tasarımı teknikleri, bu temsili kombinasyonları seçmek ve yapısal analizi sistematik olarak simüle etmek için kullanılır. Bu yöntem, Monte Carlo simülasyonuna benzer. Fakat deneysel tasarım metotlarını kullanarak, tasarım değişken değerlerinin stratejik kombinasyonları, tüm olası çıktı değerlerini kapsayan bir veri yaratmakta kullanılır.

Tam ve kısmi faktöryelleri içeren, yaygın olarak kullanılan (olasılıksal analizler için gerekli değildir) birkaç deneysel tasarım planı vardır. Kanıtlanmış bir uygulama ile literatürde söz edilen bir yaklaşım, Box-Behnken metodudur. Box-Behnken tasarımları, tüm tasarım değişkenlerinin üç seviyede çözdürülmelerini gerektirir (Şekil 3.15'te gösterildiği gibi): düşük, nominal ve yüksek. Eğer üç tane tasarım değişkeni varsa, toplam onüç test (yapısal sonlu eleman modelinin çözdürülmesi) gerekir. Bu 13 adet test, Tablo 3.9'da gösterildiği gibi uygulanacaktır.



Şekil 3.15. Tasarım Değişkenlerinin Üç Seviyesini Kullanarak Rsm Prosedürü.

Tablo 3.9. Box-Behnken Deneyisel Tasarım Matrisi.

Test Çalışma No.	Değişken 1	Değişken 2	Değişken 3
1	Düşük	Düşük	Nominal
2	Düşük	Yüksek	Nominal
3	Yüksek	Düşük	Nominal
4	Yüksek	Yüksek	Nominal
5	Düşük	Nominal	Düşük
6	Düşük	Nominal	Yüksek
7	Yüksek	Nominal	Düşük
8	Yüksek	Nominal	Yüksek
9	Nominal	Düşük	Düşük
10	Nominal	Düşük	Yüksek
11	Nominal	Yüksek	Düşük
12	Nominal	Yüksek	Yüksek
13	Nominal	Nominal	Nominal

3.7.4.2 Aşama 2-Regresyon Denkleminin Kurulması

13 yapısal sonlu eleman analizi çözümü elde edildikten sonra, tasarım değişkeni Y ve $x_1, \dots, x_n$ değişkenleri ile ilgili doğrusal bir regresyon denklemi sağlanabilir. Box-Behnken tasarımı, ikinci-dereceden cevap yüzeylerine uyarlamak için geliştirilmiştir ve tahmin edilebilir regresyon denklemi şekli aşağıdaki gibidir :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i x_i + \sum_{i=1}^N \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{ii < j}^N \beta_{ij} x_{ij} \quad (3.12)$$

Tüm tasarım değişkenlerinin, yüksek ve düşük değerleri arasında bir yerde olmaları koşuluyla, Regresyon denkleminin doğru tahminler verdiği kabul edilir. Şöyle ki, Regresyon modeli ekstrapole edilmemelidir. Regresyon analizinde, cevap yüzeyinin doğasını yanlış tanıtarak, modelin bir çok veri etrafında dönmesi ve zorlanmasına yol açıp, denklemde uç terimlere sahip olmamak gerekir.. En iyi küçük modeli sağlamak için ilk aşama, fiziksel anlam taşımayan bu uç terimleri yok etmektir. Şöyle ki, değişkenlerin fiziksel olarak anlamsız kombinasyonları (etkileşimleri) olabilir. Sonraki bir adım, tüm değişkenlerin (ve onların kombinasyonlarının) modele önemli katkıda bulunduğundan emin olmak için regresyon prosedürü kullanılmasıdır. Çeşitli Referanslarda regresyon teorisinin ayrıntılı bir tanımı bulunabilir.

3.7.4.3 Aşama 3- Cevap Değişkeni PDF'sinin Geliştirilmesi

Bir kez tüm tasarım değişkenlerini kullanan regresyon metodu geliştirildikten sonra, Monte Carlo simülasyonu, cevap değişkeni için bir dağılım çıkarmakta kullanılır. Rastgele bir çizim, Şekil 3.15'te görüldüğü gibi her bir tasarım değişkeni olasılık dağılımından yapılır ve sonra seçilen tasarım değişken değerlerinin grubu ile ilişkili tek bir cevap değeri, interpolasyon (ekleme) yoluyla hesaplanır. Sonuç olarak, bir olasılık dağılımına uyan yada sürekli dağılım yeterli uygunluğu sağlamıyorsa, süreksiz bir dağılım yaratmak için kullanılan cevap değerleri serisidir.

3.7.4.4 Aşama 4-Hasar Olasılığının Değerlendirilmesi

(1) RSM'nin hem gerilme, hem de mukavemet dağılımlarını çıkardığını yada (2) eğer sadece biri çıkarılıyorsa, diğerinin bazı başka araçlardan sağlandığını farz edersek, o zaman hasar olasılığı entegrasyon, Monte Carlo metotları yada limit durumu yaklaşım metotları ile hesaplanabilir.

Cevap yüzeyi metodolojisi ile ilgili birkaç önemli not şöyledir:

- Girdi değişkenleri için olasılık dağılımları doğru olmalı.
- Regresyon denklemleri, analiz sonuçlarına iyi uymalı ve doğal olarak ikinci derece olduklarından, girdi değişkenlerinin makul derecede değişiklikleri için cevapta hiçbir ani değişikliğin olmadığı durumlarda kullanılmalı.
- Monte Carlo simülasyonu, cevap değişkeninin olasılık dağılımının tam bir tarifini sağlamak için yeterli sayıda çalıştırılmalıdır.

3.7.4.5 Cevap Yüzeyi Metodu Örnek Problemi

Cevap yüzeyi metodu örneği, referans [10]'dan alınmıştır. Bir gaz türbin diskindeki çevresel gerilme (cevap değişkeni), aşağıdaki altı ömür etkeninden (girdi değişkenleri) etkilenir: Radyal sıcaklık, elastisite modülü, rotor hızı, radyal yük, yoğunluk ve termal genleşme katsayısı. Bu girdi değişkenleri için olasılık dağılımları, Tablo 3.10'da verilmiştir. Sonlu Elemanlar Yöntemi, bu altı girdi değişkeninin kombinasyonu için çevresel gerilmeleri belirlemek amacıyla kullanılır.

Tablo 3.10. Çevresel Gerilme Tespiti İçin Olasılık Dağılım Tanımlaması.

Tasarım Değişkeni	Olasılık Dağılımı
1. Sıcaklık (F°)	uniform (80, 220)
2. Elastisite Modülü	uniform(-2 σ ..., +2 σ), burada -2 σ ve +2 σ , sıcaklık-modül eğrilerinin alt-üst aralığıdır.
3. Rotor hızı (rpm)	Normal (Temel; %1.5 Temeli)
4. RadyalYük (lb)	Normal (2.9 x 10 ⁹ lb, 0.45 x 10 ⁶ lb)
5. Yoğunluk (lbm/in)	Normal (0.286, 0.0015)
6. Termal Genleşme Katsayısı- CTA (in/in/F ⁰ sıcaklığın bir fonksiyonu)	uniform (-2 σ , +2 σ), sırasıyla, sıcaklık - CTA eğrisinin alt -üst aralığını göstermektedir.

Problem: Bir gaz türbin diskindeki çevresel gerilme için olasılık dağılımı nedir?

Çözüm: Girdi değişkenleri ve seviyeleri (düşük, nominal ve yüksek için sırasıyla -1, 0 ve +1 olarak kodlu), Tablo 3.11'de verilmiştir. Bu metodolojide, düşük ve yüksek seviyeler, uç değerleri kısmen temsil etmek için seçilir. Altı girdi değişkeninin seviyelerinin 729 kombinasyonunun her biri için sonlu eleman analizini uygulamak yerine Box-Behnken metodu kullanılmıştır.

Tablo 3.11. Değişkenler İçin Düşük, Nominal Ve Yüksek Tanımlamalar.

Girdi Değişkeni	-1	0	1
F1: Sıcaklık(F)	80	150	220
F2: Elastisite Modülü (psi)	-2σ	Nominal eğri	$+2\sigma$
F3: Rotor Hızı (rpm)	Temel -%3	Temel	Temel +%3
F4: Radyal Yük (lb)	2,610,000	2,900,000	3,190,000
F5: Yoğunluk (lbm/in.)	0.283	0.286	0.289
F6: CTA (in/in/F)	-2σ eğri	Nominal eğri	$+2\sigma$ eğri

Tablo 3.12, girdi değişkenlerinin analiz edilen kombinasyonlarını göstermektedir.

Tablo 3.12. Üç-Seviye Box-Behnken Tasarım Test Matrisi.

F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆
±1	±1	0	±1	0	0
0	±1	±1	0	±1	0
0	0	±1	±1	0	±1
±1	0	0	±1	±1	0
0	±1	0	0	±1	±1
±1	0	±1	0	0	±1
0	0	0	0	0	0

±1 işareti, ilgili girdi verilerinin iki seviyesini (yüksek-düşük) temsil ettiğinden, ilk altı sıranın her biri, sekiz sonlu eleman yöntemi uygulamasına karşılık gelir. Tüm girdi değişkenlerinin nominal bir seviyede oldukları son sırayla beraber, bu matris için 49 sonlu eleman çözümü gerekmektedir. Bu uygulamaların sonuçları, Tablo 3.13'te gösterilmiştir.

Tablo 3.13. Verilen Girdi Değişken Seviyeleri İçin Femin Sonuçları.

uygulama	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	uygulama
1	-1	-1	0	-1	0	0	138.80
2	-1	-1	0	+1	0	0	147.00
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
49	0	0	0	0	0	0	151.90

Cevabı, $\sigma_{\text{çevresel}}$, ifade eden denklemi altı tane girdi değişkeni cinsinden belirlemek için, regresyon tekniği kullanılır.

$$\sigma_{\text{çevresel}} = 151.8 + 8.77F_1 + 0.41F_2 + 8.1F_3 + 4.14F_4 + 0.97F_5 + 0.79F_6 + 0.11F_3 + 0.2F_1F_2 + 0.37F_1F_5 + 0.25 F_3F_4$$

Bu denklem, girdi değişkenlerinin farklı değerleri için çevresel gerilmeyi tahmin etmek için kullanılır. Çevresel gerilme olasılık dağılımını belirlemek için Monte Carlo simülasyonu, girdi değişkenlerinin değerlerini kendi dağılımlarından üretmek için kullanılır ve regresyon denklemi, çevresel gerilme değerini hesaplamak için kullanılır. Nümerik simülasyonların sonucu, çevresel gerilmenin bir olasılık dağılımıdır.

3.7.5 Limit Durumu Yaklaşımı

Bu yaklaşım metodu, geçen 15 yılda olasılıksal araştırmanın temel konusu ve nümerik olasılıksal analiz teknik belgelerinin ve raporlarının konusu olmuştur. Hasar olasılığı, aşağıdaki denklem ile tanımlanır:

$$PF = \int \dots \int f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (3.13)$$

Tasarım dağılımlarının sınırlı bir grubu dışında, kapalı formda değerlendirilemezler. Kompleks yapısal analiz kodları için Monte Carlo simülasyonu özellikle düşük hasar olasılıkları için uygulama zamanı göz önüne alındığında pratik değildir. Gerekli yapısal analizlerin sayısını (örneğin sonlu elemanlar metodu) düşürmek için cevap yüzeyi metodu yada “kritik örnekleme” gibi bir tekniği uygulamak da bir yöntem olabilir. Çoklu değişken entegralini çözmek için bir diğer yaklaşım, limit durum tahmin metotlarını kullanmaktır. Bunlar, literatürde nokta genişletme metotları olarak da bildirilirler ve (1) “ortalama değer” ve (2) “en olası nokta” olarak iki gruba ayrılırlar.

Birinci Dereceden Ortalama Değer (Mean Value First Order) ve Birinci Derece İkinci Moment Ortalama Değer metotlarını kapsayan ilk grubun uygulanması oldukça kolayken, hem yüksek güvenilirlik hesaplamaları için, hem de yüksek dereceli doğrusal olmayan performans fonksiyonları için (düşük hasar olasılığı $\sim 10^{-5}$ yada bu değerden küçük) istenilen doğruluğu vermedikleri kabul edilir. Hava yapılarında, yüksek güvenilirlik söz konusu olduğundan bu yaklaşımlar burada verilmeyecektir.

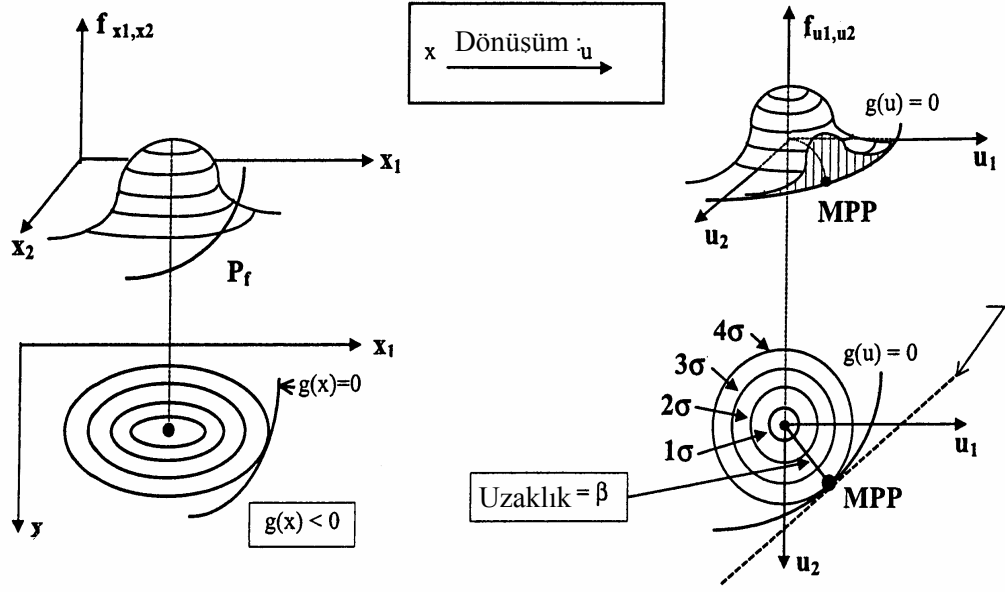
3.7.5.1 “En Olası Nokta” Metodu

Bu grupta birkaç tane metot vardır. Önemli olanlar, Birinci Dereceden Güvenilirlik Metodu (First Order Reliability Method-FORM) ve İkinci Dereceden Güvenilirlik Metodu (SORM). Bu metotlar, tüm olasılıksal analiz metotları arasında hem matematiksel olarak, hem de kavramsal olarak en kompleks olanlardır ve bu yüzden burada fazla detaylı açıklanmayacaktır. Bu analizleri uygulamak için temel aşamalar ve referanslar verilecektir.

İlk ve ikinci dereceden güvenilirlik metotlarında (FORM/SORM) yaklaşım, yukardaki entegrali etkin olarak değerlendirilebilen, yaklaşık olarak eşit bir entegrale dönüştürmektir. Bu, aşağıdaki aşamalarla yapılır:

1. Tasarım değişken dağılımları, standart normal dağılımlara dönüştürülür. Şöyle ki, “u” standart, bağımsız bir Gauss değişkeni olmak üzere; $g(x)$ 'i $g(u) = 0$ a, dönüştürmektir (Şekil 3.16).
2. *En olası nokta (MPP) yada tasarım noktası* tanımlanır. Verilen bir limit durum fonksiyonu için hasar olasılığına temel katkı, dönüştürülmüş tasarım değişken alanında (u alanı) g 'nin orijine en yakın olduğu bölgeden gelir. MPP, dönüştürülmüş alandaki orijine en yakın nokta olarak tanımlanır.
3. MPP çevresinde performans fonksiyonuna (g -fonksiyonu) çok terimli (polinom) bir yaklaşım geliştirilir. Böylece, g -fonksiyonu o noktada (MPP) basitçe tanımlı ikinci derece yüzeye yakınsamış olur. Hasar olasılığı, yeni tanımlanan fonksiyon ve dönüştürülmüş değişkenler kullanılarak hesaplanır.

Bu teknik, grafiksel olarak Şekil 3.16'da gösterilir. Bu şekil, problemin üç boyutlu bir gösterimidir. n -boyutlu problemler için, limit durum alanı olarak bilinen, hasar ve başarı arasında sınır olan bir hiper alan $g(u) = 0$ vardır.



Şekil 3.16. Standart Normal Alana Dönüşüm.

Aşama 1-Değişkenlerin Dönüştürülmesi

FORM ve SORM güvenilirlik yaklaşımları, temel değişkenleri dönüştürerek elde edilen, bir grup standart, bağımsız normal değişkenin oluşturduğu Y alanında geçerlidir. Bu dönüşüm, her bir değişkenin olasılıksal dağılım şekline bağlıdır. Bu olasılıksal dönüşümü yapmanın avantajı, standart normal alanın daha çok özelliğini kullanabilmektir. Belirgin olarak, bu alandaki olasılık yoğunluğu simetriktir (Şekil 3.16) ve orijinden uzaklığın karesi ile üstel olarak azalır. Dönüşüm, bir kaç şekilde yapılabilir. En çok kabul edilen metot, birbirleriyle ilişkili, normal olmayan değişkenlerin $X = (X_1, \dots, X_n)$ bir grubunu, ilişkili olmayan standart normal değişkenler ($U = U_1, \dots, U_n$) alanına dönüştürmek için kullanılan Nataf modelidir

Dönüştürülmüş normal ve orijinal dağılım arasındaki uygunluğu geliştirmek için diğer yöntemler çeşitli kaynaklardan bulunabilir. İyi bilinen Gerilme Altındaki Sıradan Yapıların Nümerik Değerlendirmesi (NESSUS: Numerical Evaluation of Stochastic Structures Under Stress) olasılıksal yazılımı, üç parametrelilik normal dağılım kullanır. Üçüncü parametre, hasar olasılığını etkileyen son bölgede (dağılımın kuyruk bölgesi) daha iyi uyum sağlamak için dağılımı ayarlar. Dönüşüm için farklı metotların belirgin detayları, matematiksel olarak komplekstir ve uzundur, burada verilmeyecektir.

Aşama 2-En Olası Noktanın Saptanması

MPP (Most Probable Point), Şekil 3.10’da görülebildiği gibi en yüksek bileşik yoğunluklu limit durumundaki noktadır. Şöyle ki nokta en olası noktadır çünkü hasara en geniş katkıya yada maksimum birleşik olasılık yoğunluğuna sahiptir. MPP, bir optimizasyon algoritması yada başka iterasyon algoritmaları kullanarak bulunabilir [23]. Optimizasyon, her bir ilgili değişkenin ortalama değerlerinin grubunda bulunan en olası noktayı tahmin ederek başlar. Sonra, orijinden limit durum alanına uzaklık, (yada hypersurface), limit durumu üzerinde uzanan noktayı (MPP) sınırlamak için minimize edilmiş mesafedir.

Optimizasyon prosedürlerinin detayları, çeşitli referanslarda bulunabilir. MPP’yi belirlemek, bu güvenilirlik yaklaşımı metotlarının en önemli aşamasıdır ve bir çok yayın, yakınsama kriteri ve optimizasyon algoritmalarında kullanılan araştırma metotlarının türünü, ilişkili olmayan değişkenler gibi bilgileri kapsar.

Aşama 3-g-Fonksiyonu ve Hasar Olasılığının Belirlenmesi

Fonksiyon $g(u)$, yaklaşık olarak MPP’nin etrafındaki bir polinom ile ifade edilir. Birinci Dereceden güvenilirlik metodu (FORM) yaklaşımı ile:

$$P_f = P(g \leq 0) \approx \Phi(-\beta) \quad (3.14)$$

Burada β , limit duruma minimum uzaklığı temsil eder. Polinom fonksiyonun gradyanları, minimum uzaklığı bulmak için kullanılır.

Birkaç İkinci Dereceden (SORM) yaklaşım, doğruluğu geliştirmek için uygundur. Bu daha yüksek dereceden yaklaşımlar, minimum uzaklık noktası etrafındaki limit durumunun eğriliğini de hesaba katar. SORM yaklaşımlarının en basiti, Breitung Formu denilen bir parabolik formülasyondur:

$$P_f = P(g \leq 0) \approx \Phi(-\beta) \prod_{i=1}^{n-1} (1 + \beta k_i)^{-1/2} \quad (3.15)$$

Burada k_i , minimum uzaklık noktasındaki limit durumun i . ana eğrisini belirtir. Genelde yüksek bir β değerine sahip olan pratik problemlerde, limit durum denkleminin ikinci derece şekli, gerçek olasılık değerine en iyi yakınsamayı sağlar.

Hem tahmin doğruluğu üzerinde, hem de hasar fonksiyonunu değerlendirme sayısını azaltmada geliştirme sağlamak için ikinci dereceden yaklaşımların bir çok türevleri bulunmaktadır.

3.7.6 Limit Durumu Tahmin Metotlarının Genel Değerlendirmesi

FORM yaklaşımı, MPP’de (en olası nokta) geniş eğriliğe sahip limit durumu fonksiyonları için yeterli doğrulukta sonuç vermez. SORM yaklaşımları, FORM’dan daha doğrudur fakat matematiksel olarak daha komplekstir ve daha fazla hesaplama gerektirir. Bu metotların doğruluğu, tahmini g fonksiyonunun gerçek g fonksiyonunu ne kadar iyi temsil ettiğine bağlıdır. Bu metotların en önemli özelliği, hassasiyet hesaplamalarını uygulamak için kullanılabilmesidir. Hassasiyet faktörleri, her bir değişken için hasar olasılığında baskın değişkenleri belirlemekte kullanılabilir.

Bu metotların matematiksel detayları, genelde çoğu sanayi mühendisi için anlaşılması güçtür. Olasılıksal analizin diğer detayları ile beraber bu metotların detaylı açıklamalarını kapsayan üç önemli yayın şöyledir:

- Tasarım İşleminde Olasılıksal Metotların Entegrasyonu (SAE) [11]
- Modern Yapısal Güvenilirlik Metotları (NASA) [12]
- Mühendislik Olasılıksal Metotlar (SAE) [13]

3.7.7 Limit Durumu Yaklaşımı Örnek Problemi

Şekil 3.17’de gösterilen çubuğa uygulanan gerilme S ile gösterilmektedir ve P yükünün kesit alanı A ’ya bölünmesi ile belirlenir (A sabit kabul edilir). Direnç (mukavemet) R ile gösterilmektedir.

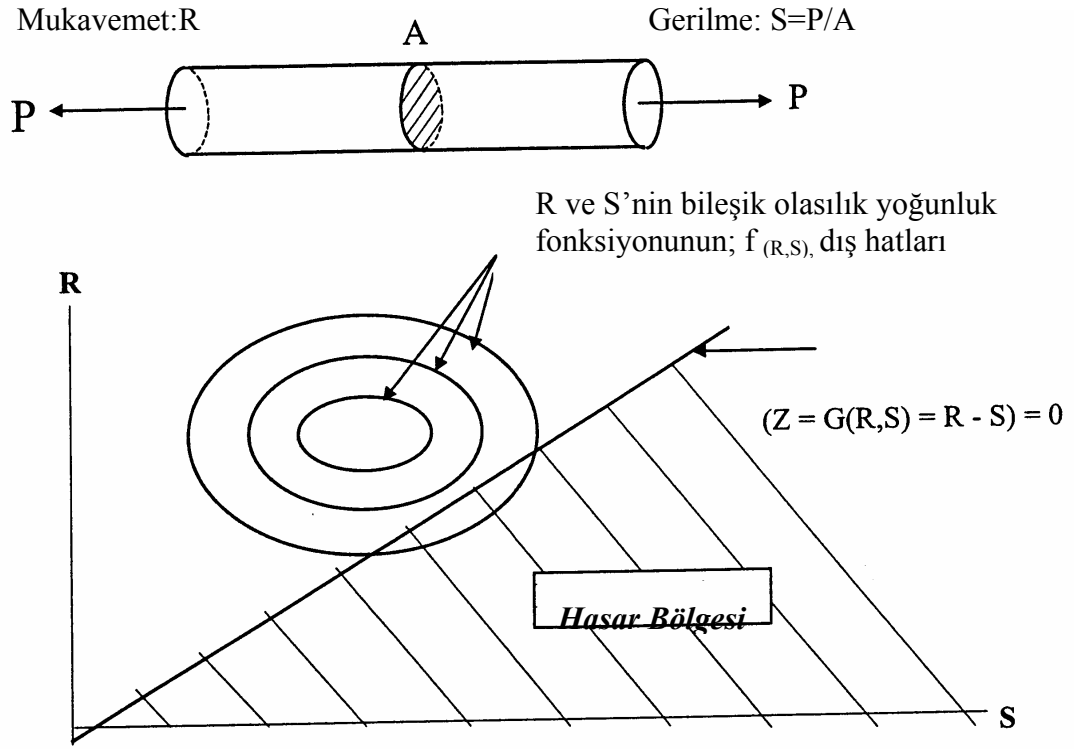
Tasarım değişkenlerinin istatistikleri, aşağıdaki gibidir:

- $R \sim \text{Normal: } \mu = 60; \sigma = 6$
- $P \sim \text{Normal : } \mu = 100; \sigma = 10$
- $A = 2.5 \text{ in}^2$

R ve P için normal dağılımların sağlandığı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu dağılımlar, aslında Gaussian olabilirler yada bölüm 3.7.5.1’de tartışılan yaklaşımlar yoluyla normal olmayan bir dağılımdan normal bir dağılım’a dönüştürülerek elde edilmiş olabilirler. Orijinal dağılımın denk bir normale dönüşümü, limit durumu

tahmin yaklaşımında kritik bir aşamadır. Gerilme ($S = \text{yük/alan}$) dağılımı, şöyle formüle edilir:

- Ortalama $100/2.5 = 40$ ($S \sim \text{normal}$)
- Standart Sapma $10/2.5 = 4$ ($S \sim \text{normal}$)



Şekil 3.17. Değişkenler R Ve S İle Orijinal Parametre Alanı.

Limit durumu, şöyle formüle edilir:

$$Z = R - S = 0 \quad (3.16)$$

İndirgenmiş değişkenler, şöyle tanımlanır:

$$r = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} ; \quad s = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S}$$

Bu limit durumu denklemindeki R ve S'yi çekersek:

$$Z = r\sigma_R + \mu_R - (s\sigma_S + \mu_S) = 0, \quad (3.17.a)$$

yada;

$$Z = \sigma_R r - \sigma_S s + (\mu_R - \mu_S) = 0, \quad (3.17.b)$$

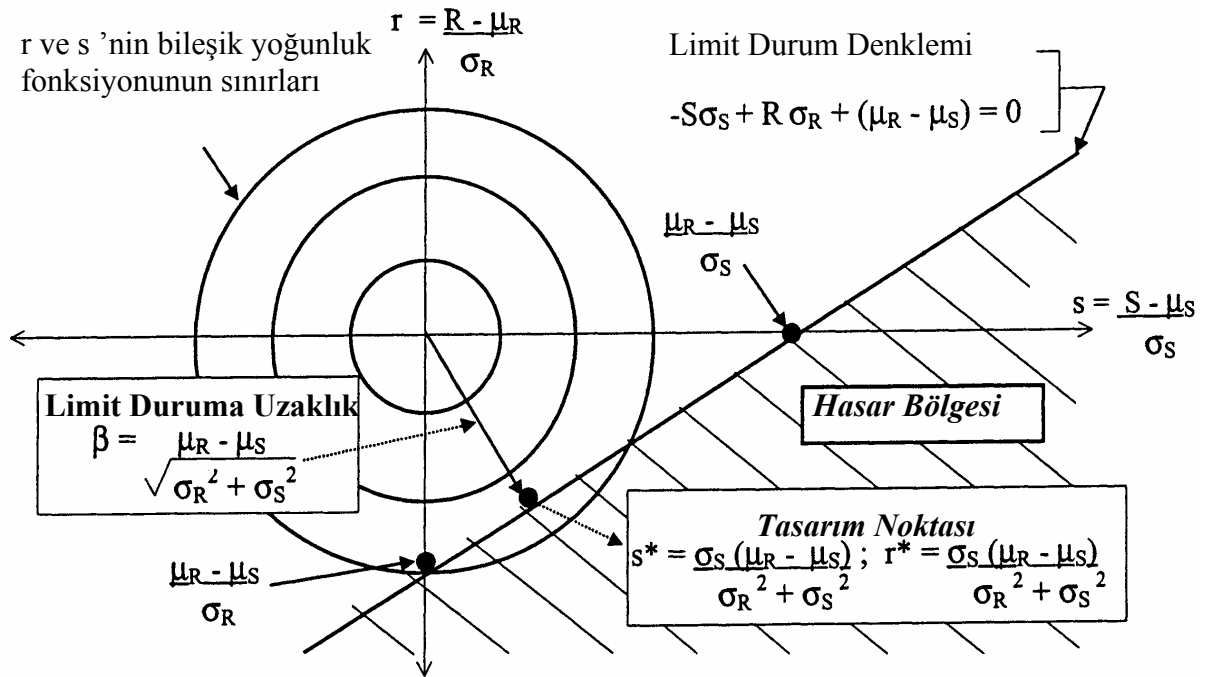
Bu limit durumu denklemi, Şekil 3.18’de görülebilir. Analitikte bir $L= Ax+By+C$ eğrisi ile orijin arasındaki en kısa mesafeyi bulmak için kullanılan teorem şöyledir:

$$(0,L)= \frac{|C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}.$$

Bu teoremi Limit durum denkleminde uygularsak, mesafe için şu değeri elde ederiz:

$$d = \frac{|\mu_R - \mu_S|}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \beta. \quad (3.18)$$

Böylece indirgenmiş koordinat alanında, orijinden MPP’ye (en olası nokta) olan mesafeyi bulmak için (- linear limit durum denklemi için-) gerekli formül türetilmiş olur.



Şekil 3.18. R Ve S Değişkenleriyle İndirgenmiş Koordinatlar Parametre Alanı.

Örnekte verilen değerleri yerlerine koyarak; limit durum denklemi :

$z = 6r - 4s + (60 - 40) = 0$ dır. Böylece orijinden bu limit duruma uzaklık:

$$d = 20 / (6^2 + 4^2) = 2.77 = \beta \text{ dır.}$$

Tasarım noktası, Şekil 3.19’da gösterildiği gibi:

$$s^* = 4 (20)/(6^2 + 4^2) = 1.54$$

$$r^* = -6 (20)/(6^2 + 4^2) = -2.31 \text{ dir.}$$

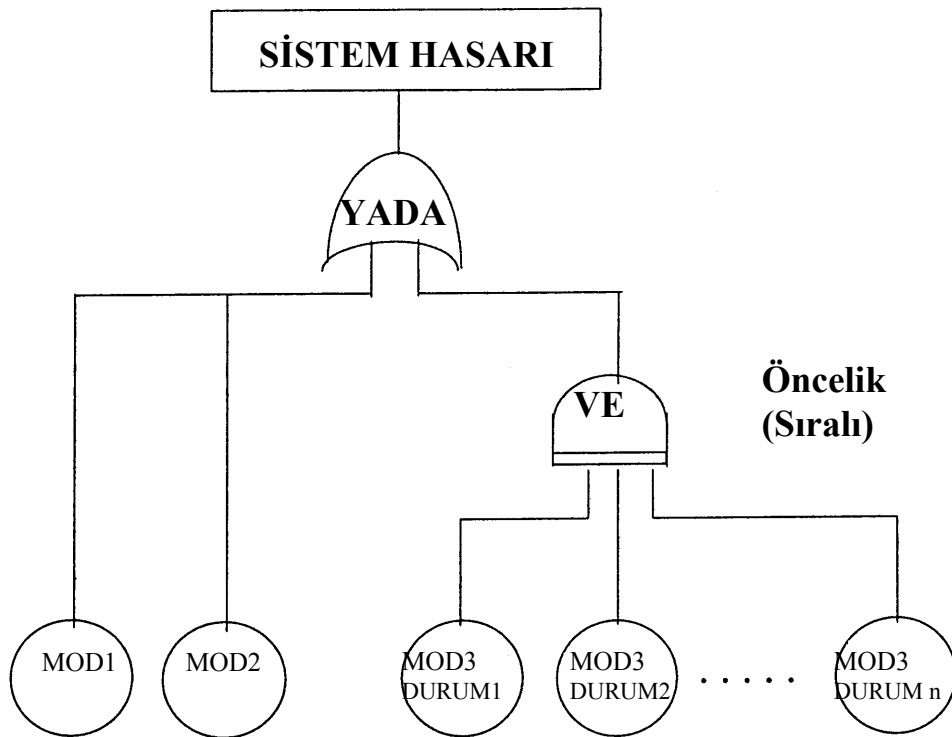
Orijinal parametre alanındaki tasarım noktası,

$$R^* = 60 - (2.31)(6) = 46.14$$

$$P^* = 100 + (1.54)(10) = 115.40' \text{ dir.}$$

Hasarın sonuçlanan olasılığı, böylece $P = \Phi(-\beta) = \Phi(-2.77) = 0.0028$ olarak bulunur.

Bu tahminin doğruluğu, normal dağılımların, gerilme ve mukavemet davranışını ne kadar iyi temsil ettiğine bağlıdır.



Şekil 3.19. Olasılıksal Hata Ağacı Analiz Metodolojisi.

3.8 Sistemin Hasar Olasılığının Belirlenmesi

Sistemdeki her bir konumun hasar olasılığı hesaplandıktan sonra, tüm yapı için kapsamlı bir hasar olasılığının belirlenmesi gerekmektedir. Eğer N konumları bağımsızsa, bu şekilde sistemin hasar olasılığı, şöyle hesaplanır:

$$P_{f,sistem} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{f,i}) \quad (3.19)$$

Genelde, eğer bir konumun gerilmesi (yada mukavemeti), diğerinin gerilmesi (mukavemeti) üzerinde hiçbir etkiye sahip değilse (ve tahmin etmek için de kullanılamıyorsa), iki yapısal konum bağımsızdır. Bu, malzeme gücü için oldukça sezgiseldir. Örneğin, malzemenin bir bölümü için verilen bir malzeme mukavemeti, yandaki bölümün mukavemeti ile ilgili hiçbir şey söylemez. Sadece test esnasında belirlenen malzeme değişkenliği, mukavemeti örneklemek için kullanılabilir. Bu nedenle, aynı mukavemet dağılımı, her bir parçaya uygulanabilirken, rastgele örnekleme, birinin gerçek mukavemetinin, diğerinkinden bağımsız olmasını neyin sağladığıdır. Aslında, her birinin kayma (kesme) mukavemeti belirgin, tek bir değerdir fakat bilinmez. Bu nedenle, tahmindeki belirsizliği tespit etmek için istatistikler kullanılır.

Eğer bir uçak yapısı analiz yada test sırasında tek bir yük koşuluna yada gerilmeye maruz kalsaydı, o zaman gerilme değerleri tamamen bağımlı olurdu. Bu durumda, bir konumdaki (yapı içinde herhangi bir lokasyon) gerilme, herhangi bir ve tüm diğer konumlardaki gerilmeyi tahmin etmek için kullanılabilirdi. Ancak, uçak yapısı çok çeşitli yükleme şartlarına maruz kalmaktadır. Bu şartların birbirlerinin basit doğrusal çarpanları olmadığını varsayarak, herhangi iki konumdaki gerilme arasındaki ilişki, yük durumlarının toplamı ile ilişkilendirilmez. Aslında, o kadar çeşitlidirler ki, istatistiksel bir açıdan, tamamen ilişkisiz oldukları varsayılabilir.

Örneğin, bir parçada, gerilme değerleri ilişkilidir (şöyle ki, yük şartına bakılmaksızın, eğer tek bir noktadaki gerilmeyi bilirsek, parça içinde her konumda da biliriz) yani bağımlıdır. Parçalar arasındaysa, birinin içindeki gerilmeyi bilmek, diğerindeki gerilmeyi tahmin etmeyi sağlamadığından, gerilmeler birbirlerinden bağımsızdırlar.

Hata ağacı analizi, yapısal sistem hasarı nedenlerinin tanımlanmasını ve bu kaynakların pek çok hasar çeşidinden birine sebep olan etkileşimlerini belirlemeyi sağlar. Hata ağacı analiz teorisi, burada belirtilmeyecektir. Daha fazla bilgi, güvenilirlikle ilgili referanslarda bulunabilir. Bağımlılık oluştuğunda, bir hata ağacı olasılığını analitik yaklaşımlarla hesaplamak zorlaşır ve simülasyon yaklaşımları daha uygun olur. Fakat simülasyon, fazla zaman gerektirebilir.

Bağımlılık durumunda uygulanan hata ağacı analizinde gerekli bir araç sağlamak için gerekenleri tespit etmek amacıyla, olasılıksal hata ağacı metotları 1990'ların başlarında geliştirilmiştir. Bir metodoloji de, Amerika'da Güneybatı Araştırma Enstitüsü'nün NESSUS yazılımına entegre edilmiştir. Temel aşamalar şunlardır:

- Yapısal sistemi temsil etmek için bir hata ağacı geliştirilir.
- Her bir hasar olayı için, en olası noktayı baz alan bir yaklaşık performans fonksiyonu kurulur (Bölüm 3.7.5).
- Örneklem sırası belirlenir.
- Etkin Monte Carlo simülasyonu kullanılarak sistem güvenilirliği hesaplanır (Uyarlanabilir etkin örneklem).

Şekil 3.19, bir hata ağacını kullanarak hasar şekillerinin ve sıralı hasarın nasıl modellenebileceğini göstermektedir. Sıralı hasarlar, “PRIORITY AND gate” (PAND) gibi yazılımlar kullanılarak modellenebilir. Yük tekrar-dağılımı ile güncelleştirilen yapısal konfigürasyonların bir sırasına karşılık gelen limit durumu fonksiyonlarının bir sırası, analiz esnasında üretilmelidir.

Bu yaklaşımı kullanmanın avantajı, analizin hem hasar şekillerinin olasılıksal derecelendirmesini hem de problem değişkenlerini sağlayabilmesidir.

4. OLASILIKSAL YÖNTEMLERLE YAPISAL YORULMA ÇATLAK İLERLEMESİ ANALİZİ

Bu bölümde dinamik yüklemeye maruz kalan yapılarda, özellikle uçaklarda yorulma çatlağı oluşumu ve ilerlemesi konusu üzerinde durulacaktır. Kırılma mekaniği prensibi anlatılarak, çatlak ilerlemesi analizinde kullanılan örnek yazılımın baz aldığı prensipler aktarılacaktır.

4.1 Yorulma Ve Çatlak İlerlemesi Konusuna Giriş

Endüstriyel devrim sırasında ve 19. yüzyıl boyunca metallerin ulaştırma sanayinde artarak kullanılmaya başlamasıyla yorulma hasarları ile daha sık karşılaşmaya başlanmıştır. Kırılma mekaniği konusundaki gelişmeler, bununla ilgili hasarların ve kazaların azalmasını sağlamıştır. Burada en önemli nokta yorulmada nasıl ve ne zaman malzeme direncinin kırılıp hasarın başladığıdır.

Metallerde yorulma, tekrarlı bir yüke maruz kalan yapıda erken evrede bir yapısal bozulma veya hasarı oluşturan etkidir. Mikroskobik boyutlarda tarif edilmesi zor metalurjik bir olaydır. Bu zorluğa rağmen yapılar ve bileşenler için bir yorulma hasar tespiti ortaya koyulmalıdır.

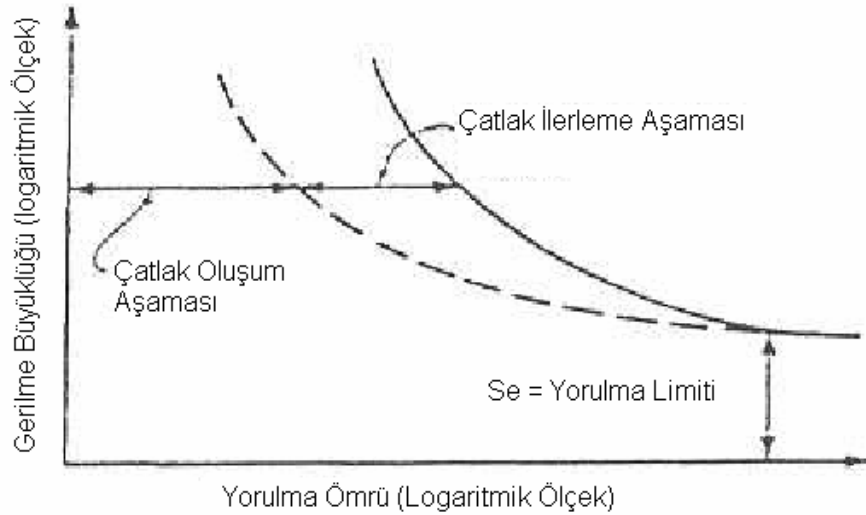
Metallerde yorulma 150 yılı aşkın süredir üzerinde çalışılan bir konudur. Bu konuda Wöhler ilk ve en ünlü araştırmacılardan biridir. 1930 ve 1940'lı yıllarda uzun yorulma direncine etki eden faktörler deneysel olarak ortaya konmaya çalışılmıştır.

1960'lı yıllarda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Irwin ve diğer araştırmacılar, kırılma mekaniğini etkin bir mühendislik aracı haline getirmişlerdir. Paris, yorulma çatlağının ilerlemesini nicelik olarak ortaya koymuştur. Hatta o dönemde Elastik bir parametre olan K 'nın, yorulma çatlak ilerlemesi gibi iç yapıdaki bir plastisite etkisinde hesaba katılmasının mümkün olamayacağı ile ilgili tepkiler almıştır. Bu araştırmalar kapalı devre malzeme testlerinin ve bilgisayar programlarının mühendislik problemlerini çözmek amacıyla kullanılmasını mümkün kılmıştır.

1970’lerde, yorulma analizi kurulu bir mühendislik aracı haline gelmişti. Buna rağmen belirsizlikler de devam etmekteydi. Tüm tasarım durumlarına uygulanabilen genel bir yorulma çatlak ilerlemesi analizi yoktur. Her yöntemin kendine göre avantajları ve sınırlamaları vardır ve hangi yöntemin kullanılacağı malzeme, yükleme koşulları, çalışma ortamı, geometri ve benzeri etkenlere bağlıdır.

4.2 Yorulma Ve Çatlak İlerlemesi Konusuna Genel Bakış

Bir yapının yorulma ömrü iki ayrı safhadan oluşur: çatlak oluşumu ve ilerlemesi (büyümesi). Bu safhalar Şekil 4.1’de şematik olarak gösterilmiştir [15]. Oluşum ve ilerleme ömrü arasındaki ayrım önemlidir. Kırılma mekaniği yaklaşımları, ilerleme ömrü tahmininde kullanılabilir.



Şekil 4.1. Yorulma Ömrünün Safhaları.

Kırılma mekaniği yaklaşımlarında bir ilk çatlak boyu bilinmelidir veya kabul edilmelidir. Malzeme yapısında düzensizlikler ve kusurlar bulunan bileşenlerde (yapıyı oluşturan birim) ilk çatlak boyu bilinebilir. Mühendisler hasarı önlemek için daha çok hasar toleransı ile ilgilendiklerinden, öncelikle analiz odaklı kırılma mekaniği yaklaşımları üzerinde durmak gerekir.

Havacılıkla ilgili yapılarda statik yük altında yorulma ve çatlaktan ziyade dinamik yükleme altında yorulma ve çatlak oluşumu önemlidir. Dinamik yükler, statik yükler kadar yüksek olmasa da, uzun periyotlarda sürekli tekrar etmektedir. Bu sebeple

dinamik yüklemeye maruz kalan yapılarda oluşan yorulma ve çatlak, yapının servis dışı kalmasına yol açar.

4.2.1 Çatlağın Gerilme Analizi

Doğrusal elastik kırılma mekanik prensipleri, çatlak ucu yakınındaki gerilme büyüklüğü ve dağılımını şunlarla ilişkilendirmek için kullanılır:

- Çatlak oluşan bileşendeki uç gerilmeler,
- Çatlak boyutu ve şekli,
- Çatlak oluşan bileşenin malzeme özellikleri.

1920’de Griffith, çatlak ilerlemesinin, sistemin toplam enerjisini azaltmasıyla yani elastik şekil değiştirme enerjisinin yeni çatlak oluşumu için gerekli enerjiden çok olmasıyla meydana geldiğini matematiksel olarak ifade etmiştir.

1940’da, Irwin, Griffith’in kırılma malzemeler için bulduğu bu teoriyi esnek malzemeler için geliştirmiş, plastik deformasyon için gerekli enerjinin, yeni çatlak yüzeyi oluşumuyla ilgili yüzey enerjisine eklenmesi gerektiğini bulmuştur. Bunun yanında, çatlak yürütme enerjisi yada şekil değiştirme serbest enerji oranı olarak adlandırdığı G ’yi tanımlamıştır. G , birim çatlak ilerlemesinde yada birim kalınlıkta emilen toplam enerji miktarıdır.

Diğer bir önemli katkısı ise çatlak ucu etrafındaki bölgesel gerilmenin :

$$\sigma_{ij} = \left[\frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right] f_{ij}(\theta) + \dots \quad (4.1)$$

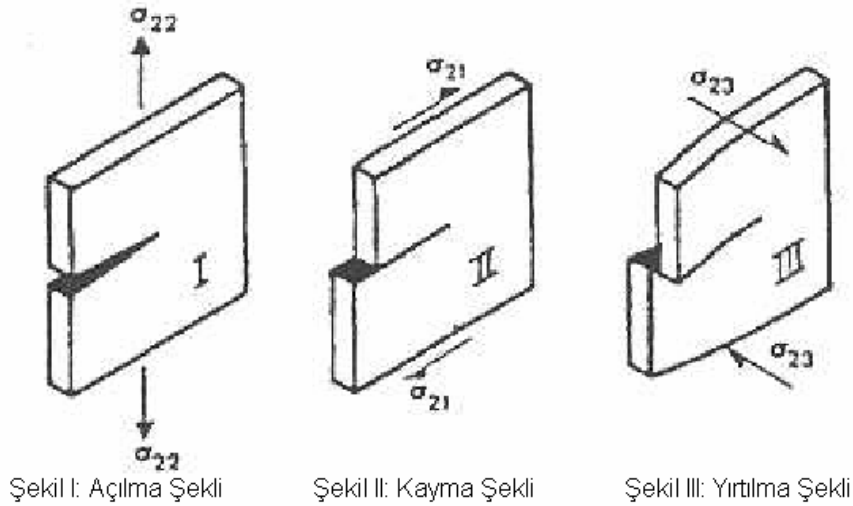
şeklinde olduğudur. Burada, r ve θ , çatlak başlangıç noktasına göre herhangi bir noktanın silindirik koordinatlarıdır. K , gerilme yoğunluk faktörüdür.(Stress intensity factor). Denklemin çözümü $\frac{1}{\sqrt{r}}$ ’ye bağlıdır. $r \rightarrow 0$ iken, diğer parametreler sonlu değer veya sıfır değerini alır, çözüm ise sonsuza yaklaşır. $r=0$ durumunda gerilmede singularite meydana gelir. Çatlak ucu etrafındaki gerilme değeri çatlak ucu noktasının yerine bağlıdır.

Irwin daha sonra enerji yaklaşımıyla (yukarıda G olarak tanımlanan) gerilme yoğunluğu yaklaşımının denk olduğunu ortaya koyarak çatlak ilerlemesinin, kritik

bir şekil değiştirme serbest enerji oranı G_c ortaya çıktığında (yada kritik gerilme yoğunluğu cinsinden K_c) meydana geldiğini göstermiştir.

Genellikle farklı çatlak yüzey şekil değiştirmelerine yol açan 3 yükleme şekli vardır (Şekil 4.2) [15].

- Mod1 : Açılma yada çekme şekli (çatlak yüzeyleri aynı doğrultuda ters yönlerde çekilir).
- Mod2 : Kayma veya düzlem içinde kayma şekli (çatlak yüzeyleri birbirini üzerinde kayar).
- Mod3 : yırtılma veya düzlem dışı kayma şekli (çatlak yüzeyleri düzlem normaline dik ve ters yönde hareket eder).



Şekil 4.2. Yükleme Şekilleri.

4.2.2 Gerilme Yoğunluk Faktörü

Bir yapının çalışma ömrü, çatlak oluşumu ve ilerlemesi ile sınırlıdır. Çalışma sırasında çatlak oluşumu engellenemeyeceğine göre, yapılması gereken eldeki yapıda çatlak etkisini hesaplamanın yolunu bulmaktır. Böylece eldeki veriler tasarım aşamasında bu etkileri en aza indirecek şekilde kullanılabilir veya servisteki yapıda çatlak oluşmuşsa muhtemel davranışın ne olacağı baştan hesaplanabilir.

Kırılma mekaniğinde çatlak ilerlemesi ve en son aşamasındaki malzeme davranışını hesaplamak için gerekli en önemli parametre K gerilme yoğunluk faktörüdür. Bu değer elastik bir katıda, çatlak ucu etrafındaki yoğun gerilme altındaki bölgede

gerilme büyüklüğünün bir ölçüsüdür. Bu K değeri, bilinen çatlak yapıları için elastik, lineer, izotropik ve homojen malzemelerde belirlenmiş ve standart formlarda kullanıma sunulmuştur.

$$\text{Çatlak etrafındaki gerilme alanı için lineer elastik çözüm } \sigma_{ij} = \left[\frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right] f_{ij}(\theta) + \dots$$

denklemini şunu gösterir ki, gerilme bileşenleri σ_{ij} , her zaman aynı formdadır ve yukarıda da belirtildiği gibi polar koordinatlar r, θ cinsinden ifade edilir.

(r, θ) noktası, çatlak ucuna yeterince yakınsa yani $r \ll \text{çatlak boyu}$ ise, yukarıdaki denkleminde takip eden diğer terimler ilk terimin yanında ihmal edilebilir olur. Elastik çözümde $r=0$ durumunda gerilme değeri sonsuz olur. Bu pratikte mümkün değildir ve çatlak ucuna yakın yüksek gerilmeli alanda plastik akma olduğunu gösterir. Ancak plastik akma alanı, $1/\sqrt{r}$ 'nin etkin olduğu gerilme alandan küçükse, çatlak davranışının elastik gerilme yoğunluğu değeri ile belirleneceği kabul edilir. Bu kabul lineer elastik kırılma mekaniğinin temelini oluşturur.

Sabit K değeri, çatlak üzerine gelen yüklemenin, çatlak şekli ve boyutlarının ve diğer bazı geometrik sınırlamaların fonksiyonudur. Şekil 4.3.1 de görüldüğü gibi, farklı çatlak şekilleri için farklı yoğunluk faktörleri vardır. Mod I durumu için, ki bu gerçek uygulamalarda en sık karşılaşılan çatlak şeklidir, K_I kullanılır. Her bir çatlak şekli için kullanılan faktörler, r sıfıra giderken ve $\theta=0$ boyunca, gerilme cinsinden şöyle ifade edilir[15]:

$$\begin{aligned} K_I &= \lim_{r \rightarrow 0} \left[\sqrt{2\pi r} \sigma_{22}(r, \theta) \right] \\ K_{II} &= \lim_{r \rightarrow 0} \left[\sqrt{2\pi r} \sigma_{21}(r, \theta) \right] \\ K_{III} &= \lim_{r \rightarrow 0} \left[\sqrt{2\pi r} \sigma_{23}(r, \theta) \right] \end{aligned} \quad (4.2)$$

K faktörü genel olarak:

$$K = f(g) \sigma \sqrt{\pi a} \quad \text{şeklinde ifade edilebilir.} \quad (4.3)$$

Burada ; σ = malzemeye uygulanan gerilme

a = çatlak boyu

$f(g)$ = numuneye ve çatlak geometrisine bağlı düzeltme faktörü

Tek yükleme durumu için K faktörü cebirsel olarak hesaplanabilir. Bir çatlak şekliyle ilgili daha karmaşık yükleme durumunda K faktörünü hesaplamak için, daha basit sonuçların süper pozisyonundan faydalanılır.

Bir süperpozisyon metodu birleştirme tekniği çok daha doğru yakınsamaların elde edilmesini sağlayabilir. Bu teknik özetle karmaşık bir problemin, sonucu bilinen daha basit alt konfigürasyonlara ayrılmasıdır. Bu basit K çözümlerinin süper pozisyonu ile daha karmaşık bir problem için K değeri elde edilebilir [16].

$$K_{tot} = K_o + \left[\sum_{n=1}^N (K_n - K_o) \right] + K_e \quad (4.4)$$

burada; K_{tot} = Karmaşık geometri için gerilme yoğunluk faktörü.

K_o = Yük uygulanabilir, hiçbir sınırı olmayan şeklin gerilme yoğunluk faktörü.

K_n = n 'inci basit konfigürasyonun gerilme yoğunluk faktörü.

K_e = Sınırlar arasındaki etkileşimin etkisini hesaba katmak için faktör.

K_e , buradaki tek bilinmeyen değerdir. Bu değeri ihmal etmek, %10'dan az bir yanılgıya sebep olacaktır.

Diğer bir yakınsama metodu, çok çeşitli geometrik etkilerin her biri için bağımsız düzeltme faktörlerini çarpmaktır.

$$K = f_1.f_2.f_3.....\sigma\sqrt{\pi a} \quad (4.5)$$

Düzeltilme faktörü f_i şunlar için kullanılır [16]:

- Sonlu genişlik (arka duvar) etkisi
- Ön duvar etkisi
- Çatlak şekli (eliptik akma)

Kullanılan diğer süperpozisyon metotları değişken metot ve ağırlık fonksiyonu metodudur. Geometrisi basit olan düz, dairesel veya eliptik çatlaklar için analitik çözümler mevcutken daha karmaşık geometri ve yükleme durumlarında gerilme yoğunluk faktörü ve gerilme düzeltme faktörünü belirlemek için sonlu elemanlar metodu uygulanmalıdır.

Uniform olmayan simetrik yükleme durumunda gerilme yoğunluk değeri, simetrik yüklemenin daha basit bir şeklindeki bilinen gerilme yoğunluk değeri kullanılarak bulunabilir ve buradan da çatlak yüzeyi şekil değiştirmesine geçilebilir [16]:

$$K_{İmevcut} = \int_0^a \sigma(x) \cdot w(a, x) \cdot dx \quad (4.6)$$

Burada $w(a, x)$ ağırlık fonksiyonu, $\sigma(x)$ ise çatlak bölgesindeki gerilme dağılımıdır. Ağırlık fonksiyonu şu şekilde verilir:

$$w(a, x) = \frac{8\mu}{1+k} \frac{1}{K_{İbilinen}} \left(\frac{\partial v(x)}{\partial a} \right)_{İbilinen} \quad (4.7)$$

Burada μ kayma modülü ve düzlem şekil değiştirme için $k = 3-4 \nu$ (ν poisson oranı) ve düzlem gerilme için $k = (3- \nu)/(1+ \nu)$ 'dür. Bilinen durum için, çatlak yüzeyinin şekil değiştirmesi $v(x)$ 'tir. Daha basit durumlarda bilinen $v(x)$ değeri (4.6) denkleminde yerine konularak çözüme ulaşılır.

4.2.3 Yorulma Çatlak İlerlemesi

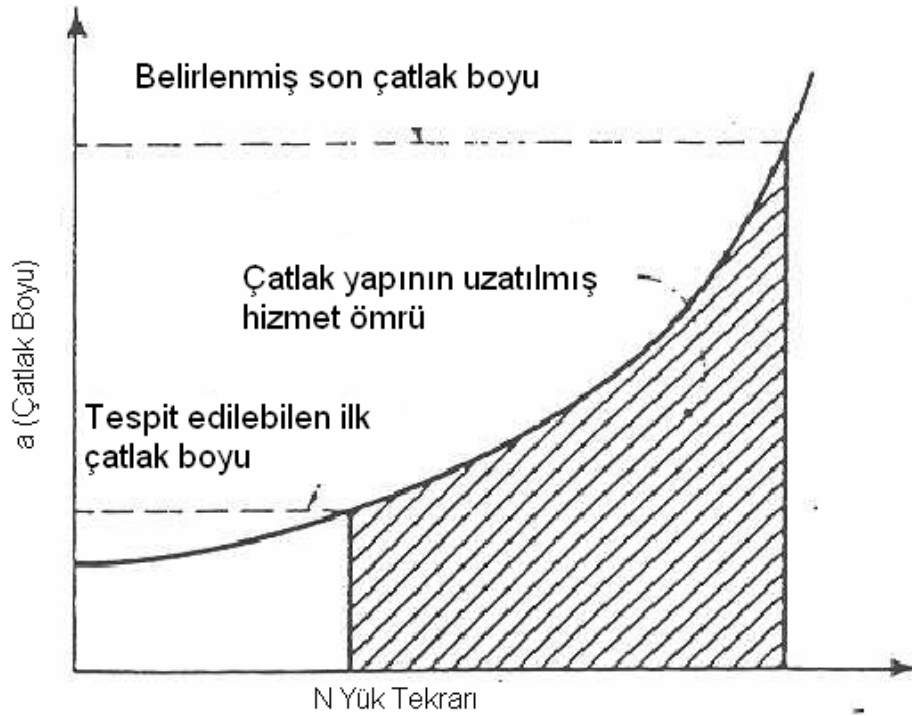
Eğer bir malzeme numunesine sürekli artan bir yük uygulanırsa, malzeme belli bir statik kopma sınırı yüküne ulaşıldığında kırılır. Benzer bir malzemeye bu kırılma yükünün uygulandığını ve malzemenin belli bir miktar şekil değiştirdikten sonra yük kaldırıldığında eski haline döndüğünü varsayalım. Bu yük belli bir tekrar ile uygulandığında malzemenin kırılmasına yol açacaktır. Kırılma yükünün altında belli tekrar ile uygulanan yük sonucu kırılma, yorulma olarak adlandırılır. Malzemenin belli bölgelerinde düzensiz gerilmelere ve şekil değişikliklerine yol açan ve belli tekrardan sonra çatlak veya kırılmaya neden olan yüke maruz kalan malzemedeki, bölgesel, ilerleyen, kalıcı, yapısal değişiklik oluşumuna *yorulma* denir.

Tüm yorulma hasarlarının son aşaması, çatlak boyunun belli bir noktaya kadar büyümesi ve kalan malzemenin artan gerilmeyi taşıyamaması sonucu oluşan kırılmadır. Çatlak boyunun uzamasının nedeni tekrar eden yüküdür.

Kırılma mekaniği yorulma ömrü tahmininde ilk çatlak boyunun bilinmesi gerekmektedir. Düzensizlikler ve imalattan kaynaklanan kusurlar (kaynak boşlukları, döküm hataları v.b..) içeren bir bileşende bir ilk çatlak boyu bilinebilir.

Veya imalat kusurları içermeyen bir malzemenin yorulma ömrü tahmini için çatlak ilerlemesini tespit etmek için kırılma mekaniği yaklaşımları kullanılabilir. Yada bu kırılma mekaniği kuralları kullanılarak çatlak boyunun belli bir boya ulaşması için gerekli yük tekrarı sayısı bulunabilir.

Havacılık sektöründe benimsenen güvenli ömür yaklaşımına göre tasarım, yapıda bir ilk çatlak oluşmuş gibi yapılır. Fakat bu çatlak hiçbir zaman belirlenmiş kritik çatlak boyuna ulaşmaz. Arada kalan süre uzatılmış hizmet ömrü olarak adlandırılır (Şekil 4.3) [17].



Şekil 4.3. Çatlak Bir Yapının Uzatılmış Hizmet Ömrü.

Yapı ömrünün çoğu, çatlak nispeten daha küçük boyutlardayken harcanmış olur. Uygulanan gerilme arttıkça, çatlak büyüme oranı artar.

Çatlak ilerleme oranı $\frac{da}{dN}$ olarak verilir. Yani çatlak boyu a'nın, N yük tekrarı sayısına oranının türevidir.

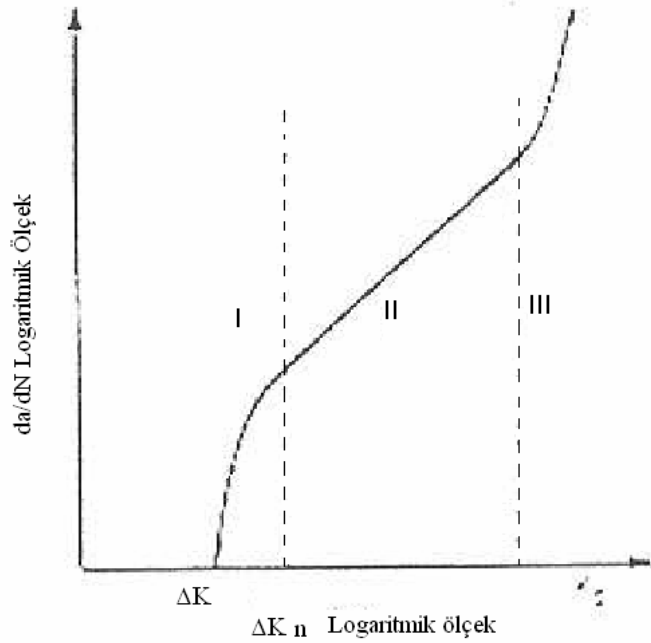
ΔK , Gerilme yoğunluk faktörü değişimi olmak üzere;

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = f(g) \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \text{ dır [17].} \quad (4.8)$$

$\Delta \sigma$, bileşene uygulanan dolaylı gerilmedir.

Bir diğer parametre gerilme oranı, $R = K_{\min}/K_{\max} = S_{\min}/S_{\max}$ 'dır. Çatlak ilerlemesinde ortalama gerilme değeri etkilerinin çoğu, sadece çekme gerilmesi ile ortaya çıkar, bu da $R \geq 0$ durumudur. Negatif R oranlarının etkisi yani basma gerilmesi durumu özellikle eşik seviyelerde yeteri kadar araştırılmamıştır. Sabit genlik koşullarında pek çok malzemeye uygulanan negatif R oranı testi, ΔK değerlerini baz alan çatlak ilerlemesi oranının, $R=0$ olduğu durumla benzerlikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Yada 2 faktöründen fazla artış göstermemiştir.

Şekil 4.4'te örnek bir çatlak büyüme oranı eğrisi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi çatlak ilerlemesi üç bölgede gerçekleşir.



Şekil 4.4 Çatlak Büyüme Oranı Eğrisinin Bölümleri.

R oranının artması, ki bu ortalama gerilme değerini arttırmak anlamına gelir. Sigmoidal eğrinin tüm bölgelerinde çatlak ilerleme oranını artırır. II. bölgedeki artış az olabilir. K_{IC} , kırılma sertliği değerinin etkin olduğu III. bölgede farklı R değerleri için çatlak ilerleme oranında da önemli farklılıklar oluşur. II. ve III. bölgelerde ortalama gerilme değerini ortaya koyan yaygın denklem Forman denklemidir. Genel hali ile [18]:

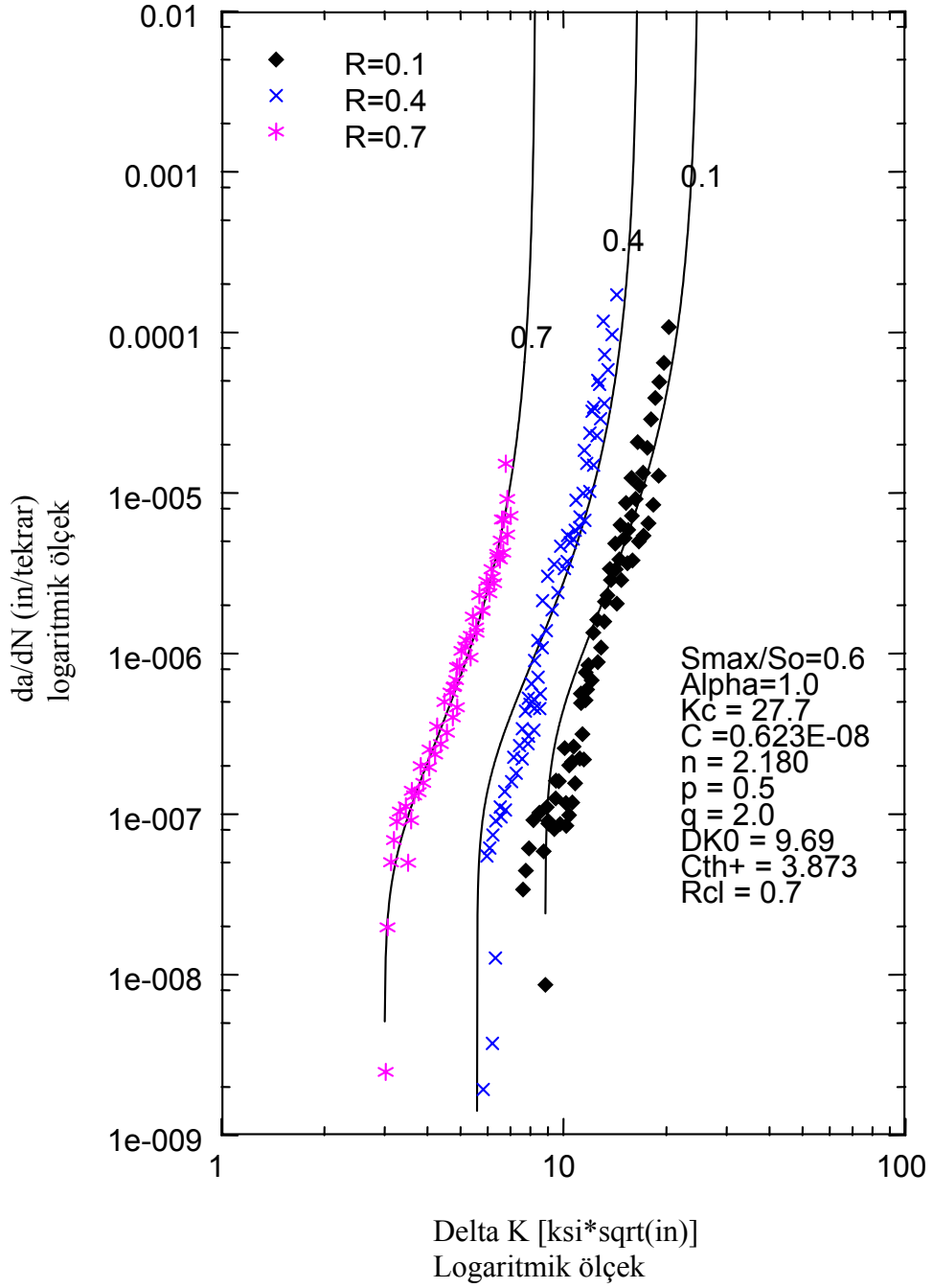
$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (4.9)$$

Burada C ve m deneysel olarak elde edilmiş malzeme yorulma sabitleridir. K_c malzeme ve kalınlık için uygulanabilir kırılma sertlik değeridir.

NASGRO yazılımında, çatlak ilerleme hesaplamaları için NASGRO denklemi denilen bir denklem kullanır. Bu denklemin değişik türevleri NASA'dan Forman ve Newman, Lockheed Martin'den Shivakumar, NLR'den De Koning ve ESA'dan Henriksen tarafından geliştirilmiş ve ilk kez Forman ve Mettu tarafından basılmıştır.

$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c} \right)^q} \quad (4.10)$$

Burada N uygulanan yorulma yükü tekrar sayısı, a çatlak boyu, R gerilme oranı, ΔK gerilme yoğunluk faktörü değişimi, ve C , n , p , ve q da ampirik olarak elde edilmiş sabitlerdir. Çatlak açılma fonksiyonu, f , eşik gerilme yoğunluk faktörü ΔK_{th} ve kritik gerilme yoğunluk faktörü K_c , ilerdeki bölümlerde açıklanacaktır. Bu denklem (4.10) gerilme oranı etkisi için daha doğrudan bir formülasyon sağlar. Ayrıca (4.10) denklemiyle, K_c ve ΔK_{th} değerlerindeki değişmelerin, eğrinin lineer bölgesindeki etkisi azaltılmış olur (K_{max} 'ın uygun seçimiyle). Bu da eldeki veriye daha uygun sonuç sağlar. Şekil 4.5 dökme Alüminyum A357 için denklem (4.10)'a uygun çatlak ilerleme (da/dN - ΔK) eğrisini göstermektedir. Bu malzeme diğer pek çok malzemeden farklı olarak düzensiz bir yorulma sergiler. Bu sebeple genel q değerlerini kullanarak verileri eğriye uydurmak mümkün değildir ve mantıklı bir uygunluk (eğriye uygunluk) elde edebilmek için K_{maks} değerinin çatlak ilerlemesine etkisini belirlemekte 2.0'dan çok daha büyük bir değer gereklidir.



Şekil 4.5. A357 Dökme Alüminyum İçin Denklem (4.10)'un Çatlak İlerleme Eğrisine Uygunluğu.

Nasgro yazılımı, yorulma çatlak kapanması analizini sabit genlikte yükleme altında çatlak ilerlemesi üzerindeki gerilme oranı etkisini hesaplamak için yapar. Plastisite etkili çatlak kapanmalarında çatlak açılma fonksiyonu f , Newman tarafından şöyle belirlenmiştir [17]:

$$f = \frac{K_{op}}{K_{max}} = \begin{cases} \max(R, A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3) & R \geq 0 \\ A_0 + A_1 R & -2 \leq R < 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Çatlak açılmasında kullanılan bu parametreler şöyle belirlenmiştir:

$$A_0 = (0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2) \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} S_{max} / \sigma_0\right) \right]^{1/\alpha} \quad (4.12)$$

$$A_1 = (0.415 - 0.071\alpha) S_{max} / \sigma_0 \quad (4.13)$$

$$A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3 \quad (4.14)$$

$$A_3 = 2A_0 + A_1 - 1. \quad (4.15)$$

Bu denklemlerde, α düzlem gerilme/şekil değiştirme sınır faktörü, ve S_{max} / σ_0 uygulanan maksimum gerilmenin akma gerilmesine oranıdır.

Uygulamada programa girilen S_0, S_1, S_2 , ve S_3 değerleri, uygulanan çekme/basma gerilmelerini, kalınlık veya genişlik boyunca eğmeyi, milli yataklamalarda basıncı gösterir. İki eksenli çekme veya basma durumunda (biaxial) yanlara doğru gerilmeyi ifade etmek için S_4 kullanılır. f_i değerleri geometrik düzeltme faktörleri olup her bir gerilme şekli için kullanılabilir, her çatlak durumu için özel bir düzeltme faktörü çıkarılmıştır.

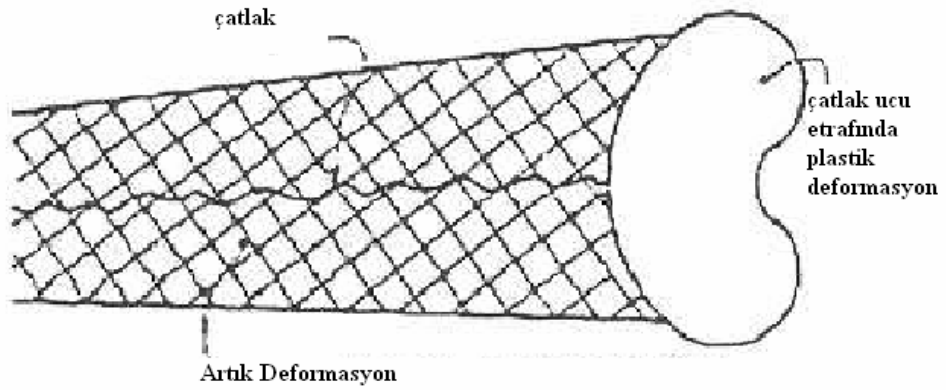
4.2.4 Yorulma Çatlak Kapanması

Çatlak kapanması argümanları, ΔK üzerinde çevresel etkiler kadar çatlak ilerlemesi gerilme oranının etkisini açıklamaya çalışır. Bununla beraber çatlak kapanması teorileri, değişken genlikli yorulma çatlak ilerlemelerinin tahmini açısından da önemlidir.

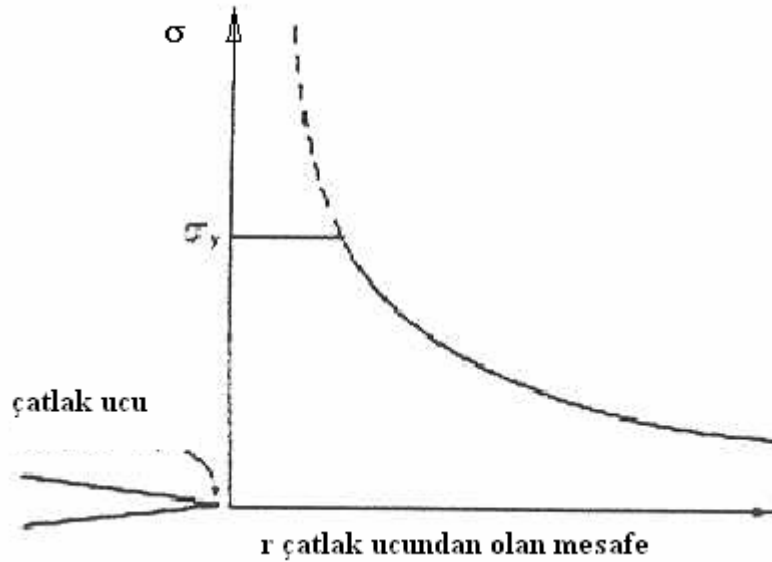
1970'lerin başında Elber yorulma çatlağı yüzeylerinin bir süre sonra çekme yüklemesi altında birbirlerine doğru kapandıklarını, temas ettiklerini ve bir sonraki yük tekrarında yeterli büyüklükte bir yük gelene kadar açılmadıklarını gözlemlemiştir. Elber çatlak kapanmasının, çatlak ucundaki plastisitenin bir sonucu olduğunu ortaya koymuştur [15]. Çatlak ucu civarındaki gerilme malzemenin akma gerilmesini aştığında çatlak ucu yakınındaki bölgede bir plastik şekil değiştirme hattı oluşur. Şekil 4.6.'da görüldüğü gibi çatlak ilerledikçe plastik deformasyona uğramış malzeme izi oluşur ancak yapının geri kalanı elastik kalır. Bu plastik şekil değiştirme

hattının boyu yapının gerilme koşullarına bağlıdır; gerilme yoğunluk faktörü K 'nın ve akma mukavemeti (S_y)'nin bir fonksiyonudur. Von Mises veya maksimum kayma gerilmesi akma kriteri ile gerilme denklemleri kullanılarak bu hattın boyu hesaplanabilir.

Plastik şekil değiştirme hattındaki gerçek gerilme-birim şekil değiştirme dağılımını elde etmek oldukça zordur ancak tasarımda lineer elastik kırılma mekanizması kullanmak için gerekliliği önemli değildir.



Şekil 4.6. Plastik Deformasyona Uğramış Malzeme.



Şekil4.7. Çatlak Ucu Etrafında Akma.

4.2.4.1 Plastik Şekil Değiştirme Hattının Boyu

İnce kesitli yapılarda kalınlık boyunca gerilme (σ_z) önemli ölçüde değişiklik göstermez. Serbest yüzeyin normali doğrultusunda gerilme sıfır olduğundan ($\sigma_z=0$) iki eksenli düzlem gerilme durumu olacaktır [15].

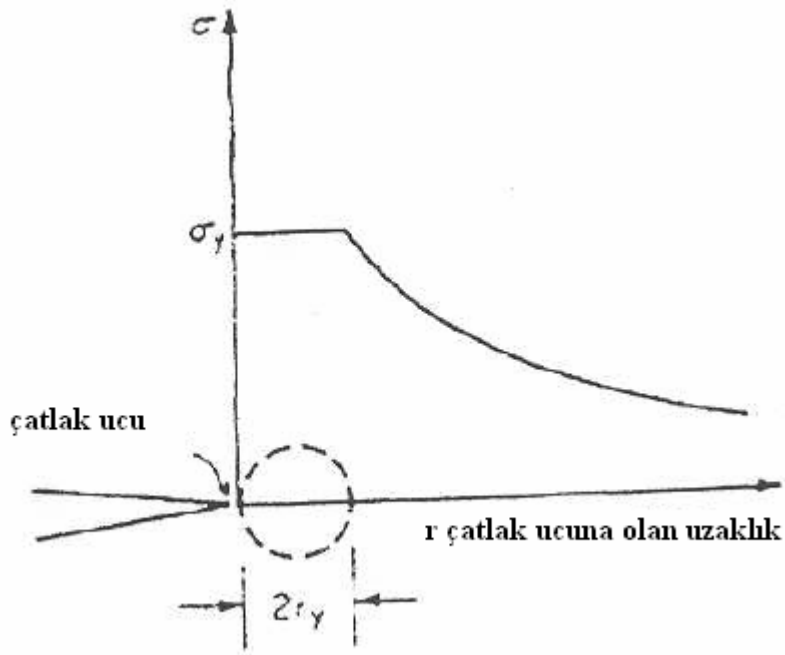
Kalın kesitli yapılarda ise malzeme, kalınlığı sebebi ile z doğrultusunda sınırlanacağından $\epsilon=0$ - düzlem şekil değiştirme durumu- ortaya çıkar. Bu sebeple plastik şekil değiştirme hattının boyu düzlem şekil değiştirmede daha az olacaktır.

- Monoton yüklemeye Plastik Hattın Boyu: Monoton yüklemeye hattın boyu yaklaşık olarak şöyle ifade edilebilir [15].

$$r_y = \left\{ \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \right\} ; \text{düzlem gerilmeye.} \quad (4.16)$$

$$r_y = \left\{ \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \right\} ; \text{düzlem şekil değiştirmede.} \quad (4.17)$$

r_y Şekil 4.8 de görülmektedir.



Şekil 4.8. Monoton Plastik Hattın Boyu.

Malzeme üzerinden yük kaldırıldığında plastik olarak uzamış çatlak kenarları, yük sıfıra inene kadar birbirine temas eder.

4.2.4.2 Çatlak Açılma Gerilmesi

Elber'in ortaya koyduğu bir diğer konu çatlak açılma gerilmesidir. Bu değer çatlağın tamamen açılması için gerekli olan gerilme değeridir ($\sigma_{op} = \sigma_{açılma}$). Çatlağın ilerlemesi için, çatlağın öncelikle tamamen açılması gereklidir [19].

$$\Delta K_{ef} = K_{maks} - K_{açıl}$$

$$\Delta K = K_{maks} - K_{min} ; \quad (4.20)$$

$K_{açılma} > K_{min}$ olduğundan, $\Delta K > \Delta K_{ef}$ olacaktır.

Bu sebeple yorulma çatlak ilerlemesi tahminlerinde, ΔK değerinden küçük olan efektif gerilme yoğunluk faktörü oranı ΔK_{ef} kullanılır.

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K_{ef}) \quad (4.21)$$

Elber ΔK_{ef} değerinin R'yi hesaba katmayı sağladığını ortaya koymuştur. R'nin yüksek değerlerinde daha az çatlak kapanması oluşur ve ΔK_{ef} , ΔK değerine yaklaşır çünkü $K_{açılma}$, K_{min} 'a yaklaşır. Bu durum çatlağın daha büyük bir yüklemeye maruz kalmasına neden olur. Amprik denklem şu şekildedir [19]:

$$\Delta K_{ef} = U \Delta K$$

$$U = \frac{\Delta K_{ef}}{\Delta K} = 0.5 + 0.4R \quad (4.22)$$

Denklem (4.18), $R > 0$ durumunda geçerlidir.

4.2.4.3 Nasgro Yazılımında Çatlak Kapanması

Düzlem gerilme/şekil değiştirme sınırlama faktörü, α , her bir malzeme sistemi için çatlak ilerleme verilerini eğriye uydurmak amacıyla sabit olarak alınır. Değerler, düzlem gerilme koşuluna karşılık gelen 1 ve düzlem şekil değiştirmeye karşılık gelen 3 arasında değişir.

K_{Ic}/σ_{ys} oranının oldukça düşük olduğu yüksek mukavemet çelikleri gibi malzemeler nispeten daha yüksek α değerleri alırlar (2.5 veya üzeri). K_{Ic}/σ_{ys} oranı yüksek olan malzemeler, 1.5-2 arasında değişen α değerleri alırlar. Deneysel sonuçlarla daha iyi bir ilinti kurabilmek için α değerinin K_{maks} ile değişmesine izin vermek gerekir [19].

Buna ek olarak maksimum uygulanan gerilmenin, akma gerilmesine oranı olan S_{maks}/σ_0 değerinin sabit olduğu kabul edilir. Bu parametreyi, çatlak açılma fonksiyonu üzerindeki etkisi nispeten azsa, $R > 0$ durumlarında (gerilme oranı) sabit kabul etmek iyi sonuçlar verir. Nasgro için eğri uygunluğu bulunan çoğu malzemede $S_{maks}/G_0=0.3$ seçilir. Bu değer çok çeşitli deney numuneleri kullanılarak yapılan yorulma çatlak ilerlemesi testlerinden elde edilen ortalama değere yakın olması sebebi ile seçilir.

Bazı malzemeler ise çok küçük bir gerilme oranı duyarlılığı sergilerler bu sebeple de çatlak kapanması etkileri göz önüne alınmadan değerlendirilirler. Bu gibi özel durumlarda çatlak açılma fonksiyonunu atlayarak (bypass) eğri uydurma seçeneği tercih edilir. Bu atlamayı yapmak için gerekli parametreler $\alpha = 5.845$, $S_{maks}/\sigma_0 = 1.0$ dır. Bu parametreler denklem (4.10)'daki f değerinin $R < 0$ için sıfıra; $0 \leq R < 1$ içinse R 'ye ($K_{açılma} = K_{min}$) eşit olması durumunda seçilir. Böylece R 'nin pozitif olduğu durumlar için çatlak ilerlemesi ilişkisi, denklem (4.10), aşağıdaki şekle indirgenmiş olur:

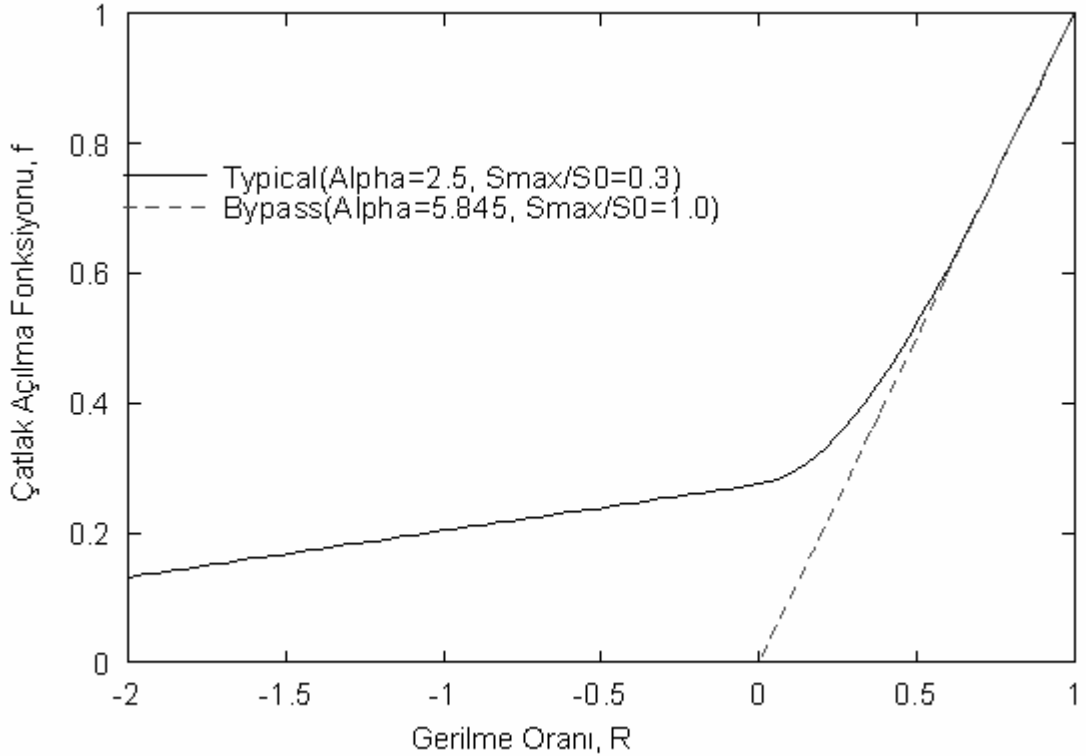
$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^n \left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K}\right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c}\right)^q} \quad (4.23)$$

Burada tüm ΔK oranı çatlak ilerlemesini etkiler ve negatif gerilme oranları için denklem şu şekilde olur:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C K_{max}^n \left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K}\right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c}\right)^q} \quad (4.24)$$

$\Delta K/(1-R) = K_{max}$ olduğundan Şekil 4.10 açılma fonksiyonu f 'yi, çoğu çelik için tipik olan $S_{maks}/\sigma_0 = 0.3$ ve $\alpha = 2.5$ değerinde ve çatlak kapanmasını atlamak için (bypass) $S_{maks}/\sigma_0 = 1.0$, $\alpha = 5.845$ değerinde, gerilme oranının bir fonksiyonu olarak gösterir. Plastisite etkili çatlak kapanmasının miktarını yansıtan f , daha yüksek gerilme oranlarında ($R = 0.7$ civarında) çatlak kapanması ihmal seçeneğine yakınsar. Ancak

negatif gerilme oranlarında, $S_{\max}/\sigma_0$ oranı, malzemedeki çatlak kapanması miktarını oldukça etkiler. Bu sebeple $R=-1$ 'den -2 'ye kadar negatif gerilme oranına sahip, yüksek tekrarlı basma gerilmesine maruz kalan sarmallı basınç tüpleri gibi yapılar için Nasgro'da ömür tahminleri yapılabilir. Bu gibi durumlarda yaklaşık bir $S_{\max}/\sigma_0$ oranı hesaplamak için kullanılacak $S_{\max}$ değerini bulurken $S_{\min}$ 'un mutlak değerini kullanmak daha uygun test sonuçları elde etmeyi sağlar.



Şekil 4.10. Çatlak Açılma Fonksiyonu – Gerilme Oranı.

Denklem (4.23)'de (kapanma atlama-*bypass*–seçeneği $R>0$ için) p ve q parametreleri sıfır kabul edilirse denklem Paris denklemine ($da/dN=C \Delta K^n$) indirgenmiş olur. Aynı şekilde denklem (4.10)'da kapanmaya göre düzeltilmiş Paris denklemine indirgenebilir.

Sabit genlikli yorulma yüklemeleri için, Newman and Raju [20] ΔK 'yı bir çatlak kapanma faktörü, β_R ile çarpmanın yarı eliptik yüzey çatlakları ile çeyrek eliptik köşe çatlaklarında daha doğru çatlak ilerleme tahminleri yapmayı sağladığını göstermişlerdir. Bu β_R faktörü, çatlak önünün serbest bir yüzeyle kesiştiği noktalarda ve gerilme oranının bir fonksiyonuysa uygulanabilir. $R>0$ için, β_R şöyledir[20]:

$$\beta_R = 0.9 + 0.2R^2 - 0.1R^4 \quad (4.25)$$

ve $R \leq 0$ için, β_R 'nin 0.9 değeri aldığı varsayılır. NASGRO 3.0'da, ΔK , tüm köşe çatlak modelleri için, plakada yüzeysel çatlak (SC01 ve SC02), kürede yüzeysel çatlak (SC03) içi boş silindirde yüzeysel çatlak durumları için β_R faktörü ile çarpılır.

Nasgro 3.0 da çatlak açılma fonksiyonu, sabit genlikli yüklemeye maruz kalan ve çatlak ilerlemesi malzemede plastik deformasyona uğramış bir hat boyunca ilerleyen merkez çatlağı bulunan panellerin analizinden türetilmiştir. Bu eğilme etkisinin hesaba katılmadığı anlamına gelir ve çatlak açılma denklemi (4.11), plastisite sebepli çatlak kapanmasını hesaba katarken, ileri oksit veya pürüzlülük sebepli çatlak kapanmasını dikkate almayabilir.

4.2.5 Eşik Gerilme Yoğunluk Faktörü Değişimi (ΔK_{th})

Denklem (4.10)'daki eşik gerilme yoğunluk faktörü değişimi, ΔK_{th} , aşağıdaki amprik denklemle ifade edilebilir:

$$\Delta K_{th} = \Delta K_0 \left(\frac{a}{a + a_0} \right)^{\frac{1}{2}} / \left(\frac{1 - f}{(1 - A_0)(1 - R)} \right)^{(1 + C_{th}R)} \quad (4.26)$$

Burada R , gerilme oranı, f Newman kapanma fonksiyonu, A_0 ise denklem (4.12)'de f 'yi hesaplamada kullanılan sabittir. ΔK_0 , $R = 0$ değerinde eşik gerilme yoğunluk faktörü değişimidir. C_{th} amprik sabit, a çatlak boyu, ve a_0 ilk çatlak boyudur. Bu denklem bir öncekinin arctan fonksiyonu ile modifikasyonudur [21]. R 'nin pozitif ve negatif değerleri için C_{th} ve ΔK_0 değerleri Nasgro'nun malzeme kütüphanesinden seçilirken, a_0 ilk çatlak boyu değeri 0.00158 inch (0.0381mm) sabit değer olarak alınır.

4.2.6 Kırılma Dayanımı ve Kritik K

Gerilme yoğunluk faktörü kritik bir değere K_c ulaştığında kararsız kırılma meydana gelir. Bu kritik gerilme yoğunluk faktörü değeri malzemenin kırılma dayanımı veya kırılma dayanımı olarak bilinir. K_c için genel bir denklem şöyledir:

$$K_c = S_c \sqrt{\pi a_c} f \left(\frac{a_c}{w} \right) \quad (4.27)$$

Burada K_c çatlak instabilitesinde uygulanan nominal gerilme, a_c instabilite durumunda çatlak boyu ve w ise malzemenin genişliğidir. K_c değeri, sıcaklığa, şekil değiştirme oranına, çevre koşullarına, kalınlığa ve çatlak boyuna bağlıdır.

Bir malzemenin kırılma dayanımı özellikleri, çatlak ilerlemesi analizlerinde gereklidir. Bu özellikler, düzlem şekil değiştirme kırılma sertliği (K_{Ic}), parça boyunca kırılma dayanımı (K_{Ic}) ve kalınlığın bir fonksiyonu olarak elde edilebilen diğer kırılma dayanımı değerlerini (K_c) içerir. K_{Ic} değerleri özellikle, gerçek yapılardaki akmalar kısmi çatlak olduğundan (yüzeysel veya köşe çatlaklar) önemlidirler. Kırılma dayanımının kalınlığa bağlı olmasının temel nedeni sınırlamadaki değişikliklerin malzemede gerilme durumunda değişiklik meydana getirmesidir. İnce yapılar-bunlarda sınırlama da küçüktür-düzlem gerilmeye maruz kalırken, düzlem şekil değiştirmeye maruz kalan kalın yapılarda sınırlama da fazladır.

Aşağıdaki denklem çatlak problemlerinde değişik malzemeler için K_c 'ye karşı kalınlık ilişkisini ortaya koyar:

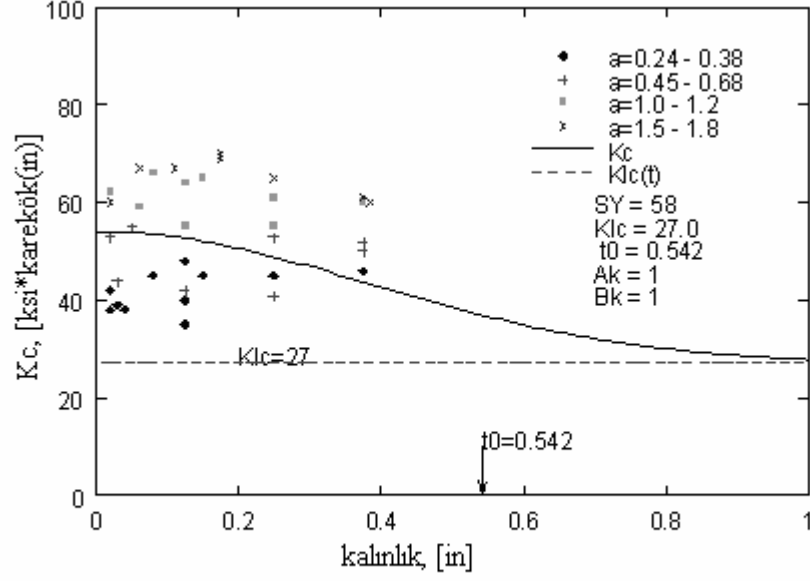
$$K_c / K_{Ic} = 1 + B_k e^{-(A_k / t_0)^2} \quad (4.28)$$

Burada,

$$t_0 = 2.5 \left(K_{Ic} / \sigma_{ys} \right)^2 \text{ dir.} \quad (4.29)$$

Bu Vroman [12] tarafından ortaya konulan ve (4.28) ve (4.29) no'lu denklemlerde $A_k = 5$ ve $B_k = 1$ kabul edilerek bulunan genellemedir. Nasgro yazılımı tüm parça boyunca çatlak geometrilerinde (yazılımda TCXX ve SCXX olarak ifade edilen çatlak durumları) K_c değerini hesaplamak ve (4.10) denkleminde yerine koymak için bu denklemleri kullanır. Ayrıca tek boyutlu yüzeysel çatlak durumlarında da (SC06, SC09, ve SC10)'da K_c yi belirlemek için (4.28) ve (4.29) denklemlerini kullanır.

Kalınlığın bir fonksiyonu olmasının yanı sıra kırılma dayanımı, çatlak boyuna veya daha doğrudan gerilme seviyesine bağlıdır. R eğrisi etkisi olarak bilinen bu durum ince yapılarda daha baskındır. Şekil 4.11, 2219-T87 Alüminyum numunelerden elde edilen ve değişik çatlak boyları için kalınlığın bir fonksiyonu olarak çizilen K_c verilerini göstermektedir [23].



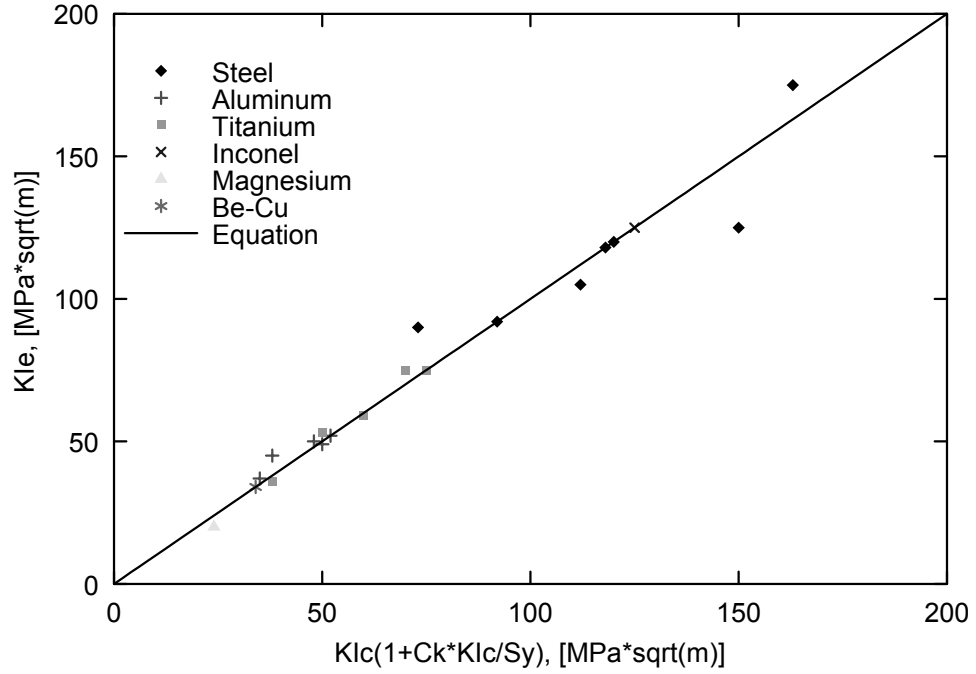
Şekil 4.11 - Kc- Kalınlık Ve R Etkisi- Alüminyum 2219-T87R.

Nasgro 3.0 veri tabanında bulunan bir malzemenin Kc kalınlık eğrisi, çoğunlukla veri noktalarının ortalamasını gösterir ve kırılma dayanımı üzerindeki gerilme seviyesi/çatlak boyu etkisini hesaba katmaz. Bu sebeple kullanıcı yüksek bir gerilmeye çatlak ilerlemesi analizi yaparken, kısa çatlak boylarında düşük tekrarlı yükleme durumu için elde edilen sonuçlar her zaman güvenilir olmayabilir. Parça içine doğru da ilerleyen iki boyutlu çatlak içeren numunelerden alınan kırılma dayanımı verileri de çatlak boyu ve gerilme seviyesine göre dayanımda değişiklikler göstermektedir ancak kalınlığa az bir duyarlılık gösterir. Bu parça içine doğru çatlak geometrilerinde (programda CXX ve iki boyutlu SCXX çatlak durumları) (4.10) denklemindeki Kc değeri Nasgro malzeme kütüphanesinden elde edilen sabit bir K_{Ic} değerine eşit olur. Uygun eğriyi çizdirme sırasında verilen malzeme/çevre kombinasyonu için K_{Ic} seçilir. Bu seçim yapılırken PS(T)'lerden veya diğer yüzeysel çatlamaş numunelerden gelen kırılma dayanımı verileri baz alınmalıdır. Eğer bu mümkün değilse K_{Ic} için şu yaklaşım kullanılabilir [22]:

$$K_{Ie} = K_{Ic} \left(1 + C_k K_{Ic} / \sigma_{ys} \right) \quad (4.30)$$

Burada C_k ampirik bir sabittir ve birimi $\text{boy}^{-1/2}$ 'dir. Bu ilişki pek çok malzeme için uygundur. K_{Ic}/σ_{ys} oranı yüksek olan malzemelerde, bu denklemle hesaplanan K_{Ie}

oranı yüksektir. Bu gibi durumlarda daha ihtiyatlı olması açısından Nasgro malzeme dosyalarına girilen K_{Ic} değerleri, K_{Ic} 'nin 1.4 katı olacak şekilde sınırlandırılır.



Şekil 4.12. Yüzey Çatlağında Kırılma Dayanım Eğrisi.

4.2.7 Hasar Kriteri

Çatlak kararsızlığının genellikle, K_{max} değeri, malzemenin kırılma dayanımını (K_c) aştığında meydana geldiği kabul edilir. Parça boyunca ilerleyen çatlaklarda K_{max} değeri denklem (4.28) ve (4.29) ile hesaplanan K_c değeri ile karşılaştırılır. Parça içine doğru da ilerleyen 2 boyutlu çatlak geometrilerinde ise K_{maks} değeri K_{Ic} ile karşılaştırılır. Bazı serbest yüzeyi olan kısmi çatlak geometrilerinde (SC01-05-11-12 ile CC01-04 grupları) K_{max} değeri, K_{Ic} 'nin 1.1 katı ile karşılaştırılır. Ayrıca eğer net kesitteki gerilme, malzemenin belirli ortalama akma gerilmesi değerini aşarsa-ki bu değer akma gerilmesi ile kopma sınırı gerilmesinin ortalaması olarak kabul edilir-hasar oluştuğu kabul edilir [23].

Yazılımda, kullanıcı tarafından tercih edilebilecek iki yükleme koşulu vardır. Programda bazı veya tüm bloklar için (blok: yazılımda yükleme koşulu senaryosu) çevresel etkilerle desteklenmiş (örneğin korozyon gerilmesi) eşik gerilme yoğunluk faktörü K_{eac} ile beraber K_{max} seçeneği işaretlenebilir. Eğer K_{max} değeri kullanıcı tarafından girilen K_{eac} 'yi geçerse kırılma oluştuğu kabul edilir ve çatlak ilerlemesi

analizi bitirilir. Diğer seçenek her blok için bir referans gerilme değeri girmektir. O zaman referans gerilmeden-yani limit yüklemdeki gerilme değerinden- hesaplanan K_c değeri, seçilen malzemenin K_c değerini aştığında kırılma meydana gelir. Seçilen K_c değeri çatlakın tüm malzeme boyunca veya bir kısmı boyunca olup olmadığına göre seçilir.

4.2.8 Akma Kontrolü

Net kesite gelen gerilme değeri malzemenin akma dayanımını aştığında yazılımda bir uyarı verilir. Burada net kesite gelen gerilme değeri:

$$S_n = P/A_n + Mc/I_n \quad (4.31)$$

A_n net alan, P son yük, M meydana gelen moment, c dış fiberlere olan mesafe, ve I_n de net kesitte oluşan atalet momentidir. Yazılım her bir çatlak durumu için akma denklemleri içerir. Net kesit uyarısından sonra da çatlak ilerleme analizi devam eder ancak kullanıcı elde edilen sonucun güvenilirliği konusunda dikkatli olmalıdır. Bunun nedeni malzeme akma sınırını geçtiğinde K_c değerinde azalma olmasıdır. Bu sebeple bir malzemenin net kesiti akma sınırından yüksek değerlerde analiz edilmesi gerekiyorsa, tahmini ömür daha fazla çıkacak olmasına rağmen daha düşük K_c değerleri kullanılmalıdır.

Parça içine doğru da ilerleyen iki boyutlu çatlak durumunda, K_{Ic} ve K_{Ie} verileri gerekir. Net bağlar arası akma meydana geldiğinde çatlak, sanki parça boyunca tek doğrultuda gibi düşünülerek hasar analizleri yapılır. Bağlar arası akma analizi aşağıdaki kriter kullanılarak yapılır [15].

$$a + \rho \geq t \quad (4.32)$$

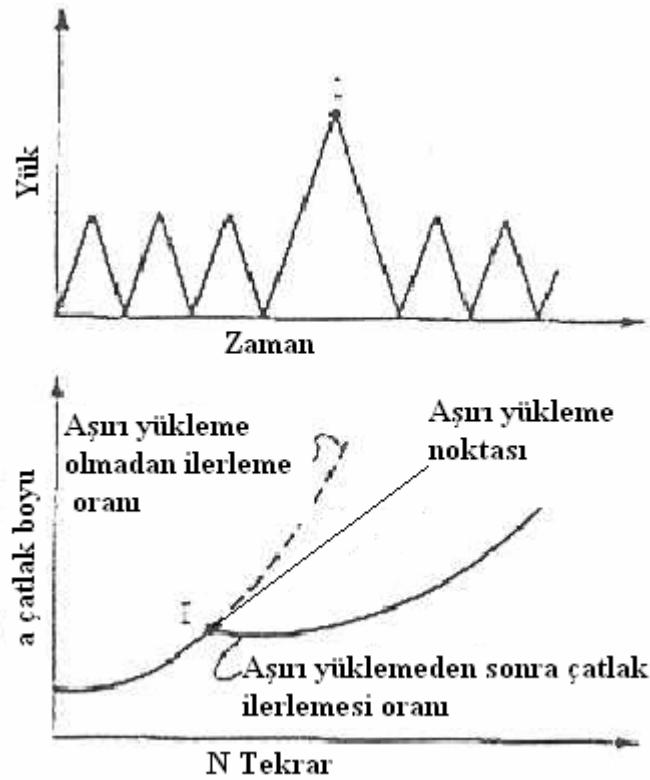
plastik hattın boyu , ρ , şöyle elde edilir:

$$\rho = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (4.33)$$

Bu kontrol yapılır ancak program herhangi bir uyarı vermez. Bağlar arası akma kriterine geçilmeden önce K_{max} değeri K_{Ic} ile kıyaslanır. Daha sonra da uygun tek boyutlu çatlak için K_{max} değeri, denklem (4.28) ve (4.29)'dan hesaplanan K_c değeri ile kıyaslanır. Yüzey çatlaklarında program çatlak derinliğinin, parça kalınlığını aşıp aşmadığını da kontrol eder. Eğer bu olursa, program uygun tek boyutlu çatlak çözümüne geçer.

4.3 Yük Etkileşimi Altında Çatlak Büyümesi

Yüklerin birbirleri ile olan etkileşimlerinin çatlakla etkisi ilk 1960'lı yıllarda fark edilmiştir. Tek bir aşırı yükleme sonrasında çatlak ilerlemesi oranında bir azalma olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.13). Bu durum çatlak yavaşlaması olarak da bilinir [14].



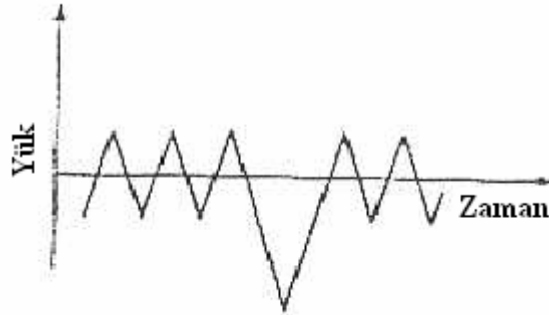
Şekil 4.13. Aşırı Yükleme Sonrası Çatlak Yavaşlaması.

Çatlak yavaşlaması, aşırı yüklemeden sonra belli yükleme periyodunda devam eder. Bu periyottaki tekrar sayısı, aşırı yüklemede oluşan plastik hattın boyu ile bağlantılıdır. Aşırı yükleme sonucu oluşan plastik hat büyüdükçe, çatlak yavaşlama etkisi daha uzun sürer.

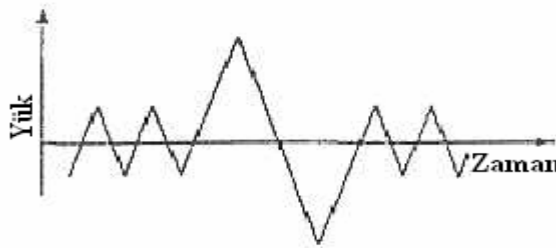
Çatlak ilerleme oranı, aşırı yük uygulandıktan hemen sonra minimum seviyeye inmez. Çatlak, plastik hattın içindeki mesafenin 1/4 ila 1/8'i oranında ilerledikten sonra minimum değere ulaşılır. Bu durum gecikmiş yavaşlama olarak bilinir.

Tek bir aşırı baskı yüklemesi (ters yükleme), Şekil 4.14'de görüldüğü gibi genellikle çatlak ilerleme oranında düşüşe neden olur. Bununla beraber Şekil 4.15'de görüldüğü gibi bir aşırı yüklemenin ardından gelen baskı yüklemesi sonucunda çatlak yavaşlaması önemli oranda azalır.

Çoktan aza yükleme durumunda da çatlak yavaşlaması meydana gelir. Yavaşlama, aşırı çekme yüklerinin sayısı P 'nin artmasıyla artar. Bu durum aşırı yüklemenin sınırlayıcı bir doygunluğa ulaşılmasına kadar devam eder. Bu durum için aşırı yükleme çevrimleri arasındaki süre kritiktir. (Şekil 4.16'da M değeri). Birbirine çok yakın gerçekleşen aşırı yükleme, çatlak yavaşlamasının avantajlarını ortadan kaldırır çünkü malzeme tepkisi bu yükleme durumuna karşın sabit genlikli çatlak ilerlemesi oluşturmak eğilimindedir.



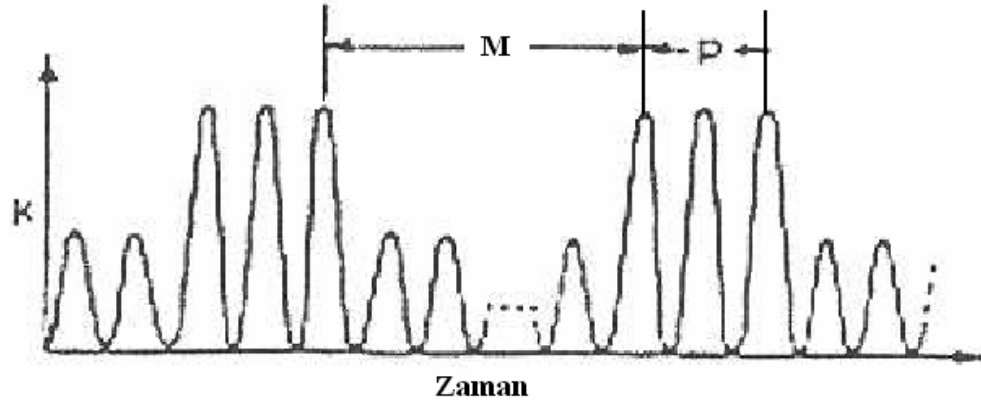
Şekil 4.14 Tek Bir Aşırı Bası Yükleme.



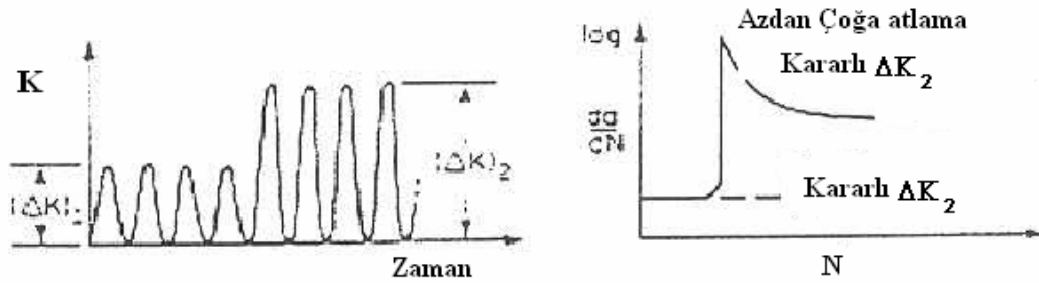
Şekil 4.15 Aşırı Yüklemeyi Takip Eden Baskı Yükleme.

Azdan çoğa yükleme durumunda çatlak ilerlemesi hızlanabilir. Neyse ki çatlak yavaşlaması etkileri ile karşılaştırıldığında bu hızlanma kısa sürede stabilize olur.

Periyodik aşırı yüklemeler de her zaman avantaj sağlamaz. Bazı düşük tekrarlı yorulma testlerinde, periyodik aşırı yüklemenin de çatlak ilerlemesinde hızlanmaya neden olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.16. Birden Fazla Aşırı Yüklemede Yüklemeler Arasındaki Zaman.



Şekil 4.17 Yükteki Artışla Çatlak İlerleme Oranının Hızlanması.

4.3.1 Nasgro Yazılımında Yük Etkileşimi Altında Çatlak İlerlemesi Analizi için Kullanılan Modeller

Nasgro yazılımında çatlak ilerlemesi analizinde, yukarıda çatlak ilerlemesini etkileyen yükleme durumları için çeşitli modeller ve bu modellerin ortaya koyduğu formüller kullanılır.

4.3.1.1 Genelleştirilmiş Willenborg Modeli

Bu model sadece çatlak yavaşlaması ile ilgilidir. Genellenmiş Willenborg modeli K_R artık gerilme yoğunluğu değerinin kullanır. Bu değer yük etkileşimine bağlı olarak efektif gerilme oranını bulmakta kullanılır.

4.3.1.2 Değiştirilmiş Genelleştirilmiş Willenborg Modeli (MGW:Modified Generalized Willenborg)

Bu model Genellenmiş Willenborg yük etkileşimi modelinin, bası yüklemelerine (ters yüklemeler) bağlı olarak yavaşlama etkilerinin azalması durumunu da hesaba katan genişletilmiş şeklidir. MGW modeli, önceki modelde de olduğu gibi artık gerilme yoğunluğu K_R değerini kullanarak yük etkileşimine bağlı efektif K_{max} ve K_{min} değerlerini belirler.

4.3.1.3 Walker-Chang Willenborg Modeli

Chang ve Engle Genelleştirilmiş Willenborg modelini geliştirerek ters yüklemeler sebebiyle oluşacak ivmelenmeyi de modele dahil etmişlerdir. Pozitif gerilme oranları için Walker denklemini, negatif gerilmeler içinse Chang tarafından geliştirilmiş bir denklemi kullanarak oluşturulan formül, CRKGRO adlı bir kodla bilgisayara aktarılmıştır. Genellenmiş Willenborg modelinde olduğu gibi yavaşlama etkileri de modellenmiştir.

4.3.1.4 Strip Yield Model

Strip Yield, büyüyen yorulma çatlaklarının çatlak başındaki plastik alan boyunca ilerleyeceğini ve plastik deformasyonun gerilme etkileşimlerinin etkisine, çatlak ilerlemesinde ivmelenme veya yavaşlama gibi katkısı olduğunu varsayar.

4.3.1.5 Sabit Kapanma Modeli

Bu model, bazı yük spektrumlarında, kapanma gerilmesinin belli bir kararlı değerden çok fazla sapmadığı gözlemini temel alan basit bir kapanma modelidir. Bu kararlı değer, spektrumun çatlak başında oluşan kalıcı gerilmeyi dolayısıyla da kapanma seviyesini sabit tutmaya yeterli bir “kontrol aşırı yüklemesi”ne ve “kontrol ters yüklemesi”ne sahip olduğu varsayılarak belirlenir.

Nasgro yazılımında kapanma seviyeleri üç yöntemle hesaplanabilir. İlk yöntemde test verilerinin ampirik uygunluk eğrisinden elde edilen fonksiyondan hesaplanabilir.

Bu uygunluk eğrisi üç parçadan oluşur. Bu parçalardan ikisi, Walker çatlak ilerleme kuralına dayanan bir ilişki ile ortada birleşen iki düz çizgi şeklindedir. Uygunluk sağlama eğrileri kullanıcı tarafından belirlenir. İkinci yöntemde kapanma seviyesi doğrudan girilebilir. Üçüncü olarak da, kapanma seviyesini belirlemek için Newman kapanma fonksiyonu kullanılır.

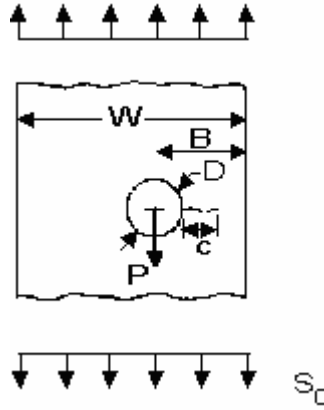
Bu modellerle ilgili daha ayrıntılı bilgi ve formüller [23]'de bulunabilir.

5. ÇATLAK İLERLEMESİ DURUMUNDA HASAR OLASILIĞI ANALİZİ

Bu bölümde bir hava taşıtına ait olduğu varsayılan bir yapının, çatlak ilerlemesi durumunda hasar olasılığının hesaplanmasına yönelik bir örnek problem çözülecektir.

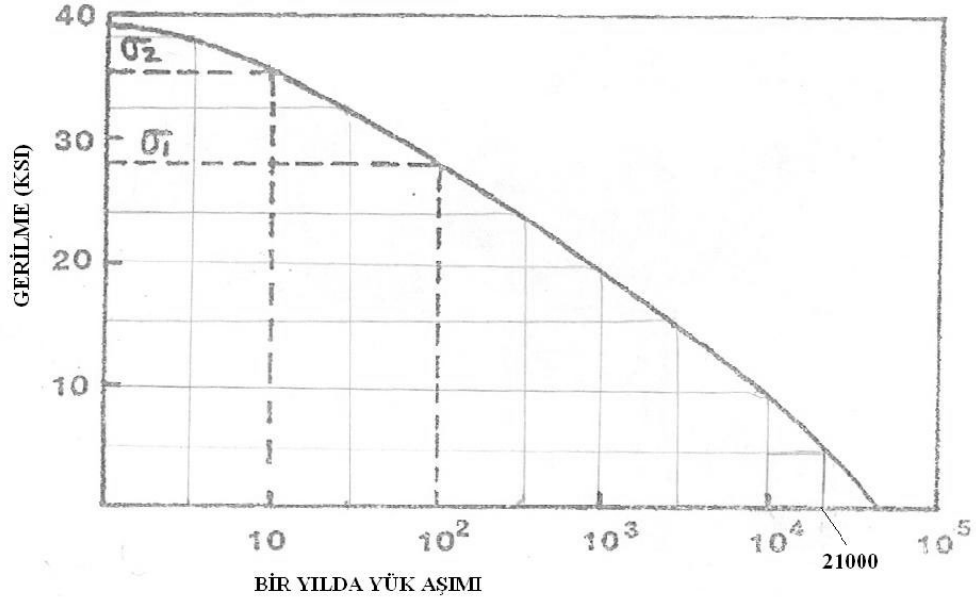
Problem: Şekil 5.1’de görünen uçak kanadına ait olduğunu varsayılan 2024-T3 Alüminyum alaşımından imal edilmiş levhadaki $D=10$ mm delik etrafında 0.05 mm bir ilk çatlak bulunmaktadır. Bu hava taşıtının bir senede maruz kaldığı yük aşımı Şekil 5.2’de görülmektedir.

$W=100$ mm
Kalınlık, $t=1.5$ mm
Delik çapı, $D=10$ mm
Delik eksenli, $B=50$ mm
İlk çatlak, $c_i = 0.05$ mm



Şekil 5.1. Parça Geometrisi

Bu durum göz önüne alınarak, bir sene sonunda yapıda meydana gelecek hasar olasılığı ne olur?



Şekil 5.2. Bir Senede Yapının Maruz Kaldığı Aşırı Gerilme Adedi.

Çözüm: Yapının herhangi bir bölgesine ait bu bileşendeki hasar olasılığı uygulanan gerilme ve çatlak ilerlemesinin bileşik olasılığıdır.

5.1 Yük Aşımı Değerlerinin Olasılığı ve PDF'nin Bulunması

Öncelikle yapının bir senede maruz kaldığı yük değerlerini SI birim sistemine çevirerek, bu değerlerden yapının bir sene boyunca yükleme olasılığını gösteren olasılık eğrisi çıkarılır. Bu değerlerden uygulanan gerilme değerleri sonucu oluşacak çatlak boyları bulunur.

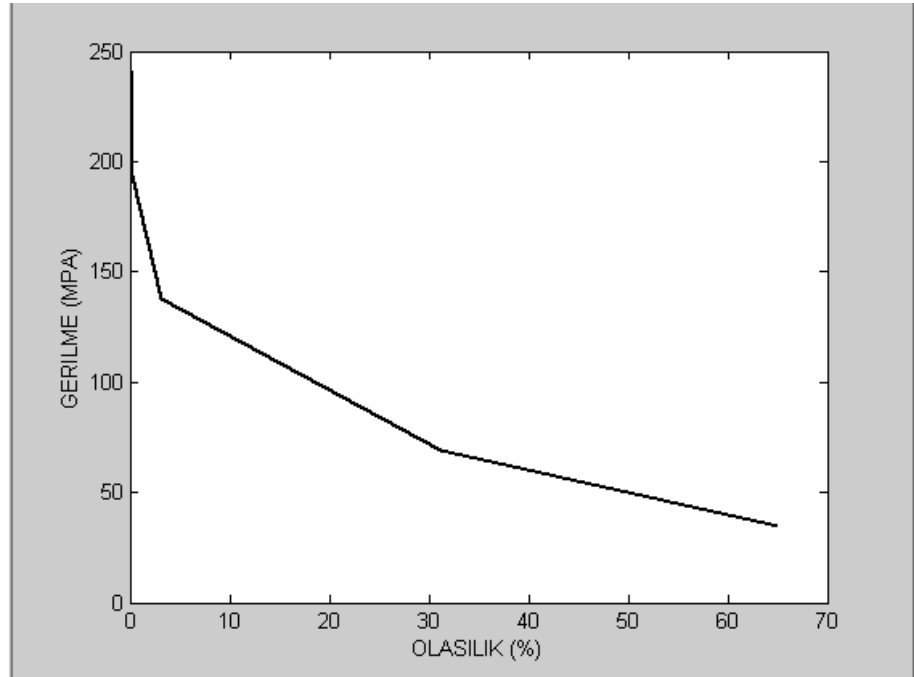
Toplam yük aşımı sayısı (yük tekrarı) = 10+ 100+1000+10000+21000 = 32110 (N)
toplam gelen yük sayısıdır.

$Pf = \frac{Nf}{N}$ olduğundan Şekil5.2' den elde edilen gerilme değerlerinin meydana gelme olasılığı Tablo 5.1'de şu şekilde toplanır:

Tablo 5.1. Bir Senede Gerilmelerin Oluşma Olasılığı.

OLASILIK (%)	GERİLME	
	Ksi	Mpa
0,03114	5	34,4738
0,3114	10	68,9476
3,114	20	137,8952
31,14	28	193,053
65	35	241,3166

Bu değerleri Matlab'e aktardığımızda Şekil 5.3'deki eğri elde edilir.

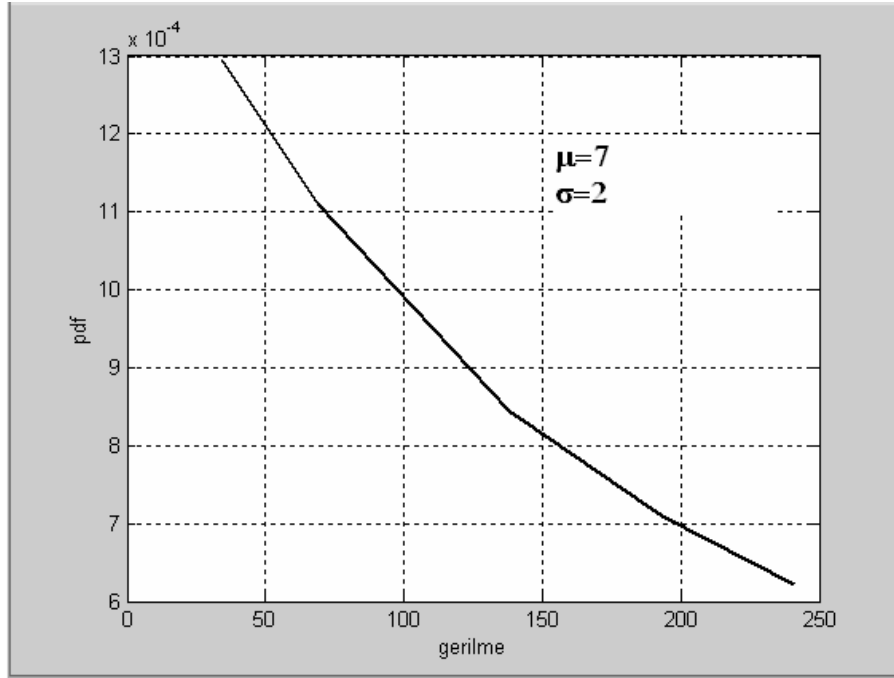


Şekil 5.3. Bir Senede Karşılaşılan Gerilmelerin Olasılığı.

Bu kümülatif olasılık değerleri standart bir pdf'ye dönüştürülmek istendiğinde değerlerin $\mu = 7$ ve $\sigma = 2$ parametreleriyle en yakın logaritmik dağılıma uyduğu belirlenmiştir.

Matlab’de yazılan aşağıdaki program Şekil5.4.’ü vermektedir:

```
x=[241.32 193.1 137.9 68.9 34.5];  
y=lognpdf(x,7,2);  
plot(x,y);grid;  
xlabel('gerilme');ylabel('pdf')
```



Şekil 5.4. Yapının Bir Yılda Maruz Kaldığı Gerilmelerin Olasılık Yoğunluk Dağılımı.
(Logaritmik Dağılım).

5.2 Aşırı Gerilme Sonucu Oluşan Çatlak Boylarının Belirlenmesi

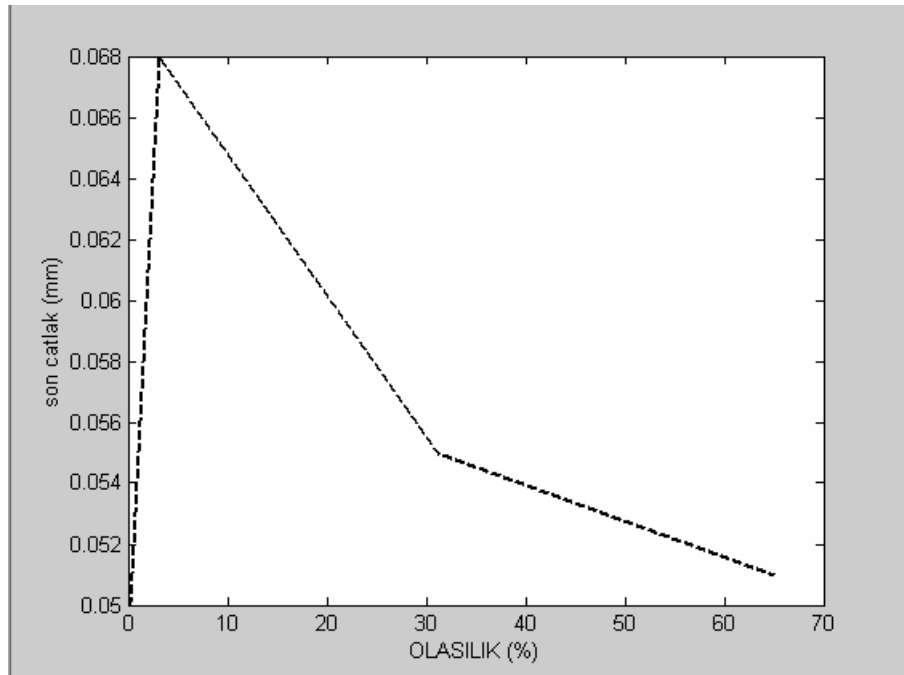
Yapının bir senede maruz kaldığı yük aşımı değerlerine karşı bu yük değerleri için ulaşılacak son çatlak boyları da mevcut kırılma mekaniği yazılımları ile bulunabilir. Bu analiz için Nasgro yazılımı kullanılmıştır. Yapıya bir sene boyunca uygulanan yükler, belirtilen tekrarlarla uygulanmıştır. Geometri olarak program kütüphanesinden TC03 delik kenarından parça boyunca çatlak durumu seçilir. Malzeme 2024 T3 alüminyumdur.

Programın analiz çıktıları sayfa 105’den 114’e kadar bulunmaktadır. Eklerde yer alan analizlerden, 0.05 mm ilk çatlak boyu için beş farklı yükleme durumunda elde edilen değerler Tablo5.2’ de toplanmıştır:

Tablo 5.2. Aşırı Gerilmeler Sonucu Ulaşılan Son Çatlak Boyları.

Analiz	Yük		İlk çatlak boyu (mm)	Son çatlak boyu (mm)
	Tekrar sayısı (N)	Miktarı (Mpa)		
1	21000	± 34.47	0.05	0.05
2	11000 10000	± 34.47 ± 68.94	0.05	0.0501
3	20000 1000	± 34.47 ± 137.89	0.05	0.068
4	20900 100	± 34.47 ± 193.05	0.05	0.055
5	20990 10	± 34.47 ± 241.316	0.05	0.051

Bu durumda kümülatif olasılık eğrisi Şekil 5.5’deki gibi olur.



Şekil 5.5. Bir Senede Uygulanan Gerilme Sonucu Elde Edilecek Son Çatlak Değerlerinin Olasılığı.

5.3 Genel Kritik Çatlak Değerleri Olasılığının Elde Edilmesi

Yapının belli yüklerde hasar dağılımları elde edilerek, yukarıda uygulanan bir senelik yük durumunda oluşan sonuçla kıyaslanabilecek bir olasılık dağılımı elde edilmelidir. Şekil5.6 belli ilk çatlak boyları için yapının kümülatif olasılık eğrisini göstermektedir. Bu eğri ilk çatlak boyu için güvenilirliği ifade eder. Yani şekilde görülen 0.0019 in. değeri ilk çatlak boyu olarak kullanılırsa, erişilen son çatlak boylarının %90'ı , %95 ihtimalle bu değerle ulaşılandan az olacaktır. Yani %95 güvenilirlik sağlayacaktır. Tersine bir yaklaşımla %5 hasar olasılığı bulunmaktadır. Buradan kritik çatlak olasılık dağılımına geçilebilir. Her bir ilk çatlak durumu için kritik bir çatlak boyu bulunarak, yapının kritik çatlak durumunda hasar olasılığı tespit edilecektir.



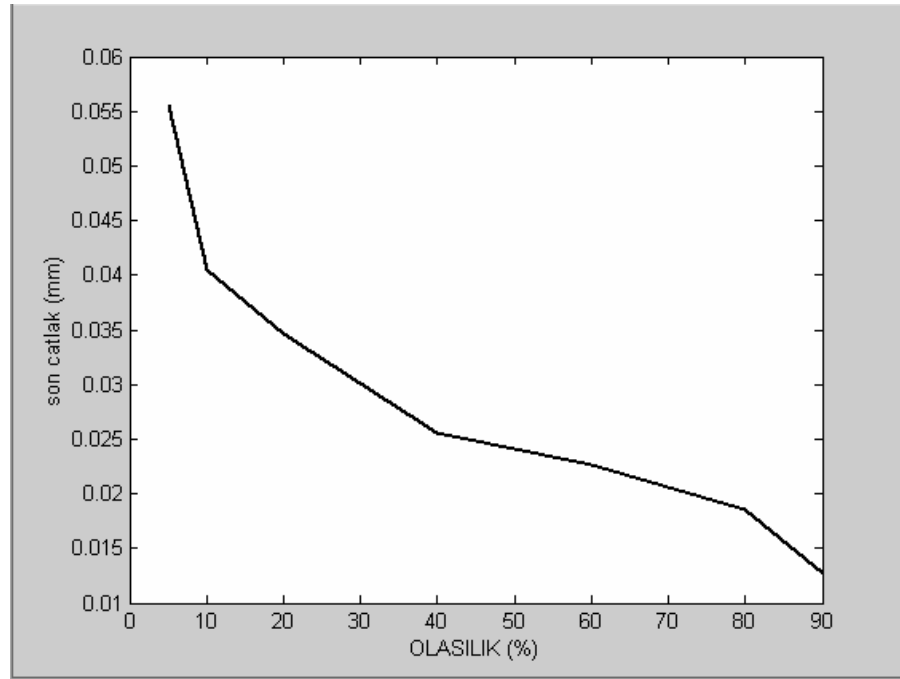
Şekil 5.6. Düz Delik Etrafında İlk Çatlak Boyu ve Güvenilirlik

Şekil5.6'daki her bir ilk çatlak için Nasgro'da çatlak ilerleme analizi yapılmıştır. Buna göre en kritik gerilme durumu olan 3 numaralı yükleme durumu, şekilden alınan ilk çatlak değerleri için analiz edilmiştir. Örnek analiz çıktıları sayfa 115 ve 116'da bulunabilir. Bu analizin sonuçları Tablo 5.3'de verilmektedir:

Tablo 5.3. Kritik Çatlak Boyu Olasılıkları.

İlk çatlak boyu		Güvenilirlik (%)	Hasar (%)	Son çatlak boyu (mmx10 ⁻²)
in x 10 ⁻³	mm x10 ⁻²			
0.45	1.143	10	90	1.27
0.64	1.625	20	80	1.86
0.77	1.95	40	60	2.27
0.875	2.22	60	40	2.56
1.12	2.84	80	20	3.47
1.28	3.25	90	10	4.05
1.68	4.27	95	5	5.56

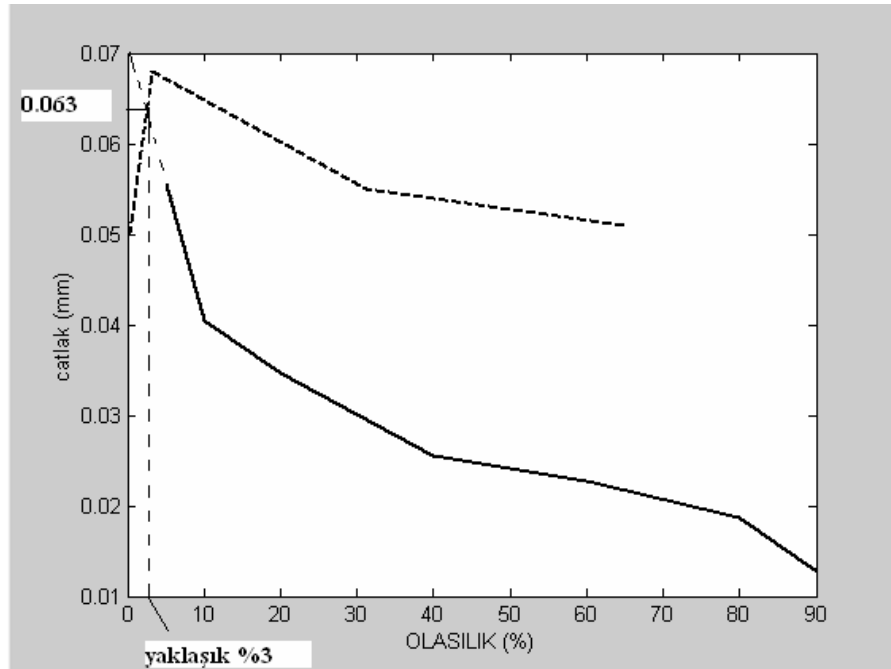
Bu veriler Matlab’de çizdirilirse Şekil5.7 elde edilir. Bu eğri yapıya ait, istatistiksel olarak tespit edilmiş çatlak olasılık eğrisidir ve Şekil 5.6’dan elde edilir.



Şekil 5.7. Yapının Kümülatif Hasar Olasılık Eğrisi.

5.4 Bir Sene Sonunda Yapının Hasara Uğrama Olasılığı

Son olarak, bir senelik uygulamada hasar olasılığının tespit edilmesi gerekmektedir. Hasar Olasılığı yapıya ait çatlak hasar olasılığı eğrisi ile (Şekil 5.7) bir sene sonunda elde edilmesi muhtemel çatlak boylarını ve olasılıklarını gösteren (Şekil 5.5)'in çakıştığı alandır. Aslında en uygunu bu eğrilere ait PDF eğrilerinin uydurularak, PDF'lerin kullanılmasıdır. Ancak uygulamada varsayılan ve test edilen yapılar sanal olduğundan olasılık eğrilerini PDF eğrilerine dönüştürürken uygunluğu sağlaması için kullanılan parametrelerin yüksek seçilmesi gerekmektedir. Bu da bazı noktaların ihmal edilmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple doğrudan olasılık eğrileri kullanılmıştır. Hasar olasılığı da bu eğrilerin çakıştığı alandır (PDF 'den farklı olarak olasılık x eksenı doğrultusundadır, bu sebeple alan hesaplanırken dikkat edilmelidir) (bkz. Şekil 5.8).



Şekil 5.8 İki Olasılık Eğrisinin Çakıştığı Alan-Hasar Olasılığı.

Bir senenin sonunda çatlağın güvenilirlik limitlerini aşması olasılığı, [0.05, 0.07] aralığı tabanlı ve yüksekliği 3 birim olan üçgenin alanına eşittir.

Bu durumda $Hasar = \frac{0.07 - 0.05}{2} \cdot 3 = 0.03$ bulunur. Yani hasar olasılığı %3'tür.

5.5 Elde Edilen Verilerin Değerlendirilmesi

Daha önce üçüncü bölümde de bahsedildiği gibi elde edilen hasar olasılığının değerlendirilebilmesi için daha önceden belirlenmiş bazı kriterler gerekmektedir. Kıyaslamamanın yapılacağı bu kriterin belirlenmesi oldukça güç bir iştir ve üst düzey bir konudur.

Yukarıdaki uygulama için kabul edilebilir hasar olasılığı, Amerikan havacılık sanayi tarafından belirlenen 10^{-7} / uçuş saati olarak alınacaktır.

Örnek konusu olan parçanın ait olduğu uçak yapısının yılda 300 uçuş saati gerçekleştirdiğini kabul edersek hasar olasılığı:

$0.03 / 300 = 10^{-4}$ bulunur. Bu değer 10^{-7} sınırının oldukça üzerindedir.

Çatlağın verilen yük aşımı değerleri sonucu ilerlemesi kabul edilebilir sınırların üzerindedir. Bunun için malzeme, geometri, çalışma koşullarının tekrar gözden geçirilmesi gerekmektedir.

6. OLASILIKSAL TASARIM METODOLOJİSİ İLE İLGİLİ SONUÇLAR

Yapıların Güvenilirliği ortaya koyulurken yük, geometri, montaj prosedürleri, modeller, malzeme özellikleri, çalışma koşulları ve bakım gibi pek çok parametrenin belirsizliğinin yanı sıra yapısal tasarım ve sınır güvenliği değerlerini tespit etmek için yapılan testlerde de belirsizlikler, sapmalar bulunmaktadır. Bu belirsizlikleri sayısal olarak ortaya koymaya yarayan olasılıksal metodolojinin avantajları ve sınırlamaları aşağıdaki gibi sıralanabilir [1].

Avantajlar:

- Tasarımdaki riski veya güvenilirliği sayısal olarak ortaya koyabilir. Geleneksel belirleyici tasarımda tasarım belirsizlikleri uygulanan limit gerilmeyle belirsizlik faktörünün çarpılmasıyla elde edilirken, olasılıksal analizde neredeyse parametrelerin tümü değişken olarak ve yapısal analiz yöntemleri ile beraber modellenir.
- Bir tasarımdaki riski yüksek olan alanları tanımlar.
- Güvenilirliğe etkisi olan tasarım değişkenlerini belirlemeyi sağlar.
- Diğer tasarımlarla kıyaslanabilecek bir ortalama güvenilirlik sağlar.
- Tasarım optimizasyonu için hareket noktası oluşturur.
- Tasarımın en kötü durum baz alınarak değil, gerçekte karşılaşılması en olası durum belirlenerek yapılmasını sağlar.
- Optimum hasar oluşma aralığı kurmayı sağlar (örneğin çatlak için zaman aralığı).
- Garanti ve yedek parça kapsamalarının oluşturulması için veri sağlar.

Sınırlamalar:

- Mühendislik ve istatistik bilgisi gerektirir. En ideal uygulama mühendisi, istatistik bilgisi olan bir yapısal analizci/tasarım mühendisidir.
- Yeterli miktarda istatistik verisi bulmak zordur. Olasılıksal analiz, genellikle enterpolasyon, ekstrapolasyon gibi teknikleri kullandığından oldukça fazla test verisine ihtiyaç duyulur.

- Ek süre ve kaynak gerektirir.Olasılıksal analiz için modelin kurulması zaman almaktadır.
- Tasarım sertifikası
- Bilinmeyenlerin hesaba katılması gerekir.
- Uç değerlerin duyarlılığı önemlidir.
- Mevcut bir hasar şekli modeli bulunmalıdır. Örneğin kırılma,yorulma, çatlak ilerlemesi vb. hasar şekilleri için mevcut yapısal analiz modelleri etrafında olasılıksal analiz oluşturulmalıdır.
- Sistem hasarının modellenmesi zordur.

Bu çalışmada olasılıksal metodoloji ile ilgili temel teknikler açıklanmıştır. Kırılma mekaniği prensiplerinden faydalanılarak yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar olasılıksal metodolojinin temel prensipleri ile beraber bir çatlak ilerlemesi problemine başarı ile uygulanarak, hasar olasılığına ulaşılmıştır.

Olasılıksal değerlendirme tasarımcıya riskin kaynağı konusunda bir fikir verir. Bunun yanı sıra tasarım değişkenlerinin duyarlılığını değerlendirmede bir araçtır. Yöntemler üzerinde iyileştirilme çalışmaları, ilgili bilgisayar programlarının esnekliği ve kolay kullanımının geliştirilmesi halen devam etmektedir.

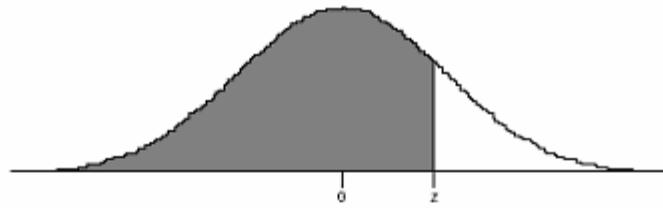
KAYNAKLAR

- [1] **Long, M.W. ve Narciso, J. D.**, Haziran 1999. Probabilistic Design Metodology For Composite Aircraft Structures, U.S Department of Transportation FAA Final Raporu, Washington D.C, ABD , 3.1-3.18.
- [2] **Press, Teukolsky,Vettering ve Flannery.**, Numerical Recipes in Fortran, Cambridge University Press, Second edition.
- [3] **Pugsley, A.G.**, 1942. A Philosophy of Aeroplane Strength Factors, British Aeronautical research Commitee,Rapor ve memorandum No.1906.
- [4] **Freudenthal, A.M.**, 1954. Safety and the Probability of Structural Failure, American Society of Civil Enginners, Rapor, No.2843.
- [5] **Bernstein,P.L.**, 1996. Against The Gods: Remarkable Story of Risk, John Wiley& Sons.
- [6] **Evans, M., Hastings, N. ve Peacock,B.**, 1993. Statistical Distributions, John Wiley & Sons.
- [7] **Fox, E.P.ve Safie, F.**, 1992. Statistical Characterization of Life Drivers for A Probabilistic Design Analysis, AIAA-92-3414.
- [8] **Nakayasu, H., Murotsu, Y., Mori, K., ve Kase, S.**, 1978. Effect of Distribution and Sample Size in Material Testing on Probabilistic Design of Structure, ICQC, Rapor D1-20, Tokyo.
- [9] **Wirshing, P.H.**, 1992. Literature Review on Mechanical Reliability and Probabilistic Design, Probabilistic Structural Analysis Methods for Selected Space Propulsion system Components (PSAM), NASA Raporu, 189159, sayı III.
- [10] **Eric P. Fox of Pratt & Whitney.**, 1993. Methods of Integrating Probabilistic Design Within an Organization's Design System Using Box-Behnken Matrices, Basım; American Institute of Aeronoutics, AIAA-93-CP.

- [11] **SAE**, 1997. Bilgilendirme Raporu 5080, SAE.
- [12] **Mahadevan, S.**, Ocak 1994. Modern Structural Reliability Methods, NASA.
- [13] **SAE**, 1996. Uzay-Havacılık Bilgilendirme Raporu ,5083.
- [14] **Atagündüz, S. S.**, 2004. Fatigue Failure and Crack Propagation in Aircraft Structures, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] **Bannantine, J.A., Corner, J. J.**, 1989. Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey.
- [16] **Rooke, D. P.**, 1974. Approximate Stress Intensity Factors Compounded From Known Solutions , *Engineering Fracture Mechanics* s.6, 563.
- [17] **Fuchs, H. O., Stephens, R.I.**,1980. Metal Fatigue in Engineering.
- [18] **Forman, R.G., Kearney, V. E. ve Engle , R.M.**, 1967.Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures, *ASME, Journal of Basic Eng.*, s.89, 459-464.
- [19] **Newman, Jr., J. C.**, Mart 1984, A Crack Opening Stress Equation for Fatigue Crack Growth, *International Journal of Fracture*, sayı 24, No. 3, s.R131-R135.
- [20] **Neman, Jr., J. C. and Raju, I. S.**, “Prediction of Fatigue Crack-Growth Patterns and Lives in Three-Dimensional Cracked Bodies,” *Advances in Fracture Research (Fracture 84)*, Sixth International Conference on Fracture, sayı 3, 1984, s. 1597-1608.
- [21] **Forman, R. G., and Mettu, S. R.**, 1992. Behavior of Surface and Corner Cracks Subjected to Tensile and Bending Loads in Ti-6Al-4V Alloy, *Fracture Mechanics: Twenty-second Symposium*, Vol. 1, ASTM STP 1131, H. A. Ernst, A. Saxena, and D. L. McDowell, eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, s. 519-546.

- [22] **Henkener, J. A., Lawrence, V. B., and Forman, R. G.,** “An Evaluation of Fracture Mechanics Properties of Various Aerospace Materials,” Fracture Mechanics: Twenty-Third Symposium, ASTM STP 1189, R. Chona, ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993, s. 474-497.
- [23] **Nasgro version 3.0 Reference Manuel,** Mart2000,, Enginnering Directorate Fatigue Growth Programme, NASA.

Tablo A- 1: Normal Dağılım Tablosu (kaynak : Ulberg, 1987)



Normal Deviate z	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
-4.0	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
-3.9	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
-3.8	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
-3.7	.0001	.0001	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
-3.6	.0002	.0002	.0001	.0001	.0001	.0001	.0001	.0001	.0001	.0001
-3.5	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002
-3.4	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0002
-3.3	.0005	.0005	.0005	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0003
-3.2	.0007	.0007	.0006	.0006	.0006	.0006	.0006	.0005	.0005	.0005
-3.1	.0010	.0009	.0009	.0009	.0008	.0008	.0008	.0008	.0007	.0007
-3.0	.0013	.0013	.0013	.0012	.0012	.0011	.0011	.0011	.0010	.0010
-2.9	.0019	.0018	.0018	.0017	.0016	.0016	.0015	.0015	.0014	.0014
-2.8	.0026	.0025	.0024	.0023	.0023	.0022	.0021	.0021	.0020	.0019
-2.7	.0035	.0034	.0033	.0032	.0031	.0030	.0029	.0028	.0027	.0026
-2.6	.0047	.0045	.0044	.0043	.0041	.0040	.0039	.0038	.0037	.0036
-2.5	.0062	.0060	.0059	.0057	.0055	.0054	.0052	.0051	.0049	.0048
-2.4	.0082	.0080	.0078	.0075	.0073	.0071	.0069	.0068	.0066	.0064
-2.3	.0107	.0104	.0102	.0099	.0096	.0094	.0091	.0089	.0087	.0084
-2.2	.0139	.0136	.0132	.0129	.0125	.0122	.0119	.0116	.0113	.0110
-2.1	.0179	.0174	.0170	.0166	.0162	.0158	.0154	.0150	.0146	.0143
-2.0	.0228	.0222	.0217	.0212	.0207	.0202	.0197	.0192	.0188	.0183
-1.9	.0287	.0281	.0274	.0268	.0262	.0256	.0250	.0244	.0239	.0233
-1.8	.0359	.0351	.0344	.0336	.0329	.0322	.0314	.0307	.0301	.0294
-1.7	.0446	.0436	.0427	.0418	.0409	.0401	.0392	.0384	.0375	.0367
-1.6	.0548	.0537	.0526	.0516	.0505	.0495	.0485	.0475	.0465	.0455
-1.5	.0668	.0655	.0643	.0630	.0618	.0606	.0594	.0582	.0571	.0559
-1.4	.0808	.0793	.0778	.0764	.0749	.0735	.0721	.0708	.0694	.0681
-1.3	.0968	.0951	.0934	.0918	.0901	.0885	.0869	.0853	.0838	.0823
-1.2	.1151	.1131	.1112	.1093	.1075	.1056	.1038	.1020	.1003	.0985
-1.1	.1357	.1335	.1314	.1292	.1271	.1251	.1230	.1210	.1190	.1170
-1.0	.1587	.1562	.1539	.1515	.1492	.1469	.1446	.1423	.1401	.1379
-.9	.1841	.1814	.1788	.1762	.1736	.1711	.1685	.1660	.1635	.1611
-.8	.2119	.2090	.2061	.2033	.2005	.1977	.1949	.1922	.1894	.1867
-.7	.2420	.2389	.2358	.2327	.2296	.2266	.2236	.2206	.2177	.2148
-.6	.2743	.2709	.2676	.2643	.2611	.2578	.2546	.2514	.2483	.2451
-.5	.3085	.3050	.3015	.2981	.2946	.2912	.2877	.2843	.2810	.2776
-.4	.3446	.3409	.3372	.3336	.3300	.3264	.3228	.3192	.3156	.3121
-.3	.3821	.3783	.3745	.3707	.3669	.3632	.3594	.3557	.3520	.3483

http://hotmix.ce.washington.edu/wsdot_web/Modules/08_specifications_qa/normal_distribution.htm

EK 2

FATIGUE CRACK GROWTH ANALYSIS

DATE: 12/21/04 TIME: 00:17:45
(Computed: NASGRO Version 3.0.4, Mar 2000.)
SI units [mm, MPa, MPa sqrt(mm)]

PROBLEM TITLE

Crack Growth Model: Non Interaction
Equation/Table : NASGRO Equation

GEOMETRY

MODEL: TC03-Through crack from hole in plate.

Plate Thickness, t = 1.5000
Plate Width, W = 100.0000
Hole Diameter, D = 10.0000
Edge to Hole Ctr, B = 50.0000

FLAW SIZE: (User specified)

c (init.) = 0.5000E-01

MATERIAL

MATL 1: 2024-T3
Clad Plt & Sht; L-T; LA & HHA
Material Properties:

:Matl: UTS : YS : K1e : K1c : Ak : Bk : Thk : Kc : Keac :
: No.: : : : : : : : : :
:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:
: 1 : 455.1: 365.4:1598.4:1146.7: 1.00: 1.00: 1.500:2289.2: :

:Matl:----- Crack Growth Eqn Constants -----:
: No.: C : n : p : q : DKo : Cth+ : Cth- : Rcl:Alpha:Smax/:
: : : : : : : : : :SIGo :
:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:
: 1 :0.183D-11:3.284:0.50:1.00:100.77: 1.50: 0.10:0.70: 1.50: 0.30:

MODEL: TC03

FATIGUE SCHEDULE BLOCK INPUT TABLE

[Note: Stress = Input Value * Scale Factor]

Stress Scaling Factors for Block Case: 1

Scale Factor for Stress S0: 1.0000
Scale Factor for Stress S3: 0.0000

Schedule info. was input manually
Total No. of Blocks in Schedule = 1
Block Number and Case Correspondences
Block Number Block Case No.

From - To
1 - 1 1
Stresses: Tension, bending or pin

MODEL: TC03

FATIGUE SCHEDULE BLOCK INPUT TABLE

SINGLE DISTINCT BLOCK

S : M: NUMBER : S0 : S3 :
T : A: OF : : :
E : T: FATIGUE : : :
P : L: CYCLES : (t1): (t2) : (t1): (t2) :

1: 1: 21000.00 : 34.47: -34.47: 0.00: 0.00:

Environmental Crack Growth Check for Sustained Stresses
(Kmax less than Keac): NOT SET

MODEL: TC03

FATIGUE SCHEDULE BLOCK STRESS TABLE

S : M: NUMBER : S0 : S3 :
T : A: OF : : :
E : T: FATIGUE : (MPa) : (MPa) :
P : L: CYCLES : (t1): (t2) : (t1): (t2) :

1: 1: 21000.00 : 34.47: -34.47: 0.00: 0.00:

Environmental Crack Growth Check for Sustained Stresses
(Kmax less than Keac): NOT SET

MODEL: TC03

ANALYSIS RESULTS:

Schedl	Blk	Flaw Size	K max
	Step	Cycles c	c-tip
1	1	21000.	0.05000 46.220 t

FINAL RESULTS:

All Stress Intensities are below the Fatigue Threshold.

NO growth in Schedule No. 1

Crack Size c = 0.500000E-01

FATIGUE CRACK GROWTH ANALYSIS

DATE: 12/21/04 TIME: 00:19:59
(Computed: NASGRO Version 3.0.4, Mar 2000.)
SI units [mm, MPa, MPa sqrt(mm)]

PROBLEM TITLE

Crack Growth Model: Non Interaction
Equation/Table : NASGRO Equation

GEOMETRY

MODEL: TC03-Through crack from hole in plate.

Plate Thickness, t = 1.5000
Plate Width, W = 100.0000
Hole Diameter, D = 10.0000
Edge to Hole Ctr, B = 50.0000

FLAW SIZE: (User specified)

c (init.) = 0.5000E-01

MATERIAL

MATL 1: 2024-T3
Clad Plt & Sht; L-T; LA & HHA

Material Properties:

:Matl: UTS : YS : K1e : K1c : Ak : Bk : Thk : Kc : Keac :
:No.: : : : : : : : : :
:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:
: 1 : 455.1: 365.4:1598.4:1146.7: 1.00: 1.00: 1.500:2289.2: : :

:Matl:----- Crack Growth Eqn Constants -----:
:No.: C : n : p : q : DKO : Cth+ : Cth- : Rcl:Alpha:Smax/:
: : : : : : : : : :SIGo :
:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:
: 1 :0.183D-11:3.284:0.50:1.00:100.77: 1.50: 0.10:0.70: 1.50: 0.30:

MODEL: TC03

FATIGUE SCHEDULE BLOCK INPUT TABLE

[Note: Stress = Input Value * Scale Factor]

Stress Scaling Factors for Block Case: 1

Scale Factor for Stress S0: 1.0000
Scale Factor for Stress S3: 0.0000

Schedule info. was input manually

Total No. of Blocks in Schedule = 1

Block Number and Case Correspondences
Block Number Block Case No.
From - To
1 - 1 1

Stresses: Tension, bending or pin

MODEL: TC03

FATIGUE SCHEDULE BLOCK INPUT TABLE

SINGLE DISTINCT BLOCK

S : M: NUMBER : S0 : S3 :

T : A: OF : : :
 E : T: FATIGUE : : :
 P : L: CYCLES : (t1) : (t2) : (t1) : (t2) :

 1: 1: 20000.00 : 34.47: -34.47: 0.00: 0.00:
 2: 1: 1000.00 : 68.95: -68.95: 0.00: 0.00:

Environmental Crack Growth Check for Sustained Stresses
 (Kmax less than Keac): NOT SET

 MODEL: TC03

FATIGUE SCHEDULE BLOCK STRESS TABLE

 S : M: NUMBER : S0 : S3 :
 T : A: OF : : :
 E : T: FATIGUE : (MPa) : (MPa) :
 P : L: CYCLES : (t1) : (t2) : (t1) : (t2) :

 1: 1: 20000.00 : 34.47: -34.47: 0.00: 0.00:
 2: 1: 1000.00 : 68.95: -68.95: 0.00: 0.00:

Environmental Crack Growth Check for Sustained Stresses
 (Kmax less than Keac): NOT SET

 MODEL: TC03

ANALYSIS RESULTS:

Schedl	Blk	Flaw Size	K max
	Step	Cycles c	c-tip
1	1	21000.	0.05097 93.214

FINAL RESULTS:
 Critical Crack Size has NOT been reached.

at Cycle No. 1000.00
 of Load Step No. 2 Description: None
 of Block No. 1
 of Schedule No. 1
Crack Size c = 0.509677E-01
Total Cycles = 21000.000

t - indicates this step or a step in this block was below threshold

FATIGUE CRACK GROWTH ANALYSIS

 DATE: 12/21/04 TIME: 00:25:34
 (Computed: NASGRO Version 3.0.4, Mar 2000.)
 SI units [mm, MPa, MPa sqrt(mm)]

PROBLEM TITLE

 Crack Growth Model: Non Interaction
 Equation/Table : NASGRO Equation

GEOMETRY

 MODEL: TC03-Through crack from hole in plate.

Plate Thickness, t = 1.5000
 Plate Width, W = 100.0000
 Hole Diameter, D = 10.0000
 Edge to Hole Ctr, B = 50.0000
 FLAW SIZE: (User specified)
 c (init.) = 0.5000E-01

MATERIAL

 MATL 1: 2024-T3
 Clad Plt & Sht; L-T; LA & HHA

Material Properties:

:Matl: UTS : YS : K1e : K1c : Ak : Bk : Thk : Kc : Keac :
 :No.: : : : : : : : : :
 :-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:
 : 1 : 455.1: 365.4:1598.4:1146.7: 1.00: 1.00: 1.500:2289.2: :

 :Matl:----- Crack Growth Eqn Constants -----:
 :No.: C : n : p : q : DKo : Cth+ :Cth- : Rcl:Alpha:Smax/:
 : : : : : : : : : :SIGo :
 :-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:
 : 1 :0.183D-11:3.284:0.50:1.00:100.77: 1.50: 0.10:0.70: 1.50: 0.30:

MODEL: TC03

FATIGUE SCHEDULE BLOCK INPUT TABLE

 [Note: Stress = Input Value * Scale Factor]

Stress Scaling Factors for Block Case: 1
 Scale Factor for Stress S0: 1.0000
 Scale Factor for Stress S3: 0.0000

Schedule info. was input manually

Total No. of Blocks in Schedule = 1

Block Number and Case Correspondences

Block Number	Block Case No.
From - To	
1 - 1	1

Stresses: Tension, bending or pin
 MODEL: TC03

FATIGUE SCHEDULE BLOCK INPUT TABLE

SINGLE DISTINCT BLOCK

S : M: NUMBER : S0 : S3 :
 T : A: OF : : :
 E : T: FATIGUE : : :
 P : L: CYCLES : (t1): (t2) : (t1): (t2) :
 :-----:-----:-----:-----:-----:-----:
 1: 1: 20000.00 : 34.47: -34.47: 0.00: 0.00:
 2: 1: 1000.00 : 137.90: -137.90: 0.00: 0.00:

Environmental Crack Growth Check for Sustained Stresses

(Kmax less than Keac): NOT SET

MODEL: TC03

FATIGUE SCHEDULE BLOCK STRESS TABLE

S : M: NUMBER : S0 : S3 :
T : A: OF : : :
E : T: FATIGUE : (MPa) : (MPa) :
P : L: CYCLES : (t1) : (t2) : (t1) : (t2) :
-----:-----:-----:-----:
1: 1: 20000.00 : 34.47: -34.47: 0.00: 0.00:
2: 1: 1000.00 : 137.90: -137.90: 0.00: 0.00:

Environmental Crack Growth Check for Sustained Stresses

(Kmax less than Keac): NOT SET

MODEL: TC03

ANALYSIS RESULTS:

Schedl	Blk	Flaw Size	K max
	Step	Cycles	c c-tip
1	1	21000.	0.06781 213.769

FINAL RESULTS:

Critical Crack Size has NOT been reached.

at Cycle No. 1000.00
of Load Step No. 2 Description: None
of Block No. 1
of Schedule No. 1

Crack Size c = 0.678108E-01

Total Cycles = 21000.000

t - indicates this step or a step in this block was below threshold

FATIGUE CRACK GROWTH ANALYSIS

DATE: 12/21/04 TIME: 00:27:20
(Computed: NASGRO Version 3.0.4, Mar 2000.)
SI units [mm, MPa, MPa sqrt(mm)]

PROBLEM TITLE

Crack Growth Model: Non Interaction
Equation/Table : NASGRO Equation
GEOMETRY

MODEL: TC03-Through crack from hole in plate.

Plate Thickness, t = 1.5000
Plate Width, W = 100.0000
Hole Diameter, D = 10.0000
Edge to Hole Ctr, B = 50.0000
FLAW SIZE: (User specified)
c (init.) = 0.5000E-01
MATERIAL

P : L: CYCLES : (t1) : (t2) : (t1) : (t2) :
 -----:
 1: 1: 20900.00 : 34.47: -34.47: 0.00: 0.00:
 2: 1: 100.00 : 193.05: -193.05: 0.00: 0.00:

Environmental Crack Growth Check for Sustained Stresses
 (Kmax less than Keac): NOT SET

MODEL: TC03

ANALYSIS RESULTS:

Schedl	Blk	Cycles	Flaw Size c	K max c-tip
1	1	21000.	0.05500	271.098

FINAL RESULTS:

Critical Crack Size has NOT been reached.

at Cycle No. 100.00
 of Load Step No. 2 Description: None
 of Block No. 1
 of Schedule No. 1
Crack Size c = 0.549980E-01
Total Cycles = 21000.000

t - indicates this step or a step in this block was below threshold

FATIGUE CRACK GROWTH ANALYSIS

DATE: 12/21/04 TIME: 00:29:02
 (Computed: NASGRO Version 3.0.4, Mar 2000.)
 SI units [mm, MPa, MPa sqrt(mm)]

PROBLEM TITLE

Crack Growth Model: Non Interaction
 Equation/Table : NASGRO Equation

GEOMETRY

MODEL: TC03-Through crack from hole in plate.

Plate Thickness, t = 1.5000
 Plate Width, W = 100.0000
 Hole Diameter, D = 10.0000
 Edge to Hole Ctr, B = 50.0000
 FLAW SIZE: (User specified)

c (init.) = 0.5000E-01

MATERIAL

Clad Plt & Sht; L-T; LA & HHA
 Material Properties:

:Matl: UTS : YS : K1e : K1c : Ak : Bk : Thk : Kc : Keac :
 :No.: : : : : : : : : :
 -----:
 : 1 : 455.1: 365.4:1598.4:1146.7: 1.00: 1.00: 1.500:2289.2: :

:Matl:----- Crack Growth Eqn Constants -----:
 :No.: C : n : p : q : DKo : Cth+ : Cth- : Rcl:Alpha:Smax/:

```

: : : : : : : : : :SIGo :
:-----:
: 1 :0.183D-11:3.284:0.50:1.00:100.77: 1.50: 0.10:0.70: 1.50: 0.30:

```

MODEL: TC03

FATIGUE SCHEDULE BLOCK INPUT TABLE

[Note: Stress = Input Value * Scale Factor]

Stress Scaling Factors for Block Case: 1

Scale Factor for Stress S0: 1.0000

Scale Factor for Stress S3: 0.0000

Schedule info. was input manually

Total No. of Blocks in Schedule = 1

Block Number and Case Correspondences

Block Number	Block Case No.
From - To	
1 - 1	1

Stresses: Tension, bending or pin

MODEL: TC03

FATIGUE SCHEDULE BLOCK INPUT TABLE

SINGLE DISTINCT BLOCK

```

S : M: NUMBER : S0 : S3 :
T : A: OF : : :
E : T: FATIGUE : : :
P : L: CYCLES : (t1): (t2) : (t1): (t2) :
:-----:
1: 1: 20990.00 : 34.47: -34.47: 0.00: 0.00:
2: 1: 10.00 : 241.32: -241.32: 0.00: 0.00:

```

Environmental Crack Growth Check for Sustained Stresses
(Kmax less than Keac): NOT SET

MODEL: TC03

FATIGUE SCHEDULE BLOCK STRESS TABLE

```

~
S : M: NUMBER : S0 : S3 :
T : A: OF : : :
E : T: FATIGUE : (MPa) : (MPa) :
P : L: CYCLES : (t1): (t2) : (t1): (t2) :
:-----:
1: 1: 20990.00 : 34.47: -34.47: 0.00: 0.00:
2: 1: 10.00 : 241.32: -241.32: 0.00: 0.00:

```

Environmental Crack Growth Check for Sustained Stresses
(Kmax less than Keac): NOT SET

MODEL: TC03

ANALYSIS RESULTS:

Schedl	Blk		Flaw Size	K max
	Step	Cycles	c	c-tip
1	1	21000.	0.05104	327.025

FINAL RESULTS:

Critical Crack Size has NOT been reached.

at Cycle No. 10.00
of Load Step No. 2 Description: None
of Block No. 1
of Schedule No. 1

Crack Size c = 0.510409E-01

Total Cycles = 21000.000

t - indicates this step or a step in this block was below threshold

EK 3

FATIGUE CRACK GROWTH ANALYSIS

DATE: 12/21/04 TIME: 21:08:54
(Computed: NASGRO Version 3.0.4, Mar 2000.)
SI units [mm, MPa, MPa sqrt(mm)]

PROBLEM TITLE

Crack Growth Model: Non Interaction
Equation/Table : NASGRO Equation
GEOMETRY

MODEL: TC03-Through crack from hole in plate.

Plate Thickness, t = 1.5000

Plate Width, W = 100.0000

Hole Diameter, D = 10.0000

Edge to Hole Ctr, B = 50.0000

FLAW SIZE: (User specified)

c (init.) = 0.1143E-01

MATERIAL

MATL 1: 2024-T3

Clad Plt & Sht; L-T; LA & HHA

Material Properties:

:Matl: UTS : YS : K1e : K1c : Ak : Bk : Thk : Kc : Keac :

:No.: : : : : : : : : :

:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:

: 1 : 455.1: 365.4:1598.4:1146.7: 1.00: 1.00: 1.500:2289.2: :

:Matl:----- Crack Growth Eqn Constants -----:

:No.: C : n : p : q : DKo : Cth+ : Cth- : Rcl:Alpha:Smax/:

: : : : : : : : : :SIGo :

:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:-----:

: 1 :0.183D-11:3.284:0.50:1.00:100.77: 1.50: 0.10:0.70: 1.50: 0.30:

MODEL: TC03

FATIGUE SCHEDULE BLOCK INPUT TABLE

[Note: Stress = Input Value * Scale Factor]

Stress Scaling Factors for Block Case: 1

Scale Factor for Stress S0: 1.0000

Scale Factor for Stress S3: 0.0000

Schedule info. was input manually

Total No. of Blocks in Schedule = 1

Block Number and Case Correspondences

Block Number Block Case No.

From - To

1 - 1 1

Stresses: Tension, bending or pin

SINGLE DISTINCT BLOCK

S : M: NUMBER : S0 : S3 :
T : A: OF : : :
E : T: FATIGUE : : :
P : L: CYCLES : (t1) : (t2) : (t1) : (t2) :

1: 1: 20000.00 : 34.47: -34.47: 0.00: 0.00:
2: 1: 1000.00 : 137.90: -137.90: 0.00: 0.00:

Environmental Crack Growth Check for Sustained Stresses
(Kmax less than Keac): NOT SET

FATIGUE SCHEDULE BLOCK STRESS TABLE

S : M: NUMBER : S0 : S3 :
T : A: OF : : :
E : T: FATIGUE : (MPa) : (MPa) :
P : L: CYCLES : (t1) : (t2) : (t1) : (t2) :

1: 1: 20000.00 : 34.47: -34.47: 0.00: 0.00:
2: 1: 1000.00 : 137.90: -137.90: 0.00: 0.00:

ANALYSIS RESULTS:

Schedl	Blk		Flaw Size	K max
	Step	Cycles	c	c-tip
1	1	21000.	0.01267	94.653

FINAL RESULTS:

Critical Crack Size has NOT been reached.

at Cycle No. 1000.00
of Load Step No. 2 Description: None
of Block No. 1
of Schedule No. 1

Crack Size c = 0.126714E-01

Total Cycles = 21000.000

t - indicates this step or a step in this block was below threshold

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Bengüsu Yalçın

e-posta adresi: bengusu_yalcin@yahoo.com

1979 Kırıkkale doğumluyum. 1997 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Programına girdim. 2001 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Bölümü Konstrüksiyon Ana Bilim Dalında Yüksek Lisansa başladım.

İyi derecede İngilizce ve başlangıç seviyesinde Almanca biliyorum. Kullanabildiğim yazılımlar, MS DOS, MS Office, Matlab, Hypermesh, Nastran, UG NX. Sertifikalı bir UG kullanıcısıyım. Bunun dışında ISO 9001 temel eğitimi ve Proje Yönetimi eğitimi aldım.

2002 senesinde girdiğim firmada halen ürün geliştirme mühendisi olarak görev yapmaktayım.