

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI**

**YAPILARIN GÜVENİLİRLİK ANALİZİ İÇİN BİR YAKLAŞIM:  
GELİŞTİRİLMİŞ YANIT YÜZEYİ YÖNTEMİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Hasan Basri BAŞAĞA**

**HAZİRAN 2009  
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI

YAPILARIN GÜVENİLİRLİK ANALİZİ İÇİN BİR YAKLAŞIM:  
GELİŞTİRİLMİŞ YANIT YÜZEYİ YÖNTEMİ

Yük. İnş. Müh. Hasan Basri BAŞAĞA

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“Doktor (İnşaat Mühendisliği)”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27.05.2009  
Tezin Savunma Tarihi : 09.06.2009

Tez Danışma : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Metin HÜSEM

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Levent GÜMÜŞEL

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Metin AYDOĞAN

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2009

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

Yapıların inşa aşamasındaki en büyük problem, yapının projesi ile inşa edilen yapı arasındaki farklılıklardır. Bu farklılıkların yapı davranışındaki etkisini inceleyen bu tez çalışmasını,engin bilgi ve tecrübesiyle bana öneren ve her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse manevi desteğini benden esirgemeyen, yoğun idari görevleri sırasında bile bana her zaman değerli vaktini ayıran danışmanım ve saygıdeğer hocam Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmanın başından beri her altı ayda bir çalışmayı inceleyen ve değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan değerli hocalarım Prof. Dr. Metin HÜSEM'e ve Doç. Dr. Levent GÜMÜŞEL'e teşekkür ederim. Ayrıca, tezimi inceleme zahmetine katlanan ve tavsiyelerini benimle paylaşan sayın Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ'a ve sayın Prof. Dr. Metin AYDOĞAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Bununla birlikte, ilkokuldan bugünlere gelene kadar üzerimde emeği olan bütün hocalarım şükranlarımı sunarım.

Çalışmanın en kritik anlarında bilgileriyle çalışmaya ışık tutan ve değerli zamanımı benimle paylaşmaktan çekinmeyen sayın Doç. Dr. İrfan KAYMAZ'a teşekkür ederim.

Her başım sıkıştığında kendimi yanında bulduğum sevgili arkadaşım ve moral hocam Murat Emre KARTAL'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim. Dr. Ali URAL'a ve Okt. Kazım BABACAN'a teze katkılarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca, motivasyon desteklerini ve yardımlarını benden esirgemeyen bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren ve insana yatırım yapmak tezini bana aşıl原因an sevgili anneme ve babama, her daim sevgilerini ve desteklerini hissettiğim kardeşlerime ve dualarını benden esirgemeyen bütün aileme şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca desteğini, sevgisini ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen, yoğun çalışma zamanlarımda birlikteliğimizden çaldığım zamanı bana bağışlayan sevgili eşime ve güler yüzüyle bana her zaman moral veren küçük oğluma sonsuz sevgilerimi sunarım.

Bugünleri göremediği için büyük üzüntü duyduğum babamı rahmetle anıyor ve bu tez çalışmasını ona armağan ediyorum. Bu çalışmanın yeni çalışmalara öncülük etmesini ve ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

- Hacıfendioğlu, K., **Başağa, H.B.**, Bayraktar, A., Ateş, Ş., Nonlinear Analysis of Rock-Fill Dams to Non-Stationary Excitation by the Stochastic Wilson-Teta Method, Applied Mathematics and Computation, 194, 333-345, 2007. (SCI)
- Bayraktar A, Kartal M.E., **Basaga H.B.**, Reservoir Water Effects on Earthquake Performance Evaluation of Torul Concrete-Faced Rockfill Dam, Water Science and Engineering, 2, 1, 43-57, 2009.
- **Başağa, H.B.**, Bayraktar, A., Kaymaz, I., An Improved Response Surface Method for Reliability Analysis of Structures, Structural Safety (under review)
- **Başağa, H.B.**, Türker, T., Bayraktar, A., An Approach based on Design Points for Finite Element Model Updating of Structures using Modal Testing, Engineering Structures (under review)
- **Basaga, H.B.**, Kartal, M.E., Bayraktar, A., Reliability Analysis of Steel Braced RC Frames Considering Semi-Rigid Boundary Conditions, Materials and Structures (under review)
- Kartal, M.E., **Başağa, H.B.**, Bayraktar, A., Probabilistic Nonlinear Analysis Of CFR Dams By MCS Using Response Surface Method, Probabilistic Engineering Mechanics (under review)
- Hacıfendioğlu, K., Bayraktar, A., **Başağa, H.B.**, Dumanoğlu, A.A, Estimation of Stochastic Nonlinear Dynamic Response of Rock-fill Dams with Uncertain Structural Parameters for Non-stationary Random Seismic Excitation, Nonlinear Dynamics (under review)
- Bayraktar, A., Kartal, M.E., **Başağa, H.B.**, Earthquake Performance of Concrete Slab on CFR Dam under Seismic Excitations, KSCE Journal of Civil Engineering (under review)
- Kartal, M.E., **Başağa, H.B.**, Muvafik, M., Bayraktar, A., Effects of Semi-Rigid Connection on Structural Responses, Electronic Journal of Structural Engineering (under review)
- Bayraktar, A., Kartal, M.E., **Başağa, H.B.**, The Effect Of Face Slab Thickness On Seismic Performance Of Concrete Slab On CFR Dams, HydrOu - CFR World (under review)

Hasan Basri BAŞAĞA  
Trabzon, 2009

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa No</u></b>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET .....	V
SUMMARY .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	IX
SEMBOLLER DİZİNİ.....	X
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Güvenilirlik Analizi ile İlgili Bazı Çalışmalar .....	2
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	13
1.4. Güvenilirlik Analizindeki Temel Kavramlar .....	13
1.4.1. Rastgele Değişkenleri Tanımlayan Temel İfadeler.....	13
1.4.1.1. Ortalama.....	14
1.4.1.2. Varyans .....	14
1.4.1.3. Standart Sapma.....	14
1.4.1.4. Değişim Katsayısı .....	15
1.4.2. Güvenilirlik Analizinde Kullanılan Bazı Olasılık Dağılımları .....	15
1.4.2.1. Normal Dağılım (Gauss Dağılım).....	15
1.4.2.2. Lognormal Dağılım.....	17
1.4.2.3. Gumbel Dağılım.....	19
1.4.3. Limit Durum.....	19
1.4.4. Göçme Olasılığı .....	20
1.5. Güvenilirlik Analiz Yöntemleri .....	23
1.5.1. Açık Limit Durum Fonksiyonu ile Güvenilirlik Analizi.....	24
1.5.1.1. Birinci Derece İkinci Moment Güvenilirlik Yöntemi (BDİMGY).....	24
1.5.1.2. Birinci Derece Güvenilirlik Yöntemi (BDGY).....	27
1.5.1.3. İkinci Derece Güvenilirlik Yöntemi (İDGY).....	31
1.5.1.4. Monte Carlo Yöntemi (MCY).....	33
1.5.1.4.1. Direkt Örneklemeli Monte Carlo Yöntemi (DÖMCY).....	33

1.5.1.4.2. Önemli Örneklemeli Monte Carlo Yöntemi (ÖÖMCY).....	34
1.5.2. Kapalı Limit Durum Fonksiyonu ile Güvenilirlik Analizi.....	35
1.5.2.1. Direkt Birleştirme Yöntemi.....	36
1.5.2.2. Yanıt Yüzeyi Yöntemi .....	36
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	41
2.1. Açık Limit Durum Fonksiyonları İçin Geliştirilen Algoritmalar.....	46
2.1.1. Yanıt Yüzey Yöntemi ile Güvenilirlik Analizi .....	46
2.1.1.1. Uygulama 1: Lineer Olmayan Limit Durum Fonksiyon.....	48
2.1.2. Geliştirilmiş Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile Güvenilirlik Analiz Algoritması .....	51
2.1.2.1. Uygulama 2: Düzgün Yayılı Yüke Maruz Konsol Kiriş.....	60
2.1.2.2. Uygulama 3: Yüksek Mertebede Lineer Olmayan Limit Durum Fonksiyon.....	69
2.1.2.3. Uygulama 4: Lineer Olmayan Sarkacın Dinamik Davranışı .....	70
2.2. Kapalı Limit Durum Fonksiyonu İçin Geliştirilen Algoritmalar .....	73
2.2.1. Güvenilirlik Yöntemleri-ANSYS Birleşimi.....	74
2.2.1.1. Uygulama 5: Basit Kiriş Modeli .....	75
2.2.2. Yanıt Yüzeyi Yöntemleri-ANSYS Birleşimi.....	78
2.2.2.1. Uygulama 6: Ortası Delikli Levha .....	78
2.2.2.2. Uygulama 7: Çerçeve Sistem .....	81
2.2.2.3. Uygulama 8: Kafes Sistem.....	83
2.2.2.4. Uygulama 9: Perdeli Çerçeve Sistem.....	85
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
4. KAYNAKLAR .....	93
5. EKLER.....	101
ÖZGEÇMİŞ	

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile yapıların güvenilirlik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, kapalı limit durum fonksiyonlarının güvenilirlik analizi açık kodlu FERUM güvenilirlik analiz programı kullanılarak geliştirilen algoritmayla birlikte yapılmıştır. Geliştirilen algoritma, klasik yanıt yüzeyi yönteminin eksikliklerini gidermek amacıyla tasarlanmış ve kapalı limit durum fonksiyonlarının güvenilirlik analizini yapabilmek amacıyla arka planda çalışma özelliği ve kendine özgü programlama dili olan ANSYS sonlu elemanlar programı ile birleştirilmiştir.

Tez çalışmasında geliştirilen algoritmayı diğer yöntemlerle karşılaştırmak amacıyla farklı çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Bunlar: 1. Klasik yanıt yüzeyi yönteminin FERUM'a eklenmesi, 2. Kapalı limit durum fonksiyonları için FERUM-ANSYS birleştirilmesinin yapılması, 3. Klasik yanıt yüzeyi yönteminin ANSYS ile birleştirilmesi.

Çalışmada, geliştirilen algoritmanın ve diğer çalışmaların geçerliliğini göstermek amacıyla birçok örnek verilmiştir. Özellikle geliştirilen algoritma için seçilen örnekler her türlü yapıyı temsil etmesi açısından farklı eleman tiplerini kapsamaktadır.

Örneklerden elde edilen sonuçlara göre, genel olarak, geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizinden elde edilen sonuçlar diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlardan ya daha iyi sonuç vermekte ya da onlara paralellik göstermektedir. Buna göre oluşturulan algoritmanın etkin ve doğru biçimde çalıştığı ispatlanmış olmaktadır.

Bu tez çalışması, üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde kullanılan yöntemler hakkında bilgiler verilmekte ve hesap adımları gösterilmektedir.

İkinci bölümde, geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminin detayları verilmekte ve seçilen örneklerden elde edilen sonuçlar ile diğer yapılan çalışmaların sonuçları gösterilmektedir.

Üçüncü bölümde, çalışmadan elde edilen sonuçlar ve ileriki çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

Son olarak, bu üç bölümü kaynaklar ve geliştirilen algoritmanın ana kodlarının yer aldığı ekler bölümü takip etmektedir.

**Anahtar Kelimeler :** Güvenilirlik Analizi, Belirsizlikler, Göçme Olasılığı, Yanıt Yüzeyi Yöntemi.

## SUMMARY

### **An Approach for Reliability Analysis of Structures: Improved Response Surface Method**

In this thesis, reliability analysis of structures is carried out with improved response surface method. Accordingly, reliability analysis of implicit limit state functions is carried out with algorithm developed by using explicit FERUM reliability analysis program. This developed algorithm is designed with the aim of removing the deficiencies of the classical response surface method and combined with ANSYS finite element program, which has a peculiar programming language and batch mode, to make reliability analysis of implicit limit state function.

To compare algorithm developed in thesis with the other methods, various studies have also been conducted. These are: 1. The addition of classical response surface method to FERUM 2. The combination of FERUM-ANSYS for implicit limit state functions 3. The combination of the classical response surface method with ANSYS.

A lot of examples are given to show the validity of improved algorithm and other studies. In particular, the selected examples for improved algorithm include different element types in terms of representing each type of structures.

To the results acquired by the examples, in general, the results procured by reliability analysis with improved response surface method yield either better results than the results acquired by other methods or show parallelism with them. Consequently, it is proved that the algorithm is effective and accurate.

This thesis is composed of three chapters. In the first chapter, some information is given regarding the methods used and calculation steps are displayed.

In the second chapter, the details of improved response surface method are given and the results are shown on the selected examples with the other studies.

In the third chapter, the results acquired by the study and suggestions for further studies are presented.

Finally, these three chapters are followed by references and the appendix involving main codes of improved algorithm.

**Key Words :** Reliability Analysis, Uncertainties, Probability of Failure, Response Surface Method.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1. Normal dağılıma sahip rastgele bir değişkenin olasılık yoğunluk ve eklenik dağılım fonskiyonları.....	16
Şekil 2. Normal dağılımlı rastgele bir değişkenin farklı ortalama ve standart sapmalar için olasılık yoğunluk fonskiyonları.....	17
Şekil 3. Lognormal dağılımına sahip bir değişkenin olasılık yoğunluk fonskiyonu.....	18
Şekil 4. Gumbel dağılımına sahip bir değişkenin olasılık yoğunluk fonskiyonu.....	19
Şekil 5. Rastgele dağılım gösteren Q ve R için göçme olasılığı (Ranganathan, 2000).....	21
Şekil 6. Güvenilirliğin belirlenmesi (Ranganathan, 2000).....	23
Şekil 7. Limit durum fonskiyon dağılımı ( $M = R-Q$ ) (Ranganathan, 2000).....	25
Şekil 8. Güvenilirlik indeksinin geometrik olarak gösterimi (Thoft-Christensen ve Murotsu, 1986; Nowak ve Collins, 2000).....	28
Şekil 9. Hasofer-Lind güvenilirlik indeksi (Melchers, 1999; Nowak ve Collins, 2000).....	28
Şekil 10. Yanıt yüzeyi yönteminin şematik olarak gösterimi.....	36
Şekil 11. Örneklemeye yöntemleri.....	39
Şekil 12. FERUM programı çalışma ağı.....	41
Şekil 13. DÖMCY'nin akış diyagram şeması.....	43
Şekil 14. ÖÖMCY'nin akış diyagram şeması.....	44
Şekil 15. BDGY'nin akış diyagram şeması.....	45
Şekil 16. İDGY'nin akış diyagram şeması.....	46
Şekil 17. Yanıt yüzeyi yönteminin akış diyagram şeması.....	47
Şekil 18. Limit durum fonskiyonunun gösterimi.....	48
Şekil 19. 1. aşamada elde edilen yaklaşık fonskiyon.....	49
Şekil 20. Limit durum fonskiyonu ve yanıt yüzeyi yönteminde elde edilen yaklaşık fonskiyonlar.....	50
Şekil 21. Limit durum fonskiyonunun ve ortalama değerlerin gösterimi.....	52
Şekil 22. Örnek değerlerin gösterimi.....	53
Şekil 23. Yaklaşık fonskiyonun gösterimi.....	53
Şekil 24. BDG analizinden sonra elde edilen tasarım noktasının gösterimi.....	54
Şekil 25. Tasarım noktası etrafında belirlenen köşe noktalarının gösterimi.....	55
Şekil 26. Köşe noktalarından uygun olanının seçilmesi.....	55
Şekil 27. Tasarım noktası ile köşe noktası arasındaki doğrultunun belirlenmesi.....	56



Şekil 28. Limit durum fonksiyon üzerinde bir noktanın belirlenmesi.....	56
Şekil 29. Vektör izdüşümü yöntemi ile elde edilen örnek değerler.....	58
Şekil 30. Geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizi algoritması.....	59
Şekil 31. Konsol kiriş modeli .....	60
Şekil 32. Limit durum fonksiyonunun grafiksel gösterimi.....	62
Şekil 33. Ortalama değer etrafındaki örnek değerlerin gösterimi .....	62
Şekil 34. Yaklaşık fonksiyonun gösterimi.....	63
Şekil 35. Tasarım noktasının gösterimi .....	64
Şekil 36. Tasarım noktası etrafındaki köşe noktalarının gösterimi .....	65
Şekil 37. Doğrultunun ve limit durum fonksiyonu üzerindeki noktanın gösterimi.....	66
Şekil 38. Nihai örnek değerlerin gösterimi.....	68
Şekil 39. Nihai yaklaşık fonksiyon.....	68
Şekil 40. Tek serbestlik dereceli lineer olmayan sarkaç modeli, yüklemesi ve dayanımı ..	72
Şekil 41. Direkt birleştirme yöntemi .....	74
Şekil 42. Basit kiriş modeli .....	76
Şekil 43. Kirişin sonlu elemanlar modeli .....	77
Şekil 44. Ortasında delik bulunan plak.....	79
Şekil 45. Plâğın sonlu elemanlar ağı .....	80
Şekil 46. Plâğın kontur diyagramı .....	80
Şekil 47. Çerçeve sistem.....	82
Şekil 48. Kafes sistem .....	84
Şekil 49. Perdeli çerçeve sistem .....	87
Şekil 50. Perdeli çerçeve sistemin gerilme ve yerdeğiştirme diyagramı.....	89

## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Yapılar için limit durum çeşitleri (Melchers, 1999) .....	20
Tablo 2. Seviye I, II ve III'ün tanımları (Schueremans, 2003) .....	24
Tablo 3. FERUM programında kullanılan başlıca dosyalar .....	42
Tablo 4. Güvenilirlik analiz sonuçları .....	50
Tablo 5. Uygulama 2'de kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri .....	61
Tablo 6. Örnek değerler .....	61
Tablo 7. Köşe noktaları .....	64
Tablo 8. Vektör izdüşümü yöntemi ile elde edilen örnek değerler ( $f=1$ ) .....	66
Tablo 9. Vektör izdüşümü yöntemi ile elde edilen örnek değerler ( $f=1.5$ ) .....	67
Tablo 10. Uygulama 2'nin güvenilirlik analiz sonuçları .....	69
Tablo 11. Uygulama 3'te kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri .....	69
Tablo 12. Uygulama 3'ün güvenilirlik analiz sonuçları .....	70
Tablo 13. Uygulama 4'te kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri .....	71
Tablo 14. Uygulama 4'ün güvenilirlik analiz sonuçları .....	73
Tablo 15. Uygulama 5'te kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri .....	76
Tablo 16. Uygulama 5'in güvenilirlik analiz sonuçları .....	77
Tablo 17. Uygulama 6'da kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri .....	78
Tablo 18. Uygulama 6'nın güvenilirlik analiz sonuçları .....	81
Tablo 19. Uygulama 7'de kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri .....	82
Tablo 20. Uygulama 7'nin güvenilirlik analiz sonuçları .....	83
Tablo 21. Uygulama 8'de kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri .....	84
Tablo 22. Uygulama 8'in güvenilirlik analiz sonuçları .....	85
Tablo 23. Uygulama 9'da kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri .....	86
Tablo 24. Uygulama 9'un güvenilirlik analiz sonuçları (beton basınç dayanımı için limit durum) .....	88
Tablo 25. Uygulama 9'un güvenilirlik analiz sonuçları (rölatif kat ötelemesi için limit durum) .....	89

## SEMBOLLER DİZİNİ

$a$	Paspayı
$a, b_i, c_i$ ve $d_{ij}$	Yaklaşık fonksiyonun katsayıları
$A_1, A_2$	Alan
$A_s$	Donatı alanı
$b$	Kesit genişliği
$d_k$	Adım doğrultusu
$E$	Elastisite modülü
$e_1, e_2$	Yakınsama kriterleri
$f$	1~3 arasında değişen keyfi bir katsayı
$f_c$	Betonun basınç dayanımı
$f_M(m)$	Emniyetin olasılık yoğunluk fonksiyonu
$f_Q()$	Yükün olasılık yoğunluk fonksiyonu
$f_R()$	Dayanımın olasılık yoğunluk fonksiyonu
$f_X(x)$	Olasılık yoğunluk fonksiyonu
$F_X(x)$	Normal dağılımın eklenik dağılım fonksiyonu
$f_y$	Çeliğin akma dayanımı
$f_Z(z), \phi(z)$	Standart normal değişkenlerin olasılık yoğunluk fonksiyonu
$g$	Limit durum fonksiyon değeri, sabit yük
$g()$	Limit durum fonksiyonu
$g_0$	Başlangıç limit durum fonksiyon değeri
$\tilde{g}()$	Yaklaşık fonksiyon
$h$	Kesit yüksekliği
$h_v()$	Önemli örnekleme fonksiyonu
$[H]$	Dönüştürme matrisi
$I [ ]$	Gösterge fonksiyonu
$I$	Atalet momenti
$k_1, k_2$	Yay rijitliği
$\{ks\}$	Yaklaşık fonksiyonun katsayı değerlerini gösteren vektör
$l$	Açıklık boyu
$M$	Emniyet değeri

$m$	Kütle
$m()$	Merit fonksiyonu
$M_d$	Hesap dayanımı
$M_r$	Taşıma gücü dayanımı
$N$	Simülasyon sayısı, değişken sayısı
$P()$	Olasılık
$P_1, P_2, P_3, P_4,$ $P_5, P_6, P_7, P_8,$ $P_9, P_{10}, F$	Yük
$p_f$	Göçme olasılığı
$Q$	Yük
$q$	Hareketli yük
$R$	Dayanım
$r$	Yayın kopma yerdeğiştirmesi
$R_0$	Yükün dayanımdan büyük olma olasılığı
$t$	Zaman
$u$	Dağılım parametresi
$u_{maks.}$	Maksimum yerdeğiştirme
$Var(X)$	X değişkenlerinin varyansı
$V_x$	Değişim katsayısı
$V_{p_f}$	Göçme olasılığının değişim katsayısı
$\hat{v}_j$	Önemli örnekleme fonksiyonundan alınan örnek değerleri
$w$	Birim metrekareye gelen yayılı yük
$[W]$	Tasarım matrisi
$x^*, X_D$	Tasarım noktası
$\hat{x}_j$	Her bir değişken için üretilen örnek değer
$X_C$	Limit durum fonksiyonunu kesen nokta
$x_i$	Rastgele değişken
$X_M$	Merkezi nokta
$\{X\}$	Rastgele değişken vektörü
$\{y\}$	Yanıt vektörü
$z$	Standart normal değişkenler (indirgenmiş değişken)
$z^*$	Standart normal uzaydaki tasarım noktası

$\alpha$	Doğrultman kosinüsü, dağılım parametresi
$\beta$	Güvenilirlik indeksi
$\beta_F$	Birinci derece güvenilirlik analizinden elde edilen güvenilirlik indeksi
$\varepsilon$	Hata
$\gamma$	Betonun birim hacim ağırlığı
$\kappa$	Eğrilik
$\lambda_k$	Adım boyu
$\mu_{\ln(x)}$	$\ln(x)$ 'in ortalaması
$\mu_Q$	Yükün ortalaması
$\mu_R$	Dayanımın ortalaması
$\mu_x$	Ortalama
$\Phi(z)$	Standart normal değişkenlerin eklenik dağılım fonksiyonu
$\omega_0$	Açısal frekans

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Uzun yıllar araştırmacılar, yapı davranışını daha iyi ortaya koyabilmek amacıyla yapı modelleri (kiriş, kabuk, ...) ve temel kurallar (elastisite, plastisite, hasar teorileri, ...) üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bilgisayar teknolojisinin gelişimi ile birlikte sınır değer problemlerinin yaklaşık çözümü ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Günümüzde, sonlu elemanlar yöntemi bu problemlerin çözümü için güçlü bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır. Ancak, yapı modellerinin gerçekçi olması ve hesaplama yöntemlerindeki iyileştirmeler yapıyı temsil eden parametrelerin (malzeme ve kesit özellikleri, yükler, ...) belirsizliklerinin tanımlanmasındaki problemi çözememiştir. Belirsizliklerden dolayı meydana gelebilecek olumsuz etkileri dikkate almak için hesaplamalarda emniyet katsayıları kullanılmaktadır. Örneğin, bir köprü üzerindeki taşıt yükü dikkate alındığında; hangi zaman dilimindeki, hangi büyüklükteki veya hangi şekildeki araçların yükleri köprüye etkileyecek sorusu akla gelmektedir. Bu durum, taşıt yükünün değişken bir parametre olduğunu göstermektedir. Analizlerde, taşıt yükü ve benzeri yüklerin değişkenliklerinin dikkate alınabilmesi için yükler belirli katsayılarla çarpılarak büyütülmektedir. Yapıyı belirsizliklere karşı emniyetli hale getiren bu katsayılar akıllara şu soruları getirmektedir : “Yapı ne kadar emniyetlidir?”, “Ne kadar emniyet yeterli emniyettir?”, “Optimum emniyete nasıl karar verilecek?”

Yapıya etkileyen yükler, deprem, rüzgâr ve dalga gibi çevresel şartlardan kaynaklı yükler olduğunda belirsizlikler daha da ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, yapıda kullanılan betonarme gibi malzemelerin homojen olmaması ve dayanımlarının imal edilme koşullarına göre değişim göstermesi yapıdaki mevcut belirsizliklerinin sayısını ve önemini artırmaktadır. Yapıyı etkileyen bu tür parametrelerin değişkenliklerini dikkate alarak, yapı sistemlerinin ekonomik ömrü boyunca karşılaşılabileceği herhangi bir durum için yapının hasara uğraması veya göçmesi ihtimalini hesaplayabilen analize güvenilirlik analizi denilmektedir.

Yapının güvenilirlik analizi, inşaat mühendisliğinde gerçekleştirilen analizlerden çok farklıdır. Burada önemli olan gerilme hesabı yapmak veya elemanların davranışını tayin etmek değil, daha çok davranışlardaki belirsizlikleri ve bu belirsizliklerin yüklemeye ve

malzeme dayanımında birbirlerini nasıl etkileyeceğini ortaya koymaktır. Bu tür belirsizlikler belirli bir yapıda gözlemlenemediğinden dolayı güvenilirlik analizinde, bilinen analizlerden çok daha fazla soyutlama ve kavramsallaştırma vardır. Bu nedenle, modellemede herhangi bir mühendislik probleminin sadece fiziksel gösteriminin uygunluğu yeterli olmamakta; aynı zamanda hem yüklerin hem de malzeme dayanımlarının ve bunların ayrı ayrı belirsizliklerinin gösterimlerine de ihtiyaç duyulmaktadır.

## 1.2. Güvenilirlik Analizi ile İlgili Bazı Çalışmalar

1960'lı yıllardan bugüne kadar güvenilirlik analizi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu kısımda, tezin amacına uygun olarak bu çalışmalardan sadece yanıt yüzeyi yöntemi kullanılarak güvenilirlik analizi yapan çalışmalara yer verilmiştir. Bu amaçla, konuya uygun olan bazı çalışmaların özetleri kronolojik sıraya göre aşağıda sıralanmıştır.

Yanıt yüzeyi yöntemi ilk olarak Box ve Wilson (1954) tarafından kimyasal işlemlerin işletme koşullarını bulmak için kullanılmıştır. Daha sonraları, bu yöntemin uzun sürede koştan bilgisayar kodları için yaklaşık fonksiyonlar geliştirmek için kullanılabileceği fikri ortaya atılmıştır. Wong (1984, 1985), yanıt yüzeyi yöntemini dinamik yapı-zemin etkileşimi ve şev stabilite analizi gibi inşaat mühendisliği problemlerinde kullanmıştır. Çalışmalarda, yanıt yüzeyi elde etmek için faktöryel tasarım ve regresyon yöntemleri kullanılmıştır (Gupta, 2004).

Faravelli (1989) yanıt yüzey fonksiyonunu geliştirmek amacıyla hesaplamalarda gerçek fonksiyon ile yaklaşık fonksiyon arasındaki hatayı gösteren bir düzeltme faktörü kullanmıştır. Her bir malzeme ve geometrik özellik için tanımlanan hata faktörleri, yaklaşık fonksiyonu geliştirmek için kullanılmıştır.

Bucher ve Bourgund (1990) yanıt yüzeyi yönteminde örnek noktaların seçimi için alternatif bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada, güvenilirlik analizi iki aşamada gerçekleştirilmektedir. Birinci aşamada, ortalama değer etrafında seçilen örnek değerler kullanılarak yaklaşık bir fonksiyon oluşturulmaktadır. İkinci aşamada, bu fonksiyonunun güvenilirlik analizinden elde edilen tasarım noktası kullanılarak merkezi bir nokta elde edilmekte ve bu nokta etrafında yeni örnek değerler seçilmektedir. Nihai olarak, algoritma Monte Carlo yöntemi ile birleştirilmektedir.

Rajashekhar ve Ellingwood (1993) yanıt yüzeyi yöntemini geliştirmek amacıyla, iterasyona dayalı bir algoritma sunmuşlardır. Algoritmada, merkezi nokta ile minimum norm nokta arasındaki mesafeyi sıfıra ya da çok küçük bir değere eşitlemek amaçlanmıştır. Çalışmada, rastgele değişkenlerin bütün bölgelerinde yapılacak örnekleme yerine kuyruk bölgesinde yapılacak örneklemenin yanıt yüzeyi için önemli bir katkı sağlamadığı vurgulanmıştır.

Liu ve Moses (1994) yanıt yüzeyi yöntemini önemli örneklemeli Monte Carlo yöntemi ile birlikte kullanmışlardır. İterasyona dayalı olarak yapılan yöntemde, yanıt yüzey parametreleri yakınsama kriteri elde edilinceye kadar güncellenmektedir. Yöntem, örnek olarak seçilen bir uçak sisteminin güvenilirlik analizi için kullanılmıştır.

Kim ve Na (1997) yanıt yüzeyi yönteminde, Rackwitz-Fiessler güvenilirlik analiz algoritmasıyla birlikte ikinci derece fonksiyon yerine lineer yanıt yüzeyi fonksiyonu kullanmışlardır. Geliştirilen bu yöntemde, vektör izdüşümü yöntemi kullanılarak örnek değerler gerçek fonksiyona daha yakın seçilebilmektedir. Sonuçlarda, belirli bir hata oranı yakalanıncaya kadar yapılan döngüsel işlemde elde edilen göçme olasılığı ve güvenilirlik indeksi değerlerinin gerçeğe daha yakın çıktığı vurgulanmıştır.

Warren (1997) geometrik kusurları olan çerçeve tipi yapılarda, yapının kritik yükten daha az bir yükte kararsız hale gelme olasılığını hesaplamak için bir yöntem sunmuştur. Bu çalışmada, kritik yükü hesaplamak için üç boyutlu toplam Langrange kiriş sonlu elemanlar, rastgele başlangıç kusurlarını modellemek için en küçük kareler yöntemi ve göçme olasılığını hesaplamak için yanıt yüzeyi yöntemi ile birinci derece güvenilirlik yönteminin birleşimi kullanılmıştır.

Kaymaz vd. (1998) klasik güvenilirliğe dayalı optimizasyon yaklaşımındaki bazı kısıtlamaların üstesinden gelmek amacıyla güvenilirliğe dayalı yeni bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Bu amaçla, yanıt yüzey yöntemi ile Monte Carlo yönteminin birleşiminden oluşan bir algoritma, güvenilirliğe dayalı optimizasyonda zamanı ve işlem hacmini azaltmak için kullanılmıştır.

Zhao ve Ono (1998) yanıt yüzey yöntemini elasto-plastik çerçeve yapıların güvenilirlik analizinde uygulamışlardır. Çalışmada, performans fonksiyonu, göçme mekanizmalarından ve yük yollarından bağımsız tanımlanmıştır. Sonuç olarak, çerçeve sistemler için yanıt yüzeyi yönteminin etkili olarak kullanabileceği vurgulanmıştır.

Huh (1999) ile Huh ve Haldar (2001) yanıt yüzeyi yöntemini, sonlu elemanlar yöntemini ve birinci derece güvenilirlik analizini kullanarak depreme maruz lineer



olmayan yapılar için güvenilirlik analizini gerçekleştirebilen bir algoritma geliştirmiştir. Çalışmada, iki aşamalı yanıt yüzeyi yöntemi, karma terimleri içeren ve içermeyen ikinci derece fonksiyonlar ile uygulanmıştır. Çalışmanın etkinliğini artırmak için duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen algoritmayla elde edilen sonuçların geçerliliği Monte Carlo yönteminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak ortaya konmuştur. Huh ve Haldar (2002) bu algoritmayı geometri, malzeme ve kısmen bağlı birleşimlerin lineer olmama durumlarını dikkate alarak çelik çerçevelere uygulamışlardır. Kısmen bağlı birleşimdeki lineer olmama durumu dört parametrelili Richard modeli kullanılarak moment-dönme eğrisi ile tanımlanmıştır. Algoritmanın doğruluğu Monte Carlo yönteminden elde edilen sonuçlar ile gösterildikten sonra, çerçeve sistemlerin güvenilirliği 13 farklı deprem kayıtlarına göre elde edilmiştir.

Bucher vd. (2000), iki konu üzerinde durmuşlardır. Bunlardan birincisi, gelişmiş Monte Carlo benzeşim için mevcut sonlu eleman kodu ile birlikte olasılık analiz için var olan koda uygulanmasını gerçekleştirmek; ikincisi, davranış yüzey yöntemi için lokal-global yaklaşım stratejilerinin anlatmaktır. Çalışmada, güvenilirlik-sonlu eleman yaklaşımının, karmaşık yapıların güvenilirlik analizi için gereken esnekliği ve kesinliği ortaya çıkardığı görülmüştür. Sonuç olarak, önerilen davranış yüzeyi yönteminin en büyük avantajının doğrusal olmayan limit durum fonksiyonlarının tahmini için esnek bir yapısının olduğu ve kompleks yapıların güvenilirliğini hesaplamak için kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Das ve Zheng (2000) yanıt yüzeyi yöntemi için kullanılan vektör izdüşümü yöntemini (Kim ve Na, 1997) geliştirerek yeni bir algoritma ortaya koymuşlardır. Bu yöntemde, yanıt yüzeyi yöntemi kümülatif biçimde oluşturulmaktadır. Bu amaçla, ilk olarak doğrusal yanıt yüzeyi oluşturulmakta ve birinci derece güvenilirlik analizi ile tasarım noktaları belirlenmektedir. Bir sonraki adımda, doğrusal yanıt yüzeyine ikinci derece terimleri eklenerek geliştirilmekte ve ikinci derece güvenilirlik analizi ile tasarım noktaları belirlenmektedir. Son olarak, elde edilen yanıt yüzeyi fonksiyonu seçilen örnek noktalar için test edilmekte ve eğer gerekiyorsa karma terimler de eklenerek fonksiyon geliştirilmektedir. Zheng ve Das (2000) bu yöntemi üzerinde küçük değişiklikler yaparak rijitleştirilmiş bir plağın güvenilirlik analizini gerçekleştirmek için kullanmışlardır.

Lee (2000) perde duvarlı ve duvarsız çerçeve sistemlerin statik ve dinamik yükler altında güvenilirliğini hesaplayan bir algoritma geliştirmiştir. Bu amaçla, perde duvarlı çerçeve sistemlerin statik ve dinamik analizini yapabilen bir program yazılmış ve sonuçlar

paket programlardan alınan sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Daha sonra bu programa güvenilirlik analizi algoritması eklenmiştir. Statik yükler altında gerçekleştirilen güvenilirlik analizinde, stokastik sonlu elemanlar yöntemi birinci derece güvenilirlik yöntemi ile birlikte kullanılmıştır. Dinamik yükler altında yapılan güvenilirlik analizinde ise yanıt yüzeyi yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi, birinci derece güvenilirlik analizi ve lineer iterasyon kullanılmıştır (Lee ve Haldar, 2003). Sonuçlar, Monte Carlo yönteminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak geliştirilen yöntemin doğruluğu gösterilmiştir. Çalışmada ayrıca duyarlılık analizi gerçekleştirilerek etkin parametreler belirlenmeye çalışılmıştır.

Macke vd. (2000) gerçek ve yaklaşık limit durum fonksiyon arasındaki farkı azaltarak adaptasyon sağlayabilen bir yanıt yüzeyi yöntemi geliştirmişlerdir. İki fonksiyon arasındaki lokal hatalar, elde edilen ve gerçek göçme olasılığı arasındaki fark dikkate alınarak hesaplanmakta ve bu iki değer arasında adaptasyon sağlanmaktadır. Yöntemin geçerliliği, konveks bir yapıya sahip limit durum fonksiyonu ile sonlu elemanları birleştirebilen bir çerçeve sistemin güvenilirlik analizi hesabında gösterilmiştir.

Pendola vd. (2000) çatlaklı yapıların onarım optimizasyonunda kararlı çözüm elde etmek amacıyla lineer olmayan çatlak analizi için olasılığa dayalı bir metod sunmuşlardır. Bu amaçla, sonlu elemanlar ile güvenilirlik analizi direkt yöntem ve ikinci derece yanıt yüzeyi yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Yanıt yüzeyi yöntemi için iterasyona dayalı yeni bir yaklaşım kullanılmıştır. Önerilen algoritmanın doğruluğunu göstermek amacıyla çatlak bir boru örnek olarak seçilmiştir. Sonuçlara göre, elastik-plastik kırılma mekaniği içinde J-integralin olasılığa dayalı hesabı çözüm zamanında herhangi bir artım olmadan hesaplanabilmiştir. Ayrıca, yanıt yüzeyi yönteminde kullanılan yeni yaklaşımın sonlu elemanlar ile uyum içinde çalıştığı gösterilmiştir.

Tandjiria vd. (2000) yanıt yüzeyi yöntemini yanal yüklü kazıkların güvenilirlik analizine uygulamıştır. Kazık-zemin sistemini modellemek için kiriş elemanlar ve yay serisi kullanılmaktadır. Kazık tepe yerdeğiştirmesi ve kazığın maksimum eğilme momenti limit durum kriteri olarak kullanılmaktadır. Bu kriterlere göre, elde edilen olasılık ve kümülatif yoğunluk fonksiyonlarının, Monte Carlo yönteminden elde edilen sonuçlara yakın olduğu görülmektedir. Çalışmada, ayrıca, belirlenen limit durum kriterleri altındaki kazığın göçme olasılıkları, kazık-zemin sisteminin olasılıklı davranışı ve göçme olasılığına etki eden kazık-zemin parametreleri de belirlenmiştir.

Waarts (2000) güvenilirlik analizini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yeterli doğrulukta sonuçlar elde edebilecek ve çözüm zamanını en aza indirecek yöntemler sunmuştur. Bu amaçla iki yanıt yüzey yöntemi (birinci derece güvenilirlik yöntemine dayalı uyarlanabilir yanıt yüzeyi yöntemi ve doğrusal uyarlanabilir yanıt yüzeyi örnekleme yöntemi) geliştirilmiştir. Seçilen örneklerden elde edilen sonuçlara göre birinci derece güvenilirliğe dayalı geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminden elde edilen sonuçlar klasik birinci derece güvenilirlik yönteminden elde edilen sonuçlara göre daha etkin çıkmıştır.

Guan ve Melchers (2000, 2001) yanıt yüzeyi yönteminde seçilen örnek değerlerin sonuçlara etkisini incelemiştir. Açık ve kapalı formda seçilen problemler üzerinde yapılan çalışmalarda, örnek değerlerin tespiti için kullanılan katsayının değişik değerleri için sonuçların değiştiği ve gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek için bu katsayının tek bir değeri olmadığı vurgulanmıştır.

Romero vd. (2000, 2004) örgülü örnekleme dayalı yanıt yüzey yaklaşımını geliştirmek amacıyla interpolasyon tekniklerini incelemiştir. Bu amaçla, örgülü örneklemede örnek değerleri geliştirmek için sonlu elemanlar interpolasyon yöntemi ile yanıt yüzeyi oluşturmak için kullanılan polinom regresyon ve kriging yöntemi karşılaştırılmıştır.

Roos ve Bucher (2001, 2003) davranış yüzeyi yöntemi için bazı lokal-global arakesit stratejisi üzerinde durmuşlardır. Göçme yüzeyinin çok yüzlü ve ağırlıklı yarıçap ara yüzleri, hesaplama verimliliği de dikkate alınarak göçme olasılıklarının kesin değerlerini tahmin etmek için tasarlanmıştır. Bu yöntemlerin amacı yüksek derecede doğrusal olmayan limit durum fonksiyon yaklaşımı için esneklik sağlamasıdır. Bu durum özellikle karışık doğrusal olmayan yapıların güvenilirlik analizi için uygun olmaktadır. Yüksek lokal konsantrasyonlarında bile herhangi bir sayıdaki kontrol noktaları yaklaşık problemler olmadan kullanılabilir. Bu anlamda, öne sürülen yöntemin çok etkili ve güçlü olduğu ortaya çıkmaktadır.

Yu ve diğ. (2001, 2002) yanıt yüzeyi yönteminde ikinci derece terimlerin seçimini geliştirmek amacıyla aşamalı regresyonu kullanmışlardır. Bu yöntemde, ikinci derece ve karma terimler tekrarlanan varyans analizi ile hesaplanan katkı oranlarına göre otomatik olarak modelin içinde elde edilebilmektedir. Algoritma, başlangıç olarak az sayıda örnek ile lineer yanıt yüzeyini kullanarak ikinci derece terimleri iterasyon ile kademeli olarak elde etmektedir.

Kmieciak ve Soares (2002) yanıt yüzeyi yöntemini kullanarak sıkıştırılmış plak dayanımının toplanmış olasılık yoğunluk fonksiyonunu belirleyen bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmada, limit durum fonksiyonu, lineer olmayan sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre yanıt yüzeyi yöntemi ile belirlenmiştir. Farklı yükleme seviyelerinde göçme olasılığını hesaplamak için, birinci derece güvenilirlik yöntemi kullanılarak dağılım fonksiyonu oluşturulmuştur. Önerilen yaklaşım, farklı narinliğe ve sınır şartlarına sahip plaklara uygulanmış ve çıkan sonuçlar Monte Carlo yönteminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Soares vd. (2002) betonarme yapıların güvenilirliğini fiziksel ve geometrik olarak lineer olmama durumlarını dikkate alarak hesaplayabilen bir formül geliştirmişlerdir. Güvenilirlik analizi, lineer olmayan sonlu elemanlar algoritması ile yanıt yüzeyi yönteminin birleştirilmesi sonucunda gerçekleştirilmiştir. Betonarme kolonlarında yapılan parametrik çalışma sonucunda, güvenilirlik tahmininde lineer olmama seviyesinin çok önemli olduğu çıkmıştır. Buna göre, bazı durumlarda emniyet faktörlerinin yetersiz olduğu; ancak, çerçeve sistemlerde çok fazla değişken olmasından dolayı emniyet faktörlerinin kalibre edilmesinin zor bir iş olduğu vurgulanmıştır.

Gayton vd. (2003) yeni bir yanıt yüzeyi yöntemi (yeniden örnekleme ikinci dereceden yanıt yüzeyi) geliştirmiştir. Bu yöntem ile hem mühendislik problemleri dikkate alınabilmekte hem de güvenilirlik analizinin hesaplama zamanı yanıt yüzeyin istatistiksel formülasyonu kullanılarak azaltılabilmektedir. Kullanılan yeniden örnekleme tekniği sayesinde çözüm algoritmasının ara bölümlerinde de kontrol mekanizması oluşturularak son bölüme gelmeden hesaplar birçok defa denetlenip sonuçların doğruluğu artırılmaktadır.

Impollonia ve Sofi (2003) büyük yerdeğiştirmelerin meydana geldiği belirsiz yapıların sonlu eleman analizi için yanıt yüzeyi yöntemini anlatmışlardır. Bu yöntem, polinomların oranlarına bağlı olarak yapılan yanıt yüzeyi fonksiyonlarının kullanımına dayanmaktadır. Bu fonksiyonlar, yaygın olarak kullanılan doğrusal ve ikinci derece polinomların tersine, örnekleme noktasının durumuna bağlı olmamaktadır. Yanıt yüzeyi şekli tanımlandığında, analitik bağıntılar veya duyarlılık analizinin bütün avantajlarını kullanan istatistiksel benzeşim yoluyla tahmin edilebilmektedir. Sayısal örnekler, davranışın hem istatistiksel momentlerinin hem de olasılık yoğunluk fonksiyonlarının değerlendirilmesinde kayda değer bir kesinliğin elde edildiğini göstermektedir.

Gomes ve Awruch (2004) birinci derece güvenilirlik yöntemini, yanıt yüzey yöntemini ve yapay sinir ağlarını kullanarak geliştirilmiş önemli örnekleme Monte Carlo

yöntemini oluşturmuş ve direkt Monte Carlo yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Değişkenlerin (malzeme özellikleri, yükler ve eleman boyutları...vb) rastgele olması durumunda, yapı sistemlerinin güvenlik seviyelerinin ve göçme olasılığının değerlendirilmesinin yapı tasarımında çok önemli bir yeri olduğu vurgulanmıştır. Bu değişkenlerin her birinin yapı güvenliğindeki önemini belirlemek için kullanılan birçok yöntemden ikisi olan yanıt yüzeyi ve yapay sinir ağları yöntemlerinin, bu çalışmada, basit limit durum fonksiyonlu ve hasar olasılığının kapalı form çözümü olan problemler üzerinde avantajları ve eksikleri gösterilmiştir. Sonuç olarak, bu iki yöntemin benzeşim yöntemleri vasıtasıyla yapı güvenilirliğinin belirlenmesinde uygun olacağı ortaya konulmuştur.

Gupta (2004) ile Gupta ve Manohar (2004) yanıt yüzeyi yönteminde yaklaşık fonksiyonu elde etmek için seçilen noktaları, göçme olasılığı hesabına olan katkılarını dikkate alarak gerçek limit durum fonksiyonu etrafında seçebilecek bir yöntem geliştirmişlerdir. Elde edilen örnek değerler ile yaklaşık limit durum fonksiyonu oluşturulmakta ve Monte Carlo yöntemi ile göçme olasılığı hesaplanmaktadır. Sonuçlarda, önemli derecede zaman alıcı problemlerde, önerilen yöntemin hesaplama süresi bakımından Monte Carlo yöntemine göre çok daha etkili olduğu vurgulanmıştır.

Hurtado (2004) regresyon, sınıflandırma ve olasılık yoğunluk tahmini işlemlerini birleştiren bir yapıya sahip olan istatistiksel öğrenme teorisi ile kapalı limit fonksiyonlarını açık limit durum fonksiyonlarına dönüştürerek güvenilirlik analizini gerçekleştirmiştir. Bu yöntemde, sinir ağları ve yanıt yüzeyi yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, ampirik olarak ortaya koyulan bu yöntemin kararsızlığı istatistiksel bilgi kavramlarıyla gösterilmiştir.

Youn ve Choi (2004) kayan en küçük kareler yöntemine dayalı yanıt yüzey yöntemini kullanarak yeni bir güvenilirliğe dayalı optimizasyon tasarımı geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, performansa dayalı ölçme yaklaşımı için karma ortalama yöntemi yeni yanıt yüzey yöntemi ile birleştirilmiştir. Bu sayede, geniş hacimli hesaplama gerektiren problemlerin hesaplama sürelerini, göçme olasılıklarını gerçeğe yakın tahmin ederek kısaltmışlardır.

Cheng vd. (2005) yanıt yüzeyi yöntemini, sonlu elemanlar yöntemini, birinci derece güvenilirlik yöntemini ve önemli örnekleme yöntemini birleştiren bir güvenilirlik analiz yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem, limit durum fonksiyonu açıkça ifade edilemeyen kompleks yapıların güvenilirlik analizi için geliştirilmiştir. Çalışmada, yöntemin geçerliliği ve doğruluğu gösterildikten sonra asma köprülerin salınımından dolayı meydana gelen limit durumların güvenilirlik analizi gerçekleştirilmiştir.

Gomes ve Awruch (2005) lineer olmayan limit durum fonksiyonlarına sahip betonarme yapılarda, yanıt yüzeyi yöntemini ve yapay sinir ağları yöntemini birinci derece güvenilirlik yöntemini kullanarak karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Sonuçlarda, Monte Carlo yönteminin kompleks problemler için düşük performans gösterdiğini buna karşın yaklaşık yöntemler olmasına rağmen birinci derece güvenilirlik yönteminin, yanıt yüzeyi yönteminin ve sinir ağları yönteminin uygun birer alternatif güvenilirlik analiz yöntemi olduğu vurgulanmıştır.

Kaymaz (2005) kriging yöntemini yanıt yüzey yöntemi ile birleştirerek güvenilirlik analizine uygulamış ve kriging parametrelerinin sonuçlara etkilerini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürlerdeki kriging parametrelerinin yapısal güvenilirlik analizi için iyi sonuç vermeyi garanti etmediğini göstermektedir. Çalışmada, kriging yönteminin uygulamalarından elde edilen sonuçlara dayalı olarak yöntemin dezavantajları yanında bazı avantajları da verilmektedir. Sonuç olarak, yapısal güvenilirlik analizinde daha iyi sonuçlar elde etmek için hangi kriging modelinin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Kaymaz ve McMahan (2005), yanıt yüzey yönteminde kullanılan normal regresyon yerine ağırlıklı regresyon kullanarak yeni bir yanıt yüzeyi yöntemi (ADAPRES) geliştirmiştir. Örnek olarak seçilen açık ve kapalı formdaki performans fonksiyonlarının göçme olasılıkları bu yöntem ile elde edilmiştir. Bu sonuçlar, normal regresyon ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçların kesin sonuca daha yakın olduğu gösterilmiştir.

Lee ve Kwak (2005) yanıt yüzeyi yönteminde tam faktöriyel deney tasarımı yerine eksensel örnek değerleri kullanmışlar ve yanıt yüzeyini, etki indeksi kullanılarak elde edilen deneysel bir nokta ile geliştirmişlerdir. Göçme olasılığı, Pearson sistem ve deneysel verilerden elde edilen dört istatistiksel moment kullanılarak hesaplanmıştır.

Wong vd. (2005) lineer olmayan sonlu elemanlar ile yanıt yüzeyi yönteminin kullanımını ardışık yükler için geliştirmiştir. Yapılan çalışmalarda, ardışık yükler için güvenilirlik analiz sonuçlarının gerçekten uzaklaştığı görülmektedir. Bu durumun, yanıt yüzeyin düzgün olmamasından ve sayısal ve lineer olmayan sonlu eleman analizi için oluşturulan deneysel tasarımdan kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Çalışmada, bu eksikliklerin giderilmesi amacıyla güvenilirlik analizi için yeni bir tasarım yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin doğruluğunu göstermek için seçilen üç örnekte elde edilen sonuçlar Monte Carlo'dan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Elhewy vd. (2006) yanıt yüzey yöntemine dayalı bir yapay sinir ağları yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemde, rastgele değişkenler ile yapı davranışı arasındaki ilişki yapay sinir ağları modelleri kullanılarak oluşturulmakta; daha sonra, bu modeller güvenilirlik analiz yöntemlerinden birisi ile birleştirilmektedir. Çalışmada, yapay sinir ağlarına dayalı yanıt yüzeyi yönteminden elde edilen sonuçların klasik yanıt yüzeyi yönteminden elde edilen sonuçlara göre daha doğru olduğu sonucuna varılmıştır.

Lee (2006) depreme maruz koruma binalarının güvenilirlik analizini, deprem yükünü, beton basınç dayanımını ve modal sönüm oranını rastgele değişken olarak gerçekleştirmiştir. Çalışmada, yapının sismik davranışı sırasında kritik duruma düşebilecek elemanlardaki olası göçme noktaları yanıt yüzeyi yöntemi kullanılarak yaklaşık bir fonksiyon ile temsil edilmiştir. Çok eksenli limit durum ile tek eksenli limit durum fonksiyonlarının güvenilirlik analiz sonuçlarının karşılaştırmasında, çok eksenli göçme kriterinin beton göçme dayanımını tahmin etmek için uygun bir limit durum olduğu sonucuna varılmıştır.

Most ve Bucher (2006a, 2006b) etkili bir yanıt yüzeyi yöntemi ortaya koymuşlardır. Bu yöntem, kayan en küçük kareler yöntemi ile sinir ağları yöntemini kullanmaktadır. Çalışmada, şartlı göçme olasılığındaki ve yaklaşık yarıçaplardaki maksimum farkların oluşturduğu bir kombinasyon adaptasyon kriteri olarak dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, göçme olasılığının tahmini için gerekli örnek değer sayısı klasik yanıt yüzeyi yönteminde gereken örnek değer sayısından daha az olmaktadır.

Babu ve Srivastava (2007) kohezyonlu sürtünmeli zeminlerde inşa edilen sığ temellerin taşıma gücünün güvenilirlik analizinde yanıt yüzeyi yönteminin kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada, güvenilirlik analiz sonuçları Monte Carlo'dan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve yanıt yüzeyi yönteminin kullanımının hesaplama süresini ve hafıza gereksinimini oldukça azalttığı vurgulanmıştır. Ayrıca, sonuçlarda temeldeki müsaade edilebilir basınca karar verilirken güvenilirlik analizinin yardımcı olduğu belirtilmiştir.

Lu vd. (2007) güvenilirlik analizi için geliştirilmiş örnek değerler kullanarak yeni bir yanıt yüzeyi yöntemi sunmuşlardır. Bu amaçla klasik örnek değer seçimine iki adet nokta ilave edilmiştir. Bu noktalardan bir tanesi doğrusal interpolasyon için diğeri ise bu interpolasyonun uygulamasında örnek değerlerin çevresi ile merkezi arasındaki mesafeyi kontrol etmek için kullanılmıştır. Sonuçlarda, bu yöntemde koşum sayısının artmasına karşın klasik yanıt yüzey yöntemine göre daha kesin sonuç elde edildiği vurgulanmıştır.

Most (2007) güvenilirlik analizi için etkili bir yanıt yüzey yaklaşımı ortaya koymuştur. Bu yaklaşımda, emniyetli ve emniyetsiz bölgelerde değişken uzayı sınıflandırmak için destek vektör makinesini kullanmıştır. Buna göre, bir grup başlangıç verisi kullanılarak emniyetli ve emniyetsiz bölge sınırına yakın yerlerde yeni bir grup veri üretilmekte ve bu sayede göçme olasılığı az sayıda veri kullanılarak hesaplanmaktadır.

Nowak ve Cho (2007) bir kemer köprünün göçme mekanizmalarının birleşiminde yeni bir yöntemi olasılığa dayalı risk değerlendirmesi için önermiş ve geleneksel güvenilirlik çözüm yöntemiyle karşılaştırmıştır. Çalışmada, eleman bazında güvenilirlik kırımların maksimum kesme ve negatif moment gibi kritik kesitlerinde tasarım değişkenlerinin yanıt yüzeyleri kullanarak değerlendirilmiştir. Örnek olarak seçilen köprü sistemi, sistem güvenilirlik analizi için seri bağlı bir sistem olarak modellenmiştir. Yapı sisteminin göçme olasılıklarının alt ve üst sınırları elde edilmiş ve tüm göçme mekanizmalarının potansiyel kombinasyonları için önerilen yöntem ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, oluşturulan algoritma geleneksel sistem güvenilirlik çözüm yöntemleriyle kıyaslandığında, göçme mekanizmalarının değişik kombinasyonları için algoritmanın hesaplamalarda çözüm zamanını önemli derecede azalttığı ortaya çıkmıştır.

Bucher ve Most (2008) yapı güvenilirliğinde kullanılan yaklaşık yanıt yüzey fonksiyonlarının güvenilirlik analizi sonuçlarına etkisini incelemiştir. Bu amaçla, polinom fonksiyonlara, radyal temelli fonksiyonlara ve yapay sinir ağlarına dayalı yanıt yüzey yaklaşımlardan elde edilen güvenilirlik analiz sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmada, dikkate alınan yanıt yüzey fonksiyonları ile göçme olasılığının kabul edilebilir doğrulukta elde edildiği vurgulanmıştır.

Cheng vd. (2008) yapıların göçme olasılığını belirlemek için yanıt yüzeyi yöntemine dayalı yeni bir yapay sinir ağları yöntemini düzgün tasarım yöntemi ile birleştirmişlerdir. Geliştirilen yöntemde kullanılan düzgün tasarım yöntemi, eğitim için seçilen verilerin kalitesini arttırmakta; dolayısıyla daha iyi bir yapay sinir ağları modeli elde edilmektedir. Bununla birlikte, daha düşük sayıda eğitilen veri ile daha iyi bir yaklaşık limit durum fonksiyonu oluşturulabilmektedir. Sonuçlarda, geliştirilen yöntemden elde edilen sonuçların klasik yapay sinir ağlarına dayalı yanıt yüzey yöntemi ile gerçekleştirilen güvenilirlik analizlerden elde edilen sonuçlara göre daha iyi ve daha ekonomik olduğu vurgulanmıştır.

Cho ve Kim (2008) asma köprülerin yapım aşamasındaki risk değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla, araştırmacılar tarafından önerilen yanıt yüzey yöntemi



yaklaşımlarından üç tanesi değerlendirilmiş ve lineer yanıt yüzey fonksiyonları ile ağırlıklı matrisin kullanımının en ideal kombinasyon olacağına karar verilmiştir. Elde edilen bu yaklaşımla, köprünün ana kablosunun kopması nihai limit durum olarak tanımlanarak köprünün inşa aşamalarında göçme olasılığı hesaplanmıştır.

Gavin ve Yau (2008) yanıt yüzeyi yönteminde, ikinci derece polinom yerine yüksek mertebeli polinomlar kullanmışlardır. Polinomun derecesi, polinom katsayıların istatistiksel analizi kullanılarak elde edilmiştir. Ortogonal polinomlar kullanılarak, yüksek mertebeli polinomlardan dolayı oluşan problemlerin önüne geçilmiştir. Çalışmada, elde edilen algoritmanın doğruluğunu göstermek amacıyla, seçilen örnekler için güvenilirlik analiz sonuçları klasik yanıt yüzeyi yönteminden ve Monte Carlo yönteminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Proppe (2008) göçme olasılığının hesabı için kayan en küçük kareler yöntemine dayalı bir limit durum fonksiyon elde etme yaklaşımı ortaya koymuştur. Bu yöntemin öne çıkan özellikleri, çok yönlü olması, kolay uygulanabilir olması ve mevcut önemli örnekleme algoritmalarına çok iyi uyum sağlayabilmesidir. Yöntem, limit durum fonksiyonundan elde edilen sonuçları optimizasyon probleminde yeniden kullanmaktadır. Dolayısıyla, çok sayıda değişkeni olan problemlerde eski bilgileri kullanarak işlem hacmini azaltmış olmaktadır.

Cho (2009) olasılıklı şev stabilite analizi ile geleneksel sonlu farklar yönteminin birleştirilmesi işlemi için bir yaklaşım sunmuştur. Limit durum fonksiyonu, yanıt yüzeyi yöntemine dayalı yapay sinir ağları modeli ile kapalı formda temsil edilmiştir. Güvenilirlik analizi, eğitilmiş yapay sinir ağları modeli kullanılarak birinci derece güvenilirlik ve ikinci derece güvenilirlik ve Monte Carlo yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir.

Chowdhury ve Rao (2009) yükün, malzeme ve geometrik özelliklerin rastgele değişken olduğunu dikkate alarak yapının göçme olasılığını yüksek boyutlu model gösterimine (YBMG) ve çarpımsallaştırılmış yüksek boyutlu model gösterimine (ÇYBMG) dayalı bir yanıt yüzeyi yöntemi ile hesaplamışlardır. Bu iki yöntemin geçerliliğini göstermek amacıyla yapı, katı mekanik ve geoteknik mühendislik problemlerinden yedi farklı örnek seçilmiştir. Sonuçlara göre, ÇYBMG'ye dayalı yanıt yüzeyi yöntemi kullanılarak elde edilen göçme olasılığı, Monte Carlo yönteminden elde edilen göçme olasılığı ile karşılaştırıldığında daha doğru sonuç vermektedir.

Möller vd. (2009) yanıt yüzeyi yönteminin gerçekleştirilmesinde kullanılan yaklaşımlardan üç tanesinin (deterministik veritabanının genel tahmini, deterministik

veritabanının lokal ara kesiti ve geleneksel sinir ağı) karşılaştırılmasını yapmışlardır. Bu amaçla, beş katlı betonarme bir bina örnek olarak seçilmiş ve lineer olmayan dinamik analiz sonuçlarına göre güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, her bir yöntemin avantaj ve dezavantajları vurgulanmıştır.

Nguyen vd. (2009) yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizi için ağırlıklı regresyona dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Yanıt yüzeyi yönteminde kullanılan ağırlıklı regresyon noktalarının ağırlıklarını noktaların gerçek göçme yüzeyine olan uzaklığına ve tahmini tasarım noktasına olan uzaklığına göre belirlemektedir. Bu yöntemde etkin ve doğru sonuçları kısa zamanda elde etmeyi amaçlamışlardır. Yöntemin geçerliliği literatürden alınan örneklerin sonuçları ile karşılaştırılarak gösterilmiştir.

### **1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Bu tez çalışmasında, yapıların güvenilirlik analizini gerçekleştirmek amacıyla güvenilirlik analizi-sonlu elemanlar birleşiminde kullanılan yanıt yüzey yönteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Algoritmanın sonlu elemanlar kısmında ANSYS (2008) programı kullanılmıştır. Geliştirilmiş yanıt yüzeyi algoritmasını elde etmek ve diğer güvenilirlik yöntemleri ile karşılaştırmasını yapabilmek için aşağıda sıralanan çalışmalar gerçekleştirilmiştir:

- Açık limit durum fonksiyonun klasik yanıt yüzey yöntemi ile güvenilirlik analizi,
- Açık limit durum fonksiyonunun geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizi,
- Kapalı limit durum fonksiyonunun güvenilirlik analizi,
- Kapalı limit durum fonksiyonunun klasik ve geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemleri ile güvenilirlik analizi.

### **1.4. Güvenilirlik Analizindeki Temel Kavramlar**

#### **1.4.1. Rastgele Değişkenleri Tanımlayan Temel İfadeler**

Güvenilirlik analizinde, yapı davranışını etkileyen belirsizlikler yapı tasarımında kullanılan parametrelerin değişken tanımlanmasıyla dikkate alınır. Yapı analizlerinde

deterministik olarak tanımlanan kesit boyutları, elastisite modülü, birim hacim ağırlık, poisson oranı, yükler... vb gibi parametreler güvenilirlik analizinde istatistiksel olarak ifade edilirler. Aşağıda tez çalışmasında da kullanılan bazı istatistiksel tanımlar verilmektedir (Beyazıt, 1996; Nowak ve Collins, 2000).

#### 1.4.1.1. Ortalama

Rastgele değişken (X) için elde edilmiş bir grup veri  $x_i$  ile temsil edilirse, ortalama,  $\mu_x$ ,

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

şeklinde tanımlanır. Burada, N değişkenler için elde edilen toplam verinin sayısını göstermektedir.

#### 1.4.1.2. Varyans

$$\text{Var}(X) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \quad (2)$$

Burada Var (X), X değişkenine ait varyans değerini temsil etmektedir.

#### 1.4.1.3. Standart Sapma

Standart sapma, varyansın karekökü olarak tanımlanmaktadır.

$$\sigma_x = \sqrt{\text{Var}(X)} \quad (3)$$

#### 1.4.1.4. Değişim Katsayısı

Değişim katsayısı, boyutsuz olarak standart sapmanın ortalamaya oranı olarak tanımlanmaktadır.  $V_x$ , değişim katsayısını göstermek üzere;

$$V_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (4)$$

şeklinde tanımlanır.

#### 1.4.2. Güvenilirlik Analizinde Kullanılan Bazı Olasılık Dağılımları

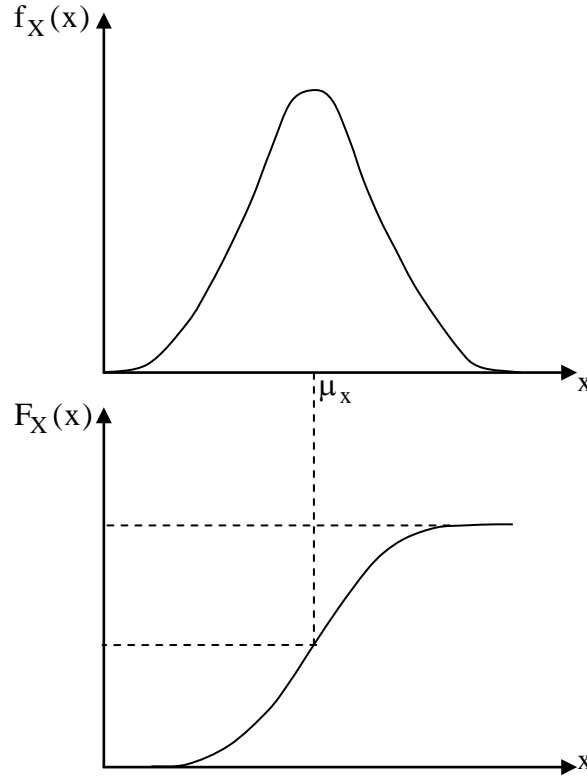
Rastgele bir değişken kendisine ait eklenik dağılım fonksiyonu ( $F_X(x)$ ) ve bunun türevi olan olasılık yoğunluk fonksiyonu ( $f_X(x)$ ) ile tanımlanır. Herhangi bir rastgele değişken için bu fonksiyonlar elde edilebilmektedir. Ancak, pratikte, belli formda bazı fonksiyonların birçok rastgele değişkenlerin dağılımlarını iyi ifade ettikleri görülmektedir. Bu dağılımlardan, üniform, normal, lognormal, gamma, gumbel, weibull ve poisson dağılımları güvenilirlik analizlerinde kullanılan en önemli dağılımlardır. Bu dağılımlardan çalışmada kullanılan Normal, Lognormal ve Gumbel dağılımları ile ilgili bilgiler aşağıda verilmektedir (Nowak ve Collins, 2000; Ang ve Tang, 2007).

##### 1.4.2.1. Normal Dağılım (Gauss Dağılımı)

Pratikte uygulamalarda karşılaşılan rastgele değişkenlerin büyük bir çoğunluğu normal dağılım adı ile bilinen dağılıma uyar. Bu dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right] \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 1'de normal dağılımlı rastgele bir değişkene ait olasılık yoğunluk ve eklenik dağılım fonksiyonları verilmektedir.



Şekil 1. Normal dağılıma sahip rastgele bir değişkenin olasılık yoğunluk ve eklenik dağılım fonskiyonları

Normal dağılımlı rastgele değişkenin eklenik dağılım fonskiyonunun kapalı formda çözümü bulunmamaktadır. Ancak, ortalaması sıfır ( $\mu_X = 0$ ) ve standart sapması bir ( $\sigma_X = 1$ ) özel durumu için eklenik dağılım fonskiyon tabloları geliştirilmiştir. Özel durum için ortalama ve standart sapma değerleri (5) nolu denklemde yerine yazılırsa;

$$f_Z(z) = \phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}(z)^2\right] \quad (6)$$

standart normal değişken  $z$  için olasılık yoğunluk fonskiyonu ( $\phi(z)$ ) elde edilir. Standart normal değişkenin eklenik dağılım fonskiyonu  $\Phi(z)$  ile gösterilmektedir.  $z > 0$  için normal dağılım simetri özelliği kullanılırsa;

$$\Phi(z) = 1 - \Phi(-z) \quad (7)$$

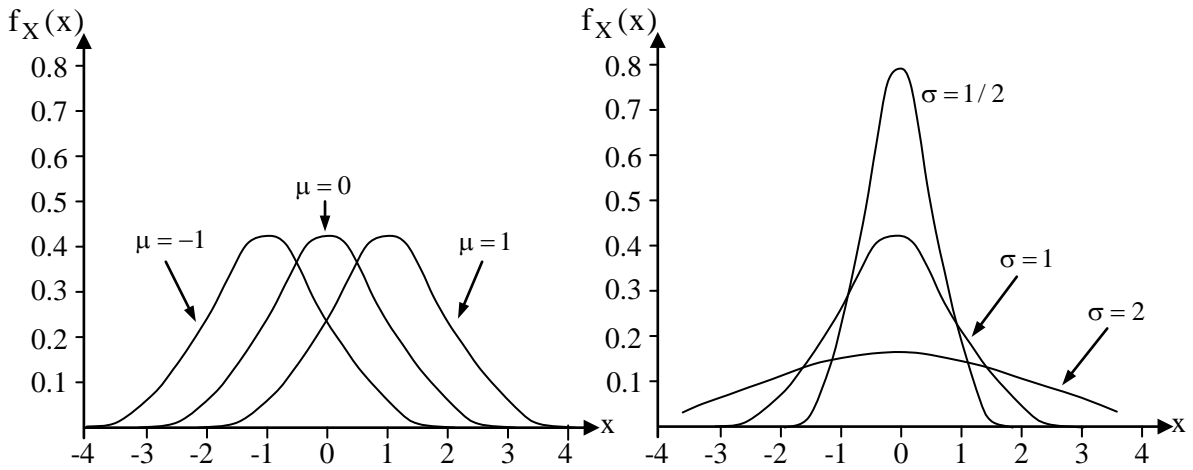
elde edilir.

Normal dağılımın eklenik dağılım fonksiyonu;

$$F_X(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right) \quad (8)$$

şeklinde tanımlanır.

Normal dağılımı daha iyi tanımlamak amacıyla Şekil 2’de farklı değerlere sahip normal dağılımın değişimi gösterilmektedir. Burada, aynı standart sapmaya, farklı ortalamaya sahip normal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonları (Şekil 2a) ve aynı ortalamaya, farklı standart sapmaya sahip normal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonları (Şekil 2b) verilmektedir.



a) Aynı standart sapma, farklı ortalama

b) Aynı ortalama, farklı standart sapma

Şekil 2. Normal dağılımlı rastgele bir değişkenin farklı ortalama ve standart sapmalar için olasılık yoğunluk fonksiyonları

#### 1.4.2.2. Lognormal Dağılım

Normal dağılımın özelliklerinin iyi bilinmesi ve kullanımının kolay olmasından dolayı, normal dağılmış olmayan değişkenler de uygun bir dönüşümle normal dağılıma uydurulur. Dönüştürülmüş dağılımlardan biri lognormal dağılımdır.  $Y = \ln(X)$  normal dağılım özelliği gösterdiğinde,  $X$  lognormal rastgele bir değişkendir. Lognormal rastgele

değişkenler sadece pozitif değerler için tanımlıdır ( $x \geq 0$ ). Lognormal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$f_X(x) = \frac{1}{x \sigma_{\ln(x)}} \phi\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln(x)}}{\sigma_{\ln(x)}}\right) \quad (9)$$

Burada,  $\mu_{\ln(x)}$  ve  $\sigma_{\ln(x)}$ , sırasıyla,  $\ln(x)$ 'in ortalamasını ve standart sapmasını göstermektedir ve değerleri;

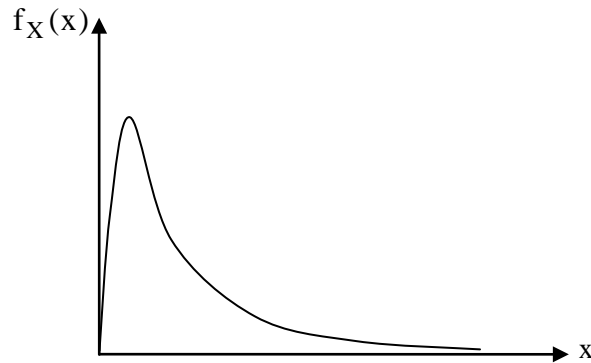
$$\mu_{\ln(x)} = \ln(\mu_X) - \frac{1}{2} \sigma_{\ln(x)}^2 \quad (10)$$

$$\sigma_{\ln(x)} = \sqrt{\ln(V_X^2 + 1)}$$

ifadeleri ile elde edilir. Bu dağılıma ait eklenik dağılım fonksiyonu;

$$F_X(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln(x)}}{\sigma_{\ln(x)}}\right) \quad (11)$$

olarak tanımlanır. Şekil 3'te lognormal dağılıma ait bir değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu verilmektedir.



Şekil 3. Lognormal dağılımına sahip bir değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

### 1.4.2.3. Gumbel Dağılımı

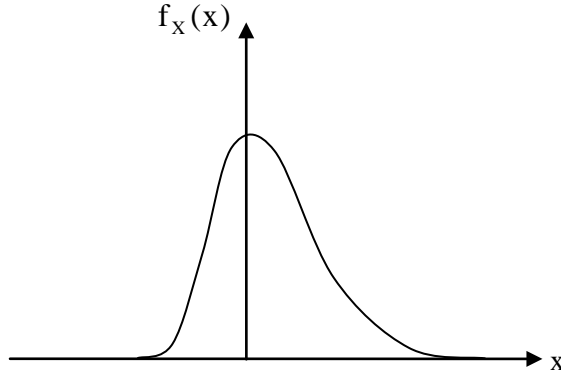
Gumbel dağılımı, ekstrem değerleri (en büyük veya en küçük değerler) karakterize etmek için kullanılan dağılımlardan biridir. Bu dağılıma ait olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$f_X(x) = \alpha e^{-e^{-\alpha(x-u)}} e^{-\alpha(x-u)} \quad (12)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\alpha$  ve  $u$  dağılım parametreleridir. Yaklaşık olarak ortalama ve standart sapma;

$$\begin{aligned} \mu_X &\approx u + \frac{0.577}{\alpha} \\ \sigma_X &\approx \frac{1.282}{\alpha} \end{aligned} \quad (13)$$

ifadeleri ile verilebilir. Gumbel dağılımlı bir değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Gumbel dağılımına sahip bir değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

### 1.4.3. Limit Durum

Yapı emniyetini belirleyebilmek için yapı davranışını tehlikeye sokacak unsurların sınırlarının tanımlanması gerekmektedir. Güvenilirlik analizinde, tanımlanan bu sınırlara



limit durum denir. Dolayısıyla, limit durum, yapının istenen ve istenmeyen performansı arasındaki bir sınırdır. Bu durumda, limit durumun ihlali, yapı için istenilmeyen koşulun oluşması anlamına gelmektedir. Bazı limit durum örnekleri Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Yapılar için limit durum çeşitleri (Melchers, 1999)

Limit Durum Çeşitleri	Tanımlama	Örnekler
Nihai emniyet	Yapının tamamının veya bir kısmının göçmesi	Kopma, kırılma, aşamalı göçme, korozyon, yangın...
Hasar		Aşırı veya erken oluşan çatlaklar, deformasyonlar veya kalıcı elastik olmayan deformasyonlar
Kullanılabilirlik	Normal kullanımın aksaması	Aşırı eğilme, titreşimler, yerel hasarlar

#### 1.4.4. Göçme Olasılığı

Yapılar için tanımlanan limit durum, matematiksel olarak limit durum fonksiyonu veya performans fonksiyonu olarak adlandırılır. Dayanım ve yük etkisi sırasıyla R ve Q ile gösterilirse limit durum fonksiyonu (Nowak ve Collins, 2000; Ditlevsen ve Madsen, 2002);

$$g(R,Q) = R-Q \quad (14)$$

olarak tanımlanır.  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  yapıları temsil eden yük ve dayanım parametrelerini (sabit yük, hareketli yük, uzunluk, derinlik, basınç dayanımı, atalet momenti...) göstermek üzere limit durum fonksiyon şartları;

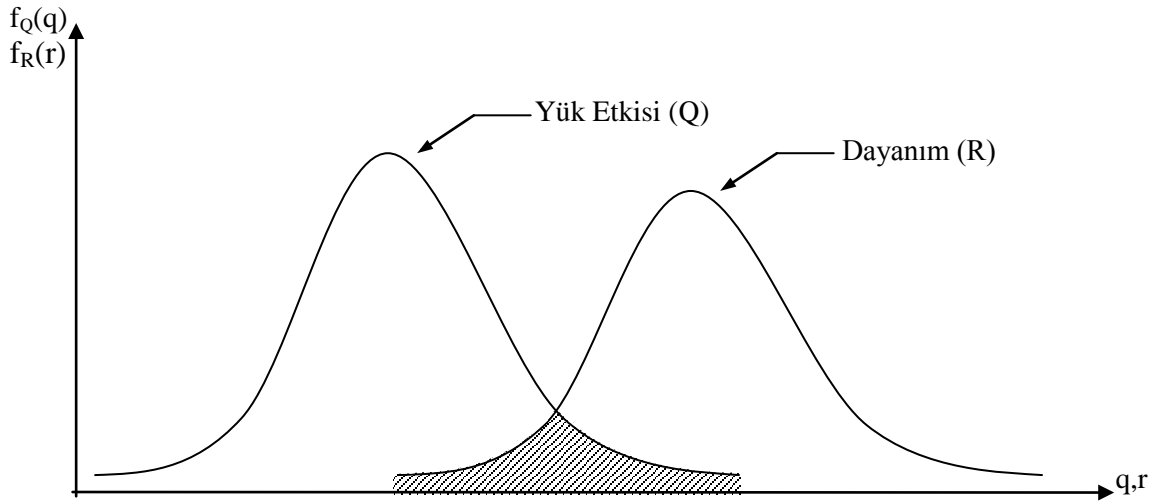
$$\begin{aligned} g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) > 0 & \longrightarrow \text{emniyetli durum} \\ g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0 & \longrightarrow \text{emniyetli ve emniyetsiz arasında sınır durum} \\ g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) < 0 & \longrightarrow \text{emniyetsiz durum} \end{aligned}$$

şeklinde gösterilir. Bir yapı elemanında, üzerine etkiyen yükün dayanımından fazla olması halinde göçeceği düşünülürse göçme olasılığı;

$$p_f = \begin{cases} P(R \leq Q) \\ P(R - Q \leq 0) \\ P\left(\frac{R}{Q} \leq 1\right) \\ P(\ln R - \ln Q \leq 1) \\ P[G(R - Q) \leq 0] \end{cases} \quad (15)$$

şeklinde değişik biçimlerde ifade edilebilir (Melchers, 1999).

Dayanım (R) ve yük etkisi (Q) için olasılık yoğunluk fonksiyonları sırasıyla  $f_R(\cdot)$  ve  $f_Q(\cdot)$  olarak tanımlanırsa R ve Q nun yoğunluk fonksiyonları Şekil 5'teki gibi gösterilebilir. Burada taralı alan göçme olasılığının değerini göstermektedir.



Şekil 5. Rastgele dağılım gösteren Q ve R için göçme olasılığı (Ranganathan, 2000)

Yükün (Q) olasılık değeri q ile ifade edilirse, Şekil 6'da gösterilen A1 alanı bu değere eşit olur. Buna göre;

$$P\left(q - \frac{dq}{2} < Q < q + \frac{dq}{2}\right) = f_q(q) dq = A_1 \quad (16)$$

şeklinde  $A_1$  alanı ifade edilebilir.  $R > q$  olasılığı Şekil 6'da gösterilen  $A_2$  alanına eşittir.  $A_2$  alanı;

$$P(R > q) = \int_q^{\infty} f_Q(q) dq = A_2 \quad (17)$$

olarak ifade edilebilir. Dayanım  $q$  değerini aldığı zaman, güvenilirlik bu iki olasılığın türünden yazılabilir. Buna göre;

$$dR_0 = f_q(q) dq \int_0^{\infty} f_R(r) dr \quad (18)$$

şeklini alır. Yapının güvenilirliği,  $R_0$ , yükün ( $Q$ ) muhtemel bütün değerlerinden dayanımın ( $R$ ) daha büyük olma olasılığı ile gösterilebilir.  $R_0$  değeri;

$$R_0 = \int dR_0 = \int_{-\infty}^{\infty} f_q(q) \left[ \int_q^{\infty} f_R(r) dr \right] dq \quad -\infty \leq q \leq \infty \quad (19)$$

olarak elde edilir (Ranganathan, 2000).

Göçme olasılığı;

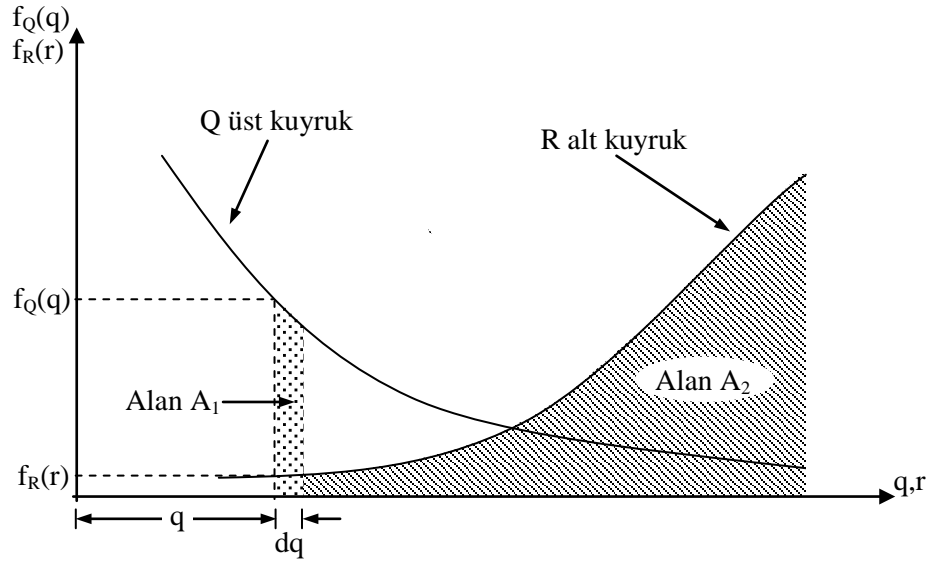
$$p_f = 1 - R_0 = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_q(q) [1 - F_R(q)] dq \quad (20)$$

$$p_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_q(q) F_R(q) dq \quad (21)$$

olarak elde edilir. Bu ifade genelleştirilirse;

$$p_f = P[g(X) \leq 0] = \int_{g(X) \leq 0} \dots \int f_x(x) dx \quad (22)$$

şeklinde yazılabilir (Thoft-Christensen ve Baker, 1982; Thoft-Christensen ve Murotsu, 1986; Melchers, 1999; Nowak ve Collins, 2000; Ranganathan, 2000).



Şekil 6. Güvenilirliğin belirlenmesi (Ranganathan, 2000)

### 1.5. Güvenilirlik Analiz Yöntemleri

Göçme olasılığını elde etmek için (22) nolu denklemdeki çoklu integralin hesaplanması gerekmektedir. Ancak, gerçek bir yapının veya sistemin olasılık yoğunluk fonksiyonunu (22) nolu denklemi kullanarak hesaplamak çok zor bir iştir. Çünkü pratikte, bütün rastgele değişkenlerin ortak olasılık yoğunluk fonksiyonlarını bir alanda tanımlamak imkânsızdır. Dolayısıyla, yapı güvenilirliğini elde etmek için yaklaşık yöntemler kullanılmaktadır.

Güvenilirlik analizinde, (14) nolu denklemde tanımlanan limit durum fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu fonksiyonda tanımlı olan dayanım ve yük, birçok parametreye bağlı olduğundan fonksiyonun bu parametrelerle oluşturulması gerekmektedir. Parametrelere bağlı olarak açık şekilde ifade edilebilen fonksiyona açık limit durum fonksiyonu denir. Kompleks yapıların limit durum fonksiyonlarını yapıların belirsiz parametrelerine bağlı olarak elde etmek zor bir iştir. Bu tür yapıların analizinde kesin çözüm yerine sonlu elemanlar gibi yaklaşık çözümler kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar kapalı formda çözüm yaptığından limit durum fonksiyonu açık olarak elde edilemez. Bu şekilde oluşturulan fonksiyonlara kapalı limit durum fonksiyonu denir.

### 1.5.1. Açık Limit Durum Fonksiyonu ile Güvenilirlik Analizi

Güvenilirlik analizi, seviye I, II, III ve IV olmak üzere dört seviyede gerçekleştirilmektedir. Bunlardan seviye IV, seviye I, II ve III'e ekonomik değerleri de ekleyerek, optimal maliyet-kâr analizi yapmaktadır. Tablo 2'de Avrupa Standardında (EC1) tanımlanan ilk üç seviye verilmektedir (Schueremans, 2003).

Tablo 2. Seviye I, II ve III'ün tanımları (Schueremans, 2003)

Seviye	Tanım
Seviye III	Seviye III yöntemleri hassasiyeti en yüksek olan yöntemlerdir. Bu yöntemler, yapı sisteminin veya yapı elemanlarının göçme olasılığını, bütün rastgele değişkenlerinin kesin olasılık yoğunluk fonksiyonunu kullanarak hesaplar (Monte Carlo yöntemi).
Seviye II	Birinci Derece ve İkinci Derece Güvenilirlik gibi Seviye II yöntemleri göçme olasılığını, idealleştirilmiş limit durum fonksiyonunun ortalamalarını kullanarak hesaplar.
Seviye I	Seviye I yönteminde, yapının göçme olasılığını hesaplamak yerine yapının güvenilir olup olmadığına bakılır. Bu yöntem, genellikle kısmi güvenlik faktörlerinin ortalamalarının hesabı ile gerçekleştirilir.

#### 1.5.1.1. Birinci Derece İkinci Moment Güvenilirlik Yöntemi (BDİMGY)

(14) nolu denklemde verilen iki değişkenli bir limit durum fonksiyonun göçme olasılığı, bazı dağılımlar için, (21) nolu denklemdeki integralin analitik olarak çözümü ile hesaplanabilir. Örneğin, dayanım (R) ve yük (Q) normal dağılıma,  $\mu_R$  ve  $\mu_Q$  ortalamasına ve  $\sigma_R^2$  ve  $\sigma_Q^2$  varyansına sahip ise (14) nolu denklem için ortalama ve standart sapma (Melchers, 1999; Ranganathan, 2000);

$$\mu_M = \mu_R - \mu_Q \quad (23)$$

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2} \quad (24)$$

şeklinde tanımlanır. Bu tanımlara bağlı olarak Cornell (1969) bir yapının güvenilirliğini;

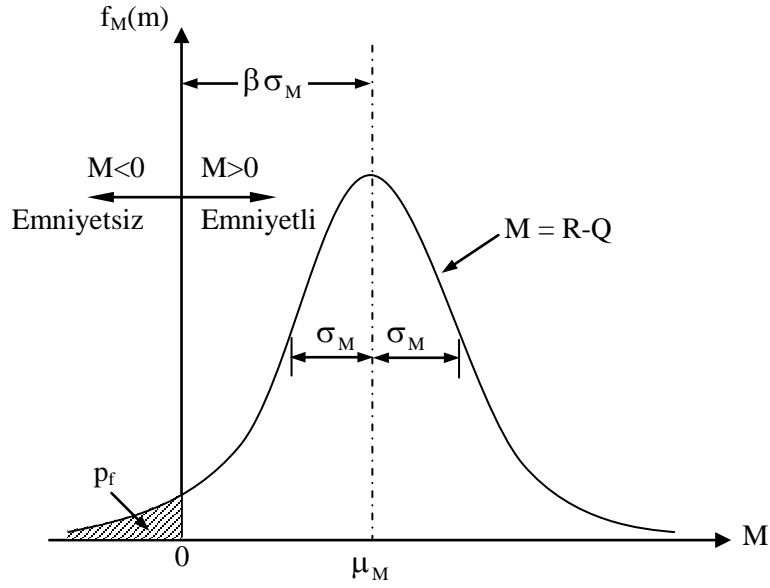
$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (25)$$

olarak ifade etmiştir  $\beta$ , yapı emniyetini belirlemek için tanımlanan bir katsayıdır ve güvenilirlik indeksi olarak adlandırılır. Buna göre, göçme olasılığı;

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (26)$$

şeklinde elde edilir.

Normal dağılıma sahip  $M$  değişkeni için emniyet sınırları Şekil 7'de verilmektedir. Şekil üzerindeki taralı alan göçme olasılığını göstermektedir.



Şekil 7. Limit durum fonksiyon dağılımı ( $M = R-Q$ ) (Ranganathan, 2000)

Eğer limit durum fonksiyonu çok değişkenli lineer bir fonksiyon ise ve bu değişkenler de normal dağılıma sahip ise, limit durum fonksiyonu;

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i \quad (27)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $X_i$  birbirinden bağımsız değişkenleri ifade etmektedir. Bu fonksiyonun güvenilirlik indeksi;

$$\beta = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_{X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \sigma_{X_i})^2}} \quad (28)$$

olarak elde edilir.

Lineer olmayan limit durum fonksiyonu Taylor serisi açılımı ile ifade edilirse;

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) \approx g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (X_i - x_i^*) \frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)} \quad (29)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  noktaları açılımın uygulandığı noktaldır. Bu lineerleştirme noktaları için rastgele değişkenlerin ortalama değerleri alınabilir. Bu durumda (29) denklemi,

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) \approx g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}) + \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_{X_i}) \frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n})} \quad (30)$$

haline dönüşür. Bu lineer olmayan limit durum fonksiyonunun güvenilirlik indeksi;

$$\beta = \frac{g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \sigma_{X_i})^2}} \quad (31)$$

şeklinde dir. Burada;

$$a_i = \frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}} \quad (32)$$

olarak tanımlanır. (31) nolu denklemde tanımlı olan güvenilirlik indeksine birinci derece ikinci moment ortalama değer güvenilirlik indeksi denir (Melchers, 1999; Nowak ve Collins, 2000).

### 1.5.1.2. Birinci Derece Güvenilirlik Yöntemi (BDGY)

Bir limit durum fonksiyonu sınırları veya bölgesi değiştirilmeden başka bir fonksiyon olarak ifade edildiğinde, güvenilirlik indeksinin değişmemesi gerekir. Ancak, güvenilirlik indeksi (31) nolu denkleme göre hesaplandığında değeri değişmektedir. Bu olay, hesaplanan güvenilirlik indeksinin limit durum fonksiyonunun özel biçimine bağlı olduğunu göstermektedir. Değişmezlik problemi olarak adlandırılan bu problem, Hasofer ve Lind (1974) tarafından güvenilirlik indeksi hesabında ortalamalar yerine “tasarım noktası” kullanılarak giderilmektedir. Tasarım noktasının yeri bilinmediği için güvenilirlik indeksinin çözümünde iterasyon kullanmak zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.

Güvenilirlik analizinde, ilk adım olarak, bütün değişkenler standart normal formlarına (sıfır ortalamalı birim varyanslı normal dağılım) dönüştürülürler. Bu sayede, değişkenler boyutsuz bir ortamda temsil edilebilmektedir. İndirgenmiş değişken,  $Z_i$ , ile gösterilirse, normal dağılımlı bir değişken için;

$$Z_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (33)$$

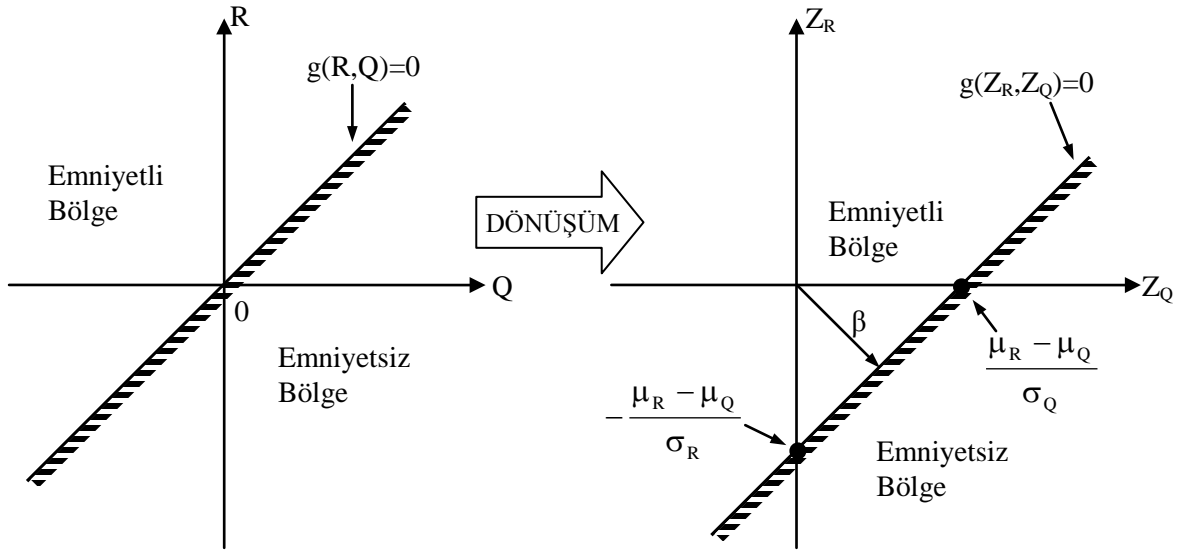
Güvenilirlik indeksinin geometrik olarak tanımı, indirgenmiş değişkenlerin oluşturduğu eksen takımının orijini ile bu eksen takımında tanımlı  $g(Z_R, Z_Q)=0$  fonksiyonu arasındaki en kısa mesafedir. Eğer limit durum fonksiyonu lineer ise, daha önceden de bahsedildiği gibi güvenilirlik indeksi (28) nolu denklem kullanılarak hesaplanmaktadır. Limit durum fonksiyonu lineer değil ise, güvenilirlik indeksi, Hasofer ve Lind (1974) tarafından  $g(Z)=0$  şartına bağlı olarak;

$$\beta = \min\left(\sqrt{Z^T Z}\right) \quad (34)$$

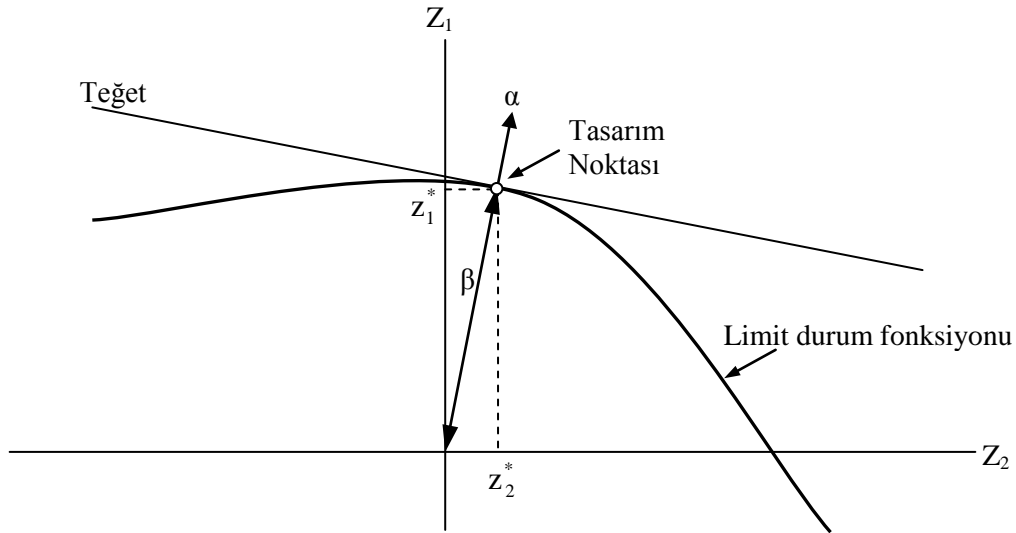
denkleminin hesabı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 8’de ve Şekil 9’da sırasıyla lineer ve lineer olmayan limit durum fonksiyonları için güvenilirlik indeksinin geometrik olarak gösterimi verilmektedir.



Şekil 8. Güvenilirlik indeksinin geometrik olarak gösterimi (Thoft-Christensen ve Murotsu, 1986; Nowak ve Collins, 2000)



Şekil 9. Hasofer-Lind güvenilirlik indeksi (Melchers, 1999; Nowak ve Collins, 2000)

Hasofer ve Lind (1974)’in geliştirdiği güvenilirlik yönteminde değişkenlerin dağılımı dikkate alınmamaktadır. Bunun anlamı, bütün değişkenler normal dağılıma sahip kabul edilmektedir. Rackwitz ve Fiessler (1978) değişkenlerin dağılımlarını dikkate alarak güvenilirlik indeksi hesabını geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, her bir normal olmayan

dağılıma sahip değişkenlerin ortalamaları ve standart sapmaları yerine “eşdeğer normal” değerleri kullanılmaktadır.

BDGY’de temel algoritma olarak Rackwitz-Fiessler yöntemi alınmasına rağmen, birçok araştırmacı tasarım noktası hesaplama işlemini geliştirmeye çalışmışlardır. Bu tez çalışmasında, geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler yöntemi (Zhang ve Der Kiureghian, 1997; Haukaas, 2001) kullanılmıştır. Bu yöntemde, her bir iterasyonda kullanılan adım boyu ve doğrultusu farklı bir algoritma ile hesaplanmaktadır. Aşağıda, bu yöntem için hesap adımları verilmektedir (Zhang ve Der Kiureghian, 1997; Haukaas, 2001).

1.  $n$  tane değişken için limit durum fonksiyonu,  $g(X)$ , oluşturulur.
2. Başlangıç tasarım noktası,  $X = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)^T$ , seçilir. Başlangıç tasarım noktası için genellikle değişkenlerin ortalama değerleri alınır.
3.  $X$  lere bağlı olarak indirgenmiş değişkenler,  $Z = (z_1 \ z_2 \ \dots \ z_n)^T$ ,

$$z_i = \Phi^{-1}(F_X(x_i)) \quad (35)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanır.

4.  $\{z_i\}$  değerleri, standart normal uzaydaki  $\{x_i\}$  değerlerine dönüştürülür (iterasyonun ilk adımında bu madde atlanır):

$$x_i = F_X^{-1}(\Phi(z_i)) \quad (36)$$

5.  $\{x_i\}$  değerleri  $g(X)$  fonksiyonunda yerine yazılarak  $g$  değeri elde edilir. İterasyonun ilk adımında  $g_0=g$  olarak hesaplanır.
6. Gradyan vektörü hesaplanır,

$$\nabla Z g = \left. \frac{\partial g}{\partial Z} \right|_z = \left. \frac{\partial g}{\partial X} \right|_x [J]^{-1} \quad (37)$$

Burada,  $J$  Jacobi matrisini göstermektedir ve;

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial Z_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial Z_1}{\partial X_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Z_n}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial Z_n}{\partial X_n} \end{bmatrix} \quad (38)$$

ile temsil edilmektedir.

7. Doğrultman kosinüsleri hesaplanır,

$$\alpha = -\frac{\nabla Z \mathbf{g}}{\|\nabla Z \mathbf{g}\|} \quad (39)$$

8. Yakınsama kriterleri hesaplanır. Sınır değerler ( $e_1$  ve  $e_2$ ) genellikle  $10^{-3}$  alınır.

$$\left| \frac{\mathbf{g}}{\mathbf{g}_0} \right| < e_1 \quad (40)$$

$$Z - \alpha^T Z \alpha < e_2$$

9. Bir önceki maddedeki şartlar sağlanmadıysa, bir sonraki adım için yeni tasarım noktası hesaplanır,

$$Z_{k+1} = Z_k + \lambda_k \mathbf{d}_k \quad (41)$$

Burada,  $\mathbf{d}_k$  ve  $\lambda_k$  sırasıyla adım doğrultusunu ve adım boyunu göstermektedir:

$$\mathbf{d}_k = \left( \alpha^T Z_k + \frac{\mathbf{g}}{\|\nabla Z \mathbf{g}_k\|} \right) \alpha - Z_k \quad (42)$$

$$\lambda_k = \arg \min \{m(Z_k + \lambda d_k) - m(Z_k)\}$$

$$m(Z) = \frac{1}{2} \|Z\|^2 + c|g(Z)| \quad (43)$$

$$c > \frac{\|Z\|}{\|\nabla Z g\|}$$

m, merit fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır.

10. 4-9 maddeleri işlem yakınsayana kadar tekrarlanır.

11. Güvenilirlik indeksi,

$$\beta = \alpha^T Z \quad (44)$$

olarak elde edilir.

12. Göçme olasılığı (26) nolu denklemden hesaplanır.

### 1.5.1.3. İkinci Derece Güvenilirlik Yöntemi (İDGY)

BDGY’de limit durum yüzeyini belirlemek için lineer yüzey (Taylor serisinin açılımı ile) kullanılmaktadır. Ancak yüksek mertebede lineer olmayan yüzeyler için bu yaklaşım yeterli olmamaktadır. İkinci derece güvenilirlik yöntemi, limit durum fonksiyonunun yüksek mertebede lineer olmama durumu için birinci derece güvenilirlik analizinde oluşan hataları gidermek için geliştirilmiştir. Bu yöntemde, bu tür yüzeyleri tanımlamak için değişik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak parabolik, ikinci veya daha yüksek dereceden yüzeyler verilebilir (Ranganathan, 2000; Schueremans, 2003).

İkinci derece güvenilirlik analizinde, ikinci derece Taylor açılımı kullanılmaktadır. Standart normal uzayda bu açılım yapılırsa (Fiessler ve diğ., 1979),

$$g(Z) = \beta_F - \alpha^T * Z + \frac{1}{2} (Z - Z^*)^T B (Z - Z^*) \quad (45)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $\beta_F$  ve  $Z^*$  sırasıyla birinci derece güvenilirlik analizinden elde edilen güvenilirlik indeksini ve standart normal uzaydaki tasarım noktasını göstermektedir. B matrisi,

$$B = \frac{\nabla^2 Zg}{\|\nabla Zg\|} \quad (46)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Gerekli ara işlemler yapıldıktan sonra;

$$\tilde{g}(X) = -(X_n - \beta_F) + \frac{1}{2} \tilde{X}^T \tilde{A} \tilde{X} \quad (47)$$

fonksiyonu elde edilir. Burada,

$$\tilde{X} = (X_1, X_2, \dots, X_{n-1}) \quad (48)$$

$$\tilde{A} = HBH^T$$

şeklinde ifade edilir. H dönüştürme matrisini göstermektedir.

$\tilde{A}$ , asal eğriliklerin hesabında kullanılmaktadır. Göçme yüzeyinin tasarım noktasındaki eğriliği,  $\kappa_i$ ,  $\tilde{A}$  matrisinin özdeğerleri hesaplanarak elde edilir:

$$|A' - \kappa I| = 0 \quad (49)$$

Breitung (1984), göçme olasılığını asimptotik yaklaşım kullanarak,

$$p_f = \Phi(-\beta_F) \prod_{j=1}^{n-1} (1 + \beta_F \kappa_j)^{-1/2} \quad (50)$$

ifadesi ile temsil etmiştir (Breitung, 1994).

Birçok araştırmacı İDGY için yeni yaklaşımlar geliştirerek göçme olasılığı hesabı için daha kesin sonuçlar bulmuşlardır (Tvedt, 1983; Der Kiureghian vd., 1987; Tvedt,

1988; Hohenbichler ve Rackwitz, 1988; Tvedt, 1990; Der Kiureghian ve De Stefano, 1991; Koyluoglu ve Nielsen, 1994; Cai ve Elishakoff, 1994; Zhao ve Ono, 1999a; Zhao ve Ono, 1999b).

Bu tez çalışmasında, Tvedt (1983) tarafından geliştirilen üç terimli formül kullanılmıştır:

$$\begin{aligned}
 p_f &= \Phi(-\beta_F) \prod_{j=1}^{n-1} (1 + \beta_F \kappa_j)^{-1/2} + A_2 + A_3 \\
 A_2 &= [\beta_F \Phi(-\beta_F) - \phi(-\beta_F)] \left\{ \prod_{j=1}^{n-1} (1 + \beta_F \kappa_j)^{-1/2} - \prod_{j=1}^{n-1} (1 + (\beta_F + 1) \kappa_j)^{-1/2} \right\} \\
 A_3 &= (\beta_F + 1) [\beta_F \Phi(-\beta_F) - \phi(-\beta_F)] \left\{ \prod_{j=1}^{n-1} (1 + \beta_F \kappa_j)^{-1/2} - \operatorname{Re} \left[ \prod_{j=1}^{n-1} (1 + (\beta_F + i) \kappa_j)^{-1/2} \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{51}$$

#### 1.5.1.4. Monte Carlo Yöntemi (MCY)

MCY, herhangi bir fiziksel test yapmadan sayısal olarak sonuç üretmek amacıyla kullanılan özel bir tekniktir. Her bir değişkene karşılık rastgele örnek değerler olasılık yoğunluk fonksiyonlarına göre üretilmektedir. Üretilen bu değerler limit durum fonksiyonunda yerine konularak fonksiyonun alacağı değer kontrol edilmektedir (Nowak ve Collins, 2000). MCY’de en büyük dezavantaj çok fazla iterasyon gerektirmesidir. Özellikle, göçme olasılığının  $10^{-6}$ ’dan küçük olması durumunda bu yöntemin kullanılması imkânsız hale gelmektedir. Örnek sayısını azaltarak kesin sonucu elde etmek için birçok önemli örnekleme çalışması yapılmıştır (Bucher, 1988; Bjerager, 1988; Karamchandani ve Cornell, 1991). Bu tez çalışmasında MCY’nin direkt ve önemli örnekleme yöntemleri kullanılmıştır.

##### 1.5.1.4.1. Direkt Örnekleme Monte Carlo Yöntemi (DÖMCY)

Bu yöntemde, göçme olasılığı,

$$p_f = \int \cdots \int I[g(x) \leq 0] f_x(x) dx \tag{52}$$

$$p_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(\hat{x}_j) \leq 0] \quad (53)$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır. Burada,  $N$  üretilen örnek sayısını,  $\hat{x}_j$  her bir değişken için üretilen örnek değeri ve  $I[ ]$  gösterge fonksiyonunu göstermektedir. Gösterge fonksiyonunun değeri,

$$I[g(\hat{x}_j) \leq 0] = \begin{cases} 1 & \rightarrow g(\hat{x}_j) \leq 0 \\ 0 & \rightarrow g(\hat{x}_j) > 0 \end{cases} \quad (54)$$

şeklinde hesaplanır (Ranganathan, 2000; Schueremans, 2003; Melchers ve Ahammed, 2004).

Göçme olasılığının varyansı ve değişim katsayısı,

$$\sigma_{p_f}^2 = \frac{p_f(1-p_f)}{N} \quad (55)$$

$$V_{p_f} = \frac{\sigma_{p_f}}{p_f}$$

ifadeleri ile elde edilmektedir. (55) nolu denklemden gerekli olan minimum örnek sayısı,  $N$ ,

$$N \geq \frac{1}{V_{p_f}^2} \left( \frac{1}{p_f} - 1 \right) \quad (56)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

#### 1.5.1.4.2. Önemli Örneklemeli Monte Carlo Yöntemi (ÖÖMCY)

Bu yöntem, DÖMCY'nin verimini artırmak için geliştirilmiş bir yöntemdir. Uygun bir önemli örnekleme yoğunluk fonksiyonu,  $h_v( )$ , seçimiyle birlikte, bu yöntem

DÖMCY'nin doğruluğu ve verimliliği üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Başarılı bir  $h_v(\cdot)$  fonksiyonu tercihi ile hem simülasyon sayısında önemli bir azalma olur hem de yanlış tercih edilen örneklemelerin yol açacağı hatalı sonuçlardan arınarak güvenli sonuçlara ulaşılır (Melchers, 1999; Ang ve Tang, 2007).

Bu yöntem (22) nolu denklemdeki göçme olasılığına uygulanırsa;

$$p_f = \int \cdots \int \mathbf{I}[g(x) \leq 0] \frac{f_x(x)}{h_v(x)} h_v(x) dx \quad (57)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade (53) nolu denklemdeki gibi yazılırsa;

$$p_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ \mathbf{I}[g(\hat{v}_j) \leq 0] \frac{f_x(\hat{v}_j)}{h_v(\hat{v}_j)} \right\} \quad (58)$$

bağıntısı elde edilir. Burada,  $\hat{v}_j$ ,  $h_v(\cdot)$  önemli örnekleme fonksiyonundan alınan örnek değerleri ifade etmektedir (Melchers, 1999; Schueremans ve Van Gemert, 2003).

### 1.5.2. Kapalı Limit Durum Fonksiyonu ile Güvenilirlik Analizi

Çoğu pratik problemlerde yapı davranışı (yerdeğiştirme, gerilme, kesit tesirleri vb.) yaklaşık yöntemlerle birlikte belirli bir algoritma sonucu elde edilmektedir. Örneğin, sonlu elemanlar yöntemi yapı davranışını ortaya koymak için kullanılan en etkili yaklaşık yöntemlerden biridir. Yapı davranışının belirlenmesinde sonlu elemanlar gibi yöntemlerin kullanılması, limit durum fonksiyonun açık olarak ifade edilememesine neden olmaktadır. Bu durumda, limit durum fonksiyonu sonlu elemanlar kullanılarak elde edilen sonuçlara bağlı olarak kurulabilmektedir. Bu tür limit durum fonksiyonlarına kapalı limit durum fonksiyonu denilmektedir. Kapalı limit durum fonksiyonlarıyla güvenilirlik analizi, ancak, güvenilirlik analiz yöntemleri ile sonlu elemanlar algoritmasının birleştirilmesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu konu ile yapılmış çalışmalarda genel olarak direkt birleştirme yöntemi, yanıt yüzeyi yöntemi ve optimizasyon yöntemi kullanılmıştır (Maymon, 1994; Borri ve Speranzini, 1997; Mohamed ve Lemaire, 1998; Bucher vd., 2000; Pendola vd., 2000; Lemaire ve Mohamed, 2000; Sudret ve Der Kiureghian, 2002;



Nie ve Ellingwood, 2005). Bu tez çalışmasında direkt birleştirme ve yanıt yüzeyi yöntemi kullanıldığından, bu yöntemler hakkında bilgi verilecektir.

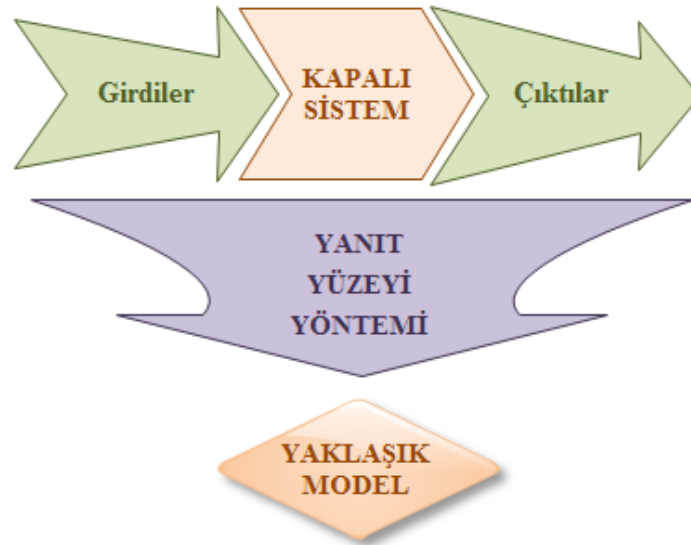
### 1.5.2.1. Direkt Birleştirme Yöntemi

Direkt birleştirme yönteminde, güvenilirlik analiz algoritması ile sonlu elemanlar için kullanılan program dosya alışverişi ile birleştirilmektedir. Direkt birleştirme yöntemine göre, güvenilirlik analiz hesaplama adımları aşağıdaki gibi olmaktadır:

1. Güvenilirlik analiz algoritmasına başlanır,
2. Limit durum fonksiyonuna ihtiyaç duyulduğu zaman, sonlu elemanlar programının veri dosyası içinde rastgele değişkenlere ait değerler değiştirilerek yeni veri dosyası hazırlanır,
3. Sonlu elemanlar için kullanılan program çalıştırılır,
4. İstenen sonuç bir dosyaya yazdırılır,
5. Güvenilirlik analizinde bu dosyadan değer okunarak işleme devam edilir.

### 1.5.2.2. Yanıt Yüzeyi Yöntemi

Yanıt yüzeyi yöntemi, girdiler ile çıktılar arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Şekil 10'da bu ilişki gösterilmektedir.



Şekil 10. Yanıt yüzeyi yönteminin şematik olarak gösterimi

Yanıt yüzeyi yönteminin güvenilirlik analizindeki kullanım amacı, kapalı limit durum fonksiyonlarını ( $g(X)$ ) dikkate alınan değişkenler cinsinden polinom türünde olan açık limit durum fonksiyonuna ( $\check{g}(X)$ ) dönüştürmektir. Genel ifadeyle karma terimleri ihmal edilmemiş ikinci dereceden bir polinom (Myers, 1971),

$$\check{g}(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (59)$$

ifadesi ile temsil edilir. Burada  $n$  değişken sayısını,  $a$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  ve  $d_{ij}$  polinomun katsayılarını ve  $\varepsilon$  yüksek mertebel i terimlerin dikkate alınmamasından kaynaklı hatayı göstermektedir. Pratikte, (59) nolu denklem yerine karma terimleri ihmal edilmiş ikinci derece polinom kullanılmaktadır. Bu durumda, (59) nolu ifade;

$$\check{g}(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 + \varepsilon \quad (60)$$

şekline dönüşür. Bu fonksiyonun katsayılarının ( $a$ ,  $b_i$  ve  $c_i$ ) hesabı için örnek değerler seçilmesi gerekmektedir. Bunun için birçok örnekleme yöntemi mevcuttur. Bunlardan yıldız tasarımı, tam faktöriyel tasarımı, merkezi karma tasarımı ve Box-Behnken tasarımı üç parametre için Şekil 11'de verilmektedir.

Bucher ve Bourgund (1990), güvenilirlik analizinde yıldız tasarımını dikkate almış ve örnek noktaları  $x_i$  koordinat ekseninde ortalamalar etrafında seçmiştir. Buna göre örnek değerler,

$$x_i = \mu_i \mp f\sigma_i \quad (61)$$

formülü ile elde edilebilir. Burada  $f$ , 1~3 arasında değişen keyfi bir katsayıyı göstermektedir. Üç değişken için örnek değerler matrisi;

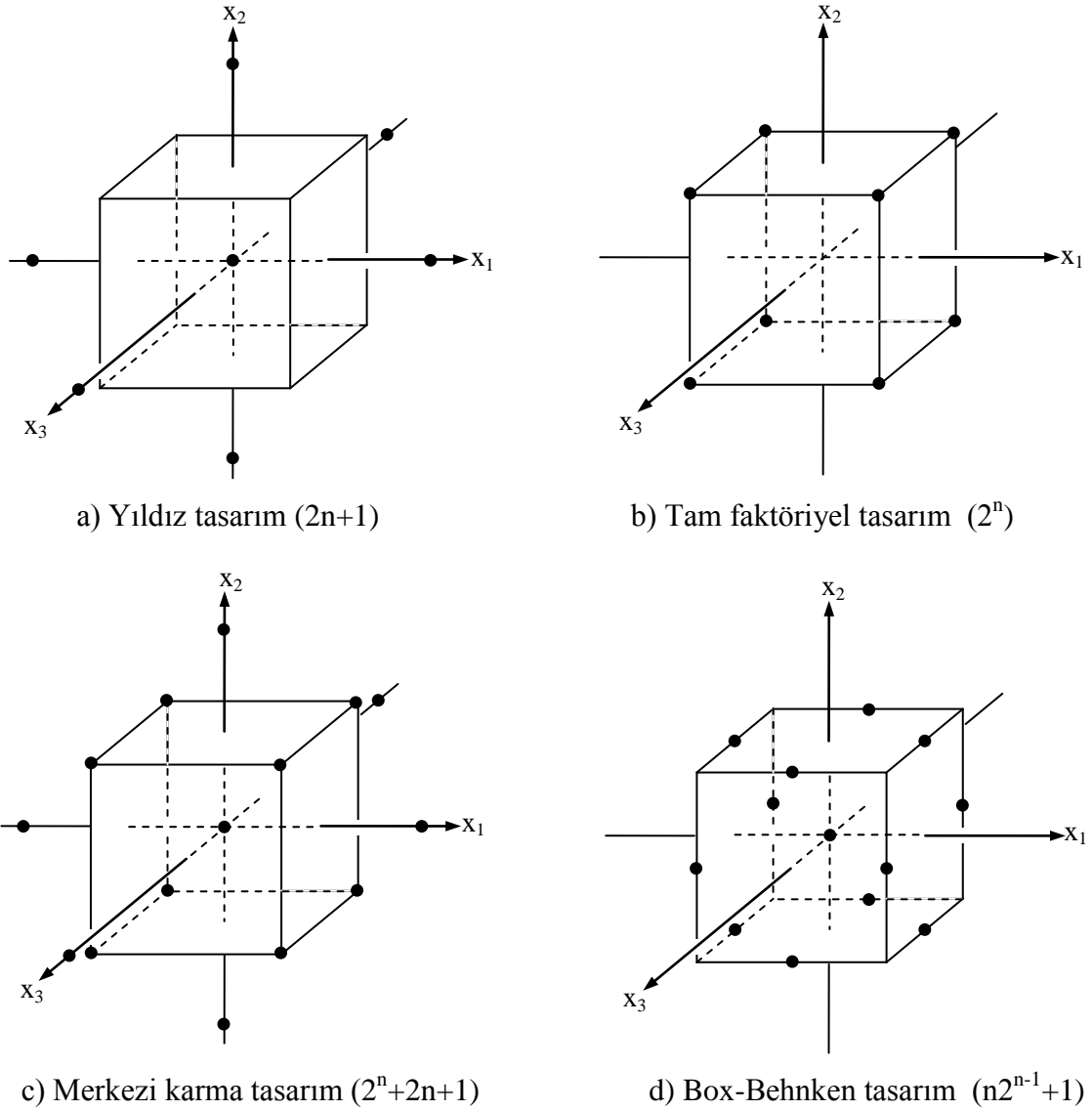
$$X = \begin{bmatrix} \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 \\ \mu_1 + k\sigma_1 & \mu_2 & \mu_3 \\ \mu_1 - k\sigma_1 & \mu_2 & \mu_3 \\ \mu_1 & \mu_2 + k\sigma_2 & \mu_3 \\ \mu_1 & \mu_2 - k\sigma_2 & \mu_3 \\ \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 + k\sigma_3 \\ \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 - k\sigma_3 \end{bmatrix} \quad (62)$$

şeklinde tanımlanır. (60) nolu denklemde tanımlanan ikinci derece yaklaşık fonksiyonun katsayıları,  $ks$ , en küçük kareler metodu kullanılarak elde edilebilir:

$$ks = (W^T W)^{-1} W^T y \quad (63)$$

Burada,  $y$  örnek değerlere bağlı olarak performans fonksiyonundan elde edilen yanıt vektörünü ve  $W$  örnek değerleri içeren tasarım matrisini göstermektedir. Tasarım matrisi, karma terimleri ihmal edilmiş ikinci derece polinom ve üç değişkenli bir problem için ortalamalar etrafında aşağıdaki gibi elde edilir:

$$W = \begin{bmatrix} 1 & \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 & (\mu_1)^2 & (\mu_2)^2 & (\mu_3)^2 \\ 1 & \mu_1 + k\sigma_1 & \mu_2 & \mu_3 & (\mu_1 + k\sigma_1)^2 & (\mu_2)^2 & (\mu_3)^2 \\ 1 & \mu_1 - k\sigma_1 & \mu_2 & \mu_3 & (\mu_1 - k\sigma_1)^2 & (\mu_2)^2 & (\mu_3)^2 \\ 1 & \mu_1 & \mu_2 + k\sigma_2 & \mu_3 & (\mu_1)^2 & (\mu_2 + k\sigma_2)^2 & (\mu_3)^2 \\ 1 & \mu_1 & \mu_2 - k\sigma_2 & \mu_3 & (\mu_1)^2 & (\mu_2 - k\sigma_2)^2 & (\mu_3)^2 \\ 1 & \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 + k\sigma_3 & (\mu_1)^2 & (\mu_2)^2 & (\mu_3 + k\sigma_3)^2 \\ 1 & \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 - k\sigma_3 & (\mu_1)^2 & (\mu_2)^2 & (\mu_3 - k\sigma_3)^2 \end{bmatrix} \quad (64)$$



Şekil 11. Örneklemeye yöntemleri

Yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizinin hesap adımları aşağıdaki gibi verilebilir:

1. Limit durum fonksiyonunu temsilen ikinci derece karma terimleri ihmal edilmiş bir polinom seçilir,
2. Örnek değerler ortalamalar etrafında seçilir,
3. Bilinmeyen katsayılar en küçük kareler yöntemi ile elde edilir,
4. Elde edilen yaklaşık  $\hat{g}^{(1)}(X)$  fonksiyonuna, güvenilirlik analiz yöntemlerinden biri uygulanarak  $X_D$  tasarım noktası hesaplanır,

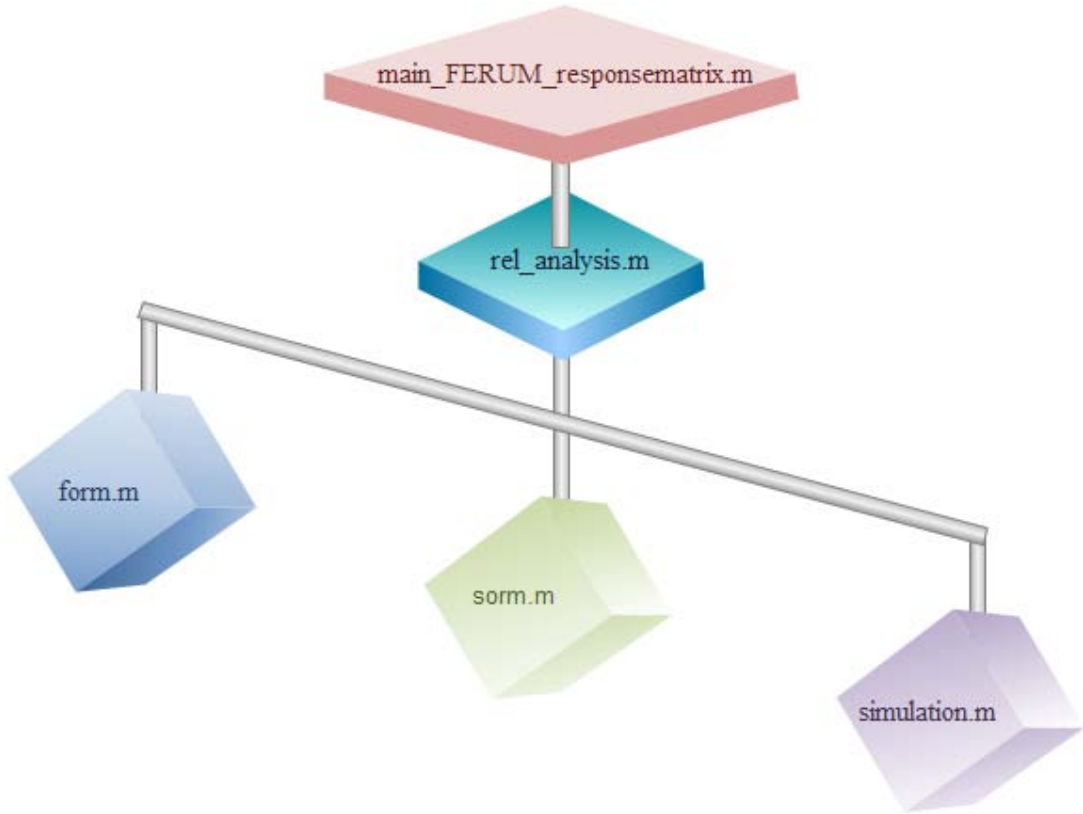
5.  $X_D$  tasarım noktaları,  $X_M$  merkezi noktaları elde etmek için kullanılır. Yeni  $X_M$  ler  $X$ 'lerin ortalama vektöründen ( $\mu$ ),  $X_D$  tasarım noktalarına uzanan doğru üzerinde seçilir. Dolayısıyla  $g(X)=0$  fonksiyonuna yakın noktalar tespit edilir:

$$X_M = \mu + (X_D - \mu) \frac{g(\mu)}{g(\mu) - g(X_D)} \quad (65)$$

6.  $X_M$  ler etrafında yeni bir örnek değer grubu elde edilir,
7. Yaklaşık fonksiyonu yeniden belirlemek için en küçük kareler yöntemi kullanılarak katsayılar belirlenir,
8.  $\hat{g}^{(2)}(X)$  yaklaşık fonksiyonu elde edilir,
9. En son elde edilen  $\hat{g}^{(2)}(X)$  açık limit durum fonksiyonuna göre güvenilirlik analizi yöntemlerinden biri seçilerek göçme olasılığı hesaplanır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Bu tez çalışmasında, güvenilirlik analizi-sonlu elemanlar birleştirilmesinde kullanılan yanıt yüzeyi yöntemi için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu amaçla, açık limit durum fonksiyonlarının güvenilirlik analizini Birinci Derece Güvenilirlik Yöntemi (BDGY), İkinci Derece Güvenilirlik Yöntemi (İDGY), Direkt Örneklemeli Monte Carlo Yöntemi (DÖMCY) ve Önemli Örneklemeli Monte Carlo Yöntemi (ÖÖMCY) ile yapabildiği MATLAB programlama dilinde yazılmış FERUM programı (URL-1, 2004; Zhang ve Der Kiureghian, 1997; Haukaas, 2001) çalışmanın başlangıç aşaması için kullanılmıştır. Bu program, açık kodlu olup Şekil 12’de verilen ağ ile ana dosyalar birbirine bağlıdır.



Şekil 12. FERUM programı çalışma ağı

Şekil 12’de gösterilen dosyalar ve çalışma ağına verilmeyen ama önemli olduğu düşünülen birkaç dosyanın programdaki görevleri ve açıklamaları Tablo 3’te, kodları EK-1’de verilmiştir.

Tablo 3. FERUM programında kullanılan başlıca dosyalar

Dosya ismi	Görevi	Açıklaması
main_FERUM_responsematrix.m	Ana program	Değişkenlere ait ortalama ve standart sapma değerleri dosyadan okunur ve güvenilirlik analiz yöntemi seçilir.
rel_analysis.m	Alt program	Değişkenlere ait dağılım, yakınsama kriteri ve simülasyon sayısı tanımlanır ve seçilen güvenilirlik analiz yöntemi için alt program çağrılır.
form.m	Alt program	Birinci derece güvenilirlik analizi gerçekleştirilir.
sorm.m	Alt program	İkinci derece güvenilirlik analizi gerçekleştirilir.
simulation.m	Alt program	Monte Carlo analizleri gerçekleştirilir.
responsematrix.m	Alt program	Limit durum fonksiyonu tanımlanır.
main_prob.dat	Veri dosyası	Değişkenlere ait ortalama ve standart sapma değerleri bu dosyada verilir.

FERUM programında yer alan güvenilirlik analiz yöntemlerinin formülasyonları daha önceki bölümlerde verilmişti. Hesap adımlarının daha iyi anlaşılması açısından Şekil 13, Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16'da sırasıyla DÖMCY'ye, ÖÖMCY'ye, BDGY'ye ve İDGY'ye ait akış diyagramları verilmektedir. Aynı ayrı verilen bu algoritmalar, programda ana bir program ile birlikte birbirine bağlıdır.

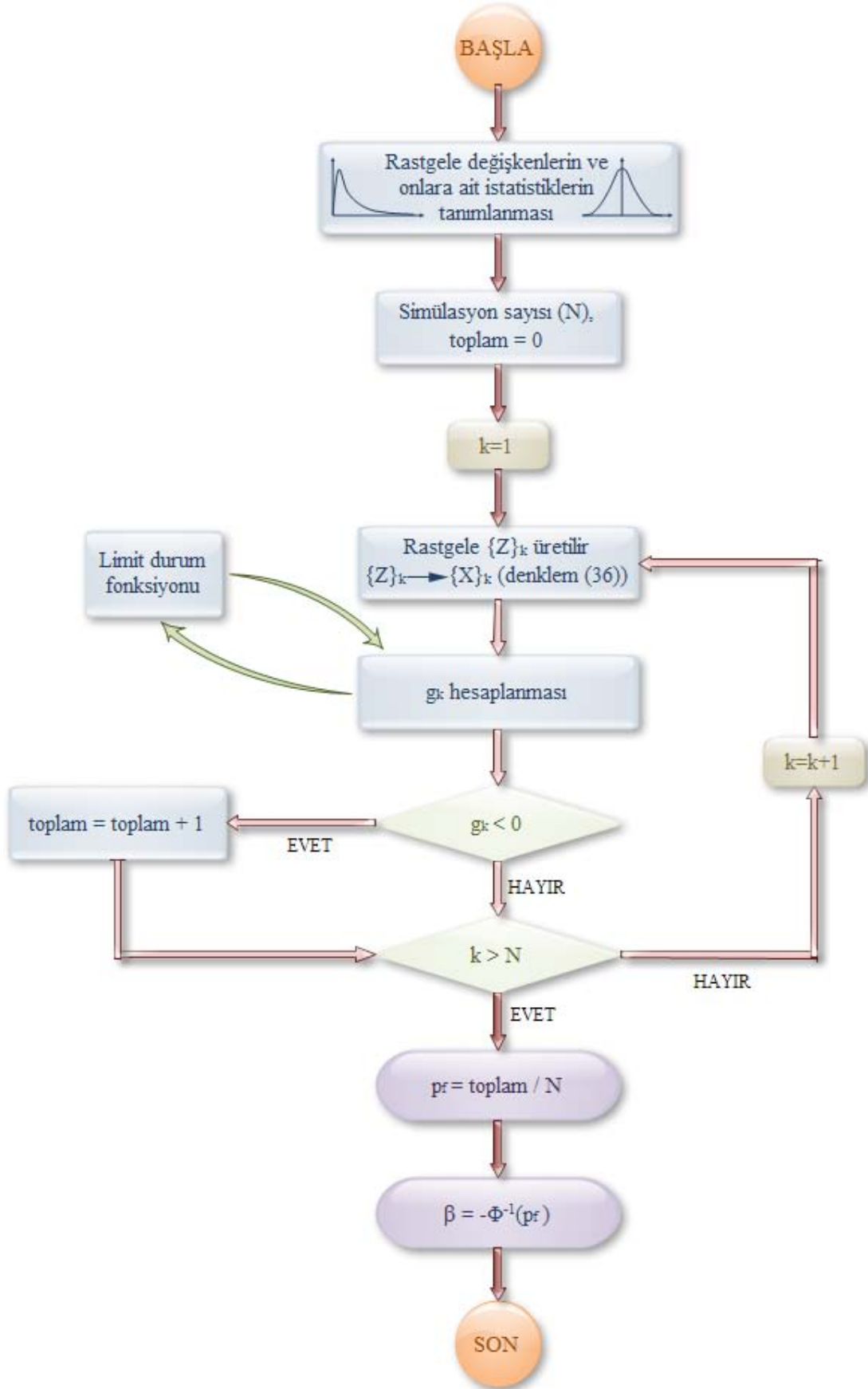
Tez çalışmasında, FERUM güvenilirlik analiz programına eklemeler yapmak suretiyle aşağıda verilen çalışmalar gerçekleştirilmiştir:

Açık limit durum fonksiyonları için:

1. FERUM programına açık limit durum fonksiyonları için yanıt yüzeyi yöntemi eklenmiştir.
2. Geliştirilmiş yanıt yüzeyi algoritması oluşturulmuş ve FERUM programına eklenmiştir.

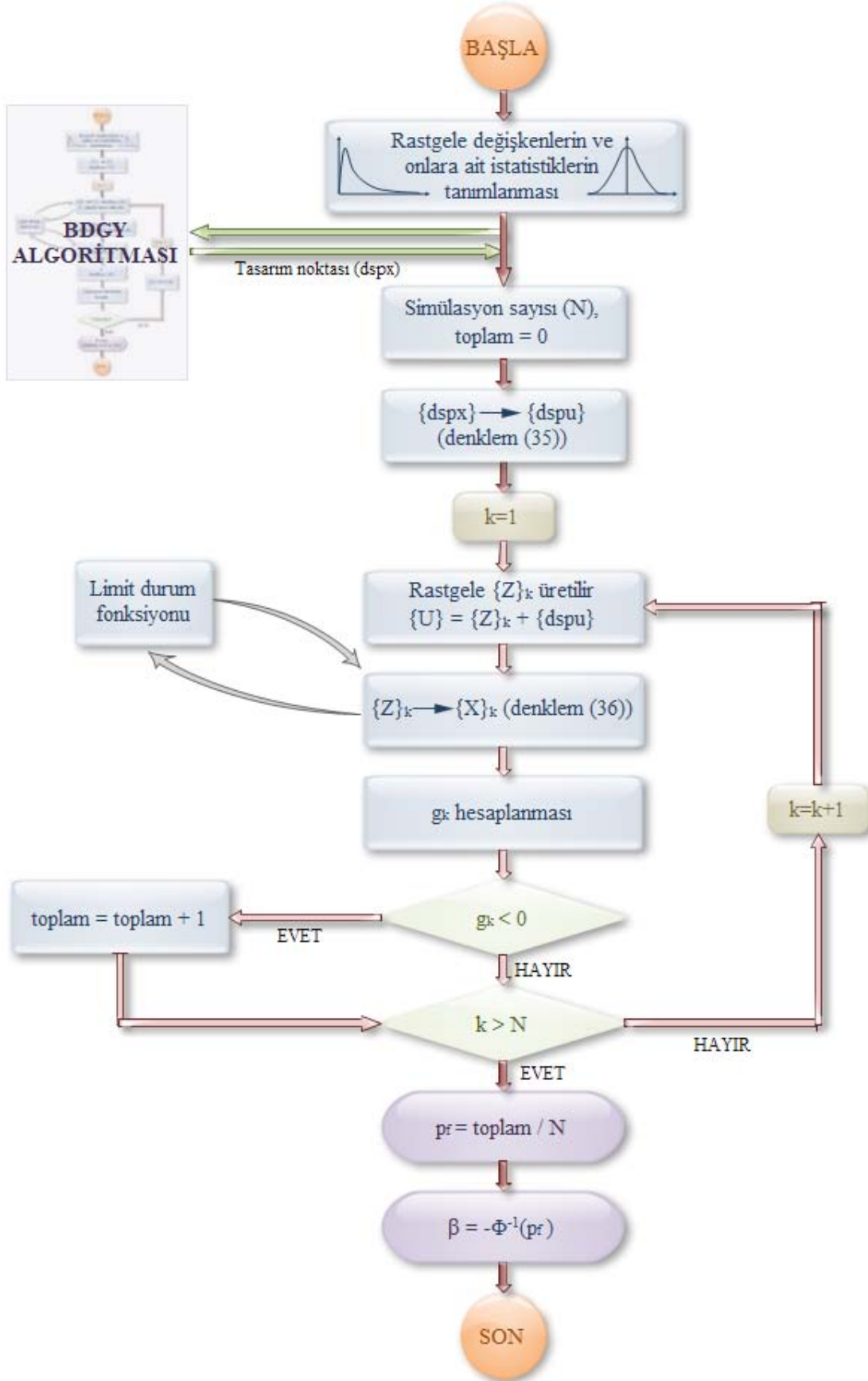
Kapalı limit durum fonksiyonları için:

1. FERUM programı ile ANSYS (ANSYS, 2008) sonlu elemanlar programı birleştirilmiştir.
2. Klasik yanıt yüzeyi yöntemi ve geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi ile ANSYS sonlu elemanlar programı birleştirilmiştir.

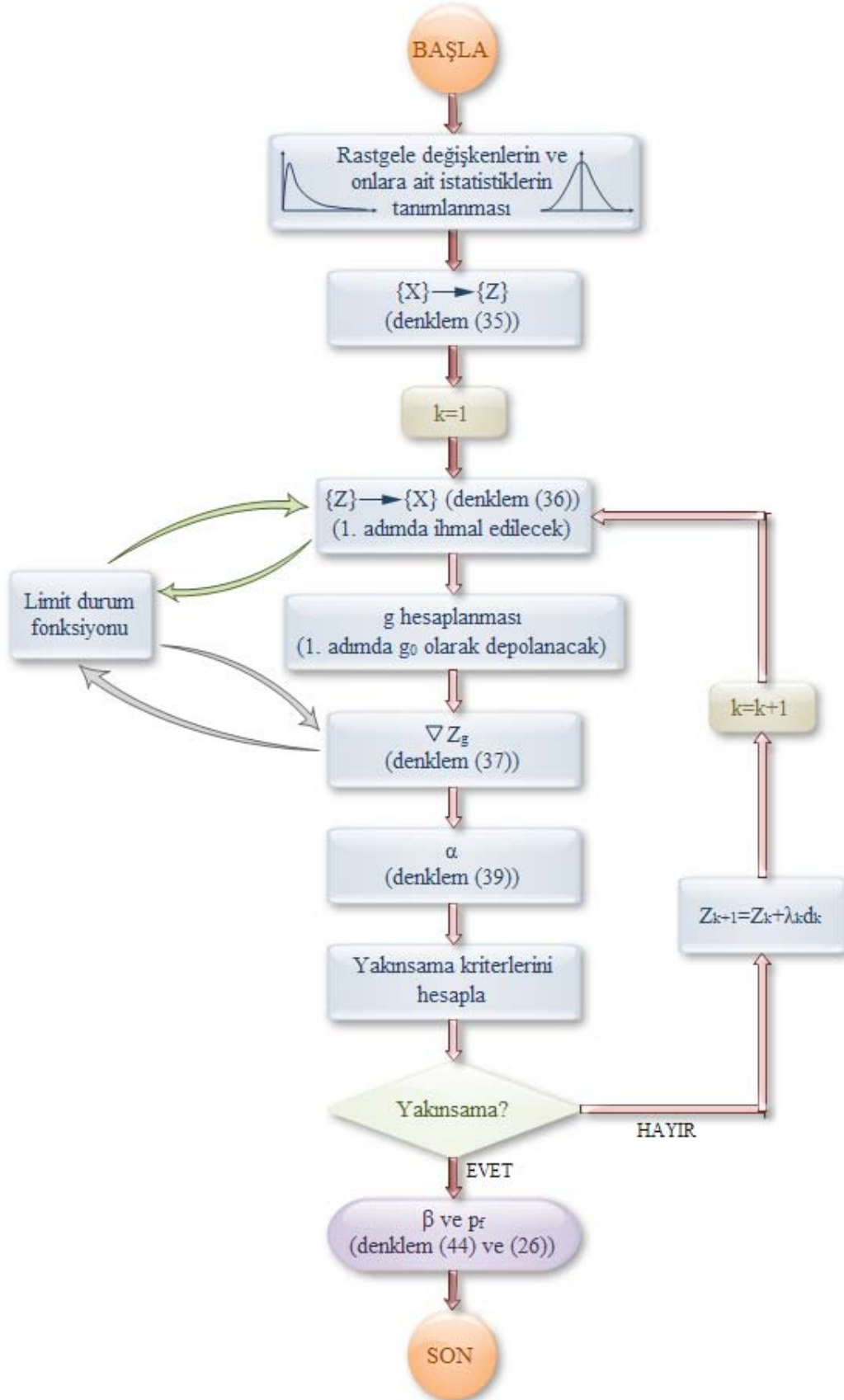


Şekil 13. DÖMCY'nin akış diyagram şeması

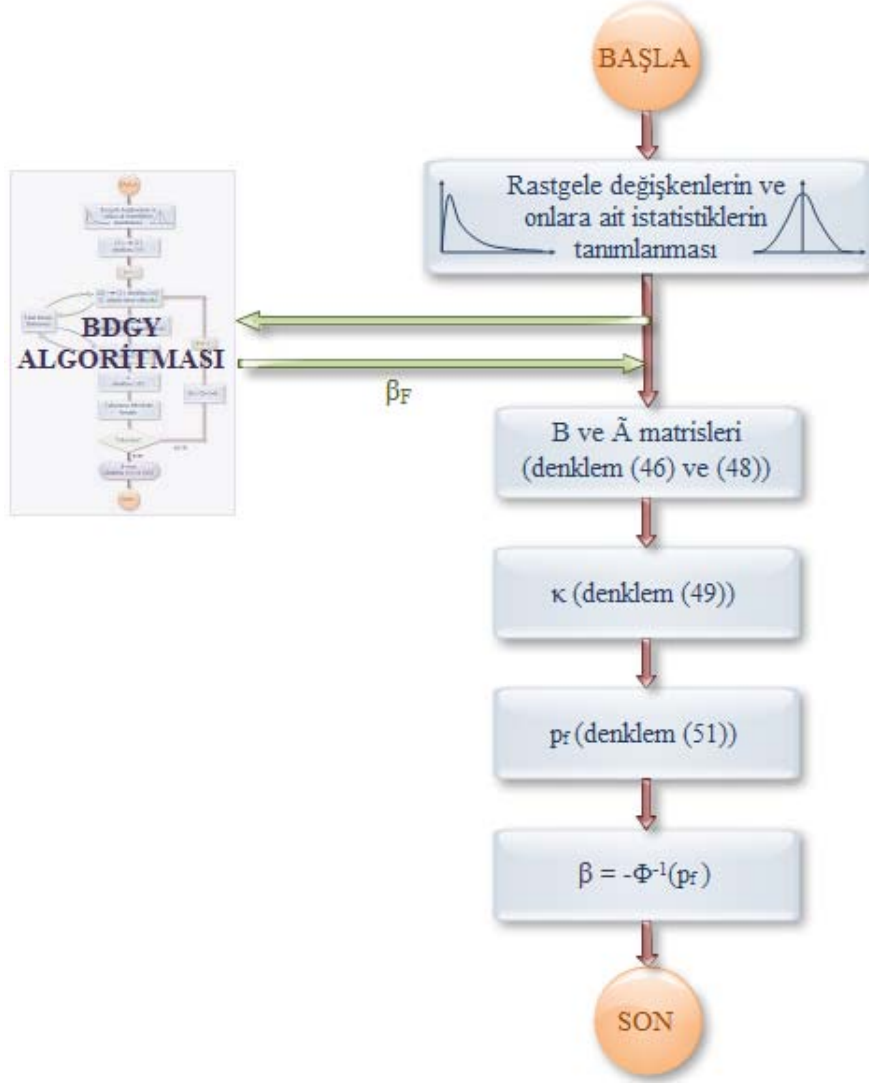




Şekil 14. ÖÖMCY'nin akış diyagram şeması



Şekil 15. BDGY'nin akış diyagram şeması



Şekil 16. İDGY'nin akış diyagram şeması

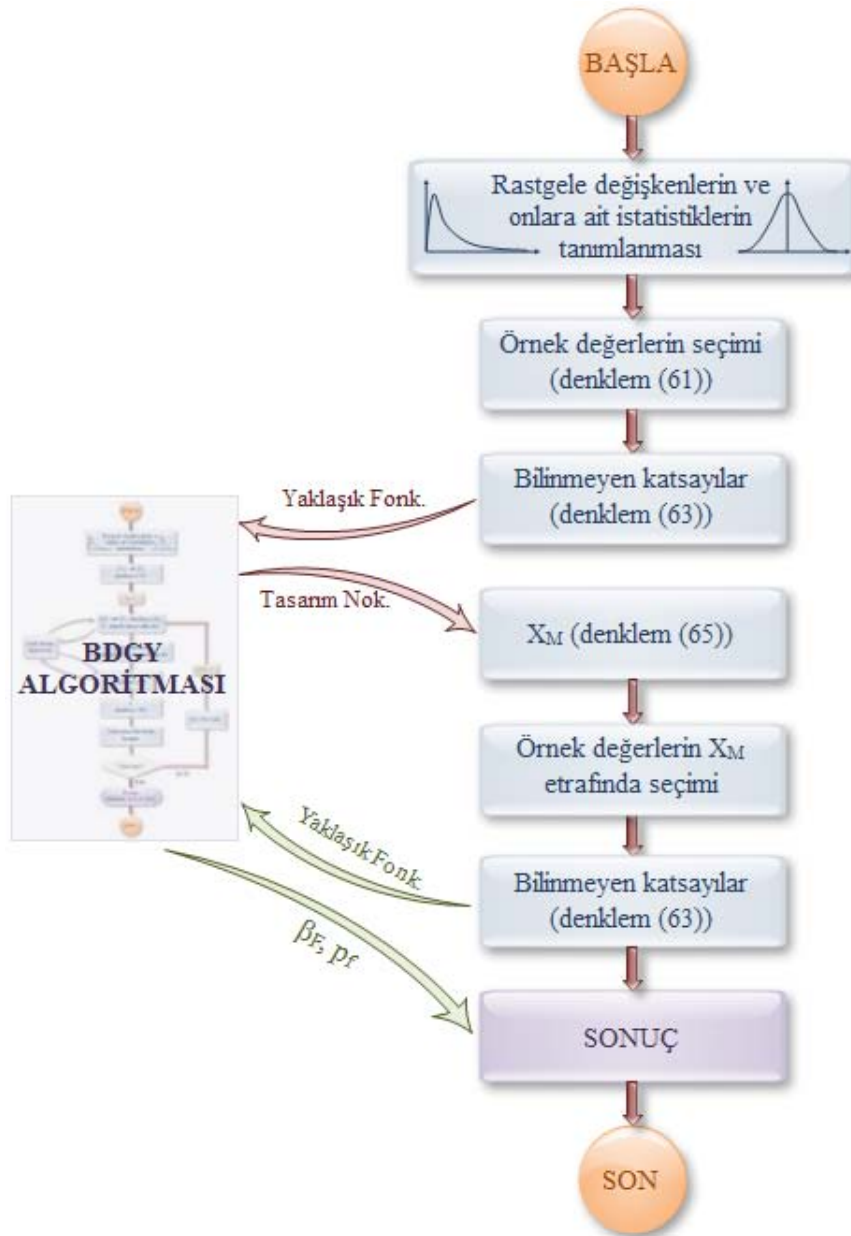
## 2.1. Açık Limit Durum Fonksiyonları İçin Geliştirilen Algoritmalar

### 2.1.1. Yanıt Yüzey Yöntemi ile Güvenilirlik Analizi

Yanıt yüzeyi yönteminde giriş parametreleri ile çıkış parametreleri arasında bir ilişki kurulmaktadır. Bu ilişki genelde, ikinci derece bir fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Güvenilirlik analizinde, bu fonksiyon kapalı olarak ifade edilen limit durum fonksiyonlarının belirsiz parametrelerle birlikte açık olarak tanımlanmasında kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, yanıt yüzeyi yöntemi kapalı limit durum fonksiyonları ile güvenilirlik analizinde kullanılmadan önce açık limit durum fonksiyonları ile güvenilirlik

analizi için *responsesurface* alt programı ile FERUM'a eklenmiştir. Böylece, sonlu elemanlar güvenilirlik analizinin de temel algoritması oluşturulmuştur. Yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizinde limit durum fonksiyonunun tanımlandığı *responsematrix* alt programında yaklaşık fonksiyon tanımlanmaktadır. Dolayısıyla, gerçek fonksiyon FERUM'a eklenen *limit* alt programında verilmektedir. Şekil 17'de gösterilen yanıt yüzeyi yöntemi algoritmasının kodu EK-1'de verilmektedir.



Şekil 17. Yanıt yüzeyi yönteminin akış diyagram şeması

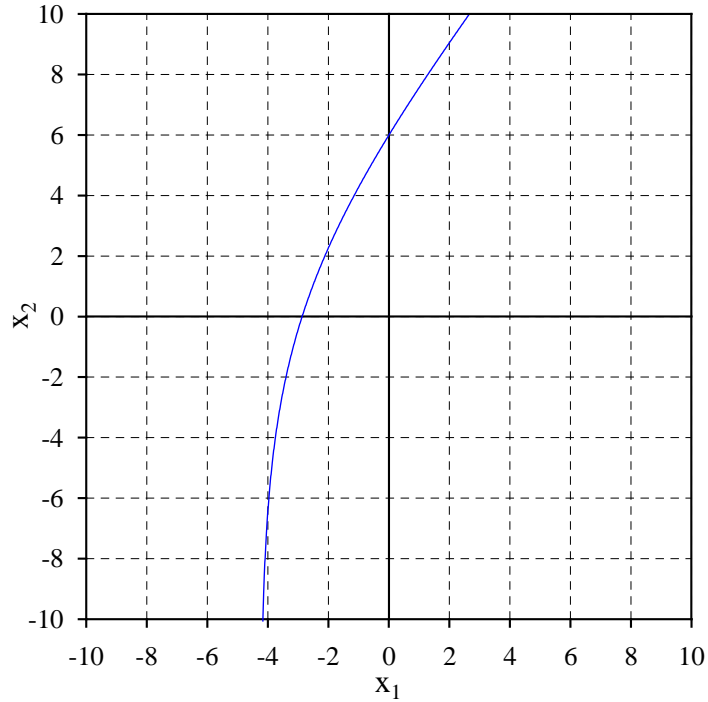
Geliştirilen program, Kaymaz (2005) tarafından çalışmasında kullanılan lineer olmayan limit durum fonksiyon örnek olarak alınarak test edilmiştir. Uygulama 1’de bu örneğin detayları verilmektedir.

### 2.1.1.1. Uygulama 1: Lineer Olmayan Limit Durum Fonksiyon

Yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizi için oluşturulan algoritmanın doğruluğunu göstermek amacıyla seçilen limit durum fonksiyonu (Kaymaz, 2005);

$$g(x_1, x_2) = \exp[0.4(x_1 + 2) + 6.2] - \exp(0.3x_2 + 5) - 200 \quad (66)$$

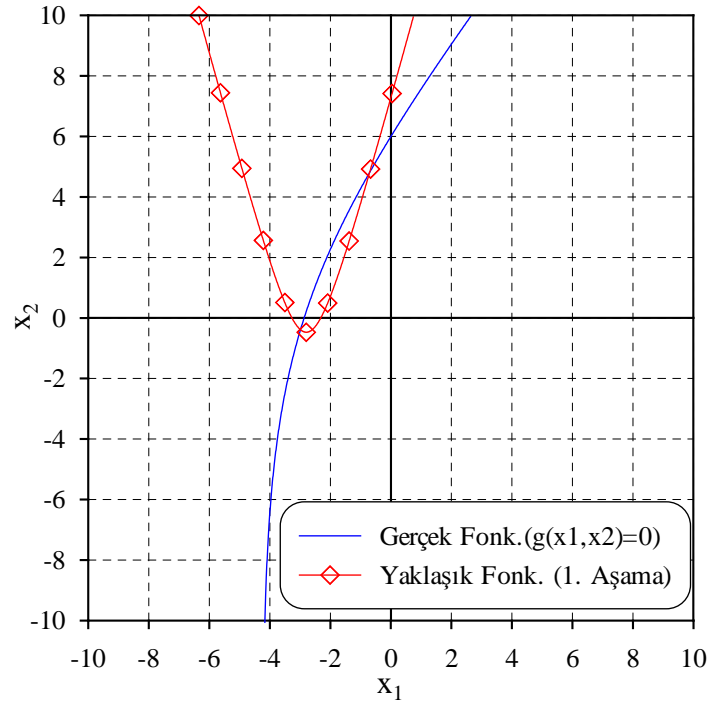
formülü ile verilmektedir. Burada,  $x_1$  ve  $x_2$  birbirinden bağımsız standart normal dağılıma ( $\mu_1, \mu_2 = 0; \sigma_1, \sigma_2 = 1$ ) sahip değişkenleri ifade etmektedir. Bu fonksiyonun gösterimi Şekil 18’de verilmektedir.



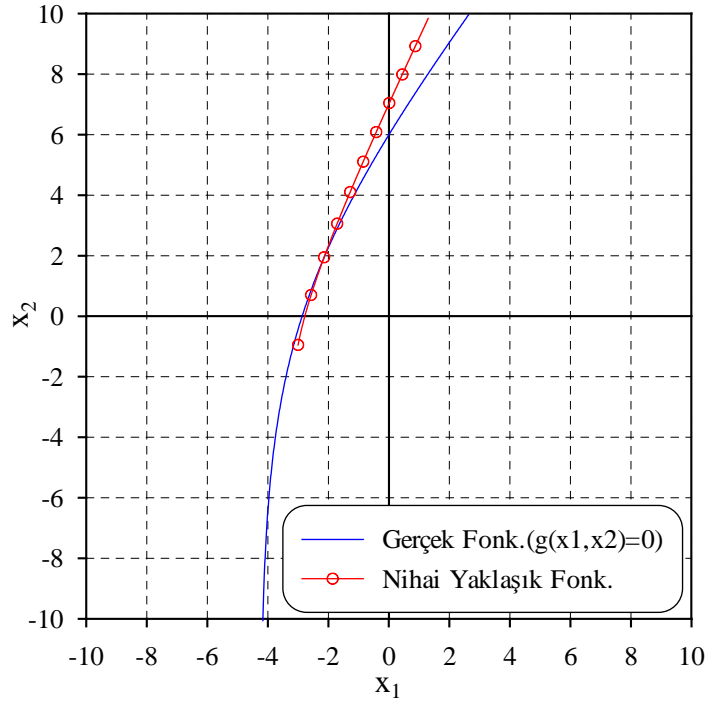
Şekil 18. Limit durum fonksiyonunun gösterimi

Yanıt yüzeyi yönteminin çözüm algoritmasının daha iyi anlaşılması açısından çözüm aşamalarında elde edilen yaklaşık fonksiyonlar grafiksel olarak verilecektir. Yanıt yüzeyi

yönteminin ilk aşamasında üretilen örnek değerlere uydurulan 2. derece yaklaşık fonksiyonun katsayıları en küçük kareler yöntemi ile elde edildikten sonra Şekil 19'da verilen yaklaşık fonksiyon tanımlanır. Şekilden de görüldüğü gibi 1. aşamada elde edilen yaklaşık fonksiyon gerçek fonksiyonu tam temsil edememektedir. 2. aşamada üretilecek örnek değerlere temel teşkil eden merkezi noktanın hesabından sonra elde edilen örnek değere uydurulan yaklaşık fonksiyon Şekil 20'de verilmektedir. Bu fonksiyon gerçek fonksiyonu daha iyi temsil etmektedir. Bundan dolayı, bu fonksiyon ile yapılacak olan güvenilirlik analizi, gerçek fonksiyon ile yapılacak olan güvenilirlik analizi ile yakın sonuçlar verecektir.



Şekil 19. 1. aşamada elde edilen yaklaşık fonksiyon



Şekil 20. Limit durum fonksiyonu ve yanıt yüzeyi yönteminde elde edilen yaklaşık fonksiyonlar

Tablo 4'te yanıt yüzeyi yöntemi algoritmasından elde edilen sonuçlar ile Kaymaz (2005)'dan alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tabloda, ayrıca, DÖMCY, BDGY ve İDGY'ye göre COMREL (URL-2, 2004) paket programından elde edilen sonuçlar ve FERUM'un kendi güvenilirlik analiz algoritmasından elde edilen sonuçlar da verilmiştir. DÖMCY'de sonuçlar 1000000 örnek değer kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 4. Güvenilirlik analiz sonuçları

	FERUM		COMREL		Kaymaz (2005)	
	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$
BDGY	2.7099	3.36512e-3	2.710	3.37e-3	---	---
İDGY	2.6852	3.62431e-3	2.685	3.63e-3	---	---
DÖMCY ( $V_{p_f} = \%1.65$ )	2.6827	3.65100e-3	2.684	3.64e-3	---	---
Yanıt Yüzeyi Yöntemi	<b>2.6614</b>	<b>3.89038e-3</b>	---	---	<b>2.6610</b>	<b>3.89215e-3</b>

Tablodan da görüldüğü üzere, FERUM'dan elde edilen sonuçlar, COMREL'den elde edilen sonuçlara çok yakın çıkmıştır. Bu sonuç, FERUM programının tez çalışması için

uygun bir algoritmaya sahip olduğunu göstermektedir. FERUM'a eklenen yanıt yüzeyi yönteminden elde edilen sonuçlar ile Kaymaz (2005)'dan alınan sonuçlar da birbirine çok yakın çıkmıştır. Buna göre, eklenen algoritmanın doğru bir şekilde çalıştığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, BDG ve İDG yöntemlerini DÖMCY ile karşılaştırıldığında İDGY'nin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

### 2.1.2. Geliştirilmiş Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile Güvenilirlik Analiz Algoritması

Klasik yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizi, özellikle, limit durum fonksiyonunun lineer olmama durumu fazla olan fonksiyonlarda iyi sonuç vermemektedir. Bu tez çalışmasında, yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizi için yeni bir yaklaşım ortaya koyarak daha iyi sonuçlar elde etmek amacıyla geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi algoritması elde edilmiştir. Bu algoritma, klasik yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizi algoritmasından farklı olarak güvenilirlik analizini üç aşamada elde etmektedir: 1. Klasik yanıt yüzeyi yönteminin birinci aşamasının gerçekleştirilmesi, 2. Gerçek fonksiyonun üzerinde nokta bulunması, 3. Vektör izdüşümü örnekleme yöntemi (Kim ve Na, 1997) kullanılarak örnek değerlerin elde edilmesi ve güvenilirlik analizinin gerçekleştirilmesi. Bu aşamaların hesap adımları ve detayları aşağıda verilmektedir. Hesap adımlarının daha iyi anlaşılması açısından iki değişkenli bir limit durum fonksiyonu için hesap adımları şekillerle şematik olarak gösterilmektedir. Bu aşamalarda toplam  $8n+12$  veya  $10n+12$  kere limit durum fonksiyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Geliştirilmiş yanıt yüzeyi algoritması, *impresponsesurface* alt programı ile birlikte FERUM programına eklenmiştir. Bu alt programın kodu EK-1'de verilmektedir.

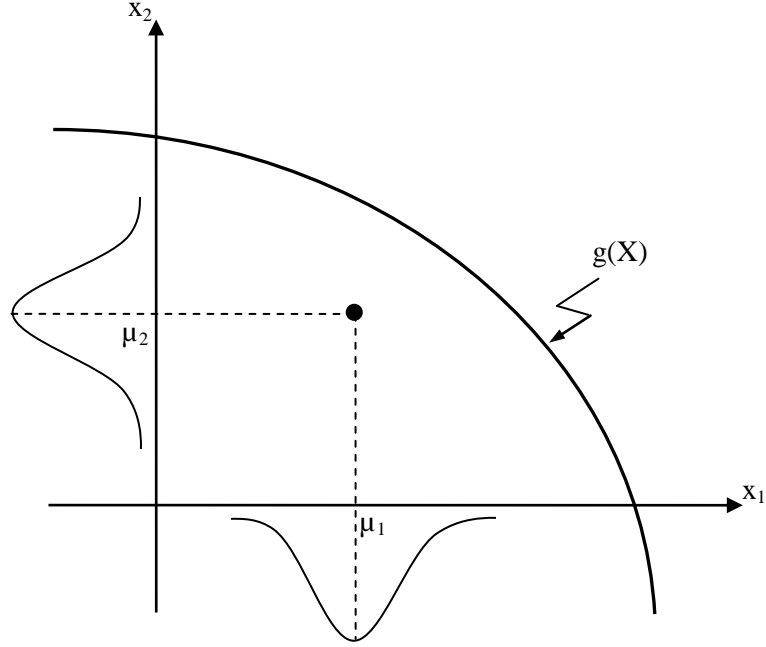
#### ➤ 1. Aşama

Bu aşamada klasik yanıt yüzeyi yönteminin birinci aşaması gerçekleştirilmiştir. Burada amaç kaba olarak tasarım noktalarını belirlemektir. Bu aşamanın hesap adımları klasik yanıt yüzeyi hesap adımlarının ilk aşaması ile aynıdır. Aşağıda bu hesap adımları daha detaylı olarak verilmektedir. Bu aşamada  $2n+1$  kere limit durum fonksiyonuna gereksinim duyulmaktadır.

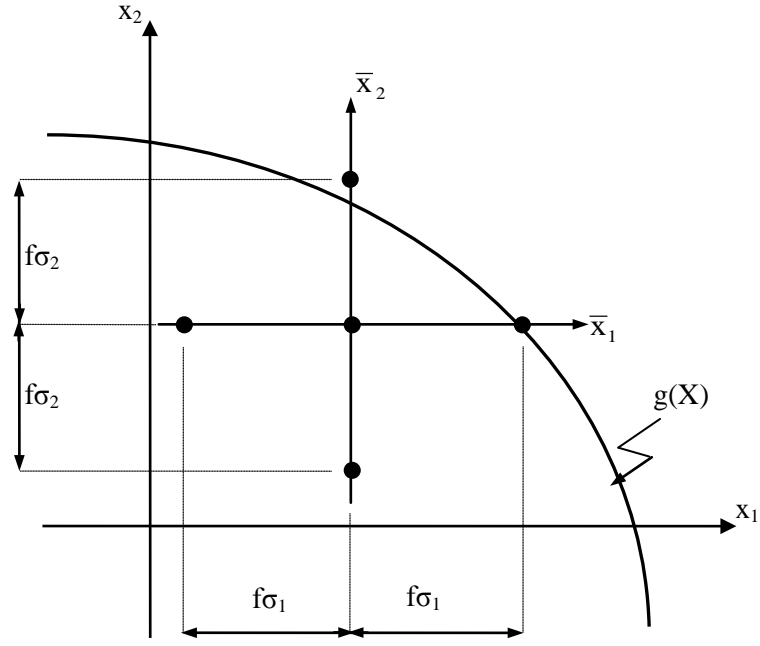
1. Limit durum fonksiyonu, rastgele değişkenler ve istatistiksel özellikleri (ortalama, standart sapma ve dağılım) belirlenir (Şekil 21).
2. Ortalama etrafında örnek değerler seçilir (Şekil 22).



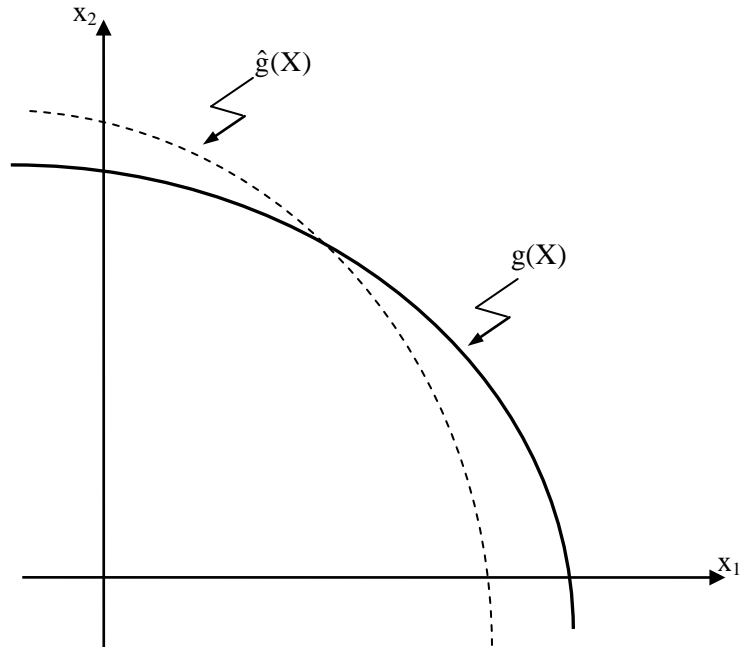
3. Elde edilen örnek değerler limit durum fonksiyonunda yerine yazılarak sonuçlar  $y$  vektöründe depolanır.
4. Tasarım matrisi oluşturulur (denklem (64)).
5. En küçük kareler yöntemi kullanılarak ikinci derece yaklaşık fonksiyonun katsayıları belirlenir (denklem (63)) ve böylece ikinci derece yaklaşık fonksiyonu tanımlanmış olur (Şekil 23).
6. Oluşturulan ikinci derece fonksiyon ve 1. adımda belirtilen dağılımlar kullanılarak BDG analizi gerçekleştirilir (Şekil 15).
7. BDG analizi sonunda tasarım noktası elde edilir (Şekil 24).



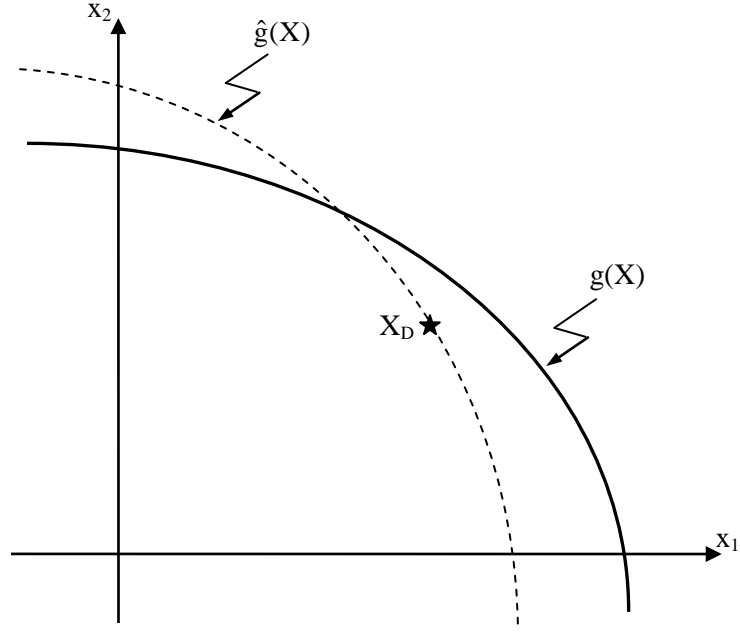
Şekil 21. Limit durum fonksiyonunun ve ortalama değerlerin gösterimi



Şekil 22. Örnek değerlerin gösterimi



Şekil 23. Yaklaşık fonksiyonun gösterimi



Şekil 24. BDG analizinden sonra elde edilen tasarım noktasının gösterimi

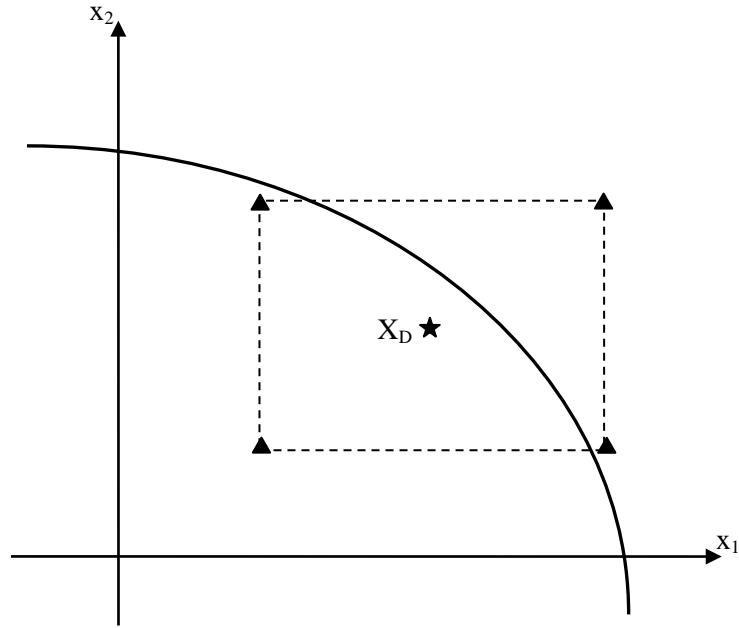
➤ 2. Aşama

Bu aşamada gerçek fonksiyon üzerinde nokta bulunmaktadır. Dolayısıyla geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizinin en önemli aşamasıdır. Çünkü bir sonraki aşamanın, dolayısıyla sonuçların, doğru olarak elde edilebilmesi bu aşamada belirlenecek noktaya bağlıdır. Bu noktanın belirlenebilmesi için bir algoritma geliştirilmiştir. Bu aşamada  $n+9$  kere limit durum fonksiyonu kullanılmaktadır.

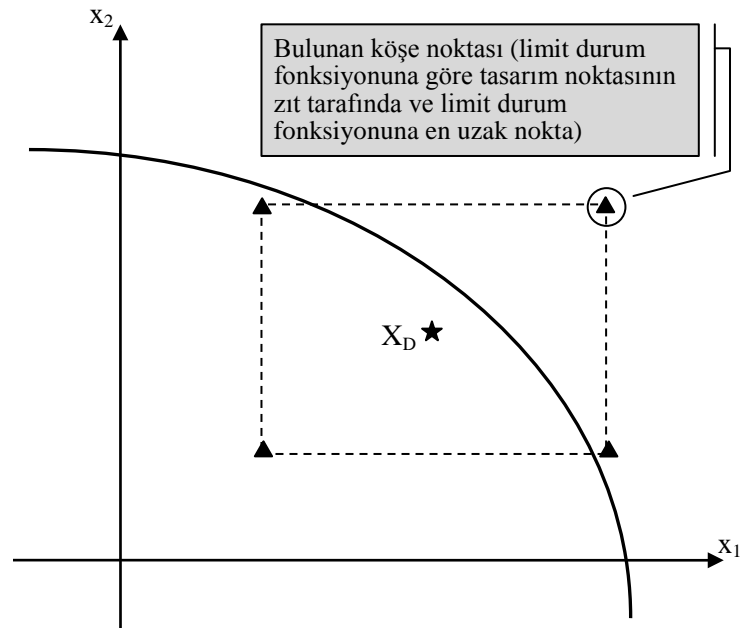
Geliştirilen bu algoritmanın hesap adımları aşağıda verilmektedir.

1. 1. aşamada elde edilen tasarım noktası limit durum fonksiyonunda yerine konularak değeri hesaplanır.
2. Tasarım noktasının etrafında  $\mp 3\sigma_i$  kadar uzaklıktaki köşe noktaları belirlenir (Şekil 25).
3. Belirlenen köşe noktalarından, limit durum fonksiyonunu köşe noktası ile tasarım noktası arasında bırakacak köşe belirlenir (Şekil 26). Bu amaçla, köşe noktalarından limit durum fonksiyonundaki değeri 1. adımda hesaplanan değerlerin ters işaretlisi olan köşe aranır.
4. Dikkate alınan köşe noktası ile tasarım noktası arasındaki doğrultu belirlenir (Şekil 27). Bu doğrultu limit durum fonksiyonunu bir noktada kesmektedir.

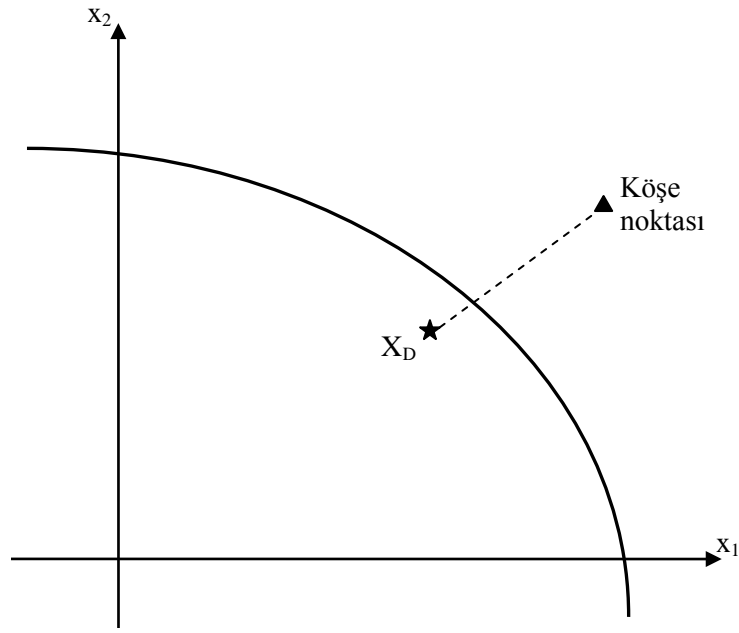
5. 4. adımda belirlenen doğrultunun limit durum fonksiyonunu kestiği nokta ( $X_C$ ) bulunur. Bu amaçla, her seferinde iki uç noktanın orta noktası bulunmak üzere beş adım gerçekleştirilir. Şekil 28'de bu adımlardan iki tanesi gösterilmiştir. Bu hesaplamalar sonunda limit durum fonksiyonuna en yakın olan nokta seçilir.



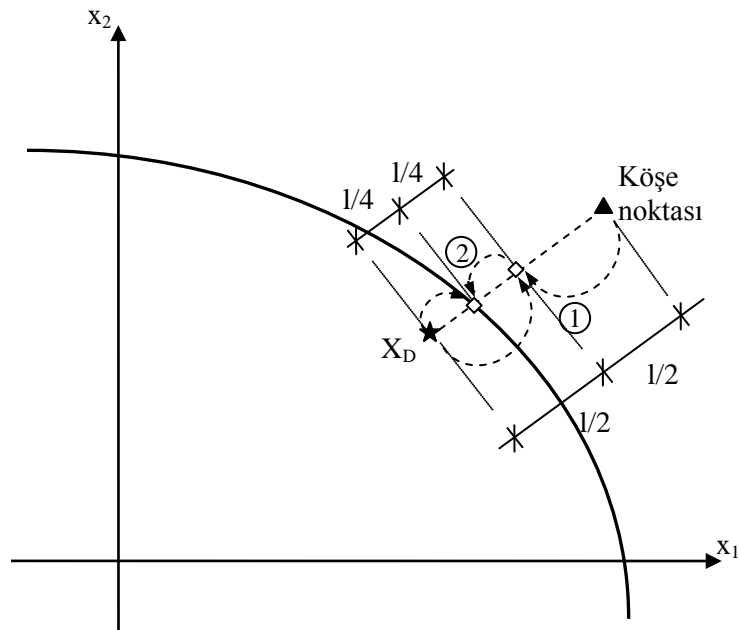
Şekil 25. Tasarım noktası etrafında belirlenen köşe noktalarının gösterimi



Şekil 26. Köşe noktalarından uygun olanının seçilmesi



Şekil 27. Tasarım noktası ile köşe noktası arasındaki doğrultunun belirlenmesi



Şekil 28. Limit durum fonksiyon üzerinde bir noktanın belirlenmesi

➤ 3. Aşama

Son aşamada, bir önceki aşamada elde edilen  $X_C$  noktası etrafında vektör izdüşümü yöntemi ile örnek değerler üretmek ve bu değerlere karşılık elde edilen yaklaşık fonksiyonda güvenilirlik analizini gerçekleştirmek amaçlanmıştır. Bu aşamada vektör izdüşümü yönteminde kullanılan  $f$  katsayının alacağı değere göre  $5n+2$  veya  $7n+2$  kere limit durum fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu aşamanın hesap adımları aşağıda verilmiştir.

1.  $f=1$  seçilir ve  $X_C$  noktası etrafında vektör izdüşümü yöntemine göre örnek değerler üretilir. Sembolik olarak bu değerlerin gösterimi Şekil 29'da verilmektedir.

$$x_s^i = X_C \pm f \cdot \sigma_i \cdot \sqrt{n-1} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^{iT} \cdot \boldsymbol{\delta}^i \quad (67)$$

Burada,  $i=1,2,\dots,n$  olmak üzere,

$$\boldsymbol{\varepsilon}^i = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_k = 1.0 & \text{for } k = i \\ \varepsilon_k = 0.9 & \text{for } k \neq i \end{cases} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (68)$$

şeklinde ifade edilir.  $\boldsymbol{\delta}^i$  birim vektör izdüşümü gösterir ve her bir değişken için,

$$\delta_j^i = \frac{h_j^i}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (h_k^i)}} \quad (69)$$

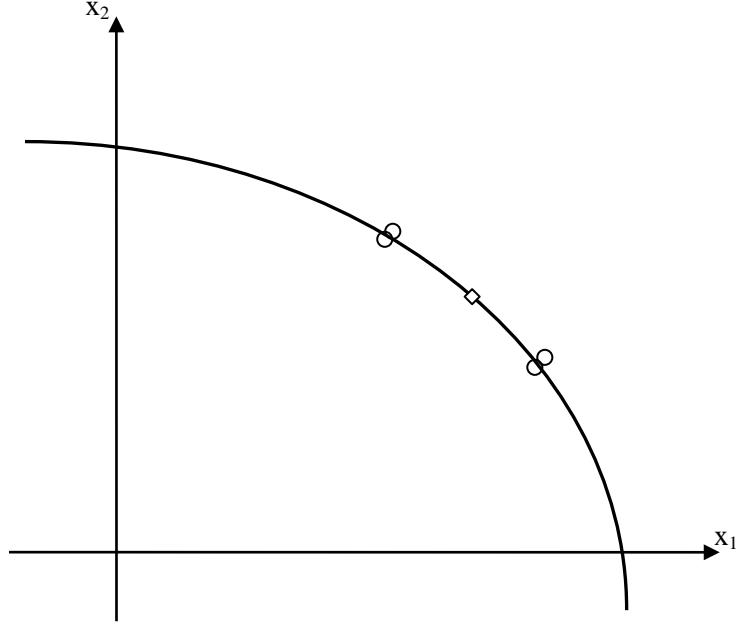
olarak elde edilir. Her bir değişken için  $j=1,2,\dots,n$  olmak üzere  $\mathbf{h}^i$ ,

$$\mathbf{h}^i = \mathbf{u}^i - \Delta \mathbf{g} \cdot (\Delta \mathbf{g}^T \cdot \mathbf{u}^i) \quad (70)$$

ile ifade edilir.  $\Delta \mathbf{g}$  ve  $\mathbf{u}^i$ , sırasıyla, limit durum fonksiyonunda  $X_C$  noktasına göre türevleri ve kroneker deltayı göstermektedir. Kroneker delta,

$$u^{iT} = [e_1 \dots e_n] \begin{cases} e_k = 1 & k = i \\ e_k = 0 & k \neq i \end{cases} \quad (71)$$

şeklinde elde edilir.

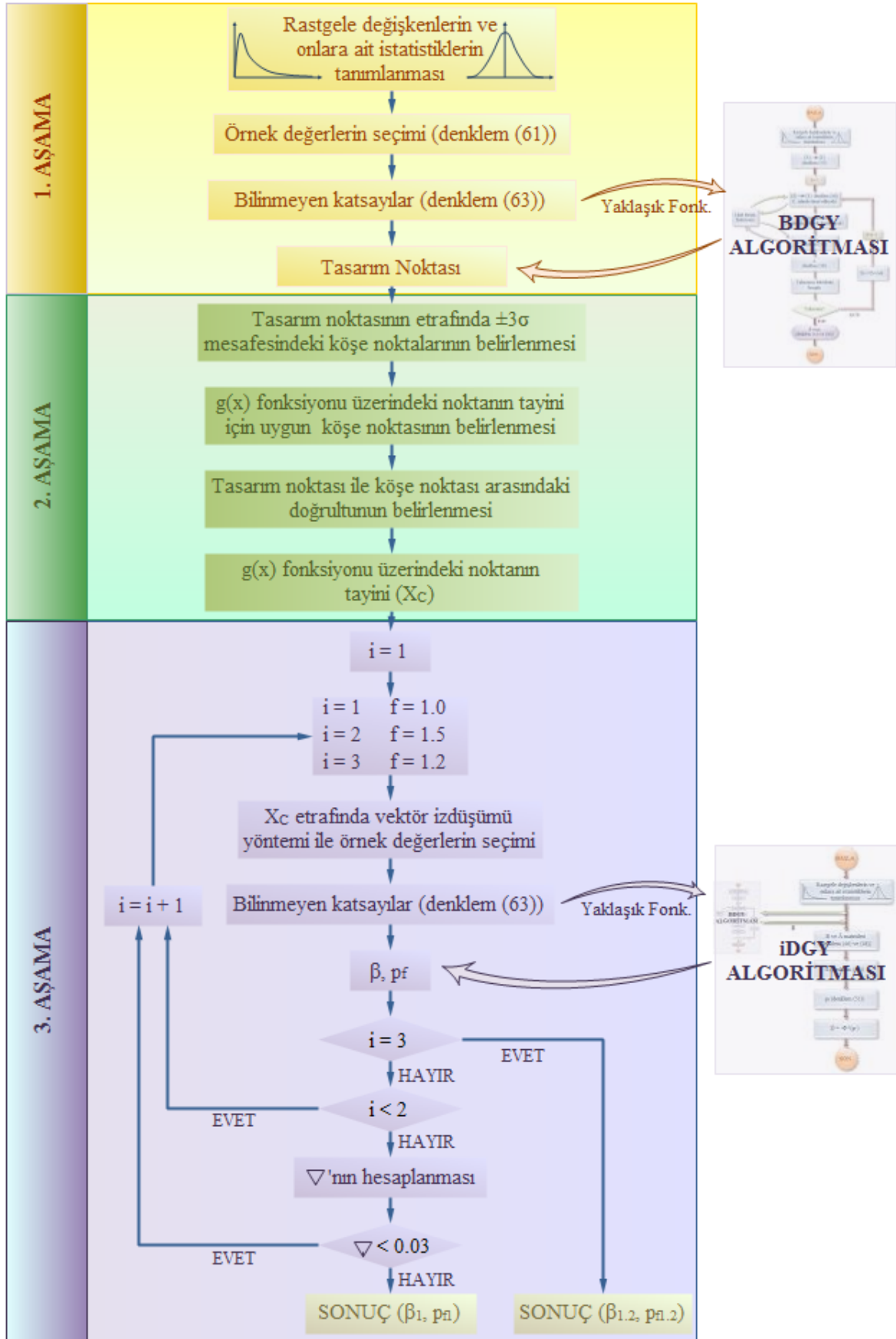


Şekil 29. Vektör izdüşümü yöntemi ile elde edilen örnek değerler

2. 1. aşamadaki 3., 4., ve 5. adımlar uygulanarak bir önceki aşamada elde edilen örnek değerler ile ikinci derece yaklaşık fonksiyon elde edilir.
3. İDG analizi gerçekleştirilerek beta hesaplanır ( $\beta_1$ ).
4.  $f=1.5$  alınarak 2. ve 3. adımdaki işlemler tekrarlanarak  $\beta_{1.5}$  elde edilir.
5.  $\nabla = \frac{|\beta_1 - \beta_{1.5}|}{n-1}$  hesaplanır.
6. 5. adımda hesaplanan değere göre  $f$  seçilir:

$$f \Rightarrow \begin{cases} f = 1 & \rightarrow & \nabla \leq 0.03 \\ f = 1.2 & \rightarrow & 0.03 < \nabla \end{cases} \quad (72)$$

7. Eğer  $f=1$  ise 3. adımda elde edilen sonuçlar geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analiz sonuçları olur; eğer  $f=1.2$  ise 2. ve 3. adım bu değer için tekrarlanır. Yukarıda detayları verilen algoritmanın akış diyagramı Şekil 30'da verilmektedir.



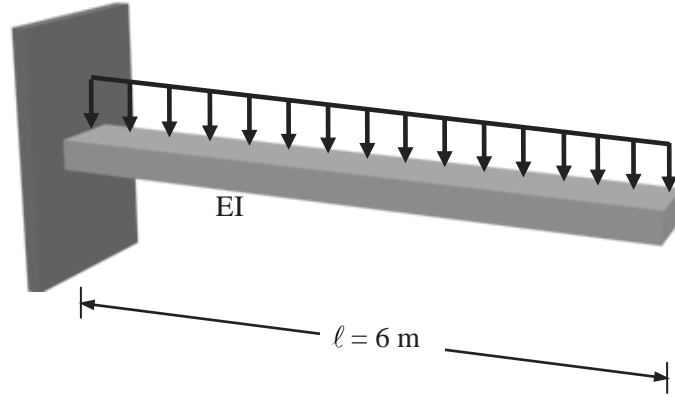
Şekil 30. Geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizi algoritması



Algoritmanın geçerliliğini göstermek amacıyla literatürden seçilmiş örnekler (düzgün yayılı yüke maruz konsol kiriş (Rajashekhar ve Ellingwood, 1993; Gomes ve Awruch, 2004), yüksek mertebede lineer olmama durumuna sahip bir limit durum fonksiyon (Kaymaz ve McMahon, 2005) ve lineer olmayan sarkaç (Bucher ve Bourgund, 1990; Rajashekhar ve Ellingwood, 1993; Gayton vd., 2003) uygulama olarak çözülmüştür. Bu uygulamalardan konsol kiriş örneğinde bütün hesap adımları tek tek açıklanarak grafiklerle gösterilecektir.

### 2.1.2.1. Uygulama 2: Düzgün Yayılı Yüke Maruz Konsol Kiriş

İlk uygulama Şekil 31’de verilen üzerinde düzgün yayılı yük bulunan dikdörtgen kesitli bir konsol kiriş örneğidir (Rajashekhar ve Ellingwood, 1993; Gomes ve Awruch, 2004). Aşağıda her bir hesap adımı için gerçekleştirilen işlemler ve sonuçlar verilmektedir.



Şekil 31. Konsol kiriş modeli

#### ✓ 1. Aşama

1. Limit durum fonksiyonunun ve rastgele değişkenlerin istatistiksel özelliklerinin belirlenmesi

Limit durum olarak, konsolun serbest ucundaki yerdeğiştirmesinin  $1/325$ 'i geçmesi düşünülmüştür. Buna göre, limit durum fonksiyonu;

$$g = \frac{1}{325} - \frac{(wb)\ell^4}{8EI} \quad (73)$$

şeklindedir. Burada,  $w$ ,  $b$ ,  $\ell$ ,  $E$  ve  $I$  sırasıyla birim metrekaareye gelen yayılı yükü, kesit genişliğini, kiriş açıklığını, elastisite modülünü ve atalet momentini göstermektedir. Atalet momenti ifadesi denklemde yazılacak olursa, limit durum fonksiyonu;

$$g = \frac{1}{325} - \frac{(wb)\ell^4}{8E(bh^3/12)} \quad (74)$$

şekline dönüşür. Bu fonksiyonda  $E$  ve  $\ell$  sabit kabul edilmiş ve sırasıyla  $2.6E10 \text{ N/m}^2$  ve  $6 \text{ m}$  olarak hesaba katılmıştır. Kiriş yüksekliği ve birim metrekaareye gelen yayılı yük rastgele değişken olarak seçilmiştir. Bu değişkenlere ait istatistiksel özellikler Tablo 5'te verilmektedir. Sabit değerler yerine yazılır, gerekli sadeleştirmeler yapılır ve değişkenlere göre limit durum fonksiyonu yeniden düzenlenirse, limit durum fonksiyonu;

$$g = 0.01846154 - 7.476923077 * 10^{-8} \frac{x_1}{x_2^3} \quad (75)$$

şeklinde elde edilir. Bu fonksiyona ait grafik Şekil 32'de verilmiştir.

Tablo 5. Uygulama 2'de kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri

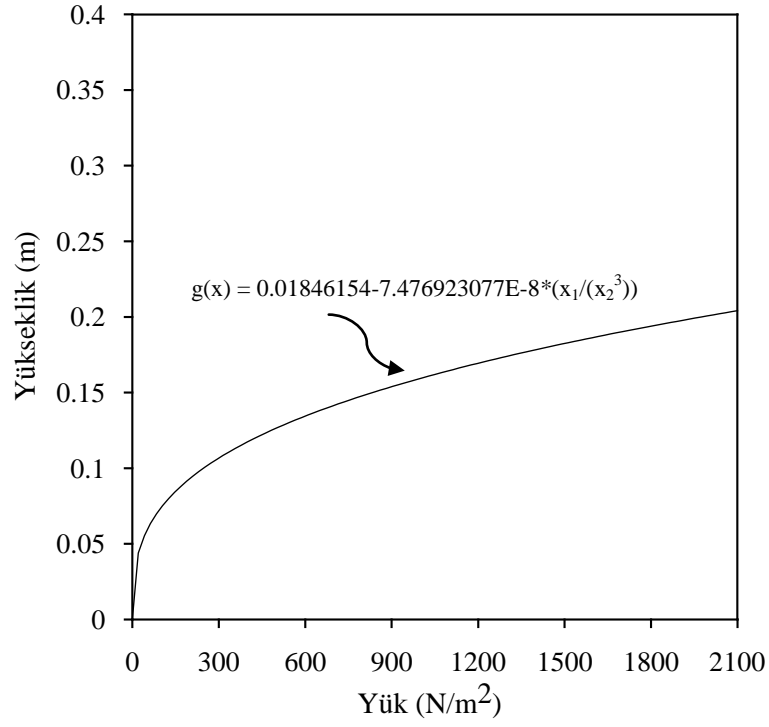
	Ortalama	Std. Sapma	Dağılım
$x_1$ (Birim metrekaareye gelen yayılı yük ( $w$ ) – $\text{N/m}^2$ )	1000	200	Normal
$x_2$ (Kiriş yüksekliği ( $h$ )– $\text{m}$ )	0.25	0.0375	Normal

## 2. Ortalama etrafında örnek değerlerin seçilmesi

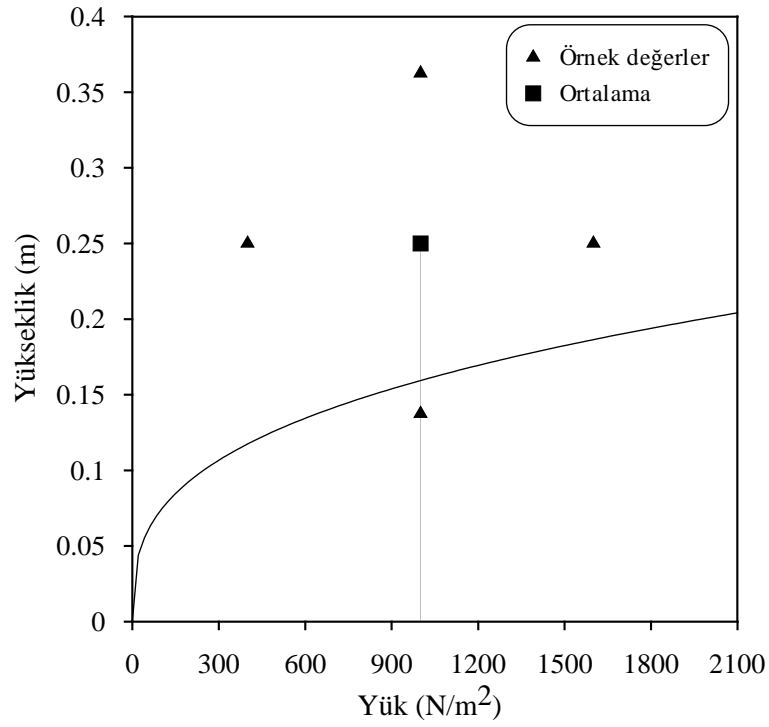
Örnek değerler, ortalamalar merkez olacak şekilde yatay ve düşeyde  $\pm f\sigma_i$  mesafesinde seçilmektedir. Buna göre, elde edilen noktalar Tablo 6'da verilmektedir. Noktaların limit duruma göre pozisyonları Şekil 33'te gösterilmektedir.

Tablo 6. Örnek değerler

	Ortalama	1. örnek	2. örnek	3. örnek	4. örnek
$x_1$	1000	1600	400	1000	1000
$x_2$	0.25	0.25	0.25	0.3625	0.1375



Şekil 32. Limit durum fonksiyonunun grafiksel gösterimi



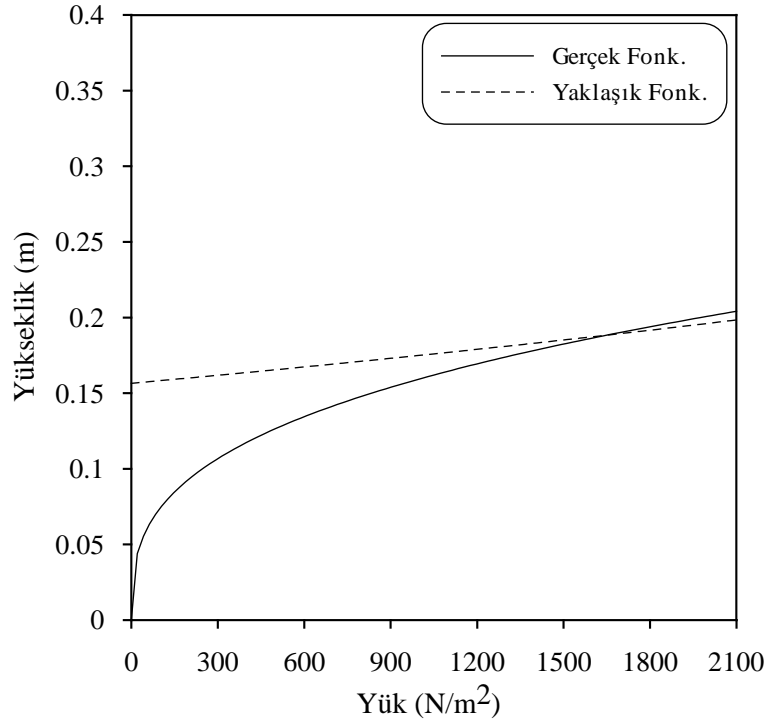
Şekil 33. Ortalama değer etrafındaki örnek değerlerin gösterimi

### 3. İkinci derece yaklaşık fonksiyonun belirlenmesi

Elde edilen örnek değerlerin limit durum fonksiyonundaki değerleri hesaplanır, tasarım matrisi oluşturulur ve bunlar kullanılarak en küçük kareler yöntemi ile yaklaşık fonksiyonun katsayıları elde edilmektedir. Buna göre belirlenen yaklaşık fonksiyon;

$$\hat{g}_1 = -0.063013 - 4.7852e - 6 * x_1 + 0.53095 * x_2 + 2.3569e - 21 * x_1^2 - 0.82018 * x_2^2 \quad (76)$$

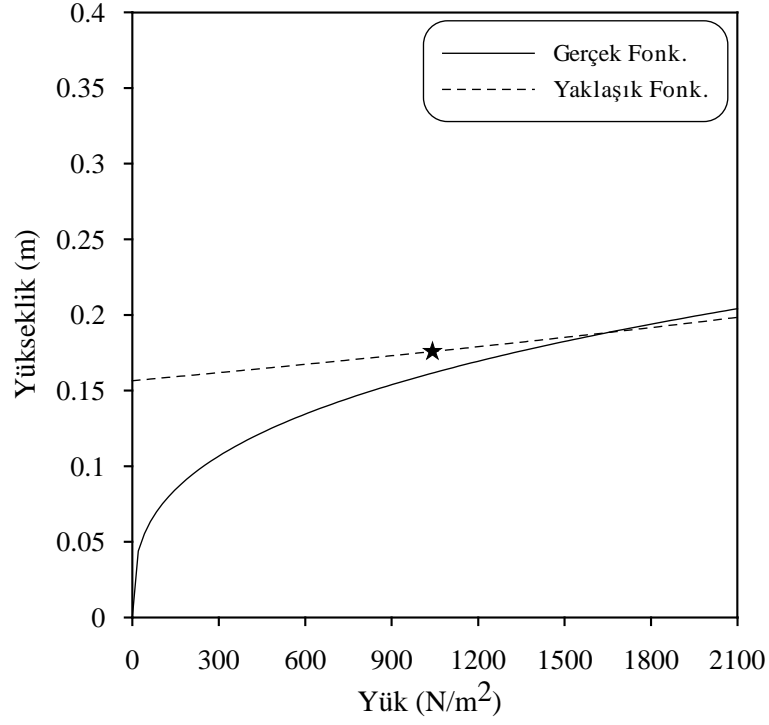
şeklinde ifade edilir. Fonksiyonun grafiksel gösterimi Şekil 34'te verilmektedir.



Şekil 34. Yaklaşık fonksiyonun gösterimi

### 4. Yaklaşık fonksiyonda BDG analizinin gerçekleştirilmesi

Yaklaşık fonksiyonda BDG analizi gerçekleştirilerek tasarım noktası (1041.37,0.176) olarak elde edilmiştir. Böylece, kabaca limit durum fonksiyonuna yakın bir nokta bulunarak gerçek tasarım noktasının hesabı için başlangıç noktası tayin edilir. Belirlenen tasarım noktasının yeri Şekil 35'te gösterilmektedir.



Şekil 35. Tasarım noktasının gösterimi

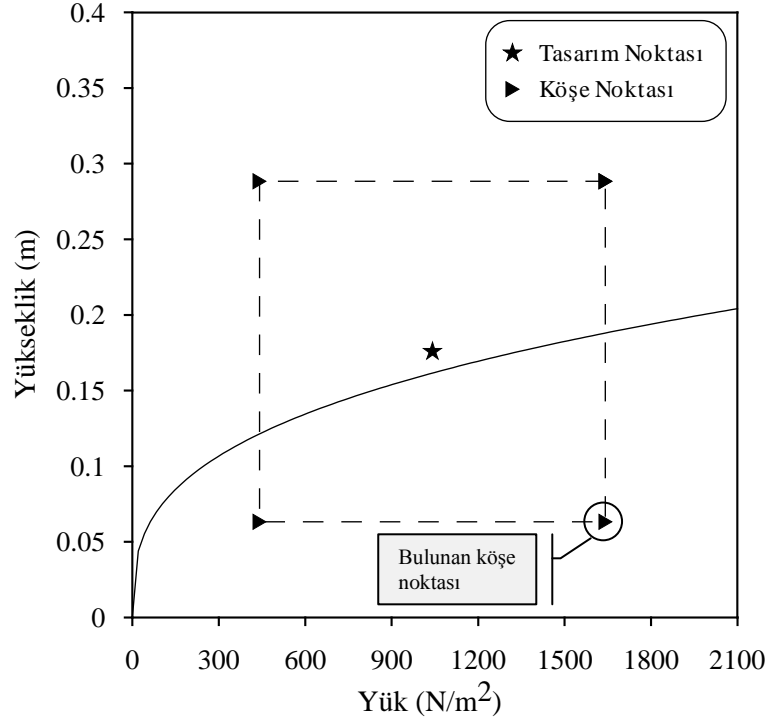
✓ 2. Aşama

1. Tasarım noktası etrafındaki köşe noktalarının tayini ve uygun köşe noktasının bulunması

Tasarım noktasının limit durum fonksiyonundaki değeri 0.0041 olarak elde edilmiştir. Tasarım noktası etrafında kare oluşturacak şekilde köşe noktalarının yerleri belirlenir ve bu köşe noktalarından limit durum fonksiyondaki değeri yukarıda elde edilen sayının tersi işaretli değeri veren köşe bulunur. Bu nokta (1641.3747,0.0633) koordinatlarındaki köşedir ve limit durum fonksiyondaki değeri -0.4650'dir. Tablo 7'de köşe noktalarının koordinatları ve hesaplamalarda bulunan köşe noktası verilmektedir. Bu noktaların tasarım noktası etrafındaki yerleri Şekil 36'da gösterilmektedir.

Tablo 7. Köşe noktaları

	1. köşe	2. köşe	3. köşe	4. köşe
$x_1$	441.3747	441.3747	1641.3747	<b>1641.3747</b>
$x_2$	0.0633	0.2883	0.2883	<b>0.0633</b>



Şekil 36. Tasarım noktası etrafındaki köşe noktalarının gösterimi

## 2. Doğrultunun belirlenmesi ve limit durum fonksiyonu üzerindeki noktanın aranması

Bulunan köşe noktası ile tasarım noktası arasındaki doğrultu belirlenir. Bu doğrultu limit durum fonksiyonunu bir noktada ( $X_C$ ) kesmektedir. Hesaplamalardan bu nokta (1097.62469, 0.16527) olarak elde edilmiştir. Bu noktanın limit durum fonksiyonundaki değeri 0.00028'dir. Buna göre, noktanın limit durum fonksiyonunun üzerinde kabul edilebilecek kadar yakın pozisyonda olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 37'de köşe noktası ile tasarım noktası arasındaki doğrultu ve bu doğrultu ile limit durum fonksiyonunu kesen noktanın yeri gösterilmektedir.

## ✓ 3. Aşama

### 1. $X_C$ etrafında vektör izdüşümü yöntemi ile belirlenen örnek değerler kullanılarak güvenilirlik analizinin gerçekleştirilmesi ( $f=1$ )

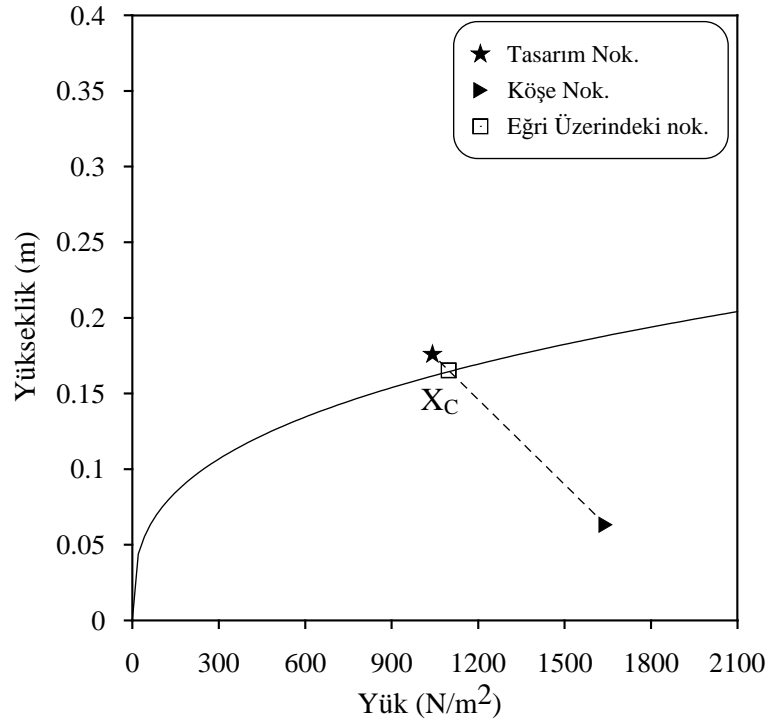
$X_C$  noktasında limit durum fonksiyonuna çizilen teğet doğrultusunda vektör izdüşümü yöntemi ile noktalar Tablo 8'de verildiği gibi bulunmuştur. Bu değerlere göre elde edilen yaklaşık eğri;

$$\hat{g}_2 = -0.054391 - 3.333e-5 * x_1 + 0.6634 * x_2 + 7.5594e-9 * x_1^2 - 1.00649 * x_2^2 \quad (77)$$

olarak elde edilmiştir. Yaklaşık fonksiyon kullanılarak gerçekleştirilen İDG analizi sonucunda  $\beta_1=2.3451$  olarak hesaplanmıştır.

Tablo 8. Vektör izdüşümü yöntemi ile elde edilen örnek değerler ( $f=1$ )

	$X_C$	1. örnek	2. örnek	3. örnek	4. örnek
$x_1$	1097.6247	1290.7935	904.4559	1271.4766	923.7728
$x_2$	0.1653	0.1740	0.1565	0.1750	0.1556



Şekil 37. Doğrultunun ve limit durum fonksiyonu üzerindeki noktanın gösterimi

2.  $X_C$  etrafında vektör izdüşümü yöntemi ile belirlenen örnek değerler kullanılarak güvenilirlik analizinin gerçekleştirilmesi ( $f=1.5$ )

$f=1.5$  alınarak elde edilen örnek değerler Tablo 9’da verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen yaklaşık fonksiyon;

$$\hat{g}_3 = -0.053691 - 3.36513e-5 * x_1 + 0.65769 * x_2 + 7.60802e-9 * x_1^2 - 0.98677 * x_2^2 \quad (78)$$

ifadesi ile temsil edilmektedir. Yaklaşık fonksiyon kullanılarak gerçekleştirilen İDG analizi sonucunda  $\beta_{1,5}=2.3449$  olarak hesaplanmıştır.

Tablo 9. Vektör izdüşümü yöntemi ile elde edilen örnek değerler ( $f=1.5$ )

	$X_C$	1. örnek	2. örnek	3. örnek	4. örnek
$x_1$	1097.6247	1387.3779	807.8715	1358.4026	836.8468
$x_2$	0.1653	0.1784	0.1522	0.1798	0.1507

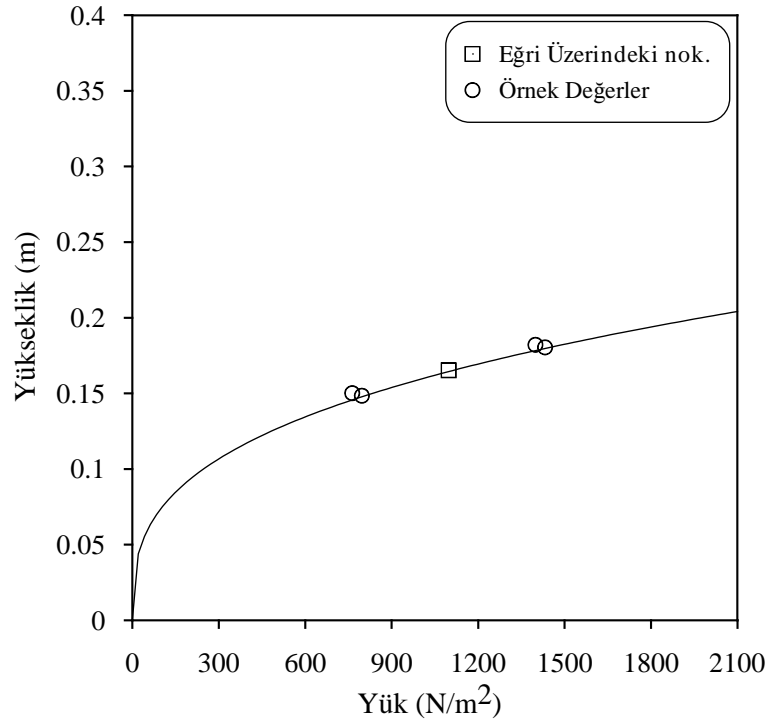
### 3. $\nabla$ 'nın hesaplanması

$$\nabla = \frac{|2.3451 - 2.3449|}{2 - 1} = 0.0002 \text{ olarak elde edilir. Buna göre, } \nabla \leq 0.03 \text{ olduğundan}$$

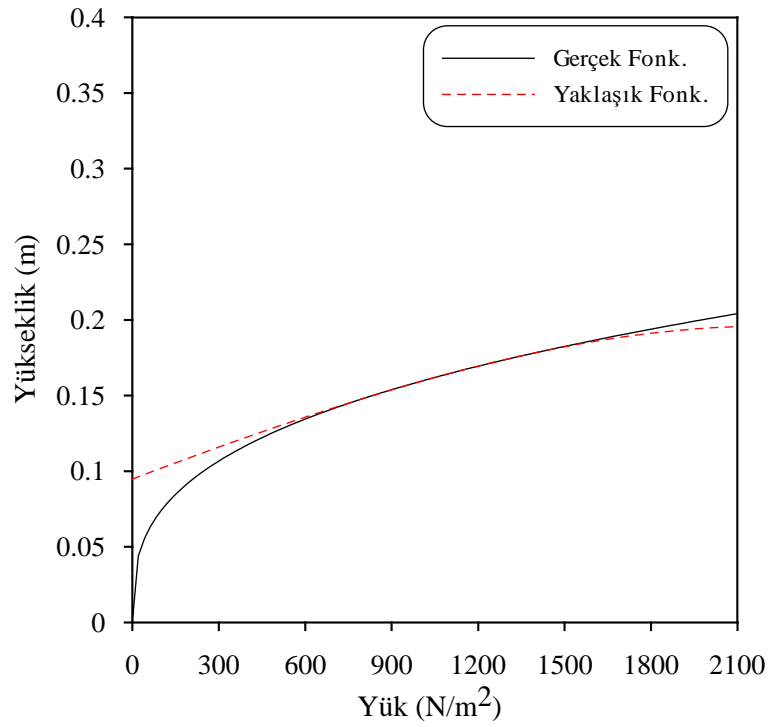
$f=1$  durumundaki sonuçlar geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analiz sonuçlarını vermektedir. Şekil 38'de ve Şekil 39'da sonuç olarak elde edilen örnek değerler ve bu örnek değerlerle oluşturulan yaklaşık fonksiyon gösterilmektedir.

Geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminin sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla, DÖMCY, BDGY, İDGY ve klasik yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizi de gerçekleştirilmiştir. Tablo 10'da elde edilen bütün sonuçlar verilmiştir. Tabloda ayrıca her bir yöntemde güvenilirlik analiz boyunca limit durum fonksiyonunun kullanılma sayısı da verilmiştir. Sonuçlar, DÖMCY'den elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında en iyi sonucu (%0.080954 hata) geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizinin verdiği görülmüştür. Bu uygulamada, klasik yanıt yüzeyi yöntemi en iyi limit durum fonksiyonu kullanım sayısını (12) vermesine rağmen  $\beta=0.201$  değeri ile en kötü sonucu verdiği gözlenmiştir. BDGY ve İDGY'den elde edilen sonuçlar kesin sonuca yakın çıkmıştır. Ancak limit durum fonksiyonu kullanma sayısı olarak geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminde kullanılanlardan daha fazla olmaktadır.





Şekil 38. Nihai örnek değerlerin gösterimi



Şekil 39. Nihai yaklaşık fonksiyon

Tablo 10. Uygulama 2'nin güvenilirlik analiz sonuçları

	$\beta$	$P_f$	$\beta$ için hata oranı (%)	Limit durum fonksiyonunu kullanma sayısı
DÖMCY ( $V_{p_f} = \% 1.02$ )	2.347	9.470e-3	---	1000000
BDGY	2.331	9.880e-3	0.681721	39
İDGY	2.344	9.550e-3	0.127823	44
Klasik Yanıt Yüzeyi Yöntemi	0.201	4.206e-1	91.43588	12
Geliştirilmiş Yanıt Yüzeyi Yöntemi	2.345	9.510e-3	0.080954	28

### 2.1.2.2. Uygulama 3: Yüksek Mertebede Lineer Olmayan Limit Durum Fonksiyon

Geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminin geçerliliğini göstermek amacıyla ikinci uygulama olarak yüksek mertebede lineer olmayan bir fonksiyon (Kaymaz ve McMahon, 2005) seçilmiştir. Limit durum fonksiyonu;

$$g = x_1^3 + x_1^2 x_2 + x_2^3 - 18 \quad (79)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Limit durum fonksiyonunda iki adet değişken ( $x_1$  ve  $x_2$ ) vardır. Bu değişkenlerin istatistiksel dağılımları Tablo 11'de verilmektedir.

Tablo 11. Uygulama 3'te kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri

	Ortalama	Standart Sapma	Dağılım
$x_1$	10	5	Normal
$x_2$	9.9	5	Normal

Gerçekleştirilen güvenilirlik analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 12'de gösterilmektedir. Sonuçlara göre, DÖMCY'ye göre en iyi sonucu (%1.989735 hata) geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi vermiştir. Limit durum fonksiyonunu kullanma sayısı dikkate alındığında en iyi yöntem klasik yanıt yüzeyi olmasına karşın bu yöntemle elde edilen güvenilirlik analiz sonucu (%43.92420 hata) en kötü çıkmıştır. Bu durumda

güvenilirlik analiz sonucu ve limit durum fonksiyonu kullanma sayısı olarak en optimum sonucun geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminden alınabildiği görülmektedir. BDGY ve İDGY'den elde edilen sonuçlar DÖMCY'ye yakın çıkmasına karşın limit durum fonksiyon kullanımı açısından geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminden elde edilen sayıya göre çok fazladır ( $\approx 4.5$  kat).

Tablo 12. Uygulama 3'ün güvenilirlik analiz sonuçları

	$\beta$	$P_f$	$\beta$ için hata oranı (%)	Limit durum fonksiyonunu kullanma sayısı
DÖMCY ( $V_{pr} = \% 1.33$ )	2.5330	5.6500e-3	---	1000000
BDGY	2.2870	1.1100e-2	9.711804	149
İDGY	2.6320	4.2400e-3	3.908409	154
Klasik Yanıt Yüzeyi Yöntemi	1.4204	7.7744e-2	43.92420	12
Geliştirilmiş Yanıt Yüzeyi Yöntemi	2.4826	6.5219e-3	1.989735	32

#### 2.1.2.3. Uygulama 4: Lineer Olmayan Sarkacın Dinamik Davranışı

Açık limit durum fonksiyonları için geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizinin son uygulaması tek serbestlik dereceli lineer olmayan bir sarkaç (Bucher ve Bourgund, 1990; Rajashekhar ve Ellingwood, 1993; Gayton vd., 2003) modelidir. Bu amaçla, Şekil 40'da verilen dinamik yüke maruz sönümsüz bir yay kütle modeli seçilmiştir. Bu sistem için limit durum fonksiyonu olarak;

$$g = 3r - |u_{maks.}| \quad (80)$$

ifadesi tanımlanmıştır. Burada,  $r$  yaylardan birinin kopma anında yapmış olduğu yerdeğiştirmeyi ve  $u_{maks.}$  maksimum yerdeğiştirmeyi ifade etmektedir ve;

$$u_{maks.} = \frac{2F_1}{m\omega_0^2} \sin\left(\frac{\omega_0 t_1}{2}\right) \quad (81)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada,  $\omega_0$ ,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_1 + k_2}{m}} \quad (82)$$

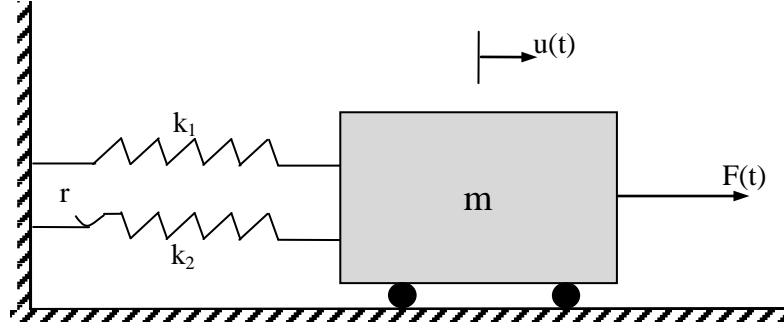
ifadesi ile tanımlanır.

Güvenilirlik analizinde dikkate alınan değişkenler ve bu değişkenlere ait istatistiksel özellikler Tablo 13'te verilmiştir.

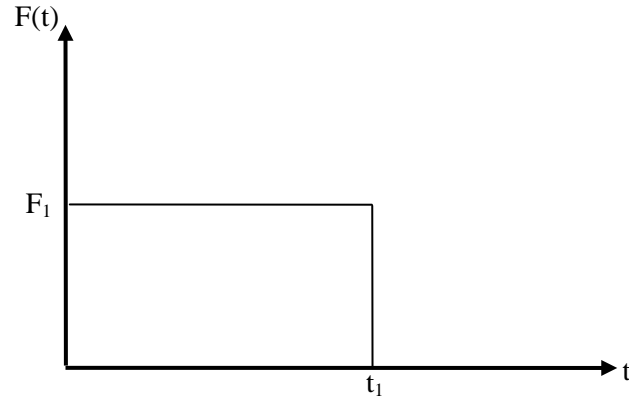
Tablo 13. Uygulama 4'te kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri

	Ortalama	Standart Sapma	Dağılım
m	1.00	0.05	Log-Normal
k <sub>1</sub>	1.00	0.10	Log-Normal
k <sub>2</sub>	0.10	0.01	Log-Normal
r	0.50	0.05	Log-Normal
F <sub>1</sub>	1.00	0.20	Log-Normal
t <sub>1</sub>	1.00	0.20	Log-Normal

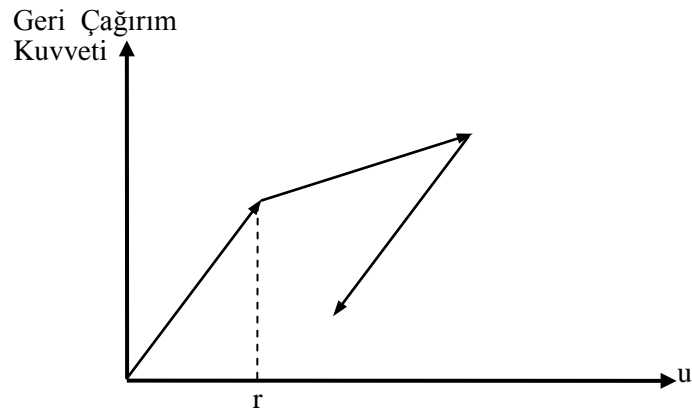
Güvenilirlik analiz sonuçlarına göre elde edilen bütün sonuçların hata oranları birbirine yakın çıkmaktadır. DÖMCY'ye göre en iyi sonucu İDGY %0.334358 hata oranı ile vermiştir. Geliştirilmiş yanıt yüzey yöntemi yaklaşık olarak İDGY ile aynı sonucu vermiştir. Limit durum fonksiyon kullanma sayısı olarak klasik yanıt yüzeyi yöntemi ve BDGY en iyi sonucu vermiştir. Ancak bu yöntemlerde elde edilen güvenilirlik analiz sonuçları diğer iki yönteme göre daha kötü çıkmıştır. Sonuç olarak, geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminden elde edilen sonuçlar kabul edilebilir limit durum fonksiyon kullanma sayısı ile birlikte en iyi yaklaşık sonucu veren İDGY'ye çok yakın çıkmıştır. Tablo 14'te güvenilirlik analiz sonuçları verilmektedir.



a) Model



b) Dinamik yük



c) Dayanım

Şekil 40. Tek serbestlik dereceli lineer olmayan sarkaç modeli, yüklemesi ve dayanımı

Tablo 14. Uygulama 4'ün güvenilirlik analiz sonuçları

	$\beta$	$P_f$	$\beta$ için hata oranı (%)	Limit durum fonksiyonunu kullanma sayısı
DÖMCY( $V_{pr} = \% 1.23$ )	1.8543	3.1850e-2	---	200000
BDGY	1.8325	3.3439e-2	1.175646	31
İDGY	1.8481	3.2292e-2	0.334358	65
Klasik Yanıt Yüzeyi Yöntemi	1.8324	3.3442e-2	1.181039	28
Geliştirilmiş Yanıt Yüzeyi Yöntemi	1.8432	3.2649e-2	0.598609	60

## 2.2. Kapalı Limit Durum Fonksiyonu İçin Geliştirilen Algoritmalar

Güvenilirlik analizi, belirli bir kriter altında, yapının sınır durumunu temsil eden fonksiyonlar kullanılarak belirsiz parametrelere göre göçme olasılığı hesabı olarak tanımlanmıştır. Ancak, kompleks yapılarda limit durum fonksiyonu belirsiz parametrelere bağlı olarak açık olarak ifade edilememektedir. Dolayısıyla, göçme olasılığının hesabında, yapı davranışının hesabında kullanılan sonlu elemanlar gibi yaklaşık algoritmalarla güvenilirlik analiz algoritmasının birleştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, FERUM güvenilirlik analiz programının ANSYS sonlu elemanlar programı ile birlikte çalışabilmesi sağlanmıştır.

ANSYS sonlu elemanlar programının FERUM programı ile birlikte kullanılması için ANSYS'in arka planda çalışma özelliğinden faydalanılmıştır. Bu özellik, programın kullanıcı grafik ara yüzünü açmadan dosya üzerinden işlem yapabilmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla, ANSYS programı bir başka programın alt programı olarak çağrılabilir. ANSYS programının bir diğer özelliği de veri dosyasının hazırlanmasında kendine ait bir programlama diline izin vermesidir. APDL olarak bilinen bu dil, FORTRAN program diline benzeyen ve komutları tekrarlama, makrolar, do-loop döngüleri, if-then-else döngüleri ile matris işlemleri gibi birçok komut özelliğine sahiptir. Bu sayede, ANSYS veri dosyasında istenilen işlem yapılabilen, istenilen veri dosyadan okunabilmekte ve istenilen veri dosyaya yazılabilmektedir.

### 2.2.1. Güvenilirlik Yöntemleri-ANSYS Birleşimi

FERUM-ANSYS birleştirmesi, direkt birleştirme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, güvenilirlik analizinde limit durum fonksiyonuna ihtiyaç duyulan her işlemde yeni bir ANSYS veri dosyası hazırlanarak sonlu elemanlar işlemi gerçekleştirmekte ve elde edilen sonuç bir dosyaya yazılarak FERUM tarafından okunması sağlanmaktadır. Bu işlem *ansys* alt programı ile FERUM programına eklenerek gerçekleştirilmiştir. Bu alt program, *responsematrix* alt programında kapalı limit durum fonksiyonları için çağrılmaktadır. Buna ek olarak, ANSYS veri dosyası direkt birleştirme yöntemine uygun dosya değiştirmelerini yapabilecek şekilde APDL kullanılarak düzenlenmiştir. Şekil 41’de verilen algoritma, *ansys* alt programında kullanılan döngüyü temsil etmektedir. Bu alt programa ait program kodu EK 1’de verilmiştir.



Şekil 41. Direkt birleştirme yöntemi

Oluşturulan algoritmanın doğruluğunu göstermek amacıyla bir örnek üzerinde hem açık hem kapalı limit durum fonksiyonları kullanılarak güvenilirlik analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, limit durum

fonksiyonu açık olarak ifade edilebilecek basit mesnetli bir kiriş modeli kullanılmıştır. Uygulama 5'te bu örneğin detayları verilmektedir.

### 2.2.1.1. Uygulama 5: Basit Kiriş Modeli

FERUM-ANSYS algoritmasının doğruluğunu göstermek amacıyla üzerinde yayılı yük bulunan basit mesnetli bir kiriş (Şekil 42') örnek olarak seçilmiştir. 6 m boyundaki bu kirişin hesap momentinin taşıma gücü momentini geçme durumu limit durum olarak dikkate alınarak güvenilirlik analizi gerçekleştirilmiştir. Buna göre limit durum fonksiyonu;

$$g = M_r - M_d \quad (83)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada,  $M_r$  taşıma gücü dayanımını ve  $M_d$  hesap dayanımını göstermektedir.  $M_r$  ve  $M_d$  ifadeleri aşağıda verilmektedir:

$$M_r = f_y A_s \left( h - a - \frac{1}{2} \frac{f_y A_s}{0.85 f_c b} \right) \quad (84)$$

$$M_d = \frac{(q + g + \gamma h b) l^2}{8} \quad (85)$$

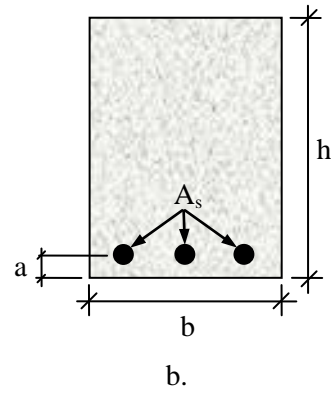
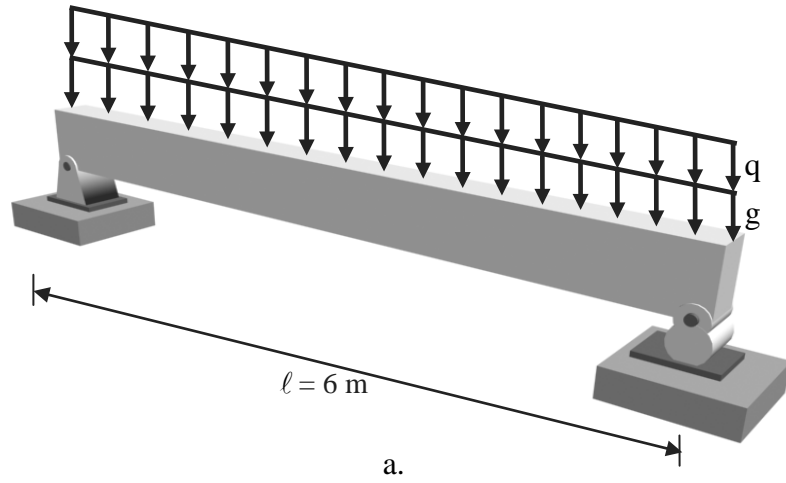
Bu ifadelerde sabit değerler yerine yazılırsa belirsiz parametrelere bağlı olarak limit durum fonksiyonu açık olarak;

$$g = 0.0035 x_5 \left( x_3 - 0.04 - \frac{1}{2} \frac{0.0035 x_5}{0.85 x_6 x_4} \right) - \frac{36 (x_1 + x_2 + 24 x_3 x_4)}{8} \quad (86)$$

şeklinde elde edilir.

Güvenilirlik analizinde hareketli (q) ve sabit (g) yük, kirişin kesit yüksekliği (h) ve genişliği (b), çeliğin akma dayanımı ( $f_y$ ) ve betonun basınç dayanımı ( $f_c$ ) belirsiz parametre olarak seçilmiştir. Bu parametrelerin istatistiksel değerleri Tablo 15'te verilmektedir.





Şekil 42. Basit kiriş modeli

Tablo 15. Uygulama 5’te kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri

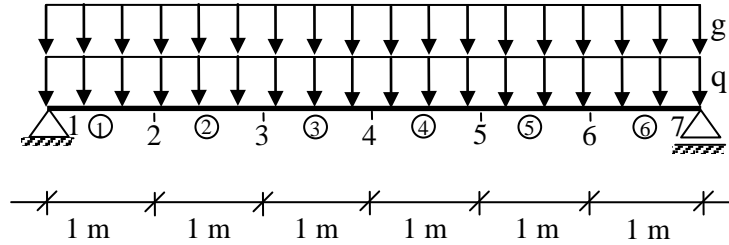
		Ortalama ( $\mu$ )	Standart Sapma ( $\sigma$ )	Dağılım
q (kN/m)	$x_1$	70	14	Gumbel
g (kN/m)	$x_2$	25	1.75	LogNormal
h (m)	$x_3$	0.6	0.03	Normal
b (m)	$x_4$	0.25	0.0125	Normal
$f_y$ (MPa)	$x_5$	560	61.6	LogNormal
$f_c$ (MPa)	$x_6$	35	4.2	Normal
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	---	24	---	Sabit
a (m)	---	0.04	---	Sabit
$A_s$ (m <sup>2</sup> )	---	0.0035	---	Sabit

Aynı kiriş sonlu elemanlar ile modellenerek hesap momenti ANSYS sonlu elemanlar programı yardımıyla elde edilmiştir. Kirişin sonlu elemanlar modeli oluşturulurken 6 eleman kullanılmıştır. Şekil 43'te kiriş modelin sonlu elemanlar ağı verilmektedir. Bu durumda limit durum fonksiyonu;

$$g = 0.0035x_5 \left( x_3 - 0.04 - \frac{1}{2} \frac{0.0035x_5}{0.85x_6x_4} \right) - M_d \quad (87)$$

ifadesi ile gösterilir. Burada,  $M_d$ , ANSYS'ten elde edilen hesap momentini temsil etmektedir.

Açık ve kapalı limit durum fonksiyonlarından elde edilen güvenilirlik analiz sonuçları Tablo 16'da verilmektedir. DÖMCY için 1000000, ÖÖMCY için 10000 örnek değer kullanılmıştır. Sonuçlardan da görüleceği üzere ÖÖMCY'de DÖMCY'ye göre 1/100 oranında örnek değer kullanılmasına rağmen daha kesin sonuçlar ( $V_{p_f} = \%2.10$ ) elde edilmiştir. Ayrıca, açık ve kapalı limit durum fonksiyonlarının güvenilirlik analizinden elde edilen sonuçlar hemen hemen birbirinin aynı olmaktadır.



Şekil 43. Kirişin sonlu elemanlar modeli

Tablo 16. Uygulama 5'in güvenilirlik analiz sonuçları

	Kapalı Limit Durum (FERUM-ANSYS)		Açık Limit Durum	
	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$
BDGY	<b>3.1664</b>	7.71646e-4	<b>3.1664</b>	7.71646e-4
İDGY	<b>3.1038</b>	9.55253e-4	<b>3.1036</b>	9.56068e-4
DÖMCY ( $V_{p_f} = \%3.10$ )	---	---	<b>3.1039</b>	9.55000e-4
ÖÖMCY ( $V_{p_f} = \%2.10$ )	<b>3.0962</b>	9.79950e-4	<b>3.0898</b>	10.0142e-4

### 2.2.2. Yanıt Yüzeyi Yöntemleri-ANSYS Birleşimi

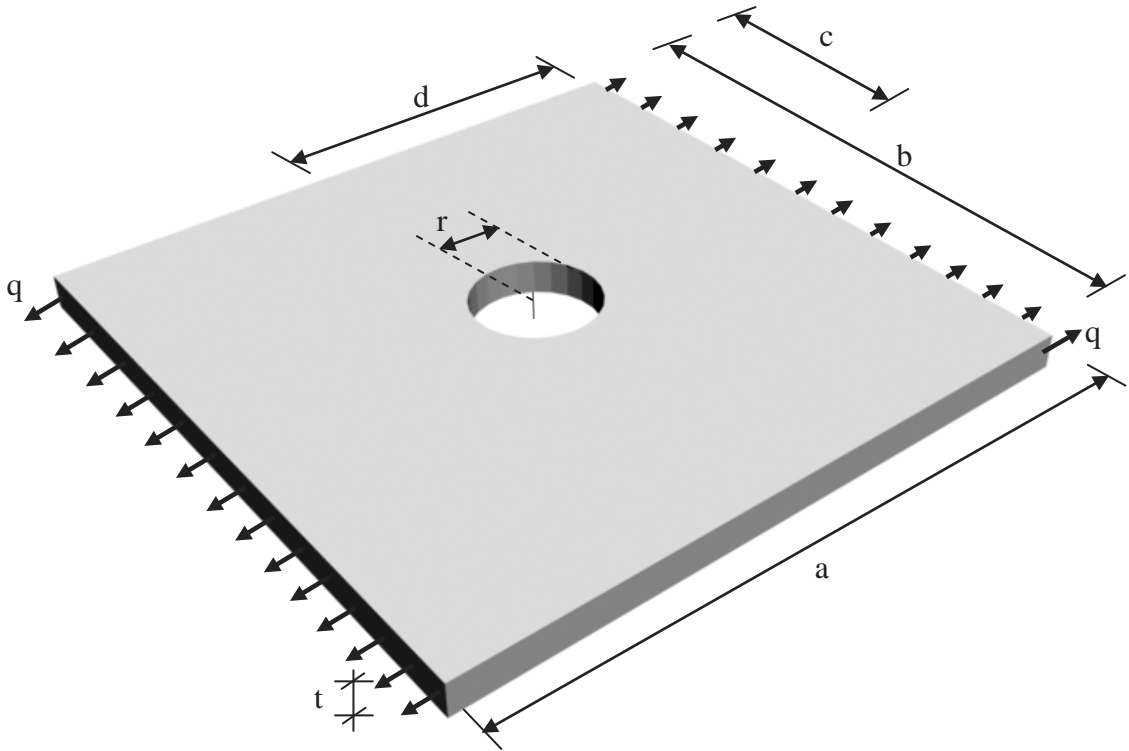
Yanıt yüzeyi yöntemleri ile kapalı limit durum fonksiyonlarının güvenilirlik analizi hesabında klasik yanıt yüzeyi yöntemi ve geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi algoritmalarında limit durum fonksiyonuna ihtiyaç duyulduğu durumlarda Şekil 41’de verilen algoritma dikkate alınmıştır. Oluşturulan yeni algoritmanın geçerliliğini göstermek amacıyla ortasında delik bulunan bir levha, literatürden seçilmiş iki adet uygulama (çerçeve sistem (Kim ve Na, 1997) ve kafes sistem (Kim ve Na, 1997; Lee ve Kwak, 2006)) ve perde duvarlı bir çerçeve sistem örnek olarak seçilmiştir.

#### 2.2.2.1. Uygulama 6: Ortası Delikli Levha

Ortasında delik bulunan kare bir levha, geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi ile kapalı limit durum fonksiyonlarının güvenilirlik analizini göstermek amacıyla ilk örnek olarak seçilmiştir. Şekil 44’te üst ve alt kenarlarından yayılı yüklerle çekilmiş levhanın şekli verilmektedir. Bu uygulamada, çeliğin elastisite modülü (E), poisson oranı ( $\nu$ ), levha kalınlığı (t), levha boyutları (a ve b), deliğin yarıçapı (r) ve yayılı yük belirsiz parametreler olarak seçilmiştir. Bu değişkenlere ait istatistiksel veriler Tablo 17’de verilmektedir.

Tablo 17. Uygulama 6’da kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri

	Ortalama	$V_x$ (%)	Dağılım
E (kN/m <sup>2</sup> )	2.10e8	5	LogNormal
$\nu$	0.3	5	LogNormal
t (m)	0.001	2	LogNormal
a (m)	0.1	3	LogNormal
b (m)	0.1	3	LogNormal
r (m)	0.01	1	Normal
q (kN/m)	30	10	Gumbel
c (m)	0.05	0	Sabit
d (m)	0.05	0	Sabit

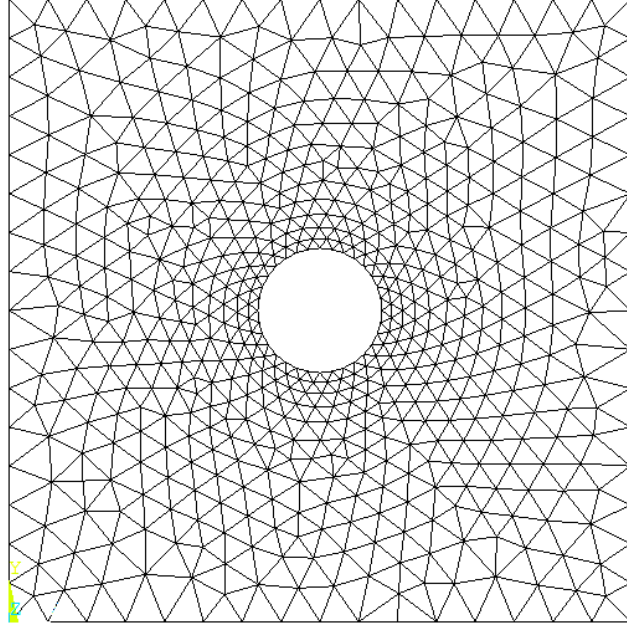


Şekil 44. Ortasında delik bulunan levha

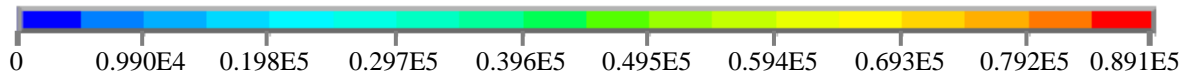
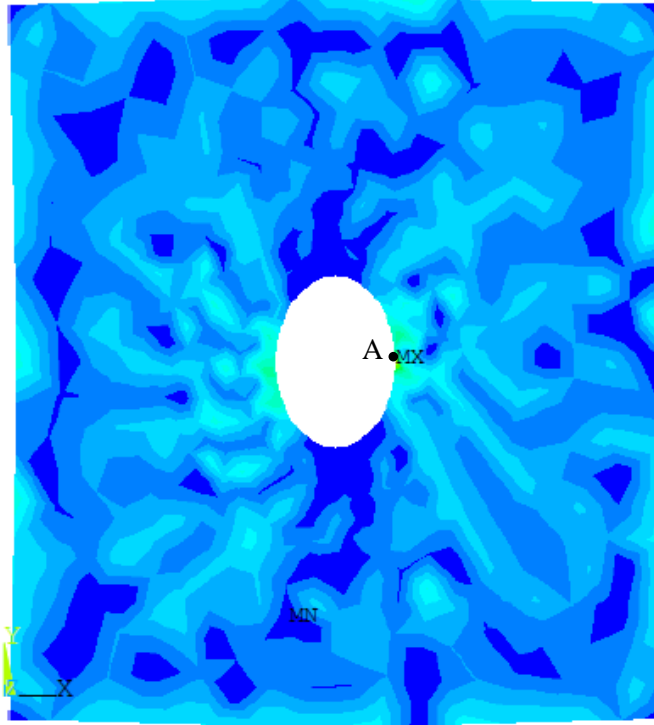
Levhanın sonlu elemanlar ağı oluşturulurken 6 düğüm noktalı üçgen izoparametrik kabuk elemanlar kullanılmıştır. Şekil 45'te levhaya ait sonlu elemanlar ağı verilmiştir. Levhada limit durum olarak çekme gerilmesinin emniyet gerilmesinden büyük olması olarak tanımlanmıştır. Buna göre limit durum fonksiyonu;

$$g = 140000 - \sigma_{\text{maks.}} \quad (88)$$

olarak tanımlanmıştır.  $\sigma_{\text{maks.}}$  değeri Şekil 46'da verilen gerilme kontur diyagramında maksimum çekme gerilmesinin olduğu A noktasındaki değer olarak tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 18'de verilmektedir. Bu sonuçlara göre, genel olarak güvenilirlik indeksleri birbirine yakın çıkmıştır. Ancak en iyi sonuç %0.250439 hata ile geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminden elde edilmiştir. Limit durum fonksiyonu kullanma sayısı olarak en az koşum sayısı klasik yanıt yüzeyi yöntemi vermiştir. Ancak geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi ile klasik yanıt yüzeyi yöntemi arasında limit durum kullanma sayısı açısından çok fark bulunmamaktadır.



Şekil 45. Levhanın sonlu elemanlar ağı



Şekil 46. Levhanın kontur diyagramı

Tablo 18. Uygulama 6'nın güvenilirlik analiz sonuçları

	$\beta$	$P_f$	$\beta$ için hata oranı (%)	Limit durum fonksiyonunu kullanma sayısı
ÖÖMCY ( $V_{p_f} = \%1.71$ )	2.6753	3.73300e-3	---	10054
BDGY	2.6912	3.55996e-3	0.594326	54
Klasik Yanıt Yüzeyi Yöntemi	2.6892	3.58122e-3	0.519568	32
Geliştirilmiş Yanıt Yüzeyi Yöntemi	2.6820	3.65873e-3	0.250439	68

### 2.2.2.2. Uygulama 7: Çerçeve Sistem

Kapalı limit durum fonksiyonlarının güvenilirlik analizinde geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminin geçerliliğini göstermek amacıyla 6 katlı 2 açıklıklı bir çerçeve sistem (Kim ve Na, 1997) ikinci uygulama olarak seçilmiştir. Şekil 47'de tekil yüklerle yanal olarak yüklenmiş bu çerçeve sistem verilmiştir. Çerçeve sistemde limit durum olarak en üst kat yatay yerdeğiştirmesinin 0.11 m'yi geçmesi olarak tanımlanmıştır. Buna göre, limit durum fonksiyonu;

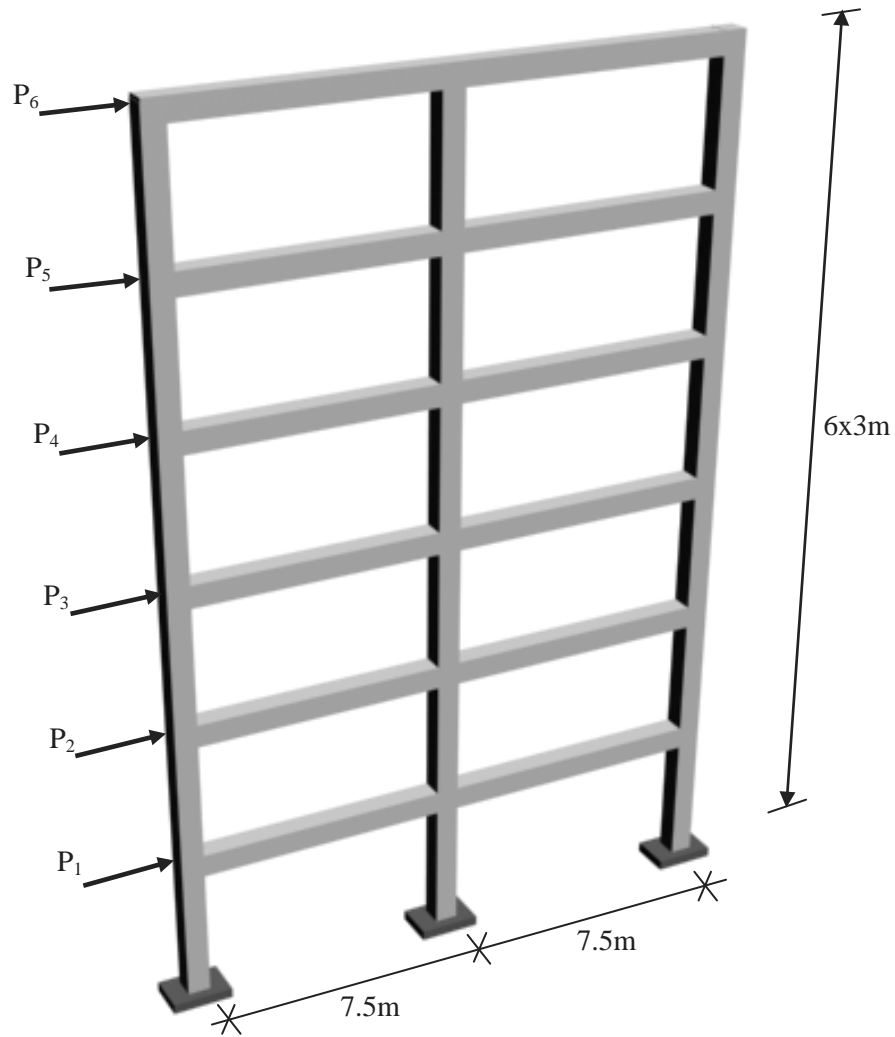
$$g = 0.11 - u_{maks} \quad (89)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Burada,  $u_{maks}$  çerçeve sistemin en üst kat yanal ötelenmesini göstermektedir. Güvenilirlik analizinde belirsiz parametre olarak yatay yükler, kolon ve kirişlerin elastisite modülleri ve atalet momentleri dikkate alınmıştır. Bu parametrelerin istatistiksel özellikleri Tablo 19'da verilmektedir.

Tablo 20'de verilen sonuçlara göre, ÖÖMCY sonuçlarına göre en küçük hata oranlarını (%0.070025 ve %0.089477) veren sonuçlar klasik ve geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemlerinden elde edilmektedir. Limit durum fonksiyonunu kullanma sayısı olarak klasik yanıt yüzeyi yöntemi diğer yöntemlerden daha iyi sonuç vermiştir. BDGY en uzak sonucu en fazla koşum sayısı ile birlikte elde etmiştir. Geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminin koşum sayısı klasik yanıt yüzeyi yöntemine göre fazla olmasına rağmen aradaki fark dikkate alındığında yöntemin uygulanabilir olduğu görülmektedir.

Tablo 19. Uygulama 7’de kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri

	Ortalama	Standart Sapma	Dağılım
$E_{\text{kolon}} \text{ (N/m}^2\text{)}$	2.0E10	2.0E9	Log-Normal
$I_{\text{kolon}} \text{ (m}^4\text{)}$	1.0E-3	1.0E-4	Log-Normal
$E_{\text{kiriş}} \text{ (N/m}^2\text{)}$	2.0E10	2.0E9	Log-Normal
$I_{\text{kiriş}} \text{ (m}^4\text{)}$	1.5E-3	1.5E-4	Log-Normal
$P_1 \text{ (N)}$	25000	6250	Normal
$P_2 \text{ (N)}$	28000	7000	Normal
$P_3 \text{ (N)}$	29000	7250	Normal
$P_4 \text{ (N)}$	30000	7500	Normal
$P_5 \text{ (N)}$	31000	7750	Normal
$P_6 \text{ (N)}$	32000	8000	Normal



Şekil 47. Çerçeve sistem

Tablo 20. Uygulama 7'nin güvenilirlik analiz sonuçları

	$\beta$	$P_f$	$\beta$ için hata oranı (%)	Limit durum fonksiyonunu kullanma sayısı
ÖÖMCY( $V_{p_f} = \%1.72$ )	2.5705	5.07725e-3	---	10375
BDGY	2.5789	4.95558e-3	0.326784	375
Klasik Yanıt Yüzeyi Yöntemi	2.5687	5.10407e-3	0.070025	44
Geliştirilmiş Yanıt Yüzeyi Yöntemi	2.5728	5.04417e-3	0.089477	92

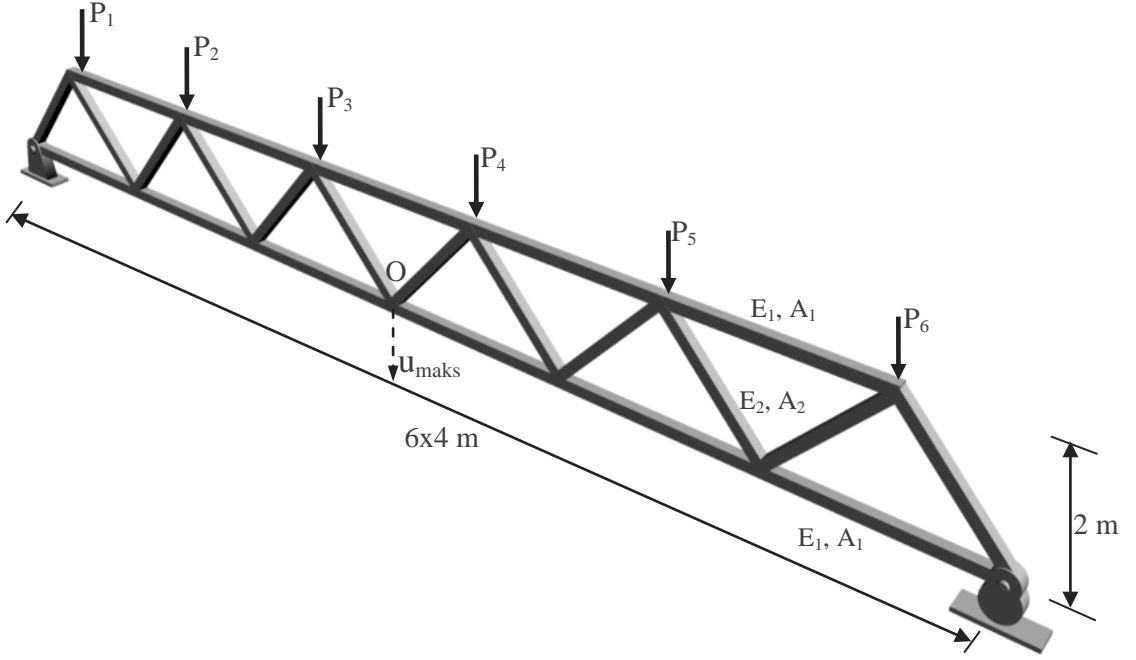
### 2.2.2.3. Uygulama 8: Kafes Sistem

Kapalı limit durum fonksiyonlarını kullanarak geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizini göstermek amacıyla seçilen diğer bir uygulama 23 elemandan oluşan kafes sistemdir (Kim ve Na, 1997; Lee ve Kwak, 2006). Şekil 48'de bu kafes sistemin şekli verilmiştir. Kafes sistemde belirsiz parametre olarak çubuk elemanların elastisite modülleri, kesit alanları ve kafes sistemin maruz kaldığı düşey yükler dikkate alınmıştır. Bu değişkenlere ait istatistiksel özellikler Tablo 21'de verilmiştir. Limit durum fonksiyonu olarak alt başlık orta noktasının düşey yerdeğiştirmesinin 0.11m'yi geçmesi düşünülmüştür. Buna göre kapalı limit durum fonksiyonu;

$$g = 0.11 - u_{maks} \quad (90)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $u_{maks}$  O noktasının düşey yerdeğiştirmesini temsil etmektedir.





Şekil 48. Kafes sistem

Tablo 21. Uygulama 8’de kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri

	Ortalama	Standart Sapma	Dağılım
$E_1$ (N/m <sup>2</sup> )	2.1e11	2.1E10	Log-Normal
$E_2$ (N/m <sup>2</sup> )	2.1e11	2.1E10	Log-Normal
$A_1$ (m <sup>2</sup> )	2.0e-3	2.0E-4	Log-Normal
$A_2$ (m <sup>2</sup> )	1.0e-3	1.0E-4	Log-Normal
$P_1$ (N)	5.0e4	7.5e3	Gumbel
$P_2$ (N)	5.0e4	7.5e3	Gumbel
$P_3$ (N)	5.0e4	7.5e3	Gumbel
$P_4$ (N)	5.0e4	7.5e3	Gumbel
$P_5$ (N)	5.0e4	7.5e3	Gumbel
$P_6$ (N)	5.0e4	7.5e3	Gumbel

Elde edilen sonuçlar Tablo 22’de verilmektedir. Bu sonuçlara göre, en iyi limit durum fonksiyonu kullanım sayısını BDGY (48) ve klasik yanıt yüzeyi yöntemi (44) vermiştir. Ancak, sonuçlar ÖÖMCY’den elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminin en küçük hata oranı (%4.436831) ile güvenilirlik analizini gerçekleştirdiği görülmektedir. Ayrıca, limit durum fonksiyonu kullanım sayısı

açısından diğer yöntemlerden fazla bir fark olmamasına rağmen sonuçlar açısından diğer yöntemlerle arasında fark olduğu görülmektedir.

Tablo 22. Uygulama 8'in güvenilirlik analiz sonuçları

	$\beta$	$P_f$	$\beta$ için hata oranı (%)	Limit durum fonksiyonunu kullanma sayısı
ÖÖMCY( $V_{P_f} = \%1.86$ )	2.3643	9.03217e-3	---	10048
BDGY	2.5749	5.01334e-3	8.907499	48
Klasik Yanıt Yüzeyi Yöntemi	1.5523	6.02969e-2	34.344203	44
Geliştirilmiş Yanıt Yüzeyi Yöntemi	2.4692	6.77038e-3	4.436831	92

#### 2.2.2.4. Uygulama 9: Perdeli Çerçeve Sistem

Geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizini kapalı limit durum fonksiyonları için geçerliliğini göstermek amacıyla seçilen son örnek Şekil 49'da gösterilen 10 katlı, 4 açıklıklı ve 1 açıklığı 10 kat boyunca perde duvar olan bir çerçeve sistemdir. Bu sistemde, betonun elastisite modülü, poisson oranı, kolon ve kirişin atalet momentleri, perde kalınlığı ve yanal yükler olmak üzere toplam 15 adet belirsiz parametre dikkate alınmıştır. Tablo 23'te bu belirsizlere ait istatistiksel özellikler verilmiştir.

Limit durum olarak iki fonksiyon dikkate alınmıştır. Bunlardan birincisi, perde duvarda oluşan maksimum basınç gerilmesinin emniyet gerilmesinden büyük olması ve ikincisi, rölatif kat ötelenmesinin DBYBHY (2007)'de öngörülen değeri aşması durumudur. Perde duvarda maksimum gerilme, perde duvarın sağ alt köşesinde ve en büyük rölatif kat ötelenmesi 7.kat ile 8. kat arasında meydana gelmiştir.

Dikkate alınan kriterlere göre limit durum fonksiyonları:

- Beton basınç dayanımı için

$$g = 20000 - \sigma_{\text{maks.}} \quad (91)$$

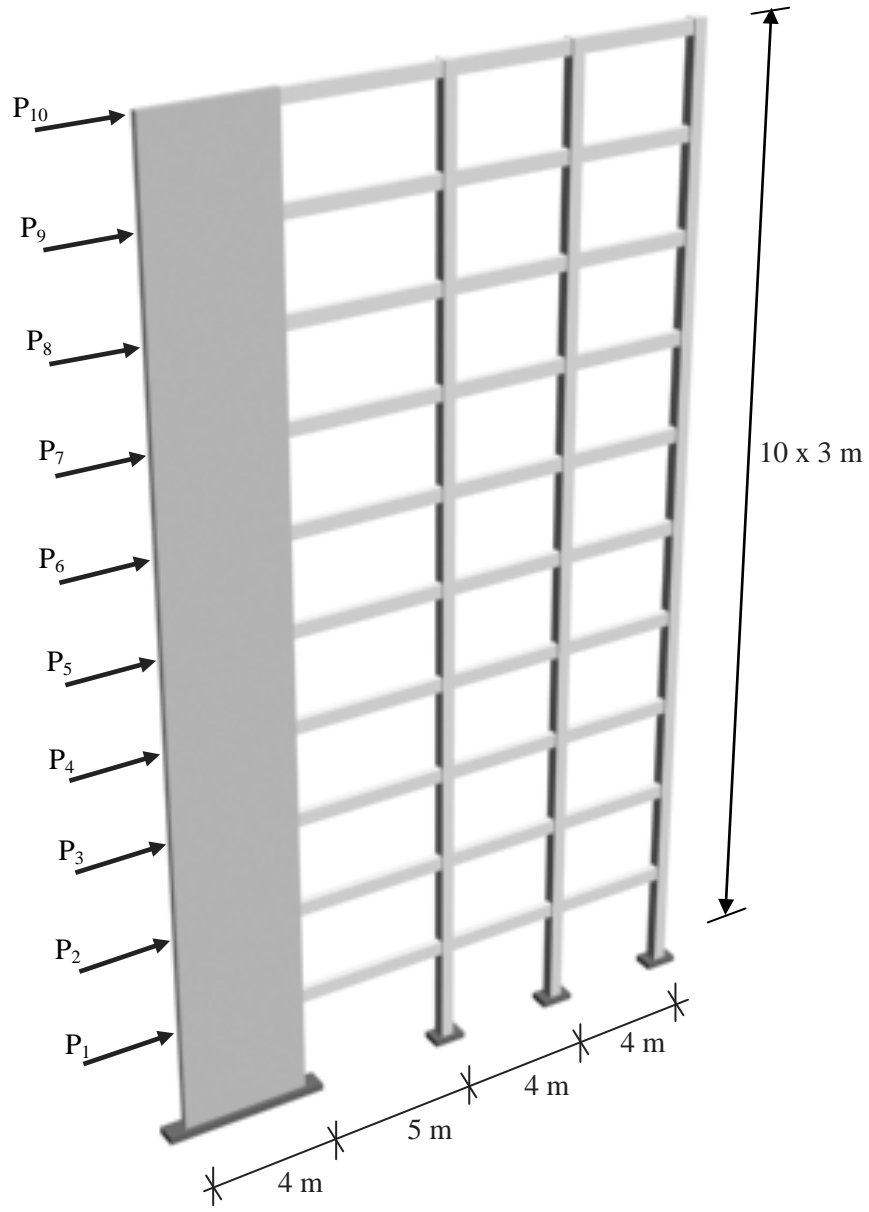
- Rölatif kat ötelenmesi için (DBYBHY, 2007)

$$g = 0.0035 - (u_8 - u_7)/h \quad (92)$$

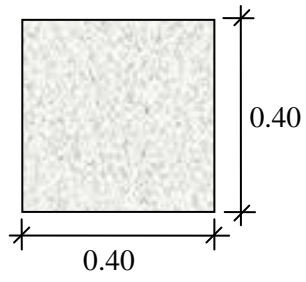
Burada,  $\sigma_{maks.}$  Şekil 50'de gösterilen A noktasının gerilmesini, h kat yüksekliğini,  $u_8$  ve  $u_7$  sırasıyla 8. ve 7. kat yanal yerdeğiştirmelerini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, beton basınç dayanımı limit durumu için Tablo 24'te, rölatif kat ötelenmesi limit durumu için Tablo 25'te verilmektedir. Sonuçlara göre:

Tablo 23. Uygulama 9'da kullanılan belirsiz parametrelerin istatistiksel özellikleri

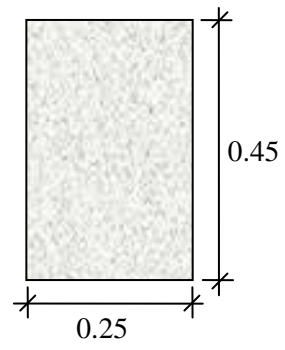
	Ortalama	$V_x$ (%)	Dağılım
$E_{beton}$ (kN/m <sup>2</sup> )	2.8E7	10	Log-Normal
$\nu$	0.2	5	Log-Normal
$I_{kolon}$ (m <sup>4</sup> )	2.13333E-3	10	Normal
$I_{kiriş}$ (m <sup>4</sup> )	1.89844E-3	10	Normal
t (m)	0.25	5	Log-Normal
$P_1$ (kN)	8	10	Gumbel
$P_2$ (kN)	25	10	Gumbel
$P_3$ (kN)	40	10	Gumbel
$P_4$ (kN)	57	10	Gumbel
$P_5$ (kN)	75	10	Gumbel
$P_6$ (kN)	89	10	Gumbel
$P_7$ (kN)	103	10	Gumbel
$P_8$ (kN)	117	10	Gumbel
$P_9$ (kN)	130	10	Gumbel
$P_{10}$ (kN)	140	10	Gumbel
$A_{kolon}$ (m <sup>2</sup> )	0.16	0	Sabit
$A_{kiriş}$ (m <sup>2</sup> )	0.1125	0	Sabit



a.



b. Kolon kesiti



c. Kiriş kesiti

Şekil 49. Perdeli çerçeve sistem

- Beton basınç dayanımı için

Geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizinden elde edilen sonuçlar diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlara göre daha az hata oranı (%1.849873) ile en iyi sonucu vermiştir. Klasik yanıt yüzeyi ve BDGY'den elde edilen sonuçlarda %20 civarında hata ile sonuca ulaşılmıştır. Limit durum fonksiyonunu kullanma sayısı açısından bu iki yöntem geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizine göre daha az çıkmıştır. Ancak, güvenilirlik analiz sonuçlarındaki hata yüzdesi fazla olduğundan limit durum kullanım sayısındaki azlığın önemi kalmamaktadır.

Tablo 24. Uygulama 9'un güvenilirlik analiz sonuçları (beton basınç dayanımı için limit durum)

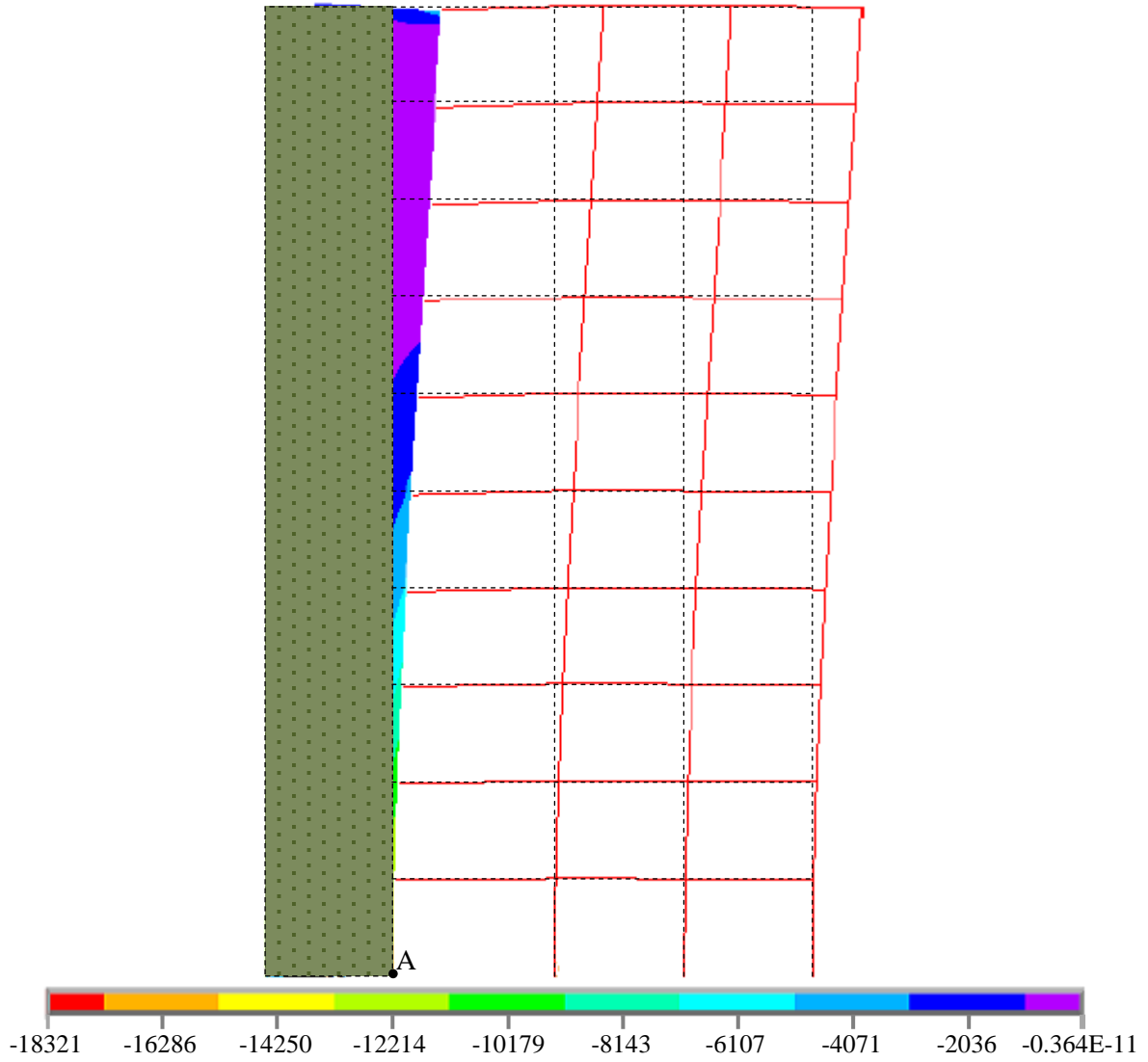
	$\beta$	$P_f$	$\beta$ için hata oranı (%)	Limit durum fonksiyonunu kullanma sayısı
ÖÖMCY( $V_{Pr} = \%1.47$ )	1.4974	6.71491e-2	---	10067
BDGY	1.8109	3.50804e-2	20.93628	67
Klasik Yanıt Yüzeyi Yöntemi	1.8098	3.51664e-2	20.86283	64
Geliştirilmiş Yanıt Yüzeyi Yöntemi	1.4697	7.08173e-2	1.849873	132

- Rölatif kat ötelenmesi için

Rölatif kat ötelenmesi için gerçekleştirilen güvenilirlik analizinde de beton basınç dayanımı için elde edilen güvenilirlik analiz sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. Klasik yanıt yüzeyi ve BDGY'den elde edilen sonuçlar ÖÖMCY'ye göre sırasıyla %8.830223 ve %9.501593 hata ile yaklaşabilmiştir. Buna karşın, geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizinde %0.711197 hata ile sonuca ulaşılmıştır. Geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizinde limit durum fonksiyon kullanım sayısı bakımından diğer iki yöntemle göre fazla çıkmıştır. Ancak, sonuçlara yakınlığı dikkate alındığında bu sayının kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu söylenebilir.

Tablo 25. Uygulama 9'un güvenilirlik analiz sonuçları (rölatif kat ötelemesi için limit durum)

	$\beta$	$P_f$	$\beta$ için hata oranı (%)	Limit durum fonksiyonunu kullanma sayısı
ÖÖMCY( $V_{P_f} = \%1.47$ )	1.7576	3.94044e-2	---	10068
BDGY	1.9246	2.71389e-2	9.501593	68
Klasik Yanıt Yüzeyi Yöntemi	1.9128	2.78889e-2	8.830223	64
Geliştirilmiş Yanıt Yüzeyi Yöntemi	1.7451	4.04795e-2	0.711197	162



Şekil 50. Perdeli çerçeve sistemin gerilme ve yerdeğiştirme diyagramı

### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Güvenilirlik analizi belirsiz parametreler dikkate alınarak yapının ekonomik ömrü boyunca hasara uğrama veya göçme olasılığını hesaplama işlemidir. Burada amaç, yapının herhangi bir zaman diliminde göstereceği davranışı belirlemekten ziyade bu davranışın yapı üzerindeki etkisini incelemektir. Yapı davranışını belirlerken en yaygın ve en ideal çözüm olarak bilinen Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmaktadır. Ancak, güvenilirlik analizinde amaç yapının yerdeğiştirmesini veya yapıdaki gerilmeleri hesaplamak olmadığından, bu analizde sonlu elemanlar amaç değil araçtır. Bu nedenle, yapının güvenilirlik analizi gerçekleştirilirken sonlu elemanlar ve güvenilirlik analizi algoritması birlikte kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında güvenilirlik analizi-sonlu elemanlar birleştirmesi için yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizi olarak adlandırılan bu algoritma, birleşimi, klasik yanıt yüzeyi yöntemine yeni yaklaşımlar ekleyerek gerçekleştirmektedir. Algoritmanın güvenilirlik analiz kısmında FERUM programı, sonlu elemanlar kısmında ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. ANSYS sonlu elemanlar programının güvenilirlik analizinde tercih edilme sebebi, ANSYS'in arka planda çalışma özelliğinin bulunması ve veri dosyasında programlama yapılabilmesidir. Bu iki özelliği sayesinde, ANSYS, FERUM programında bir alt program gibi çalıştırılmıştır. Tez çalışmasında, geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizi algoritmasını elde edebilmek ve diğer yöntemler ile karşılaştırabilmek için ön çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar:

1. Klasik yanıt yüzeyi yönteminin açık limit durum fonksiyonları için FERUM'a eklenmesi
2. Klasik yanıt yüzeyi yönteminin kapalı limit durum fonksiyonları için güncellenmesi
3. FERUM'un kapalı limit durum fonksiyonları ile güvenilirlik analizi yapabilmesi için ANSYS'in FERUM'a uyarlanması

Bu çalışmalar gerçekleştirildikten sonra geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi algoritması oluşturulmuş ve bu algoritma FERUM'a eklenmiştir. Elde edilen yeni yöntem ile ANSYS birleştirilerek geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analiz yönteminin kapalı limit durum fonksiyonlarında da sonuç alabilmesi sağlanmıştır. Tez çalışmasında, yapılan bütün ön çalışmalar birer örnek yardımıyla test edilmiş ve doğrulanmıştır.

Geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizinin doğruluğunu göstermek amacıyla 3 adet açık limit durum fonksiyonlu, 4 adet kapalı limit durum fonksiyonlu olmak üzere toplam 7 adet örnek çözülmüştür. Bu örnekler, karşılaşılabilecek problemlerin genelini kapsamı açısından geniş bir yelpaze içinde seçilmiştir. Bu amaçla, lineer olmayan bir fonksiyon, yüksek mertebede lineer olmayan bir fonksiyon ve lineer olmayan sarkacın dinamik davranışını gösteren bir fonksiyon açık limit durum fonksiyonları için; plak, çerçeve, kafes ve perdeli çerçeve sistemleri kapalı limit durum fonksiyonları için seçilen örneklerdir. Çalışmada yaklaşık yöntemlerden elde edilen sonuçlar, açık limit durum fonksiyonlu örneklerde DÖMCY'den, kapalı limit durum fonksiyonlu örneklerde ÖÖMCY'den elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. DÖMCY'de 1000000, ÖÖMCY'de 10000 simülasyon sayısı kullanılmıştır.

Genel olarak elde edilen sonuçlara göre geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminin iyi sonuç verdiği ve limit durum fonksiyonu kullanma sayısı olarak da diğer yöntemlerle çok fazla fark olmadığı söylenebilir. Bütün örneklerde limit durum kullanma sayısı en az klasik yanıt yüzeyi yönteminde elde edilmesine rağmen, lineer olmama durumunun dikkate alındığı açık limit durum fonksiyonlarında bu yöntemin iyi sonuç vermediği gözlenmiştir. Bu sonuçtan yola çıkarak, kapalı limit durum fonksiyonları için kafes sisteminin ve perdeli çerçeve sisteminin limit durum fonksiyonlarının lineer olmadığı söylenebilir. Lineere yakın fonksiyonlarda bütün yöntemlerden elde edilen sonuçlar birbirine yakın olmaktadır. Genel olarak ifade edilen sonuçlar aşağıda her bir örnek için özetlenmektedir.

1. Lineer olmayan fonksiyona sahip konsol giriş örneğinde DÖMCY'den elde edilen sonuçlara en yakın sonucu geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi, en uzak sonucu klasik yanıt yüzeyi yöntemi vermiştir. BDGY ve İDGY'nin sonuçları geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminin sonuçlarına yakın elde edilmiştir. Limit durum fonksiyonu kullanım sayısı açısından, sonuçlar bütün yöntemlerde yaklaşık olarak birbirine yakın çıkmıştır.
2. Yüksek mertebede lineer olmayan limit durum fonksiyonu için elde edilen sonuçlara göre, en iyi sonuç geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizinden, en kötü sonuç klasik yanıt yüzeyi yönteminden elde edilmiştir. BDGY ve İDGY, geliştirilmiş yanıt yüzeyine yakın sonuçlar vermesine karşın limit durum fonksiyonu kullanma sayısı bakımından yaklaşık 4.5 kat gibi bir fark ortaya çıkmaktadır.
3. Lineer olmayan sarkacın dinamik davranışını dikkate alan limit durum fonksiyonunun güvenilirlik analizinde, en iyi sonucu İDGY ve geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizi, en kötü sonucu BDGY ve klasik yanıt yüzeyi yöntemi vermiştir.



Limit durum fonksiyonu kullanım sayısı olarak da güvenilirlik analizinden elde edilen sonucun tam tersi elde edilmiştir.

4. Ortasında delik bulunan levha örneğinde, en iyi sonucu geliştirilmiş yanıt yüzeyi yöntemi en kötü sonucu BDGY vermiştir. Ancak, bütün yöntemlerde hem sonuçlar hem de limit durum fonksiyonu kullanma sayıları birbirine çok yakın çıkmıştır.
5. Çerçeve sistemin güvenilirlik analiz sonuçlarına göre geliştirilmiş yanıt yüzeyi ve klasik yanıt yüzeyi yönteminden elde edilen sonuçlar en iyi sonucu vermiştir. Buna karşın BDGY'den elde edilen sonuçlar diğer iki yöntemle göre hem kötü olmakta hem de limit durum fonksiyonu kullanım sayısı açısından fark çıkmaktadır.
6. Kafes sistemde klasik yanıt yüzeyi yöntemi farklı biçimde hatalı sonuç vermiştir. Bununla birlikte, geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizinde elde edilen sonuçlar ÖÖMCY'den elde edilen sonuçlara en yakın çıkmaktadır. Limit durum fonksiyonu kullanım sayısı açısından en az değeri BDGY ve klasik yanıt yüzeyi yöntemi vermesine rağmen, geliştirilmiş yanıt yüzeyi yönteminden elde edilen sonuçlar bu iki yöntemden fazla farklı olmamaktadır.
7. Perdeli çerçeve sistemde beton basınç kriterine ve rölatif kat ötelemesine göre gerçekleştirilen güvenilirlik analiz sonuçları birbirine paralellik göstermektedir. İki sonuçta da BDGY ve klasik yanıt yüzeyi yöntemi birbirine çok yakın olmakta, ancak ÖÖMCY'den elde edilen sonuçlara çok uzak çıkmaktadır. Bununla birlikte, geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizinde sonuçlar ÖÖMCY'ye çok yakın olmaktadır. Limit durum fonksiyonu kullanım sayısı geliştirilmiş yanıt yüzeyinde diğer yöntemlere göre biraz farklı olmaktadır. Ancak, güvenilirlik analiz sonuçlarındaki hata oranları göz önüne alındığı zaman bu fark kabul edilebilir düzeydedir.

Bu tez çalışmasında dikkate alınmayan ancak ileriki çalışmalara ışık tutması açısından aşağıda sıralanan öneriler yapılmaktadır:

1. Geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizi, birbirinden bağımsız değişkenlerle değil, korelasyonlu değişkenlerle gerçekleştirilebilir.
2. Geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizinde, eleman bazında çözüm yerine sistem bazında çözüm yapılabilir.
3. Geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizi, zamana bağlı limit durum fonksiyonları için geliştirilebilir.
4. Geliştirilmiş yanıt yüzeyi ile güvenilirlik analizinde optimizasyon veya yapay sinir ağları kullanılarak yöntem geliştirilebilir.

#### 4. KAYNAKLAR

- Ang, A.H-S. ve Tang, W.H., 2007. Probability Concepts in Engineering, John Wiley&Sons Inc., United State of America, 406 s.
- ANSYS, 2008. Swanson Analysis Systems Inc., Houston PA, USA.
- Babu, G.L.S. ve Srivastava, A., 2007. Reliability Analysis of Allowable Pressure on Shallow Foundation Using Response Surface Method, Technical note, Computers and Geotechnics, 34, 187–194.
- Beyazıt, M., 1996, İnşaat Mühendisliğinde Olasılık Yöntemleri, İTÜ Matbaası, İstanbul, 245 s.
- Bjerager, P., 1988. Probability Integration by Directional Simulation, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 114, 8, 1285–302.
- Borri, A. ve Speranzini, E., 1997. Structural Reliability Analysis Using a Standard Deterministic Finite Element Code, Structural Safety, 19, 4, 361-382.
- Box, G.E.P. ve Wilson, K.B., 1954. The Exploration and Exploitation of Response Surfaces: Some General Considerations and Examples, Biometrics, 10, 16-60.
- Breitung, K., 1984. Asymptotic Approximation for Multi-Normal Integrals, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 110, 3, 357–366.
- Breitung, K.W., 1994. Asymptotic Approximations for Probability Integrals, Springer-Verlag, Berlin, 146 s.
- Bucher, C., Hintze, D. ve Roos, D., 2000. Advanced Analysis of Structural Reliability Using Commercial FE-Codes, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering- ECCOMAS 2000, Barcelona.
- Bucher, C. ve Most, T., 2008. A Comparison of Approximate Response Functions in Structural Reliability Analysis, Probabilistic Engineering Mechanics, 23, 154-163.
- Bucher, C.G., 1988. Adaptive Sampling—an Iterative Fast Monte Carlo Procedure, Structural Safety, 5, 2, 119–26.
- Bucher, C.G. ve Bourgund, U., 1990. A Fast and Efficient Response Surface Approach for Structural Reliability Problems, Structural Safety, 7, 57-66.
- Cai, G.Q. ve Elishakoff, I., 1994. Refined Second-Order Reliability Analysis, Structural Safety, 14, 267–276.

- Cheng J., Cai C.S., Xiao R.C. ve Chen, S.R., 2005. Flutter Reliability Analysis of Suspension Bridges, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 93, 757–775.
- Cheng, J., Lib, Q.S. ve Xiao, R.C., 2008. A New Artificial Neural Network-Based Response Surface Method for Structural Reliability Analysis, Probabilistic Engineering Mechanics, 23, 51–63.
- Cho, S.E., 2009. Probabilistic Stability Analyses of Slopes Using the ANN-Based Response Surface, Computers and Geotechnics. (in press)
- Cho, T. ve Kim, T.S., 2008. Probabilistic Risk Assessment for the Construction Phases of a Bridge Construction Based on Finite Element Analysis, Finite Elements in Analysis and Design, 44, 6-7, 383-400.
- Chowdhury, R. ve Rao, B.N., 2009. Assessment of High Dimensional Model Representation Techniques for Reliability Analysis, Probabilistic Engineering Mechanics, 24, 1, 100-115.
- Cornell C.A., 1969. A Probability-Based Structural Code, Journal of the American concrete Institute, 66, 12.
- Das, P.K. ve Zheng, Y., 2000. Cumulative Formation of Response Surface and Its Use in Reliability Analysis, Probabilistic Engineering Mechanics, 15, 309-315.
- DBYBHY, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, İMO Ankara Şubesi, Ankara.
- Der Kiureghian, A. ve De Stefano, M., 1991. Efficient Algorithm for Second-Order Reliability Analysis, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 117, 12, 2904–2923.
- Der Kiureghian, A., Lin, H.Z. ve Hwang, S.J., 1987. Second-Order Reliability Approximations, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 113, 8, 1208–1225.
- Ditlevsen, O. ve Madsen, H.O., 2002. Structural Reliability Methods, Internet Edition 2.1, 351 s.
- Elhewy, A.H., Mesbahi, E. ve Pu, Y., 2006. Reliability Analysis of Structures Using Neural Network Method, Probabilistic Engineering Mechanics, 21, 44-53.
- Faravelli, L., 1989. Response-Surface Approach for Reliability Analysis, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 115, 2763-278.
- Fiessler, B., Neumann, H-J. ve Rackwitz, R., 1979. Quadratic Limit States in Structural Reliability, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 105, 4, 661–676.
- Gavin, H.P. ve Yau, S.C., 2008. Higher Order Limit State Functions in the Response Surface Method for Structural Reliability Analysis, Structural Safety, 30, 162-179.

- Gayton, N., Bourinet, J.M. ve Lemaire, M., 2003. CQ2RS: A New Statistical Approach to the Response Surface Method for Reliability Analysis, Structural Safety, 25, 99-121.
- Gomes, H.M. ve Awruch, A.M., 2004. Comparison of Response Surface and Neural Network with Other Methods for Structural Reliability Analysis, Structural Safety, 26, 49-67.
- Gomes, H.M. ve Awruch, A.M., 2005. Reliability Analysis of Concrete Structures with Neural Networks and Response Surfaces, Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering and Software, 22, 1, 110-128.
- Guan, X.L. ve Melchers, R.E., 2000. A Parametric Study on the Response Surface Method, Joint Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability (8<sup>th</sup> ASCE), PMC2000-023, United States.
- Guan, X.L. ve Melchers, R.E., 2001. Effect of Response Surface Parameter Variation on Structural Reliability Estimation, Structural Safety, 23, 4, 429-444.
- Gupta, S., 2004. Reliability Analysis of Randomly Vibrating Structures with Parameter Uncertainties, Phd. Thesis, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science, India.
- Gupta, S., ve Manohar, C.S., 2004. An Improved Response Surface Method for the Determination of Failure Probability and Importance Measures , Structural Safety, 26, 123-139.
- Hasofer, A.M. ve Lind, N.C., 1974. Exact and Invariant Second Moment Code Format, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 100, 111-121.
- Haukaas, T., 2001. A New Computational Framework for Nonlinear Finite Element Reliability and Sensitivity Analysis, Report No. CE299, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley.
- Hohenbichler, M. ve Rackwitz, R., 1988. Improvement of Second Order Reliability Estimates by Importance Sampling, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 114, 12, 2195-2199.
- Huh, J., 1999. Dynamic Reliability Analysis for Nonlinear Structures Using Stochastic Finite Element Method, Phd. Thesis, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Arizona, United States.
- Huh, J. ve Haldar, A., 2001. Stochastic Finite-Element-Based Seismic Risk of Nonlinear Structures, Journal of Structural Engineering, ASCE, 127, 3, 323-329
- Huh, J. ve Haldar, A., 2002. Seismic Reliability of Non-Linear Frames with PR Connections Using Systematic RSM, Probabilistic Engineering Mechanics, 17, 177-190.

- Hurtado, J.E., 2004. An Examination of Methods for Approximating Implicit Limit State Functions from the Viewpoint of Statistical Learning Theory, Structural Safety, 26, 3, 271-293.
- Impollonia, N. ve Sofi, A., 2003. A Response Surface Approach for the Static Analysis of Stochastic Structures with Geometrical Nonlinearities, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 192, 4109-4129.
- Karamchandani, A. ve Cornell, C.A., 1991. Adaptive Hybrid Conditional Expectation Approaches for Reliability Estimation, Structural Safety, 11, 59-74.
- Kaymaz, I., 2005. Application of Kriging Method to Structural Reliability Problems, Structural Safety, 27, 133-151.
- Kaymaz, I. ve McMahon, C.A., 2005. A Response Surface Method Based on Weighted Regression for Structural Reliability Analysis, Probabilistic Engineering Mechanics, 20, 11-17.
- Kaymaz, I., McMahon, C.A. ve Meng, X., 1998. Reliability Based Structural Optimization Using the Response Surface Method and Monte Carlo Simulation, 8th International Machine Design and Production Conference, Ankara, Turkey.
- Kim, S.H. ve Na, S.W., 1997. Response Surface Method Using Vector Projected Sampling Points, Structural Safety, 19, 1, 3-9.
- Kmiecik, M. ve Soares, C.G., 2002. Response Surface Approach to the Probability Distribution of the Strength of Compressed Plates, Marine Structures, 15, 139-156.
- Koyluoglu, H.U. ve Nielsen, S.R.K., 1994. New Approximations for SORM Integrals, Structural Safety, 13, 235-246.
- Lee, S.H. ve Kwak, B.M., 2005. Response Surface Augmented Moment Method for Efficient Reliability Analysis, Structural Safety, 28, 261-272.
- Lee, S.L., 2006. Reliability Analysis of Containment Building Subjected to Earthquake Load Using Response Surface Method, Computers and Concrete, 3, 1, 1-15.
- Lee, S.Y., 2000. Static and Dynamic Reliability Analysis of Frame and Shear Wall Structural Systems, Phd. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Arizona, United States.
- Lee, S.Y. ve Haldar, A., 2003. Reliability of Frame and Shear Wall Structural Systems II: Dynamic Loading, Journal of Structural Engineering, 129, 2, 233-240.
- Lemaire, M. ve Mohamed A., 2000. Finite Element and Reliability: A Happy Marriage?, Keynote Lecture- 9<sup>th</sup> IFIP WG 7.5 Working Conference.

- Liu, Y.W. ve Moses, F., 1994. A Sequential Response Surface Method and Its Application in the Reliability Analysis of Aircraft Structural Systems, Structural Safety, 16, 39-46.
- Lu, Z.Z, Zhao, J. ve Yue, Z.F., 2007. Advanced Response Surface Method for Mechanical Reliability Analysis, Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 28, 1, 19–26.
- Macke, M., Roos, D. ve Riedel, J., 2000. An Adaptive Response Surface Method Utilizing Error Estimates, Joint Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability (8<sup>th</sup> ASCE), PMC2000-068, United States.
- Maymon, G., 1994. Direct Computation of the Design Point of a Stochastic Structure Using a Finite Element Code, Structural. Safety, 14, 3, 185–202.
- Melchers, R.E., 1999. Structural Reliability Analysis and Prediction, John Wiley&Sons, England, 437 s.
- Melchers, R.E. ve Ahammed, M., 2004. A Fast Approximate Method for Parameter Sensitivity Estimation in Monte Carlo Structural Reliability, Computers and Structures, 82, 55-61.
- Mohamed, A. ve Lemaire, M., 1998. Discussion on: Structural Reliability Analysis Using a Standard Deterministic Finite Element Code, Structural Safety, 20, 4, 391–397.
- Möller, O., Foschi, R.O., Rubinstein, M. ve Quiroz, L., 2009. Seismic Structural Reliability Using Different Nonlinear Dynamic Response Surface Approximations, Structural Safety. (in press)
- Most, T., 2007. An Adaptive Response Surface Approach for Structural Reliability Analyses Based on Support Vector Machines, 11th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, St. Julians, Malta.
- Most, T. ve Bucher, C., 2006a. Application of an Adaptive Response Surface Approach for Efficient Structural Reliability Analysis, 19th Nordic Seminar on Computational Mechanics, Lund, Sweden.
- Most, T. ve Bucher, C., 2006b. Adaptive Response Surface Approach Using Artificial Neural Networks and Moving Least Squares, 17th International Conference on the Applications of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering, Weimar.
- Myers, R.H., 1971. Response Surface Methodology, Allyn and Bacon, Boston.
- Nguyen, X.S., Sellier, A., Duprat, F. ve Pons, G., 2009. Adaptive Response Surface Method Based on a Double Weighted Regression Technique, Probabilistic Engineering Mechanics, 24, 2, 135-143.

- Nie, J. ve Ellingwood, B.R., 2005. Finite Element-Based Structural Reliability Assessment Using Efficient Directional Simulation, Journal of Engineering Mechanics, 131, 3.
- Nowak, A.S. ve Collins, K.R., 2000. Reliability of Structures, McGraw-Hill Higher Education, United State of America, 338 s.
- Nowak, A.S. ve Cho, T., 2007. Prediction of the Combination of Failure Modes for an Arch Bridge System, Journal of Construction Steel Research, 63, 12, 1561-1569.
- Pendola, M., Mohamed, A., Lemaire, M. ve Horner, P., 2000. Combination of Finite Element and Reliability Methods in Nonlinear Fracture Mechanics, Reliability Engineering and System Safety, 70, 1, 15-27.
- Proppe, C., 2008. Estimation of Failure Probabilities by Local Approximation of the Limit State Function, Structural Safety, 30, 277–290.
- Rackwitz, R. ve Fiessler, B., 1978. Structural Reliability under Combined Random Load Sequences, Computer and Structures, 9, 489-494.
- Rajashekhar, M.R. ve Ellingwood, B.R., 1993. A New Look at the Response Surface Approach for Reliability Analysis, Structural Safety, 12, 205-220.
- Ranganathan, R., 2000. Reliability Analysis and Design of Structures, McGraw-Hill Publishing Company, United State of America, 354 s.
- Romero, V.J., Swiler, L.P. ve Giunta, A.A., 2000. Application of Finite Element, Global Polynomial, and Kriging Response Surfaces In Progressive Lattice Sampling Designs, Joint Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability (8<sup>th</sup> ASCE), PMC2000-175, United States.
- Romero, V.J., Swiler, L.P. ve Giunta, A.A., 2004. Construction of Response Surfaces Based on Progressive Lattice-Sampling Experimental Designs with Application to Uncertainty Propagation, Structural Safety, 26, 201–219.
- Roos, D. ve Bucher, C., 2001. An Adaptive Response Surface Method Using Weighted Radii, Proceedings of the 8th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR'01), Newport Beach, California.
- Roos, D. ve Bucher, C., 2003. Adaptive Response Surfaces for Structural Reliability of Nonlinear Finite Element Structures, NAFEMS Seminar: Use of Stochastics in FEM Analysis, Germany.
- Schueremans, L., 2003. Structural Reliability in Design and Analysis, State of the Art Report, PAT-TAP-project “Technological Attraction Poles”.
- Schueremans, L. ve Van Gemert, D., 2003. System Reliability Methods using Advanced Sampling Techniques, ESREL, European Safety and Reliability Conference, Netherlands.

- Soares, R.C., Mohamed, A., Venturini, W.S. ve Lemaire, M., 2002. Reliability Analysis of Non-Linear Reinforced Concrete Frames Using the Response Surface Method, Reliability Engineering and System Safety, 75, 1-16.
- Sudret, B. ve Der Kiureghian, A., 2002. Comparison of Finite Element Reliability Methods, Probabilistic Engineering Mechanics, 17, 337-348.
- Tandjiria, V., Teh, C.I. ve Low, B.K., 2000. Reliability Analysis of Laterally Loaded Piles Using Response Surface Methods, Structural Safety, 22, 335-355.
- Thoft-Christensen, P. ve Baker, M.J., 1982. Structural Reliability Theory and Its Applications, Springer-Verlag, Berlin, 267 s.
- Thoft-Christensen, P. ve Murotsu, Y., 1986. Application of Structural Systems Reliability Theory, Springer-Verlag, Berlin, 343 s.
- Tvedt, L., 1983. Two Second-Order Approximations to the Failure Probability, Veritas Rep. RDIV/20-004083, Det norske Veritas, Oslo.
- Tvedt, L., 1988. Second-Order Reliability by an Exact Integral, Proc., 2nd IFIP Working Conference on Reliability and Optimization on Structural Systems, New York, 377–384.
- Tvedt, L., 1990. Distribution of Quadratic Forms in the Normal Space-Application to Structural Reliability, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 116, 6, 1183–1197.
- URL-1, [http://www.ce.berkeley.edu/FERUM/User\\_s\\_Guide/user\\_s\\_guide.html](http://www.ce.berkeley.edu/FERUM/User_s_Guide/user_s_guide.html) Ferum User's Guide. 05.04.2004
- URL-2, <http://www.strurel.de/comrel.htm> COMREL, demo versiyon, 06.01.2004.
- Waarts, P.H., 2000. Structural Reliability Using Finite Element Analysis, Phd. Thesis, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Netherlands.
- Warren, J.E., 1997. Nonlinear Stability Analysis of Frame-Type Structures with Random Geometric Imperfections Using a Total-Lagrangian Finite Element Formulation, Phd. Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Wong, F.S., 1984. Uncertainties in Dynamic Soil-Structure Interaction, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 110, 2, 308-324.
- Wong, F.S., 1985. Slope Stability and Response Surface Method, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111, 1, 32-53.
- Wong, S.M., Hobbs, R.E. ve Onof, C., 2005. An Adaptive Response Surface Method for Reliability Analysis of Structures with Multiple Loading Sequences, Structural Safety, 27, 287-308.



- Youn, B.D. ve Choi, K.K., 2004. A New Response Surface Methodology for Reliability-Based Design Optimization, Computers and Structures, 82, 241–256.
- Yu, L., Das, P.K. ve Zheng, Y., 2001. Stepwise Response Surface Method and Its Application to Reliability Analysis of Ship Hull Structures, 20<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2001), Rio de Jenerio, Brazil.
- Yu, L., Das, P.K. ve Zheng, Y., 2002. Stepwise Response Surface Method and Its Application to Reliability Analysis of Ship Hull Structures, ASME Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 124, 4, 226-230.
- Zhang, Y. ve Der Kiureghian A, 1997. Finite Element Reliability Methods for Inelastic Structures, Report No. UCB/SEMM-97/05, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley.
- Zhao, Y.G. ve Ono, T., 1998. System Reliability Evaluation of Ductile Frame Structures, Journal of Structural Engineering, ASCE, 124, 6, 678-685.
- Zhao, Y.G. ve Ono, T., 1999a. New Approximations for SORM: Part 1, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 125, 1, 79-85.
- Zhao, Y.G. ve Ono, T., 1999b. New approximations for SORM: Part 2, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 125, 1, 86–93.
- Zheng, Y. ve Das, P.K., 2000. Improved Response Surface Method and Its Application to Stiffened Plate Reliability Analysis, Engineering Structures, 22, 544–551.

## 5. EKLER

### EK 1 Geliştirilmiş Yanıt Yüzeyi ile Güvenilirlik Analizi Programının Kodları

#### *main\_FERUM\_responsematrix.m*

```
function main

clear all
clc
warning off
format short g;
global nrandom
global mean
global std
global SRM_loop;
global graph_disp;
global point_disp;

% -----
% Reading probabilistic data from the datafile, main_prob.dat
% -----

load main_prob.dat;
mean=main_prob(:,1);
std=main_prob(:,2);

% -----
% determinig the number of the random variables
% -----

nrandom=length(mean);

% -----
% problem parameters for reliability analysis
% type of the reliability analysis
% SRM_loop -> 1: FORM
%           2: SORM
%           3: Importance Sampling
%           4: Crude Monte Carlo simulation
%           5: Response Surface Method (H.B. BAŞAĞA)
%           6: Improved Response Surface Method (H.B. BAŞAĞA)
% -----

SRM_loop=1;

% -----
% calling FERUM
% -----

rel=rel_analysis(SRM_loop);
```

```

% |-----|
% | writing design points
% |-----|

rel.dsptx
rel.dsptu

rel_analysis.m

function rel=rel_analysis(SRM_loop)
global mean
global std
global nrandom

lsf=1;

% |-----|
% | first column of probdata includes the type of the marginal
% | distribution function for each random variable
% |-----|

test_outputfile = 'outputfile.txt';

%Uygulama 5 (Basit Kiriş)
%-----|
probddata.marg(1,1)=15;    % Gumbel
probddata.marg(2,1)=2;    % Lognormal
probddata.marg(3,1)=1;    % Normal
probddata.marg(4,1)=1;    % Normal
probddata.marg(5,1)=2;    % Lognormal
probddata.marg(6,1)=1;    % Normal

for i=1:nrandom
    probdata.marg(i,2)=mean(i);
    probdata.marg(i,3)=std(i);
    probdata.marg(i,4)=mean(i);
    probdata.marg(i,5)=0;
    probdata.marg(i,6)=0;
    probdata.marg(i,7)=0;
    probdata.marg(i,8)=0;
    probdata.marg(i,9)=0;
end

probddata.parameter = distribution_parameter(probddata.marg);

% |-----|
% | FERUM parameters
% |-----|

analysisopt.ig_max      = 200;
analysisopt.il_max      = 5;
analysisopt.e1          = 0.01
analysisopt.e2          = 0.01
analysisopt.step_code   = 0;
analysisopt.grad_flag  = 'ffd';
%analysisopt.sim_point  = 'origin';
analysisopt.sim_point   = 'dspt';
analysisopt.stdv_sim    = 1;

```

```

analysisopt.num_sim      = 10000;
analysisopt.target_cov  = 0.01;

gfundata(1).evaluator   = 'basic';
gfundata(1).type        = 'matlabfile';
gfundata(1).parameter   = 'no';
femodel                 = 0;
randomfield.mesh        = 0;

%|-----|
%| select the type of Structural Reliability Method |
%|-----|

switch SRM_loop
    case 1
        SRM_type='FORM';
    case 2
        SRM_type='SORM';
    case 3
        SRM_type='IMPSIMULATION';
    case 4
        SRM_type='CRUDESIMULATION';
    case 5
        SRM_type='RESPONSESURFACE';
    case 6
        SRM_type='IMPRESPONSESURFACE';
end

switch SRM_type
    case 'FORM'

        % Clear screen and display message
        % -----
        disp('FORM analysis is running, please wait... (Ctrl+C breaks)')
        nrv = size(probdata.marg,1);

        % Run the analysis
        % -----
        t = clock;

[formresults]=form(1,probdata,analysisopt,gfundata,femodel,randomfield);
    results.form = formresults;
    betaFORM= formresults.betal;
    rel=formresults;
    time = etime(clock,t);

    % Display results
    % -----
    if test_ouputfile == 1
        diary(filename)
    end

    disp(' ');
    disp(['
#####
#####
        disp(['          #
FORM RELIABILITY ANALYSIS
                                RESULTS FROM RUNNING
                                #' ])
```

```

disp(['
#####
#####'])
disp(' ');
disp(['Number of iterations: ',num2str(formresults.iter),''])
disp([' '])
disp(['Time to complete the analysis:      ',num2str(time),''])
disp(' ');
disp(['Reliability index beta1: ',num2str(formresults.beta1),''])
disp([' '])
disp(['Failure probability pf1: ',num2str(formresults.pf1,'%0.5e'),''])
disp([' '])
diary off

case 'SORM'

% FORM is called to supply initial values for SORM, formresults
% -----
[formresults] = form(1,probdata,analysisopt,gfundata,femodel,
                    randomfield);
results.form = formresults;

% Clear screen and display message
% -----
disp('SORM analysis is running, please wait... (Ctrl+C breaks)')
nrv = size(probdata.marg,1);

% Run the analysis
% -----
t = clock;
[sorm_curfit_results] = sorm_curvature_fitting(1,formresults,
                                              probdata,analysisopt,gfundata,femodel,
                                              randomfield);
results.sorm_curve_fitting = sorm_curfit_results;
time = etime(clock,t);
if test_outputfile == 1
    diary(filename)
end
disp(' ');
disp(['
#####
#####'])
disp(['          #          RESULTS FROM RUNNING CURVATURE-
FITTED SORM RELIABILITY ANALYSIS          #'])
disp(['
#####
#####'])
disp(' ');
diary off
disp(['Number of iterations:',num2str(sorm_curfit_results.iter),''])
disp(['Reliability index beta1: ',num2str(sorm_curfit_results.beta1),''])
disp(['Failure probability pf1: ',num2str(sorm_curfit_results.pf1,
                                         '%0.5e'),''])

disp(' ');
disp(['Time to complete the analysis:      ',num2str(time),''])
disp(' ');
disp(['          Tvedt three-term approximation'])
disp(['Reliability index beta2 :
          ',num2str(sorm_curfit_results.beta_tvdedt),''])

```

```

disp(['Failure probability pf2:
      ',num2str(sorm_curfit_results.pf2_tvedt,'%0.5e'),''])
disp(' ');
diary off
rel=sorm_curfit_results;

case 'IMPSIMULATION'

% first FORM is run to get the design point values
% for Importance Sampling
% -----
[formresults] = form(1,probdata,analysisopt,gfundata,femodel,
                    randomfield);
results.form = formresults;

% Clear screen and display message
% -----
disp('Simulation analysis is running, please wait... (Ctrl+C breaks)')

% Set point for importance sampling
% -----
simpoint = analysisopt.sim_point;
switch lower(simpoint)
    case 'dspt'
        analysisopt.sim_point = formresults.dsptu;
    case 'origin'
        marg = probdata.marg;
        margsize = size(marg);
        analysisopt.sim_point = zeros(margsize(1),1);
    otherwise
        disp('ERROR: Invalid sampling point for simulation
              analysis.');
```

end

```

% Run simulation analysis
% -----
[simulationresults] = simulation(1,probdata,analysisopt,gfundata,
                                femodel,randomfield);

% Display results
% -----
disp('
                                The Reliability Analysis Result')
disp(' ')
disp(sprintf('the selected method: %s',SRM_type))
disp(sprintf('the probability of failure : %s',simulationresults.pf))
disp(sprintf('the reliability index      : %s',simulationresults.beta))
disp(sprintf('Coefficient of variation of probability of failure:
              %s\n',simulationresults.cov_pf))
disp(sprintf('Number of simulations: %s\n',simulationresults.num_sim))

case 'CRUDESIMULATION'

% Clear screen and display message
% -----
disp('Simulation analysis is running, please wait... (Ctrl+C breaks)')
marg = probdata.marg;
margsize = size(marg);
analysisopt.sim_point = zeros(margsize(1),1);
```

```

% Run simulation analysis
% -----
t = clock;
[simulationresults] = simulation(1,probddata,analysisopt,gfundata,
                               femodel,randomfield);

time = etime(clock,t);

% Display results
% -----
disp('                The Reliability Analysis Result')
disp(' ')
disp([' '])
disp(['Time to complete the analysis:      ',num2str(time),''])
disp(' ');
disp(sprintf('the selected method: %s',SRM_type))
disp(sprintf('the probability of failure : %s',simulationresults.pf))
disp(sprintf('the reliability index      : %s',simulationresults.beta))
disp(sprintf('Coefficient of variation of probability of failure:
              %s\n',simulationresults.cov_pf))
disp(sprintf('Number of simulations: %s\n',simulationresults.num_sim))
rel=simulationresults;

case 'RESPONSESURFACE'

% Clear screen and display message
% -----
disp('Response Surface analysis is running, please wait...
      (Ctrl+C breaks)')
nrv = size(probddata.marg,1);

% Run the analysis
% -----
t = clock;
[response_surface_results] = responsesurface(1,probddata,analysisopt,
                                             gfundata,femodel,randomfield);
rel=response_surface_results;
time = etime(clock,t);
disp(' ');
disp(['Time to complete the analysis:      ',num2str(time),''])
disp(' ');
disp(['Reliability index beta :
      ',num2str(response_surface_results.beta_tvedt),''])
disp(['Failure probability  pf:
      ',num2str(response_surface_results.pf2_tvedt,'%0.5e'),''])
disp(' ');
diary off

case 'IMPRESONSESURFACE'

% Clear screen and display message
% -----
disp('Improved Response Surface analysis is running, please wait...
      (Ctrl+C breaks)')
nrv = size(probddata.marg,1);

% Run the analysis
% -----
t = clock;

```

```

[impresponse_surface_results] = impresponsesurface(1,probddata,
                                                    analysisopt,gfundata,femodel,
                                                    randomfield);
rel=impresponse_surface_results;
time = etime(clock,t);
disp(' ');
disp(['Time to complete the analysis:      ',num2str(time),''])
disp(' ');
disp(['Reliability index beta :
      ',num2str(impresponse_surface_results.beta_tvedt),''])
disp(['Failure probability pf:
      ',num2str(impresponse_surface_results.pf2_tvedt,'%0.5e'),''])
disp(' ');
diary off

otherwise

disp('ERROR: Please select a Structural Reliability Methods.');
```

end

### ***responsematrix.m***

```

function respmat=responsematrix(nrandom,DesMat)
format long;
global SRM_loop;

for i=1:nrandom
    eval(['x',int2str(i),'=DesMat(:,i);'])
end

% |-----|
% | using the approximate function instead of the performance |
% | function for Response Surface Method                       |
% |-----|

if (SRM_loop ==5) | (SRM_loop ==6)

% |-----|
% | reading coefficients of approximate function from the datafile, |
% | coeff.txt                                                       |
% |-----|

    fid2=fopen('D:\VERITABANI\FERUM_responsematrix\coeff.txt','r');
    load coeff.txt;
    coeff=fscanf(fid2,'%e');
    fclose(fid2);

% |-----|
% | determining the approximate function type and calculating it    |
% |-----|

    respmat=0.0;
    respmat1=0.0;
    respmat2=0.0;
```



```

% First Order Polynomial
% -----
if (size(coeff,1)==nrandom+1);
    for i=1:nrandom
        respmat=respmat+coeff(i+1)*DesMat(:,i);
    end
    respmat=coeff(1)+respmat;

% Second Order Polynomial without Cross Terms
% -----
elseif (size(coeff,1)==2*nrandom+1);
    for i=1:nrandom
        respmat=respmat+coeff(i+1)*DesMat(:,i);
        respmat1=respmat1+coeff(nrandom+i+1)*DesMat(:,i)*DesMat(:,i);
    end
    respmat=coeff(1)+respmat+respmat1;

% Second Order Polynomial with Cross Terms
% -----
elseif (size(coeff,1)==(nrandom+1)*(nrandom+2)/2);
    sum=0;
    for i=1:nrandom
        respmat=respmat+coeff(i+1)*DesMat(:,i);
        respmat1=respmat1+coeff(nrandom+i+1)*DesMat(:,i)*DesMat(:,i);
        for j=1:i-1;
            sum=sum+(nrandom-j);
        end

        for k=1:nrandom-i
            respmat2=respmat2+coeff(2*nrandom+1+sum+k)*
                DesMat(:,i)*DesMat(:,i+k);
        end
        sum=0;
    end
    respmat=coeff(1)+respmat+respmat1+respmat2;
end

else

% -----
% Calling ANSYS to get the response from the performance function
% -----

[maxvalue]=Ansys(nrandom,DesMat); % Uygulama 5 (Basit giriş)
respmat=35e-4*x5*(x3-0.04-0.5*((35e-4*x5)/(0.85*x6*x4)))-abs(maxvalue);

% -----
% entering the explicit performance function
% -----

% respmat=35e-4*x5*(x3-0.04-0.5*((35e-4*x5)/(0.85*x6*x4)))
% -((x1+x2+24*x3*x4)*(36/8)); % Uygulama 5 (Basit giriş)

end

```

*form.m*

```

function formresults = form(lsf,probddata,analysisopt,gfundata,femodel,
                           randomfield)

marg      = probddata.marg;

i_max     = analysisopt.ig_max;
e1        = analysisopt.e1;
e2        = analysisopt.e2;
step_code = analysisopt.step_code;
grad_flag = lower(analysisopt.grad_flag);

% |-----|
% | Determine number of random variables |
% |-----|

marg_dim = size(marg,1);

% |-----|
% | Compute starting point for the algorithm |
% |-----|

x = ( marg(:,4) );
u = x_to_u(x,probddata);

% |-----|
% | Set parameters for the iterative loop |
% |-----|

i = 1;          % Initialize counter.
conv_flag = 0; % Convergence is achieved when this flag is set to 1.

% |-----|
% | Perform iterative loop to find the design point |
% |-----|

while conv_flag == 0;

    % Transformation from u to x space
    x = u_to_x(u,probddata,Lo);
    J_u_x = jacobian(x,u,probddata,Lo,iLo);
    J_x_u = inv(J_u_x);
    gfundata(1).evaluator;

    % Evaluate limit-state function and its gradient
    % -----
    [ G, grad_g ] =
    gfun(lsf,x,grad_flag,probddata,gfundata,femodel,randomfield);
    grad_G = (grad_g * J_x_u)';
    Recorded_grad_G_values(:,i) = grad_G;
    Recorded_G_function_values(i) = G;

    % Set scale parameter Go and inform about struct. resp.
    % -----
    if i == 1
        Go = G;
    end
end

```

```

% Compute alpha vector
% -----
alpha = -grad_G / norm(grad_G);

% Check convergence
% -----
if ( (abs(G/Go)<e1) & (norm(u-alpha'*u*alpha)<e2) ) | i==i_max
    conv_flag = 1;
end

% Take a step if convergence is not achieved
% -----
if conv_flag == 0;

    % Determine search direction
    % -----
    d = search_dir(G,grad_G,u);
    search_direction(:,i)=d;

    % Determine step size
    % -----
    if step_code == 0
        step = step_size(lsf,G,grad_G,u,d,probddata,gfundata,femodel,
            randomfield,analysisopt,J_x_u);
    else
        step = step_code;
    end
    Recorded_step_size_values(i) = step;

    % Determine new trial point
    % -----
    u_new = u + step * d;

    % Prepare for a new round in the loop
    % -----
    u = u_new;

    i = i + 1;

end
end

%|-----|
%| FORM results |
%|-----|

if i ~= i_max

    formresults.iter      = i;
    formresults.betal    = alpha' * u;
    formresults.pfl      = ferum_cdf(1,-formresults.betal,0,1);
    formresults.dsptu    = u;
    formresults.dsptx    = x';
    formresults.alpha    = alpha;
    formresults.gfcn     = Recorded_G_function_values;
    formresults.grad_gfunc = Recorded_grad_G_values;
    formresults.stpsz    = Recorded_step_size_values;

    D_prime = diag(diag(sqrt( J_x_u * J_x_u' )));

```

```

    formresults.imptg =(alpha'*J_u_x*D_prime/norm(alpha'*J_u_x*D_prime));
else
    disp('Maximum number of iterations was reached before convergence.');
```

end

### ***sorm.m***

```

function sorm_curfit_results = sorm_curvature_fitting(lsf,formresults,
    probdata,analysisopt,gfundata,femodel,
    randomfield)

i_complex = i;

grad_flag = lower(analysisopt.grad_flag);

iter = formresults.iter;
beta = formresults.beta1;
pfl = formresults.pfl;
dsptu = formresults.dsptu;
alpha = formresults.alpha;
dsptx = formresults.dsptx';
imptg = formresults.imptg;
gfcn = formresults.gfcn;
stpsz = formresults.stpsz;

marg = probdata.marg;

% |-----|
% | Determine number of random variables |
% |-----|

marg_dim = size(marg,1);

% |-----|
% | Compute the gradient of G |
% |-----|

J_u_x = jacobian(dsptx,dsptu,probdata,Lo,iLo);
J_x_u = inv(J_u_x);
[G,grad_g]=gfun(lsf,dsptx,grad_flag,probdata,gfundata,femodel,
    randomfield);
grad_G = (grad_g * J_x_u)'; % Gradient of G evaluate at the design point

% |-----|
% | Compute the rotation matrix |
% |-----|

R1 = gram_schmidt(alpha');

% |-----|
% | Compute the hessian matrix |
% |-----|

hess_G = hessian_G(1,dsptx,dsptu,G,probdata,gfundata,femodel,
    randomfield);
```

```

A = R1*hess_G*R1' / norm(grad_G);
[eigenvectors,D] = eig(A([1:(marg_dim-1)], [1:(marg_dim-1)]));

for ii=1:marg_dim-1
    kappa(ii) = D(ii,ii);
end

%|-----|
%| Tvedt three-term approximation |
%|-----|

A1 = ferum_cdf(1,-beta,0,1) * prod(1./(1+beta*kappa).^0.5);
A2 = (beta*ferum_cdf(1,-beta,0,1) - ferum_pdf(1,beta,0,1))
    *(prod(1./(1+beta*kappa).^0.5) - prod(1./(1+(beta+1)*kappa).^0.5));
A3 = (beta+1)*(beta*ferum_cdf(1,-beta,0,1)
    - ferum_pdf(1,beta,0,1)) * (prod(1./(1+beta*kappa).^0.5)
    - real(prod(1./(1+(beta+i_complex)*kappa).^0.5)));
pf2_tvedt = A1 + A2 + A3;
beta_tvedt = -inv_norm_cdf(pf2_tvedt);

%|-----|
%| SORM results |
%|-----|

sorm_curfit_results.R1          = R1;
sorm_curfit_results.hess_G     = hess_G;
sorm_curfit_results.kappa      = kappa';
sorm_curfit_results.eig_vectors = eigenvectors;
sorm_curfit_results.beta_tvedt = beta_tvedt;
sorm_curfit_results.pf2_tvedt  = pf2_tvedt;

```

### ***simulation.m***

```

function simulationresults =
simulation(lsf,probddata,analysisopt,gfundata,
          femodel,randomfield)

```

```

%|-----|
%| Extract model data |
%|-----|

marg      = probdata.marg;
point     = analysisopt.sim_point;
stdv1     = analysisopt.stdv_sim;
num_sim   = analysisopt.num_sim;
target_cov = analysisopt.target_cov;

%|-----|
%| Find number of random variables |
%|-----|
nrv = length(point);

%|-----|
%| Initializations |
%|-----|

```

```

sum_q = 0;
sum_q_squared = 0;
k = 1;
cov_of_q_bar(k) = 1.0;

t=clock;

%|-----|
%| Perform iterative loop to apply the MCS |
%|-----|

while( k<=num_sim & cov_of_q_bar(length(cov_of_q_bar))>target_cov )

    % Do the simulation (create array of random numbers)
    % -----
    u = point + randn(nrv,1);

    % Transform into original space
    % -----
    [ x ] = u_to_x(u,probddata);

    % Evaluate limit-state function
    % -----
    [ g, dummy ] = gfun(lsf,x,'no ',probddata,gfundata,femodel,randomfield);

    % Collect result of sampling
    % -----
    if g < 0
        I = 1;
    else
        I = 0;
    end

    % Update sums
    % -----
    q = I ;
    sum_q = sum_q + q;
    sum_q_squared = sum_q_squared + q^2;

    % Compute coefficient of variation (of pf) for each simulation
    % -----
    if sum_q > 0
        q_bar = 1/k * sum_q;
        variance_of_q_bar = 1/k * ( 1/k * sum_q_squared - (1/k*sum_q)^2);
        cov_of_q_bar(k) = sqrt(variance_of_q_bar) / q_bar;
        if cov_of_q_bar(k) == 0
            cov_of_q_bar(k) = 1.0;
        end
    else
        cov_of_q_bar(k) = 1.0;
    end

    k = k + 1;

end

if sum_q > 0

```

```

% Compute probability of failure and reliability index
% -----
pf    = q_bar;
cov   = cov_of_q_bar(k-1);
beta  = -inv_norm_cdf(pf);

else
    pf    = 0;
    cov   = 0;
    beta  = 0;
end

simulationresults.pf        = pf;
simulationresults.cov_pf   = cov;
simulationresults.beta     = beta;
simulationresults.num_sim  = k-1;

```

### *responsesurface.m*

```

function response_surface_results = responsesurface(lsf,probdata,
                                                analysisopt,gfundata,femodel,
                                                randomfield);

format long;

marg      = probdata.marg;
dim       = size(probdata.marg,1);
%
%|-----|
%| 1. STEP: Determine the approximate function |
%|-----|
%|-----|
%| Determine the samples around the means    |
%|-----|
for i=1:dim;
    for j=1:2*dim+1;
        xtest(j,i)=marg(i,2);
    end
    xtest(2*i,i)=marg(i,2)+3*marg(i,3);
    xtest(2*i+1,i)=marg(i,2)-3*marg(i,3);
end

%|-----|
%| Evaluate samples at the performance function |
%|-----|

for i=1:2*dim+1;
    g(i)=limit(i,xtest);
end

%|-----|
%| Calculate coefficients |
%|-----|

for i=1:2*dim+1;
    XX(i,1)=1.0;
    for j=1:dim;

```

```

        XX(i,j+1)=xtest(i,j);
        XX(i,j+1+dim)=xtest(i,j)^2;
    end
end

coeff=inv(XX'*XX)*XX'*g';

%-----|
%| Write coefficients to the datafile, coeff.txt |
%|-----|

fid2=fopen('D:\VERITABANI\FERUM_responsematrix\coeff.txt','w');
fprintf(fid2,'%20.7e\n',coeff);
fclose(fid2);
%-----|
%|-----|
%| 2. STEP: Calculate the Centre Point and |
%|          determine the approximate function |
%|-----|
%|-----|
%| Apply FORM and get design points (XD) |
%|-----|

[formresults] = form(1,probdata,analysisopt,gfundata,femodel,
                    randomfield);
XD=formresults.dsptx;

%-----|
%| Calculate the centre point (XM) |
%|-----|

for j=1:dim
    xtest(1,j)=XD(j);
    xtest(2,j)=marg(j,2);
end

gg1=limit(1,xtest);
gg2=limit(2,xtest);

for i=1:dim
    XM(i)=marg(i,2)+(XD(i)-marg(i,2))*(gg2/(gg2-gg1));
end

%-----|
%| Generate the new set of samples according to |
%| the centre point |
%|-----|

for i=1:dim
    for j=1:2*dim+1
        xtest(j,i)=XM(i);
    end
    xtest(2*i,i)=XM(i)+3.0*marg(i,3);
    xtest(2*i+1,i)=XM(i)-3.0*marg(i,3);
end

%-----|
%| Evaluate samples at the performance function |
%|-----|

```



```

for i=1:2*dim+1
    g(i)=limit(i,xtest);
end

% |-----|
% | Calculate coefficients |
% |-----|

for i=1:2*dim+1
    XX(i,1)=1.0;
    for j=1:dim
        XX(i,j+1)=xtest(i,j);
        XX(i,j+1+dim)=xtest(i,j)^2;
    end
end

coeff=inv(XX'*XX)*XX'*g';

% |-----|
% | Write coefficients to the datafile, coeff.txt |
% |-----|

fid2=fopen('D:\VERITABANI\FERUM_responsematrix\coeff.txt','w');
fprintf(fid2,'%20.7e\n',coeff);
fclose(fid2);

% |-----|
% | Apply FORM |
% |-----|

[formresults] =
form(1,probdata,analysisopt,gfundata,femodel,randomfield);

response_surface_results=formresults;

impresponsesurface.m

function impresponse_surface_results = impresponsesurface(lsf,probdata,
    analysisopt,gfundata,femodel,
    randomfield);

marg      = probdata.marg;
grad_flag = lower(analysisopt.grad_flag);

dim=size(probdata.marg,1);
%
% |-----|
% | 1. STEP: Determine the approximate function |
% |-----|
%
% |-----|
% | Determine the samples around the means |
% |-----|

for i=1:dim;
    for j=1:2*dim+1;
        xtest(j,i)=marg(i,2);
    end
end

```

```

    end
    xtest(2*i,i)=marg(i,2)+3*marg(i,3);
    xtest(2*i+1,i)=marg(i,2)-3*marg(i,3);
end

% |-----|
% | Evaluate samples at the performance function |
% |-----|

for i=1:2*dim+1;
    y(i)=limit(i,xtest);
end

% |-----|
% | Calculate coefficients |
% |-----|

for i=1:2*dim+1;
    X(i,1)=1.0;
    for j=1:dim;
        X(i,j+1)=xtest(i,j);
        X(i,j+1+dim)=xtest(i,j)^2;
    end
end

coeff_bucher=inv(X'*X)*X'*y';

% |-----|
% | Write coefficients to the datafile, coeff.txt |
% |-----|

fid2=fopen('D:\VERITABANI\FERUM_responsematrix\coeff.txt','w');
fprintf(fid2,'%20.7e\n',coeff_bucher);
fclose(fid2);

% |-----|
% | Apply FORM and get design points (XD) |
% |-----|

[formresults] = form(1,probdata,analysisopt,gfundata,femodel,
                    randomfield);
XD=formresults.dsptx;

% |-----|
% | 2. STEP: Search a point on the exact function |
% |-----|

xtest=[];
stdv=marg(:,3);
num=0;
k=3;

```

```

%|-----|
%| Find the values according to the design point
%|
%| x1          x2          x3          . . .
%| x1+k*stdv1  x2          x3          . . .
%| x1          x2+k*stdv1  x3          . . .
%| x1          x2          x3+k*stdv1  . . .
%| .           .           .           . . .
%| .           .           .           . . .
%| .           .           .           . . .
%|-----|

for i=1:dim;
    for j=1:dim+1;
        xtest(j,i)=XD(i);
    end
    xtest(i+1,i)=XD(i)+k*stdv(i);
end

%|-----|
%| Evaluate the values at the performance function
%|-----|

for i=1:dim+1
    respmat(i)=limit(i,xtest);
end

g_XD=respmat(1)          % The performance function value for design point

totmat(:,2)=respmat(2:1:(dim+1))';
totmat(:,1)=respmat(1)';

for i=1:dim;
    if (totmat(i,2)<totmat(i,1))
        variation(i)=-1;
    else
        variation(i)=1;
    end
end

%|-----|
%| Determine the corner point opposite the
%| design point according to the LSF
%|-----|

if (g_XD>0)
    coeff=-variation;
else
    coeff=variation;
end

%|-----|
%| Calculate coordinates of the corner point
%|-----|

for i=1:dim;
    xtest(1,i)=XD(i)+k*stdv(i)*coeff(i);
end

```

```

%|-----|
%| Evaluate the corner point at the |
%| performance function            |
%|-----|

g_corner=limit(1,xtest);

%|-----|
%| Find the point (XC) on the exact |
%| performance function            |
%|-----|

g(1)=g_XD;
g(2)=g_corner;

hmat(1)= 0;
hmat(2)= 3;
num     = 0;
num1    = 0;
index1  = 0;
index2  = 0;

test     = xtest(1,:);
xtest    = [];
xtest(1,:) = XD(:)';
xtest(2,:) = test(:)';

for i=3:7;
    if (i==3)
        h=(hmat(1)+hmat(2))/2;
    else
        h=(hmat(index1)+hmat(index2))/2;
    end

    for p=1:dim;
        xtest(i,p)=XD(p)+coeff(p)*h*stdv(p);
    end

    g(i)=limit(i,xtest);
    hmat(i)=h;

    for j=1:i;
        if (g(j)<0)
            num=num+1;
            g1(num)=g(j);
        else
            num1=num1+1;
            g2(num1)=g(j);
        end
    end

    if (num~=0)
        index1=min(find(abs(g)==min(abs(g1)))));
    end
    if (num1~=0)
        index2=max(find(abs(g)==min(abs(g2)))));
    end
end
end

```

```

for i=1:5
    XX(i,1)=1.0;
    XX(i,2)=hmat(i+1);
    XX(i,3)=hmat(i+1)^2;
    yy(i)=g(i+1);
end

coeff_bucher1=inv(XX'*XX)*XX'*yy';

if (sqrt(coeff_bucher1(2)^2-4*coeff_bucher1(3)*coeff_bucher1(1))>0)
    kok1=(-coeff_bucher1(2)+sqrt(coeff_bucher1(2)^2
        -4*coeff_bucher1(3)*coeff_bucher1(1)))/(2*coeff_bucher1(3));
    kok2=(-coeff_bucher1(2)-sqrt(coeff_bucher1(2)^2
        -4*coeff_bucher1(3)*coeff_bucher1(1)))/(2*coeff_bucher1(3));
    hmat(8)=kok1;
    hmat(9)=kok2;

    for p=1:dim;
        xtest(8,p)=XD(p)+coeff(p)*kok1*stdv(p);
        xtest(9,p)=XD(p)+coeff(p)*kok2*stdv(p);
    end

    g(8)=limit(8,xtest);
    g(9)=limit(9,xtest);

elseif(sqrt(coeff_bucher1(2)^2-4*coeff_bucher1(3)*coeff_bucher1(1))==0)
    kok1=-coeff_bucher1(2)/(2*coeff_bucher1(3));
    hmat(8)=kok1;
    for p=1:dim;
        xtest(8,p)=XD(p)+coeff(p)*kok1*stdv(p);
    end
    g(8)=limit(8,xtest);
end

min_g=min(abs(g));
index=min(find(abs(g)==min_g));
g(index)
point=xtest(index,:)
%
% -----
% | 3.STEP: Generate the samples around the XC with vector projection |
% | and apply the reliability analysis |
% |-----|
%
G = g(index);
x=point';
u = x_to_u(x,probdata,iLo);
J_u_x = jacobian(x,u,probdata,Lo,iLo);
J_x_u = inv(J_u_x);
original_x = point;

% |-----|
% | Generate the samples around the XC |
% | with vector projection |
% |-----|

for j = 1 : dim
    h = marg(j,3)/200;
    x = original_x;
    x(j) = x(j) + h;
end

```

```

    xtest(j,:)=x;
    G_a_step_ahead = limit(j,xtest);
    derg(j) = (G_a_step_ahead - G)/h;
end

derg = (derg * J_x_u);

derg=derg/norm(derg);
for i=1:dim;
    for j=1:dim;
        if (i==j);
            e(i,j)=1.0;
            eps(i,j)=1.0;
        else
            e(i,j)=0;
            eps(i,j)=0.9;
        end
    end
    hasan(i,:)=e(i,:)-(e(i,:)*derg')*derg;
    delta(i,:)=hasan(i,:)/norm(hasan(i,:));
end

u_mean = x_to_u(point,probddata,iLo);

for i=1:dim;
    for j=1:dim;
        delta(i,j)=delta(i,j)*eps(i,j);
    end
end

for ii=1:3
    if (ii==1)
        k=1;
    elseif (ii==2)
        k=1.5;
    else
        if (deltabeta>0.03)
            k=1.2;
        else
            break
        end
    end
end

utest=zeros(2*dim+1,dim);

for i=1:dim;
    utest(1,i)=u_mean(i);
    for j=1:dim;
        utest(2*i,:)=u_mean'+k*sqrt(dim-1)*1*delta(i,:);
        utest(2*i+1,:)=u_mean'-k*sqrt(dim-1)*1*delta(i,:);
    end
end

for i=1:2*dim+1;
    u=utest(i,:);
    x = u_to_x(u,probddata,Lo);
    xtest(i,:)=x';
end

```

```

% |-----|
% | Calculate coefficients |
% |-----|

for i=1:2*dim+1;
    yyy(i)=limit(i,xtest);
end

for i=1:2*dim+1;
    XXX(i,1)=1.0;
    for j=1:dim;
        XXX(i,j+1)=xtest(i,j);
        XXX(i,j+1+dim)=xtest(i,j)^2;
    end
end

coeff_bucher2=inv(XXX'*XXX)*XXX'*yyy';

% |-----|
% | Write coefficients to the datafile, coeff.txt |
% |-----|

fid2=fopen('D:\VERITABANI\FERUM_responsematrix\coeff.txt','w');
fprintf(fid2,'%20.7e\n',coeff_bucher2);
fclose(fid2);

% |-----|
% | Apply SORM |
% |-----|

[formresults] =
form(1,probddata,analysisopt,gfundata,femodel,randomfield);
results.form = formresults;
[sorm_curfit_results] =
sorm_curvature_fitting(1,formresults,probddata,
    analysisopt,gfundata,femodel,randomfield);
results.sorm.curvature.fitting=sorm_curfit_results;

if (ii==1)
    response_surface_results1 = sorm_curfit_results;
elseif (ii==2)
    response_surface_results1_5 = sorm_curfit_results;
    deltabeta=abs(response_surface_results1.beta_tvedt
        -response_surface_results1_5.beta_tvedt)/(dim-1)
else
    response_surface_results_k = sorm_curfit_results;
end
end

if (deltabeta>0.03
    impresponse_surface_results=response_surface_results_k;
else
    impresponse_surface_results=response_surface_results1;
end
end

```

***limit.m***

```

function g=limit(i,xtest)
global nrandom;
for j=1:nrandom
    eval(['x',int2str(j),'=xtest(i,j);'])
end

% |-----|
% | entering the explicit performance function |
% |-----|

% g=35e-4*x5*(x3-0.04-0.5*((35e-4*x5)/(0.85*x6*x4)))
%   -((x1+x2+24*x3*x4)*(36/8));           % Uygulama 5 (Basit giriş)

% |-----|
% | Calling ANSYS to get the response from the performance function |
% |-----|

variable=xtest(i,:);
[maxvalue]=Ansys(nrandom,DesMat);           % Uygulama 5 (Basit giriş)
g=35e-4*x5*(x3-0.04-0.5*((35e-4*x5)/(0.85*x6*x4)))-abs(maxvalue);

```

***ansys.m***

```

function [maxvalue]=Ansys(nrandom,DesMat)
for i=1:nrandom
    eval(['x',int2str(i),'=DesMat(:,i);'])
end

% |-----|
% | Write {X} to the datafile, variable.txt |
% |-----|

fid=fopen('D:\VERITABANI\FERUM_responsematrix\Ansys\variable.txt','w');
for i=1:nrandom
    fprintf(fid,'%30.10f\n',DesMat(:,i));
end
fclose(fid);

% |-----|
% | Call the ANSYS after changing the data file |
% |-----|

cd('D:\VERITABANI\FERUM_responsematrix\Ansys');
!"D:\VERITABANI\FERUM_responsematrix\Ansys\ansys_change.exe";
!"C:\Program Files\Ansys Inc\v110\ANSYS\bin\intel\ansys110.exe" -b -i
    veri.txt -o out.res;

% |-----|
% | Read the maxvalue from the datafile, result.txt |
% |-----|

fid=fopen('D:\VERITABANI\FERUM_responsematrix\Ansys\result.txt','r');
maxvalue=fscanf(fid,'%f',1);
fclose(fid);

```



## ÖZGEÇMİŞ

Hasan Basri Başağa, 1976 yılında Bayburt'ta doğdu. İlk öğrenimini Cudibey ve Gazipaşa İlkokullarında, orta ve lise öğrenimini Trabzon Kanuni Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 1995 yılında K.T.Ü Gümüşhane Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. Burada bir dönem okuduktan sonra K.T.Ü Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne yatay geçiş yaptı. 1999 yılında burayı dönem üçüncüsü olarak tamamladı. Aynı yıl K.T.Ü İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. 2000 yılında K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsünde Araştırma Görevliliği kadrosuna atandı. Yüksek lisansını 2003 yılında tamamlayan Başağa, iyi derecede İngilizce bilmektedir. Hasan Basri Başağa evli ve bir çocuk babasıdır.