

**BİR TAKVİYESİZ UÇAK PANELİNİN VE YAPISAL TEST
ADETLERİNİN OLASILIKSAL YÖNTEMLER KULLANARAK
EŞZAMANLI ENİYİLEŞTİRİLMESİ**

MERVE TURİNAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2010

ANKARA

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Anabilim Dalı Başkanı

Merve TURİNAY tarafından hazırlanan “Bir Takviyesiz Uçak Panelinin ve Yapısal Test Adetlerinin Olasılıksal Yöntemler Kullanarak Eşzamanlı Eniyileştirilmesi” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Erdem ACAR

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. İstemi Barış ÖZSOY _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Erdem ACAR _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Melin ŞAHİN _____

(Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü)

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Merve TURİNAY

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Erdem ACAR
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Aralık 2010

Merve TURİNAY

**BİR TAKVİYESİZ UÇAK PANELİNİN VE YAPISAL TEST ADETLERİNİN
OLASILIKSAL YÖNTEMLER KULLANILARAK EŞZAMANLI
ENİYİLEŞTİRİLMESİ**

ÖZET

Uçakların yapısal emniyeti, uçak yapılarının belirsizlikler altında tasarlanması ve belirsizlikleri azaltacak yönde adımlar atılması ile sağlanır. Emniyet faktörü ve müsaade edilebilir malzeme özellikleri belirsizliklere karşı koruma amaçlı emniyet tedbirleri olup, kupon testleri, yapısal eleman testleri, bakım/onarım ve sağlık denetimi ise belirsizlikleri azaltmaya yönelik emniyet tedbirleridir. Bu çalışmada belirsizlik azaltma mekanizmalarından yalnızca yapısal testler ele alınmış, bir takviyesiz uçak paneli ele alınarak testlerin uçak panelinin yapısal güvenilirliğine olan etkisi incelenmiş ve takviyesiz uçak panelinin kalınlığı ile yapısal test adetlerinin olasılıksal eniyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle yapısal testlerin hasar gerilmesi dağılımına etkileri incelenmiştir. Yapısal belirsizlikler ve gelecekte yapılacak testlerden elde edilebilecek tüm olası sonuçlar modellenmiş, sertifikasyon testindeki başarısızlık ihtimali ve uçuş esnasındaki hasar ihtimali Monte Carlo simülasyonu ile hesaplanmıştır. Daha sonra olasılıksal tasarım teknikleri kullanılarak uçak panelinin ve yapısal test adetlerinin minimum ömür devri maliyeti için eşzamanlı eniyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, birim ağırlık maliyetinin panelin tasarımı ve yapısal test adetlerinin belirlenmesi üzerine etkisi incelenmiştir. Birim ağırlık maliyetinin değeri, farklı çalışmalar baz alınarak makul sınırlar içinde değiştirilmiştir. Elde edilen bulgular göstermektedir ki, eniyileştirme sonuçları ağırlıklı olarak birim ağırlık maliyetine bağlıdır. Optimum kupon testi adeti, birim ağırlık maliyetinden bağımsız olarak daima 80 (çalışmadaki üst limit) olarak belirlenmiştir. Bunun nedeni de kupon testi maliyetinin düşük olmasıdır. Eleman testi adeti ise birim ağırlık maliyetine bağlı olmak üzere dört veya beş olarak değişmektedir. Son olarak, olasılıksal tasarım problemi minimum ömür devri maliyet yerine minimum hasar ihtimali için çözülmüş ve benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçak Yapıları, Yapısal Emniyet, Yapısal Testler, Belirsizlik Altında Tasarım, Olasılıksal Yöntemler, Eniyileştirme

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Mechanical Engineering
Supervisor : Assistant Professor Dr. Erdem ACAR
Degree Awarded and Date : M.Sc. – December 2010

Merve TURINAY

**SIMULTANEOUS OPTIMIZATION OF AN UNSTIFFENED AIRCRAFT PANEL
AND THE NUMBER OF STRUCTURAL TESTS BY USING PROBABILISTIC
METHODS**

ABSTRACT

The safety of aircraft structures can be achieved by designing the structure against uncertainty and by taking steps to reduce the uncertainties. Safety factors and allowable material properties are the measures for compensating uncertainties, while coupon tests, structural element tests, quality control, inspection, health monitoring and maintenance are uncertainty reduction measures. In this paper, only structural tests are considered among these uncertainty reduction measures. A representative unstiffened aircraft panel is considered and the effects of the structural tests on aircraft panel's structural reliability are investigated and aircraft panel's thickness and the number of structural tests are simultaneously optimized. Structural uncertainties and future tests are modelled, probability of failure in certification testing and probability of failure during service life are computed through Monte Carlo simulations. Then, aircraft panel thickness and the number of structural tests are simultaneously optimized for minimum life time cost by using probabilistic methods. The effect of weight penalty factor on the obtained results are investigated. The value of the weight penalty factor is varied in the reasonable range based on other works in literature. The results show that optimization results depend heavily on the weight penalty factor. Optimal number of coupon tests is determined 80 (upper limit in the work) and found to be independent of the weight penalty factor. The reason for this is argued to be the very low cost of the coupon tests. Optimal element test changes from four to five and depending on the weight penalty factor. Finally, probabilistic design optimization problem is solved for minimum probability of failure besides minimum operational life time and similar results are obtained.

Key Words: Aircraft Structures, Structural Safety, Structural Tests, Design Under Uncertainty, Probabilistic Methods, Optimization

TEŐEKKÖR

Bu tezin hazırlanmasında her aşamada bana yok gösteren, bilgi ve desteklerini esirgemeyen değerli hocam ve danışmanım Yrd. Doç. Dr. Erdem Acar'a, yapısal testler hakkında bilgi sağlayan TUSAŐ HAVACILIK VE UZAY SANAYİ A.Ő.'de çalışan Fırat Temel'e ve Nevzat Akgün'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmamı MAG-109M537 no'lu proje kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Merve TURİNAY

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. Yapısal Testlerin Yapısal Emniyet Üstüne Etkilerini Araştırmaya Yönelik Çalışmalar	5
2.2. Uçak Yapılarının Ağırlık/Maliyet Optimizasyonuna Yönelik Çalışmalar	8
3. YAPISAL EMNİYET TÜRLERİ	11
3.1. Giriş	11
3.2. Sınır Durum İhlaline Karşı Deterministik Tedbirler	11
3.2.1. Emniyet faktörü	11
3.2.2. Yükleme faktörü	12
3.2.3. Kısmi faktör	12
3.3. Yapısal Güvenilirlik Tedbirleri	13
3.3.1. Belirsizliklere karşı koruma amaçlı emniyet tedbirleri	13
3.3.2. Belirsizlikleri azaltma amaçlı emniyet tedbirleri	15
3.4. Kısmi Olasılıksal Yöntemler	16
3.5. Olasılıksal Yöntemler	16

4. MONTE CARLO SİMÜLASYONU VE GÜVENİLİRLİK HESAPLAMALARINDAKİ UYGULAMALARI	20
4.1. Giriş	20
4.2. Rastgele Sayıların Üretilmesi	21
4.3. Basit Monte Carlo Yöntemi	24
4.4. Ayrık Monte Carlo Yöntemi	26
5. YAPISAL BELİRSİZLİKLER	28
5.1. Giriş	28
5.2. Yapısal Belirsizliklerin Sınıflandırılması	29
5.2.1. Fenomenolojik belirsizlikler	29
5.2.2. Karar belirsizlikleri	29
5.2.3. Modelleme belirsizlikleri	30
5.2.4. Tahmin belirsizlikleri	30
5.2.5. Fiziksel belirsizlikler	30
5.2.6. İstatistiksel belirsizlikler	30
5.2.7. İnsan faktöründen kaynaklanan belirsizlikler	31
5.3. Hata ve Varyasyon	32
6. BELİRSİZLİKLERİN MODELLENMESİ	37
6.1. Giriş	37
6.2. Malzeme Mukavemeti Hatalarının Kupon Testleriyle Belirlenmesi	37
6.3. Yapısal Elemanların Mukavemet Tahminindeki Hatalar	39
6.4. Yapısal Mukavemet Tahminindeki Hatalar	41
6.5. Tasarım Hataları	42
6.6. Konstrüksiyon Hataları	43
6.7. Toplam Hata	44
6.8. Eleman Testlerine Bağlı Olarak Tasarım Güncellenmesi	44
6.9. Varyasyon	45

6.10. Eleman Testi Sonuçlarından Elde Edilen Hasar Gerilmesi Dağılımının Bayes Teorisiyle Güncellenmesi	47
6.11. Sertifikasyon Testi	53
7. MİNİMUM MALİYET VE MİNİMUM HASAR İHTİMALİ İÇİN OLASILIKSAL TASARIM	55
7.1. Giriş	55
7.2. Tasarım Değişkenlerine Bağlı Olarak Yük Taşıyan Kesit Alanı ve Güvenilirlik İndisi İçin Yanıt Yüzeylerin Oluşturulması	56
7.3. Minimum Maliyet İçin Eniyileştirme Probleminin Tanımlanması	61
7.3.1. Yapısal ağırlığın birim maliyeti	63
7.3.2 Test maliyetleri	64
7.4. Minimum Maliyet İçin Güvenilirlik Tabanlı Tasarımın Tek Değişkene Bağlı Olarak Çözümü	65
7.4.1. Malzeme kupon testi adetinin sonuçlara etkisi	65
7.4.2. Eleman testi adetinin sonuçlara etkisi	66
7.5. Minimum Maliyet İçin Güvenilirlik Tabanlı Tasarımın Eniyileştirilmesi ve Bulguları	67
7.6. Minimum Hasar İhtimali İçin Güvenilirlik Tabanlı Tasarımın Eniyileştirilmesi ve Bulguları	69
7.6.1. Minimum hasar ihtimali için eniyileştirme probleminin tanımlanması	69
7.6.2. Minimum hasar ihtimali için eniyileştirme probleminin tek değişkene bağlı olarak çözümü	70
7.6.3. Minimum hasar ihtimali için eniyileştirme	72
8. SONUÇLAR	74
8.1 Tartışma	74
8.2 Sonuçlar ve İleriye Yönelik Çalışmalar	75

KAYNAKLAR

77

ÖZGEÇMİŞ

80

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 4.1.	Basit Monte Carlo Yöntemiyle problemin çözümü	25
Çizelge 5.1.	İnsan faktöründen kaynaklanan hata ihtimalleri	31
Çizelge 5.2.	Belirsizlik ayrımı	32
Çizelge 5.3.	Hataların olasılıksal karakteristikleri	34
Çizelge 5.4.	Varyasyonların olasılıksal karakteristikleri	34
Çizelge 5.5.	Bayes güncellemesi için ayrıca oluşturulan MCS döngüsü detayları	36
Çizelge 5.6.	Güvenilirlik hesabı için oluşturulan MCS döngüsü detayları	36
Çizelge 6.1.	30 kupon testi uygulandığında, eleman testlerinden sonra ortalama hasar gerilmesinin Johnson parametrelerinin ortalama ve standart sapma değerleri	50
Çizelge 6.2.	50 kupon testi uygulandığında, eleman testlerinden sonra ortalama hasar gerilmesinin Johnson parametrelerinin ortalama ve standart sapma değerleri	51
Çizelge 6.3.	80 kupon testi uygulandığında, eleman testlerinden sonra ortalama hasar gerilmesinin Johnson parametrelerinin ortalama ve standart sapma değerleri	51
Çizelge 6.4.	Hasar gerilmesi tahmini hatası e_{ef} 'ye sahip ortalama hasar gerilmesinin Johnson parametrelerinin ortalama değerinin ve sapmasının varyasyonu	51
Çizelge 6.5.	Hasar olasılığı hesaplaması için Monte Carlo Simülasyonu prosedürü	54
Çizelge 7.1.	Yanıt yüzeylerin girdilerinin (tasarım değişkenlerinin) alt ve üst limitleri	57
Çizelge 7.2.	Oluşturulan yanıt yüzey modellerinin çapraz doğrulama hatası ile doğruluk tespiti	57
Çizelge 7.3.	Malzeme kupon testi adetinin sonuçlara etkisi	65
Çizelge 7.4.	Yapısal eleman testi adetinin sonuçlara etkisi	66
Çizelge 7.5.	Farklı birim ağırlık parametresi değeri kullanılarak elde edilen optimizasyon sonuçları	68
Çizelge 7.6.	Malzeme kupon testi adetinin sonuçlara etkisi	71
Çizelge 7.7.	Malzeme kupon testi adetinin sonuçlara etkisi	71
Çizelge 7.8.	Yapısal eleman testi adetinin sonuçlara etkisi	72
Çizelge 7.9.	Yapısal eleman testi adetinin sonuçlara etkisi	72
Çizelge 7.10.	Farklı birim ağırlık parametresi değeri kullanılarak elde edilen optimizasyon sonuçları	73

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 1.1	Uçak paneli	4
Şekil 1.2	Takviyeli (stiffened) panel	4
Şekil 3.1.	Üç seviyeli test piramidi	15
Şekil 4.1.	Monte carlo simülasyonu kullanılarak yapılan bir güvenilirlik analizinin akış şeması	23
Şekil 4.2.	Ayrık MCS için akış şeması	27
Şekil 5.1.	İhmal türleri	28
Şekil 5.2.	Güvenilirlik analizindeki belirsizlikler	29
Şekil 6.1.	Tolerans katsayısının kupon testi adetiyle değişimi	39
Şekil 6.2.	Hasar gerilmesindeki hata ve varyasyon	47
Şekil 6.3.	ortalama hasar gerilmesinin birinci ve ikinci Johnson parametrelerinin histogramları	52
Şekil 7.1.	Panel kesit alanı için oluşturulan yanıt yüzeyler	58
Şekil 7.2.	Güvenilirlik indisi için oluşturulan yanıt yüzeyler	60
Şekil 7.3.	Birim ağırlık maliyetinin yapısal eleman testinin optimum adeti ve toplam maliyet kazancı üzerine etkisi	69

SEMBOL LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$A_{built-av}$	Yük taşıyan alanın üretilen değeri
A_{design}	Yük taşıyan alanın tasarım değeri
A_{req}	Uçak modelinin belirli bir kopyasının, net yükleme şartlarını taşıyan kesit alanı
A'_{req}	Gerekli alan
C_{coupon}	Kupon testi maliyeti
C_{elem}	Eleman testi maliyeti
C_{man}	Üretim maliyeti
C_{test}	Yapısal testlerin maliyeti
$C_{test - other}$	Diğer testlerin maliyeti
C_{urm}	Belirsizlik azaltma mekanizmaları maliyeti
CF	Düzeltilme faktörü
c_r	Yeniden tasarım faktörü
$(c_{cf})_{calc}$	Kupon testleriyle hesaplanmış hasar gerilmesinin varyasyon katsayısı
DOC	Toplam minimum maliyet (direct operational cost)
e_{ef}	Hasar teorisindeki hata
e_f	Tüm yapının hasar tahmini hatası
e_p	Yükleme hesabındaki hata
e_{σ}	Gerilme analizindeki hata
e_t	Panel kalınlığının hatası
e_{total}	Toplam hata
e_w	Panel genişliğinin hatası
F_X	Kümülatif olasılık dağılım fonksiyonu
$f_X(x)$	Olasılık yoğunluk fonksiyonu
G(X)	Performans fonksiyonu (sınır durum fonksiyonu)
I[]	İndikatör fonksiyonu
k_A	A-tabanlı değer için normal dağılım tolerans katsayısı
k_B	B-tabanlı değer için normal dağılım tolerans katsayısı
k_d	Mukavemet indirgeme faktörü (FAA tarafından belirlenen değer)
k_{2d}	Tek yönlü hasar gerilmesi ve birleşik yönlü hasar gerilmesi oranı
k_f	Ek mukavemet indirgeme faktörü (uçak firmalarının belirlediği değer)
n_e	Eleman testi adeti
n_c	Kupon testi adeti
N	Simülasyon adeti
p	Birim ağırlık maliyeti
P_f	Hasar ihtimali
PFCT	Sertifikasyon testinde başarısız olma ihtimali
P_{calc}	Hesaplanan tasarım yüklemesi
P_d	Gerçek tasarım yüklemesi

Q_D	Uygulanan yüklemeler
R_{pi}	Plastik direnç
R	Mukavemet
s	Standart sapma
S	Gerilme
S_D	Ölü yükleme etkisi
S_F	Yük için emniyet faktörü
S_L	Canlı yükleme etkisi
$Std(\sigma_f)$	Hasar gerilmesinin standart sapması
t	Panel kalınlığı
$t_{built-av}$	Üretilen panelin kalınlığı
$t_{built-var}$	Yapısal bir parçanın kalınlığı
t_{design}	Tasarım kalınlığı
v_t	Kalınlık varyasyonu
v_w	Genişlik varyasyonu
w	Panel genişliği
w_{design}	Tasarım genişliği
$w_{built-av}$	Üretilen panelin genişliği
W_R	İç iş fonksiyonu
W_Q	Dış iş fonksiyonu
Z_{1-p}	Normal dağılımın kritik değeri
β	Güvenilirlik indeksi
λ	Yükleme faktörü
γ_D	Ölü yükleme üstündeki kısmi faktör
γ_L	Canlı yükleme üstündeki kısmi faktör
μ_R	Mukavemetin ortalama değeri
μ_S	Gerilmenin ortalama değeri
μ_z	Emniyet payının ortalama değeri
σ_a	Yapısal tasarım seviyesindeki müsaade edilebilir gerilme
σ_{calc}	Hesaplanan gerilme
σ_{ca}	Kupon seviyesindeki müsaade edilebilir gerilme
$\bar{\sigma}_{ef}$	Eleman testlerinden elde edilen hasar gerilmesi
$\bar{\sigma}_f$	Hasar gerilmesinin ortalama değeri
σ_{ea}	Eleman testi seviyesindeki müsaade edilebilir gerilme
$\sigma_i(x)$	X noktasına uygulanan i. gerilme bileşeni
σ_{pi}	Müsaade edilebilir gerilme
σ_R	Mukavemetin standart sapması
σ_S	Gerilmenin standart sapması
σ_Z	Emniyet payının standart sapması
$(\bar{\sigma}_{cf})_{calc}$	Kupon seviyesindeki hasar gerilmesi
$(\bar{\sigma}_{ef})_{true}$	Gerçek hasar gerilmesi

$(\bar{\sigma}_{ef})_{calc}$	Hesaplanan hasar gerilmesi
$(\bar{\sigma}_{ef})_{calc}^{updated}$	Güncellenmiş ortalama hasar gerilmesi
$(\bar{\sigma}_f)_{calc}$	Tüm yapının hesaplanmış ortalama hasar gerilmesi
ϕ	Mukavemet üstündeki kısmi faktör

1. GİRİŞ

Yapısal risk ve güvenilirlik analizi, olasılıksal mühendislik yaklaşımı olup, güvenilirlik metodu olarak bilinmektedir. Bir ürünün güvenilirliği üründen beklenen fonksiyonları/performansı belirli bir zaman aralığında ve belirli çalışma koşulları altında yerine getirebilme olasılığı olarak tanımlanır. Güvenilirlik seviyesi tasarım aşamasında oluşturulur ve tasarım aşamasından sonraki test, bakım-onarım gibi işlemlerle veya tasarım değişiklikleri ile artırılabilir [1]. Güvenilirlik kavramının (RAMS) genel olarak dört bileşeni mevcuttur, bunlar güvenilirliğin kendisi (reliability), bakım yapılabilirlik yani sistem arızalandıktan sonra tekrar çalışabilir hale getirilebilmesi (maintainability), kullanıma hazır olabilirlik yani sistemin istenildiği anda çalışabilir durumda olması (availability) ve son olarak güvenliktir (safety-integrity). Güvenlik herhangi bir mühendislik yapısının belirli bir süre içinde hasar oluşturmama kapasitesidir [2].

Güvenilirlik metodunda, istatistiksel dağılımlar, saçılım parametreleri yaşam ömrüne ve hasar ihtimaline karar vermek için kullanılır. Bunun yanı sıra yorulma ömründeki varyasyon ve istenilen emniyet seviyesi de belirlenir. Olasılıksal yaklaşımda yorulma mukavemeti ve varyasyonunu etkileyen parametreleri tanımlamak mümkündür. Bunun yanı sıra olasılıksal yaklaşım, üreticilerin üretim, bakım/onarım zamanları, maliyet gibi parametrelerde doğru kararlar almasını sağlar [3].

Güvenilirlik metodu için matematik temeller 1960 yılı sonlarında oluşturulmuştur. Güvenilirlik analizinde kullanılan teorilerin temelleri ise 1700'lü yıllarda oluşturulmuştur. 1773 yılında Pierr-Simon Laplace, Laplace dönüşümünü gerçekleştirmiş, 1812 yılında ise Theorie analytique des probabilités isimli yayını çıkarmıştır. Andrei Andreevich Markov 1880 yılında Markov zincirini geliştirmiştir. Diğer başlıca teoriler; yenileme teorisi, Markov modelleri, Monte Carlo simülasyonları, Bayes güncellemeleri gibi yaklaşımlardır [4].

Modern mühendislik tarihinde, sistemlerin belirsizlik nedeniyle hasarına her mühendislik dalında rastlanmıştır. Örneğin 1940'da Tacoma Narrows köprüsü inşasından 4 saat sonra, 42 mph hızındaki rüzgardan kaynaklanan burulma

salınımlar sonucu yıkılmıştır. Sistemlerin ve bileşenlerinin güvenilirliğinin önemi günlük yaşamın her aşamasında ortaya çıkar; televizyon, çamaşır makineleri, otomobil vs. gibi [5]. Güvenilirlik hesabında istatistiksel yeti ve mühendislik yetisi bir arada kullanılır. Bir ürünün ömrü boyunca güvenilirlik uygulamaları tasarım aşamasında, mukavemet, yüklemde öngörülen değişiklikler, üretim aşamasında, geometri belirsizlikleri, kalite kontrol aşamasında, kullanım ve bakım onarım aşamalarında kullanılır [5].

Havacılığın ilk yıllarında, uçakların güvenilirliğinden ziyade uçup uçamayacağı daha önemlidir. Bu sebeple o yıllarda çok fazla uçak kaybı olmuştur. Aynı zamanda güvenilirlik analizi hem yüksek bilgisayar gücü gerektirdiği hem de sadece olasılıksal yöntemler konusunda oldukça bilgili mühendisler tarafından uygulanabileceği için, uçak yapılarının analizinde güvenilirlik tabanlı yöntemler değil, deterministik yöntemler daha çok tercih edilmiştir. Ancak uçak yapılarındaki gelişmeler sayesinde, uçak emniyetinin önemi giderek artmıştır. Yapısal uçak analizinde, daha düşük maliyet sınırlarında uçağın ömrünü artırma gereksinimleri doğduğu için ve modern mühendislik sistemlerinin karmaşıklaşmasından ötürü uçak işletmecileri eski yöntemlerin yetersizliğine kanaat getirmiş ve olasılıksal yaklaşım sivil ve askeri uçak üreticileri için önem kazanmıştır [3]. Bu gelişmeler çerçevesinde uçak yapılarındaki hasarların nedenleri ve sistem ömrü araştırılmıştır. Sürünme, korozyon ve yorulmadan kaynaklanan çatlakların önlenmesi için çalışmalar yapılmıştır. Uçak yapılarının, uçak kaybına neden olabilecek hasar tespitinin önceden yapılabilmesi ancak parçaların ömür tahmini ve gerekli güvenilirlik analizlerinin yapılması ile mümkün olacağı anlaşılmıştır [1].

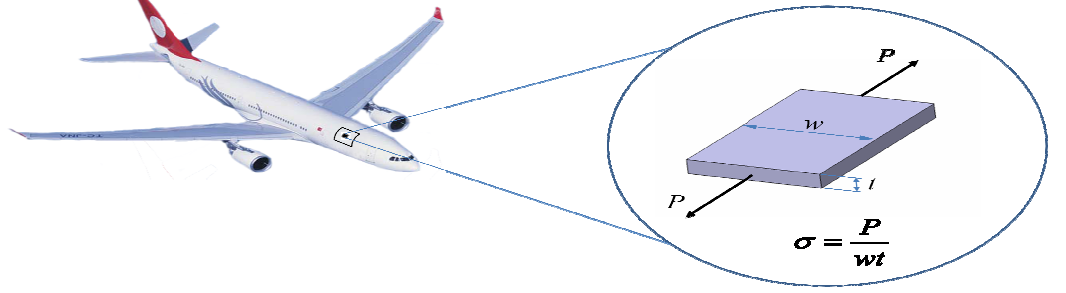
Güvenilirliğin eniyileştirilmesi ise uçak tasarımında bir diğer önemli başlıktır. Bir ürünün tasarımında, üretiminde, bakım aşamalarında hedeflenen güvenilirliğin ne olduğu önemlidir. Ürünün arzulanan ömrü boyunca toplam maliyetinin, nominal güvenilirlik seviyesinde, minimum olması beklenir. Ürünün ömür boyu maliyetinin daha az olması için malzemenin daha iyi seçilmesi, istatistik/olasılık yöntemlerinin kullanılması, güvenilirlik/onarılabirlik

kontrollerinin yerine getirilmesi, ağırlık/maliyet ilişkisinin iyi incelenmesi gerekir.

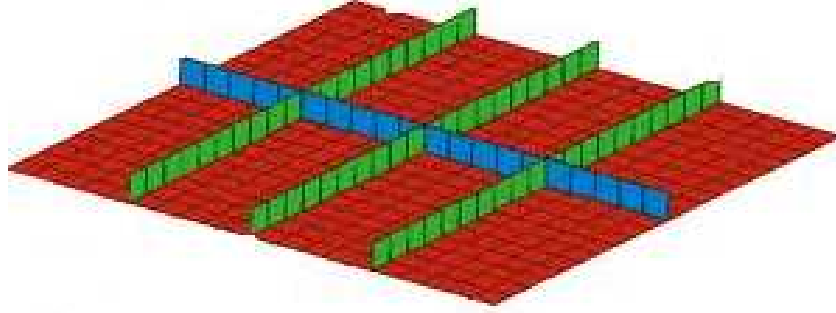
Uçak yapılarının tasarımında; uçuş koşulları, malzeme özellikleri ve geometri parametrelerindeki belirsizlikler göz önüne alınmalıdır. Uçakların yapısal emniyeti, uçak yapılarının bu belirsizlikler altında tasarlanması ve belirsizlikleri azaltacak yönde adımlar atılması ile sağlanır. Eğer belirsizlikler olduğu gibi kabul edilir ve uçak yapıları bu belirsizlikler altında emniyetli olacak şekilde tasarlanırsa, ağırlığı gereğinden fazla tasarımlar elde edilebilir. Bunu engellemenin yolu; yapısal testler, kalite kontrolü, muayene, sağlık denetimi ve bakım/onarım gibi belirsizlik azaltma mekanizmaları kullanmaktır. Bu çalışmada, tüm bu belirsizlik azaltma mekanizmalarından sadece bir tanesi olan yapısal testler üzerinde yoğunlaşılacaktır. Yapısal testler ana başlığı altında, malzeme kupon testleri, yapısal eleman testleri, parça testleri ve sertifikasyon testi gibi farklı tipte testler bulunmaktadır.

Mevcut uygulamalara göre, yapılması gereken test adetlerinin belirlenmesi geçmiş deneyimlere dayanmaktadır. Yeni bir uçak modeli tasarlanırken, yapılacak kupon testleri veya yapısal eleman testlerinin adetleri, önceki başarılı modellerdeki uygulamalara dayanarak belirlenmektedir. Yapısal testler oldukça maliyetli olduğundan, test sayısının azaltılması istenmektedir. Ancak yapısal test sayılarının, toplam maliyeti azaltacak yönde nasıl belirleneceği üstüne yerleşik bir çalışma mevcut değildir. Bu konuda ilk akla gelen, pahalı testlerin az sayıda, ucuz testlerin ise daha fazla sayıda yapılabileceğidir. Fakat böyle bir karar vermeden önce, gerek pahalı testlerin gerekse ucuz testlerin, uçak emniyeti üstündeki etkilerinin belirlenmesi gerekir. Bu da ancak olasılıksal yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, bir takviyesiz uçak paneli örnek problem olarak ele alınacak; olasılıksal tasarım teknikleri kullanılarak uçak panelinin geometrik özelliklerinin ve panel için yapılması öngörülen yapısal test adetlerinin minimum ömür devri maliyeti için eşzamanlı eniyileştirilmesi yapılacaktır. Şekil (1.1)'de söz konusu uçak paneli görülmektedir. Problemden ele alınan uçak paneli, uçağın en kritik bölgesinden alınmış olup aynı zamanda takviyesiz olduğu düşünülmüştür. Şekil (1.2)'de takviyeli (stiffened) bir panel

örneği görölmektedir. Takviyeli ve takviyesiz panelin her ikisi de uçak yapılarında kullanılmakta olup, takviyeli panelde mukavemetin artırılması söz konusudur. Problem çözümünü basitleştirmek için çalışmada takviyesiz panel tercih edilmiştir.



Şekil 1.1 Uçak paneli



Şekil 1.2 Takviyeli(stiffened) panel

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde yapısal testlerin yapısal emniyet üzerine etkilerini araştırmaya yönelik çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar yapısal test adetlerinin doğru şekilde tayini ile yapısal emniyetin artırılabilceğini göstermiştir. Aynı zamanda literatürde uçak yapılarının ağırlık/maliyet eniyileştirmesine yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. Bölüm 2.1'de yapısal testler üzerine yapılan çalışmalar, Bölüm 2.2'de ise ağırlık/maliyet üstüne yapılan çalışmaların detayları verilmiştir.

2.1. Yapısal Testlerin Yapısal Emniyet Üstüne Etkilerini Araştırmaya Yönelik Çalışmalar

Jiao ve Moan [6] güvenilirlik modelinin gelecekteki olaylarla güncellenmesi yöntemleri üstüne çalışmışlardır. Güvenilirlik modelinin güncellenmesi tasarım değişkenlerinin olasılık dağılımlarının güncellenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Emniyet tedbirleri (kalite-kontrol, doğrulama testi, bakım-onarım) ve kazara gelişen olaylar tasarım güvenilirliğini değiştirmektedir. Bir sistemin, yükleme, malzeme özellikleri, malzeme boyutları gibi temel değişkenleri hesaplanan belirsizlikleri ilk aşamada içermektedir. Yeni bilgilerle bu temel değişkenlerin olasılık dağılımları güncellenerek, güvenilirlik seviyesi artırılabilir. Çalışmada bu güncelleme yöntemleri araştırılmış ve analitik bir formülasyon geliştirilmiştir. Daha çok normal ve lognormal dağılıma sahip değişkenlerin olasılık dağılımlarının güncellenmesi üstüne çalışılmıştır. Gelecek olaylara veya yapıyla ilgili sonradan edinilen bilgiye örnek olarak doğrulama testi ve tahribatsız muayene örnekleriyle güncelleme gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucu göstermiştir ki, gelecekte uygulanan emniyet tedbirleri ile güvenilirlik güncellenmesi oldukça önemlidir ve oluşturulan analitik model farklı tipteki problemlere uygulanabilmektedir.

Jiao ve Eide [7] testlerin ve bakım-onarımın açık deniz yapılarının güvenilirliğine olan etkilerini araştırmışlardır. Tahribatlı muayene, tahribatsız muayene, doğrulama testi ve bakım-onarım etkileri incelenmiştir. Tahribatlı muayenede sistemin maruz kalacağı maksimum yüklemeye karar verilir ya da sistemin bileşeninin mukavemeti belirlenir. Tahribatlı muayeneyle modelin son kapasitesi doğrulanır ve ilgili belirsizlikler modellenerek hasar ihtimali güncellenir. Doğrulama testinde ise yapının

belirli bir mukavemet altına düşüp düşmeyeceği test edilir. Örneklerin çoğunun bu değer altına düşmemesi gerekir. Doğrulama testinin güvenilirlik üstüne etkisi, hasar ihtimalinin Bayes teorisiyle güncellenmesiyle belirlenir. Hasarsız muayene teknikleri, radyografik, manyetik, ses ötesi gibi yöntemleri içermektedir. Hasarsız muayene teknikleri yapının çatlaklarını belirlemede kullanılabilir. Hasarsız muayenenin etkisi, yapının boyutlarının doğruluğuna bağlıdır. Çalışmanın sonucunda testlerin ve bakım-onarımın güvenilirliği geliştirdiği gözlemlenmiştir.

Beck ve Katafygiotis [8] yapısal bir modelin ve belirsizliklerinin, dinamik test sonuçlarına Bayes yaklaşımı uygulanarak, güncellenmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarının amacı, tanımlanan dinamik yüklemeler için daha doğru yanıt tahminler elde etmenin yanı sıra bu doğruluk için nicel bir değerlendirme sunabilmektir. Yapısal model ve bu modelin tahmini cevabının doğruluğunu tanımlayan olasılıksal model, dinamik test verileri kullanılarak güncellenmiştir. Deterministik model, olasılıksal modelle bütünleştirilmiş ve yapısal model sistemik ve rastgele olmak üzere iki kısım içermiştir. Bayes teoremiyle model parametrelerinin optimal değerleri belirlenmiştir.

Papadimitriou vd. [9] yapısal test verilerini kullanarak gürbüz güvenilirliğin güncellenmesi üzerine çalışmışlardır. Gürbüz güvenilirlik ölçümünde yapısal modelin belirsizlikleri ve yapının ömrü boyunca göstereceği belirsizlikler birlikte göz önüne alınmıştır. Dinamik test verilerine dayanan gürbüz güvenilirliğin güncellenmesi için, Bayes olasılıksal yaklaşımı, yapısal olasılıksal analize entegre edilmiştir. Bu yöntem test verileri ve teorik bilgiye dayandığı için, yapısal modelin belirsizlikleri daha doğru bir şekilde tayin edilmiştir. Sistem model parametrelerinin güncellenmiş dağılımı kullanılarak, yapının gelecekte maruz kalacağı belirsizlikler (deprem, rüzgar vs.) göz önünde bulundurularak, yapısal güvenilirliği hesaplamak üzere bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem lineer ve lineer olmayan modeller için kullanılabilir. Çalışmanın sonucu göstermiştir ki, dinamik test verileri kullanılmadan önceki ve sonraki yapısal emniyet birbirinden oldukça farklıdır, dolayısıyla bir yapının dinamik cevapları, yapı için daha doğru bir emniyet değerlendirmesi yapabilmek için test sonuçları kullanılarak mutlaka güncellenmelidir.

Acar vd. [10] uçakların yapısal emniyetini artıran ölçümlerin etkilerini araştırmışlardır. Bu emniyet ölçümleri, yük emniyet faktörü 1.5, müsaade edilebilir malzeme özellikleri, yedekleme, sertifikasyon testi ve varyasyon azaltmadır. Çalışmada statik nokta gerilmesi ve basit bir yedek model düşünülmüştür. Yükleme ve gerilmedeki hatalar ve yükleme, malzeme özellikleri ve geometrideki varyasyonlar bireysel şekilde modellenmiştir. Hata terimleri için üniform dağılım kullanılmıştır. Varyasyonlar için lognormal dağılım kullanılmıştır. Geometrideki varyasyonlar ise üniformdur. Hatayı azaltmanın, sertifikasyon testinden daha etkili olduğu bulunmuştur. Sertifikasyon testi ise yük emniyet faktöründen daha etkilidir. Varyasyonu düşürmenin ise hasar ihtimalini en fazla miktarda azaltan emniyet tedbiri olduğu belirlenmiştir. Sertifikasyon testinin, hatanın sınırları geniş olduğundan etkili olduğu saptanmıştır, yedekleme ise hata sınırı küçükken etkilidir. Tüm bunlara ek olarak emniyet tedbirlerinin hasar ihtimalini düşürürken, hasar ihtimalinin belirsizliğini artırdığı saptanmıştır.

An vd. [11] test verileri kullanılarak hasar gerilmesinin güncellenmesi üzerine çalışmışlardır. Hasar gerilmesinin başlangıç dağılımı kupon testlerinden elde edilmektedir ve daha sonra bu dağılım yapısal eleman testi sonuçları kullanılarak güncellenmektedir. Bir yapısal elemanın hasar gerilmesini belirlemek için, genel bir yaklaşım olarak, eleman testleri tekrarlanır ve belirsizliklere karşı korunumlu olmak adına test sonuçlarından en küçüğü kullanılır. Bu uygulama müsaade edilebilir gerilmeyi bir mukavemet indirgeme faktörüyle çarpmaya eşdeğerdir. Bunun dışında test sonuçlarının ortalamasını alıp, bu değeri bir mukavemet faktörü ile çarpmak tercih edilebilir. Alternatif olarak, test sonuçları Bayes teorisi kullanarak başlangıç dağılımının güncellenmesinde de kullanılabilir. An vd. [11]'nin çalışmasında üniform ve lognormal dağılıma sahip test sonuçlarına Bayes güncellemesinin uygulanması, en kötü test sonucunun ve ortalama test sonucunun seçilmesi arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. Tüm yaklaşımlarda hasar gerilmesinin korunumsuz (unconservative) olarak tahmin edilmesi ihtimali düşmektedir. Bu ihtimal en fazla Bayes güncellenmesinde düşmektedir. Aynı zamanda test verilerinin güncellenmesiyle hasar gerilmesinin varyasyonu da düşmektedir.

Acar vd. [12] yapısal testlerin uçak güvenilirliğine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada kupon testi ve eleman testi adetlerinin, hasar gerilmesi dağılımına etkileri üstüne yoğunlaşmıştır. Ortalama hasar gerilmesinin bir hasar gerilmesi kriterinden (örneğin kompozit malzemeler için Tsai-Wu) tahmin edildiği varsayılmıştır. Kupon testlerinden elde edilen hasar gerilmesinin ilk dağılımı, analiz prosedüründeki hatalardan ötürü belirsizlikler göstermektedir. Sınırlı sayıdaki kupon testlerinin varyasyonuna bağlı olarak da belirsizlik söz konusudur. Eleman testi sonuçlarından elde edilen hasar gerilmesi dağılımı Bayes yaklaşımıyla güncellenir. Belirsizlikler ve mümkün test sonuçları baz alınarak Monte Carlo simülasyonu ile yapısal hasar ihtimali belirlenir. Test adetleri, yapısal ağırlık ve sertifikasyon testinde başarısız olma ihtimali arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda olasılıksal tasarımın ve ABD Federal Havacılık Yönetimi (Federal Aviation Administration, FAA) yönetmeliğine uygun deterministik tasarımın eşzamanlı uygulanabileceği gösterilmiştir.

2.2. Uçak Yapılarının Ağırlık/Maliyet Eniyileştirilmesine Yönelik Çalışmalar

Curran vd. [13] uçak mühendisliğindeki maliyet modellerini incelemişlerdir. Çalışmada finansal maliyet analizleri yer almamakta, yalnızca mühendislik işlemlerindeki tasarım ve üretim gibi maliyet modelleri yer almaktadır. Çalışmada tasarım aşamasından başlayarak her üretim aşaması için maliyet tanımları verilmiştir. Tasarımın integrasyonu ve üretim başlıkları daha detaylı incelenmiştir. Mühendislerin maliyeti belirlemede ve etkilemede finansörlerden çok daha etkili olduğu ortaya çıkmıştır.

Curran vd. [14] uçak yapılarının ağırlık/maliyet eniyileştirmesi üstüne sayısal bir yöntem geliştirmişlerdir. Eniyileştirme prosesinde toplam minimum maliyet üzerine yoğunlaşmıştır. Toplam minimum maliyet, devralma maliyeti, yakıt tüketimi, bakım, işçi, lojistik maliyetlerinin bir fonksiyonudur. Eniyileştirme sonucunda devralma maliyeti ve yakıt tüketimi arasındaki oran 4:3 olarak bulunmuştur. Minimum ağırlık, minimum malzeme maliyeti, minimum üretim maliyeti, minimum toplam maliyet koşullarında eniyileştirme gerçekleştirilmiş ve maliyet kazançları incelenmiştir. En fazla maliyet kazancı, toplam minimum maliyet amaç fonksiyonu

olarak belirlendiğinde elde edilmiştir. Daha sonra sırasıyla en fazla maliyet kazancı, üretim, ağırlık ve malzeme amaç fonksiyonu olarak seçildiğinde elde edilmiştir.

Kaufmann vd. [15] uçak yapılarının entegre ağırlık/maliyet eniyileştirmesine yönelik çalışmışlardır. Amaç fonksiyonu, toplam minimum maliyet, yapının üretim maliyeti ve malzeme maliyeti toplamı olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla tasarım çözümü ne yalnızca maliyet odaklı ne de yalnızca ağırlık odaklı olacaktır. Üretim maliyeti ve ağırlık arasındaki dengeyi simgeleyen parametre, yapısal ağırlığın birim maliyeti, yakıt tüketiminin etkisini, çevresel etkileri de içinde barındırmaktadır. Minimum ağırlık ve minimum maliyet çözümleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, sonuçların ağırlıklı olarak yapısal ağırlığın birim maliyetine bağlı olduğu ve tasarım çözümünde ideal seçimin minimum maliyet veya minimum ağırlık olmadığı, iki çözümün kombinasyonu olduğu belirlenmiştir.

Yukarıda bahsedildiği üzere, literatürde yapısal testlerin yapısal emniyet üzerine etkilerini araştırmaya yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Aynı zamanda uçak yapılarının ağırlık/maliyet eniyileştirmesine yönelik çalışmalar da yapılmıştır. Ancak uçak yapılarının tasarımının ve yapısal test adetlerinin eşzamanlı eniyileştirilmesine yönelik bir çalışma bulunmamaktadır. Yapılan çalışma ile literatürdeki bu kritik boşluğun doldurulması hedeflenmiştir. Bu çalışmada aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Ele alınan problemde uçağın en kritik bölgesindeki panelin tasarımı yapıldığı düşünülmüştür.
- Panelin takviyesiz olduğu varsayılmıştır.
- Statik yükleme altında tasarım yapılmıştır ve yükleme tek yönlüdür. Korozyon, yorulma göz önüne alınmamıştır.
- Yedekleme gibi emniyet tedbirleri ele alınmamıştır.
- Belirsizlikler hata ve varyasyon olarak ikiye ayrılmıştır.
- Hataların ve varyasyonların olasılık dağılımları da birer varsayımdır.
- Parça ve montaj testleri hesaba katılmamıştır.
- Yeniden tasarım kriterleri sezgisel olarak belirlenmiştir.

- Panelin hasara uğramasının uçağın tamamen işlemez olmasına neden olmayacağı varsayılmıştır. Bu nedenle, panelde tek yönlü hasar yolu bulunmasına rağmen, müsaade edilebilir malzeme özellikleri için B-tabanlı değer kullanmıştır.

3. YAPISAL EMNİYET TÜRLERİ

3.1. Giriş

Bir mühendislik yapısı herhangi bir yüklemeye maruz kaldığında, yüklemenin tipine, şiddetine ve yapının mukavemetine göre tepki verir. Bu tepkinin kabul edilebilirliği ise bir takım gerekliliklerin sağlanmasına bağlıdır. Bu gereklilikler yapının yıkılmaması, hasara uğramaması, servis kullanımının bozulmaması ya da başka bir kriter olabilir. Bu gerekliliklerin hepsine sınır durumu adı verilir ve bir yapı için sınır durumunun aşılması gerekir. Yapısal güvenilirlik çalışması bir mühendislik yapısının servis ömrü boyunca sınır durumunu aşma ihtimalinin tahminini hedef alır [16].

Bir yapı için sınır durumunun aşılması ihtimali sayısal bir ölçümdür. Bu ölçüm, benzer yapılar uzun zamanlı incelenerek ya da kişisel tecrübelerle dayanarak belirlenebilir. Pratikte yeterince uzun zamanlı gözlem mümkün olmadığı için, kişisel tecrübe, bilgi, yapı ve özelliklerinin gözlemi birleştirilerek, yapının sınır durumunu aşma ihtimali tahmin edilir.

3.2. Sınır Durumu İhlaline Karşı Deterministik Tedbirler

Olasılıksal hesaplamalarda bir değişkenin belirsizliği göz önünde bulundurulur. Geleneksel yöntemlerde, emniyet faktörü, yükleme faktörü gibi belirsizlikler hesaba katılmaz. Bunlar deterministik ölçümler olup yapıyı ve mukavemetini tanımlayan değişkenlerin bilindiği, belirsizlik olmadığı varsayılır.

3.2.1. Emniyet faktörü

Emniyet faktörü genellikle elastik gerilme analiziyle ilişkili olup aşağıdaki gerekliliğin sağlanması gerekir [16].

$$\sigma_i(x) \leq \sigma_{pi} \quad (3.1)$$

Burada $\sigma_i(x)$ yapıdaki x (gerilmeye maruz kalan nokta) noktasına uygulanan i . gerilme bileşeni olup, σ_{pi} de i . gerilme bileşeni için müsaade edilebilir gerilmedir.

İzin verilebilir gerilmeler yapısal tasarım kodlarında tanımlanır, malzeme mukavemetinden elde edilir ve σ_{ui} ile emniyet faktörünün çarpımıyla ifade edilir.

$$\sigma_{pi} = \frac{\sigma_{ui}}{F} \quad (3.2)$$

Emniyet faktörü F genellikle deneysel gözlemlere, deneyimlere dayanarak ve ekonomik faktörler göz önünde bulundurularak belirlenir. Denklem (3.1) ve (3.2) birleştirilerek sınır durum ihlali şöyle ifade edilir;

$$\frac{\sigma_w(x)}{F} \leq \sigma_i(x) \quad (3.3)$$

3.2.2. Yükleme faktörü

Yükleme faktörü λ emniyet faktörünün özel bir türü olup, yapıların plastik teorisinde kullanılır. Yapıya etkiyen tüm yüklemeler, yapının yıkılmasına neden olacak şekilde yükleme faktörüyle çarpılır. Yapının mukavemeti, malzeme mukavemeti özelliklerinden plastik malzemeler için ideal olacak şekilde belirlenir. Yükleme parametresi tüm ölü, canlı, rüzgar gibi yük bileşenlerini içermektedir. Sınır durum denklemi aşağıdaki gibidir [16];

$$\frac{W_R(R_{pi})}{\lambda W_Q(Q_D + Q_L + \dots)} = 1 \quad (3.4)$$

Burada R plastik dirençleri, Q uygulanan yüklemeleri göstermektedir. W_R iç iş fonksiyonu, W_Q dış iş fonksiyonudur. Denklem (3.4) sol tarafı birden küçük olduğunda hasar gerçekleşmiş olur.

3.2.3. Kısmi faktör

Emniyet ve yükleme faktörünü geliştirerek oluşturulmuştur. Sınır durum denklemi şöyledir [16];

$$\phi_i R_i \leq \gamma_{Di} S_{Di} + \gamma_{Li} S_{Li} + \dots \quad (3.5)$$

R mukavemet, ϕ R üstündeki kısmi faktör, S_D ve S_L ölü ve canlı yükleme etkileri, γ_D ve γ_L S_D ve S_L üstündeki kısmi faktörlerdir. Denklem (3.5) 1960'larda takviye edilmiş inşaat yapıları için geliştirilmiştir. Canlı ve rüzgar yükünün, ölü yüklere göre daha büyük kısmi faktöre sahip olabilmesine izin verebilmektedir. Ayrıca bu modellemeyle işçilikten kaynaklanan varyasyon, mukavemetteki belirsizlikler de hesaplanabilmektedir. Geleneksel emniyet formatlarının genişlemesiyle yükleme ve mukavemetteki belirsizliklerin ayrılması sağlanmıştır.

3.3. Yapısal Güvenilirlik Tedbirleri

3.3.1. Belirsizliklere karşı koruma amaçlı emniyet tedbirleri

Yük İçin Emniyet Faktörü: ABD Sivil uçak tasarımında, FAA (Federal Aviation Administration) kuralları gereğince, yüklemelerdeki belirsizliklere karşı korunma maksadıyla 1.5 emniyet faktörü kullanılmalıdır (FAR-25.303 [17]). Yani, uçak yapıları limit yüklemenin 1.5 katı bir yüklemeye hasar görmeksizin dayanmak zorundalardır.

Müsaade Edilebilir Malzeme Özellikleri: FAA kuralları gereğince, malzeme özelliklerindeki belirsizliklere karşı korunma amacıyla, müsaade edilebilir değerler kullanılmalıdır (FAR-25.613 [18]). Bu değerler, A-tabanlı veya B-tabanlı değerler olarak karakterize edilir [19]. Bu çalışmada, B-tabanlı değer kullanılmıştır. B-tabanlı değer, popülasyonun %90'ı tarafından %95 güvenlik sınırı (confidence bound) ile geçilen değerdir. B-tabanlı değer, belirli sayıda yapılan kupon testi sonuçları kullanılarak hesaplanır. A- tabanlı değer, popülasyonun %99'u tarafından %95 güvenilirlik sınırı için geçilen değerdir. A-tabanlı değer tek yönlü hasar yolu olduğu durumlarda, B-tabanlı değer ise çok yönlü hasar yolu bulunan durumlar için tercih edilir. A-tabanlı (A-basis) değer aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır

$$A-basis = \bar{x} - s \cdot k_A \quad (3.6)$$

Burada \bar{x} ortalama değer, s standart sapma ve k_A da Denklem (3.7)'de verilen normal dağılım için tolerans katsayısıdır.

$$k_A=(z_{1-p}+(z_{1-p}^2-ab)^{1/2})/a \quad (3.7)$$

$$a=1-z_{1-\gamma}^2/2(N-1)$$

$$b=z_{1-p}^2-z_{1-\gamma}^2/N$$

Burada N örnek adeti, z_{1-p} normal dağılımın kritik değeri olup, $1-p$ olasılığını geçen değerdir. A-tabanlı değer için, p %99 ve γ ise %95'dir. Normal dağılım dışındaki dağılımlar için, önce tüm değerler normal dağılıma dönüştürülür, ardından k_A ve A-tabanlı değer hesaplanır. Son olarak da, A-tabanlı değer orijinal dağılımdaki değerine dönüştürülür.

A-tabanlı değer belirlenmesi için malzemeden 100 ile 300 arası adette kupon seçilir. Daha sonra hasar gerilmelerinin ortalama değeri ve varyasyonu hesaplanır. Hesaplanan A-tabanlı değer de rassal bir değişkendir.

B- tabanlı değer ise Denklem (3.8)'deki gibi hesaplanır.

$$B-basis = \bar{x} - s \cdot k_B \quad (3.8)$$

Burada B , B-tabanlı değerdir, \bar{x} örnek ortalama değeri ve k_B 'de Denklem (3.9)'de verilen normal dağılım için tolerans katsayısıdır. Tolerans katsayısı k_B lognormal dağılım için, lognormal dağılımın normal dağılıma dönüştürülmesiyle elde edilir

$$k_B=(z_{1-p}+(z_{1-p}^2-ab)^{1/2})/a \quad (3.9)$$

$$a=1-z_{1-\gamma}^2/2(N-1), \quad b=z_{1-p}^2-z_{1-\gamma}^2/N$$

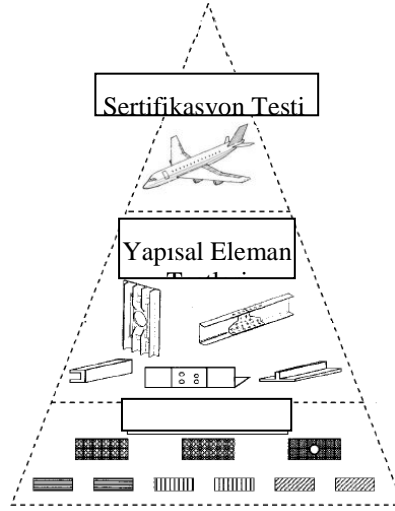
Burada N, örnek adetidir, z_{1-p} normal dağılımın kritik değeri olup, $1-p$ olasılığını geçen değerdir. B-tabanlı değer için p %90 ve γ ise %95'dir.

Bu çalışmada, yedekleme (redundancy) gibi diğer bazı emniyet tedbirleri hesaba katılmamıştır.

3.3.2. Belirsizlikleri azaltma amaçlı emniyet tedbirleri

Uçak yapılarının yapısal analizinde ve hasar tahminindeki gelişmeler, hataları azaltmakta ve güvenilirlik seviyesini arttırmaktadır. Bu gelişmeler daha hızlı bilgisayarlarla daha detaylı sonlu elemanlar analizi ve daha doğru hasar teorileri geliştirilmesiyle elde edilmektedir.

Belirsizlikleri azaltan emniyet tedbirleri içinde yapısal testler, bakım/onarım, yapısal sağlık denetimi gibi tedbirler bulunmaktadır. Örneğin, yapısal testler yapının mukavemet tahminindeki hataları azaltır ve böylelikle yapısal emniyeti artırır. Aynı şekilde, mukavemet tahminindeki belirsizlikler bakım/onarım, yapısal sağlık denetimi, kalite kontrolü ile de azaltılabilir. Burada varyasyon azaltılmasının etkileri için Qu vd. [20]'nin çalışması, hata azaltılmasının etkisi için Acar vd. [21]'nin çalışması, hata ve varyasyonun birlikte azaltılarak etkisinin incelenmesi için Acar vd. [22]'nin çalışması incelenebilir.



Şekil 3.1. Üç seviyeli test piramidi [12]

Bu çalışmada, belirsizlik azaltma mekanizmaları içerisinde yapısal testler üzerinde yoğunlaşılacaktır. Yapısal testler piramit şeklinde bir prosedür ile gerçekleştirilir [19]. Önce, malzeme kuponları test edilir ve mukavemetin ortalama değeri ve varyasyonu hesaplanır. Kupon testi sonuçları, bir hasar teorisi (örneğin, kompozit malzemeler için Tsai-Wu[23]) dahilinde kullanılarak ortalama mukavemet değeri

tahmin edilir. Bu tahmini değer, yapısal eleman testi yapılarak güncellenir. Daha sonra, piramidin bir üst basamağına geçilir ve parçalar test edilir. Ardından, parça grupları test edilir. Bu test piramidi, son olarak uçak tam ölçek testleri (bir adet statik, bir adet yorulma) ile son bulur (FAR-25.307 [24]). Bu çalışmada, Şekil (3.1)'de gösterilen üç seviyeye indirgenmiş, basit bir test piramidi kullanılmıştır. Test piramidinde; malzeme kupon testleri, yapısal eleman testleri ve sertifikasyon testleri mevcuttur.

3.4. Kısmi Olasılıksal Yöntemler

Mühendislik tasarımlarında doğal olaylara bağlı yüklemeler, rüzgar, fırtına, deprem gibi, rastgele cereyan etmektedir. Bir mühendislik yapısında bu tür bir olayın yapının servis ömrü boyunca meydana gelme ihtimali oldukça düşüktür. Bu az görülen yüklemeler için, olasılıksal bir kavram olan “tekrarlama periyodu” kavramı üretilmiştir. Bu kavram yapının servis ömrü boyunca böyle bir olayla karşılaşma ihtimalini tanımlar. Bu aşamadan sonra yapının tasarımı deterministik olarak yapılır [5,16].

Tekrarlama periyodu istatistik olarak bağımsız iki olayın gerçekleşmesi arasındaki ortalama süredir ve rastgele bir değişkendir. 20 yılda bir tekrarlanmış deprem için, olayın herhangi bir yılda meydana gelme ihtimali $1/20$ 'dir. Tekrarlama periyodu olayın gerçekleşme ihtimaliyle şöyle ilişkilidir; $T=1/p$. Tekrarlama periyodu zaman açısından olasılıksal bir yöntemdir, yükleme ve mukavemet bakımından deterministiktir [5].

3.5. Olasılıksal Yöntemler

Tekrarlama periyodu konsepti, yüklemenin herhangi bir limiti aşma ihtimali ve bu ihtimalin zamanda rastgele dağıldığını göz önünde bulundurmaktadır. Bu varsayım yüklemenin deterministik tanımlamalarının üstüne bir gelişmedir ancak, net yüklemenin belirsiz olduğunu göz önüne almamaktadır. Bunun dışında mukavemet, geometri, işçi varyasyonları gibi parametreler de olasılıksal olarak tanımlanabilir [5].

Temel yapısal güvenilirlik problemi yalnızca tek yükleme etkisi S , ve buna karşılık gelen mukavemet R 'nin etkisini göz önüne alır. S ve R 'nin her biri bilinen olasılık

yoğunluk fonksiyonlarıyla tanımlanır. S uygulanan yüklemekten yapısal bir analizle (deterministik veya rastgele bileşenler) elde edilir. R ve S'nin aynı birim olması gerekir. S'nin R'den büyük olma durumunda hasarın gerçekleştiği düşünülür. Hasar ihtimali R ve S'nin olasılık dağılım fonksiyonlarına bağlı olarak aşağıdaki yollardan herhangi biriyle tespit edilebilir [5];

$$p_f = P(R \leq S) \quad (3.10a)$$

$$= P(R - S \leq 0) \quad (3.10b)$$

$$= P\left(\frac{R}{S} \leq 1\right) \quad (3.10c)$$

$$= P(\ln R - \ln S \leq 1) \quad (3.10d)$$

Ya da genel olarak

$$= P[G(R, S) \leq 0] \quad (3.10e)$$

Burada G() performans fonksiyonu (ya da sınır durum fonksiyonu) olup hasar ihtimali, sınır durum ihlali ihtimaline eşittir.

Özel bir durum ve en dikkate değer örnek olarak S ve R'nin normal dağıldığını farz edersek, emniyet payı $Z=R-S$, ortalama değeri μ_z ve varyansı σ_z^2 aşağıdaki gibi olur.

$$\mu_z = \mu_R - \mu_S \quad (3.11a)$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 \quad (3.11b)$$

Normal rastgele değişkenlerin çıkarılması kuralları uygulanarak hasar ihtimali şöyle bulunur;

$$p_f = P(R - S \leq 0) = P(Z \leq 0) = \Phi\left(\frac{0 - \mu_z}{\sigma_z}\right) \quad (3.12)$$

Denklemler birleştirildiğinde hasar ihtimali için şu ifade elde edilir;

$$p_f = \Phi\left(-\frac{(\mu_R - \mu_S)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right) = \Phi(-\beta) \quad (3.13)$$

Burada β , güvenilirlik indeksidir.

Bir çok problem için bu basit formülasyonları uygulamak doğru değildir çünkü yapısal güvenilirlik problemini yalnızca R ve S cinsine indirgemek her zaman mümkün değildir. Genellikle R, malzeme özellikleri, yapının boyutlarının bir fonksiyonuyken, S de uygulanan yüklerin, malzeme yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Bu parametrelerin hepsi de rastgele değişkenlerdir. Bazı durumlarda ise R ve S birbirinden bağımsız olmayabilir, örneğin bazı yüklemeler ya da yapının boyutları hem R'yi hem de S'i etkileyebilir. Böyle durumlar için daha genel formüller gereklidir.

Yapının emniyetini ve davranışlarını yansıtan parametrelere burada temel değişkenler adı verilmektedir. Bu değişkenler genellikle yapının tasarımında ve analizinde rol oynar. En tipik örnekleri, boyutlar, yoğunluk, yükleme tipi ve şiddeti ve mukavemettir [16].

Temel değişkenleri bağımsız olarak seçmek mümkün olsa bile bu her zaman mümkün değildir. Örneğin, çekme, basma ve burma gerilmeleri birbiriyle ilişkili olsa bile, yapısal analizde bunların bağımsız hareket ettiği düşünülebilir. Çünkü temel değişkenlerin birbirine bağlı olması yapısal güvenilirlik analizini oldukça karmaşık bir hale getirir. Dolayısıyla bağımlı değişkenler arasındaki ilişki bilinmeli ve bir şekilde ifade edilmelidir. Bu durumda genellikle korelasyon matrisleri kullanılmaktadır [16].

Temel değişkenlerin olasılık fonksiyonları gözlemlenen verilerden, kişisel değerlendirmelerden ya da her ikisinin kombinasyonundan elde edilir. Bazen temel değişkenin, diğer başka değişkenlerin toplamı olduğu durumlar olabilir. Bu durumda merkezi limit teoremiyle temel değişkenin normal dağılıma yakınsadığı düşünülür [5]. Bu yaklaşım basma gerilmesi ve ölü yük parametrelerini tanımlama da oldukça faydalıdır. Çünkü her ikisinde de bir çok gerilme bileşeni mevcuttur. Diğer bir

yaklaşımında, Gumbel dağılımıyla temsil edilen maksimum rüzgar hızı için de normal olasılık dağılımı kullanılabilir.

Olasılık dağılımlarının parametreleri ise gözlemlenen verilerden, moment metoduyla [5], maksimum olasılık veya istatistik kurallarıyla belirlenir. Parametreler belirlendikten sonra, olasılık dağılımı modelinin yapının verileriyle uyuşup uyuşmadığı kontrol edilmelidir.

Temel değişken için uygun olasılık dağılımını bulmak her zaman mümkün değildir. Bu durumda temel değişken için nokta tahmini uygulanır. Eğer belirsizlik söz konusuysa, temel değişken ortalama değeri ve varyansı ile yani ikinci momentle [5] temsil edilir. Diğer bir yöntem de eğer değişken için gerekli veri yoksa dağılımı normal kabul edilebilir.

Temel değişkenler ve olasılık dağılımları göz önüne alındığında genelleştirilmiş performans fonksiyonu şöyle olur [5];

$$P_f = P[G(X) \leq 0] = \int_{G(X) \leq 0} \dots \int f_X(x) dx \quad (3.14)$$

Burada $f_X(x)$ temel değişken X 'in n vektörü için birleştirilmiş olasılık yoğunluk fonksiyonudur. Dikkat edilmelidir ki burada S ve R 'nin bağımsız olmasına gerek yoktur. $G(X) < 0$ integrasyon bölgesi limit durum ihlalinin aşıldığı bölge yani hasar bölgesidir. Birçok mühendislik problemi için Denklem (3.14)'ün analitik hesabı çok zor olabilir hatta mümkün olmayabilir. Yukarıda bahsedilen varsayımlar yardımıyla (örneğin normalite, merkezi limit teoremi [16]) hasar ihtimali hesaplanabilse de, daha gerçekçi hasar tahminleri için nümerik yöntemler kullanılabilir. Bu sayısal yöntemler içerisinde en popüler olanı Monte Carlo Simülasyonu (MCS)'dur. Monte Carlo simülasyonu ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 4'de verilecektir.

4. MONTE CARLO SİMÜLASYONU VE GÜVENİLİRLİK HESAPLAMALARINDAKİ UYGULAMALARI

4.1. Giriş

Monte Carlo simülasyonları 1940'lu yıllarda mühendislik sistemlerindeki yüksek test maliyetlerini azaltabilmek amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Bu uygulamada sistemlerin gerçek davranışlarının benzetimi yapılır ve analitik modele uygun bir bilgisayar tabanlı model gerçekleştirilerek sistemin olası davranışlarının tahmini yapılır. Her döngüde sistemin girdi parametrelerinden biri için rastgele durumlar oluşturulur. Sistemin girdi parametrelerinden rastgele sayılar üretmek için olasılık dağılımları kullanılır. Sonuç olarak sistemin olası davranışlarından bazı tahminlerde bulunulur. Daha sonra sistemin olasılık dağılım tipinin ve momentlerinin bulunması için istatistiksel metotlar uygulanır [25].

Monte Carlo simülasyonunda öncelikle bir model yardımıyla sistemin tanımı yapılır. Rassal değişkenler için rastgele sayılar üretilir ve modelin hesaplanması yapılır. Sonuç davranışlara istatistiksel analiz yapılır ve son olarak da sistem verimliliğinin simülasyonu yapılır. Sistem tanımlanması; sistemin sınırlarını, girdi parametrelerini, çıktı ölçümlerini ve parametrelerini içermektedir. Simülasyonun doğruluğu yüksek oranda sistemin doğru tanımlanmasına bağlıdır. Tüm kritik parametreler, belirsizlikler modelde yerini almalıdır. Girdi parametrelerinin tanımı olasılık dağılımlarını ve momentlerini içermelidir. Bu değerler modele eklenerek çıktı ölçümlerinin alınması sağlanır. Bu prosedür N defa tekrarlanır. Dolayısıyla sisteme ait N adet yanıt ölçüm elde edilir. Bu yanıtlar kullanılarak ortalama değer, varyans ve sistemin istatistiksel dağılımı oluşturulur. Sonuç ölçümlerinin doğruluğu ne kadar fazla döngü yapıldığına (yani N sayısına) bağlıdır [25]. Bunun dışında uygun olmayan istatistiksel model seçimi hatalı ömür süreleri ve hatalı risk tahminlerinin ortaya çıkmasına sebebiyet verir [1].

Monte Carlo simülasyonu bir mühendislik deneyinin laboratuvar ortamında değil, bilgisayar ortamında gerçekleştirilmesi gibi düşünülebilir. Fiziksel deneyler zaman alıcı ve pahalı olduğu için, Monte Carlo simülasyonları oldukça kullanışlı olmaktadır [5].

Monte Carlo simülasyonunda, en basit yaklaşımla, rastgele bir değişken olan X_i için örnek bir değer olan x_i seçilir. Bu değer için sınır-durum fonksiyonunun $G(x) \leq 0$ olup olmadığı kontrol edilir. Limit durum şartı aşıldıysa yapı hasar görmüş demektir. Bu örnekleme N defa tekrarlanır ve her bir durum için hasarın olup olmadığına bakılır, hasar oluşan n adet örnek sayılır. Bu durumda hasar ihtimali şöyle hesaplanır [16].

$$Pf = n(G \leq 0)/N \quad (4.1)$$

Burada $n(G \leq 0)$, $G \leq 0$ olduğu durumlar için deneme adetidir.

Monte Carlo teknikleri uygulanırken aşağıdaki faktörlerin göz önüne alınması gereklidir;

- i. Temel değişken X için örneklemler oluşturmak için sistematik bir yöntem geliştirmek (bu yöntem temel değişkenler arasındaki korelasyonu modelleyebilmelidir)
- ii. Örnekleme stratejisi için uygun ekonomik ve güvenilir bir simülasyon tekniği seçmek
- iii. Hasar durum fonksiyonunun karmaşıklığını, temel değişken adetinin etkilerini göz önünde bulundurmak
- iv. Seçilen simülasyon tekniğinin, oluşturulan örneklem adetine bağlı olarak, mantıklı bir hasar ihtimali değeri verip veremediğini kontrol etmek

4.2. Rastgele Sayıların Üretilmesi

Monte Carlo simülasyonunda öncelikle her bir değişkenin olasılık dağılımına uygun olarak belirli bir sayıda set olarak sayılar üretilir. Bu set sayısına rastgele sayılar adı verilir ve uygun bir rassal sayı üretme yöntemiyle oluşturulur. Rassal sayıları üretmek için farklı yöntemler mevcuttur. Dijital bilgisayarlardan önce rassal sayılar için yayınlanmış tablolar kullanılırdı. Dijital bilgisayarlarla belirli bir dağılım için rastgele sayıları otomatik olarak üretmek mümkündür. Öncelikle 0 ve 1 arasında uniform dağılmış rastgele sayılar üretilerek, uygun bir dönüşümle belirlenen olasılık dağılımı için gerekli rassal sayılar elde edilir. Standart normal değişken U için yoğunluk ve kümülatif olasılık fonksiyonları Denklem (4.2) ve (4.3)'te verilmiştir [5].

$$f_U(u) = \begin{cases} 0; & u < 0 \\ 1; & 0 \leq u \leq 1 \\ 0; & u > 1 \end{cases} \quad (4.2)$$

$$F_U(u) = \begin{cases} 0; & u < 0 \\ 1; & 0 \leq u \leq 1 \\ 0; & u > 1 \end{cases} \quad (4.3)$$

X , $F_X(x)$ dağılım fonksiyonuna sahip bir rastgele değişken olsun. x 'in kümülatif fonksiyonunu değeri u aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$x = F_X^{-1}(u) \quad (4.4)$$

burada F_X^{-1} , F_X 'in ters fonksiyonudur.

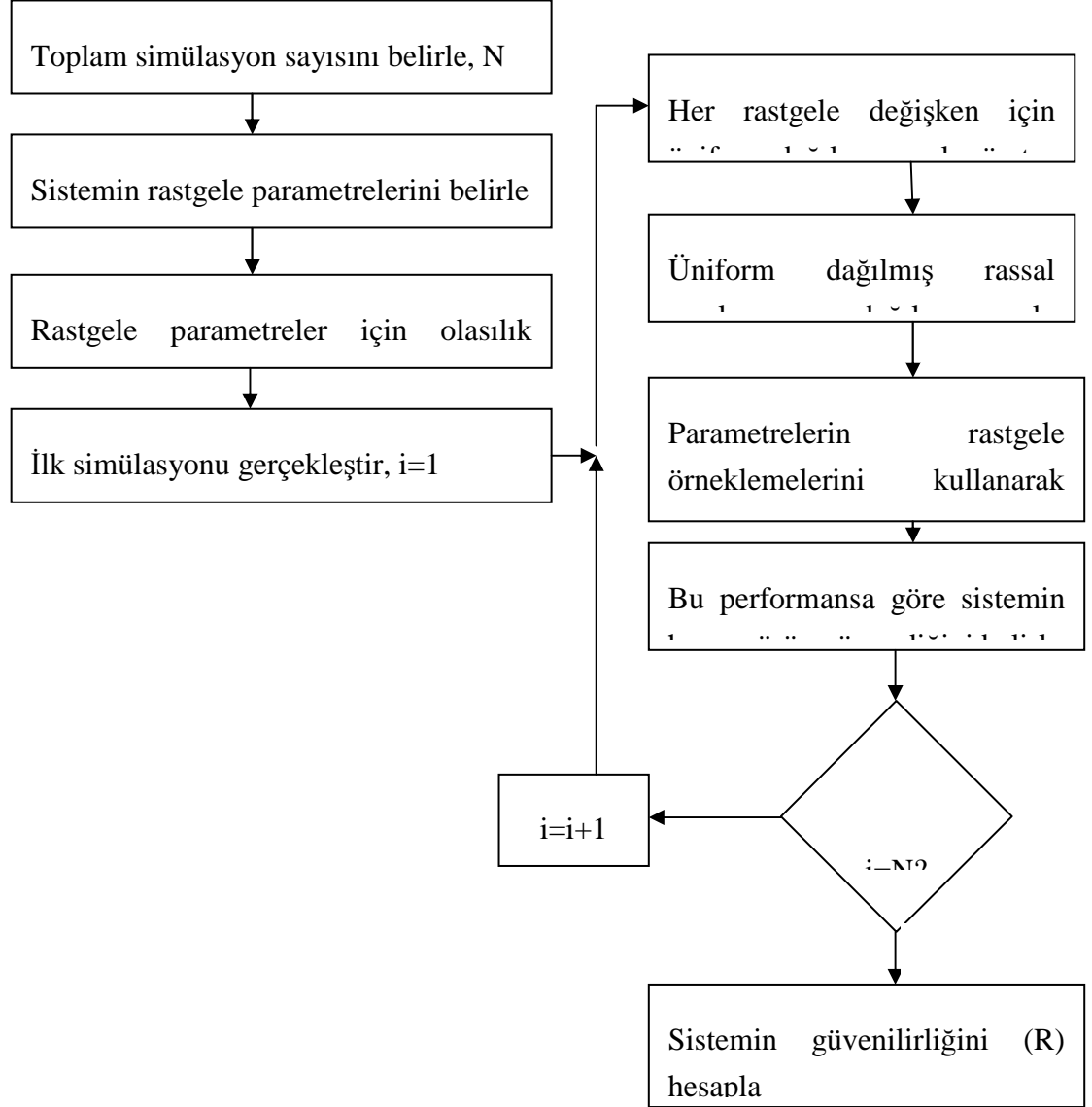
Rassal sayı üreticileriyle, üniform dağılıma sahip, üniform dağılıma sahip olmayan, ayrık rastgele sayılar, birleşik dağılıma sahip rassal sayılar, korelasyonlu rassal sayılar üretmek mümkündür.

Monte Carlo simülasyonu için üretilen rassal sayılar güvenilirlik hesaplaması için kullanılır. Hesaplanan hasar ihtimalindeki hata önemlidir. Doğru bir yaklaşım için kaç simülasyonun gerektiği önemlidir. Hesaplanan hasar ihtimalinin hata yüzdesi Denklem (4.5)'deki gibi bulunur [5].

$$\% \text{ hata} = 200 \sqrt{\frac{1 - P_f}{NP_f}} \quad (4.5)$$

Burada N , simülasyon için kullanılan örnekleme sayısıdır. Hesaplanan hasar ihtimalinin hatası %95 ihtimalle Denklem (4.5) ile hesaplanan değerden düşük olacaktır. Yani eğer 1000 simülasyon için hasar ihtimali 0.1 ise, hata oranı %18 olur. Bu durumda hasar ihtimali %95 ihtimalle 0.1 ± 0.018 arasında değer alır. Bu denklem aynı zamanda, hasar ihtimalinde elde etmek istediğimiz doğruluk için kaç örnekleme yapılmasının bulunması için de kullanılabilir. Örneğin hasar ihtimali için 0.1 ± 0.01 doğrulukta bir değer beklemek için 3600 kere simülasyonu yapmak gereklidir [5].

Şekil (4.1)'de Monte Carlo simülasyonu kullanılarak yapılan bir güvenilirlik analizinin akış şeması yer almaktadır.



Şekil 4.1. Monte Carlo simülasyonu kullanılarak yapılan bir güvenilirlik analizinin akış şeması

4.3. Basit Monte Carlo Yöntemi

En yaygın olarak kullanılan fakat verimliliği en düşük basit Monte Carlo yöntemidir. Hasar ihtimali aşağıdaki gibi hesaplanır [16].

$$P_f = \int \dots \int I[G(x) \leq 0] f_x(x) dx \quad (4.6)$$

Burada $I[]$ indikatör fonksiyonu $f_x(x)$ ise, eğer $[]$ doğruysa 1'dir, yanlıssa 0'dır. Denklem (4.6)'da integrasyon fonksiyonunu tanımlamak üzere kullanılmıştır. Burada x_j , rassal değişken X 'in j . örneklemesidir. Basit Monte Carlo yöntemi ile hasar ihtimali şu şekilde hesaplanır.

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[G(x_j) \leq 0] \quad (4.7)$$

Basit Monte Carlo yönteminde üç önemli faktör söz konusudur. Simülasyon noktalarından en fazla bilginin nasıl alınacağı, doğru bir yaklaşım için kaç simülasyon noktasının gerektiği ve daha büyük doğruluk için örnekleme tekniğinin nasıl geliştirileceğidir [16]. Basit Monte Carlo yönteminde her bir temel değişken için oluşturulan rassal sayılar, sistem performansını hesaplamak üzere sırasıyla birbirleriyle eşleştirilir, gerekli işleme sokulur. Basit Monte Carlo yönteminde hesaplanan hasar gerilmesinin varyansını teorik olarak hesaplamak mümkündür Denklem (4.8)'deki gibi;

$$\sigma = \sqrt{\frac{q \cdot p}{N}} \quad (4.8)$$

Burada N simülasyon sayısı, p hasar ihtimali ve q da $1-p$ 'dir. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki %95 güvenilirlik sınırında, 10^{-2} mertebesindeki bir hasar ihtimalini hesaplamak için 10.000-20.000 simülasyon gerekmektedir [26].

Gerilme bileşeninin istatistiksel dağılımı normal olan ve $N(10.0, 1.25)$ olan bir panel düşünelim. Panelin mukavemeti $N(13.0, 1.5)$ olsun. Panelin hasar ihtimalini 10 örnekleme kullanarak basit Monte Carlo yöntemiyle hesaplamak istersek öncelikle gerilme ve mukavemet temel değişkenleri için normal dağılıma uygun 10 adet örnek

oluşturulur. Her bir örnek çifti için $R-S \leq 0$ olma durumuna bakılır. Hasar ihtimali de, mukavemetin gerilmeden küçük olduğu örneklemelerin, toplam örnekleme sayısına bölünmesiyle elde edilir. Problemin çözümü Çizelge (4.1)'de görülmektedir.

Çizelge 4.1 Basit Monte Carlo yöntemiyle problemin çözümü

N (Örnekleme Sayısı)	R (Mukavemet)	S (Gerilme)	$R-S \leq 0$ (Hasar Durumu)	$I[R-S \leq 0]$
1	13.4416	9.4593	3.9823	0
2	10.9957	7.9180	3.0777	0
3	14.0715	10.1567	3.9148	0
4	15.4353	10.3596	5.0757	0
5	11.9623	8.5669	3.3954	0
6	14.2870	11.4886	2.7984	0
7	14.8810	10.2183	4.6627	0
8	10.6094	9.9530	0.6564	0
9	10.8386	11.4865	-0.6479 (Hasar)	1
10	13.8567	10.4091	3.4476	0

Çizelge (4.1)'i oluşturabilmek için öncelikle mukavemet için dağılım tipine, ortalama değerine ve standart sapmasına uygun olacak şekilde 10 adet örnekleme yapılmıştır. Bu örnekleme gerçekleştirilebilmek için 0 ve 1 arasında dağılmış rastgele sayılar tablosu kullanılabilir veya bir bilgisayar programıyla otomatik olarak oluşturulabilir. Aynı uygulama gerilme için de yapılır. Daha sonra teker teker her örnekleme için mukavemetten gerilme çıkarılmıştır. Örnekte verilen 10 örnekleme göre hasar ihtimali 0.1'dir. Denklem (3.13)'e göre normal dağılım için hasar ihtimalini teorik olarak hesaplamak istersek 0.0622 bulunur.

$$p_f = \Phi\left(-\frac{(\mu_R - \mu_S)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right) = \Phi\left(-\frac{(13-10)}{\sqrt{1.5^2 + 1.25^2}}\right) = \Phi(-1.5365) = 0.0622$$

4.4. Ayrık Monte Carlo Yöntemi

Ayrık Monte Carlo yönteminde amaç hasar gerilmesi varyasyonunu azaltmaktır. Temel değişkenlerin örneklemelerinden her biri, diğer temel değişkenin tüm örneklemeleriyle işleme girer. Bu sayede daha az simülasyon sayısı ile daha yüksek doğruluk elde etmek mümkündür. Ayrık Monte Carlo yöntemiyle ilgili daha fazla bilgi Smarslok ve Haftka [27]'da mevcuttur.

Basit MCS yöntemi kullanılarak çözülen güvenilirlik hesabı probleminde 10^{-7} seviyesinde sonuçlar elde etmek için trilyonlarca simülasyon yapmak gereklidir. Simülasyon sayısını azaltmak için ayrık MCS prosedürü uygulanır. Bu prosedür güvenilirlik fonksiyonu $g_1(x_1) > g_2(x_2)$, şeklinde ifade edilebildiğinde kullanılır, burada x_1 and x_2 ayrık rastgele değişkenler setleridir. Bu prosedürü kullanmanın avantajı şudur: Sınır durum fonksiyonu sadece g_1 varyasyonlara ve g_2 sadece hatalara bağlı olacak şekilde ayrık bir formda formüle edilebilir. Yapısal güvenilirlik durumu genellikle gerilme < mukavemet şeklindedir. Buna rağmen bu form ayrılabilirlik gerekliliğini sağlamamaktadır. Örneğin, gerilme malzeme özelliklerindeki varyasyona bağlı olduğu gibi, analiz prosesinin hatalarını taşıyan tasarım alanına da bağlıdır. Sınır durum fonksiyonunu doğru forma getirmek için, gerekli kesit alanının A'_{req} , üretilmiş alandan, $A_{built-av}$, büyük olma durumu şeklinde yeni bir forma sokulur. Dolayısıyla güvenilirlik fonksiyonu gerekli kesit alanı, A'_{req} , ve üretilen alan, $A_{built-av}$ cinsinden şöyle tanımlanır:

$$A_{built-av} < \frac{A_{req}}{(1+v_t)(1+v_w)} \equiv A'_{req} \quad (4.9)$$

burada A_{req} uçak modelinin belirli bir kopyasının, net yükleme şartlarını taşıyan kesit alanıdır ve A'_{req} ise kalınlık ve genişlik varyasyonuna sahip filo-ortalama kesit alanıdır, v_t kalınlık varyasyonu, v_w ise genişlik varyasyonudur.

$$A_{req} = P_{act} / \sigma_f \quad (4.10)$$

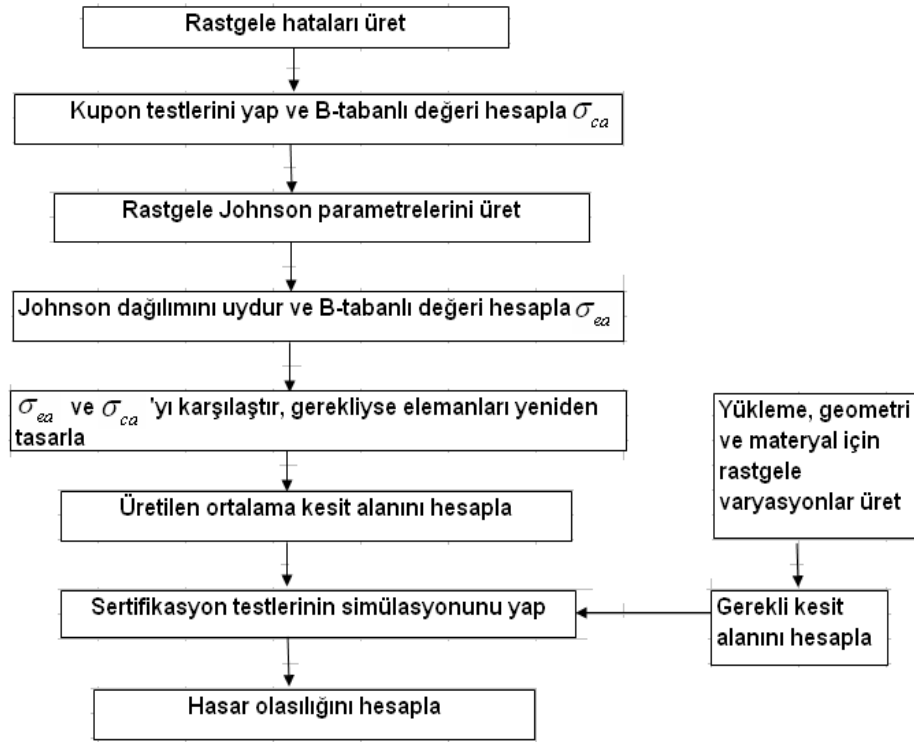
Gerekli kesit alanı yalnızca varyasyona bağlı iken, üretilmiş kesit alanı yalnızca hatalara bağlıdır. Sertifikasyon testi hesaplamaya katıldığında, üretilmiş kesit alanı, $A_{built-av}$, yerini A_{cert} 'ye bırakır. Burada A_{cert} sertifikasyon testini geçen firmaların

üretilmiş kesit alanı değeridir. Sertifikasyon testini geçemeyen firmalar göz önünde bulundurulmamıştır. Güvenilirlik fonksiyonu şöyle tanımlanır

$$\text{Sertifikasyon testleriyle güvenilirlik} \quad A_{built-av} - A'_{req} < 0 \quad (4.11)$$

$$\text{Sertifikasyon testleri olmadan güvenilirlik:} \quad A_{cert} - A'_{req} < 0 \quad (4.12)$$

Ayrılabilir Monte Carlo simülasyon prosedürü Şekil (4.2)'de özetlenmiştir



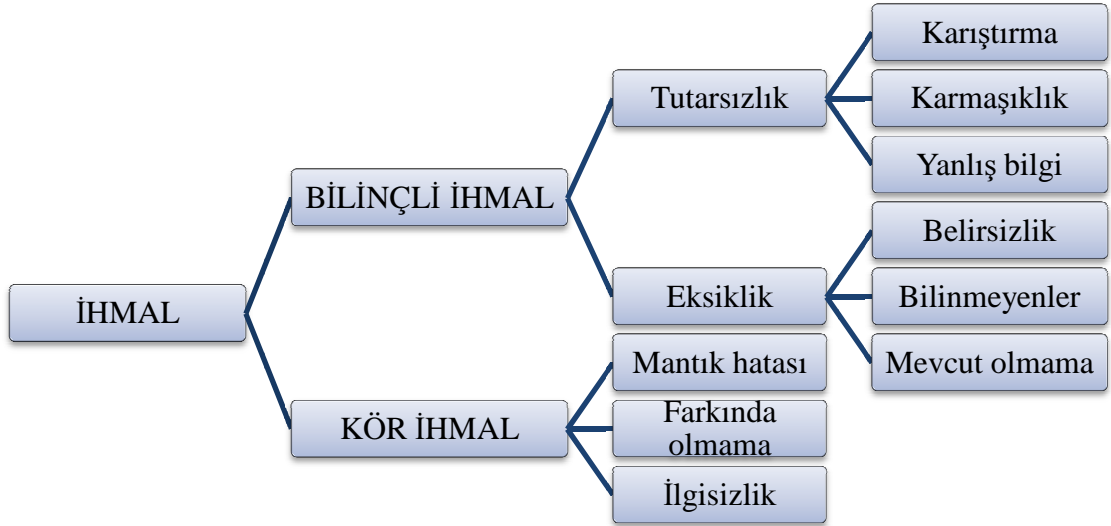
Şekil 4.2. Ayrık MCS için akış şeması [12]

5. YAPISAL BELİRSİZLİKLER

5.1. Giriş

Yapısal bir ürünün tasarımında farklı kaynaklı belirsizlikler göz önüne alınmalıdır. Örneğin yapıya etkiyen yükleme çalışma koşullarındaki değişimlere bağlı olarak farklı değerler alırken, malzeme özellikleri ve malzeme boyutları da üretim koşullarındaki varyasyon nedeniyle farklılık gösterir. Üretim aşamasında yapının her boyutunda varyasyonlar ve farklı aşamalarda belirli bir aralıkta değişen hatalar oluşur. Bu belirsizlikler hasar ihtimaline istatistiksel bir boyut kazandırır. Güvenilirlik yapının başarılı olma ihtimali iken, hasar durumu da yapının başarısız olma ihtimalidir ve her iki durum da bir olasılık dağılımı olarak ifade edilir. Bu olasılık dağılımlarından doğru ve maksimum bilgiyi elde etmek için, bahsedilen belirsizliklerin tasarım aşamasına entegre edilmesi gerekir [28].

Belirsizlikler ihmallerin bir kategorisi olarak Şekil (5.1)'deki gibi incelenebilir [25].



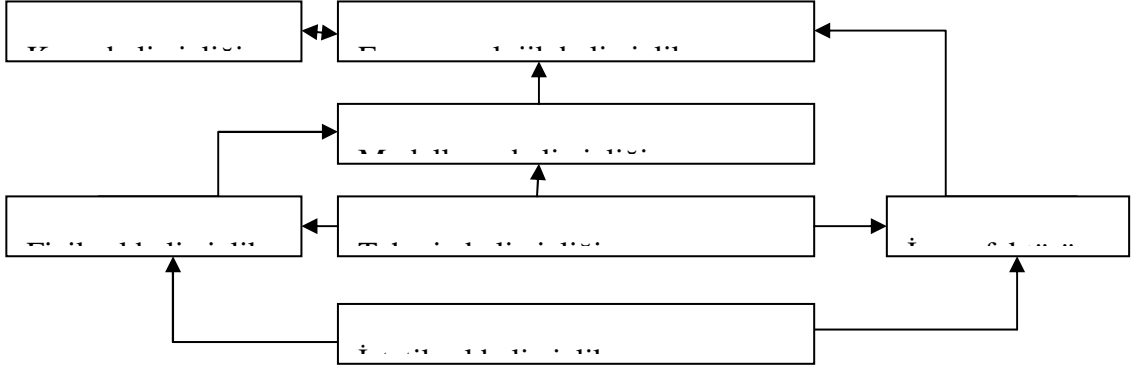
Şekil 5.1. İhmal türleri [25]

İhmal durumu, kasıtlı olmadan ya da yanlış bilgi nedeniyle bilinçli olarak, ya da bilginin ihmaline bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Bilinçli ihmalde herhangi bir kasıt ya da farkındalık söz konusu değildir. Tutarsızlık ve eksik bilgi nedeniyle ortaya çıkar. Kör ihmalde farkında olmayarak gerekli bilgi kullanılamaz ya da mevcut

değildir veya ilgisizlik dikkat dağımıklığı söz konusudur. Yapısal belirsizlikler bilinçli ihmalin, bilgi eksikliğinin bir kategorisi olarak değerlendirilebilir.

5.2. Yapısal Belirsizliklerin Sınıflandırılması

Yapısal belirsizliklerin karmaşık sistemler için tanımlanması zordur. Üretimden ve çevreden kaynaklanan tüm yükleme durumlarının ve her durumdaki hatanın göz önünde bulundurabilmesi için sistematik bir belirsizlik sınıflandırılması yararlı olacaktır. Şekil (5.2)'de tüm yapısal belirsizliklerin şeması ve birbiri arasındaki ilişki görülmektedir [16].



Şekil 5.2. Güvenilirlik analizindeki belirsizlikler [16].

5.2.1. Fenomenolojik belirsizlikler

Fenomenolojik belirsizlik, tahmin edilemeyen bir olayın gelişmesiyle hasar oluşturan durumdur. Bu belirsizliğin tahmini ve hesaplanabilmesi için yalnızca sübjektif bir değerlendirme yapılabilir. Fenomenolojik belirsizlik herhangi bir yapının ya da tasarım tekniğinin her şartta, konstrüksiyon aşamasında, servis ya da maksimum yükleme durumunda, belirsizlik gösterebileceğinde göz önünde bulundurulur.

5.2.2. Karar belirsizlikleri

Karar belirsizliği, daha çok sınır durum ihlalinin belirlenmesiyle alakalı olarak ortaya çıkmaktadır. Tipik bir örnek olarak çatlak genişliği veya hatası verilebilir. Yapı

aniden çalışamaz duruma gelir ya da hasar görür. Çoğunlukla yapı kullanılabilirliğini kaybeder. Formüle edilmesi kolaydır.

5.2.3. Modelleme belirsizlikleri

Modelleme belirsizlikleri bir sistemi tanımlayan temel değişkenlerin arasında gerçekte olması gerekenden daha basit ilişkiler kullanmaktan kaynaklanır. En basit anlamıyla modelleme belirsizlikleri, fiziksel modeldeki ve performans fonksiyonundaki belirsizliklerdir. Güvenilirlik analizine kolay entegre edilirler.

5.2.4. Tahmin belirsizlikleri

Birçok güvenilirlik problemi gelecekteki durumların tahminini de içermektedir. Yapısal belirsizliğin hesaplanması mümkün analiz sonuçlarına bağlı olduğu gibi, yeni bilgilerin varlığıyla da bu hesaplama daha doğru bir hale gelmektedir. Örneğin bir projenin konstrüksiyon aşamasında, malzeme mukavemetleri, işçilik hakkında bilgiler daha önceki deneyimlere dayanarak elde edilir ve daha sonra yapının testiyle ilk yükleme, sınır yükleme gibi bilgilerinin elde edilmesiyle güvenilirlik hesaplanması revize edilir. Hasar ihtimali hesaplanması yalnızca yapının özelliklerinin bilinmesine değil, analistin yapı hakkındaki bilgisine ve yapıya etkileyen kuvvetlere de bağlıdır. Örneğin yapının ömrü için yapılan bir güvenilirlik hesaplamasına, analistin yapının ömrüyle ilgili yaptığı tahminin belirsizliği de eklenmelidir.

5.2.5. Fiziksel belirsizlikler

Fiziksel belirsizlikler temel değişkenlerin doğasından kaynaklanmaktadır. Örneğin malzeme mukavemeti varyasyonu, rüzgar yüklemesi varyasyonu, yapının boyutlarındaki varyasyon gibi. Fiziksel belirsizlikler kalite kontrolü ile azaltılabilir fakat tam olarak ortadan kaldırılamazlar. Gözlemlere dayanarak ya da öznel olarak değerlendirilerek güvenilirlik hesaplamasına entegre edilirler.

5.2.6. İstatistiksel belirsizlikler

İstatistiksel hesaplamalarda öncelikle elde edilen veriden örneğin ortalaması ve momentleri hesaplanarak uygun olasılık dağılımı ve bu dağılımın parametreleri elde

edilir. Değişken, gözlemlenen ve kaydedilen veriden farklı davranış gösterebilir. Farklı örnek veri setleri de belirsizliğe neden olmaktadır. Bu durum istatistiksel belirsizliği oluşturur. İstatistiksel belirsizlik değişkenin ortalama değerinin ve varyasyonunun, güvenilirlik analizine rastgele değişkenler olarak entegre edilmesiyle azaltılır.

5.2.7. İnsan faktöründen kaynaklanan belirsizlikler [29]

Güvenilirlik analizinde insan faktöründen kaynaklanan belirsizliklerin de entegre edilmesi gerekmektedir. Bu belirsizlikler stres, karmaşıklık, deneyimsizlik gibi birçok faktör nedeniyle oluşmaktadır. Bu konuda, insan hatalarından kaynaklanan hatalar için veritabanları oluşturulmuştur. Hangi üretim aşamalarında, hangi olasılıkla insan hatası olma ihtimali üstüne çalışmalar mevcuttur. İnsan faktöründen kaynaklanan hataların azaltılabilmesi için, eğitim, sistemlerin karmaşıklığının azaltılması, iyi personel seçimi, bakım-onarım gibi önlemler alınabilir. Çizelge (5.1) 1980’de J.C. Williams tarafından geliştirilen, farklı işlerde insan faktörü nedeniyle hata oluşma ihtimallerini göstermektedir.

Çizelge 5.1 İnsan faktöründen kaynaklanan hata ihtimalleri [29]

Görev	İnsan faktöründen kaynaklanan hata ihtimali %
Konuya yabancılık	55
Kontrol prosedürleri yerine getirilmeden sistemin yeni duruma getirilmesi,	26
Karmaşık sistem, yetenek isteyen sistem	16
Çabukluk gerektiren sistem	9
Rutin sistem, yetenek istemeyen sistem	2
Sistemin yen bir duruma getirilmesi, kontrol prosedürleri yerine getirilerek	0.3
Konuyla ilgili tecrübe, motivasyon	0.04

5.3. Hata ve Varyasyon

Mühendislik simülasyonlarındaki belirsizliklerin kaynaklarının iyi bir analizi Oberkampf vd. [30,31] çalışmasında verilmiştir. Bu çalışmada, analizi basitleştirmek amacıyla tüm belirsizlikler hata ve varyasyon olarak ikiye ayrılmıştır. Çizelge (5.2)'de sunulan bu ayrım önemlidir, çünkü belirsizlik azaltma mekanizmaları ya hataları ya da varyasyonu azaltmayı hedef alır. Örneğin, yapısal testler mukavemet tahminindeki hatayı azaltmayı hedeflerken, kalite kontrolü uygulamaları mukavemetteki varyasyonu azaltmayı hedefler. Varyasyon, belirli bir niceliğin, popülasyonun bir elemanından diğerine olan değişimini gösterir. Örneğin, belirli bir uçak panelinin mukavemetinin bir uçaktan diğerine değişimi gibi. Varyasyonlar ölçülebildikleri için, olasılıksal modeller yardımıyla kolayca modellenebilir. Ancak, hatanın değeri popülasyonun her bir elemanı için aynıdır ve bu değer önceden bilinemez. Bu yüzden hatalar, sıklıkla bulanık rakamlar (fuzzy numbers) ya da olurluk analizi (possibility analysis) ile modellenirler [32,33]. Ancak, analizi kolaylaştırmak için, bu çalışmada hatalar da olasılıksal olarak modellenmiştir. Minimum bilgiyi ve maksimum düzensizliği yansıtmak için, hataların olasılık dağılımları üniform dağılım ile modellenmiştir. Airbus, Boeing, Embraer gibi birçok firmanın aynı tip bir sivil uçağı tasarladığı varsayılmıştır. Hataları modellerken, her bir firmanın belirli bir uçak paneli için sabit bir hataya sahip olduğu, bu hatanın firmalar arası dağılımının ise üniform olduğu varsayılmıştır.

Çizelge 5.2. Belirsizlik ayrımı

Belirsizlik tipi	Yayılım	Sebe	Çözüm
Hata	Belirli bir filodaki bir uçağın özelliklerinin ideal olandan sapması	Hasar tahmini hataları. İmalat hataları.	Yapısal testler. Sağlık denetimi.
Varyasyon	Belirli bir filodaki bir uçağın özelliklerinin bir filo ortalaması değerden farkı	Takım tezgahlarının, uçuş koşullarının filodaki bir uçaktan diğerine değişmesi	Kalite kontrolü.

Problemi basitleştirmek için, takviyesiz panelin basit noktasal gerilme hesabına göre tasarlandığı varsayılmıştır. Yani, panelin performans fonksiyonu

$$g = \sigma_f - \frac{P}{wt} \quad (5.1)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada, P panelin ömrü boyunca maruz kalacağı en yüksek yük, w panelin genişliği, t panelin kalınlığı ve σ_f malzemenin mukavemetidir. Denklemdaki tüm değişkenler rassal değişkenlerdir ve olasılık dağılımları ilerleyen kısımlarda açıklanacaktır.

Güvenilirlik hesabı için, bir Monte Carlo Simülasyonu (MCS) döngüsü içinde test piramidi ve ilintili belirsizlikler modellenir. Malzeme kupon testleri seviyesinde, sınırlı sayıda test yapılmasından kaynaklanan belirsizlikler modellenir. Yapısal eleman testleri seviyesinde, yapısal elemanın hasar durumunu belirlemek için kullanılan hasar teorisindeki hatalar modellenir. Sertifikasyon testi seviyesinde, yapısal mukavemet tahminindeki hatalar, yük ve gerilme tahminindeki hatalar ve geometrideki hatalar modellenir. Aynı şekilde, her test seviyesinde mukavemet, yükleme ve geometrideki varyasyonlar da uygun olasılık dağılımları kullanarak modellenir. Tüm belirsizlikler dikkatlice modellendikten sonra, panelin emniyeti MCS yöntemiyle hesaplanabilir.

Hata ve varyasyonun modellenmesi, iki aşamalı MCS döngüsü içinde yapılabilir. İlk aşamada, aynı uçağı tasarlayan farklı uçak firmalarının benzetimi yapılır. Her firmanın mukavemet, yük ve gerilme tahminindeki ve geometrideki hataları bir üniform dağılımdan rastgele olarak belirlenir. İkinci aşamada ise, imalat ve uçuş koşullarındaki farklılıklardan kaynaklanan mukavemet, geometri ve yükteki varyasyonlar modellenir. Nihayetinde, herbir uçak firması tarafından üretilen panellerin güvenilirlikleri hesaplanır ve ortalaması alınır.

Çizelge (5.3)'de uçak paneli tasarımı problemindeki hataların olasılıksal karakteristikleri verilmiştir. Minimum bilgiyi ve maksimum entropiyi yansıtmak için, hataların olasılık dağılımları üniform dağılım ile modellenmiştir. Çizelge (5.4)'te varyasyonların olasılıksal dağılımları verilmiştir. Örneğin yüklemenin olasılık dağılımı Tip 1 asimtotik olarak alınmıştır, çünkü uçağın servis ömrü boyunca maruz kalacağı maksimum yükleme göz önüne alınmıştır. Bir filoda 1000 uçak olduğu varsayılmış ve filodaki uçaklardan sadece bir tanesinin servis ömrü boyunca limit

yüklemeye maruz kalacağı varsayılmıştır. Dolayısıyla filodaki bir uçağın ömrü boyunca limit yüklemeye maruz kalma oranı 1/1000 olarak belirlenmiştir. Yüklemedeki varyasyon katsayısı 10% olarak alınmıştır. Yükleme değerleri mukavemetle normalize edilmiş ve mukavemetin ortalama değeri 1.0 olarak alınmıştır. Bu durumda, limit yükleme $1/S_F=2/3$ olarak belirlenmiştir. Tip 1 Asimtotik dağılım için CDF dağılımı Denklem (5.2)'de olduğu gibi verildiğinde, olasılık dağılımı parametreleri $a=28.73$, $b=0.4263$ olarak hesaplanmıştır.

$$F_x(x) = \exp\{-\exp[-a(x-b)]\} \quad (5.2)$$

Çizelge 5.3 Hataların olasılıksal karakteristikleri

Hata tipi	Olasılık Dağılımı	Ortalama	Sınırlar
Yük hesabındaki hata	Üniform	0.0	± %10
Panel genişliğindeki hata	Üniform	0.0	± %1
Panel kalınlığındaki hata	Üniform	0.0	± %3
Eleman mukavemetindeki hata	Üniform	0.0	± %10
Yapının mukavemetindeki hata	Üniform	0.0	± %10

Çizelge 5.4 Varyasyonların olasılıksal karakteristikleri

Değişken	Olasılık dağılımı	Ortalama	Yayılm
Servis yüklemesi	Tip I asimtotik	$a=28.73$	$b=0.4263$
Panel genişliği	Üniform	w	%1 sınırlar
Panel kalınlığı	Üniform	t	%3 sınırlar
Mukavemet (eleman ve yapı)	Normal	1.0	0.08

* Yüklemedeki a ve b parametreleri ortalama ve standart sapmayı göstermiyor.

Ortalama mukavemetin olasılık dağılımının güncellemesi, yapısal eleman test sonuçları ve Bayes teorisi kullanılarak yapılmıştır [11,34]. Eleman testi sonuçları elde edildikten sonra, ortalama mukavemetin başlangıç olasılık dağılımı Bayes teorisi kullanılarak güncellenmiştir. Burada, Bayes teorisi güvenilirlik hesabı için kullanılan MCS döngüsü içerisine direkt olarak entegre edilebilir. Yani MCS

döngüsünde, her bir uçak firmasına ait yapısal test seviyesinde, elde edilebilecek tüm olası test sonuçları modellenip, her bir test seti için Bayes teorisi kullanıp güncelleme yapılabilir. Ancak, bu durumda güvenilirlik hesabı çok uzun zaman alacaktır. Diğer bir yol ise, Bayes güncellemesini güvenilirlik hesabı için kullanılan MCS döngüsü içerisinde değil, ondan bağımsız diğer bir MCS döngüsünde yapmaktır. Bu yol izlendiğinde, önce rastgele kupon testi sonuçları üretilir. Sonra bu sonuçlar bir hasar teorisi dahilinde kullanılarak ortalama mukavemet için bir başlangıç dağılımı oluşturulur. Daha sonra da ‘hatasız’ mukavemet dağılımından rastgele test sonuçları üretilir ve Bayes teorisi kullanılarak mukavemet dağılımı güncellenir. Burada not edilmelidir ki, ‘hatasız’ mukavemet dağılımı MCS döngüsü içinde sadece test sonuçları üretme amaçlı kullanılır, uçak firmalarının kullandıkları dağılım ise ‘hatalı’ mukavemet dağılımıdır.

Oluşturulan her bir test seti için, ortalama mukavemetin güncellenen olasılık dağılımına Johnson dağılımı uydurulur (yani Johnson dağılımı parametreleri hesaplanır). Olası tüm sonuçlar modellendiğinden oluşturulan her test seti için bu işlem tekrar edilir ve Johnson parametrelerinin olasılık dağılımları elde edilir. Elde edilen sonuçlar, Johnson parametrelerinin olasılık dağılımlarının normal dağılıma yakın olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla, Johnson parametrelerinin sadece ortalama değerlerinin ve standart sapmalarının hesaplanması yeterlidir. Bayes güncellemesinin detayları Çizelge (5.5)’de verilmiştir.

Bayes güncellemesi ile hesaplanan Johnson parametrelerinin ortalama değerleri ve standart sapmaları, güvenilirlik hesabı için oluşturulan MCS döngüsünde kullanılır (bkz. Çizelge 5.6). Böylelikle, Bayes teoremi MCS döngüsü içerisine direkt değil dolaylı yoldan entegre edilmiş olur. Bu yolla, güvenilirlik hesabı daha kısa zaman içerisinde yapılabilir.

Çizelge 5.5 Bayes güncellemesi için ayrıca oluşturulan MCS döngüsü detayları

1. Malzeme kupon testlerinden mukavemet dağılımı elde et.
 2. Sonuçları bir hasar teorisi dahilinde kullan ve ortalama mukavemet başlangıç olasılığını belirle.
 3. Rastgele yapısal eleman testi sonuçları oluştur ('hatasız' mukavemet dağılımı kullan).
 4. Bayes teorisini kullan ve ortalama mukavemet olasılık dağılımını güncelle.
 5. Güncellenen dağılıma Johnson dağılımı uydur (Johnson parametrelerini hesapla).
 6. 1 ila 5 arası adımları 20,000 kez yinele ve Johnson parametrelerinin ortalama değerlerini, standart sapmalarını ve aralarındaki korelasyonu hesapla.
-

Çizelge 5.6 Güvenilirlik hesabı için oluşturulan MCS döngüsü detayları

1. Malzeme kupon testlerinden müsaade edilebilir mukavemet değerini hesapla (σ_{ca}).
2. Panelin kesit alanını tasarla.
3. Tablo 4'de detayları verilen ayrı bir MCS ile elde edilen Johnson parametreleri olasılıksal özelliklerini kullanarak, rastgele Johnson parametreleri oluştur.
4. Oluşturulan Johnson parametrelerini kullanarak müsaade edilebilir mukavemet hesapla (σ_{ea}).
5. Adım 1 ve Adım 4'te elde edilen müsaade edilebilir değerlerini karşılaştır ve panelin kesit alanını gerekliyse* revize et.
6. Tasarlanan kesit alanına binaen diğer belirsizlikleri de hesaba katarak güvenilirlik hesapla.

Güvenilirlik hesabının detayları için Bölüm 7'ye bakınız.

* Eğer σ_{ea} değeri σ_{ca} değerinden %5 daha yüksekse (tasarım gerektiğinden dayanıklıdır), kesit alanı $\sigma_{ca} / \sigma_{ea}$ oranında azaltılır. Ancak, eğer σ_{ea} değeri σ_{ca} değerinden %2 daha düşükse (tasarım gerektiğinden dayanıksızdır), kesit alanı $\sigma_{ca} / \sigma_{ea}$ oranında artırılır. Bu iki durum da geçerli değilse, kesit alanında revizyon yapılmaz. İkinci durumdaki düşük tolerans, emniyet amaçlıdır.

6. BELİRSİZLİKLERİN MODELLENMESİ

6.1. Giriş

Güvenilirlik hesabı için, bir MCS döngüsü içinde Bölüm 3.3.2’de verilen test piramidi ve ilintili belirsizlikler modellenir. Malzeme kupon testleri seviyesinde, sınırlı sayıda test yapılmasından kaynaklanan belirsizlikler modellenir. Yapısal eleman testleri seviyesinde, yapısal elemanın hasar durumunu belirlemek için kullanılan hasar teorisindeki hatalar modellenir. Sertifikasyon testi seviyesinde, yapısal mukavemet tahminindeki hatalar, yük ve gerilme tahminindeki hatalar ve geometrideki hatalar modellenir. Aynı şekilde, her test seviyesinde mukavemet, yükleme ve geometrideki varyasyonlar da uygun olasılık dağılımları kullanarak modellenir. Tüm belirsizlikler dikkatlice modellendikten sonra, panelin emniyeti MCS yöntemiyle hesaplanabilir.

Hata ve varyasyonun modellenmesi, iki aşamalı MCS döngüsü içinde yapılabilir. İlk aşamada, aynı uçağı tasarlayan farklı uçak firmalarının benzetimi yapılır. Her firmanın mukavemet, yük ve gerilme tahminindeki ve geometrideki hataları bir üniform dağılımdan rastgele olarak belirlenir. İkinci aşamada ise, imalat ve uçuş koşullarındaki farklılıklardan kaynaklanan mukavemet, geometri ve yükteki varyasyonlar modellenir. Nihayetinde, herbir uçak firması tarafından üretilen panellerin güvenilirlikleri hesaplanır ve ortalaması alınır.

6.2. Malzeme Mukavemeti Hatalarının Kupon Testleriyle Belirlenmesi

Kupon testleri malzemelerin mukavemet özelliklerinin (örneğin hasar mukavemeti, A tabanlı, B tabanlı tasarım değerleri gibi) istatistiksel olarak belirlenmesi için yapılır. Sınırlı sayıdaki kupon testleriyle elde edilen istatistiksel karakterizasyon hatalar içerir. Dolayısıyla sınırlı sayıdaki kupon testleriyle elde edilmiş olan malzemenin ortalama hasar gerilmesi ve bunun standart sapması belirsizdir. Hasar gerilmesinin normal dağılıma sahip olduğu varsayıldığında, hesaplanan ortalama da normal dağılım takip etmektedir. Buna ek olarak kupon testi adeti 25’ten fazla olduğunda, hesaplanan standart sapma normale eğilimlidir. Bu yüzden hasar gerilmesi şöyle ifade edilir [12].

$$(\sigma_f)_{calc} = Normal \left[(\bar{\sigma}_f)_{calc}; Std(\sigma_f)_{calc} \right] \quad (6.1)$$

ve hesaplanan ortalama değer ve standart sapma şoyledir

$$(\bar{\sigma}_f)_{calc} = Normal \left(\bar{\sigma}_f; \frac{Std(\sigma_f)}{\sqrt{n_c}} \right) \quad (6.2)$$

$$Std(\sigma_f)_{calc} = Normal \left(Std(\sigma_f) \sqrt{\frac{1 + \sqrt{\frac{n_c - 3}{n_c - 1}}}{2}}; Std(\sigma_f) \sqrt{\frac{1 - \sqrt{\frac{n_c - 3}{n_c - 1}}}{2}} \right) \quad (6.3)$$

Burada, $\bar{\sigma}_f$ ve $Std(\sigma_f)$ hasar gerilmesinin ortalama değerinin ve standart sapmasının geręek değeridir. Dikkat edilmelidir ki Denklem (6.1) ve (6.3) normal dağılımdan gelen, parametreleri de rastgele olan, rastgele bir değişkeni tanımlamaktadır.

Kupon seviyesindeki müsade edilebilir gerilme, σ_{ca} , mukavemet indirgeme faktörü k_d kullanılarak, kupon testi seviyesindeki hasar gerilmesinden $(\bar{\sigma}_f)_{calc}$ hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{ca} = k_d (\bar{\sigma}_f)_{calc} \quad (6.4)$$

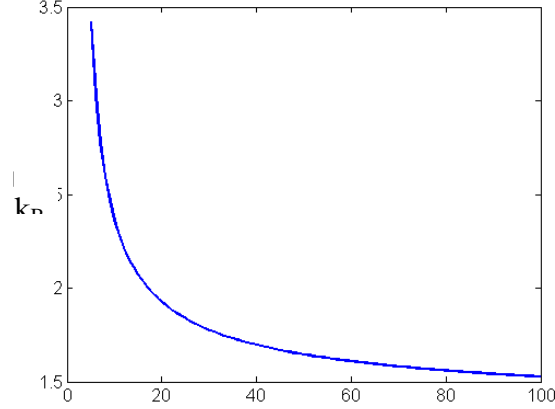
Mukavemet indirgeme faktörü k_d ABD Federal Havacılık Yönetimi (Federal Aviation Administration, FAA) kurallarına göre belirlenmiştir (Federal Aviation Regulations, FAR). Normal dağılım için k_d kupon testi adeti ve hasar gerilmesinin varyasyon katsayısına bağlıdır.

$$k_d = 1 - k_B (c_f)_{calc} \quad (6.5)$$

$(c_f)_{calc}$ kupon testleriyle hesaplanmış hasar gerilmesinin varyasyon katsayısı ve k_B de limit tolerans faktörüdür. Tolerans limit faktörü kupon testi sayısının bir fonksiyonudur.

$$k_B \approx 1.282 + \exp \left(0.958 - 0.520 \ln(n_c) + \frac{3.19}{n_c} \right) \quad (6.6)$$

Kupon testi sayısına bağılı olarak, tolerans katsayısının değişimi Şekil (6.1)'de gösterilmiştir. Dikkat edilmelidir ki Denklem (6.6) normal dağılım için geçerlidir. Diğer dağılımlar için ise, normal dağılıma dönüştürme yöntemleri kullanılabilir.



Şekil 6.1. Tolerans katsayısının kupon testi adetiyle değişimi [12]

6.3. Yapısal Elemanların Mukavemet Tahminindeki Hatalar

Test piramidindeki ikinci aşama yapısal eleman testleridir. Bu testler yapısal elemanların hasar kriterlerinin (örnek; kompozit malzemeler için Tsai-Wu) doğruluğunun denetlenmesi için yapılır. Bu çalışmada hasar yüzeyinin tek bir hasar gerilmesi değerine, $\bar{\sigma}_{ef}$, indirgenebildiği varsayılmıştır. Burada 'e' alt simgesi eleman testlerine tekabül etmektedir. Eleman testlerinden elde edilen hasar gerilmesi, $\bar{\sigma}_{ef}$, kupon testlerinden elde edilen ortalama hasar gerilmesinden, $\bar{\sigma}_{cf}$, tahmin edilebilir [12].

$$\bar{\sigma}_{ef} = k_{2d} \bar{\sigma}_{cf} \quad (6.7)$$

burada k_{2d} tek yönlü hasar gerilmesi ve birleşik yükleme altında yüklenmiş malzemedeki bir katmanın hasar gerilmesi arasındaki orandır. Eğer hasar gerilmesi teorisi hatasız ise ve sonsuz sayıda kupon testi yapılmışsa, k_{2d} 'yi tam olarak hesaplamak mümkündür ve bu değer yalnızca malzeme varyasyonuna bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yalnız ne hasar teorisi hatasız, ne de sonsuz sayıda kupon testi yapıldığı için k_{2d} şöyle bulunur [12];

$$(k_{2d})_{calc} = (1 - e_{ef}) k_{2d} \quad (6.8)$$

burada e_{ef} hasar teorisindeki hatadır. Dikkat edilmelidir ki hata teriminin işareti negatiftir, çünkü hata terimleri daha konservatif kararlar aldırarak şekilde formüle edilmiştir. Bu yüzden eleman seviyesindeki ortalama hasar gerilmesi, kupon testi seviyesindeki hasar gerilmesiyle şöyle ilişkilidir [12].

$$(\bar{\sigma}_{ef})_{calc} = (k_{2d})_{calc} (\bar{\sigma}_{ef})_{calc} = (1 - e_{ef}) k_{2d} (\bar{\sigma}_{ef})_{calc} \quad (6.9)$$

Burada kolaylık için $k_{2d} = 1$ alınmıştır. Dolayısıyla denklem şu hale gelir

$$(\bar{\sigma}_{ef})_{calc} = (1 - e_{ef}) (\bar{\sigma}_{ef})_{calc} \quad (6.10)$$

$(\bar{\sigma}_{ef})_{calc}$ 'in ilk dağılımı, kupon testleri sonuçlarından, $(\bar{\sigma}_{ef})_{calc}$, ve e_{ef} 'den elde edilmektedir. Eleman testi verileri Bayes prosedüründe kullanılmak üzere, hasar gerilimi dağılımını güncellemek için kullanılır. Pratikte eleman testlerinden elde edilen en küçük hasar gerilmesini kullanmak gibi bir prosedür sıklıkla uygulanmaktadır. Buradaki varsayım eleman testlerinden daha verimli yararlanmaya yöneliktir.

Eğer Bayes güncellemesini direkt olarak, birim yük taşıyan tasarım kesit alanı belirlemesi için kullandığımız MCS döngüsü içinde kullanırsak, çözüm uzun zaman alır. Bunun yerine Bayes güncellemesi MCS döngüsü dışında, belirli bir aralıktaki mümkün test sonuçlarını baz alarak uygulanmaktadır. Bayes güncellemesi kodunda kullandığımız hata tanımı MCS kodunda kullandığımızdan farklıdır. Bayes güncellemesi kodunda kullandığımız hata hesaplanan hasar gerilmesi $(\bar{\sigma}_{ef})_{calc}$ değerlerinden ölçülmektedir, öyle ki gerçek ve hesaplanan hasar gerilmesi şöyle ilişkilidir $(\bar{\sigma}_{ef})_{true} = (1 + error)(\bar{\sigma}_{ef})_{calc}$. MCS kodunda ise hata gerçek hasar değeri üstünden hesaplanmaktadır ve gerçekte hesaplanan hasar gerilmesi ilişkisi şöyledir $(\bar{\sigma}_{ef})_{calc} = (1 - e_{ef})(\bar{\sigma}_{ef})_{true}$. Bu yüzden Bayes güncellemesi uygulanırken, MCS döngüsünde kullanılan rastgele hata, e_{ef} , $error = \frac{1}{1 - e_{ef}} - 1$ 'e dönüşmektedir. Bu

karmaşıklık MCS döngüsünde mümkün olduğunca fazla sayıda eleman analizinin ve test sonuçlarının göz önünde bulundurulduğunu ve bunların kusursuz olduğunu göstermektedir.

Eleman testi seviyesindeki müsadde edilebilir gerilme şöyle hesaplanır [12];

$$\sigma_{ea} = k_d (\bar{\sigma}_{ef})_{calc} \quad (6.11)$$

Burada kullanılan güncellenmiş ortalama hasar gerilmesi, $(\bar{\sigma}_{ef})_{calc}^{updated}$, maksimum olasılık yoğunluk fonksiyonu değerine sahip ortalama hasar gerilmesine tekabül etmektedir.

Denklem (6.4), (6.10) ve (6.11) birleştirilirse

$$\sigma_{ea} = (1 - e_{ef}) \sigma_{ca} \quad (6.12)$$

elde edilir.

6.4. Yapısal Mukavemet Tahminindeki Hatalar

Yapısal sistemin bütününe karmaşıklığına bağlı olarak, tüm yapının hasar tahmininde e_f gibi bir hata olacaktır. $(\bar{\sigma}_{ef})_{calc}$ 'ı $(\bar{\sigma}_{ef})_{calc}$ 'ye bağlı olarak ifade eden formül takip edilirse, tüm yapının hesaplanmış ortalama hasar gerilmesi, $(\bar{\sigma}_f)_{calc}$, yapısal elemanın hesaplanmış ortalama hasar gerilmesi $(\bar{\sigma}_{ef})_{calc}$ cinsinden şöyle ifade edilebilir [12].

$$(\bar{\sigma}_f)_{calc} = (1 - e_f) (\bar{\sigma}_{ef})_{calc} \quad (6.13)$$

Yapısal tasarım seviyesindeki müsadde edilebilir gerilme, σ_a , eleman seviyesindeki müsadde edilebilir gerilmeyle, σ_{ea} , aşağıdaki şekilde ilişkilidir [12].

$$\sigma_a = k_f (1 - e_f) \sigma_{ea} \quad (6.14)$$

Burada k_f yapısal seviyede ekstra bir önlem olarak kullanılan ek bir mukavemet indirgeme faktörüdür. Burada k_f 0.95 alınmıştır. Denklem (6.12) ve (6.14) kombine edilirse;

$$\sigma_a = (1 - e_{ef})(1 - e_f)k_f \sigma_{ac} \quad (6.15)$$

6.5. Tasarım Hataları

Daha önce belirtildiği gibi hasar gerilmesi tahmininde hatalar olduğu gibi, tasarım ve konstrüksiyon da hatalar içermektedir. Yapısal tasarım başlamadan önce, uçağa etkileyen servis yükünü belirlemek üzere aerodinamik analizlerin yapılması gerekmektedir. Hesaplanan tasarım yükleme değeri P_{calc} , gerçek tasarım yükleme değeri olan P_d 'den, FAA tasarım spesifikasyonlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (örnek, ani rüzgar yüklemesi mukavemeti spesifikasyonları). Her firmanın ayrı bir tasarım uygulaması olduğu için, yükleme hesabındaki hata, e_p , bir firmadan diğerine değişiklik göstermektedir. Hesaplanan tasarım yüklemesi, P_{calc} , gerçek tasarım yüklemesine, P_d , bağlı olarak şu şekilde hesaplanabilir [12].

$$P_{calc} = (1 + e_p)P_d \quad (6.16)$$

Yükleme hesabındaki hataların yanı sıra bir firma gerilme hesabında da hatalar yapabilir. Yapısal parçada kalınlığı t , genişliği w olan ve o bölgedeki yüklemeye mukavemet gösterecek küçük bir bölge düşünülün. Bu yapısal parçadaki hesaplanan gerilme, σ_{calc} , hesaplanan yükleme değeri, P_{calc} , tasarım genişliği, w_{design} , yapının kalınlığı, t ve gerilme analizindeki hatayı temsil eden, e_σ , cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir [11].

$$\sigma_{calc} = (1 + e_\sigma) \frac{P_{calc}}{w_{design} t} \quad (6.17)$$

Bu çalışmada uçak firmalarının gerilme tahminlerini hatasız yaptığı varsayılmış ve dolayısıyla e_σ 'nin etkisi ihmal edilmiş ve 0 alınmıştır. Hesaplanan gerilme değeri, tasarım kalınlığı t_{design} 'yi belirlemek üzere şöyle formüle edilir [12].

$$t_{design} = \frac{S_F P_{calc}}{w_{design} \sigma_a} = \frac{(1+e_p)}{(1-e_f)(1-e_{ef})} \frac{S_F P_d}{w_{design} k_f \sigma_{ca}} \quad (6.18)$$

Yük taşıyan birim alanın tasarım değeri ise şöyledir [12];

$$A_{design} = t_{design} w_{design} = \frac{(1+e_p)}{(1-e_f)(1-e_{ef})} \frac{S_F P_d}{k_f \sigma_{ca}} \quad (6.19)$$

6.6. Konstrüksiyon Hataları

Bahsedilen hatalara ek olarak, geometrik parametrelere bağlı konstrüksiyon hataları da olabilir. Bu hatalar, geometrik parametrelerin üretilmiş bir uçaktaki ortalama değeri ve tasarım değeri arasındaki farkı temsil etmektedir. Genişlik hatası, e_w , yapının tasarım genişliği, w_{design} , ile firma tarafından üretilmiş yapısal parçanın genişliği, $w_{built-av}$, arasındaki sapmayı göstermektedir[12].

$$w_{built-av} = (1+e_w) w_{design} \quad (6.20)$$

Buna benzer olarak, üretilen kalınlık değeri, dizayn değerinden şöyle farklılık göstermektedir [12];

$$t_{built-av} = (1+e_t) t_{design} \quad (6.21)$$

Bunlara bağlı olarak, üretilmiş birim yük taşıyan alan, $A_{built-av}$, şöyle ifade edilir [5];

$$A_{built-av} = (1+e_t)(1+e_w) A_{design} \quad (6.22)$$

Hataların varsayılan nominal değerleri Çizelge 5.3'te verilmiştir

6.7. Toplam Hata, e_{total}

Yapısal parçanın kupon testleri baz alınarak yapılan, panel kesit alanı değeri, $A_{built-av-c}$, Denklem (6.19)'u ve (6.22)'yi birleştirerek yeniden şu şekilde formüle edilir[12];

$$A_{built-av-c} = (1 + e_{total}) \frac{S_F P_d}{k_f \sigma_{ca}} \quad (6.23)$$

burada

$$e_{total} = \frac{(1 + e_p)(1 + e_t)(1 + e_w)}{(1 - e_f)(1 - e_{ef})} - 1 \quad (6.24)$$

e_{total} , bahsedilen tüm hataların toplam etkisini yansıtmaktadır.

6.8. Eleman Testlerine Bağlı Olarak Tasarımın Güncellenmesi

Hasar gerilmesi dağılımı güncellemelerinin yanı sıra, eleman testlerinin, eğer tasarım güvenilir değil ya da fazla konservatif ise, mevcut tasarımın güncellenmesinde de önemli bir rolü vardır. Eğer eleman testlerinden fazla büyük ya da fazla küçük hasar gerilmeleri elde edildiye, firma yük taşıyan alanı küçültmek ya da büyütme isteyebilir. Tasarım güncellemesi uygulamaları için yayınlanmış bir veri bulunmadığı için, bu çalışmada Acar vd.[12] tarafından tasarlanan yaklaşım kullanılmıştır. Eğer eleman testlerinden elde edilmiş B tabanlı değer , σ_{ca} , kupon testlerinden elde edilmiş B tabanlı değerden, σ_{ca} , %5 fazla ise yük taşıyan alan $\sigma_{ca} / \sigma_{ea}$ oranında azaltılır. Eğer eleman testlerinden elde edilmiş B tabanlı değer , σ_{ca} , kupon testlerinden elde edilmiş B tabanlı değerden, σ_{ca} , %2 düşükse, yük taşıyan alan $\sigma_{ca} / \sigma_{ea}$ oranında artırılır. Kesit alanı artırılırken kullanılan bu düşük tolerans güvenilirlik gereğini yansıtmaktadır. Bu durumların dışında yeniden tasarıma gerek yoktur. Yapısal elemanın kesit alanı, Denklem (6.25)'i yeniden tasarım faktörü , c_r , ile çarparak şöyle revize edilir;

$$A_{built-av} = c_r A_{built-av-c} = (1 + e_{total}) c_r \frac{S_F P_d}{k_f \sigma_{ca}} \quad (6.25)$$

burada

$$c_r = 1 \quad (\text{tasarım güncellemesi gerekli değilse})$$

$$c_r = \frac{1.01}{C.F.} \quad (\text{tasarım güncellemesi gerekli ise}) \quad (6.26)$$

Tasarım güncellemesi; yeni elemanların üretimlerini ve testlerini gerektirdiği için maliyetlidir. Bu yüzden bir defa tasarım güncellemesi yapılan elemanların, bir defa daha tasarım güncellemesinin yapılmasına gerek yoktur. Yeniden tasarlanmış elemanları testlerdeki belirsizliklerden korumak için, hesaplanmış müsaade edilebilir değerlerde %1 ek bir azaltma uygulanır [12]. (Denklemler 6.26'daki 1.01 terimine bakınız.)

6.9. Varyasyon

Daha önceki bölümlerde tasarım ve konstrüksiyon aşamasında, bir uçak filosundaki ortalama geometri, yükleme ile bunların tasarım değerleri arasındaki farklılıkları yansıtan hatalar analiz edildi. Bu değerler belli bir tasarım için, işleme , konstrüksiyon, ve uçuş koşulları değişkenliğine bağlı olarak, filodaki bir uçaktan diğerine farklılık gösterir. Örneğin yapısal bir parçanın kalınlığı , $t_{built-var}$, filonun ortalama kalınlık değerine, $t_{built-av}$, göre şöyle ifade edilir [12];

$$t_{built-var} = (1 + v_t) t_{built-av} \quad (6.27)$$

v_t 'nin %3 sınırlar dahilinde (bakınız Çizelge 6.2) üniform dağılıma sahip olduğunu varsayılmıştır. Dolayısıyla net yük taşıyan alan, $A_{built-var}$, şöyle ifade edilir [12];

$$A_{built-var} = t_{built-var} W_{built-var} = (1 + v_t)(1 + v_w) A_{built-av} \quad (6.28)$$

burada v_w filodaki ortalama genişlik değerindeki varyasyonu göstermektedir.

Çalışmada kullanılan varyasyonların olasılıksal karakteristikleri Çizelge (5.4)'te verilmiştir. Dikkat edilmelidir ki Çizelge (5.3)'te kalınlık hatası %±3 oranında üniform dağılmıştır. Dolayısıyla bütün firmaların filolarında uçakların kalınlık farkı %±6'dır. Ancak üniform varyasyon ve uniform hata birleştirildiğinde elde edilen dağılım üniform değildir.

6.10. Eleman Testi Sonuçlarından Elde Edilen Hasar Gerilmesi Dağılımının Bayes Teorisiyle Güncellenmesi

Yapısal elemanın başlangıç hasar gerilmesi dağılımı, bir hasar kriteriyle (ör. metaller için von-Mises teorisi, kompozitler için Tsai-Wu teorisi) kupon testi sonuçları kullanılarak elde edilir. Başlangıç hasar gerilmesi dağılımı hatalıdır ve bu tahmindeki hatanın iki kaynağı vardır. Birincisi sınırlı sayıda kupon testi uygulanmaktadır, ikincisi ise kupon testlerinden elde edilen hasar gerilmesinin ortalama ve standart sapma değeri, gerçek ortalama ve standart sapma değerinden farklıdır.

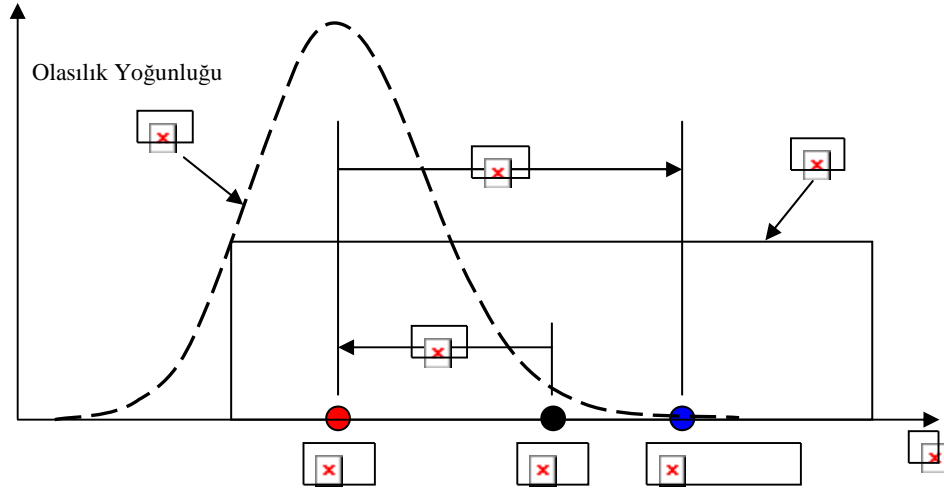
Bu çalışmada testlere bağlı olan mukavemetin analitik tahminlerini güncellemek üzere tipik bir durum varsayılmıştır. Yapısal bir parçanın hasar gerilmesinin analitik tahmininin, $(\sigma_{ef})_{calc}$, ortalama hasar gerilmesi $(\bar{\sigma}_{ef})_{true}$ olan, birbirinin aynı, sonsuz sayıda yapısal elemana uygulandığı düşünülmüştür. Hata terimi, e_{ef} , analitik tahmin için şöyle tanımlanır [12];

$$(\bar{\sigma}_{ef})_{true} = (1 + e_{ef})(\sigma_{ef})_{calc} \quad (6.29)$$

Burada tasarımcının hatanın sınırlarını, b_e , (imkan dahilinde konservatif), hatanın büyüklüğüne bağlı olarak hesaplayabildiği varsayılır, buna ek olarak hataların belirli sınırlar içerisinde uniform dağılıma sahip olduğu kabul edilir. Dikkat edilmelidir ki hatanın, hasar gerilmesinin hesaplanan değerlerine bağlı olarak tanımlanması Şekil (6.2)'de gösterildiği üzere daha uygundur.

An vd. yaptıkları çalışmada [35], kupon testleri ihmal edilmiş ve ortalama hasar gerilmesinin, $f^{ini}(\bar{\sigma}_{ef})$, ilk dağılımı b_e sınırları içinde uniform olarak verilmiştir.

$$f^{ini}(\bar{\sigma}_{ef}) = \begin{cases} \frac{1}{2b_e(\sigma_{ef})_{calc}} & \text{if } \left| \frac{\bar{\sigma}_{ef}}{(\sigma_{ef})_{calc}} - 1 \right| \leq b_e \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.30)$$



Şekil 6.2. Hasar gerilmesindeki hata ve varyasyon [11]

Hata hesaplanan değer civarında merkezlenmiştir, ve üniform dağılıma sahip olduğu varsayılmıştır. Buna rağmen varyasyon dağılımı lognormaldir ve ortalama değeri gerçek hasar gerilmesinin ortalamasıdır.

Daha sonra, ortalama hasar gerilmesi dağılımı, verilen $(\sigma_f)_{1, test}$ ile Bayes teorisi ile güncellenir

$$f_{1, test}^{upd}(\bar{\sigma}_{ef}) = \frac{f_{1, test}(\bar{\sigma}_{ef}) f^{ini}(\bar{\sigma}_{ef})}{\int_{-\infty}^{\infty} f_{1, test}(\bar{\sigma}_{ef}) f^{ini}(\bar{\sigma}_{ef}) d\bar{\sigma}_{ef}} \quad (6.31)$$

Burada $f_{1, test}$ birinci test sonucunun, $(\sigma_{ef})_{1, test}$, mümkün varyasyonunu yansıtan olasılık fonksiyonudur. Bu olasılık fonksiyonu Denklem (6.32) ya da (6.33) kullanılarak formüle edilebilir.

$$f_{1, test}(\bar{\sigma}_{ef}) = Normal\left((\sigma_{ef})_{1, test}; \bar{\sigma}_{ef}, Std(\sigma_{ef})\right) \quad (6.32)$$

Denklem (6.33) kullanılarak

$$f_{1, test}(\bar{\sigma}_{ef}) = Normal\left((\sigma_{ef})_{1, test}; \bar{\sigma}_{ef}, \bar{\sigma}_{ef} c_{ef}\right) \quad (6.33)$$

Dikkat edilmelidir ki, eleman hasar gerilmesinin standart sapması, $Std(\sigma_{ef})$, kupon testlerinden elde edilmiş standart sapmaya, $Std(\sigma_{ef})$, eşit alınmıştır. Burada Denklem

(6.32) ve (6.33) arasında ciddi bir tercih gerekçesi olmadığı için, ikinci formülasyon (Denklem 6.33) seçilmiştir (daha önceki bir çalışmada olduğu gibi [12]).

Dikkat edilmelidir ki, $f_{1, test}(\bar{\sigma}_{ef})$, $\bar{\sigma}_{ef}$ içinde bir olasılık dağılımı değil, ortalama değeri $\bar{\sigma}_{ef}$ olarak verilen hasar gerilmesinden, test sonucu $(\sigma_{ef})_{1, test}$ 'yi elde etmenin koşullu olasılık yoğunluğudur. Bunu takip eden testler aynı denklemlerle, güncellenmiş dağılımı ilk dağılım olarak elde edilir.

Bayes prosedürü direkt olarak panel kesit alanı tasarlayan MCS döngüsü içinde kullanılsaydı çözüm süresi uzun olurdu. Bu çalışmada, Bayes güncellemesi MCS döngüsü dışında uygulanmıştır. Bu ayrı döngüde, ilk olarak hesaplanan hasar gerilmesinin ortalama, $\bar{\sigma}_{ef}$, ve standart sapma, $Std(\sigma_{ef})$, değerleri için rastgele örnekler üretilerek kupon testi simülasyonu yapılır. Daha sonra, n_e adetince eleman testi simülasyonu yapılır $(\sigma_{ef})_{1, test}$. Eleman testi sonuçları, ortalama ve standart sapma değerleri, Denklem (6.32)'deki olasılık fonksiyonunu, $f_{1, test}(\bar{\sigma}_{ef}) = Normal\left((\sigma_{ef})_{1, test}; \bar{\sigma}_{ef}, \bar{\sigma}_{ef} c_{ef}\right)$, tanımlamak üzere kullanılır. Denklem (6.31)'deki $f^{ini}(\bar{\sigma}_{ef})$ 'nin ilk dağılımı üniformdur ve Denklem (6.34)'te verilen sınırlara sahiptir.

$$f^{ini}(\bar{\sigma}_{ef}) = \begin{cases} \frac{1}{2b_e \bar{\sigma}_{ef}} & \text{eğer } \left| \frac{\bar{\sigma}_{ef}}{\bar{\sigma}_{ef}} - 1 \right| \leq b_e \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (6.34)$$

Hata sınırının, b_e , Bayes güncellemesinden önce ya da sonra uygulanması farketmemektedir. Hata sınırının Bayes güncellemesinden önce uygulanması demek, ilk dağılımı, $f^{ini}(\bar{\sigma}_{ef})$, Denklem (6.35)'den belirlemek ve sonra Denklem (6.31)'yi kullanmaktır. Hata sınırını Bayes güncellemesinden sonra uygulamak, başlangıçta oldukça geniş bir hata sınırı uygulayıp, ilk dağılımı, $f^{ini}(\bar{\sigma}_{ef})$, Denklem (6.34)'ten hesaplamak ve son olarak da gerçek hata sınırını, b_e , Denklem (6.31)'den elde edilen dağılıma uygulamaktır.

Hata sınırını Bayes güncellemesinden sonra uygulamak, Bayes güncellemesinden elde edilen ortalama hasar gerilmesine dağılımlar (ör. Johnson dağılımı) uydurmak istediğimizde daha kullanışlıdır. Hata sınırını başta uygularsak, Denklem (6.31)'den sonraki dağılım kesik olacak, ve doğru bir dağılım uydurmak zor olacaktır. Hata sınırı sonda uygulandığında ise, Denklem (6.31)'den sonraki dağılım sürekli olacaktır ve iyi bir dağılım uydurulabilecektir.

Dolayısıyla tüm prosedür şöyledir. Bir MCS döngüsü içinde kupon testlerinden elde edilmiş hasar gerilmesinin ortalama değeri ve standart sapması için rastgele sayılar üretilir. Daha sonra Denklem (6.34)'te kullanılmak üzere geniş hata sınırları belirlenir, eleman testleri simülasyonu yapılır ve ortalama hasar gerilmesi dağılımını belirlemek üzere Denklem (6.31) kullanılır. Ortalama hasar gerilmesi dağılımının Johnson parametreleri hesaplanır. Bu parametrelerin ortalaması ve standart sapması hesaplanır ve bu parametreler normal dağılıma göre modellenir. Dikkat edilmelidir ki, Johnson parametreleri hasar gerilmesinin [0.067, 0.309, 0.691, 0.933]'ne karşılık gelen CDF değerleridir.

Johnson parametreleri, kupon testi adetinin (n_c), eleman testi adetinin (n_e), ve hasar gerilmesi tahmini hatasının (e_{ef}), bir fonksiyonudur. Öncelikle, bu parametrelerin ortalama ve standart sapma değerleri için, n_c ve e_{ef} 'ye bağlı olmak üzere yanıt yüzey yaklaşımı kullanıldı. Toplam on adet, n_c ve e_{ef} 'ye bağlı yanıt yüzey (beş değer ortalama, beş değer standart sapma için) oluşturuldu. Bunun yanı sıra sayısal analizler, kupon testi adetinin Johnson parametreleri üstünde kayda değer bir etkiye sahip olmadığını ve hatanın etkisinin yalnızca Johnson parametrelerini ($1-e_{ef}$) terimiyle çarparak temsil edilebileceğini gösterdi. Farklı kupon testi adetleri ve farklı e_{ef} hata terimi değerleri için elde edilen Johnson parametreleri ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 6.1, 6.2, 6.3 ve 6.4'te verilmiştir.

Daha sonra belirtildiği gibi, Johnson parametrelerinin normal dağılıma sahip olduğu varsayıldı. Şekil 6.3; 200,000 örnekleme MCS döngüsünden elde edilen ortalama hasar gerilmesinin ($e_{ef} = 0$ iken üçüncü eleman testinden sonra 50 kupon testi için) birinci ve ikinci Johnson parametrelerinin histogramlarını göstermektedir. Parametrelerin tam olarak normal dağılım takip etmediği görülür.

Çizelge 6.1. 30 kupon testi uygulandığında, eleman testlerinden sonra ortalama hasar gerilmesinin Johnson parametrelerinin ortalama ve standart sapma değerleri.

	Parametrelerin ortalama değeri (Q_{1-4})				Parametrelerin standart sapması (Q_{1-4})			
	\bar{Q}_1	\bar{Q}_2	\bar{Q}_3	\bar{Q}_4	$std(Q_1)$	$std(Q_2)$	$std(Q_3)$	$std(Q_4)$
test1	0.899	0.968	1.049	1.145	0.073	0.077	0.084	0.094
test2	0.925	0.975	1.032	1.096	0.053	0.055	0.058	0.063
test3	0.937	0.979	1.025	1.076	0.044	0.045	0.047	0.051
test4	0.945	0.982	1.021	1.065	0.038	0.039	0.041	0.043
test5	0.950	0.983	1.019	1.057	0.035	0.036	0.037	0.039

Çizelge 6.2. 50 kupon testi uygulandığında, eleman testlerinden sonra ortalama hasar gerilmesinin Johnson parametrelerinin ortalama ve standart sapma değerleri

	Parametrelerin ortalama değeri (Q_{1-4})				Parametrelerin standart sapması (Q_{1-4})			
	\bar{Q}_1	\bar{Q}_2	\bar{Q}_3	\bar{Q}_4	$std(Q_1)$	$std(Q_2)$	$std(Q_3)$	$std(Q_4)$
test1	0.897	0.966	1.047	1.143	0.073	0.078	0.084	0.093
test2	0.924	0.975	1.032	1.095	0.053	0.055	0.058	0.063
test3	0.937	0.979	1.025	1.075	0.044	0.045	0.047	0.050
test4	0.944	0.981	1.021	1.064	0.038	0.039	0.041	0.043
test5	0.950	0.983	1.019	1.057	0.035	0.035	0.037	0.039

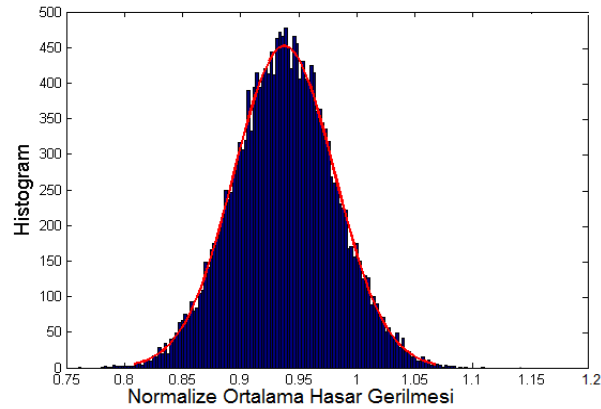
Çizelge 6.3. 80 kupon testi uygulandığında, eleman testlerinden sonra ortalama hasar gerilmesinin Johnson parametrelerinin ortalama ve standart sapma değerleri

	Parametrelerin ortalama değeri (Q_{1-4})				Parametrelerin standart sapması (Q_{1-4})			
	\bar{Q}_1	\bar{Q}_2	\bar{Q}_3	\bar{Q}_4	$std(Q_1)$	$std(Q_2)$	$std(Q_3)$	$std(Q_4)$
test1	0.898	0.967	1.049	1.144	0.071	0.076	0.083	0.091
test2	0.924	0.975	1.032	1.096	0.052	0.055	0.058	0.062
test3	0.937	0.979	1.025	1.076	0.043	0.045	0.047	0.050
test4	0.944	0.982	1.021	1.065	0.038	0.039	0.040	0.042
test5	0.950	0.983	1.019	1.057	0.034	0.035	0.036	0.038

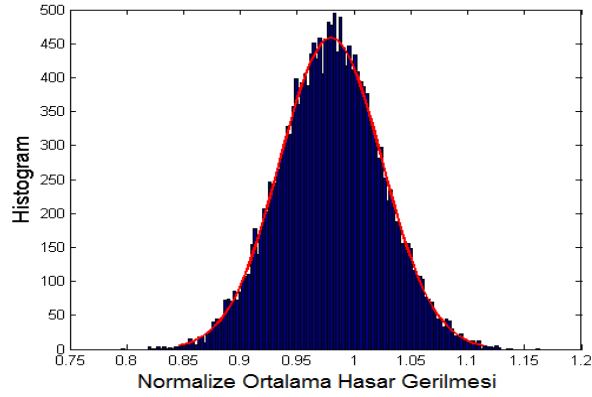
Çizelge 6.4. Hasar gerilmesi tahmini hatası e_{ef} 'ye sahip ortalama hasar gerilmesinin Johnson parametrelerinin ortalama değerinin ve sapmasının varyasyonu

e_{ef}	Parametrelerin ortalama değeri (Q_{1-4})				Parametrelerin standart sapması (Q_{1-4})			
	\bar{Q}_1	\bar{Q}_2	\bar{Q}_3	\bar{Q}_4	$std(Q_1)$	$std(Q_2)$	$std(Q_3)$	$std(Q_4)$
-0.10	0.835	0.881	0.923	0.968	0.039	0.041	0.043	0.045
-0.05	0.890	0.930	0.974	1.022	0.042	0.043	0.045	0.048
0	0.937	0.979	1.025	1.076	0.044	0.045	0.047	0.050
0.05	0.983	1.027	1.075	1.128	0.045	0.047	0.049	0.052
0.10	1.031	1.077	1.128	1.183	0.048	0.050	0.052	0.055

Bu ayrı MCS döngüsünden elde edilen sonuçlar ana MCS döngüsünde kullanılır. Johnson parametrelerinin ortalama ve standart sapma değerleri, ortalama hasar gerilmesine Johnson dağılımını uydurmak için kullanılır. Hata sınırları Johnson dağılımına uygulanır ve eleman testleri simüle edildiğinde bu dağılımdan rastgele değerler belirlenir. Ayrıca bu parametrelerin arasında ciddi bir korelasyon bulunmaktadır, dolayısıyla bu korelasyon Gaussian copula kullanılarak, MCS döngüsünde rastgele parametreler üretilme aşamasında analizde yerini almıştır. Gaussian copula kullanılarak, korelasyonlu değişkenleri olan güvenilirlik problemleri hesaplamalarının detayları kaynak [36]'da mevcuttur.



(a) birinci parametrenin histogramı



(b) ikinci parametrenin histogramı

Şekil 6.3. Ortalama hasar gerilmesinin birinci ve ikinci Johnson parametrelerinin histogramları (üçüncü eleman testinden 52 sonra). *Sürekli çizgiler normal dağılıma uydurulmasını göstermektedir.*

6.11. Sertifikasyon Testi

Bir yapısal parça; mukavemet, yükleme, genişlik, mücade edilir gerilme ve kalınlıktaki rastgele hatalarla üretildiğinde uçak sertifikasyon testinde başarısız olabilir. Hatırlanmalıdır ki; yapısal bir parça, geometrideki varyasyonlara bağlı olarak tam tasarlandığı gibi üretilemez. Dolayısıyla $w_{built-var}$ ve $t_{built-var}$ değerlerinin kesin değerleri, filodaki ortalama değerleri olan $w_{built-av}$ ve $t_{built-av}$ 'den varyasyona bağlı olarak farklılık gösterir. Daha sonra yapısal parça tasarım kuvveti olan S_F çarpı P_{calc} ile yüklenir. Eğer gerilme yapının hasar gerilmesini aşarsa, yapı başarısız olmuş demektir ve tasarım kabul edilemez. Aksi durumda parça kullanım için onaylanmıştır. Eğer aşağıdaki eşitsizlik sağlanıyorsa parça sertifikasyon testini geçer [12].

$$\sigma - \sigma_f = \frac{S_F P_{calc}}{(1 + v_t)(1 + v_w) A_{built-av}} - \sigma_f \leq 0 \quad (6.35)$$

Monte Carlo simülasyonunun prosedürü Çizelge (6.5)'te verilmiştir.

Çizelge 6.5. Hasar olasılığı hesaplaması için Monte Carlo simülasyonu prosedürü [12]

1. Kupon testleri sonuçlarını kullanarak mücade edilebilir gerilmeyi, σ_{ca} , hesapla
2. Elde edilen mücade edilebilir gerilmeyi kullanarak kullanarak panelin kesit alanını tasarla $A_{built-av-c} = (1 + e_{total}) \frac{S_F P_d}{k_f W_{design}} \frac{1}{\sigma_{ca}}$
3. Güncellenmiş ortalama hasar gerilmesinin Johnson parametreleri için rastgele sayılar üret.
4. Bu parametreleri kullanarak B tabanlı değeri hesapla, σ_{ea}
 - a. Ortalama hasar gerilmesi için sınırları hesapla $lb = \frac{1 - be_{ef} - 2c_f / \sqrt{n_c}}{(1 - e_{ef})}$ ve $ub = \frac{1 + be_{ef} + 2c_f / \sqrt{n_c}}{(1 - e_{ef})}$
 - b. Ortalama hasar gerilmesinin olasılık yoğunluk fonksiyonunu Johnson dağılımıyla adım 3'de bulunan parametreleri kullanarak hesapla ve $(\bar{\sigma}_{ef})_{calc}^{updated}$ sınırları içerisinde maksimum olasılık yoğunluk fonksiyonuna sahip değeri seç
 - c. B tabanlı değeri hesapla, $\sigma_{ea} = [1 - k_B (c_{ef})_{calc}] (\bar{\sigma}_{ef})_{calc}^{updated}$
5. B tabanlı değer için bir düzeltme faktörü hesapla $CF = \frac{\sigma_{ea}}{\sigma_{ca}}$. CF'nin limit değeri

- [0.9, 1.1] . Yani $CF < 0.9$ ise $CF = 0.9$ 'dur, eğer $CF > 1.1$ ise $CF = 1.1$ 'dir.
6. Panel kesit alanını CF değerini baz alarak revize et
- a. Eğer $CF < 0.98$, yeniden tasarım gereklidir. Panel kesit alanı CF ile artırılır. Yeni kesit alanı $A_{built-av} = \frac{1.01}{CF} A_{built-av-c}$. Burada 1.01 faktörü ikinci bir yeniden tasarımı engellemek için koyulmuştur.
- b. Eğer $0.98 \leq CF \leq 1.05$, ise yeniden tasarıma gerek yoktur. Panel kesit alanı $A_{built-av} = A_{built-av-c}$ olur.
- c. Eğer $CF > 1.05$ ise yeniden tasarım gereklidir. Yük taşıyan alan CF ile azaltılır. Yeni kesit alanı $A_{built-av} = \frac{1.01}{CF} A_{built-av-c}$ olur.
7. $A_{built-av}$ 'ı kullanarak, hasar ihtimalini (P_f) ve sertifikasyon testinde başarısız olma olasılığını hesapla($PFCT$).

7. MİNİMUM MALİYET VE MİNİMUM HASAR İHTİMALİ İÇİN OLASILIKSAL TASARIM

7.1. Giriş

Geleneksel güvenilirlik tabanlı optimizasyonda sadece tasarım aşamasındaki belirsizlikler güvenilirlik hesaplamasına dahil edilir [10,37]. Üretilen uçak tasarım sırasında öngörüldüğünden daha güvenlidir, çünkü tasarım sonrasında belirsizlikleri azaltacak yönde adımlar atılmaktadır. Dolayısıyla, üretilecek bir uçağın güvenilirliğini daha tasarım aşamasındayken doğru bir şekilde tahmin edebilmek için tasarım sonrasında uygulanacak olan belirsizlik azaltma mekanizmalarının etkilerinin göz önüne alınması gerekmektedir [20,37]. Daha da önemlisi, tasarım sonrası uygulanacak olan belirsizlik azaltma mekanizmalarını direkt olarak tasarıma entegre etmek avantajlı olacaktır. Bu çalışmada, uygulanması olası tüm bu belirsizlik azaltma mekanizmaları içerisinde sadece yapısal testler tasarıma entegre edilecek, maliyet ve güvenilirlik analizleri yapılacaktır.

Uçak yapısal tasarımında yapısal test adetleri halen tecrübeye dayanarak belirlenmektedir. Yeni bir uçak modeli tasarlanırken, yapılacak kupon testi veya eleman testi adetleri, önceki başarılı modellerdeki uygulamalar örnek alınarak belirlenmektedir. Ancak, yapısal testler oldukça maliyetli olduğundan, emniyeti tehlikeye atmaksızın test masraflarının azaltılması istenmektedir. Sezgisel olarak, eleman testi veya parça testi gibi pahalı testler daha az sayıda, kupon testi gibi ucuz testler daha fazla sayıda yapılabilir. Fakat, böyle bir karar vermeden önce, pahalı testlerin ve ucuz testlerin uçak emniyeti üzerindeki etkilerinin belirlenmesi gerekir. Bu da, ancak olasılıksal yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmada, yapısal testlerin yapısal emniyet üzerine etkileri Monte Carlo Simülasyonu (MCS) kullanılarak hesaplanmaktadır. Bir MCS döngüsü içinde, önce malzeme kupon testleri benzetimi yapılır (kupon testleri sınırlı sayıda olduğundan, test sonuçlarında belirsizlik olacaktır). Sonra, kupon testi sonuçları bir hasar teorisi dahilinde kullanılarak yapının ortalama mukavemeti hesaplanır. Kullanılan hasar teorisindeki olası hatalardan dolayı, ortalama mukavemet tahmini için bir başlangıç belirsizlik değeri belirlenir. Dolayısıyla; ortalama mukavemet değerinde hem kupon testlerinin sınırlı sayıda olmasından kaynaklı, hem de hasar kriterindeki olası hatalardan dolayı iki farklı belirsizlik vardır. Sonra, gelecekte yapılacak olan yapısal eleman testlerinin tüm olası sonuçları bir Bayes yaklaşımı dahilinde modellenir ve ortalama mukavemetteki belirsizlik güncellenir. Aynı zamanda, yapının mukavemetinin bir uçaktan diğerine olan varyasyonu da MCS benzetimi ile modellenir. Aynı şekilde, çalışma koşulları ve geometrideki belirsizlikler de modellenerek, uçak parçasının güvenilirliği hesaplanır. Böylelikle, yapısal testlerin emniyet üzerine etkileri belirlenebilir. Monte Carlo simülasyonunun ve belirsizliklerin modellenmesinin detayları Bölüm 4, 5 ve 6'da verilmiştir.

Testlerin yapısal emniyet üzerine etkileri belirlendikten sonra, uçak panelinin kalınlığının ve yapısal test adetlerinin minimum maliyet için optimizasyonu yapılır. Olasılıksal tasarım optimizasyonu probleminin çözümüne, MCS ile yapılan güvenilirlik hesaplamaları direkt olarak entegre edilirse, problemin çözümü uzun zaman alabilir. Bu sorunu çözmek için, panelin kesit alanı (yapısal ağırlık için vekil model) ve güvenilirlik indisi (hasar olasılığı için vekil model) için tasarım

değişkenleri cinsinden yanıt yüzeyler oluşturulmuştur. Bu yanıt yüzeyler, toplam maliyet (amaç fonksiyonu) ve hasar olasılığı (kısıt fonksiyonu) hesabında kullanılacaklardır. Bu tip modeller, yapısal tasarımda çalışan mühendisler için çok yararlı olacaklardır.

7.2. Tasarım Değişkenlerine Bağlı Olarak Yük Taşıyan Kesit Alanı Ve Güvenilirlik İndisi İçin Yanıt Yüzeylerin Oluşturulması

Olasılıksal tasarım optimizasyonu probleminin çözümüne, güvenilirlik hesaplamaları direkt olarak entegre edilirse, problemin çözümü uzun zaman alabilir. Bu sorunu çözmek için, kesit alanı (yapısal ağırlığın vekil modeli) ve güvenilirlik indisi (hasar olasılığının vekil modeli) için tasarım değişkenleri cinsinden ikinci derece polinomsal yanıt yüzeyler oluşturulmuştur. Panelin uzunluğu sabit kabul edilmiştir, dolayısıyla kesit alanı ve ağırlık lineer orantılıdır. Bu yanıt yüzeyler, toplam maliyet (amaç fonksiyonu) ve hasar olasılığı (kısıt fonksiyonu) hesabında kullanılacaklardır. Güvenilirlik indisi β ile hasar olasılığı P_f arasındaki bağıntı Denklem (3.9)'da verilmiştir. Denklem (7.1)'de, Φ standart normal dağılımın olasılık dağılım fonksiyonudur.

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (7.1)$$

Yanıt yüzeylerin girdilerinin (tasarım değişkenleri) alt ve üst limit değerleri Çizelge (7.1)'de verilmiştir. Bu limitler içinde, Latin Hypercube örnekleme kullanılarak 30 adet veri noktası oluşturulmuş ve bu noktalarda güvenilirlik analizi yapılmıştır. Güvenilirlik analizi (MCS tabanlı) kodundan, kesit alanı ve güvenilirlik indisi değerleri çıkarılmış ve bu iki yanıt için tasarım değişkenleri cinsinden yüzeyler oluşturulmuştur. Oluşturulan yanıt yüzeylerin doğruluk dereceleri, veri noktalarında yapılan çapraz doğrulama yöntemiyle hesaplanmıştır. Bu yöntem ile 30 adet veri noktasında, önce her bir nokta veri havuzundan geçici olarak silinmiş, bir yanıt yüzey oluşturulmuş ve bu yanıt yüzey ile silinen veri noktasında tahmin yapılmış ve hata hesaplanmıştır. Tüm veri noktaları için bu işlem yapıldıktan sonra, çapraz doğrulama hatalarının karekök ortalama hata karesi (KOHK), ortalama mutlak hata (OMH) ve maksimum mutlak hata (MMH) değerleri hesaplanmıştır. Bu hata

metrikleri hesaplanan yanıtın ortalama değeriyle karşılaştırıldığında, oluşturulan yanıt yüzeylerin yeterince doğru olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.1. Yanıt yüzeylerin girdilerinin (tasarım değişkenlerinin) alt ve üst limitleri

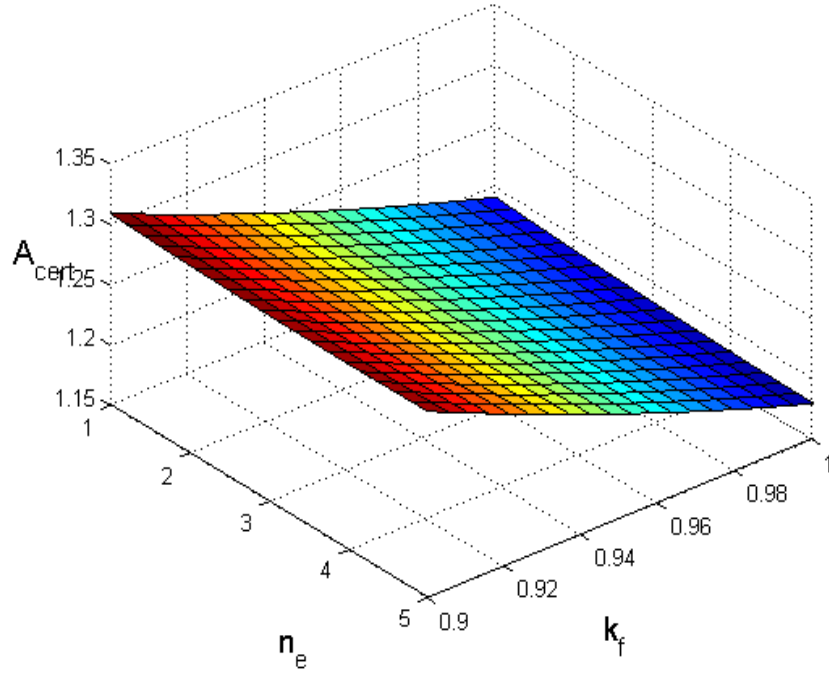
<i>Değişken</i>	k_f	n_c	n_e
Alt limit	0.90	30	1
Üst limit	1.00	80	5

Çizelge 7.2. Oluşturulan yanıt yüzey modellerinin çapraz doğrulama hatası ile doğruluk tespiti

<i>Yanıt</i>	<i>Ortalama değer</i>	$KOHK^{(a)}$	$OMH^{(b)}$	$MMH^{(c)}$
<i>Alan, A</i>	1.24	0.0015	0.0011	0.0041
<i>Güv. İndisi, β</i>	5.24	0.009	0.008	0.018

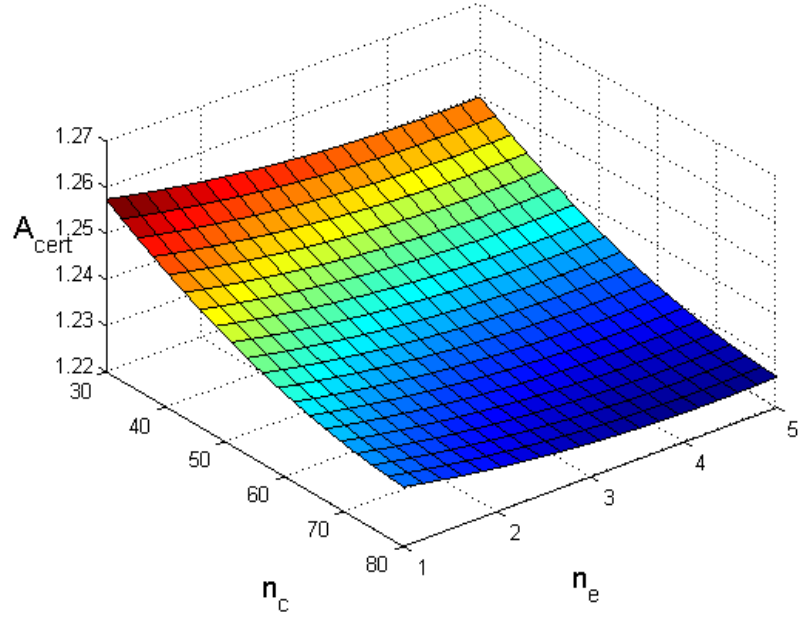
^(a) KOHK: karekök ortalama hata karesi; ^(b) OMH: ortalama mutlak hata; ^(c) MMH: maksimum mutlak hata

İncelenen problemde üç tasarım değişkeni olduğundan, değişkenlerin tümünü değiştirip yanıt yüzeylerin grafiksel gösterimini yapmak mümkün değildir. Bu yüzden, Şekil (7.1) ve (7.2)'de değişkenlerden biri nominal değerinden tutulup, yanıtların diğer iki değişkene göre değişimleri gösterilmiştir. Şekil (7.1) panelin kesit alanının azaltılması için tüm tasarım değişkenlerinin artırılması gerektiğini göstermektedir. Şekil (7.2) güvenilirliğin artırılması için k_f ve n_c 'nin azaltılması, n_e 'nin artırılması gerektiğini göstermektedir. Panel kesit alanının ve güvenilirlik indisinin k_f ile değişimleri lineere yakın, n_c ve n_e ile değişimleri ise lineerden uzaktır.

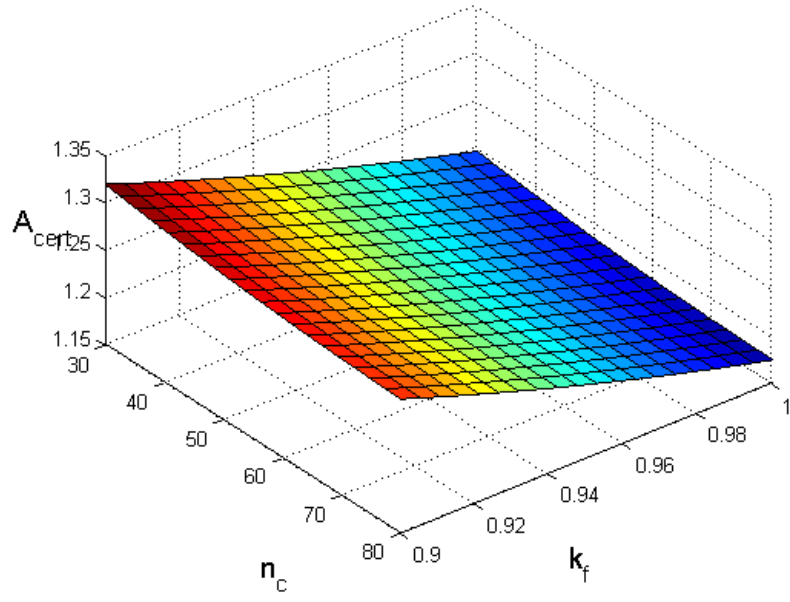


(a) $n_c=50$ için

Şekil 7.1. Panel kesit alanı için oluşturulan yanıt yüzeyler

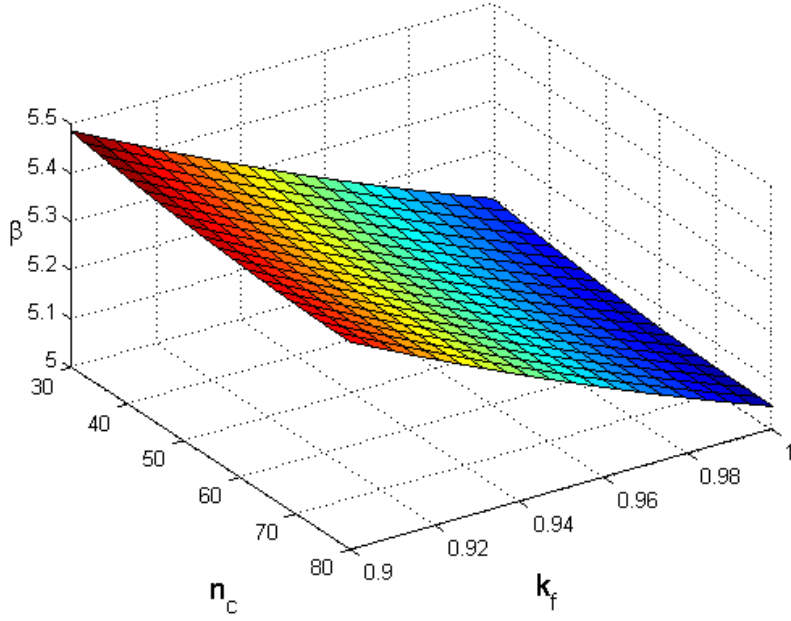


(b) $k_f=3$ için

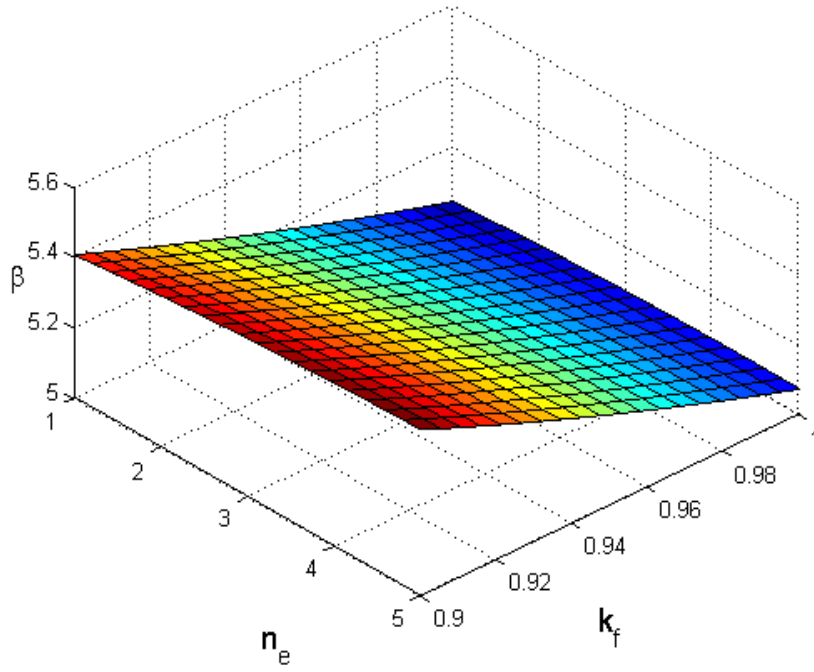


(c) $n_e=3$ için

Şekil 7.1. Devam. Panel kesit alanı için oluşturulan yanıt yüzeyler

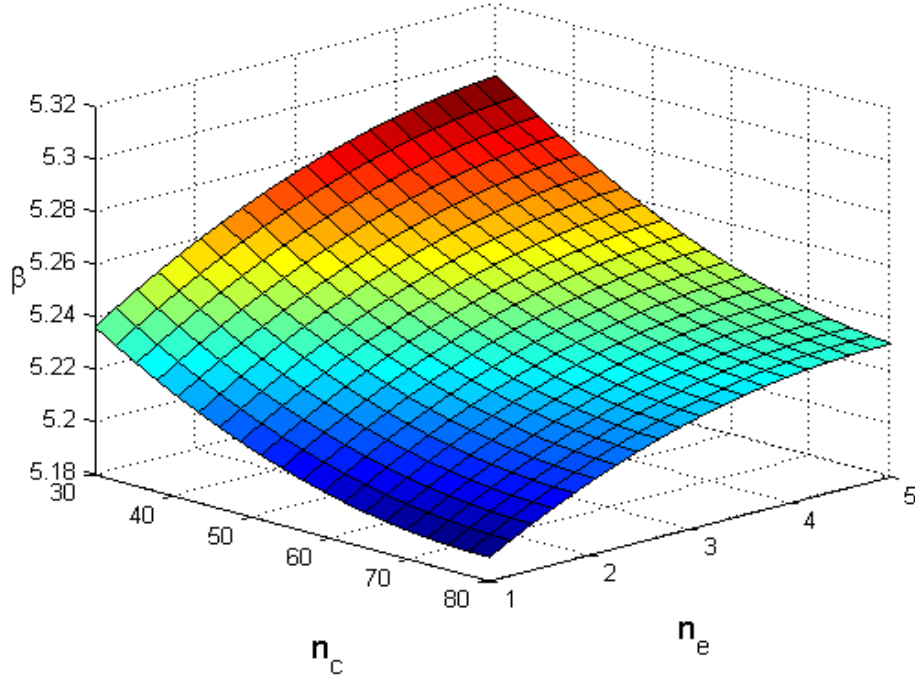


(a) $n_e = 3$ için



(b) $n_c = 50$ için

Şekil 7.2. Güvenilirlik indisi için oluşturulan yanıt yüzeyler



(c) $k_f = 50$ için

Şekil 7.2. Devam. Güvenilirlik indisi için oluşturulan yanıt yüzeyler

7.3. Minimum Maliyet İçin Eniyileştirme Probleminin Tanımlanması

Daha önce bahsedildiği üzere çalışmanın amacı güvenilirlik tabanlı tasarımın gelecek testleri de hesaba katarak hesaplanmasıdır. Takviyesiz uçak panelinin olasılıksal tasarımı için üç adet tasarım değişkeni belirlenmiştir: (1) uçak firması tarafından belirlenen mukavemet indirgeme faktörü (k_f), (2) malzeme kupon testi adeti (n_c), (3) yapısal eleman testi adeti (n_e). Toplam minimum maliyet (direct operating cost, DOC) için olasılıksal tasarım problemi, Denklem (7.2)'de verilen eniyileştirme problemi çözümlenerek gerçekleştirilebilir.

$$\text{Bul } k_f, n_c, n_e \quad (7.2a)$$

$$\text{Minimum } \text{DOC}(k_f, n_c, n_e) \quad (7.2b)$$

$$\text{Kısıt } P_f(k_f, n_c, n_e) \leq (P_f)_{nom} \quad (7.2c)$$

$$0.9 \leq k_f \leq 1.0, 30 \leq n_c \leq 80, 1 \leq n_e \leq 5 \quad (7.2d)$$

Burada, $(P_f)_{nom}$ tasarım değişkenlerinin nominal değerlerini aldıkları zaman (yani $k_f = 0.95$, $n_c = 50$, $n_e = 3$) elde edilen hasar olasılığı (P_f) değeridir. Toplam maliyet aşağıda açıklandığı gibi elde edilir.

Bu çalışmadaki maliyet modeli Kaufman vd. [15] çalışmasını esas almaktadır. Çalışmada optimal maliyet tabanlı tasarım, minimum ağırlık ve minimum üretim maliyeti arasındaki ilişkiyi incelemektedir. Toplam maliyet Denklemi (7.3)'teki gibidir.

$$\text{DOC} = C_{man} + p_0 W \quad (7.3)$$

Burada, C_{man} üretim maliyeti, p_0 ise ağırlık için penaltı parametresidir. Bu çalışmada, belirsizlik azaltma mekanizmaları da, C_{urm} (yapısal testler, kalite kontrol, bakım-onarım) maliyet formülasyonuna entegre edilmiştir Ayrıca, üretim maliyetleri de ağırlık penaltı parametresi içine katılmıştır. Toplam maliyet Denklem (7.4)'teki gibi olur.

$$\text{DOC} = pW + C_{urm} \quad (7.4)$$

Burada p , birim ağırlık tasarrufundan elde edilen maliyet kazancıdır. Çalışmada belirsizlik azaltma mekanizmalarından yapısal testlere odaklanıldığı için, C_{urm} ikiye ayrılabilir;

$$C_{urm} = C_{test} + C_{urm - other} \quad (7.5)$$

Burada C_{test} testlerin maliyeti, $C_{urm - other}$ da testler haricindeki belirsizlik azaltma mekanizmalarının maliyetidir. Çalışmada iki tip teste odaklanılmıştır; kupon testleri ve eleman testleri. Dolayısıyla C_{test} Denklem (7.6)'daki gibi ayrılabilir;

$$C_{test} = C_{coupon} + C_{elem} + C_{test - other} \quad (7.6)$$

C_{coupon} , kupon testlerinin maliyeti, C_{elem} , eleman testlerinin maliyeti, $C_{test-other}$, sertifikasyon testi, parça testi gibi testlerin maliyetidir.

Denklemler (7.3-7.6) birleştirildiğinde

$$DOC = pW + C_{coupon} + C_{elem} + C_{other} \quad (7.7)$$

Burada

$$C_{other} = C_{urm - other} + C_{test - other} + C_{labor} \quad (7.8)$$

Son olarak toplam minimum maliyet (DOC) fonksiyonu Denklem (7.9)'daki gibi yazılabilir;

$$DOC(k_f, n_c, n_e) = pW(k_f, n_c, n_e) + C_{coupon}(n_c) + C_{elem}(n_e) + C_{other} \quad (7.9)$$

Burada W , yapısal ağırlık, p yapısal ağırlığın birim maliyeti, C_{coupon} kupon testi maliyeti, C_{elem} eleman testi maliyeti ve C_{other} da bunların dışında kalan maliyetlerdir. C_{other} terimi tasarım değişkenlerine bağlı olmadığı için eniyileştirme problemini etkilemez yani formülasyondan çıkarılabilir.

7.3.1. Yapısal ağırlığın birim maliyeti

Uçağın yapısal ağırlığının bir birim azaltılması ile elde edilecek toplam maliyet kazancı üzerine literatürde birçok çalışma mevcuttur. Curran vd. [14] uçaktan bir birim ağırlık azaltılmasının mali değerinin 300 \$/kg olduğunu belirtmiştir. Kim vd. [38] ABD Ulusal Malzeme Danışma Kurulu'nun yaptığı bir çalışmaya [39] atıfta bulunmuştur. Bahsedilen bu çalışmada, bir sivil uçaktan 1 lb. ağırlık azalmasının 200 \$'lık bir kazanç getirdiği belirtilmiştir. Kale [40] uçak birim yapısal ağırlığını 0.015 \$/uçuş olarak kullanmıştır. Bir sivil uçağın ortalama kullanım ömrü 40,000 uçuş varsayılırsa, birim yapısal ağırlık azalması 600 \$'lık bir kazanç getirir. Ancak, yukarıda bahsedilen çalışmalarda elde edilen birim maliyetler birbirinden farklıdır. Aynı zamanda yakıt fiyatları da sürekli değişmektedir. Bu çalışmada, yapısal ağırlık birim maliyeti 500 TL/kg ila 2000 TL/kg arasında değiştirilecek ve sonuçlara etkisi irdelenecektir.

Bu çalışmada, yapısal ağırlığı 25 ton olan bir sivil uçak tasarımı problemi düşünülmüştür. Yapısal test maliyetleri bir uçak filosundaki tüm uçaklara paylaştırılmalıdır. Bu yüzden, eldeki eniyileştirme probleminin amaç fonksiyonundaki yapısal ağırlık, tüm filonun ağırlığıdır. Dolayısıyla, Denklem (7.10)'daki yapısal ağırlık terimi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$W(k_f, n_c, n_e) = \frac{A(k_f, n_c, n_e)}{A_{nom}} \times N_a \times 25,000 \quad (\text{kg}) \quad (7.10)$$

Burada, $A(k_f, n_c, n_e)$ yapısal panelin kesit alanı, A_{nom} tasarım değişkenleri nominal değerlerini aldıkları durumdaki kesit alanı, N_a filodaki uçak sayısıdır. Bu çalışmada, bir uçak firmasının tipik bir sivil uçak üretim bandında $N_a=1,000$ adet uçak bulunduğu varsayılmıştır.

7.3.2 Test maliyetleri

Malzeme kupon ve yapısal eleman testlerinin nominal maliyetleri [34] Denklem (7.11) ve (7.12)'deki gibidir. Çalışmada kupon testinin nominal adeti 50, eleman testinin nominal adeti 3 alınmıştır [34]. Bir malzeme için bir adet kupon testinin maliyeti 500 TL, bir yapısal eleman için bir adet eleman testinin maliyeti 200,000 TL alınmıştır. Bu durumda, kupon ve eleman testleri maliyetleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$C_c(n_c) = 500 \times N_{mat} \times n_c \quad (\text{TL}) \quad (7.11)$$

$$C_e(n_e) = 200,000 \times N_{elem} \times n_e \quad (\text{TL}) \quad (7.12)$$

Burada, N_{mat} bir uçak modeli için test edilmesi gereken malzeme adeti, N_{elem} test edilmesi gereken yapısal eleman tipi adetidir. Bu çalışmada, $N_{mat}=80$ ve $N_{elem}=100$ olarak alınmıştır.

Eğer tasarım değişkenleri nominal değerlerini alırsa ve $p=500$ TL/kg ise, maliyet

$$\text{DOC} = 500 \times 1,000 \times 25,000 + 500 \times 80 \times 50 + 200,000 \times 100 \times 3 = [12,500 + 2 + 60] \times 10^6 \quad \text{TL} \quad (7.13)$$

olarak belirlenir. Denklem (7.13)'e göre, k_f ve n_c nominal değerlerinde kaldığı durum için; eğer yapısal eleman testi adeti (n_e) 3'ten 4'e çıkarılır ve yapısal ağırlık %0.2 veya daha fazla azaltılabilirse, test adetinin artırılması kazançlıdır. Çünkü, n_e 'nin 3'ten 4'e çıkarılması maliyeti 20 milyon TL artırırken, yapısal ağırlığın %0.2 (veya daha fazla) azaltılması maliyeti 22.5 milyon TL (veya daha fazla) azaltacaktır. Daha detaylı incelemeler Bölüm (7.4)'te yapılacaktır.

7.4 Minimum Maliyet İçin Güvenilirlik Tabanlı Tasarımın Tek Değişkene Bağlı Olarak Çözümü

7.4.1. Malzeme kupon testi adetinin sonuçlara etkisi

Denklem (7.1)'de verilen üç değişkenli eniyileştirme problemini çözmeden önce, problemin tek değişkenli versiyonlarını inceleyelim. Malzeme kupon testi adetinin sonuçlara etkisini incelemek için, eleman testi adetinin $n_e=3$ nominal değerinde sabit tutulduğunu düşünelim. Bu durumda, Denklem (7.2)'de verilen eniyileştirme probleminin çözümü, belirlenen bir n_c değeri için k_f 'nin $P_f=(P_f)_{\text{nom}}$ eşitliğini sağlayacak değerinin bulunması ve buna karşılık gelen kesit alanının hesaplanmasına indirgenir. Çizelge (7.3)'te farklı n_c değerleri için elde edilen bulgular verilmiştir. Eğer kupon test adeti 50'den 30'a indirilirse, aynı güvenilirlik değeri için panelin kesit alanı %0.28 artırılmalıdır. Ancak, eğer kupon test adeti 50'den 80'e çıkarılırsa, güvenlikten ödün vermeden panelin kesit alanı %0.24 azaltılabilir.

Kupon testi adetinin 50'den 80'a artırılması toplam maliyeti $\Delta C = 500 \times 80 \times (\Delta n_c = 30) = 1.2$ milyon TL artırır. Ancak, %0.24 ağırlık azalması toplam maliyeti $\Delta C = \%0.24 \times (500 \times 1,000 \times 25,000) = 30$ milyon TL azaltır (burada, $p=500$ TL/kg alınmıştır). Bu durumda, güvenilirlikten ödün vermeksizin minimum maliyet için kupon testi adeti $n_c=80$ olmalıdır.

Çizelge 7.3. Malzeme kupon testi adetinin sonuçlara etkisi.

n_c	k_f	A	$\% \Delta A$	$P_f (\times 10^{-7})$
30	0.9587	1.2402	0.28	0.796
50	0.9500	1.2368	---	0.796
80	0.9446	1.2338	-0.24	0.796

7.4.2. Eleman testi adetinin sonuçlara etkisi

Bu bölümde, malzeme kupon testi için yapılan analizin (Bölüm 7.4.1) benzeri kupon testi adetinin $n_c=50$ nominal değerinde sabit tutulup, yapısal eleman testi için yapılmıştır. Çizelge 7.4'te farklı n_c değerleri için elde edilen bulgular verilmiştir. Eğer sadece bir adet eleman testi yapmak isteniyorsa, panelin ağırlığı %1.43 artırılmalıdır. İki adet eleman testinden kurtulmak toplam maliyeti $\Delta C=200,000 \times 100 \times (\Delta n_c=2) = 40$ milyon TL azaltır, ancak %1.43'lük ağırlık artışı toplam maliyeti $\Delta C=\%1.43 \times (500 \times 1,000 \times 25,000) = 178.75$ milyon TL artırır (burada, $p=500$ TL/kg alınmıştır). Dolayısıyla, yapısal eleman testi adetinin azaltılması iyi bir fikir değildir. Eğer eleman testi adeti 3'ten 4'e çıkarılırsa, panelin ağırlığı %0.34 azaltılabilir. Fazladan bir adet eleman testi yapılması toplam maliyeti $\Delta C=200,000 \times 100 \times (\Delta n_c=1)= 20$ milyon TL artırır, ancak %0.34'lük ağırlık azalması toplam maliyeti $\Delta C=\%0.34 \times (500 \times 1,000 \times 25,000) = 42.5$ milyon TL azaltır (burada, $p=500$ TL/kg alınmıştır). Dolayısıyla, yapısal eleman testi adetinin 3'ten 4'e artırılması iyi bir fikirdir.

Eleman testi adetinin 4'ten 5'e çıkarılması durumunda, yapısal ağırlık ekstradan $\%0.45-\%0.34=\%0.11$ azaltılabilir. Bu durumda, toplam maliyet $\Delta C=\%0.11 \times (500 \times 1,000 \times 25,000)= 13.75$ milyon TL azaltılabilir. Ancak, fazladan bir adet eleman testi maliyeti 20 milyon TL artırdığı için, eleman testi adetini 5'e çıkarmak kazançlı değildir.

Yukarıdaki çıkarımlar birim ağırlık parametresinin değerine bağlıdır. Örneğin, eğer $p=500$ TL/kg yerine $p=1,000$ TL/kg olursa, toplam maliyet $\Delta C=\%0.11 \times (1,000 \times 1,000 \times 25,000)= 27.5$ milyon TL azaltılabilir. Bu durumda ise, eleman testi adetini 5'e çıkarmak kazançlıdır.

Çizelge 7.4. Yapısal eleman testi adetinin sonuçlara etkisi.

n_e	k_f	A	$\% \Delta A$	$P_f (\times 10^{-7})$
1	0.9403	1.2545	1.43	0.796
2	0.9460	1.2441	0.59	0.796
3	0.9500	1.2368	---	0.796
4	0.9525	1.2325	-0.34	0.796
5	0.9535	1.2313	-0.45	0.796

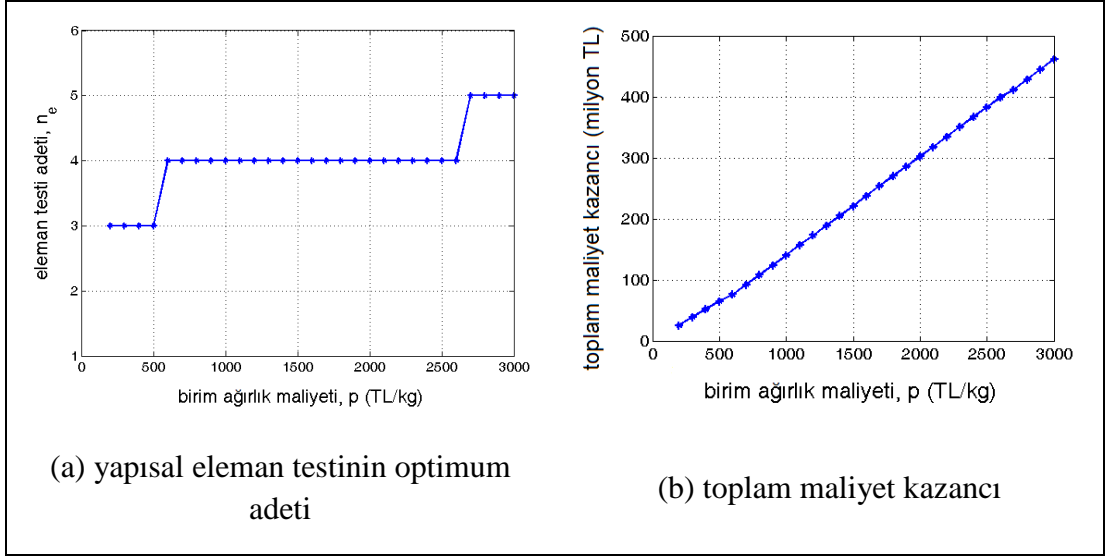
7.5. Minimum Maliyet İçin Güvenilirlik Tabanlı Tasarımın Eniyileştirilmesi ve Bulguları

Oluşturulan yanıt yüzeyler kullanılarak, Denklem (7.2)'de verilen eniyileştirme problemi MATLAB® programının R2007b versiyonunun *fmincon* fonksiyonu kullanılarak çözülmüştür[41]. Bahsedilen eniyileştirme problemi farklı birim ağırlık maliyeti değerleri kullanılarak çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Çizelge (7.5)'te verilmiştir. Çizelge (7.5)'te görüldüğü gibi, kupon testinin optimum adeti 80 olarak bulunmuştur ve bu değer birim ağırlık maliyetinden (ilgilendiğimiz aralık için) bağımsızdır. Bunun nedeni, kupon testlerinin maliyetinin çok düşük olmasıdır. Kupon testi adetinin artırılması yapısal güvenilirliği artırmaktadır. Bu artış, yapısal güvenilirlik aynı seviyede tutulup, ağırlık azalması ile takas edilebilir. Bu takas sonrası elde edilen kazanç, kupon testinin maliyeti yanında çok daha fazladır. Aynı şekilde, uçak firması tarafından belirlenen mukavemet indirgeme faktörü k_f 'nin de birim ağırlık maliyetinden (ilgilendiğimiz aralık için) bağımsız olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge (7.5) göstermektedir ki birim ağırlık maliyeti, yapısal eleman testinin optimum adetini ve toplam maliyet kazancını etkilemektedir. Birim ağırlık maliyeti arttıkça, gerek yapısal eleman testinin optimum adeti gerekse toplam maliyet kazancı artmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, grafiksel olarak da Şekil (7.3)'te sunulmuştur.

Çizelge 7.5. Farklı birim ağırlık parametresi değeri kullanılarak elde edilen eniyileştirme sonuçları ($P_f=7.96e-8$).

	k_f	n_c	n_e	W (ton)	$p W$ (M.TL)	C_c (M.TL)	C_e (M.TL)	DOC (M.TL)	Maliyet Kazancı (M.TL)
$p = 500$ TL/kg									
Nominal	0.9500	50	3	25.00	12,500	2.0	60	12,562	59
Optimum	0.9470	80	4	24.84	12,420	3.2	80	12,503	
$p = 1000$ TL/kg									
Nominal	0.9500	50	3	25.00	25,000	2.0	60	25,062	140
Optimum	0.9470	80	4	24.84	24,838	3.2	80	24,922	
$p = 2000$ TL/kg									
Nominal	0.9500	50	3	25.00	50,020	2.0	60	50,064	297
Optimum	0.9470	80	5	24.84	49,663	3.2	100	49,767	



Şekil 7.3. Birim ağırlık maliyetinin yapısal eleman testinin optimum adeti ve toplam maliyet kazancı üzerine etkisi

7.6. Minimum Hasar İhtimali İçin Güvenilirlik Tabanlı Tasarımın Optimizasyonu ve Bulguları

7.6.1. Minimum hasar ihtimali için eniyileştirme probleminin tanımlanması

$$\text{Bul } k_f, n_c, n_e \quad (7.14a)$$

$$\text{Minimum } P_f(k_f, n_c, n_e) \quad (7.14b)$$

$$\text{Kısıt } DOC(k_f, n_c, n_e) \leq DOC_{nom} \quad (7.14c)$$

$$0.9 \leq k_f \leq 1.0, \quad 30 \leq n_c \leq 80, \quad 1 \leq n_e \leq 5 \quad (7.14d)$$

Denklem (7.14)'te minimum hasar gerilmesi için eniyileştirme probleminin tanımı verilmiştir. Burada kısıt Burada, DOC_{nom} tasarım değişkenlerinin nominal değerlerini aldıkları zaman (yani $k_f = 0.95$, $n_c = 50$, $n_e = 3$) elde edilen hasar olasılığı (DOC) değeridir. Örneğin $p = 500$ iken DOC_{nom} Denklem (7.15)'teki gibi bulunur.

$$DOC_{nom} = 500 \times 1,000 \times 25,000 + 500 \times 80 \times 50 + 200,000 \times 100 \times 3 = [12,500 + 2 + 60] \times 10^6 \quad (7.15)$$

Toplam minimum maliyet DOC, birim ağırlık maliyetine p , bağlı olduğu için her birim ağırlık maliyeti için çözülen eniyileştirme probleminde DOC_{nom} değişir.

Hasar ihtimali için oluşturulan yanıt yüzey güvenilirlik indeksi β , cinsinden olduğu için eniyileştirme problemi Denklem (7.16)'daki gibi olur.

$$\text{Bul } k_f, n_c, n_e \quad (7.16a)$$

$$\text{Maksimum } \beta(k_f, n_c, n_e) \quad (7.16b)$$

$$\text{Kısıt } DOC(k_f, n_c, n_e) \leq DOC_{nom} \quad (7.16c)$$

$$0.9 \leq k_f \leq 1.0, 30 \leq n_c \leq 80, 1 \leq n_e \leq 5 \quad (7.16d)$$

7.6.2. Minimum hasar ihtimali için eniyileştirme probleminin tek değişkene bağlı olarak çözümü

Denklem (7.16)'da verilen üç değişkenli eniyileştirme problemini çözmeden önce, problemin tek değişkenli versiyonları incelenmiştir. Malzeme kupon testi adetinin sonuçlara etkisini incelemek için öncelikle eleman testi adeti $n_c=3$ nominal değerinde sabit tutulmuştur. Çizelge (7.6)'da toplam minimum maliyet sabit tutularak, kupon testi adeti sayısı değiştirilerek hasar ihtimaline olan etkisi incelenmiştir. Kupon testi adeti 50'den 30'a azaltılırsa hasar ihtimali %0.924 artar. Kupon testi adeti 50'den 80'e artırılırsa hasar ihtimali %6.497 azalır. Bu durumda toplam minimum maliyet DOC, sabit tutulduğuna göre 80 kupon testi uygulayarak güvenilirliği daha yüksek seviyede tutmak mantıklıdır. Çizelgedeki mukavemet indirgeme faktörlerine bakıldığında FAA yönetmeliğinin ihlal edilmediği görülmüştür.

Çizelge (7.7)'de $p=2000\text{TL/kg}$ için toplam minimum maliyet DOC, sabit tutularak kupon testi adeti değiştirilerek güvenilirliğe etkisi incelenmiştir. Kupon testi adeti 50'den 80'e çıkarıldığında maliyetten ödün vermeksizin güvenilirlik %6.609 artmaktadır. Bu durumda 80 adet kupon testi uygulamak birim ağırlık maliyetinden p , bağımsız olmak üzere her zaman mantıklıdır.

Çizelge 7.6. Malzeme kupon testi adetinin sonuçlara etkisi.

n_c	k_f	Güvenilirlik İndeksi	Hasar İhtimali, $P_f(x10^{-8})$	% ΔP_f	DOC($\times 10^6$)
30	0.9600	5.240	8.02	-0.9	12.562
50	0.9500	5.241	7.96	---	12.562
80	0.9417	5.253	7.46	6.4	12.562

$p=500\text{TL/kg}$. $n_e=3$. Çizelgedeki tüm k_f değerleri 1.0'den küçüktür, dolayısıyla FAA kuralları ihlal edilmemiştir.

Çizelge 7.7. Malzeme kupon testi adetinin sonuçlara etkisi.

n_c	k_f	Güvenilirlik İndeksi	Hasar İhtimali, $P_f(x10^{-8})$	% ΔP_f	DOC($\times 10^6$)
30	0.9601	5.239	8.03	-1.1	50.064
50	0.9500	5.241	7.96	---	50.064
80	0.9415	5.254	7.42	6.6	50.064

$p=2000\text{TL/kg}$. $n_e=3$. Çizelgedeki tüm k_f değerleri 1.0'den küçüktür, dolayısıyla FAA kuralları ihlal edilmemiştir.

Çizelge (7.8)'de kupon testi adeti $n_c=50$ nominal değerinde sabit tutularak eleman testinin etkisi araştırılmıştır. Toplam minimum maliyet DOC, $p=500\text{TL/kg}$ 'da sabit tutularak eleman testi adetinin değeri değiştirilerek hasar ihtimaline etkisi incelenmiştir. Eleman testi adeti üçten bire indirildiğinde güvenilirlik %28.809 azalır, iki eleman testi uygulandığında güvenilirlik %10.171 azalır. Eleman testi adeti üçten dörde çıkarıldığında güvenilirlik %3.517 artarken, eleman testi adeti beşe çıkarıldığında güvenilirlik %1.293 artar. Bu durumda toplam minimum maliyet sabit olduğuna göre dört adet eleman testi uygulamak en mantıklı seçimdir. Yalnız bu durum $p=500\text{TL/kg}$ için geçerlidir.

Çizelge (7.9)'da birim ağırlık maliyeti $p=2000\text{TL/kg}$ alınarak, eleman testi adetinin etkisi incelenmiştir. Eleman testi adetini üçten dörde çıkarmak güvenilirliği %5.896 artırırken, beşe çıkarmak güvenilirliği %6.152 arttırır. $p=500\text{TL/kg}$ iken dört adet eleman testi uygulamak mantıklıyken, $p=2000\text{TL/kg}$ iken beş adet eleman testi uygulamak mantıklıdır. Yani eleman testi adeti birim ağırlık maliyetine bağlıdır.

Çizelge 7.8. Yapısal eleman testi adetinin sonuçlara etkisi.

n_e	k_f	Güvenilirlik İndeksi	Hasar İhtimali, $P_f(x10^{-8})$	% ΔP_f	DOC($\times 10^6$)
1	0.9514	5.195	10.23	-28.8	12.562
2	0.9503	5.224	8.75	-10.1	12.562
3	0.9500	5.241	7.96	---	12.562
4	0.9506	5.248	7.66	3.5	12.562
5	0.9519	5.244	7.84	1.2	12.562

$p=500TL/kg$. $n_c=50$. Çizelgedeki tüm k_f değerleri 1.0'den küçüktür, dolayısıyla FAA kuralları ihlal edilmemiştir.

Çizelge 7.9. Yapısal eleman testi adetinin sonuçlara etkisi.

n_e	k_f	Güvenilirlik İndeksi	Hasar İhtimali, $P_f(x10^{-8})$	% ΔP_f	DOC($\times 10^6$)
1	0.9539	5.185	10.75	-35.3	50.064
2	0.9516	5.219	8.98	-13.1	50.064
3	0.9500	5.241	7.96	---	50.064
4	0.9494	5.253	7.47	5.8	50.064
5	0.9495	5.253	7.45	6.1	50.064

$p=2000TL/kg$. $n_c=50$. Çizelgedeki tüm k_f değerleri 1.0'den küçüktür, dolayısıyla FAA kuralları ihlal edilmemiştir.

7.6.3. Minimum hasar ihtimali için eniyileştirme

Denklem (7.16)'da verilen eniyileştirme probleminin MATLAB® programının R2007b versiyonunun $fmincon$ fonksiyonuyla çözülmesi için Denklem (7.17)'deki hale getirilir[41].

$$\text{Bul } k_f, n_c, n_e \quad (7.17a)$$

$$\text{Minimum } -\beta(k_f, n_c, n_e) \quad (7.17b)$$

$$\text{Kısıt } \text{DOC}(k_f, n_c, n_e) \leq \text{DOC}_{nom} \quad (7.17c)$$

$$0.9 \leq k_f \leq 1.0, 30 \leq n_c \leq 80, 1 \leq n_e \leq 5 \quad (7.17d)$$

Eniyileştirme problemi farklı birim ağırlık maliyetleri kullanılarak çözülmüştür. Çizelge (8.9)'da görüldüğü üzere, birim ağırlık maliyetinden bağımsız olmak üzere kupon testi adeti 80 olarak bulunmuştur. Eleman testi adetinin optimal değeri birim ağırlık maliyetine maliyeti bağlı olmak üzere 4 veya 5 değerini almaktadır. Kupon testi ve eleman testi adeti optimal çözümde nominal değere göre arttığı için, toplam minimum maliyet kısıtını sağlayabilmek için, mukavemet indirgeme faktörü nominal değerden aşağıya düşmüştür. Minimum hasar için eniyileştirme sonuçlarının, minimum maliyet için elde edilen eniyileştirme sonuçlarını desteklediği görülmüştür.

Çizelge 7.10. Farklı birim ağırlık parametresi değeri kullanılarak elde edilen eniyileştirme sonuçları (*Toplam Minimum Maliyet* $DOC=12.562 \times 10^6$, $p=500$ TL/kg için).

	k_f	n_c	n_e	Güv. İndeksi, β	Hasar İhtimali, $P_f(x10^{-8})$	$\% \Delta P_f$
$p = 500$TL/kg						
Nominal	0.9500	50	3	5.241	7.94	9.4
Optimum	0.9420	80	4	5.260	7.19	
$p = 1000$TL/kg						
Nominal	0.9500	50	3	5.241	7.94	11.4
Optimum	0.9410	80	4	5.264	7.04	
$p = 2000$TL/kg						
Nominal	0.9500	50	3	5.241	7.94	11.2
Optimum	0.9410	80	5	5.263	7.05	

8. SONUÇLAR

8.1 Tartışma

Birçok olasılıksal yapısal tasarım çalışmasında, belirsizliklerin olasılıksal karakteristikleri önceden belirlenir ve eldeki kaynaklar belirsizliklere karşı da korunacak şekilde eniyi düzeyde harcanır. Bunun yerine, eldeki kaynaklar belirsizlikleri azaltma amacıyla harcanabilir ve bu şekilde yapıların emniyeti korunabilir. Yapısal tasarımda belirsizlikleri azaltmanın birçok yolu vardır: yapısal testler, bakım/onarım çalışmaları, sağlık denetimi, vs. Bu çalışmada, yapısal testler üzerinde yoğunlaşmıştır. Esas olarak, gelecekte yapılacak testlerin toplam ömür devri maliyeti en aza indirecek şekilde planlanması (yani test adetlerinin belirlenmesi) amaçlanmıştır.

Uygulama problemi olarak, bir takviyesiz uçak panelinin tasarımı ele alınmış ve yapılması gereken malzeme kupon testlerinin ve yapısal eleman testlerinin adetleri belirlenmiştir. Takviyesiz panelin statik yükleme altında tasarımı yapılmış, diğer hasar mekanizmaları (yorulma, korozyon gibi) göz önüne alınmamıştır. Belirsizliklerden koruma amaçlı olarak, yük için 1.5 emniyet faktörü ve malzeme özellikleri için de müsaade edilebilir değerler kullanılmıştır. Yedekleme gibi emniyet tedbirleri göz önüne alınmamıştır. Bütün bu varsayımlar altında, yapısal testlerin uçak güvenilirliğine etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Kupon testi adeti nominal değeri olan 50'den 80'e çıkarılırsa, hasar ihtimalini sabit tutarak ağırlık %0.24 azaltılabilir.
- Eleman testi adeti nominal değeri olan dörtten beşe çıkarıldığında, hasar ihtimali sabit tutularak yapısal ağırlık %0.34 azaltılabilir.

Olasılıksal yapısal tasarım eniyileştirme problemi farklı birim ağırlık maliyeti değerleri kullanılarak çözülmüş ve optimum yapısal ağırlığın, optimum test adetlerinin ve toplam maliyetin birim ağırlık maliyetine olan etkileri irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

- Optimum kupon testi adeti 80 olarak bulunmuş ve birim ağırlık maliyetinden bağımsız olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni de, kupon testlerinin maliyetinin çok düşük olması olarak yorumlanmıştır. Kupon testi adetinin

artırılması yapısal güvenilirliği artırmaktadır. Bu artış, yapısal güvenilirlik aynı seviyede tutulup, ağırlık azalması ile takas edilebilir. Bu takas sonrası elde edilen kazanç, kupon testinin maliyeti yanında çok daha fazladır.

- Aynı şekilde, uçak firması tarafından belirlenen mukavemet indirgeme faktörü k_f 'nin de birim ağırlık maliyetinden (ilgilendiğimiz aralık için) bağımsız olduğu gözlemlenmiştir.
- Birim ağırlık maliyeti arttıkça, gerek eleman testinin optimum adetinin gerekse toplam maliyet kazancının arttığı gözlemlenmiştir.

Aynı tasarım problemi hasar ihtimalini minimize edecek şekilde farklı birim ağırlık maliyetleri için çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Kupon testi adedinin nominal değeri 80'dir ve birim ağırlık maliyetinden bağımsızdır.
- Eleman testi adedinin optimal değeri 4 veya 5 olarak değişmektedir ve birim ağırlık maliyetiyle doğru orantılı olarak artmaktadır.
- Mukavemet indirgeme faktörü birim ağırlık maliyetinden bağımsızdır.
- Optimal tabloda, toplam minimum maliyet kısıtını, kupon testi adeti 80 ve eleman testi adeti 4 veya 5 iken sağlayabilmek için mukavemet indirgeme faktörü k_f , 0.95'in altında değerler almış ancak FAA kuralları ihlal edilmemiştir.

Her iki tasarım probleminden, minimum hasar ihtimali ve minimum maliyet, elde edilen eniyi sonuçlar birbirini desteklemektedir.

8.2 Sonuçlar ve İleriye Yönelik Çalışmalar

Yeni bir uçak modeli tasarlanırken, uçak firmaları yapılması gereken kupon ve eleman testi adetlerini mevcut uygulamaları örnek alarak yapmaktadırlar. Mantık olarak kupon testlerinin maliyeti az olduğu için çok yapmak, eleman testlerinin maliyeti yüksek olduğu için az yapmak uygundur. Yapılan çalışmayla yeni bir uçak modeli tasarlanırken yapılması gereken yapısal eleman testi adetlerinin sayısının toplam maliyeti veya hasar ihtimalini azaltacak şekilde nasıl belirlenebileceği ortaya koyulmuştur. Bunun yanı sıra yapılan çalışmayla bir uçak firması belirli bir hasar ihtimalinin üstüne çıkmadan üretmesi gereken uçak yapı kalınlığını veya ürettiği

kalınlık için hasar ihtimalini hesaplayabilmektedir. Aynı şekilde belirli bir maliyet için uygulanan kupon testleri ve eleman testleri adetiyle mevcut hasar ihtimalini hesaplayabilmektedir. Problemin farklı versiyonlarda çözümleri uçak firmaları için faydalı olacaktır. Bu çalışmanın devamında takviyesiz panel yerine takviyeli panel için olasılıksal tasarım gerçekleştirilebilir, toplam maliyeti veya hasar ihtimalini minimize edecek şekilde yapısal eleman testi adetleri belirlenebilir. Aynı zamanda emniyet tedbirlerinden yalnızca yapısal eleman testleri değil yedekleme de göz önüne alınabilir. Problem karmaşıktırılarak uçak yapılarının tasarımının mevcut uygulamaları için daha kullanışlı hale getirilebilir.