

**GEMİ YAPISAL DİZAYNINDA
VEKİL MODEL KULLANIMI**

DOKTORA TEZİ

Serdar Aytekin KÖROĞLU

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2013

**GEMİ YAPISAL DİZAYNINDA
VEKİL MODEL KULLANIMI**

DOKTORA TEZİ

**Serdar Aytekin KÖROĞLU
(508072003)**

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet ERGİN

TEMMUZ 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508072003 numaralı Doktora Öğrencisi **Serdar Aytekin KÖROĞLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**GEMİ YAPISAL DİZAYNINDA VEKİL MODEL KULLANIMI**” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ahmet ERGİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Neslihan Serap ŞENGÖR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Y. Doç. Dr. Ertekin BAYRAKTARKATAL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ömer BELİK
Piri Reis Üniversitesi

Y. Doç. Dr. İsmail BAYER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **29 Mayıs 2013**
Savunma Tarihi : **24 Temmuz 2013**

Sevdiklerime,

ÖNSÖZ

Bu çalışmada beni kalıplara sokmadan özgürce araştırma imkanı ve desteği veren değerli danışman hocam Prof. Dr. Ahmet Ergin'e çok teşekkür ederim. Ayrıca Doç. Dr. Neslihan S. Şengör ve Y. Doç. Dr. Ertekin Bayraktarkatal hocalarıma da tez çalışmam süresince gösterdikleri değerli ilgi ve destekleri için minnettarım. Bana çok emeği geçen Y. Doç. Dr. Bahadır Uğurlu'ya, hem fikir alışverişi, hem de moral desteği açısından çok şey borçluyum.

Beni yetiştirerek en önemli katkıyı yapan annem ve babam, bu çalışmada en büyük pay sahipleridir. Ayrıca mutlu bir ortamda çalışmama vesile olan arkadaşlarımla doktora sürecim çok daha keyifli geçti.

Son olarak, müstakbel eşim Emre'ye, tez süresince bana gösterdiği sabır ve ileride vereceği değerli desteği için şimdiden çok teşekkür ederim.

Temmuz 2013

Serdar Aytekin KÖROĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Planı	2
2. DİZAYN VE OPTİMİZASYON	5
2.1 Dizayn.....	5
2.2 Optimizasyon.....	7
2.3 Hedeflenen Kapsam Açısından Optimizasyon	7
2.3.1 Lokal teknikler.....	7
2.3.1.1 Doğrusal programlama	8
2.3.1.2 Ardışık kuadratik programlama	8
2.3.2 Global teknikler	9
2.3.2.1 Yapay Isıl İşlem Algoritması	9
2.3.2.2 Genetik algoritmalar	9
2.3.2.3 Karınca kolonisi optimizasyonu	11
2.3.2.4 Parçacık sürü optimizasyonu	11
2.4 Yapısal Dizaynda Optimizasyon.....	11
2.4.1 Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu	12
2.4.2 Yapının etkisi altında bulunduğu şartlar	13
2.4.3 Malzeme	13
2.4.4 Üretim ve hizmet maliyeti, ağırlık, performans	14
2.5 Modern Optimizasyon Uygulamaları	14
2.6 Performans Arttırıcı Yöntemler.....	15
2.6.1 Paralleleştirme yöntemleri.....	16
2.6.1.1 Paralel genetik algoritmalar	16
2.6.1.2 Doğrusal denklem sistemleri	16
2.6.1.3 Çoklu vekil modeller	17
2.6.2 Vekil modeller	17
2.6.2.1 Radyal baz fonksiyon (RBF) ağları	18
2.6.2.2 Kriging.....	18
2.6.2.3 Yapay sinir ağları	18
2.6.2.4 Cevap yüzey yöntemi.....	19
2.6.2.5 Destek vektör makineleri.....	19

2.6.3	Boyut azaltma yöntemleri.....	20
2.6.4	Değişken hassasiyetli model kullanımı	20
2.6.5	Verimli örneklem kullanımı.....	20
2.7	Literatür Özeti	21
2.7.1	Uygulama alanına göre.....	21
2.7.2	Optimizasyon tekniği açısından	22
2.7.3	Vekil model tipi açısından	22
2.7.4	Optimizasyon tipi açısından	23
2.8	Çalışmanın Hedefleri ve Yöntemi	23
3.	YÖNTEMİN TANITIMI.....	25
3.1	Matematiksel Modeller.....	25
3.1.1	Diferansiyel denklemler	27
3.1.2	Yaklaşık modeller	28
3.2	İstatistiksel modelleme	30
3.2.1	Model parametrizasyonu	31
3.2.2	Örneklemelerin belirlenmesi - deney dizaynı	32
3.2.3	Model seçimi	33
3.2.4	Sistematik hata (bias) ve varyans ödünleşmesi - Occam'ın jileti	34
3.3	Yeni Yaklaşım.....	34
3.3.1	Yeni yaklaşımın getirdikleri	36
4.	AYRIKLAŞTIRMA ALGORİTMASI	39
4.1	Ayrıştırma algoritması	40
4.2	Kenar İnterpolasyonu	43
4.3	Bünye, Denge ve Uygunluk.....	47
4.4	Kuvvet Dönüşümü.....	50
4.5	Afin Dönüşüm	50
4.6	Algoritmanın Özeti.....	52
5.	UYGULAMALAR.....	53
5.1	Sonlu Elemanlar Test Yatağı	53
5.2	3, 9 ve 25 Panelli Test Yapıları.....	53
5.3	Sonuçlar.....	57
6.	HASSASLIK ANALİZİ	63
6.1	Analiz hakkında.....	63
6.2	Ortalama İçin Regresyon.....	64
6.3	Standart Sapma İçin Regresyon.....	67
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	71
7.1	Gelecek Çalışmalar.....	71
7.1.1	Ayrıklaştırma algoritması	72
7.1.2	Otomatik dizayn üretimi.....	72
7.1.3	Kısıt metriği.....	72
7.1.4	Paralel Uygulama	72
7.1.5	Dinamik Problemler	73
7.1.6	Gerçek deney verilerinin entegrasyonu	73
	KAYNAKLAR.....	75
	EKLER	85

EK A: 3 Panelli Örnek, Tek Serbestlik Sonuç Grafikleri	87
EK B: 9 Panelli Örnek, Tek Serbestlik Sonuç Grafikleri	97
EK C: 25 Panelli Örnek, Tek Serbestlik Sonuç Grafikleri	107
EK D: Hassaslık Analizi Ortalama Kontur Grafikleri	117
EK E: Hassaslık Analizi Standart Sapma Kontur Grafikleri	123
ÖZGEÇMİŞ	130

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 : Farklı kenar interpolasyonları için hata yüzdeleri.....	46
Çizelge 5.1 : 3 panelli örnek problem parametreleri.....	55
Çizelge 5.2 : 9 panelli örnek problem parametreleri.....	56
Çizelge 5.3 : 25 panelli örnek problem parametreleri.....	56
Çizelge 5.4 : Algoritma parametreleri.....	57
Çizelge 6.1 : Hassaslık analizi parametreleri.	64
Çizelge 6.2 : Ortalama regresyon özeti.	65
Çizelge 6.3 : Ortalama regresyon ANOVA.	66
Çizelge 6.4 : Standart sapma regresyon özeti.	68
Çizelge 6.5 : Standart sapma regresyon ANOVA.....	68

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Dizayn spirali.	5
Şekil 2.2 : Web of Science tarama istatistiği.	6
Şekil 2.3 : Gradyan temelli optimizasyon.	8
Şekil 2.4 : Genetik algoritmalar.	10
Şekil 2.5 : Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu.	12
Şekil 2.6 : Pareto sınır.	15
Şekil 2.7 : Yapay sinir ağı.	19
Şekil 3.1 : Köprü ve giriş modeli.	26
Şekil 3.2 : Düzlem gerilme modeli.	26
Şekil 3.3 : Ağ yapısı ve örnek bir eleman.	27
Şekil 3.4 : Ayrıklaştırılmış sistem ve amaca yönelik model.	28
Şekil 3.5 : Bağımsız ve bağlı parametre kullanımı.	31
Şekil 3.6 : Alın lamasının gövdenin yüzdesi cinsinden parametrizasyonu.	32
Şekil 3.7 : Latin hiper küp.	33
Şekil 3.8 : Occam'ın jileti.	34
Şekil 3.9 : Yapı taşı bloğu.	35
Şekil 4.1 : Yapı taşı bloklarından oluşan sistem.	39
Şekil 4.2 : Algoritmanın çalışma prensibi.	42
Şekil 4.3 : Kenar interpolasyonu.	43
Şekil 4.4 : Düzlem panel testi.	45
Şekil 4.5 : Stifnerli panel testi.	45
Şekil 4.6 : Düzlem panel toplam yer değiştirme (orijinal).	46
Şekil 4.7 : Düzlem panel toplam yer değiştirme (3 noktalı kenar interpolasyonu).	47
Şekil 4.8 : Stifnerli panel toplam yer değiştirme (orijinal).	47
Şekil 4.9 : Stifnerli panel toplam yer değiştirme (3 noktalı kenar interpolasyonu).	48
Şekil 4.10 : Stifnerli panel toplam yer değiştirme (4 noktalı kenar interpolasyonu).	48
Şekil 4.11 : Stifnerli panel toplam yer değiştirme (5 noktalı kenar interpolasyonu).	49
Şekil 4.12 : Afin dönüşüm.	51
Şekil 5.1 : Test yatağı akış diyagramı.	54
Şekil 5.2 : 3 panelli örnek.	55
Şekil 5.3 : 9 panelli örnek.	55
Şekil 5.4 : 25 panelli örnek.	56
Şekil 5.5 : Toplam yer değiştirme (3 panel).	57

Şekil 5.6	: Toplam yer değiştirme (9 panel).	58
Şekil 5.7	: Toplam yer değiştirme (25 panel).	58
Şekil 5.8	: Güncelleme katsayısı (3 panel).	59
Şekil 5.9	: Güncelleme katsayısı (9 panel).	59
Şekil 5.10	: Güncelleme katsayısı (25 panel).	60
Şekil 5.11	: Yer değiştirme hata (3 panel).	60
Şekil 5.12	: Yer değiştirme hata (9 panel).	61
Şekil 5.13	: Yer değiştirme hata (25 panel).	61
Şekil 5.14	: Artık kuvvet/moment (3 panel).	62
Şekil 5.15	: Artık kuvvet/moment (9 panel).	62
Şekil 5.16	: Artık kuvvet/moment (25 panel).	62
Şekil 6.1	: Ortalama regresyonu hata dağılımı.	66
Şekil 6.2	: Ortalama regresyonu hata normal dağılımı.	67
Şekil 6.3	: Standart sapma regresyonu hata dağılımı.	69
Şekil 6.4	: Standart sapma regresyonu hata normal dağılımı.	69
Şekil A.1	: 3 panel - güncelleme katsayısı X öteleme.	87
Şekil A.2	: 3 panel - güncelleme katsayısı Y öteleme.	87
Şekil A.3	: 3 panel - güncelleme katsayısı Z öteleme.	88
Şekil A.4	: 3 panel - güncelleme katsayısı X dönme.	88
Şekil A.5	: 3 panel - güncelleme katsayısı Y dönme.	89
Şekil A.6	: 3 panel - güncelleme katsayısı Z dönme.	89
Şekil A.7	: 3 panel - yer değiştirme hatası X öteleme.	90
Şekil A.8	: 3 panel - yer değiştirme hatası Y öteleme.	90
Şekil A.9	: 3 panel - yer değiştirme hatası Z öteleme.	91
Şekil A.10	: 3 panel - yer değiştirme hatası X dönme.	91
Şekil A.11	: 3 panel - yer değiştirme hatası Y dönme.	92
Şekil A.12	: 3 panel - yer değiştirme hatası Z dönme.	92
Şekil A.13	: 3 panel - artık kuvvet X öteleme.	93
Şekil A.14	: 3 panel - artık kuvvet Y öteleme.	93
Şekil A.15	: 3 panel - artık kuvvet Z öteleme.	94
Şekil A.16	: 3 panel - artık moment X dönme.	94
Şekil A.17	: 3 panel - artık moment Y dönme.	95
Şekil A.18	: 3 panel - artık moment Z dönme.	95
Şekil B.1	: 9 panel - güncelleme katsayısı X öteleme.	97
Şekil B.2	: 9 panel - güncelleme katsayısı Y öteleme.	97
Şekil B.3	: 9 panel - güncelleme katsayısı Z öteleme.	98
Şekil B.4	: 9 panel - güncelleme katsayısı X dönme.	98
Şekil B.5	: 9 panel - güncelleme katsayısı Y dönme.	99
Şekil B.6	: 9 panel - güncelleme katsayısı Z dönme.	99
Şekil B.7	: 9 panel - yer değiştirme hatası X öteleme.	100
Şekil B.8	: 9 panel - yer değiştirme hatası Y öteleme.	100
Şekil B.9	: 9 panel - yer değiştirme hatası Z öteleme.	101
Şekil B.10	: 9 panel - yer değiştirme hatası X dönme.	101
Şekil B.11	: 9 panel - yer değiştirme hatası Y dönme.	102
Şekil B.12	: 9 panel - yer değiştirme hatası Z dönme.	102

Şekil B.13	: 9 panel - artık kuvvet X öteleme.	103
Şekil B.14	: 9 panel - artık kuvvet Y öteleme.	103
Şekil B.15	: 9 panel - artık kuvvet Z öteleme.	104
Şekil B.16	: 9 panel - artık moment X dönme.	104
Şekil B.17	: 9 panel - artık moment Y dönme.	105
Şekil B.18	: 9 panel - artık moment Z dönme.	105
Şekil C.1	: 25 panel - güncelleme katsayısı X öteleme.	107
Şekil C.2	: 25 panel - güncelleme katsayısı Y öteleme.	107
Şekil C.3	: 25 panel - güncelleme katsayısı Z öteleme.	108
Şekil C.4	: 25 panel - güncelleme katsayısı X dönme.	108
Şekil C.5	: 25 panel - güncelleme katsayısı Y dönme.	109
Şekil C.6	: 25 panel - güncelleme katsayısı Z dönme.	109
Şekil C.7	: 25 panel - yer değiştirme hatası X öteleme.	110
Şekil C.8	: 25 panel - yer değiştirme hatası Y öteleme.	110
Şekil C.9	: 25 panel - yer değiştirme hatası Z öteleme.	111
Şekil C.10	: 25 panel - yer değiştirme hatası X dönme.	111
Şekil C.11	: 25 panel - yer değiştirme hatası Y dönme.	112
Şekil C.12	: 25 panel - yer değiştirme hatası Z dönme.	112
Şekil C.13	: 25 panel - artık kuvvet X öteleme.	113
Şekil C.14	: 25 panel - artık kuvvet Y öteleme.	113
Şekil C.15	: 25 panel - artık kuvvet Z öteleme.	114
Şekil C.16	: 25 panel - artık moment X dönme.	114
Şekil C.17	: 25 panel - artık moment Y dönme.	115
Şekil C.18	: 25 panel - artık moment Z dönme.	115
Şekil D.1	: Ortalama artık kuvvet/moment A-B.	117
Şekil D.2	: Ortalama artık kuvvet/moment A-C.	117
Şekil D.3	: Ortalama artık kuvvet/moment A-D.	118
Şekil D.4	: Ortalama artık kuvvet/moment A-E.	118
Şekil D.5	: Ortalama artık kuvvet/moment B-C.	119
Şekil D.6	: Ortalama artık kuvvet/moment B-D.	119
Şekil D.7	: Ortalama artık kuvvet/moment B-E.	120
Şekil D.8	: Ortalama artık kuvvet/moment C-D.	120
Şekil D.9	: Ortalama artık kuvvet/moment C-E.	121
Şekil D.10	: Ortalama artık kuvvet/moment D-E.	121
Şekil E.1	: Standart sapma artık kuvvet/moment A-B.	123
Şekil E.2	: Standart sapma artık kuvvet/moment A-C.	123
Şekil E.3	: Standart sapma artık kuvvet/moment A-D.	124
Şekil E.4	: Standart sapma artık kuvvet/moment A-E.	124
Şekil E.5	: Standart sapma artık kuvvet/moment B-C.	125
Şekil E.6	: Standart sapma artık kuvvet/moment B-D.	125
Şekil E.7	: Standart sapma artık kuvvet/moment B-E.	126
Şekil E.8	: Standart sapma artık kuvvet/moment C-D.	126
Şekil E.9	: Standart sapma artık kuvvet/moment C-E.	127
Şekil E.10	: Standart sapma artık kuvvet/moment D-E.	127

GEMİ YAPISAL DİZAYNINDA VEKİL MODEL KULLANIMI

ÖZET

Gelişen bilgisayar teknolojisi ile mühendislikte analiz ve optimizasyonun gücü de artmaktadır. Katı mekaniği problemleri için standart haline gelen sonlu elemanlar yöntemi, yakın bir zamana kadar gittikçe zorlaşan seviyelerde problemleri çözmekte sıklıkla kullanılmıştır. Gerekli gücün artması ve üretilen ısıyı uzaklaştırma problemleri, bilgisayarların daha paralel yapıda mimarilerle tasarlanmasına yol açmıştır.

Özellikle global optimizasyon problemlerinde çok sayıda analiz yapılması gerektiğinden ve güncel paralel mimarilerden yeterince faydalanılamayan sonlu elemanlar yöntemine alternatif olarak, yaklaşık sonuç veren ama çok daha hızlı istatistik model bazlı yöntemler geliştirilmiştir. Vekil modeller olarak adlandırılan bu modeller, sadece problemin optimizasyonunda kullanılacak parametreler üzerinden problemi tanımladığı için gereksiz işlem yükünden tasarruf sağlamaktadır.

Vekil modellerin, halen sonlu elemanlar yöntemine baskın hale gelememesinin sebebi, kullanılabilir parametre sayısının limitli olmasıdır. Boyutluluğun laneti adı verilen bu problemin kaynağı, kurulacak model için gerekli örneklem sayısının parametre sayısı ile üstel olarak artmasıdır.

Bu tezde, bu problemi çözmek üzere, hem vekil modellerin parametre kısıtlarından kurtulmasını sağlayan, hem de bunu gerçekleştirirken doğal bir paralel felsefeye sahip olmasıyla güncel teknolojiden de üst düzeyde faydalanabilecek yeni bir algoritma ortaya konmuştur.

Yeni yaklaşımda, vekil modeller alışlagelmiş yaklaşımlarda olduğu gibi kısıtlı bir bölgede veya genel ama kısıtlı sayıda parametreyle değil, yapı taşı bloğu olarak kullanılacak stifnerli panellere uygulanacaktır. Bu paneller, değişik türde tasarım ve sınır şartlarına uygun olarak ve problemde probleme değişim göstermeyecek şekilde tasarlanmıştır. Sistemin global davranışı ise, panellerin bağlantı noktalarında oluşan artık reaksiyonları dengelemek üzere oluşturulan ama nokta sayısından bağımsız bir algoritma ile belirlenmektedir.

Paneller arası uyumun sağlanması için yapı taşı blokların arayüzü olan kenarlardaki bağlantı nodu olmayan nodların serbestlikleri, bağlantı nodlarının serbestliklerinden oluşturulan interpolasyon polinomuyla, kısıt denklemi şeklinde ifade edilmiştir. Bu sayede arada bağlantı olmadan aynı yer değiştirmelerin gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Fakat bağlantı nod sayısı ve panelin karmaşıklığının, oluşturulan modelin verimi açısından değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Yöntemin denemesini yapmak üzere, henüz vekil modeller oluşturulmadığından, sonlu elemanlar tabanlı bir test yatağı oluşturulmuştur. 3, 9 ve 25 panelden oluşan 3 adet test yapısı ve oluşturulan test yatağı aracılığıyla algoritma denenmiş ve doğru değerlere

yakınsadığı gösterilmiştir. Ayrıca algoritmayı yönlendiren temel parametreler için bir hassaslık analizi yapılmıştır. Burada da görüldüğü üzere, parametrelerin belirli aralıklarda, erken iterasyon sayısında bile yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bu çalışmayla, vekil modellerin önündeki ana engel, statik problemler için ortadan kalkmıştır. Fakat vekil modelin oluşturulması, paralel mimarilerde uygulanması, dinamik problemler gibi daha bir çok problem de çözülmek üzere ortaya çıkmıştır.

SURROGATE MODELING IN SHIP STRUCTURAL DESIGN

SUMMARY

Designer has to consider every aspect of the product life-cycle. Starting from conceptual design, production design, service, repair and maintenance and finally disposal of the product have all contributions in the decision process. Optimization is a mathematical approach to solve the problem of determination of the design parameters subject to various constraints. Today, using computational tools, the designer may utilize analysis tools such as finite element or finite volume methods for evaluating the constraint conditions required in optimization routines.

However these tools are suitable only for simple problems or for restricted problems because they require too much computational time. Modern computer architecture favours parallel implementations. Although the conventional analysis tools can be parallelized, the speed up is still not enough for large optimization problems.

For the last couple of decades, an alternative modelling approach so called surrogate models, which are approximate but much faster models, have been commonly utilized in optimization problems instead of finite element method. The problem to be modelled is parameterized and the behavioural information is sampled from finite element simulations. After that, by using the sampled data, a statistical model is fit. Then, the constructed model is used in place of actual finite element analysis.

Using surrogate models is appealing but they are limited by the number of parameters that can be used for the problem. The required number of samples grows exponentially with increasing number of parameters. So they can be used either locally or with few parameters globally, same limitations as in finite element method.

In this thesis, the problem of "curse of dimensionality" is solved by a domain decomposition method, specifically designed for solving models with black-box character like surrogate models. The proposed methodology is based on two aspects. First the design is represented in terms of generic building blocks which are basically stiffened panels. These panels are generic enough to represent various geometry, material and boundary conditions. Furthermore an algorithm to coordinate these sub-blocks has been created. Number of iterations required for convergence is uncorrelated with number of panels.

There are many advantages of using the proposed method. It's natively parallel structure requires no ad-hoc solutions to implement. The fixed structure of the surrogate makes itself a perfect candidate for stream processing solutions like Graphical Processing Units (GPU). After construction of the model, there is no need for additional sampling and model construction. Encapsulation is also a very useful property of the sub-model when a completely automatic design optimization is in progress since no user involvement is allowed. Besides, the model speed is unaffected with the complexity of the process it models. It directly maps the input to the output so

the interim calculation volume do not have any effect on the model performance. The statistical nature of the model even permits inclusion of data from real-life experiments.

The building blocks have parameters regarding geometry, material and boundary conditions. To unify and enable the compatibility across the interfaces, fixed number of junction nodes have been defined. These nodes represent the degrees of freedom of the panel blocks. The remaining nodes between the junction nodes have been defined in terms of displacements of the junction nodes. That is accomplished by an interpolating polynomial defined by the positions and magnitudes of the degrees of freedom of junction nodes; and that polynomial is used as a constraint equation that will unify the displacements of the neighbour nodes on the interface. It is important to notice that the number of junction nodes and the complexity of the sub-block has to be carefully selected to maximize the efficiency.

In the course of algorithm, displacement estimations may vary rapidly and wildly. To have the updates affect rapidly and without risking stability, a power transformation is applied to the displacement before application of the updates.

The rigid body motion of the panel block prevents a restricted model to be fit. To model only displacements related to the deformations of the structure, an affine transformation of the panel is proposed. After the transformation, 6 degrees of freedom are saved, so 6 less parameters are required to define the panel.

Three basic aspects of elasticity are equilibrium, constitutive relations and compatibility conditions. These are satisfied in the framework as follows. Equilibrium is satisfied along the interfaces by the decomposition algorithm. Constitutive relations are embedded in the surrogate model. Compatibility conditions are satisfied by surrogate model inside the panel domain, along the interface edges by edge interpolating polynomial and across the junction nodes by coupling and treating them as single node.

To test the algorithm without defining the surrogates explicitly, a finite element test bench is created. This technique demonstrates the upper limit of the approach as well.

The algorithm can be summarized as, starting from random initial displacements and random initial update coefficients, the sub-blocks are analysed in finite-element test bench to find the restoring force/moment resulting from the imbalance of the junction nodes. These force/moment values are summed to obtain the total restoring force/moment. After that the update coefficient is applied to the displacements depending on the sign of the restoring force/moment. After 2^{nd} iteration, the update coefficient is either increased or decreased depending on the product of the signs of the last 2 restoring force/moment. After the update, the panels are again analysed and this goes on and on until the total restoring force/moment drops below a certain threshold.

To show the convergent behaviour of the algorithm, 3 test structures have been constructed with varying degrees of complexity. First structure consists of 3 panels, second structure has 9 panels and finally the third structure has 25 panels. Although the second structure converges rapidly, as a result of its symmetric geometry and loading condition, the first and third structure converges in a similar number of iterations. The update coefficient curve forms a peak after having enough momentum and crossing the equilibrium configuration. After that peak, the coefficient starts to drop in successive iterations.

To determine the sensitivity of the algorithm to its parameters a multivariate regression model has been constructed. The selected parameters were increment rate for the update coefficient, decrement rate, order of the initial displacements, order of the initial update coefficient and coefficient for power transformation. Generated contour plots show us that if the parameters are selected within the neighbourhood of their respective nominal values, the algorithm converges to similar values, even for the very few number of iterations.

The proposed framework and decomposition method solves one of the toughest problems of surrogate models. Although the curse of dimensionality is solved, there are many tasks need to be done in order to use this framework in a realistic application. First of all a generic surrogate has not been defined yet. Besides even after constructing a surrogate model, an automatic way of creating design geometry in terms of building blocks have to be designed as well to utilize the model in an optimization. The surrogate model can estimate any output that can be retrieved from finite element simulation. But in order to design a structure in a way that is consistent of realistic conditions, better constraint metrics should be defined. Furthermore, the framework should be implemented and tested in a real parallel environment to obtain actual performance values. The proposed solution works on static problems. A solution to dynamic problems have yet to be found. Finally as a statistical model, surrogate models can be constructed by using data from real experiments along with simulation data.

1. GİRİŞ

Mühendislik faaliyetleri, ihtiyaçlar doğrultusunda bir ürün fikrinin ortaya çıkmasından başlar; teknik gereksinimlerin belirlenmesi, bu doğrultuda tasarımın gerçekleştirilmesi; sonra ürünün üretilebilmesi için üretim tasarımı ve üretimin gerçekleştirilmesi aşamaları ile devam eder; daha sonra operasyon süresince, operasyonda ihtiyaç duyulabilecek unsurların belirlenip karşılanması; onarım veya sonradan duyulan ihtiyaçlar nedeniyle üründe değişikliklerin yapılması; hatta ürünün ömrünü tamamlamasından sonra bile, uygun bir şekilde geri dönüşümünün sağlanması sürecini de içine alan geniş bir tanım aralığına sahiptir. Böylesine geniş bir tanıma sahip olan bu faaliyetlerin kaderini belirlemesi açısından tasarım süreçleri, mühendisliğin her zaman en önemli uğraşı alanı olmuştur. Tasarımı kısaca, görev tanımı belirlenmiş ürünün hayata geçirilmesine kadar olan süreçte verilen kararlar toplamı olarak tanımlayabiliriz.

Modern analiz yöntemlerinin ve bilgisayar teknolojilerinin geliştirilmesinden önceki dönemde de yapılan tasarım çalışmaları, uzun vadede devrimsel nitelikte olmakta, fakat belirli tasarım tipleri üzerinde çalışmalar genelde evrimsel olarak gerçekleşmekteydi [1]. Bir ihtiyaç üzerine değişik tasarımlar ortaya çıkar ve bunlardan en iyileri ayakta kalırdı. Ayrıca, bu başarılı tasarımlar zamanla iyileştirilerek gelişme sağlanırdı. Bilgisayar çağı ile birlikte evrimsel yaklaşım korundu. Fakat deneme yanılma tabanlı ve yüksek maliyetli yöntemler yerine, artık tasarımların hayata geçirilmesinden önce, kağıt üstünde yeterli güven sağlanıp üretime sonra başlanmaktadır.

Bu güveni sağlamanın yanı sıra bilgisayarlar, ayrıca süreci otomatik hale geçirmek üzere matematiksel programlama (optimizasyon) konularında da kullanılmaya başlanmış ve önemli gelişmeler kat edilmiştir. Bu gelişmeler sayesinde, denemelerin de zaman kaybetmeden bilgisayar tarafından yapılması hedeflenmektedir.

Optimizasyon çalışmalarını etkileyen iki ana unsurdan biri arama teknikleri, bir diğeri de arama sürecindeki mevcut durumun değerlendirilip, sonraki adımlarda aramanın yönlendirilmesini sağlayacak olan analiz çalışmalarıdır. Her bir arama adımında,

gerektiğinde defalarca yapılması gereken bu analizler her optimizasyon yönteminde en önemli darboğazı oluşturmaktadırlar. Bu problemle ilgili olarak değişik çözüm önerileri ileri sürülmüş fakat kökten çözüm getirecek bir yaklaşım getirilememiştir.

Bu tezde işte bu noktada, otomatik tasarım sürecine giden yolda önemli bir adım olan analiz sürecini hızlandırıcı bir ayrıklaştırma yöntemi ortaya konacaktır. Halihazırda hesaplama yükü fazla olan sonlu elemanlar yöntemini ayrıklaştırmaya dönük çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca sonlu elemanlara alternatif olarak ortaya çıkan yaklaşık istatistiksel modeller olan vekil modeller de kısıtlı da olsa bir çözüm getirmiştir. Bu çalışmayla birlikte vekil modeller, sonlu elemanlarda uygulandığı gibi ayrıklaştırılmış bir yapıda kullanılarak, önceden karşısına kısıt olarak çıkan parametre sayısı engeli de ortadan kalkmış olacaktır.

1.1 Tezin Planı

Konuya genel bir giriş olması amacıyla 2. bölümde tasarım ve optimizasyon konuları tanıtılmıştır. Önce optimizasyonun tanımı yapılmış ve çeşitlerinde bahsedilmiştir. Ardından optimizasyonun mühendislik tasarımındaki rolünün üzerinde durulup, modern optimizasyon çalışma konularına da değinilmiştir. Tezin konusunun da içinde bulunduğu optimizasyonda performans arttırıcı yöntemler (ki bunlardan en önemlileri paralelleştirme ve vekil model kullanımındır) ve son olarak konuyla ilgili literatür özeti sunulmuştur.

3. bölümde vekil modeller ve bu tez de sunulacak olan yeni yapı taşı bloğu temelli dizayn yaklaşımı ve gelecekte yapılacak dizayn çalışmaları açısından katkılarına yer verilmiştir. Yaklaşımın can damarını oluşturan ayrıklaştırma algoritması ve bu algoritmanın hayata geçirilme yolunda doğan ihtiyaçların yön verdiği geliştirilen diğer çözümlerden 4. bölümde detaylı olarak bahsedilecektir. Yöntemin yakınsak davranışını ve ölçeğin bu davranışa etkisini incelemek üzere 5. bölümde üç ayrı ölçekte problem üzerinde yapılan uygulamalar gösterilecektir.

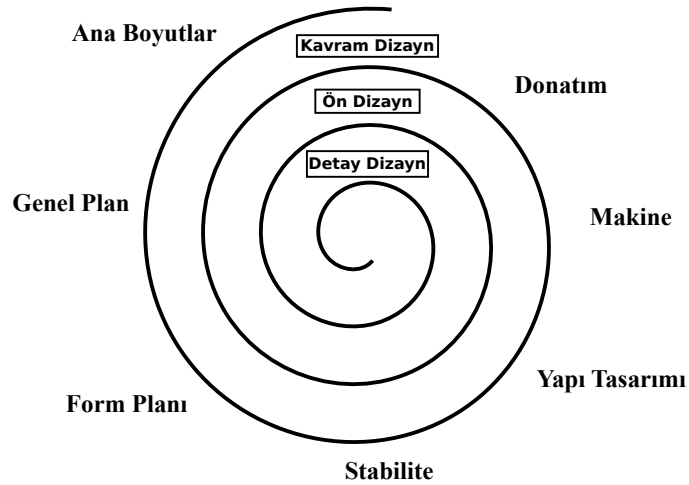
Algoritma parametrelerinin, algoritma üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek adına yapılmış olan çok değişkenli regresyon tabanlı hassaslık analizi 6. bölümde sunulmuştur. Son olarak 7. bölümde yöntemle ilgili yorumlar ve her ne kadar en önemli probleme çözüm olarak sunulan ayrıklaştırma yöntemi ortaya konmuş da

olsa, daha henüz başlangıç aşamasında olan yeni dizayn yaklaşımı ile ilgili gelecekte yapılması gereken çalışmalar hakkında bilgi verilecektir.

2. DİZAYN VE OPTİMİZASYON

2.1 Dizayn

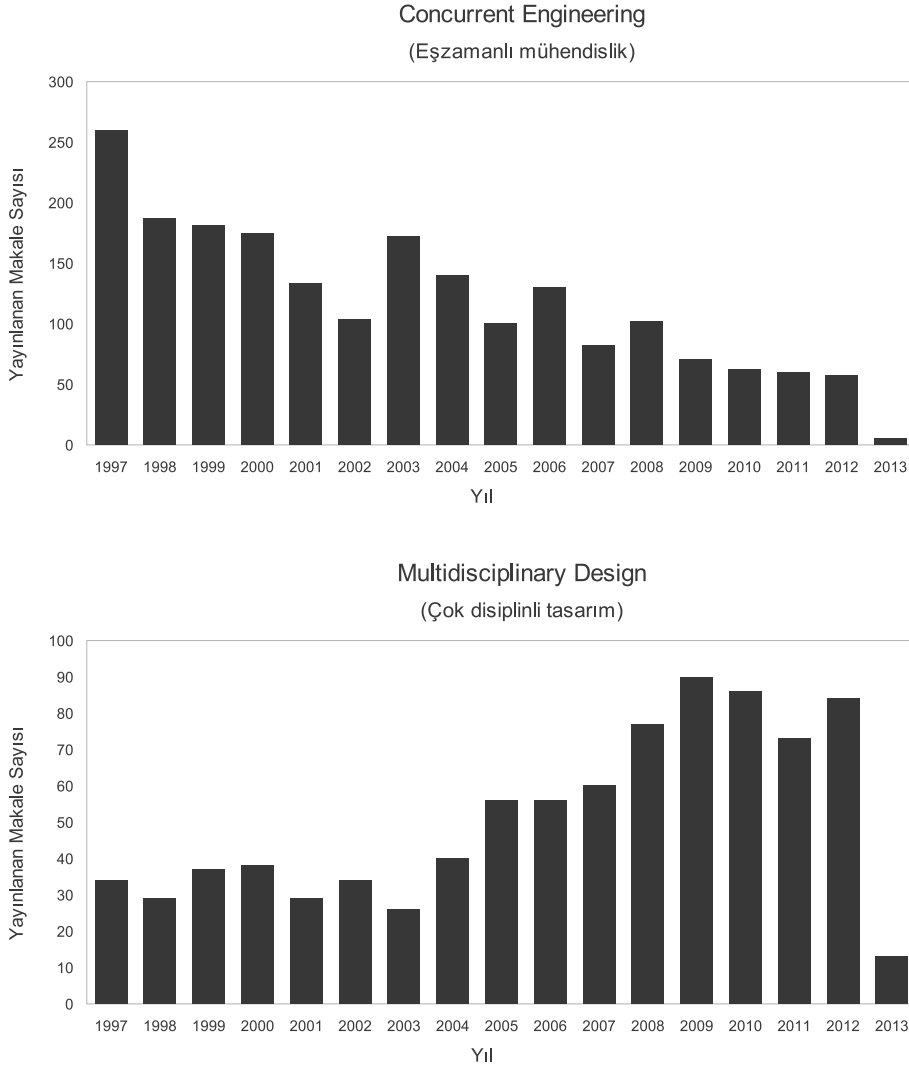
Dizayn, daha önceden de belirtildiği gibi bir ürünü hayata geçirilme aşamasına kadar alınan kararlardır. Ürünün sonuçta en ucuz veya en yüksek performans gibi kriterleri (özellikle düşük maliyetli projeler için) yerine getirmesi gerekli değildir. Kimi zaman kullanım kolaylığı veya görsel çekicilik ön plana çıkmaktadır. Fakat maliyet artınca, (özellikle gemi, uçak veya inşaat sanayi gibi) veya ürün maliyeti düşük olup da üretim büyük ölçeklerde gerçekleşiyorsa, kaçınılmaz olarak maliyet minimizasyonu veya verilen maliyette en yüksek performans beklentisi için içine girecektir. Dizayn sürecinde ana özelliklerin belirlenmesi, ön tasarım, detay dizayn,



Şekil 2.1 : Dizayn spirali.

sektöre göre (örneğin bir makine projesinde) prototip hazırlanması ve en sonunda üretime geçilmesi şeklindeki aşamalardan geçilir. Gemi dizaynında prototip kullanımı seri üretimde bile sınırlı tutulur. Diğer bir taraftan mühendislik tasarımları genellikle disiplinlerarası bir çalışma gerektirir. Böyle çok disiplin barındıran bir çalışmanın mümkün olabilmesi için uygulanan en basit yol döngüsel bir çalışma planıdır. Dizayn spirali adı verilen bu yaklaşım gemi inşaatı sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi, ana boyutlar, genel yerleşim planı, form planı, stabilite

hesapları, yapı tasarımı ve makine/donatım kararları geri besleme mekanizmalarıyla dögüsel olarak nihai ürüne ulaşılır.



Şekil 2.2 : Web of Science tarama istatistiği.

İşlemi hızlandırmak üzere, concurrent engineering adı verilen, paralel olarak yürütülebilecek süreçlerin belirlenip eş zamanlı olarak yürütülmesine imkan tanıyan bir yaklaşım geliştirilmiştir. Fakat son yıllarda bu teknik yerini, insan müdahalesini en aza indirmeyi hedefleyen multidisciplinary design tekniklerine bırakmaktadır. ISI Web of Knowledge veri-tabanından elde edilen ve atıf sayılarını baz alan veriler de Şekil 2.2'de görüldüğü gibi bu görüşü doğrulamaktadır. Bu yaklaşım özellikle uçak mühendisliği ile ilgili çalışmalarda daha fazla rastlanmaktadır. Buradaki tercihin sebebi hem süreci hızlandırmak, hem de insanlar arasındaki farklılıkların yaratacağı dezavantajları ortadan kaldırmaktır. En sonunda varılmak istenen hedef, tasarım probleminin bir matematik programlama/optimizasyon problemi olarak ifade

edilmesi ve insan müdahalesini ortadan kaldırarak sürecin tamamının otomatik hale dönüştürülmesidir.

2.2 Optimizasyon

Tasarım problemi, klasik bir optimizasyon problemi olarak ifade edilebilir. Şöyle ki,

$$\arg \min_x f_i(x) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2.2)$$

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (2.3)$$

Burada f ulaşılabilecek hedef veya hedefleri, x problem/tasarım parametrelerini, g de eşitsizlik kısıtlarını göstermektedir [2].

Yukarıda verilen ifade, aslında her türlü tasarım problemini özetleyecek kadar geneldir. Örneğin f , bir tasarımın yerine getirmesi gereken görev, minimize edilecek ağırlık, maliyet, istenmeyen bir yan etki veya maksimize edilecek bir performans parametresi, yatırım getirisi, çalışma ömrü gibi daha birçok rolü üstlenebilir.

x vektörü, tasarımı tanımlayan temel özellikler, sınırlayıcı parametreler (dış ortam şartları, maliyet parametreleri, görev parametreleri) gibi değişkenleri temsil eder.

Son olarak g ise sınırlayıcı etkenleri göstermektedir. Bu etkenler, basit tanım aralıklarından ibaret olabildiği gibi günlerce sürebilecek simülasyon sonuçlarıyla belirlenmesi de gerekebilmektedir.

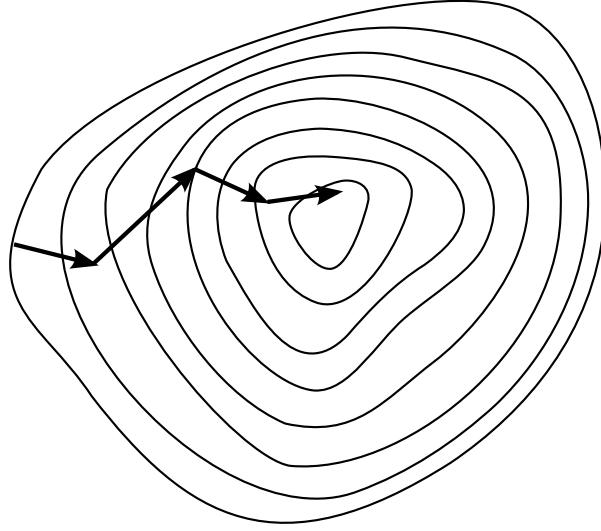
Tasarım optimizasyonu çok farklı bakış açılarıyla incelenebilmektedir. Bu nedenle önümüzdeki bölümlerde, adım adım farklı açılardan yaklaşılarak konuya daha açıklık kazandırmak hedeflenmektedir.

2.3 Hedeflenen Kapsam Açısından Optimizasyon

2.3.1 Lokal teknikler

Optimizasyon problemlerinin deterministik çözümleri sınırlı çeşitlilikteki problemlerde mümkün olmaktadır. Bu teknikler genellikle gradyan temelli olup (Şekil

2.4), genel problemlerin sadece lokal optimumunu bulmak için kullanılabilirler. Ayrıca global yöntemlerle tandem olarak yakınsama hızını arttırıcı teknikler olarak kullanılmaktadırlar. Bu tekniklere örnek olarak doğrusal programlama, ardışık kuadratik programlama verilebilir.



Şekil 2.3 : Gradyan temelli optimizasyon.

2.3.1.1 Doğrusal programlama

Conveks kısıtlı problemlerin en basitlerinden olan doğrusal programlama problemleri, hedef fonksiyonunun ve kısıt fonksiyonlarının, değişkenlerin doğrusal bir fonksiyonu olması durumunda karşımıza çıkarlar. Eğer problemin kısıtları fizibilse ve verilen kısıtlar içerisinde hedef fonksiyonu sınırlı ise; problemin sonlu bir optimum çözümü vardır.

Dantzig'in geliştirdiği simpleks yöntemi ile çözümün, kısıtların oluşturduğu polihedral bir geometri üzerinde olduğu çıkarımıyla, optimum nokta bu polihedronun köşeleri üzerinde yapılan aramaya bulunur [3].

2.3.1.2 Ardışık kuadratik programlama

Kuadratik programlama, lineer programlamadan farklı olarak, hedef fonksiyonunun 2. derece bir polinom olmasıdır. Doğrusal olmayan problemlerin çözümü için ana problem kuadratik fonksiyon ile yaklaşık olarak temsil edilir ve kısıtlar da doğrusallaştırılarak, yerel bir alt program oluşturulur.

Ardışık kuadratik programlama bu alt problemlerin kurulup, elde edilen çözümün bir sonraki adımda oluşturulacak olan yeni alt problemin başlangıç noktası olarak kullanılması esasına dayanan ardışık bir yöntemdir.

2.3.2 Global teknikler

Global optimizasyon teknikleri ise genelde stokastik bir arama yaklaşımıyla global minimumu bulmayı hedefler. Bu tekniklerin ortak özelliği lokal ve gradyan bazlı tekniklere nazaran uzayı kapsamlı bir biçimde tarayabilmeleri fakat bağıl olarak çok fazla sayıda simülasyon yapılmasına ihtiyaç duymalarıdır. Bu yöntemlere örnek olarak da yapay ısı işlem algoritması, genetik algoritmalar, karınca kolonisi optimizasyonu, parçacık sürü optimizasyonu verilebilir.

2.3.2.1 Yapay Isıl İşlem Algoritması

Bu yöntemde [4], diğer bir çok global teknikte olduğu gibi doğadaki bir olaydan ilham alınmıştır. Katıların sıcaklığının yükseltilip, yavaşça soğutularak kristalleşmesinin sağlandığı tavlama yönteminden esinlenen bu yöntem, arama uzayını başlarda daha serbest bir biçimde tararken, zamanla sıcaklık kat sayısının azaltılmasıyla daha kısıtlı ve kontrollü bir arama yaparak minimumun bulunmasını hedefler.

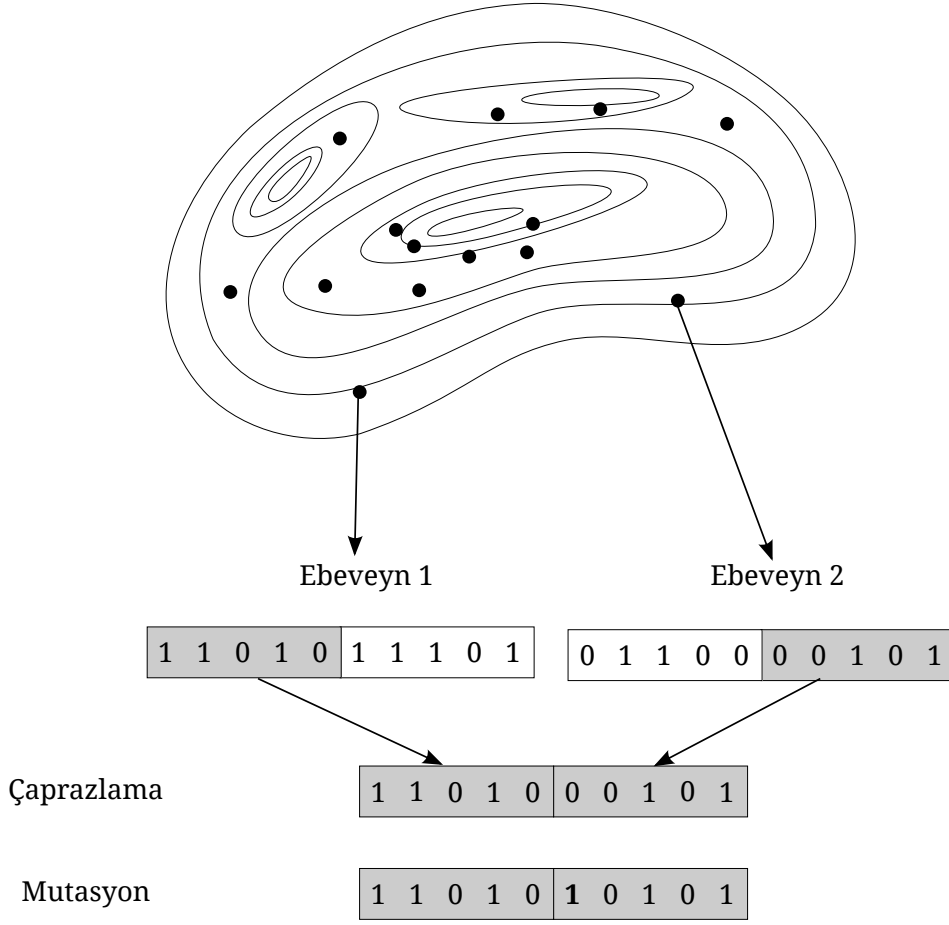
Yöntem kısaca şu adımlardan oluşur:

1. İlk en iyi noktanın, enerji seviyesinin belirlenmesi
2. Aday noktanın belirlenmesi
3. Mevcut adımdaki sıcaklık değerine karşılık gelen enerji durumuna bağlı olarak, aday noktanın enerjisinin, mevcut en iyi çözümden yüksek (daha kötü) olması durumunda bile belirli bir olasılıkla (Boltzman dağılımı kullanılır) kabul edilmesi veya reddi
4. Bir yakınsama kriterine bağlı olarak sıcaklığın düşürülüp 2. adıma geri dönülmesi veya algoritmanın sonlandırılması

2.3.2.2 Genetik algoritmalar

Darwin'in evrim teorisinden [5] esinlenerek ortaya çıkan genetik algoritmalar (Şekil 2.4), güçlü olanın hayatta kalması ve üreyerek kalıtsal bilgi aktarılması prensiplerine

dayanır. Holland'ın şema teoremi [6] sayesinde yöntemin gücüne dair işaretlerin belirmesiyle kullanımı gittikçe yaygınlaşmıştır.



Şekil 2.4 : Genetik algoritmalar.

Yöntem, aday bireylerden oluşan bir popülasyon havuzunun oluşturulmasıyla başlar. Daha sonra bu bireylerin belirlenen hedef fonksiyonu temel alınarak güçleri belirlenir. Bu güçlere orantılı olarak dağıtılan şans faktörleri göz önünde tutularak bir sonraki nesile aktarılacak genlerin belirlenmesi üzerine seçim gerçekleşir. Seçimde şans faktörü kullanımı, yöntemin lokal minimumlara takılmasına engel olmaktadır. Daha sonra çeşitliliği sağlamak üzere çaprazlama ve mutasyon işlemleri gerçekleştirilir.

Çaprazlama keşfedilmiş bilgileri gelecek nesillere aktarmak üzere kontrollü olarak uygulanır. Mutasyon nispeten daha kontrolsüz olup, aramayı kötü yönde etkileme ihtimaline karşı küçük dozlarda uygulanır. Bu işlemler bir durdurma şartı gerçekleşene dek tekrarlanır.

Genetik algoritma, güçlü bir yöntem olmasına karşın, son 20 yılda kullanımının artması bir tesadüf değildir. Yöntem çok sayıda hesap yapılmasını gerektirdiği için

güncel teknolojilere ihtiyaç duymaktadır. Bu noktada birinci problem olan algoritma hesap yükü, algoritmanın yapısı gereği paralelleştirilebilir olması nedeniyle modern bilgisayar mimarileri sayesinde problem olmaktan çıkmıştır. Fakat kısıt olacak unsurlar eğer karmaşık ve büyük ölçekli bilgisayar simülasyonları içeriyorsa, yöntem tek başına çözüm getirememektedir. Bu probleme çözüm olarak bu tezdeki yöntem sunulacaktır.

2.3.2.3 Karınca kolonisi optimizasyonu

Daha çok kombinatorik optimizasyon problemlerinde kullanılan karınca kolonisi yöntemi, karıncaların yiyecek ararken geçtiği yerde feromon maddesini bırakması ve bu maddenin diğer karıncaları yönlendirmesi ve zamanla etkisini yitirmesi özelliğini kullanır [7].

Belirlenen hedef noktasına götüren yollar rastgele belirlenir. Sonraki her rastgele iterasyonda önceki yollarla ortak geçişler yaşandığında feromon etkisi artırılır, diğer yerler için azaltılır. Ayrıca yol uzun sürdüğünde, daha düşük feromon etkisi altında kalır. Bu prensipler doğrultusunda, en kısa yola yakınsayacak şekilde bir feromon yoğunlaşması beklenir.

2.3.2.4 Parçacık sürü optimizasyonu

Parçacık sürü optimizasyonu tekniğinde, genetik algoritmalarda olduğu gibi bir popülasyon bulunmaktadır. Ama bu yöntemde optimuma ulaşmak için bir sürünün ortak bir zekayla davranması gibi, bireylerin kendi aralarında iletişim kurarak, performanslarıyla orantılı biçimde birbirlerinin doğrultularını ve hızlarını etkilemesi prensibine dayanmaktadır [8].

Aramanın popülasyonla yapılması, hem global aramayı teşvik etmekte, hem de parçacıkların her birinin diğerlerine olan etkileri nedeniyle yerel minimumlara yakalanma riskini azaltmaktadır.

Lokal ve global optimizasyonla ilgili daha detaylı bilgi [9]'da bulunabilir.

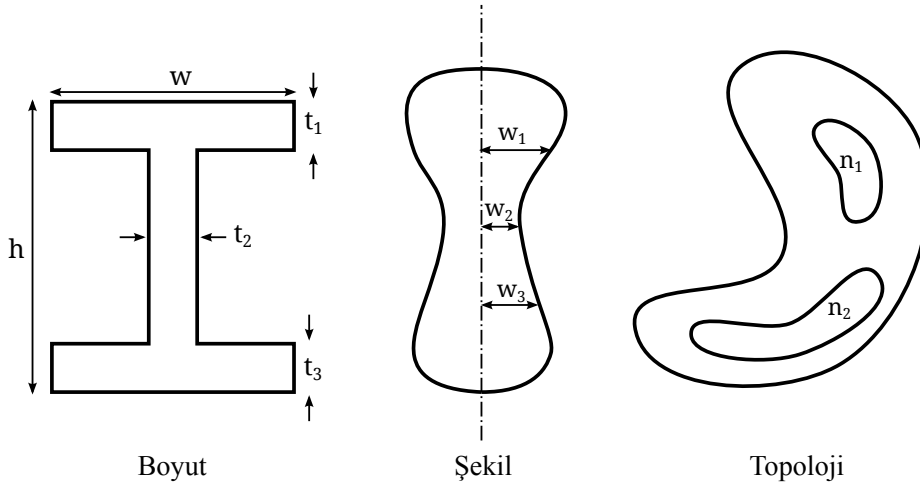
2.4 Yapısal Dizaynda Optimizasyon

Yapısal tasarım problemi genelde geometrik sınırlamalar, değişik yük durumlarını barındıran görev senaryoları, kullanım ömrü, çevresel, görev veya maliyet ile

ilgili şartlar nedeniyle sınırlanmış malzeme seçenekleri, ergonomi gibi daha birçok kısıtlama altında beklenen mukavemeti gösterecek bir ürünün ortaya konmasıdır. Yine aşağıda farklı bakış açılarıyla konu irdelenecektir.

2.4.1 Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu

Boyut optimizasyonu, yapının sabit bir şeklinin sadece levha kalınlığı veya ana boyutlarının parametrize edildiği en basit geometrik optimizasyon yaklaşımıdır. Çoğu kez yapı analizi öncesinde tekrar tekrar ağ oluşturmaya (meshing) gerek duyulmaz. Hız bakımından tercih edilmesine rağmen arama uzayının en daraltılmış hali olduğu için global optimumun bulunması zordur.



Şekil 2.5 : Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu.

Bir üst yaklaşım olarak şekil optimizasyonu, geometrinin topolojisinin sabit olduğu fakat bağıl olarak şeklinin parametrize edilebildiği yaklaşımdır. Bu yaklaşım daha genel bir uzayda arama yapılmasını sağlamakla birlikte tasarımın uygunluğu da bir ölçüde garanti altına alınabilmektedir. Fakat şekil optimizasyonu muhtemelen ağ değişiklikleri gerektirecektir.

En genel geometrik optimizasyon topoloji optimizasyonu olarak adlandırılmaktadır. Topoloji optimizasyonunda, geometrik bağlantılar da değişebilmektedir. Arama uzayı en genel anlamda ifade edilmesi global optimumu bulmaya izin verir. Fakat bu sefer de tasarımın, arama uzayında uygulanabilirliği belli durumlarda mümkün olmadığından ve bunun belirlenebilmesinin otomatik olarak çok da mümkün olmamasından ötürü aramanın verimi çok düşük olabilmektedir. 3 tip yaklaşım için örnekler Şekil 2.5'te görülebilir.

Gemi inşaatında genelde boyut optimizasyonu yapılır. Yani sadece levha kalınlıkları veya profil kesitleri parametre olarak alınmaktadır. Topoloji optimizasyonu da postalar arası mesafe, derin postaların kaç postada bir olduğu veya boyuna derin eleman sayısı gibi sınırlı sayıda parametreyle yapılmaktadır. Ayrıca ergonomi, stabilite, güvenlik vb. kaynaklı kısıtlar da bu tip problemlerde yer almaktadırlar. Sırasıyla, adam geçme delikleri, tank planı ve koferdam kullanımı bu kısıtlara örnektir.

2.4.2 Yapının etkisi altında bulunduğu şartlar

Yapılar çalışma koşullarına, geometrisine, malzemesine bağlı olarak çeşitli problemlere dayanım göstermek zorundadır. Bu unsurlar temel gösterimdeki g tipindedir, diğer bir deyişle sınırlandırıcı etkenlerdir.

Dinamik yükler, özellikle gemi yapılarının sıklıkla maruz kaldığı dalga yükleri, ana makine titreşimi, yük elleçleme sırasında yükün taşıma sisteminden kurtulması, tanklarda çalkantı gibi çok çeşitli hallerde ortaya çıkabilir. Özellikle çevresel yüklerin probleme, değişikliğe uğramadan eklenmesi gerekmektedir. Yapısal dizaynda zamanla değişen yüklerin etkisi konusunda bir inceleme yazısı olarak [10]'a başvurulabilir.

Statik yükler ise geminin ağırlık-yük-sephiye dengesinin sakin suda yarattığı, termal yüklerden kaynaklı vb. zamana bağlı değişiklik göstermeyen yüklerdir.

Ayrıca yapının servis veya bakım ömrünü belirleyecek yorulma analizi veya belirli başlangıç kırık durumlarının tehlikeli bir hale ne zaman dönüşebileceği ile ilgili kırılma analizleri de yapısal optimizasyonda göz önünde bulundurulması gereken diğer önemli durumlardır.

2.4.3 Malzeme

Malzeme her yapının, çeşitli yüklerin etkisi altında göstereceği davranışı belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Temel gösterimde x tipindedir. Basit anlamda, bir listeden seçilebilecek kadar dar bir arama uzayına sahip olduğu düşünülse de özellikle kompozit malzemelerin tasarımı malzeme için de özel optimizasyon problemlerini ortaya çıkarmıştır. Çelik inşaatında yüksek mukavemetli veya yüksek sıcaklıklara dayanıklılık gibi değişik özelliklere sahip malzemeler, tasarım parametreleri içinde

yerlerini alırlar. Çok katmanlı kompozit levhalar için ise fiber doğrultuları, katman kalınlıkları, elyaf ve matris tipleri tasarım parametreleri olarak kullanılır.

2.4.4 Üretim ve hizmet maliyeti, ağırlık, performans

Bu başlık altındaki unsurlar temel gösterimde f tipindedir. Dolayısıyla her biri minimize (veya maksimize) edilmek üzere hedef fonksiyonu olarak seçilebilirler. Eğer bu hedeflerden birden fazla seçilmek istenirse ortaya çok hedefli optimizasyon problemi çıkmaktadır. Bu problem tipi önümüzdeki bölümde açıklanacaktır ama kısaca söylemek gerekirse birden fazla hedef fonksiyonun aynı anda optimizasyonu mümkün değildir. Sadece uzlaşa kurulabilecek en iyi seçenekleri belirleyen sınırlar tespit edilebilir.

Bu hedeflerden maliyet ve ağırlık, genelde çok karmaşık simülasyonlar gerektirmez. Fakat performans optimizasyonu bağıl olarak daha zahmetlidir.

2.5 Modern Optimizasyon Uygulamaları

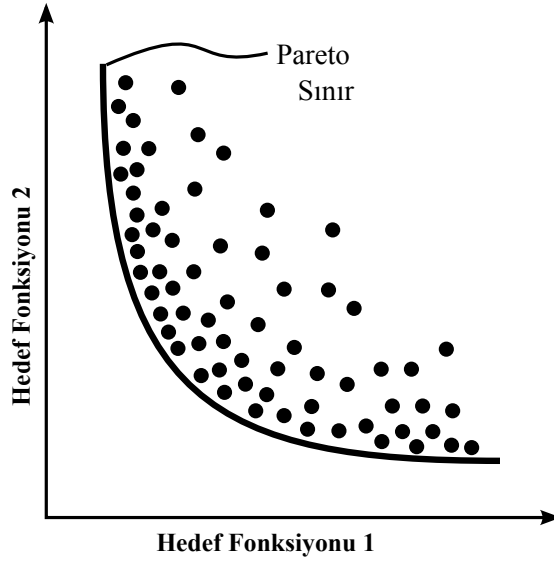
Optimizasyon, geleneksel olarak önceki bölümde örnekleri verilen tipte bir hedefi maksimize/minimize edecek parametreleri bulmaktan ibaretti. Artık değişik bakış açıları, farklı beklentiler yeni tipte optimizasyon uygulamaları doğurmuştur.

Çok-disiplinli optimizasyon, farklı disiplinlerden analizlerin gerektiği fakat bu analizlerde kullanılan tasarım parametrelerin ortak olması nedeniyle ortaya çıkmıştır. Bu problemin karmaşıklığını azaltmak adına problemin ayrıştırıldığı ve alt-problemler arası koordinasyonun sağlandığı teknikler geliştirilmiştir. Ayrıca problemin zorluğu, fazla kısıtlaması olmayan evrimsel algoritmalar gibi tekniklerle de aşılmaya çalışılmıştır. Çok-disiplinli optimizasyonun havacılıkta kullanımı ile ilgili çalışmalar [11] araştırma makalesinde daha detaylı incelenmiştir.

Robust optimizasyon ise optimizasyon neticesinde elde edilecek tasarımın, parametrelerindeki değişikliklere fazla duyarlı olmamasını hedefler. Deterministik veya stokastik parametre değişikliklerinden sistemin az etkilenmesi için bu gereklidir. [12] konuyla ilgili bir derleme çalışmasıdır.

Bir diğer önemli yaklaşım, tasarımın performansına etki eden parametreler ve bunların etkilerindeki belirsizliklerdir. Güvenilirlik hesabı, bu belirsizlikleri tasarımda göz

önüne alır. Güvenilirlik temelli optimizasyon açısından hava taşıtları için yazılmış derleme bir çalışma olarak [13] ve [14] incelenebilir.



Şekil 2.6 : Pareto sınırı.

Son olarak çok hedefli optimizasyon, birden fazla, çoğu zaman birbiriyle ters düşen hedefler içeren optimizasyon problemlerini temsil etmektedir. Burada matematiksel olarak aynı anda her hedefin en-iyilenmesi mümkün olmadığından, tasarımcı veya müşteriye seçim imkanı tanıyacak en iyi seçeneklerin belirlenmesi hedeflenmektedir.

Örneğin Şekil 2.6'da görüldüğü gibi apsis ve ordinatta gösterilen iki hedefin (bunlar tasarım parametresi değildir), kalın çizgiyle gösterilen ve pareto sınırı adı verilen sınırda en iyi kombinasyonları yer almaktadır. Bu sınırda yukarı ilerlendiğinde ordinattaki hedef, sağa ilerlendiğinde absisteki hedef ağırlık kazanır. Çok hedefli optimizasyonla ilgili derleme bir çalışma olarak [15]'e başvurulabilir.

2.6 Performans Arttırıcı Yöntemler

Bu başlık altında, optimizasyon problemi veya çözüm tekniğinden ziyade, sonuca yakınsama hızını arttırmayı hedefleyen yöntemlere yoğunlaşılacaktır. Kimi zaman bu yöntemler arama maliyetini düşürdüğü gibi, bu tezin çalışma konusunun da aralarında olduğu bazı yaklaşımlar daha önceden imkansız gibi görünen problemleri çözülebilir hale getirebilmektedirler.

2.6.1 Paralleleştirme yöntemleri

Gelişen bilgisayar teknolojisi, gün geçtikçe artan işlemci saat hızlarının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Fakat son yıllarda saat hızları ile büyüme gittikçe zorlaştığından, yerini paralelleştirmeye bırakmıştır. Paralel işlemde amaç aynı anda gerçekleştirilebilecek görev veya işlenebilecek verinin farklı işlemcilere paylaştırılarak zaman kazanılmasıdır.

Görev paralelleştirme için bir bilgisayar kümesi veya ortak hafıza kullanımıyla çalışan çoklu işlemci/çekirdekli sistemler kullanılabilir. Ayrıca veri paralelleştirmeye özel olarak akış işlemcileri, ortak görevleri çok sayıda veriye aynı anda uygulayabilmeye olanak sağlamaktadır. [16]'da paralel hesaplama ile ilgili detaylı bilgi bulunabilir.

2.6.1.1 Paralel genetik algoritmalar

Genetik algoritmalar, yapıları gereği paralelleştirmeye çok uygundur. Genel olarak arama uzayı farklı gruplara bölünerek, sadece belirli aralıklarla sağlanan koordinasyon yardımıyla paralel bir arama gerçekleştirilebilmektedir. Konuyla ilgili kapsamlı bir araştırma makalesi de yazılmıştır [17].

2.6.1.2 Doğrusal denklem sistemleri

Optimizasyon açısından paralelleştirme yapılabildiği gibi, aramada en önemli dar boğazlardan birini yaratan analizler için de çözümler ortaya konmuştur. Bu çözümler daha çok doğrusal denklem sistemlerinin çözümüne yönelik oluşturulmuşlardır. Bağlı olarak daha basit yöntemler olan eksik çarpanlara ayırma [18] ve yaklaşık matris tersi alma [19] yöntemleri önkoşullama yaklaşımları olarak kullanılmışlardır. Ayrıca alan ayrıklaştırma adı verilen daha kapsamlı ve hem ayrıklaştırmayı, hem de çözülecek problemin yapısını göz önünde bulunduran yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Schwarz yöntemleri [20] problem alanını, üst üste bindirilmiş alt-alanlara bölüp, bu alanlarda elde edilen ara çözümleri birbirlerine Dirichlet sınır şartı olarak paylaştırır. Ayrıca global olarak da koordinasyonu sağlamak üzere daha kabaca ayrıklaştırılmış problem çözümünü kullanarak çözüme giderler.

Öte yandan Schur tamamlayıcı sistemler [21], problem alanını bindirme yapmadan alt bölgelere ayırır. İç bölgelerdeki bilinmeyenler elenerek geriye kalan ve arayüzleri ilgilendiren bilinmeyenlerden oluşan ve yoğun matrisler olan Schur tamamlayıcı denklem sistemi, Krylov altuzay hızlandırıcı yöntemleriyle çözülür.

Konuyla ilgili bir araştırma çalışması için [22]'ye başvurulabilir.

Ayrıştırma yöntemlerinin kullanılabilmesi için problemin bir denklem sistemi cinsinden ifadesi gerekmektedir. Bu gereksinim istatistiksel modellerde bu yaklaşımın direk kullanımını engellemektedir ve bu tezin ortaya çıkmasındaki ana fikre kaynak olmuştur.

2.6.1.3 Çoklu vekil modeller

Bir diğer paralelleştirme esaslı yöntem çoklu vekil model kullanımınıdır [23]. Vekil modeller, kısaca yaklaşık ama normal simülasyonlara kıyasla çok hızlı modellerdir. Sonraki bölümde daha detaylı olarak anlatılacak olan bu yöntemin çoklu kullanımı hız konusunda bir getiri yaratmasa da dolaylı olarak hatayı azalttığından ötürü bir performans artışına imkan tanımaktadır.

2.6.2 Vekil modeller

Yapısal tasarım ve optimizasyonda, çok maliyetli olan sonlu elemanlar, hesaplamalı akışkanlar dinamiği gibi simülasyonlara olan ihtiyaç araştırmacıları değişik çözüm yollarına itmiştir. Son dönemde istatistiksel modellerin, bu zahmetli simülasyonlar yerine kullanımının faydalarının ortaya konulmasıyla, birçok mühendislik branşında bu konuda yoğun olarak çalışılmaktadır.

1. Veri toplama: Modeli oluşturmak üzere, problemin tanım aralığını yeterli seviyede kapsayacak bir uzayda uygun bir biçimde dağıtılmış örneklemelerin belirlenmesi ve devamında bu noktalardaki simülasyon sonuçlarının alınması
2. Model seçimi: Problemi modelleyecek yeterli esnekliğe sahip parametrik modelin seçilmesi
3. Model oturtma: En az hata ve düzgünlük gibi kriterler doğrultusunda, model parametrelerinin veriler ışığında belirlenmesi

Farklı branşlarda ortaya çıkan ve özünde yukarıda verilen şablona dayalı kullanımı olan çeşitli vekil model tipleri ortaya çıkmıştır.

2.6.2.1 Radyal baz fonksiyon (RBF) ağları

Radyal baz fonksiyonu (RBF) ağları [24], modellenecek fonksiyonu, tanım uzayına dağıtılmış baz fonksiyonu adı verilen parametrik ve yakınlığa bağlı olarak etkinliği artan fonksiyonların ağırlıklandırılmış toplamı şeklinde ifade eder.

Diğer bir deyişle modelin yapısı:

$$\hat{f}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{n_c} \omega_i \psi(\|\vec{x} - \vec{c}^{(i)}\|) \quad (2.4)$$

Burada ψ baz fonksiyonunu, c baz fonksiyon merkezlerini, w ağırlık katsayılarını, n_c ise baz fonksiyon sayısını göstermektedir. Genel olarak baz fonksiyonu olarak gauss fonksiyonu yapıdadır:

$$\psi(\|\vec{x} - \vec{c}^{(i)}\|) = e^{-\beta \|\vec{x} - \vec{c}^{(i)}\|^2} \quad (2.5)$$

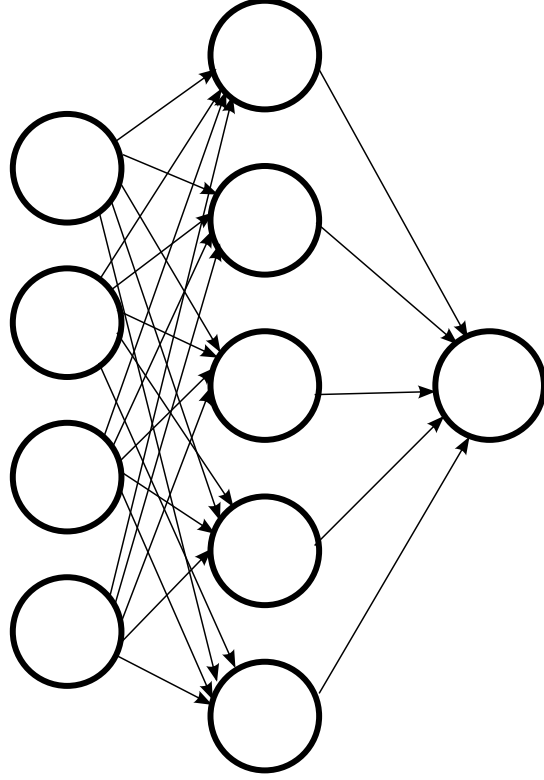
β parametresi, bazın mesafeye bağlı etkinliğini belirlemek üzere kullanılır. w katsayısı ise baz fonksiyonların birbirlerine bağlı olarak etkinliklerini belirlemek üzere kullanılır.

2.6.2.2 Kriging

Kriging [25], RBF'den farklı olarak, beta parametresi ve baz merkezlerine uzaklığı temsilen kullanılan L2 normları yerine, modellenecek fonksiyonun her boyutu için farklı bir beta ve farklı normlar kullanır.

2.6.2.3 Yapay sinir ağları

Şekil 2.7'de de görülen ileri beslemeli yapay sinir ağlarında [26] girdi değerleri ağırlıklandırılmış bir toplam olarak doğrusal olmayan (genelde sigmoid veya hiperbolik tanjant fonksiyonu) bir aktivasyon fonksiyonuna gönderilir. Gizli katman adı verilen ve bu aktivasyon fonksiyonuna sahip bir çok nöron adı verilen bileşen daha sonra çıktı değerlerini benzer gizli katmanlara veya çıkış katmanında bulunan nörona aktarır.



Şekil 2.7 : Yapay sinir ağı.

Modelin parametreleri, her nörona özel olarak ağırlık katsayıları ve ağırlıklı toplama ilave edilen sabit terimdir. Bu katsayıların çözümü için genellikle geri yayılım adı verilen ve gradyan temelli bir arama yaklaşımı kullanılır.

2.6.2.4 Cevap yüzey yöntemi

Aslında örneklem toplama tekniği ve çok değişkenli regresyondan ibaret olan cevap yüzey yöntemi [27], örneklemelerin verimli olarak toplanmasını, en uygun model seçimini ve en sonunda oluşturulan modelin ANOVA analizi ile uygunluğunun kontrolü ve parametreler hakkında detaylı bilgilerin elde edilmesini amaçlar.

2.6.2.5 Destek vektör makineleri

Bu yöntemde modellenecek fonksiyona bir epsilon hassasiyeti atanır ve modeli veriye uydururken hatanın epsilonu geçmemesi fakat olabildiğince en az karmaşıklıkta olması hedeflenir [28].

Bu modellerin oluşturulması bile başlı başına bir mühendislik uygulaması olmasından ötürü, önümüzdeki bölümlerde en verimli şekilde vekil model kullanımıyla ilgili geliştirilen yöntemlerden bahsedilecektir.

2.6.3 Boyut azaltma yöntemleri

Büyük ölçekli tasarımların fazla sayıda parametreye sahip olması, modelleme sırasında "boyutluluğun laneti" adı verilen problemten etkilenmesine sebep olur. Modeli oluşturmak için gerekli örneklemin büyüklüğü parametre sayısı ile üstel olarak artmaktadır. Bunun yanında model oturtma işlemi de arama uzayının büyümesi nedeniyle zorlaşır.

Çözüm olarak eldeki verinin ortogonal transformasyonuna dayanan ve muhtemel korelasyon içeren değişkenleri daha az sayıda lineer bağımsız değişkenlere dönüştüren temel bileşenler analizi kullanılmaktadır [29]. Bu yöntemle, önemli etkileri olmayan değişkenler ihmal edilerek orijinal problem daha basit bir probleme indirgenmiş olmaktadır.

2.6.4 Değişken hassasiyetli model kullanımı

Eğer vekil modelleri kullanırken, veri kaynaklarımız arasında hem hassas ama maliyetli, hem de daha az hassas ama ucuz modeller varsa, bu iki modelin ekonomik olarak ortaklaşa kullanılmasına imkan tanıyan uzay dönüşümü yöntemi geliştirilmiştir [30].

2.6.5 Verimli örneklem kullanımı

Önceden de bahsedildiği gibi, yeterli örneklem büyüklüğü parametre sayısı ile üstel olarak artmaktadır. Bunun dışında örneklemin arama uzayında dağılımı da modelin verimliliğine etki etmektedir. Örneklem, uzayın mümkün mertebeye her bölgesini temsil edilecek biçimde toplanmalıdır.

En popüler yaklaşım, örneklemelerin tamamının modelleme öncesinde belirlenmesi şeklindedir. Bu yaklaşıma örnek olarak latin hiper küp örnekleme yöntemi verilebilir. Deney dizaynı adı verilen bu konuda daha detaylı bilgi için [31]'den faydalanılabilir.

Ardışık örnekleme [32] adı verilen bir diğer yaklaşımda, modellemeye az sayıdaki başlangıç örneklem kullanılarak başlanır ve modelden de toplanan bilgi akışıyla sonraki örneklenecek noktalar belirlenir. Yukarıda verilen genel bilgilerin ardından önümüzdeki bölümde, vekil modellerin yapısal tasarım/optimizasyon problemlerinde kullanımıyla ilgili bir literatür özeti verilecektir. Ardından tezin bu çerçevedeki konumu, amacı ve yönteminden bahsedilecektir.

2.7 Literatür Özeti

Her ne kadar henüz genel geçer bir vekil model kullanımı gerçekleştirilememiş olsa da, bir çok farklı bakış açısının farklı problemler üzerinde değerlendirildiği literatürde görülmektedir.

2.7.1 Uygulama alanına göre

Uygulama alanlarına göre incelersek, bir bölüm çalışma sadece yapay problemler veya basit fonksiyonlar üzerinde yapılmıştır [33–43]. Bu fonksiyonlar diğer çalışmalarla karşılaştırma yapılabilmesi için belirli özelliklere (çok modluluk, geniş düzlüklerin olması vs.) sahip olacak şekilde oluşturulmuşlardır.

Vekil modellerin en çok görüldüğü alanlardan biri havacılık - uzay mühendisliğidir. Bu alanda kanat dizaynında [44–50], kanat profili dizaynında [44, 51–53], aerospike nozul tasarımı [54], uçak konsept tasarımı [55], kanat kutu optimizasyonu [56], helikopter rotor tasarımı [57], uydu konsept dizaynı [58] konularında örnek çalışmalar yapılmıştır.

İnşaat mühendisliğinde ise çalışmalar genelde kafes tasarımı üzerinde görülmektedir [59–64]. Bunun dışında deprem yüklerine maruz çerçeve tasarımı [65], betonarme için donatı düzeni optimizasyonu [66], katılaştırılmış şişirebilen yapılar [67] için de çalışmalar yapılmıştır.

Vekil modeller üzerine çalışmaların görüldüğü bir diğer popüler mühendislik alanı da makine mühendisliğidir. Bu alanda şekil ve topoloji optimizasyonu [68–71], yakıt pili tasarımı [72, 73], dinamik giriş problemleri [74], kompozit yapı tasarımı [75–77], basınçlı kapların tasarımı [78], aktif kontrol edilen yapılar [79], ısıtıcı tasarımı [80], çarpışma odaklı araç tasarımı [81–83], enjeksiyon kalıplama tasarımı [84],

metallere plastik şekil verme proses tasarımı [85] gibi çok çeşitli alanlarda uygulamalar görülmektedir.

Gemi inşaatı alanında vekil model uygulamaları az sayıda ve özellikle manevra, stabilite kontrolü gibi kontrol uygulamalarına dönük olmaktadır. Bunun dışında tekne formu tasarımı [86], dökme yük ön tasarımı [87] ve otonom hovercraft tasarımı [88] gibi daha çok ön tasarıma dönük çalışmalar görülmektedir. Gemi yapısal tasarımı açısından kayda değer bir çalışma görülmemiştir.

2.7.2 Optimizasyon tekniği açısından

Vekil modellerin kullanıldığı optimizasyon tekniklerine bakacak olursak olasılıksal yöntemlerden evrimsel algoritmaların baskın olduğu görülmektedir [33, 36, 37, 42, 49, 52, 53, 62, 68, 74, 77, 81, 87]. Ayrıca yapay ısıtma işlem yöntemi [72], parçacık sürü optimizasyonu [65] ve vekil modelin aramadaki örneklemelerin belirsizliğini modelleyerek aramayı yönlendiren "verimli global optimizasyon" [89–91] gibi yine olasılık tabanlı yöntemlerde uygulamalar yapılmıştır.

Kullanımı git gide azalsa da ardışık kuadratik programlama [45, 46, 84], ardışık lineer programlama [92] gibi deterministik yaklaşımlarda da vekil model kullanımı gözlemlenmiştir.

2.7.3 Vekil model tipi açısından

Genel olarak gözlemlenen yaklaşım, mevcut problemleri yine mevcut optimizasyon teknikleri ve vekil modellerle buluşturmak şeklinde olmaktadır. Bu da optimizasyon alanında "bedava öğle yemeği olmaz" şeklinde isimlendirilen teorem [93] göz önünde bulundurulduğunda, çok etkili çözümlerin bulunmasının bu yaklaşımla zor olduğunun işaretlerini vermektedir.

Uygulama başlangıcı nispeten daha öncelere dayanan cevap yüzey yöntemi, özünde polinomları model olarak kullanan ve deney dizaynı teknikleri ile varyans analizi (ANOVA) gibi parametrelerin etkisinin analiz edildiği ve devamında modelin güncellendiği istatistiksel yöntemlerin kullanıldığı bir yaklaşık model oluşturma yaklaşımıdır. Cevap yüzey yöntemini [94–100] çalışmalarında kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmalardaki ortak görüş, yöntemin az sayıda parametre içeren problemlerde çok etkili bir şekilde çalıştığı ancak parametre sayısı artınca verimin düştüğü yönündedir.

Bir diğ er popü ler yöntem ise ö rneklemlerin yerel çekirdek fonksiyonları aracılığıyla tanım uzayını modellenmesine dayanan ve kökeni jeostatistiğe dayanan Kriging'dir. Kriging havacılık ve uzay mühendisliği alanı başta olmak üzere bir çok alanda, son dönemde artan bir popü lerliğ e sahiptir. Ö rnek çalışma olarak [101–108] verilebilir.

Aslında Kriging yönteminin özel bir durumu olan radyal baz fonksiyon ağı da yukarıda anılan yöntemler kadar popü ler bir yöntem olup [109–112] çalışmalarında vekil model olarak kullanılmışlardır.

Bu üç yöntem dışında destek vektör makinaları [34, 113], yapay sinir ağı ları [35, 39, 45, 57, 66], hareketli en küçük kareler [77, 79] gibi yöntemler de az sayıda çalışmada denenmişlerdir. Özellikle yapay sinir ağı ları, her ne kadar vekil model olarak kullanımlarında bir dezavantaj olmasa da daha çok örüntü algılama (pattern recognition) gibi yapay zeka uygulamalarında veya kontrol uygulamalarında tercih edilmektedirler. Ayrıca vekil model tiplerinin karşılaştırılmasıyla ilgili olarak [114, 115]'e başvurulabilir.

2.7.4 Optimizasyon tipi açısından

Çok hedefli optimizasyon alanında [42, 49, 53, 57, 67, 74, 80, 90, 116], çok disiplinli optimizasyon alanında [45, 50, 55, 58, 77, 88, 117] ve güvenilirlik tabanlı optimizasyon alanında [14, 40, 56, 60, 69, 71, 75, 79] vekil model kullanımları sıklıkla görülmektedir. Çok disiplinli optimizasyon alanında vekil model kullanımıyla ilgili araştırma çalışması da bulunmaktadır [117].

2.8 Çalışmanın Hedefleri ve Yöntemi

[118]'de ASME tasarım teorisi ve metodolojisi komitesi tarafından gelecekte vekil modeller alanında çö zülmesi gereken en büyük problemler olarak:

1. bilgisayar deneyleri için ö rnekleme yöntemleri
2. deneysel sonuçların görselleştirilmesi
3. yaklaşım yöntemlerindeki belirsizliğin hesabı
4. çok boyutlu problemler

gösterilmiştir. Bu tezde hedeflenen 4. sıradaki problemidir. Özellikle gemi inşaatı veya uçak mühendisliğinde karşılaşılan çok sayıda parametre içeren problemlerin modellenmesi mevcut yöntemlerle mümkün olmamaktadır. Kullanabilecek parametre sayısını arttırmak adına verimliliği arttırmaya yönelik girişimler yapılmış fakat ana problemi çözmekten uzak kalmışlardır.

Bu tezde, geometrik ayrıklaştırma yaklaşımı ile ana sistemin çok sayıda alt sistemle gösterilmesi ve bu yolla çok boyutlu global problemin, çok sayıda yerel problem üzerinden çözülebilmesi hedeflenmektedir.

3. YÖNTEMİN TANITIMI

Analizin yapısal tasarım optimizasyonundaki rolünden geçtiğimiz bölümde bahsedilmişti. Bu bölümde analizin performansını belirleyen ana unsur olan matematiksel modellemeden bahsedilecek olup, ardından yeni yaklaşımlardan yaklaşık modelleme ve buna bağlı olarak istatistik modellemeye değinilecek ve son olarak bu tezde sunulacak olan yaklaşımın getireceği yeniliklerden bahsedilecektir.

3.1 Matematiksel Modeller

Matematiksel model gerçek hayattaki olay ve nesnelerin matematiksel terimlerle temsilidir. Burada amaç gerçek hayatta yapılan gözlemlerle oluşturulan modeller aracılığıyla gözlenmemiş durumların çıkarımı veya tahminidir.

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v\right) \quad (3.1)$$

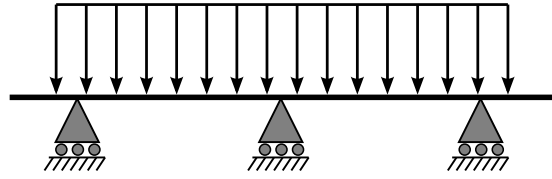
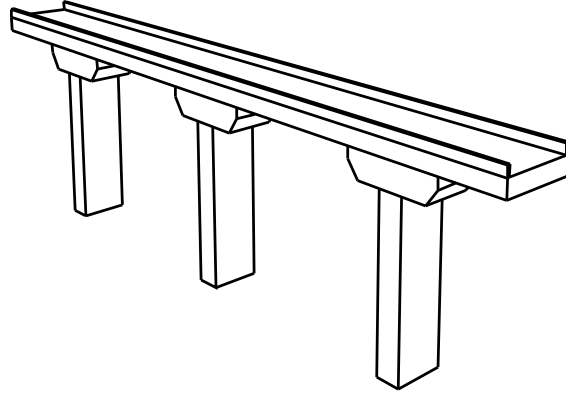
$$X_t = c + \varepsilon_t \sum_{i=1}^p \phi_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i X_{t-i} \quad (3.2)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.3)$$

Yukarıda 3 farklı tipte matematiksel model örneği verilmiştir. Denklem 3.1 zaman ve mekana göre sürekli bir değişiklik gösteren bir fenomeni modelleyen kısmi türevli bir diferansiyel denklemdir. Denklem 3.2 ise zamana göre değişen bir durumu modelleyen bir zaman serisidir. Üçüncü örnek model 3.3 ise bir olasılık dağılımı olup, rasgele bir durumla ilgili olarak tahmin yürütülmesini sağlamak üzere kullanılmaktadır.

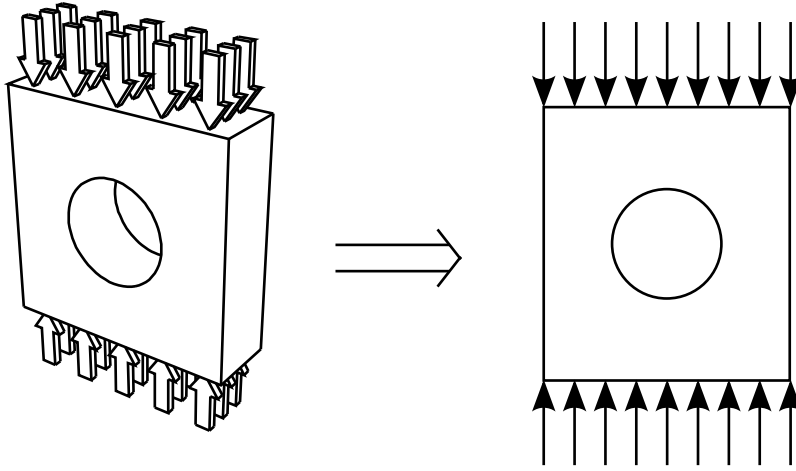
Modeller genellikle temsil ettikleri gerçek durum ve nesnelere daha basit yapılara sahiptirler. Bunun temel sebebi basit modellerin analize daha uygun olmalarıdır.

En önemli basitleştirme yöntemlerinden biri soyutlamadır. Soyutlama, ele alınan nesne veya olay incelenen olguyla doğrudan ilişkisi olmayan unsurların elenmesi sonucu, daha basit bir modelin oluşturulması anlamına gelir. Örneğin Şekil 3.1'de



Şekil 3.1 : Köprü ve kiriş modeli.

görülen köprü yapısı, 1 boyutlu bir doğru parçasıyla ve kesit özellikleri de kesit alanı, atalet momenti, malzeme elastisite modülü gibi skaler değerlerle soyutlaştırılarak modellenenir.



Şekil 3.2 : Düzlem gerilme modeli.

Bir diğer yaklaşımda, basitleştirme problemin ölçeği düşürülerek yapılır. Buna örnek olarak düzlem gerilme modeli (Şekil 3.2) verilebilir. Burada bir yapının bir doğrultudaki boyunun diğer ortogonal eksenlerdeki boylarına kıyasla çok az olması, problemin daha küçük ölçeklerde modellenmesine izin verir.

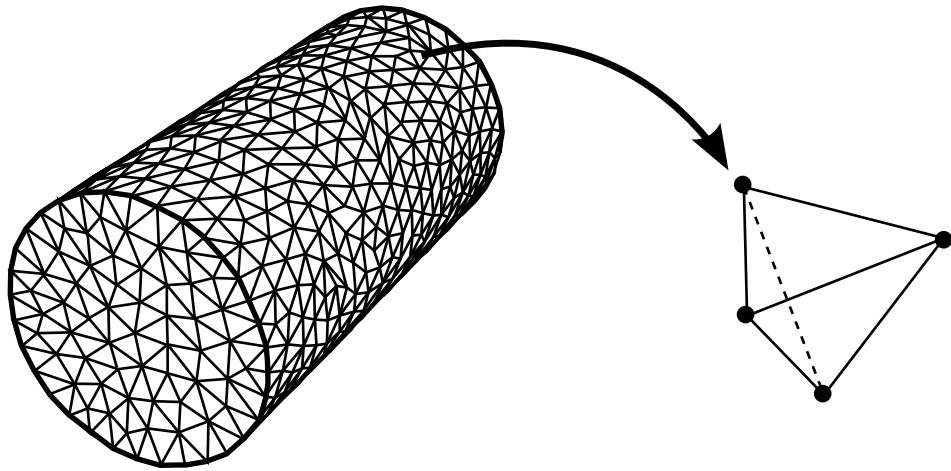
Genelde çok karmaşık olayları temsil eden modeller doğrusal olmayan davranışlar barındırır. Eğer bu davranışlar kısıtlı aralıklarda incelenirse, problem doğrusal olarak modellenebilir ve analizler de bu doğrultuda kolaylaşır.

3.1.1 Diferansiyel denklemler

Diferansiyel denklemler mühendislik, fizik, ekonomi ve daha bir çok alanda önemli rol oynayan matematiksel modellerdir. Sürekli değişen bir yapıya sahip büyüklüklerin ilişkileri ile zamansal ve uzaysal boyutlarda değişimlerini temsil ederler. Diferansiyel denklemlerin genellikle açık formda çözümlerini oluşturacak fonksiyonlar bulunamamaktadır. Bu nedenle çözümler sayısal olarak yaklaşık yöntemlerle hesaplanırlar. Buradaki temel prensip, zaman veya mekansal uzaylarda ayrıklaştırma yapıp (Şekil 3.3) çözümü parçalı veya adım adım olarak gerçekleştirmek üstüne kuruludur.

Ayrıklaştırma ne kadar küçük parçalar halinde gerçekleştirilirse, o kadar hassas bir çözüm elde edilir. Fakat bazı sayısal yaklaşımlarda bu küçültme işlemi belli bir noktadan sonra denge bozukluklarına yol açabilir.

Bu çalışmayla dikkat çekilmek istenen ana problem, geometri ne kadar çok parçaya bölünürse, çözüm süresinin o oranda artmasıdır. Gerçek bir problem göz önünde bulundurulduğunda, bu ayrıklaştırma sonucunda çok büyük bir işlem yüküyle karşılaşmak kaçınılmaz olacaktır.



Şekil 3.3 : Ağ yapısı ve örnek bir eleman.

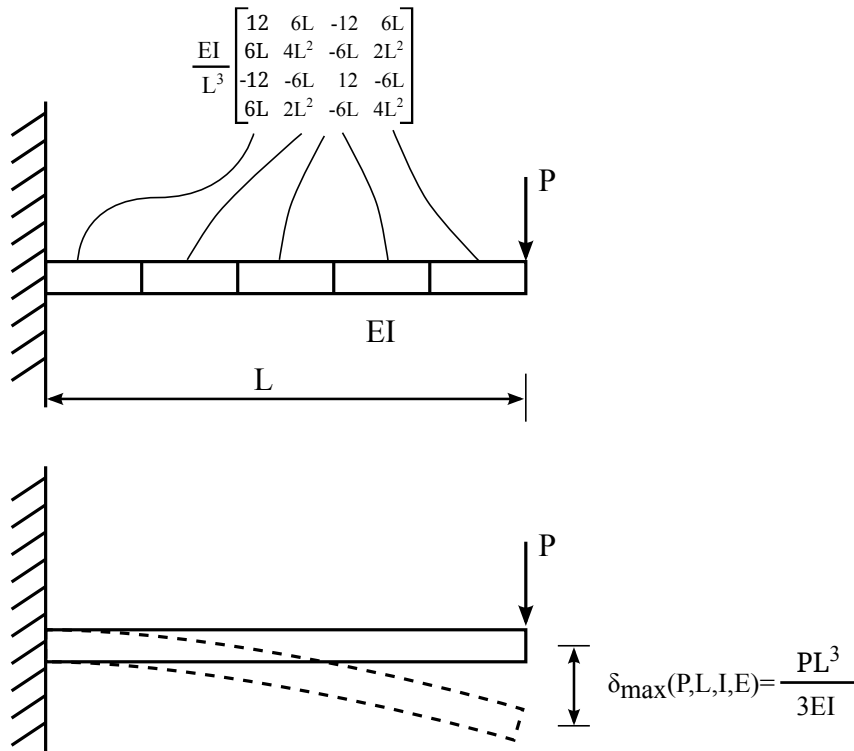
Ayrıklaştırmadaki genel prensip, fiziksel modelin davranışını nispeten daha basit bir geometri üzerinde incelenmesini sağlamak ve buradan yola çıkarak sistemin

davranışını bu basit geometrik elemanlarının toplamının davranışı üzerinden tahmin etmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım eleman sayısının çokluğu kadar esneklikte bir arama uzayında dizaynın analizine imkan sağlamaktadır. Fakat diğer taraftan bu esneklik uygun olmayan dizaynların da yapılabirliğini gereksiz yere sağladığından, hesapların çok fazla sayıda olmasına yol açmaktadır.

3.1.2 Yaklaşık modeller

Yaklaşık modeller, aslında diferansiyel denklemlere alternatif değil, tamamlayıcı bir rol üstlenirler. Eldeki diferansiyel denklemlerle tanımlı modellerin çözümünü üretilen veriler kullanılarak oluşturulurlar. Bu modellerin kullanılmasındaki amaç, önceki bölümde belirtilen gereksiz yere tanım aralığında bulunan ve fizibilitesi olmayan durumların elenmesiyle modelin basitleştirilmesini sağlamaktır.

Dolayısıyla arama uzayı, node sayısı \times serbestlik derecesiyle orantılı büyük bir yapıdan, sadece en, boy, stifner sayısı ve boyutları gibi daha özelleşmiş ve arama uzayını belirli bir kalıba yerleştiren parametrelerle tanımlanmaktadır.



Şekil 3.4 : Ayrıklaştırılmış sistem ve amaca yönelik model.

Şekil 3.4'te görülen kiriş sisteminde maksimum çökme miktarı, sadece boy, yük, malzeme ve atalet momentine bağlı olarak ifade edilebilmesine karşın, ayrıklaştırılmış

olarak çok daha fazla sayıda parametre ve sonuç olarak daha fazla işlem yüküne sebep olmaktadır. Yaklaşık modelleri oluştururken öncelikle modeli oluşturmak üzere gerekli veriyi üretmek için diferansiyel denklemlerin sayısal yöntemlerle simülasyonları yapılır. İkinci aşamada, önceden belirli veya verilerin toplanmasıyla elde edilen bilgi üstüne duruma göre oluşturulabilecek modelin (parametrik olmayan modeller) parametrelerinin toplanan veriler aracılığıyla en uygun, en hatasız tahmin yapılabilecek şekilde belirlenmesi gerçekleştirilir. Bu katsayıların bulunma işlemine öğrenme de denilmektedir.

Bir lineer regresyon modelinde, elimizde modeli temsil eden polinom terimleri ve bunlarla çarpılan sabit katsayılar bulunmaktadır. Verilerin toplanmasını takiben, tahmin yaparken ortaya çıkan hatayı minimuma indirecek model katsayılarının bulunması amaçlanır. Aslında regresyon, modelin veriye uydurulması hedefiyle, katsayıların parametre olarak alındığı ve hedefin hata olduğu bir optimizasyon problemidir.

Değişik yaklaşımların bu problemi çözmek üzere kendine has yöntemleri vardır. Örneğin yapay sinir ağlarında geri yayılım algoritması iteratif bir yolla en dik iniş yöntemini uygularken, en küçük kareler yönteminde hatanın kareler toplamı minimize edilmek üzere ifadeler düzenlenir ve oluşan denklem sistemi çözülür.

Bu tip modellerin kurulmasında önemli faktörlerden biri model parametrelerinin belirlenmesidir. Bu parametreler, diferansiyel denklemlerdeki ayrıklaştırmada yapıldığı gibi farklı bileşenlerin, farklı şekillerde denklem sisteminde yer alması gibi değil, bir parametre vektörü halinde eş değer bir şekilde modelde yer alırlar. Örneğin modelin geometrisini temsil edecek en, boy gibi tanım uzayı sürekli ve reel olan değerler, malzeme ile ilgili olan elastisite modülü gibi bünyesel özellikler ve hatta sisteme dışarıdan etkiyen kuvvetlerin değerleri model için birbirinden farksızdır. Hepsi modeli etkileyen parametreler olarak değerlendirilir.

Yapısı gereği, parametrelerin sayısı, tanım aralıkları ve genel olarak modelin yaklaşıklık hassasiyeti isteğe göre ayarlanabilir. Parametre olarak seçilmeyen özellikler sabit bir değer ile temsil edilirler.

Örneklerle belirlenirken, tanımlı aralıkları iyi temsil edebilmesi için uygun bir biçimde dağıtılmaları gerekmektedir. Aksi takdirde düşük verimle hassasiyet kaybı

yaşanacaktır. İstisnai olarak bu durum bazı problemler için avantaj olarak da kullanılabilir. Örneğin yaklaşık model bir güvenilirlik analizi için kullanılacaksa, örneklemeler özellikle limit durum civarında toplanarak modelin hassasiyetinin o bölgeye özel olarak yüksek olması sağlanır.

3.2 İstatistiksel modelleme

İstatistiksel modelleme ya da diğer alanlardaki isimleriyle vekil model, meta model, makine öğrenimi; bir fenomeni gerçek fiziki şartları sağlamadan tahmin edilebilmesi için oluşturulan yaklaşık bir matematiksel modelleme tekniğidir. Bu teknik

1. Parametrelerin belirlenmesi
 - (a) Bağımsız değişkenlerin belirlenmesi
 - (b) Gözlemlenecek çıktılarının belirlenmesi
2. Seçilen bu parametrelerin tanımlı oldukları uzayın içerisinde yeterli bilgiyi barındıracak şekilde dağılmış ve yeterli sayıda olan örneklemelerin belirlenmesi
3. Duruma göre en sonunda verilerle şekillenecek olan ve sistemin ana hatlarını tarif eden modelin belirlenmesi
4. Son olarak deney sonrasında elde edilen verilerin kullanımıyla modelin oluşturulması

adımlarıyla özetlenebilir.

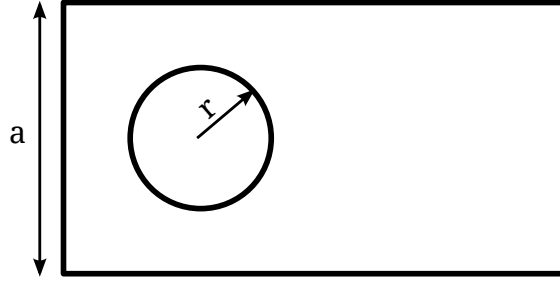
Burada deney olarak adı geçen eylem gerçek fiziksel bir deney olabileceği gibi, analiz yöntemleri aracılığıyla bilgisayar kullanılarak verilerin üretilmesi olabilir. Bu iki tip deneyin arasında önemli bazı farklar vardır. Örneğin gerçek deneylerde, bazı önceden belirlenemeyen rastgele etkilerin, modelin oluşturulmasında problem yaratmaması adına belli başlı çözümler bulunmaktadır. Yapılacak deneyler belirli bir düzende değil, rastgele bir sırayla yapılır.

Bir diğer yaklaşımda, eğer belli etkiler sisteme etki etmekte fakat kontrol edilememekteyse, bloklama adı verilen bir uygulamayla deneyler bu değişimin az olacağı alt gruplar halinde gerçekleştirilir.

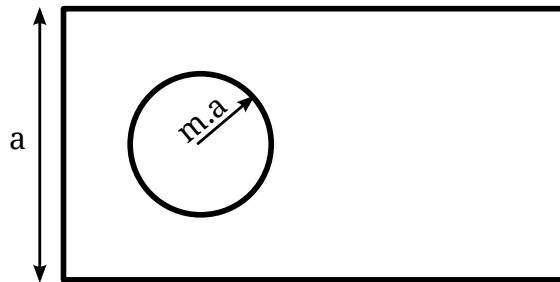
Son olarak, kontrol dışı değişimlerin etkisini de göz önünde bulundurulması adına deneyler tekrarlanarak gerçekleştirilir. Burada önerilen çözümler, sonucu tekrarlamayla değişmeyeceğinden ötürü bilgisayar deneylerine uygulanamaz. Fakat yine de istatistiksel modelin kurulma aşamasında kullanılan bir çok yöntem, fiziki ve bilgisayar deneyi olarak farklılık göstermemektedir.

3.2.1 Model parametrizasyonu

Yapısal dizayn optimizasyonu ile ilgili oluşturulacak modelin parametreleri, yapıyı oluşturan unsurların geometrisini tanımlayan parametreler, malzeme parametreleri, yük ile ilgili olarak yükün şiddeti ve dağılımı; bunun dışında ayrıştırma algoritmasında özellikle gerekecek olan nodal hareketler de parametre olarak belirlenir.



$\min.r < r < \max.r$
 $\min.a < a < \max.a$
eğer $r > a \rightarrow ???$

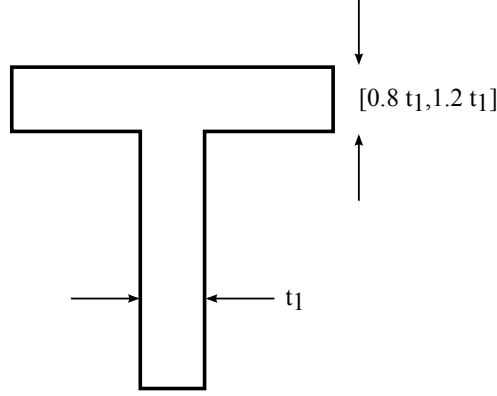


$\min.m < m < \max.m < 1$
 $\min.a < a < \max.a$

Şekil 3.5 : Bağımsız ve bağıl parametre kullanımı.

Burada dikkat edilmesi gereken nokta, model oluşturulduktan sonra optimizasyon sırasında insan müdahalesine yer vermemek adına uygulanabilir olmayan dizaynların arama uzayında yer almamasına dikkat edilmesi gerekliliğidir. Bu sebepten dolayı

örneğin Şekil 3.5'te görüldüğü gibi bir panelin içerisinde açılacak bir delik yarıçapı cinsinden parametrizasyonu yapılması yerine, yarıçapın boyutsuzlaştırılarak kenar uzunluğunun bir oranı olarak tespit edilmesi daha uygun olacaktır.



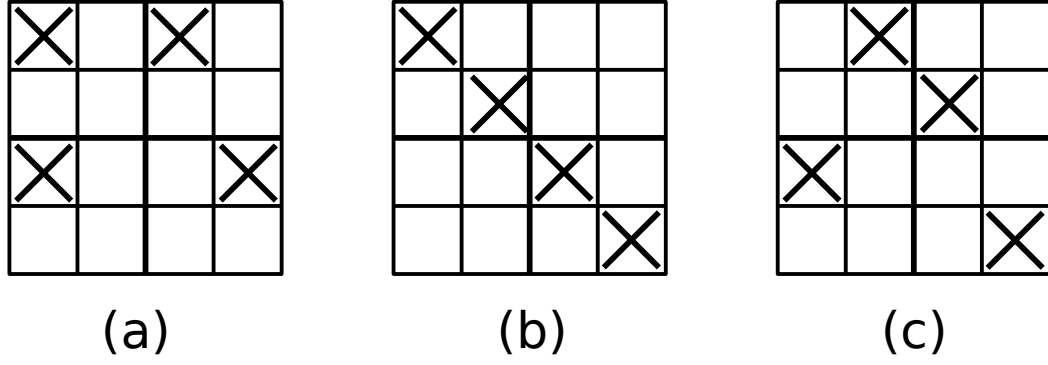
Şekil 3.6 : Alın lamasının gövdenin yüzdesi cinsinden parametrizasyonu.

Bunun dışında kısıtlar alt ve üst limitler halinde veya başka bir parametrenin civarına bağlı olarak verilen limitler şeklinde (örneğin Şekil 3.6'daki gibi alın lamasının kalınlığının, gövde kalınlığından çok farklı olmaması) verilerek de aday dizaynların uygulanabilirliği sağlanabilir. Uygulanabilirlikten aşağıdaki kavramlar anlaşılmalıdır:

- Tasarımın gerçek hayatta uygulanabilir bir topolojiye sahip olması (deliğin levhadan büyük olmaması veya stifnerlerin alın lamalarının çakışmaması gibi)
- Üretilebilirlik
 - Montaja uygunluk
 - Ara mamüllerin üretilebilir olması
- Ergonomik kısıtlara uygunluk

3.2.2 Örneklerin belirlenmesi - deney dizaynı

Gerçek ve bilgisayar deneylerinde ortak olarak kullanılan yöntemlerin başında deney dizaynı gelir. Deney dizaynı modeli kurmak için gerekli verilerin toplanacağı yerlerin, yani taranılacak uzaydaki konumlarının verimli bir şekilde belirlenmesidir. Verimle kastedilene örnek olarak Şekil 3.7'de gösterilen karelere bölünmüş ayırık bileşenlere sahip iki boyutlu bir arama uzayı oluşturulmuştur.



Şekil 3.7 : Latin hiper küp.

Aynı sayıda noktanın verimsiz bir biçimde yerleştirildiği birinci durumunda, belirli sütun ve satırlarda örneklemelerin yoğunlaştığını, diğer bir taraftan bazı bölgelerde hiç örneklem noktası seçilmemiş olduğu görülmektedir.

İkinci örnekte ise latin hiper kübü adı verilen yaklaşıma göre örneklem her satır ve her sütunda birer adet olacak şekilde ayarlanmışlardır. Fakat yine burada da belirli bir doğrultuda yoğunlaşmış olan noktalar, o doğrultu dışında örneklem alınmamış alanların bulunmasına sebep olmaktadır.

Üçüncü örnekte de uzay dolduran bir latin hiper kübü görülmektedir. Burada noktalar hem satır ve sütunlara düzgün olarak dağıtılmış, hem de belirli doğrultulara yığılmayıp, her bölgeyi temsil edecek şekilde belirlenmişlerdir.

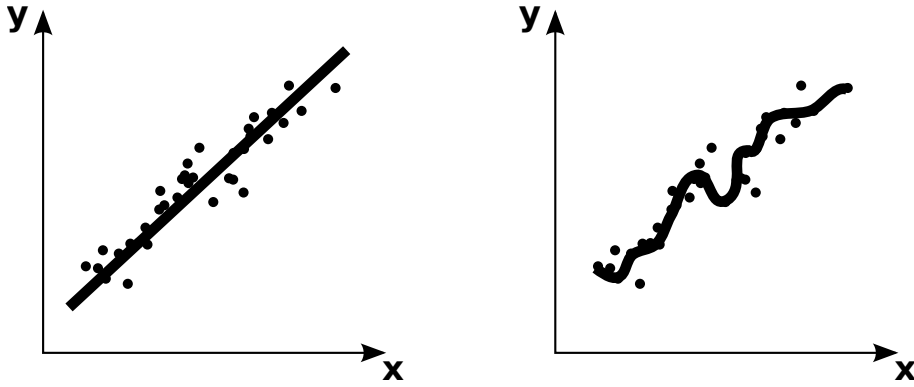
3.2.3 Model seçimi

Oluşturulacak istatistiksel model iki türlü yaklaşımla belirlenebilir. Birinci yaklaşım parametrik model adı verilen ve yapısı önceden belirli, örneklenen verilerle bu parametrelerin bir kritere göre en iyi sonucu verecek şekilde seçilmesiyle gerçekleştirilir. Parametrik olmayan modelleme yaklaşımında da model örneklenen verilerin ışığında şekil alır ve yapısı önceden belirli değildir.

Parametrik modelleme yaklaşımlarına örnek olarak cevap yüzey metodolojisi veya diğer bir deyişle polinom regresyonu veya ileri beslemeli yapay sinir ağları verilebilir. Parametrik olmayan yaklaşımlara da destek vektör makinaları ve gauss süreçleri verilebilir.

3.2.4 Sistematik hata (bias) ve varyans ödünleşmesi - Occam'ın jileti

Model yapısı seçildikten sonra belli bir kriter doğrultusunda model parametrelerinin verilere göre belirlenmesi gerekmektedir. Bu kriterler bias ve varyans ödünleşmesi adı verilen bir probleme dayanarak belirlenir. Bu problemde, eğer model, interpolasyonda olduğu gibi noktaların tam üstünden geçiyorsa yani bias 0 ise bu o modelde gereksiz dalgalanmalara sebebiyet vermektedir. Diğer bir yaklaşımda, eğer varyans minimizasyonu perspektifiyle bir kriter belirlenirse, örneklemelerden gelen bilgiden uzaklaşmaya başlanacaktır. Bu sebeple genelde, örnek verilen iki uç durumun ağırlıklandırılmış bir ortalaması gibi bir kriter belirlenir. Buna örnek olarak ince levha tiriz yöntemi verilebilir [119].



Şekil 3.8 : Occam'ın jileti.

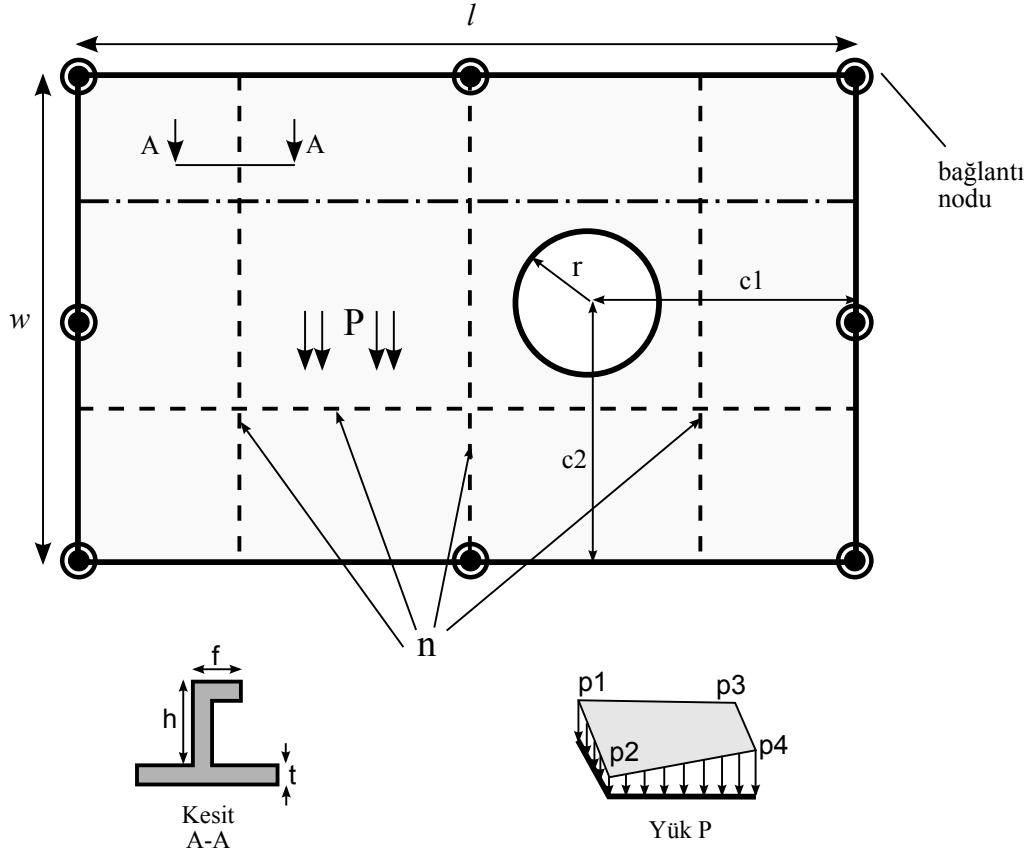
Hedef fonksiyonunda yapılan bu müdahalenin dışında, doğrudan model seçimiyle de ödünleşmeye gitmeden de iyi bir model kurulabilir. Occam'ın jileti (Şekil 3.8) adı verilen prensibe göre eldeki iki model eğer örneklemelere uygulandığında eş değer sonuçlar veriyorlarsa, yapısı daha basit olanın genelleme yeteneği daha yüksek olur. MacKay ayrıca bu teoriyi Bayezyen çıkarım yaklaşımını kullanarak model yapısının belirlenmesini otomatik olarak sağlayan bir sistem oluşturmuştur [120].

3.3 Yeni Yaklaşım

Günümüzde vekil modeller bir problemi ya global ölçekte tamamını temsil edecek ve parametreleri ona göre seçilmek üzere kullanılır ya da yerel parametreler veya global parametrelerin zaman veya mekansal olarak kısıtlı bir uzayda değerlendirilmesiyle belirlenir ve modelleme yapılır.

Boyutluluğun laneti problemi her iki yaklaşımda da problemin tam anlamıyla ele alınmasına engel olur. Global ölçekteki yaklaşımda, problemi temsil edecek parametre sayısının çok fazla olması gerektiğinden ve ne yazık ki kısıtlı sayıda parametreyle incelenemediğinden problem tam anlamıyla temsil edilememektedir. Yerel düzeydeki yaklaşımda ise yeterince parametre kullanılsa bile problemi global olarak temsil edemediğinden tam anlamıyla bir çözüm olarak değerlendirilememektedir.

Bu tezde amaçlanan yerel kapsamda oluşturulan modelin global ölçekteki problemi temsil etmesi sağlanarak bahsedilen sorunu çözüme kavuşturmak. Buna göre sistemi temsil edecek temel bileşen olarak genel amaçlı bir yapı taşı bloğu tasarlanmıştır. Bu blok sistemin her bileşenini temsil edebilecek özellikte ve genellikle bir yapıda olacaktır.



Şekil 3.9 : Yapı taşı bloğu.

Şekil 3.9'da de bir örneği görülen bu yapı taşı bloğu aslında stifnerli bir paneldir. Stifnerli panel kendi temel geometrik özellikleri ki buna sahip olduğu stifnerlerle ilgili geometrik özellikler, ayrıca panelin üzerinde açılacak delikler ve konumları gibi geometrik bilgiler olduğu gibi, o panele etkiyecek yüklerin dağılımı ve şiddeti, malzeme özellikleri ve en önemlisi diğer bloklarla iletişim kurduğu ve kendi

hareket serbestlik derecelerini temsil eden bağlantı noktaları üstünden vekil model oluşturulacaktır.

Kendi içinde tutarlı ve tanımlanan aralıklarda verilen girdi değerlere karşılık gelen çıktıları tahmin edebilen blok modeli oluşturulduktan sonra geriye bu blokların oluşturduğu sistemin sadece bloklardan aldığı bilgiyle sistemin kolektif davranışının tahmin edilmesi kalmaktadır. İşte bu global sistemin ayrıklaştırılmasını sağlayan algoritma bir sonraki bölümde ele alınacaktır.

Her ne kadar yapı olarak sonlu elemanlar veya sonlu hacimlerde olduğu gibi bir ayrıklaştırma söz konusuysa da temel olarak şöyle bir fark vardır: sonlu elemanlarda ayrıklaştırma, diğer adıyla ağ veya mesh oluşturma işlemi sabit bir geometriyi çok basit geometrilere sahip bileşenlere bölme; olayı tanımlayan diferansiyel denklemlerin bu bileşenlerdeki çözümü, global modellerin temsilini sağlamak üzere bir denklem sistemine dönüştürerek gerçekleştirilmektedir.

Bu tezdeki ortaya konan yeni yaklaşımda oluşturulacak olan dizayn, alt bloklar cinsinden ifade edilecektir. Diğer bir deyişle bu blokların sayı veya topolojik olarak farklı farklı birleşimlerinden oluşan uzay içerisinde arama yapılacaktır ve bu arama yapılırken bu blokların fiziksel davranışı ayrıca bloğun alt uzayını istatistiksel modeller aracılığıyla temsil edilecektir. Yani sonlu elemanlar örneğindeki gibi açık olarak ifade edilebilecek denklem sistemleri yer almamaktadır.

3.3.1 Yeni yaklaşımın getirdikleri

Yapı taşı bloğunun tanımlanması, yani parametrelerin belirlenip bir sonlu elemanlar yazılımıyla veri üretilebilecek hale getirildikten sonra artık belirlenen örneklemelerin toplanması aşamasına gelinir. Alışıla gelen yöntemlerin aksine yapı taşı bloğu, farklı tiplerde dizaynlarda kullanıma uygun olduğundan belirlenecek nispeten fazla parametre sayısı daha uzun hesaplama süresi gerektirse bile uzun vadede bu durumun etkisi ortadan kalkacağı için geleneksel yöntemle göre çok daha verimli olacaktır.

“Utanç verici derecede paralel” problemler, ne kadar parçaya bölünürse bölünsün, verim kaybı yaşamadan hızlanma özelliğine sahiptirler. Bu yöntemle özgü olmasa da örneklem toplama aşaması böyle bir yapıdadır ve ardışık örnekleme yapılmayacaksa istenilen büyüklükte alt gruplar halinde işlemcilerle dağıtılabilirler.

Örneklemlerin toplanmasından sonra model yapısının sabit veya değişken olduğu durumlarda parametrelerin verilere uydurulması süreci de iki şekilde hız kazanır. Bunlardan birincisi, modellerden birden fazla çıktı beklendiğinden ötürü, her çıktı için farklı bir eğitim süreci olması bu işin paralel olarak yürütülebilmesi anlamına gelmektedir.

İkinci hız kazanma durumu, parametrelerin toplanan veriler ışığında seçimi bir optimizasyon problemi olarak düşünöldüğünde, paralelleştirilebilen optimizasyon teknikleri (ki bundan 1. bölümde bahsedilmişti), tek bir çıktı için yapılan modellemelerde bile muazzam bir hız artışına imkan tanıyacaktır.

Eğitim aşamasından sonra da yaklaşımın asıl getirdikleri şöyle özetlenebilir. Öncelikle vekil model kullanımı, yapı taşı bloğu ölçęindeki problemler düzeyinde sonlu elemanlar analizi gibi yöntemlerden hızlı çalışmaktadır. Bir sonraki bölümde anlatılacak olan ayrıklaştırma yaklaşımı, problem ölçęinden bağımsız bir sürede yakınsayarak global sistem davranışını tahmin edebilmektedir.

Ayrıca, her bir iterasyon için yapı taşları birbirinden bağımsız veri ileteceği için bu verilerin üretimi dağıtık şekilde gerçekleştirilebilir. Bu tipte paralel işleme mekanizması, paylaşımlı hafıza mimarisinde çekirdeklere ve işlemcilere paylaşırma şeklinde veya cluster bilgisayar mimarilerine dağıtık olarak mümkün kılınabilir. Fakat çok sayıda iterasyon ve bileşen sayısının fazla olması göz önüne alınırsa hafıza paylaşımlı çözümler daha efektif olacaktır.

Bu yaklaşımın getirdiğı önemli sonuçlardan biri de eğitim yani model oluşturma sürecinin bir defada bitirilmesi ve bu modelin sabit katsayı ve operasyonlardan oluşması nedeniyle, adanmış mimariler ya da daha düşük bir maliyetle halihazırda popülerliğini gittikçe arttıran grafik işlemci ünitesiyle yapılan “akış işleme” (stream processing) teknolojileriyle uyumlu bir yapıdadır. Yani önceden belirlenmiş katsayılar ve operasyonlar bu grafik işlemcilere gönderilir ve her iterasyonda gerekli girdiler, problem kaç sayıda yapı taşından oluşuyorsa bu işlemciye beslenir ve sonuçlar da eş zamanlı olarak toplanıp sonraki iterasyona geçilir.

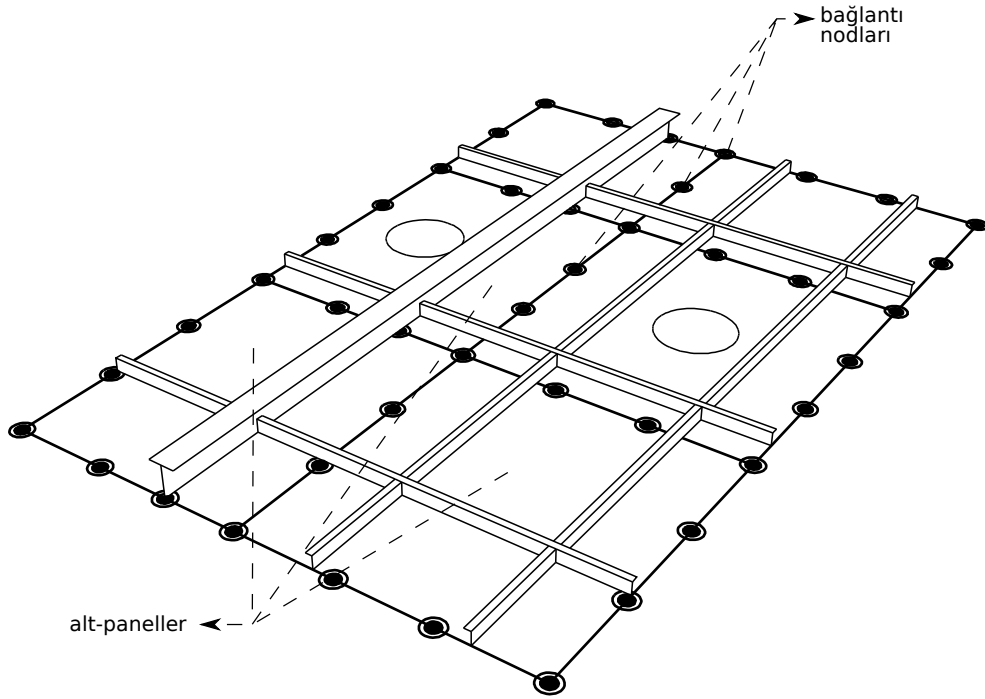
Performans açısından getirdiklerinin yanı sıra bir optimizasyon uygulamasında, encapsulation adı verilen gerekli bir özelliğı de barındırmaktadır. Bu özelliğe göre yapı taşı tutarlı bir şekilde, verilen aralıkta uygun çıktıları garanti ettiğinden dolayı, bu yapı

taşlarından oluşan sistem de yine kararlı ve optimizasyon uygulamasının durmasına yol açacak anormal durumların oluşmasına da imkan tanımayacaktır.

Son olarak kullanılan matematik model istatistiki bir model olduğu için veriler sonlu elemanlar gibi deterministik simülasyonların sonucu olabileceği gibi gerçek fiziki ölçümler de sisteme entegre edilerek daha gerçekçi modellerin oluşturulmasına imkan sağlayacaktır.

4. AYRIKLAŞTIRMA ALGORİTMASI

Gemi inşaatı, havacılık sanayii ve daha bir çok alanda ince duvarlı yapılar sıklıkla kullanılmaktadır. Bölgesel ve görevsel farklılıklar arz etseler de stifnerli paneller bu yapıları oluşturan temel bileşenleri olduğu kabulü yapılabilir. Büyük ölçekli karmaşık bir yapının stifnerli panelden ibaret olan yapı taşlarıyla gösterilebilmesi için, sürekli ortam davranışı ile ilgili beklentilerin ayrıklaştırılmış halde de gerçekleşmesi gerekir.



Şekil 4.1 : Yapı taşı bloklarından oluşan sistem.

Şekil 4.1'de yapı taşı olan paneller sistem içerisinde görülmektedir. Bu panellerin istatistiksel modeli, hedeflenen en genel halde düşünülüp, sistemin alt bileşeni olarak diğer bloklarla uyumlu bir biçimde yer alması göz önünde bulundurularak oluşturulmalıdır. Geometri, malzeme ve yük durumlarının uygun bir parametrisasyonuna daha önceden değinilmiştir. Ayrıklaştırmaya özgü olarak bloklar arası uyumu gerçekleştirmek için bloğun serbestliğini sağlayacak nodların belirli bir standartta olması gerekir. Örneğin şekildeki blokta her türlü parametrik çeşitlilikte korunması gereken nod sayısının (8 olarak alınması) ve konumlarının da yine sabit konumlara dağıtılması bu standardı sağlamak üzere uygulanmıştır. Bağlantı nodları şeklinde

adlandırılabilir bu nodlar, sonlu elemanlarla ayrıklaştırılmış bir kabuk yapısındaki elemanlarda olduğu gibi 6 adet serbestlik derecesine sahiptirler.

Global olarak sistemin verilen yük durumu ve sınır şartları doğrultusunda konumlanacağı denge konfigürasyonunu alt blokları yalıtılarak inceleyelim. Her bir kesişim noktasını denge konumunda bir mesnet aracılığıyla sabitlemesi durumunda, blokların bu yeni sınır şartı kullanılarak ayrı ayrı analizinde, denge durumundan ötürü o noktada oluşacak reaksiyon kuvvetleri her kesişim için toplamı 0 olur. Sistemin denge noktasını bulmak, bağlantı noktalarının toplamda 6 farklı serbestlikleri de düşünüldüğünde, nokta sayısı X serbestlik derecesi kadar değişkene sahip bir fonksiyonun 0 verdiği noktayı bulmak anlamına gelmektedir. Parametre sayısının artması çözümü gittikçe zorlaşan bir optimizasyon problemini doğurur.

Bu bölümde tezin bel kemiğini oluşturan işte bu optimizasyon problemini çözümünün ölçekten bağımsız bir şekilde nasıl gerçekleştirileceği bulunacaktır.

4.1 Ayrıştırma algoritması

Şekilde görülen stifnerli panellerden oluşan sistemde panellerin birleştiği kenarda bulunan kesişim nodlarını ele alalım. Sistemi yüklü denge durumunda düşündüğümüzde ve panellerden birini yalıtığımızda panelin sahip olduğu bağlantı nodlarına bu denge durumunda komşu panellerdeki komşu noddan bir reaksiyon kuvvet/momenti etki etmektedir. Aynı şekilde komşu paneldeki o noda da ilk durumda yalıtığımız panelin nodundan ters yönlü bir reaksiyon kuvvet/momenti etki etmektedir. Dolayısıyla denge durumunda bu noktada iki panelin uyguladığı kuvvet ve moment toplamı 0 olmaktadır.

Eğer herhangi bir bağlantı nodunu denge konumundan doğrusal veya açısal olarak yer değişikliği yapılırsa 0'dan farklı olan ve "artık kuvvet/moment" dediğimiz geri çağırıcı bir etki ortaya çıkacaktır. İlk tespitimiz bu bağlamda geri çağırıcı bu etkiyi konuma veya doğrultuya bağlı olarak değişen bir fonksiyon olarak düşünürsek, bu fonksiyon monoton bir fonksiyondur. Yani herhangi bir yönde yer değişikliği yapılırsa bu bir artık kuvvet yaratacaktır ve denge durumuna doğru yaklaştıkça bu kuvvet azalacaktır. Denge noktası geçildiğinde de önceki artık kuvvet/momentle ters işaretli ve gittikçe artan bir artık kuvvet ortaya çıkacaktır.

$$f_i(x_i^t + \lambda \cdot \text{sgn}(f_i(x_i^t, x_j^t)), x_j^t) = 0 \quad (\exists \lambda > 0) \quad (4.1)$$

burada f artık kuvvet/moment, x yer değiştirme, t iterasyon numarası, i bağlantı noktası numarası, j 'ye etki eden bağlantı noktası numarasıdır. Bu ifade öyle bir λ değeri vardır ki, geri çağırıcı kuvvetin işareti yönünde mevcut konumdan bir değişiklik yapıldığında artık kuvvet/moment 0 olacaktır. Diğer bir deyişle, "lokal olarak sadece bir bağlantı noktası için komşu bağlantı noktaları sabit tutulduğunda o nokta için artık kuvveti/momenti 0 yapacak bir konum bulunmaktadır" anlamına gelir.

$$\text{sgn}(f) \cdot f(x_i + \text{sgn}(f) \cdot \xi) < \text{sgn}(f) \cdot f(x_i) \quad (\forall \xi > 0) \quad (4.2)$$

burada ξ güncelleme miktarıdır. Bu eşitsizlik de, oluşan artık kuvvet/momentin işaretinin tersi işarete bir yer değişikliği ya reaksiyonu azaltacaktır ya da denge noktasının geçilerek, gittikçe artan bir ters reaksiyon oluşturacağını ifade eder. Şu ana kadar yapılan tespitler, lokal bağlantı noktalarının komşu noktalarının sabit olduğu durumlar için geçerlidir. Şimdi algoritmanın global olarak çalışmasını sağlayan adımlara geçelim.

$$\xi^{t+1} = \xi^t \cdot c \quad \text{where} \quad c = \begin{cases} c_p & f^{t+1} \cdot f^t > 0 \\ c_m & f^{t+1} \cdot f^t < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

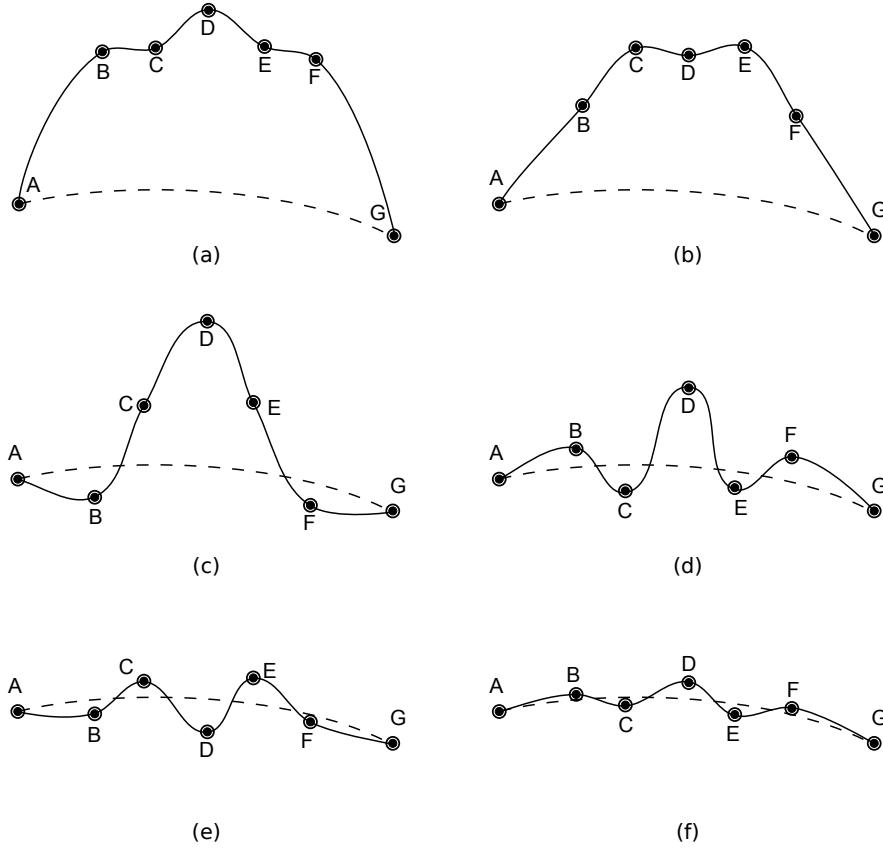
$$c_p > 1,0 \quad 0.0 < c_m < 1.0 \quad c_m > \frac{1.0}{c_p} \quad (4.4)$$

Burada ifade edilmek istenen, güncelleme miktarının her adımda hızı belirleyen bir c katsayısıyla değiştirilmesi gerektiğidir. Bu c katsayısının iki iterasyondaki artık kuvvetin/momentin işaretinin aynı kaldığı durumlarda 1'den büyük olması yani güncellemenin artış yönünde olması; aksi takdirde 0 ile 1 arasında yani denge noktasına yaklaşıldığı için hızın azaltılması yönünde değişikliğe gidilir.

c_m 'nin c_p 'ye göre verilmiş eşitsizlik ise büyütme katsayısının küçültme katsayısına nazaran fazla olması durumunda algoritmanın kararsız bir hale gelebilme riskinden ötürü oluşturulmuştur.

$$\Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} f_i^t = 0 \quad (4.5)$$

Bu şekilde yapılan bir güncelleme, iterasyon sayısı sonsuza gittiğinde artık kuvvet/moment fonksiyonunun 0'a yakınsayacağını ifade eder.



Şekil 4.2 : Algoritmanın çalışma prensibi.

Algoritmanın çalışma prensibinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 4.2'de görülen örnek oluşturuldu. Bu örnekte düz çizgi olarak algoritmanın ara bir iterasyon adımıdaki olası bir konfigürasyonu gösterilmiştir. Kesikli çizgi olarak gösterilen ise asıl denge konumunu göstermektedir. B ile F arasında kesikli çizgiden de görüldüğü gibi düzgün bir eğrinin geçmesi beklenmektedir. Fakat bu durum yerel olarak D noktası tarafından bozulmaktadır. Dolayısıyla biz D noktasının, C ve E noktalarına göre sapmış konumunu düzeltmek üzere geri çağırıcı bir artık kuvvetin oluşacağını beklemekteyiz. Bu kuvvet güncelleme kat sayısını arttırarak D'yi C ve E noktalarına yaklaştıracaktır. Yaklaşma gerçekleştiğinde C-E sınırını geçtiğinde geri çağırıcı kuvvetin işareti de değişeceğinden, güncelleme kat sayısında azaltıcı bir değişikliğe gidilecektir. Diğer bir deyişle D'nin hızında bir azalma oluşacaktır. Fakat D'nin bu yakınsama durumu, o bölgeye özel olacağından ötürü global konuma yakınsamadığı görülmektedir.

Diğer taraftan B ve F noktaları da A 'yı G'ye birleştiren eğriye yakınsamaya zorlanacaklardır ve kesikli çizgiye yaklaştıkça hızları artacaklardır. Her ne kadar D, C-E arasına gelip yavaşladıysa da, B ve F noktalarındaki hız artışı C ve E noktalarına da sirayet edecek, C ve E noktalarındaki bu değişim de D'deki yavaşlamayı tekrar hız artışına çevirecektir.

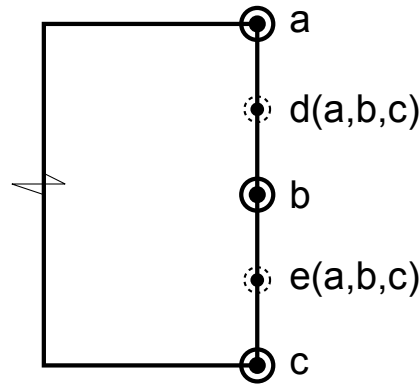
Bu şekilde bütün noktalar kesikli eğriye yaklaşmalarıyla güncelleme kat sayılarının azalması ve global denge konumuna yakınsama beklenmektedir.

4.2 Kenar İnterpolasyonu

Bu algoritma oluşturulurken yapı taşı bloklarının sahip olduğu bağlantı sayısı sabit alınmıştır. Bunun birinci sebebi farklı sayıdaki noktalara sahip panellerin ayrı ayrı değerlendirilmesiyle oluşturulacak istatistiki model için gerekli veri sayısı ve eğitim aşamasındaki zorluk her bir kombinasyonla katlanmaktadır.

Bir diğer sebep de paneller arasındaki farkın arayüzleri oluşturan kenarlarda problem olarak yansımalarına engel olmaktır.

Sabit bağlantı noktalarının kullanılması, bahsedilen problemleri çözmekte fakat başka problemlere sebep olmaktadır. Paneller her ne kadar basit tutulmak istense de stifner sayısı veya kenarlara yakın bölgelerde bulunan delikler gibi bir çok farklı nedenle kısıtlı sayıdaki bağlantı noktası o kenarın davranışını çok iyi bir şekilde temsil edememesine sebep olacaktır. Bu nedenle aradaki nodları da işin içine katmak gerekir. Fakat böyle bir durumda da komşu panellerde lokal olarak farklı durumlar yaşandığından aynı bağlantı noktaları komşu panellerde farklı davranışlar gösterecektir.



Şekil 4.3 : Kenar interpolasyonu.

Bu problemi çözmek için Şekil 4.3'te görülen yaklaşım kullanılmıştır. Kenar interpolasyonu olarak isimlendirilen bu yaklaşımda bağlantı nodları panelin ana serbestliklerini temsil etmektedir. Geriye kalan ara noktalar da bağlantı noktalarının serbestlikleri üzerinden tanımlanırlar. Örneğin şekildeki D noktası a,b ve c'nin serbestliklerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir.

Veri üretimi safhasında kullanılacak olan ve kısıt denklemleri adı verilen bir yöntemle ara noktaların serbestlikleri, bağlantı noktalarının serbestlikleri cinsinden doğrusal bir denklem olarak ifade edilip sonlu elemanlar çözümüne eklenir.

Örneğe dönecek olursak d noktasındaki herhangi bir serbestliği temsilen, a noktası 0 ve c noktası 1 olarak kabul edildiğinde, a,b ve c'deki serbestlikler ve d'nin 0 ile 1 arası konumu (Şekil 4.3'teki d noktası için bu değer 0.25) göz önüne alındığında ortaya çıkan interpolasyon polinomu aşağıdaki gibidir.

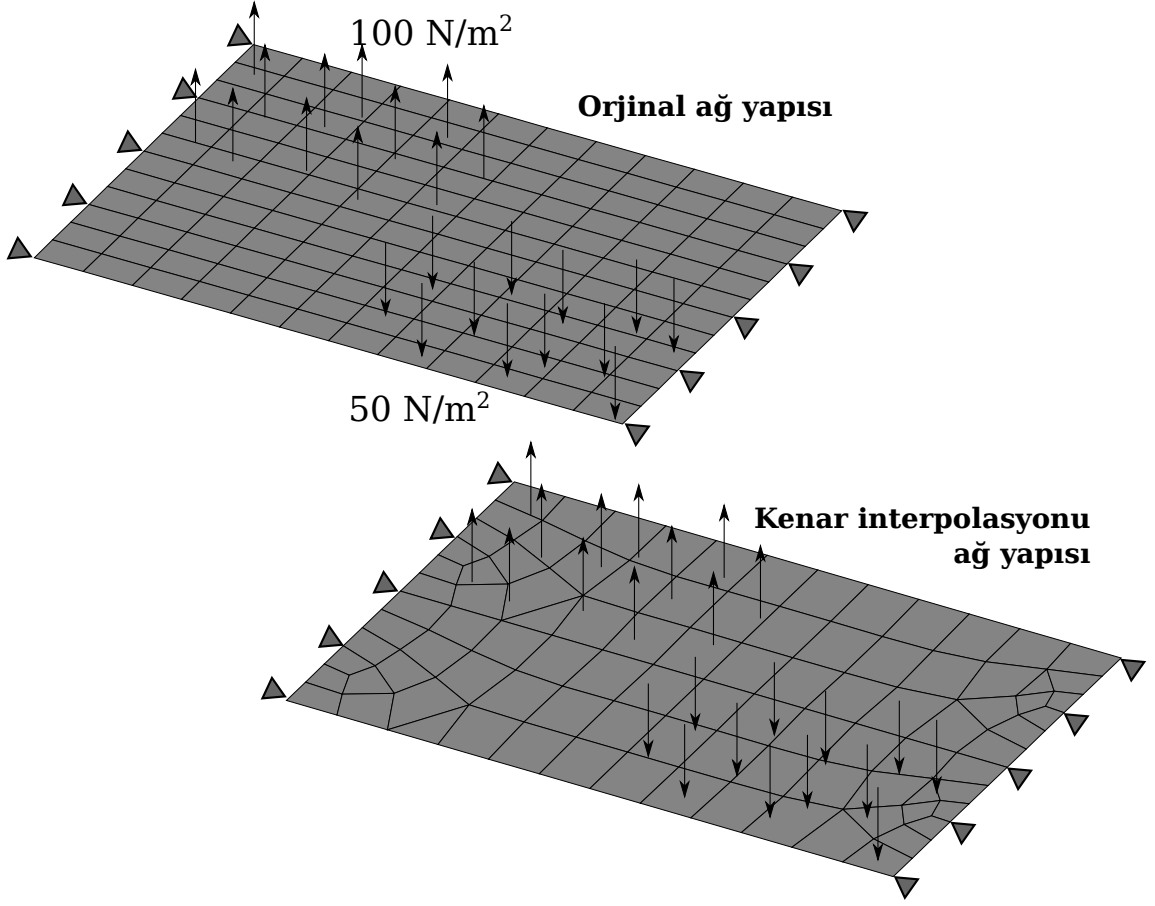
$$p_3(x) = a(1 - 3x + 2x^2) + b(4x - 4x^2) + c(-x + 2x^2) \quad (4.6)$$

4 ve 5 noktalı interpolasyon polinomları da aşağıdaki gibidir.

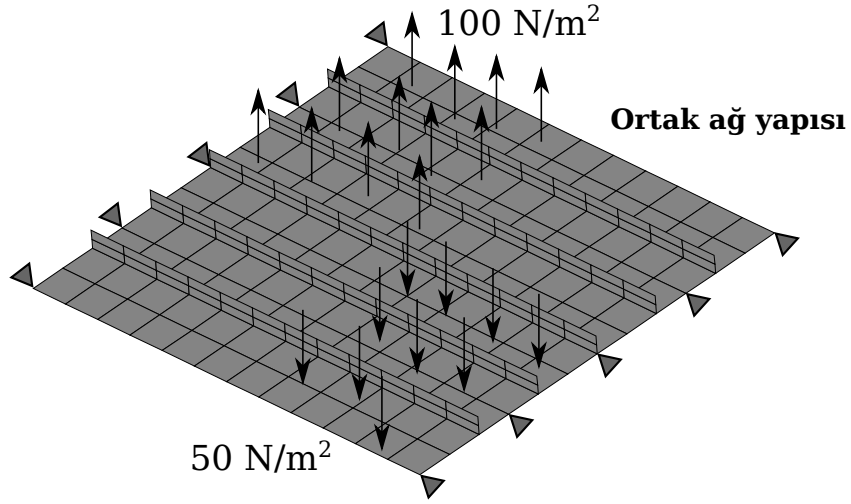
$$p_4(x) = a(1 - 5.5x + 9x^2 - 4.5x^3) + b(9x - 22.5x^2 + 13.5x^3) + c(-4.5x + 18x^2 - 13.5x^3) + d(x - 4.5x^2 + 4.5x^3) \quad (4.7)$$

$$p_5(x) = a(1 - 8.333x + 23.333x^2 - 26.667x^3 + 10.667x^4) + b(16x - 69.333x^2 + 96x^3 - 42.667x^4) + c(-12x + 76x^2 - 128x^3 + 64x^4) + d(5.333x - 37.333x^2 + 74.667x^3 - 42.667x^4) + e(-x + 7.333x^2 - 16x^3 + 10.667x^4) \quad (4.8)$$

Kenar interpolasyonunun, kenarda kullanılacak olan bağlantı sayısının artmasıyla daha iyi bir yakınlık derecesiyle temsil edebileceğini beklemekteyiz. Bu doğrultuda, düz bir panel (Şekil 4.4) ile 5 adet stifnere sahip başka bir panel (Şekil 4.5), 3, 4 ve 5 adet bağlantı noktasına sahip olacak şekilde düzenlenmiş ve kenar interpolasyonu varlığı ile oluşan hata miktarları hesaplanmıştır. Düzlemsel panelde hata miktarı 3 bağlantı noktası için bile az olduğundan 4 ve 5 adet bağlantı noktasıyla deneme yapılmamıştır. 5 stifnerli panelde ise hata miktarları nokta sayısındaki artışla orantılı olarak azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4 : Düzlem panel testi.

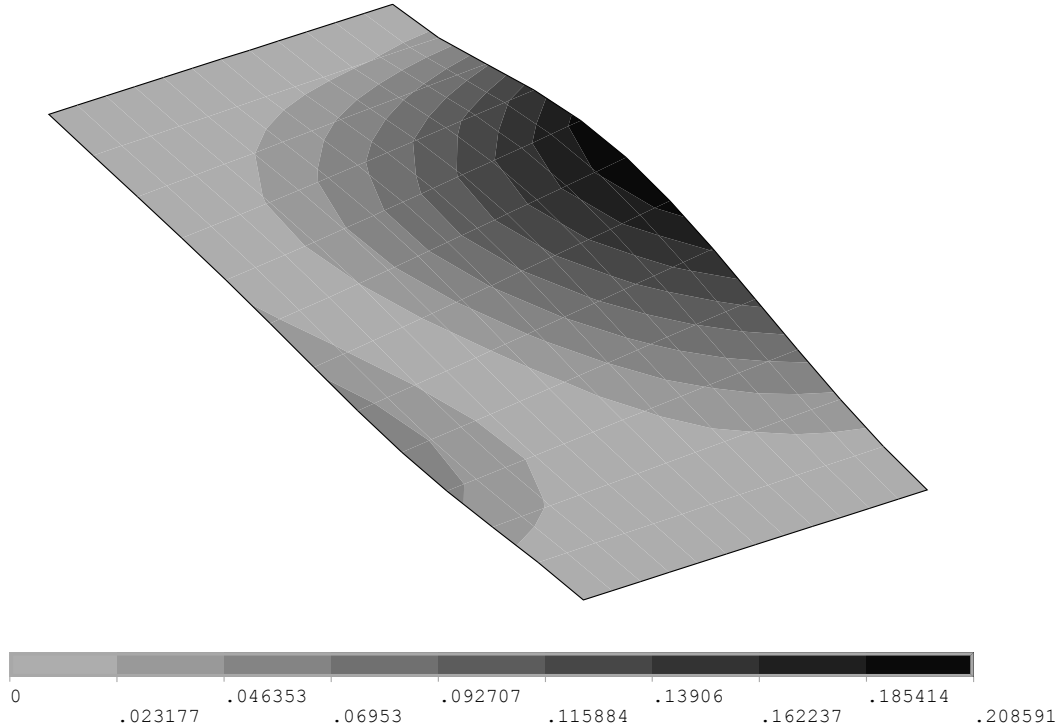


Şekil 4.5 : Stifnerli panel testi.

Sonuçlar Çizelge 4.1’de hata yüzdesi olarak ve yerdeğişirmeleri gösteren grafikler Şekil 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11’de görülmektedir. Buna göre z, z doğrultusunda maksimum yer değişirmeyi; x, x eksenini etrafında maksimum dönmeyi; v ise maksimum Von-Mises gerilme değerini göstermektedir.

Çizelge 4.1 : Farklı kenar interpolasyonları için hata yüzdeleri

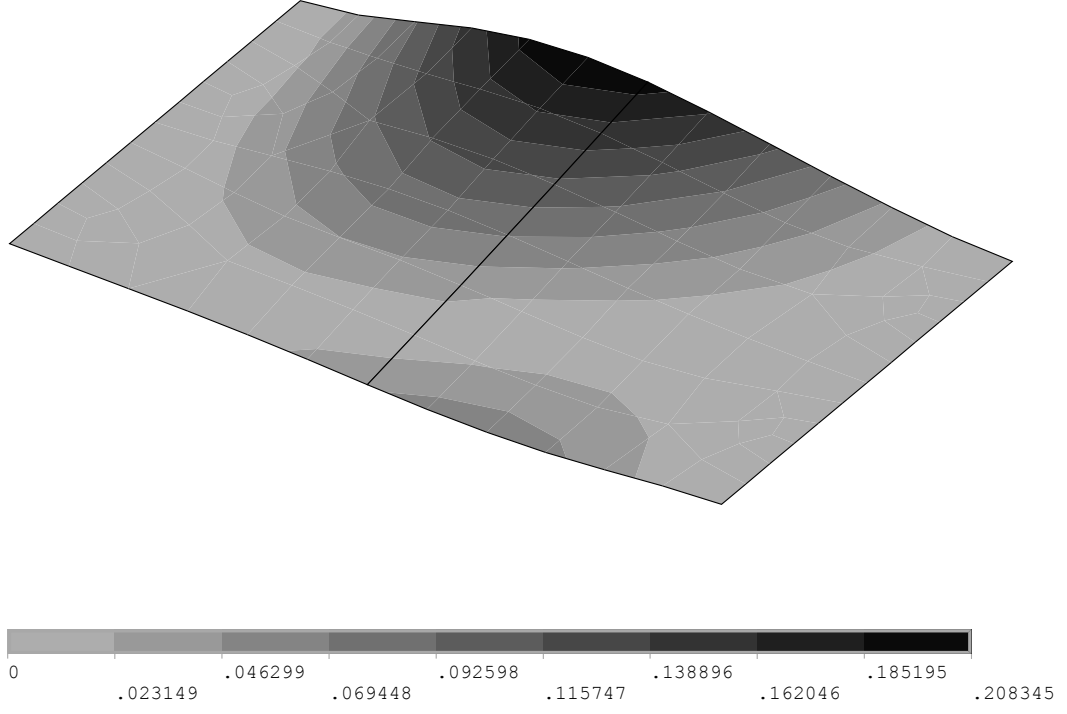
Panel Tipi	3 Bağlantı Nodu	4 Bağlantı Nodu	5 Bağlantı Nodu
Z - Düzlem panel	0.12	-	-
Z - 5 stifnerli panel	26.96	13.11	6.51
X - Düzlem panel	1.83	-	-
X - 5 stifnerli panel	29.56	19.13	11.54
V - Düzlem panel	0.24	-	-
V - 5 stifnerli panel	8.13	3.096	1.32



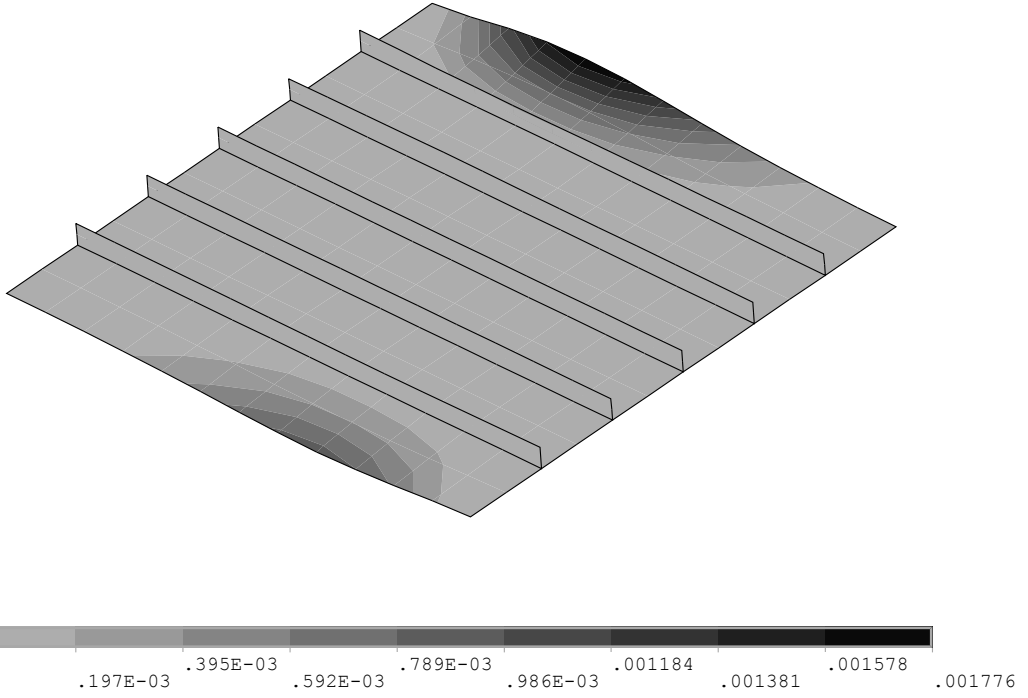
Şekil 4.6 : Düzlem panel toplam yer değiştirme (orijinal).

Dikkat edilmesi gereken bir diğer konu da paneldeki geometrinin karmaşıklığının artmasıyla ihtiyaç duyulan bağlantı sayısının artmasıdır. Bu doğrultuda panelin modeli oluşturulmadan önce en uygun bağlantı noktası sayısının belirlenmesi gerekmektedir.

Ayrıca örneğin paneldeki stifner sayısının belli bir miktarın üzerinde olması durumunda, birden fazla panelle gösterilip gösterilmemesi de verim açısından değerlendirilmelidir. Bu nedenle model için böyle karmaşıklık sağlayabilecek bileşenler için bir üst limit belirlenmelidir.



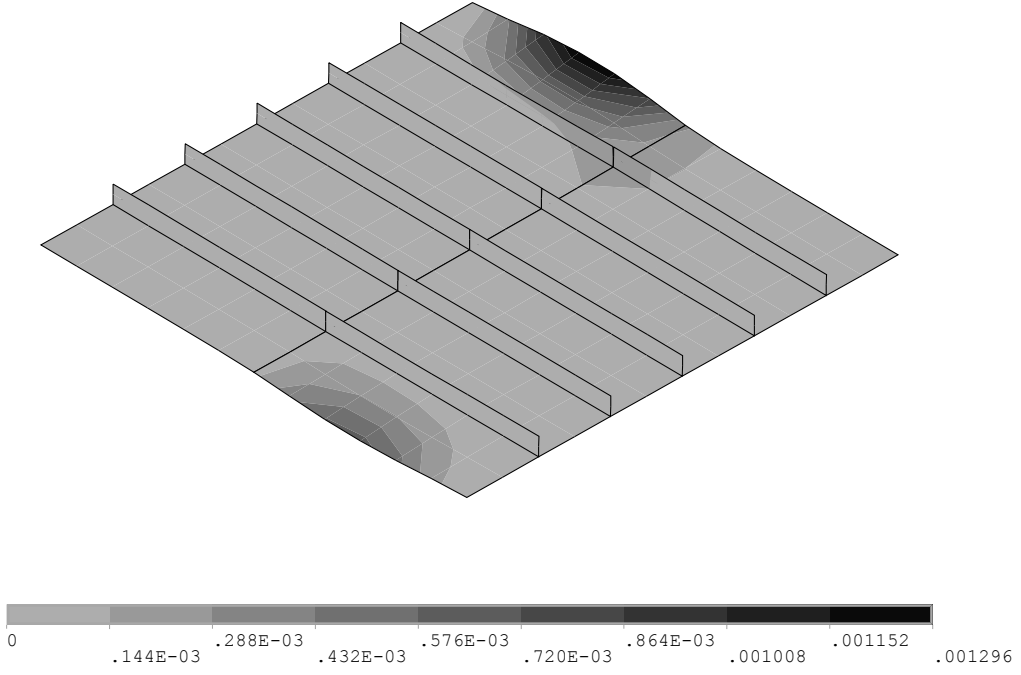
Şekil 4.7 : Düzlem panel toplam yer değıştirme (3 noktalı kenar interpolasyonu).



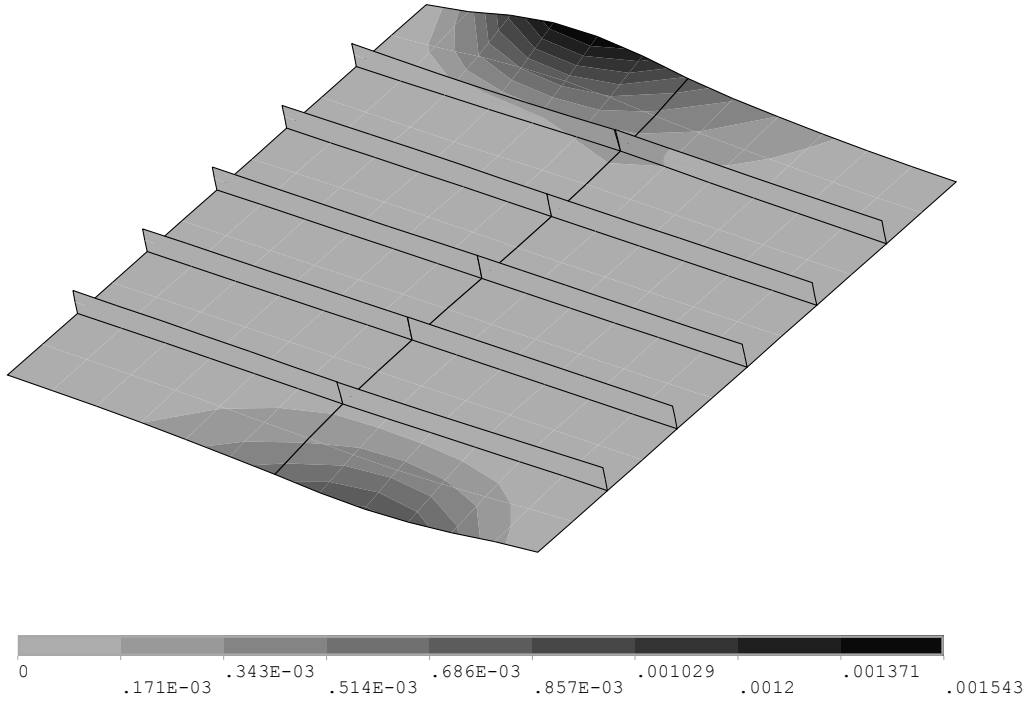
Şekil 4.8 : Stifnerli panel toplam yer değıştirme (orijinal).

4.3 Bünye, Denge ve Uygunluk

Yöntem her ne kadar diferansiyel denklemleri doğrudan kullanmasa da, katı mekaniğinin 3 önemli prensibi olan denge, bünye ve uygunluk kavramlarına tamamen

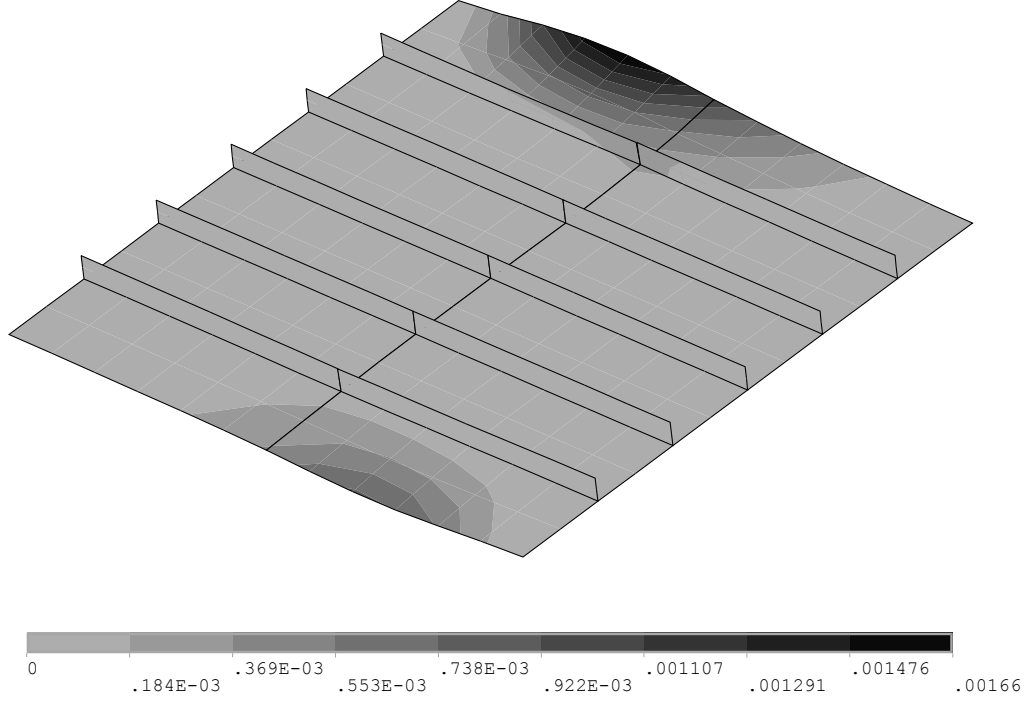


Şekil 4.9 : Stifnerli panel toplam yer değıştirme (3 noktalı kenar interpolasyonu).



Şekil 4.10 : Stifnerli panel toplam yer değıştirme (4 noktalı kenar interpolasyonu).

uymaktadır. Katı mekaniğinin 3 önemli prensibi olan denge, bünye ve uygunluk kavramları bu yöntem her ne kadar diferansiyel denklemleri doğrudan kullanmasa da, bu 3 prensibe tamamen uymaktadır.



Şekil 4.11 : Stifnerli panel toplam yer değıştirme (5 noktalı kenar interpolasyonu).

Bünye kavramı modelin malzeme, geometri ve yük parametreleri kullanılarak oluşturulan verilerle temsil edilmektedir. Bünye denklemi, istatistik model seviyesinde sağlanmaktadır.

Ayrıklaştırılmış panel sisteminde, bağlantı noktalarının birbirine karşı olan reaksiyonlarının vektörel toplamlarının 0 olduğu konum global denge konumu olduğu için denge denklemi de sağlanmaktadır. Diğer bir deyişle ayrıştırma algoritmasının denge araması, denge denklemini sağlamak üzeredir.

Uygunluk denklemleri de 3 farklı düzeyde sistemde kullanılmaktadır. İlk olarak panel seviyesinde oluşturulan modelde veriler yine uygunluğun sağlandığı simülasyon çözümlerinden elde edildiği için blok içerisinde otomatik olarak uygunluk şartları sağlanmaktadır.

Bunun dışında bağlantı noktalarının 6 adet serbestliği, o noktayı kullanan her panel için tek olması sebebiyle, doğrusal veya açısız yer değıştirmeler süreklilik göstereceğinden yine geçiş anlamında bir uygunluk bu noktalar için sağlanacaktır.

Son olarak bir önceki durumda bağlantı noktalarında sağlanan uygunluk, kalan diğer noktalarda da kenar interpolasyonu sayesinde, o arayüzdeki tüm noktalar için aynı yer değıştirmelere neden olacağından ötürü uygunluk şartları sağlanacaktır.

4.4 Kuvvet Dönüşümü

Algoritmanın çalışma prensibi gereği, aynı anda çok farklı ölçeklerde eş zamanlı arama yapılması gerekmektedir. Güncelleme katsayısının değeriyle çok kuvvetli değişimler yaratmadan, etkisinin yer değiştirmenin büyüklüğünden bağımsız olmasını sağlamak gerekmektedir. Bu sayede güncellemeler, denge problemi yaratmadan hızlıca etki gösterecektir.

İstatistikte bu gibi problemlerin önüne geçilebilmesi için dönüşüm yöntemleri kullanılmaktadır [121]. Bu çalışmada aşağıda belirtilen dönüşüm fonksiyonu kullanılmıştır.

$$\text{transform}(x, \lambda) = \begin{cases} x^\lambda & x > 0 \\ -|x| & x < 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

Bu fonksiyona göre verinin 0'dan büyük ve küçük olması durumları için verinin işaretini koruyacak şekilde iki parça halinde tanımlı olan bu fonksiyonda kuvvet (λ) olarak 0 ile 1 arasında bir değer uygulanmaktadır.

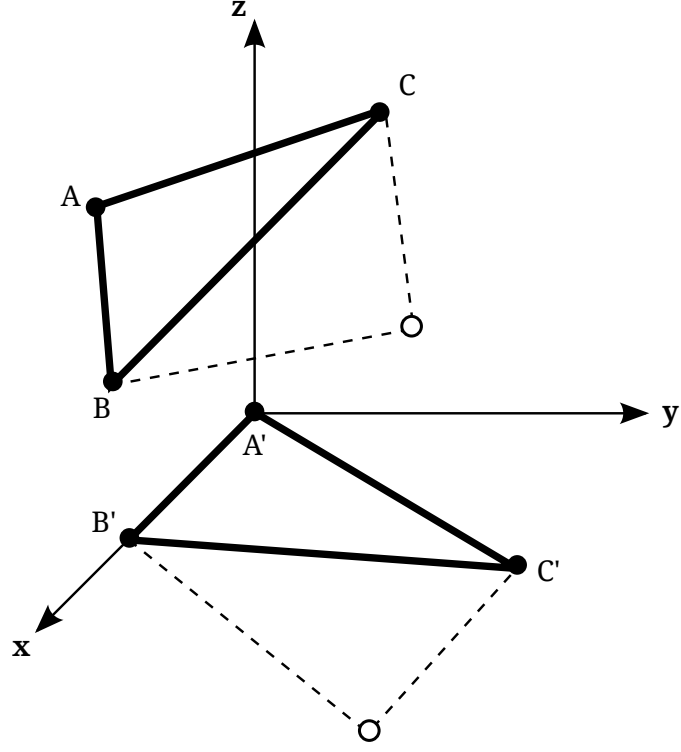
Sonraki bölümde ele alınacak örnek uygulamalarda bu λ değeri 0.15 olarak alınmıştır.

4.5 Afın Dönüşüm

Şu ana kadar panel bloğunun istatistiksel modellenmesi ile ilgili bir çok konudan bahsedildi. Bunlardan biri de parametrelerinden olan serbestlik dereceleriydi. Serbestlik dereceleri, diğer parametrelerde olduğu gibi örnekleme toplamadan önce taranacak sınırların belli olmasını gerektirir. Panel, hem serbest cisim hareketi, hem de şekil değiştirme serbestliğine sahip olduğu için bu durum hem taranacak uzayın büyümesine sebep olmakta, hem de normalde bağlantı noktası sayısı X serbestlik derecesi kadar ihtiyacımız olandan fazla sayıda parametre kullanımına sebep olmaktadır.

Bu duruma çözüm olarak afin dönüşüm adı verilen geometrik bir dönüşüm yöntemi önerilmektedir. Bu dönüşüm sonucunda doğru çizgiler doğru kalır ve bir doğrultuda yer alan noktaların mesafelerinin oranı sabit kalır.

Şekil 4.12'de bir üçgen gözükmektedir. Bu üçgen aslında istatistik modeli kurulacak panelin herhangi üç noktasını temsil etmektedir. Eğer biz bu üçgene yine şekilde



Şekil 4.12 : Afin dönüşüm.

görülen adımlardan oluşan ve sonunda üçgeni bir düzleme yatırmayı hedefleyen dönüşümleri uygularsak, aynı modelde sadece şekil değiştirmeleri dikkate alıp, serbest cisim hareketinden kaynaklı ekstra bilgilerden de modeli arındırmış oluruz. Bunu gerçekleştirebilmek için gerekli dönüşüm:

1. A noktasının orijine taşınması
2. B'nin z eksenini etrafında döndürülüp xz düzlemine oturtulması
3. B'nin y eksenini etrafında döndürülüp xy düzlemine oturtulması
4. Ve son olarak C'nin x eksenini etrafında döndürülüp xy düzlemine oturtulması

aşamalarından oluşmaktadır. Bu işlemler sonucunda A noktasından 3, B noktasından 2 ve C noktasından 1 serbestlik olmak üzere toplam 6 serbestlik azalmış olur. Bu dönüşüm sonrasında artık bütün bağlantı noktalarındaki hareketler sadece şekil değiştirmeye dönük gerçekleşir.

4.6 Algoritmanın Özeti

Şu ana kadar algoritmanın genel çalışma mantığından bahsedildi. Bu başlık altında da adım adım elimizde hazır bir istatistiki model bulunduğunda, ayrıklaştırılmış sistemin denge noktasını nasıl bulacağımızı inceleyeceğiz. Algoritmamız kısaca şu adımlardan oluşmaktadır:

1. A noktasının orijine taşınması
2. Başlangıç yer değiştirmeleri olarak bütün bağlantı noktaları için 0 veya küçük bir değer atanır
3. Başlangıç güncelleme katsayıları her bağlantı noktası ve karşılık gelen serbestlik değeri için küçük bir değer olarak atanır.
4. Verilen yükleme durumları için her panel ayrı ayrı analiz edilir. Analiz sonucunda bu bağlantı noktalarında elde edilen mesnet reaksiyonları olan kuvvet/momentler buradan alınır
5. Bir bağlantı noktasında kesişen her panel için, bir önceki adımda elde edilen reaksiyonlar toplanarak, her serbestlik için birer adet artık reaksiyon elde edilir.
6. Tahmini yer deşirmeler elde edilen bu artık reaksiyonların işaretine göre güncelleme kat sayıları eklenerek veya çıkarılarak güncellenir.
7. İkinci iterasyondan başlanarak güncelleme katsayıları aşağıdaki gibi güncellenir
 - (a) eğer reaksiyon kuvvet/momentlerinde bir işaret değişikliği gerçekleşmemişse, güncelleme kat sayısı arttırılır
 - (b) gerçekleşmişse azaltılır
8. Bir yakınsama kriteri sağlanana kadar 3. adıma geri dön

Yukarıda verilen bu adımların yanı sıra, yer değiştirme değerleri güncelleme işleminden önce kuvvet dönüşümüne tabii tutulurlar. Güncelleme yapıldıktan sonra da geri dönüşüm uygulanır.

5. UYGULAMALAR

Ayrıklaştırma algoritması aslında artık kuvvet/momentin geri çağırıcı etkisinin kullanımı ve önceki iterasyonda elde edilen duruma göre bir nevi momentum etkisini katmaktan ibarettir. Fakat böylesine basit gözükken bir yöntemin, çok fazla sayıda bağlantı noktası ve bunların etkileşimlerinin eş zamanlı olması nedeniyle çok karmaşık bir davranış göstermektedir.

Bu bölümde algoritmanın performansı 3 değişik ölçekteki örnek üzerinde gözlenecektir. Ama daha önce algoritmanın test edildiği test yatağıyla ilgili bilgi verilecektir.

5.1 Sonlu Elemanlar Test Yatağı

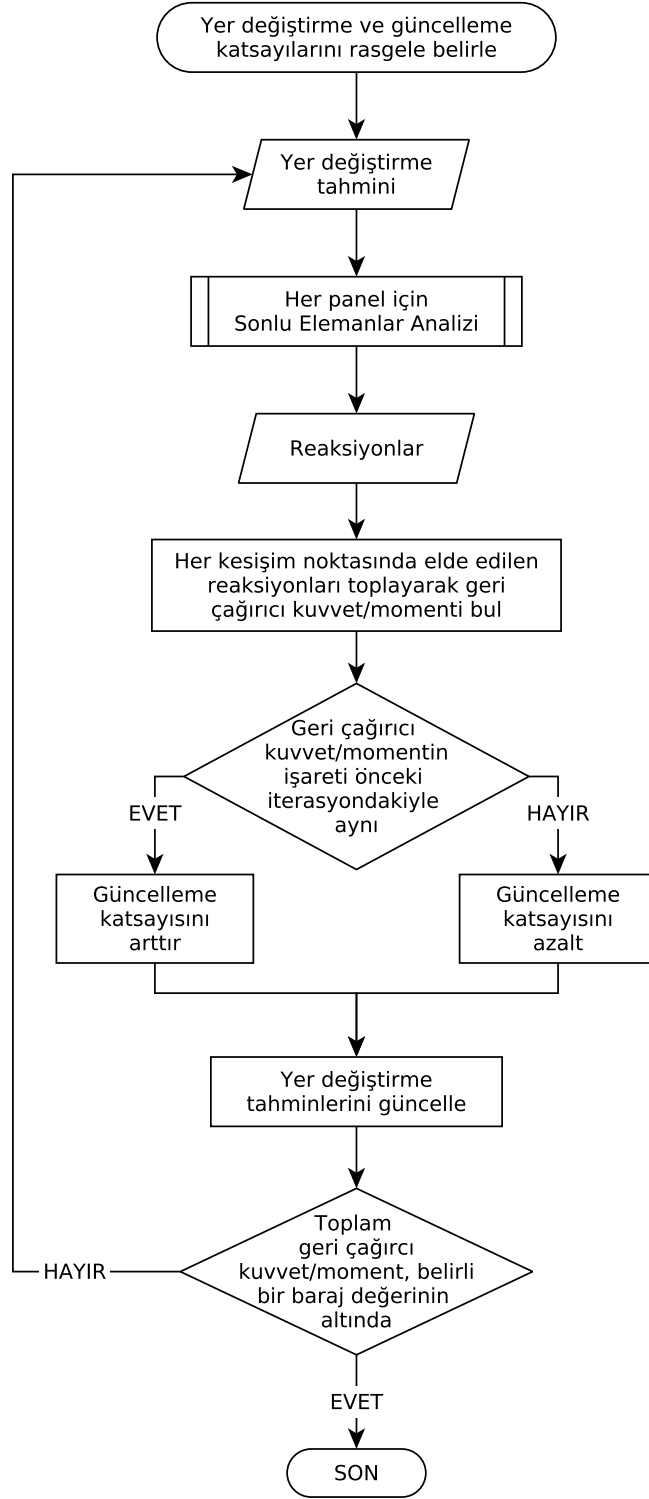
Yapı taşı bloğunun davranışını modelleyecek olan yaklaşık modelin oluşturulması başlı başına bir çalışma konusudur. Diğer taraftan ayrıklaştırma algoritmasının çalıştığı test edilmesi için bu modele ihtiyaç duymaktadır.

Bu çalışmada modeli oluşturmadan da test yapılabilmesi için yaklaşık model yerine, onu oluşturmak için gerekli veriyi üreten yani asıl referans model olan sonlu elemanlar alt yapısı kullanılacaktır. Buna göre örnek uygulamalar sonlu elemanlara göre geometri ve mesh uygulamaları gerçekleştirilecek, algoritma iterasyonlarında reaksiyon kuvvet/moment değerleri algoritmanın gönderdiği verilerin sonlu elemanlarda işlenmesiyle üretilecektir. Kullanılan test yatağının yapısını göstermek üzere hazırlanan akış diyagramı Şekil 5.1'de görülmektedir.

Sonlu elemanlar sonuçları, yaklaşık modelin üretebileceği en iyi sonuçlar olduğu için, algoritmanın performansının üst limiti de bu yolla belirlenmiş olacaktır.

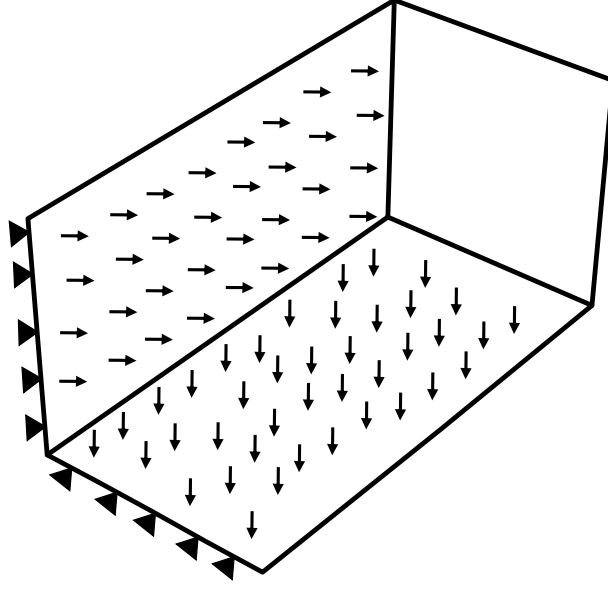
5.2 3, 9 ve 25 Panelli Test Yapıları

Algoritmanın yakınsamasını ve ölçekten bağımsız olduğunun gösterimi için 3 adet örnek uygulama hazırlandı. Şekil 5.2'de görülen birinci örnek stifnersiz ve 3 adet panelden oluşmaktadır. Sisteme yükler eksantrik olarak uygulanmıştır.



Şekil 5.1 : Test yatağı akış diyagramı.

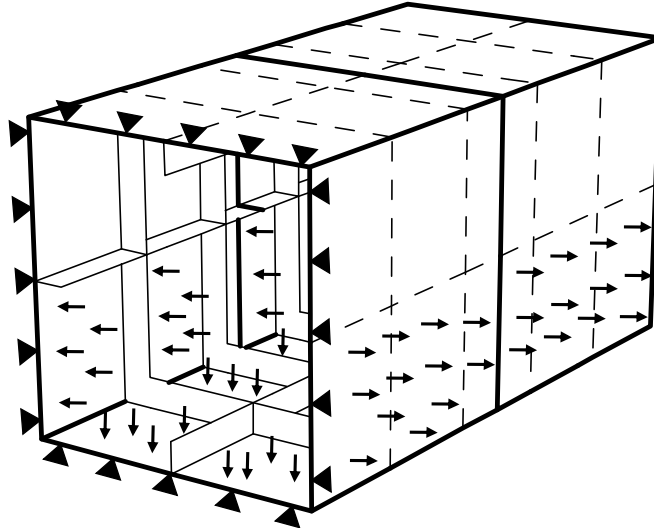
İkinci ¼rnek (Şekil 5.6) 9 adet panelden oluşmaktadır. Y¼kler i y¼zeylerden ve simetrik olarak uygulanmıştır. Panellerde stifner kullanılmış olup bu stifnerler panel orta eksenlerine g¼re asimetriktir.



Şekil 5.2 : 3 panelli örnek.

Çizelge 5.1 : 3 panelli örnek problem parametreleri.

Özellik	Değer
Kalıp genişlik	1 m
Kalıp uzunluk	2 m
Kalıp yükseklik	1 m
Panel levha kalınlığı	5 mm
Yatay yük	2000 N/m ²
Düşey yük	5000 N/m ²



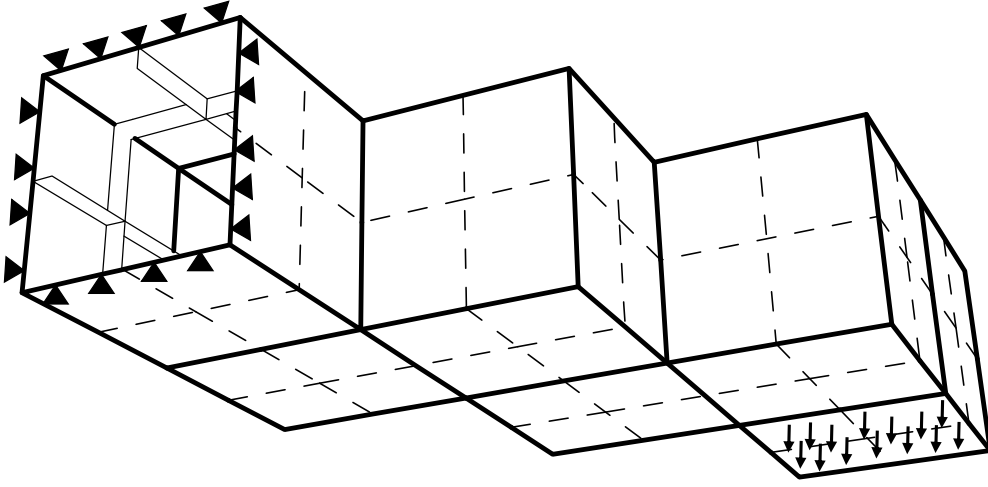
Şekil 5.3 : 9 panelli örnek.

Son olarak oluşturulan büyük ölçekli uygulama 25 adet panelden oluşmaktadır (Şekil 5.7). Birinci örekte olduğu gibi hem yapı geometrisi, hem de uygulanan yük de

Çizelge 5.2 : 9 panelli örnek problem parametreleri.

Özellik	Değer
Kalıp genişlik	1 m
Kalıp uzunluk	2 m
Kalıp yükseklik	1 m
Panel levha kalınlığı	5 mm
Stifner yüksekliği	0.1 m
Yük	10000 N/m ²

buna bağlı olarak simetrik değildir. Stifnerler bu örnekte panellerin tam ortasından geçmektedir.



Şekil 5.4 : 25 panelli örnek.

Çizelge 5.3 : 25 panelli örnek problem parametreleri.

Özellik	Değer
Kalıp genişlik	3 m
Kalıp uzunluk	4 m
Kalıp yükseklik	1 m
Panel levha kalınlığı	10 mm
Stifner yüksekliği	0.1 m
Yük	10000 N/m ²

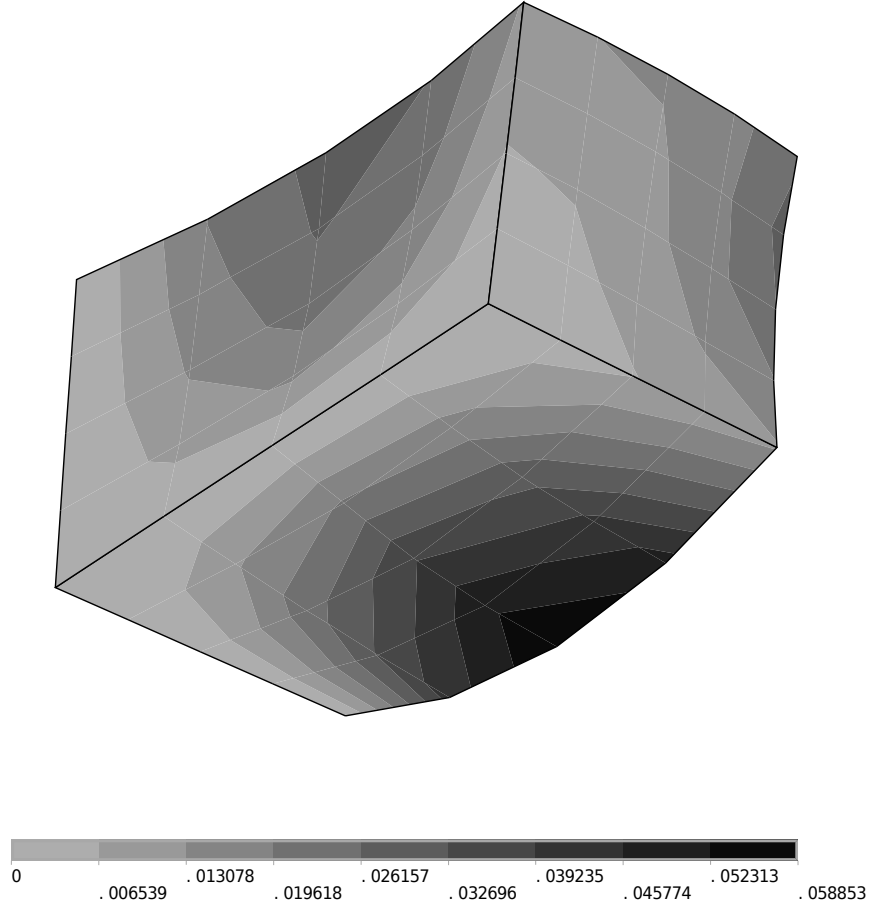
3 örnekte de panellerin arayüz kenarları 3 bağlantı noktasına sahip olup, kenar üzerinde yer alan diğer nodlar kenar interpolasyonu ile hesaba dahil edilmişlerdir.

Algoritma parametreleri her 3 örnekte de Çizelge 5.4'te görüldüğü gibi aynı alınmışlardır. 3, 9 ve 25 panelli örneklerin problem parametreleri sırasıyla Çizelge 5.1, 5.2, 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 : Algoritma parametreleri.

Özellik	Değer
Maksimum başlangıç yer değiştirme	1e-5 m
Maksimum başlangıç güncelleme katsayısı	1e-2 m
Güncelleme katsayısı artış oranı	1.1
Güncelleme katsayısı indirim oranı	0.9
Kuvvet dönüşümü katsayısı	0.15

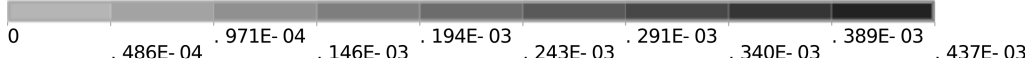
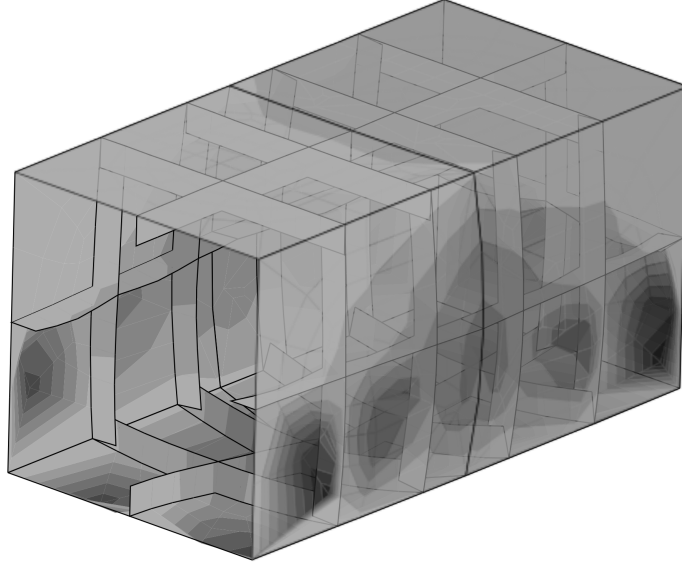
3 yapının da bağlantı nodlarından bağlı ve kenar interpolasyonlu halde analizi sonucunda elde edilen toplam yer değiştirme grafikleri Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7'de görülmektedir.



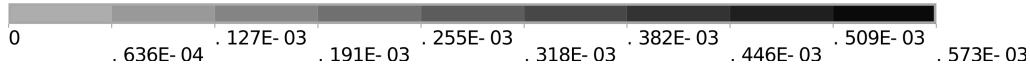
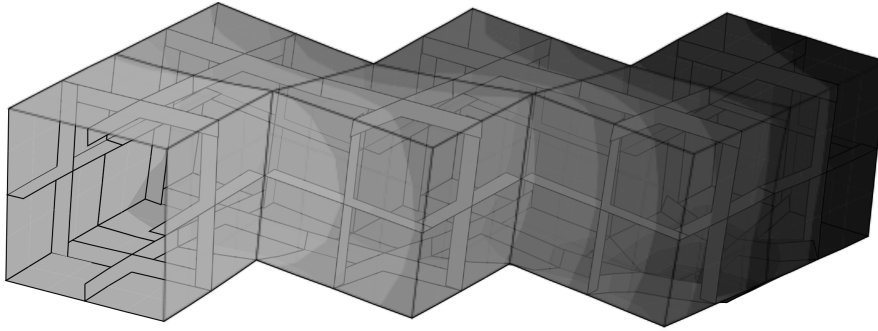
Şekil 5.5 : Toplam yer değiştirme (3 panel).

5.3 Sonuçlar

Sonuçlar 3 farklı özellik için grafik olarak gösterilmektedir. Bu sonuçlar aslında her bağlantı noktası ve karşılık gelen her serbestlik derecesi için ayrı ayrı hesaplandığı halde, en genel perspektifle durumun irdelenebilmesi için sistemi temsilen ortalama ve +/- 1 standart sapma değerleri algoritmanın ilerlemesine göre gösterilmektedir.

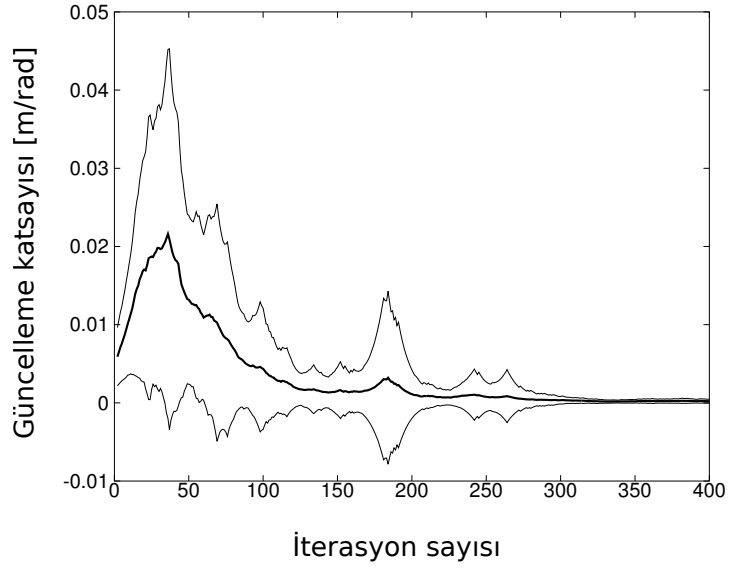


Şekil 5.6 : Toplam yer değiştirme (9 panel).

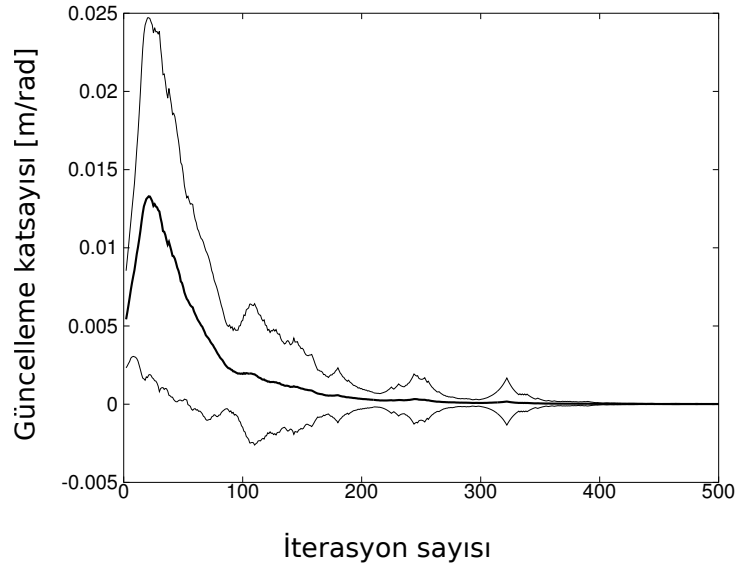


Şekil 5.7 : Toplam yer değiştirme (25 panel).

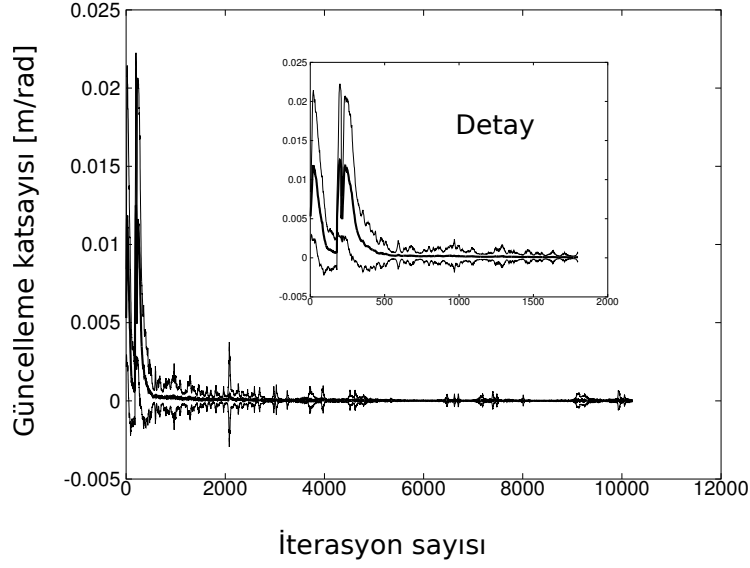
İlk sonuç grafiklerimiz güncelleme katsayısına aittir (Şekil 5.8, 5.9, 5.10). Bu grafiklerde gözlemlenen ortak durum, başlangıçta küçük değerler alan katsayı, denge konumuna uzak olduğundan giderek artan bir davranış göstermektedir. Daha sonra bağlantı noktaları denge konumunu bir bir geğmesiyle, güncelleme katsayılarına da otomatik olarak indirim uygulanmakta ve bu durum zirve noktasiyla görülebilmektedir.



Şekil 5.8 : Güncelleme katsayısı (3 panel).



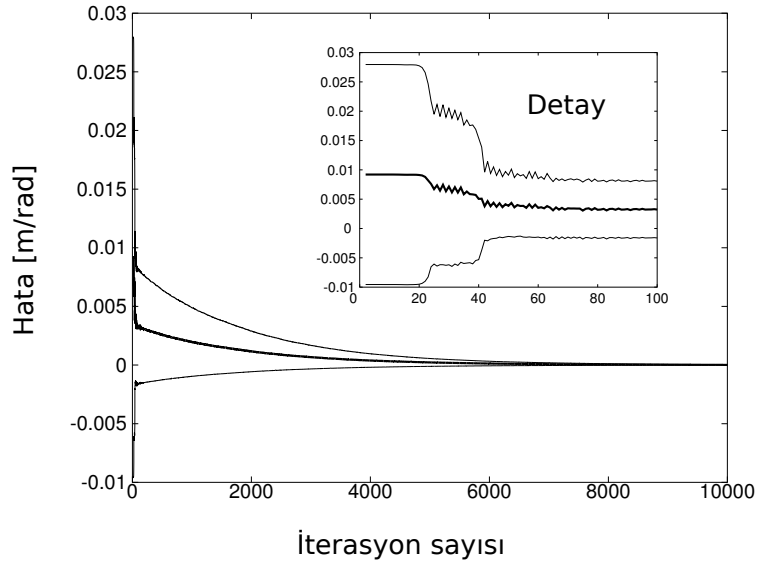
Şekil 5.9 : Güncelleme katsayısı (9 panel).



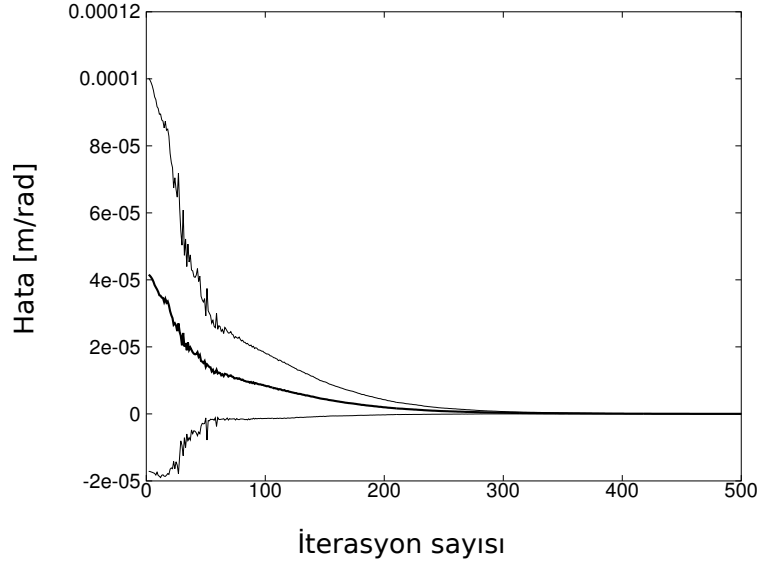
Şekil 5.10 : Güncelleme katsayısı (25 panel).

Her ne kadar lokal ölçekte salınımlar gözlemlense de yer değiştirmelerdeki hatayı gösteren grafiklerde (Şekil 5.11, 5.12, 5.13) görülmektedir ki algoritma global olarak yakınsamaktadır. Hata miktarı ortalama değerlerin %2'lik bandına 3 panelli örnekte 5385 adımda, 9 panelli örnekte 292 adımda ve 25 panelli örnekte 9618 adımda giriş yapmaktadır.

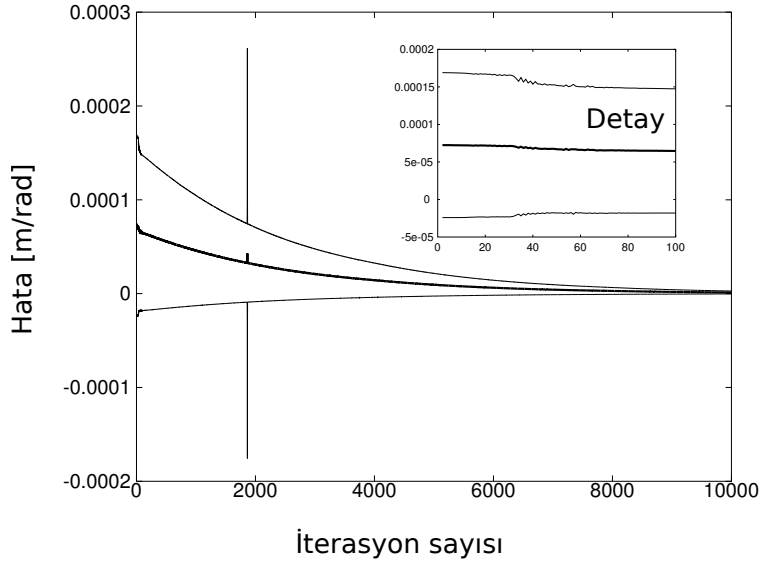
Bu sonuçlar ölçek artışı ile yakınsama için gerekli adım sayısı arasında bir ilişki olmadığını göstermektedir. 3 ve 25 panelli örnekteki yavaş yakınsama, yüklerin ve geometrinin eksantrik olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.11 : Yer değiştirme hata (3 panel).

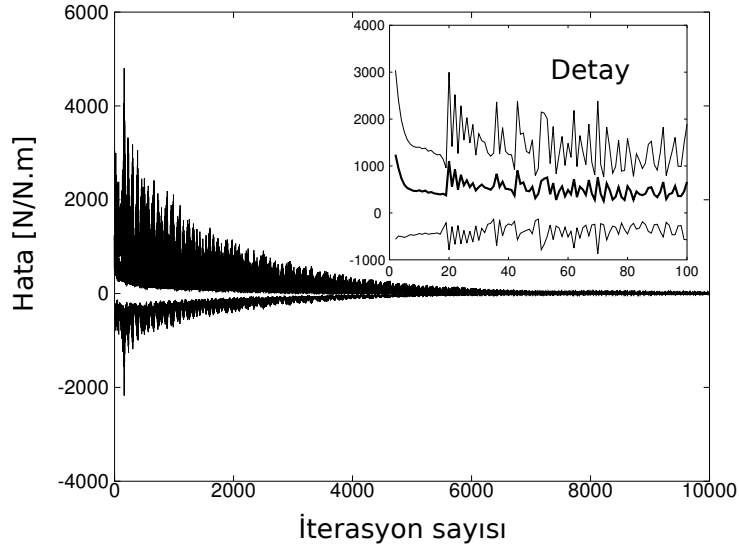


Şekil 5.12 : Yer değiştirme hata (9 panel).

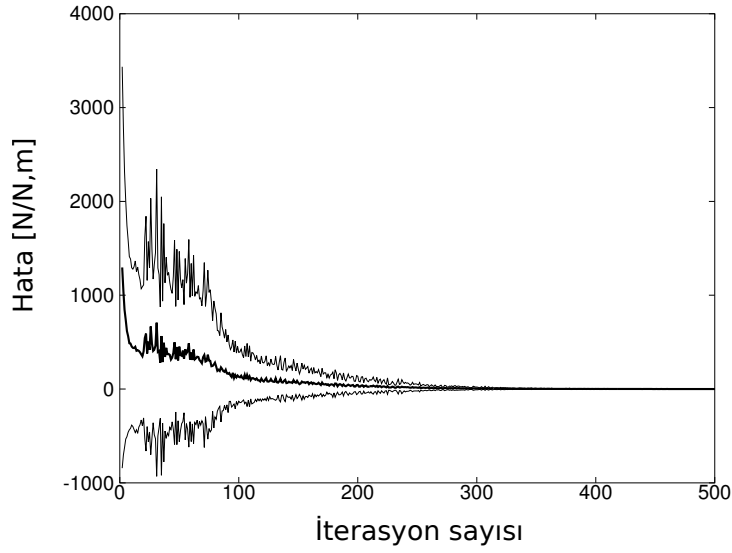


Şekil 5.13 : Yer değiştirme hata (25 panel).

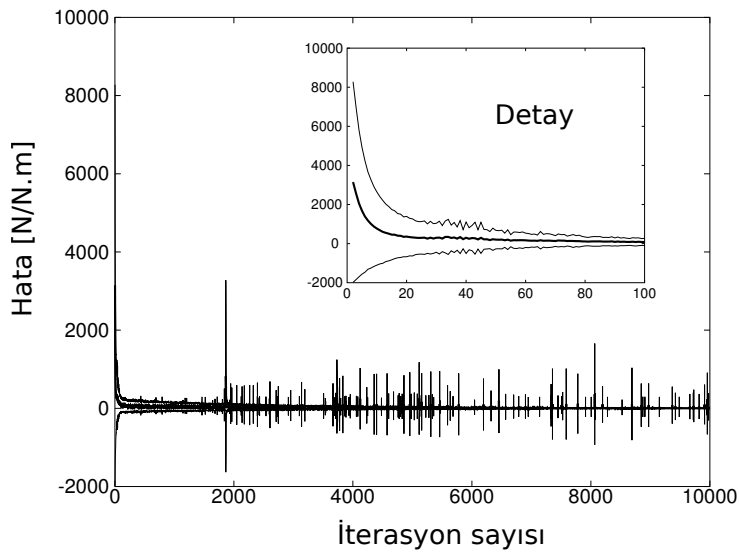
Son olarak artık kuvvet/moment değerlerini gösteren grafikler gösterilmiştir (Şekil 5.14, 5.15, 5.16). Aralarda yine salınım görülmesine karşın algoritmanın yakınsaması görülebilmektedir. Normal düzen dışında arada süreksiz olarak görülen sıra dışı değerler de algoritmanın kararlı davranışını etkilememektedir.



Şekil 5.14 : Artık kuvvet/moment (3 panel).



Şekil 5.15 : Artık kuvvet/moment (9 panel).



Şekil 5.16 : Artık kuvvet/moment (25 panel).

6. HASSASLIK ANALİZİ

Algoritmanın 5 adet parametresine göre hassaslık analizi yapılmıştır. Maliyetli bir analiz olduğundan ve genellikle algoritmanın karakteri ilk 150-200 adımda belli olduğu için, deneyler ilk 200 adım sonucunda oluşan artık kuvvet moment değerler toplamına göre yapılmıştır. Bu analize göre:

- Önce parametrelerin, örnek simülasyonlarda kullanılan nominal değerleri etrafında uygun limitler belirlendi
- Daha sonra bu limitler dahilinde deney dizaynı yapıldı
- Rastgele parametrelerin etkilerini de hesaba katmak üzere simülasyonlar tekrarlı olarak yapıldı
- Sonuçlar için kuadratik bir regresyon modeli oluşturuldu.

Analizle ilgili detaylar, ardından sonuç değerlendirmeleri verilecektir.

6.1 Analiz hakkında

Hassaslık analizi yapmak üzere algoritmanın 5 adet parametresi aşağıdaki gibidir:

- *incr (A)*: Güncelleme artım katsayısı. Son iki adımda artık kuvvet/momentlerin işaretinin aynı olması durumunda güncelleme katsayısına yapılacak artım miktarını gösterir.
- *decr (B)*: Güncelleme indirim katsayısı. Son iki adımda artık kuvvet/momentlerin işaretinin farklı olması durumunda güncelleme katsayısına yapılacak indirim miktarını gösterir.
- *init_disp (C)*: Başlangıç yer değiştirme üst sınırı. Bu parametreye göre, her bağlantı noktasının 6 serbestliği için ayrı ayrı, rastgele üretilen başlangıç yer değiştirme değerlerinin üst sınırıdır.

- *init_cst (D)*: Başlangıç güncelleme katsayısı üst sınırı. Bu parametreye göre, her bağlantı noktasının 6 serbestliği için ayrı ayrı, rastgele üretilen başlangıç güncelleme katsayısı değerlerinin üst sınırıdır.
- *pwr (E)*: Kuvvet dönüşümü parametresi. Verilere uygulanacak olan kuvvet dönüşümünde kullanılan sabit kuvvet değeri.

Parantez içindeki harfler, regresyon polinomu oluştururken, parametre ismi yerine kullanılacaktır.

Aşağıda algoritma parametrelerinin nominal ve sınır değerleri Çizelge 6.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 6.1 : Hassaslık analizi parametreleri.

Parametre	Nominal Değer	Alt Sınır	Üst Sınır
incr	1.1	1.05	1.7
decr	0.9	0.1	0.95
init_disp	1e-5	0	1e-5
init_cst	1e-2	0	1e-2
pwr	0.15	0.05	0.90

decr değeri 1/incr değerinden küçük olması gerektiğinden, alt ve üst sınır değerleri, 1/incr’ye çarpan olarak uygulandığında elde edilen bağıl sınırlar alınmıştır. Örneğin 0.95 değeri aslında 0.95(1/incr) değerine karşılık gelir.

Deney dizaynı oluşturmak üzere, [122] çalışmasında sunulan optimum latin hiper küp (LHS) tekniği kullanılmıştır. Toplamda 5 parametre için 100 optimum LHS deney üretilmiştir.

“init_disp” ve “init_cst” parametreleri, farklı başlangıç şartlarının etkilerini gözleyebilmek adına rastgele değişken olarak kullanılmıştır. Bu rastgele etkileri de görebilmek için her bir deney 25 defa tekrarlanmış ve tekrarlardaki durumu incelemek üzere her deney ortalama ve standart sapma için ayrı ayrı regresyon analizine tabi tutulmuşlardır.

6.2 Ortalama İçin Regresyon

Ortalama için yapılan 5 değişkenli kuadratik regresyon sonucunda oluşturulan model:

$$f(A, B, C, D, E) = (-2.337 \times 10^{-10} + 3.944 \times 10^{-10} A + 6.552 \times 10^{-10} B - 2.546 \times 10^{-6} C + 5.147 \times 10^{-9} D + 1.696 \times 10^{-10} E - 1.584 \times 10^{-10} A^2 - 2.831 \times 10^{-10} B^2 -$$

$$4.243 \times 10^{-10} E^2 - 3.183 \times 10^{-10} A B + 1.875 \times 10^{-10} A E + 1.122 \times 10^{-5} B C - 1.879 \times 10^{-8} D E)^{-\frac{1}{2.6}}$$

şeklinde bulunmuştur. Bağımlı değişken olan ortalama değerine uygulanan dönüşüm parametresi -2.6 için Box [121] kullanılmıştır. Burada dönüşüm yapma gerekçesi, cevap değişkeni tahminlerindeki hatanın varyansının düzgün hale gelmesini sağlamaktır.

Regresyon sonuç özeti Çizelge 6.2’de görülmektedir.

Çizelge 6.2 : Ortalama regresyon özeti.

	Tahmin	Std.Hata	t-değeri	Olasılık(> t)
(Kesişim)	-2.337e-10	2.057e-10	-1.136	0.259341
V1	3.944e-10	2.735e-10	1.442	0.153199
V2	6.552e-10	1.721e-10	3.807	0.000274
V3	-2.546e-06	2.196e-06	-1.159	0.249772
V4	5.147e-09	2.102e-09	2.448	0.016543
V5	1.696e-10	8.837e-11	1.919	0.058535
V1 ²	-1.584e-10	9.220e-11	-1.718	0.089606
V2 ²	-2.831e-10	8.483e-11	-3.337	0.001285
V5 ²	-4.243e-10	4.939e-11	-8.592	5.56e-13
V1 V2	-3.183e-10	9.120e-11	-3.490	0.000788
V1 V5	1.875e-10	5.872e-11	3.194	0.002009
V2 V3	1.122e-05	5.076e-06	2.210	0.029983
V4 V5	-1.879e-08	3.980e-09	-4.723	9.79e-06

Artık standart hata: 2.349e-11 80 serbestlik derecesinde(SD)

Çoklu R-kare: 0.8039 Ayarlanmış R-kare: 0.7745

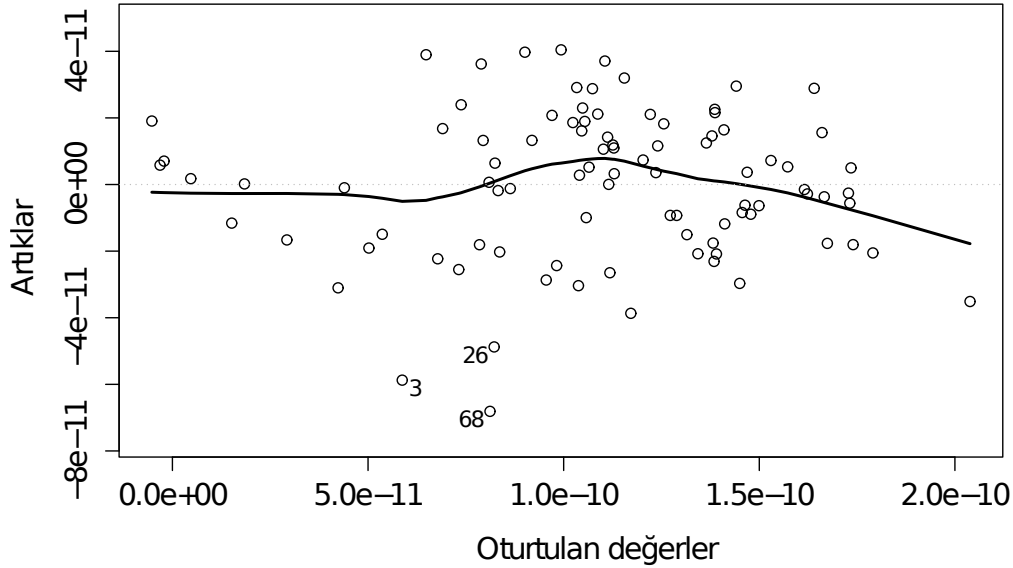
F-istatistiği: 27.33 12 and 80 SD p-değeri: < 2.2e-16

Regresyona ait ANOVA çizelgesi de şöyledir (Çizelge 6.3) :

Bu sonuçlara göre model istatistiki olarak anlamlıdır. Şekil 6.1’de hata değerlerinin oturtulan değerlere bağlı olarak grafiği görülmektedir. Burada sınırlar dışında rasgele olmayan bir düzen görülmemektedir. Sınırlardaki sıkıntı da, simülasyonun 200 gibi, bazı istisnai durumlarda erken sayılabilecek bir adımda, durdurulması olduğu düşünülmektedir. Hatanın normalliği kabulü için oluşturulan ve Şekil 6.2’de görülen grafikte de doğru üzerinde dikkate değer bir sapma görülmediğinden yapılan kabul teyit edilebilir.

Çizelge 6.3 : Ortalama regresyon ANOVA.

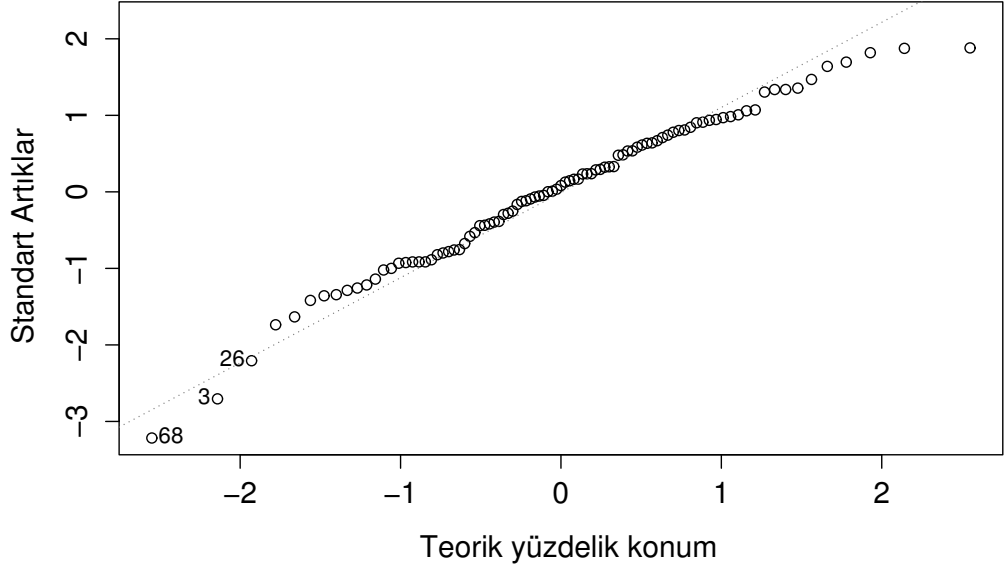
	SD	Toplam-kare	Ortalama-kare	F-değeri	Olasılık(>F)
V1	1	2.1309e-20	2.1309e-20	38.6278	2.180e-08
V2	1	1.6052e-20	1.6052e-20	29.0982	6.814e-07
V3	1	8.3050e-21	8.3050e-21	15.0556	0.0002133
V4	1	2.1742e-20	2.1742e-20	39.4138	1.663e-08
V5	1	3.7199e-20	3.7199e-20	67.4323	3.110e-12
V1 ²	1	2.8640e-21	2.8640e-21	5.1918	0.0253598
V2 ²	1	2.0060e-21	2.0060e-21	3.6370	0.0600967
V5 ²	1	4.4152e-20	4.4152e-20	80.0368	1.120e-13
V1 V2	1	7.2200e-21	7.2200e-21	13.0880	0.0005188
V1 V5	1	2.4350e-21	2.4350e-21	4.4139	0.0387949
V2 V3	1	5.3320e-21	5.3320e-21	9.6664	0.0025994
V4 V5	1	1.2303e-20	1.2303e-20	22.3023	9.788e-06
Artıklar	80	4.4132e-20	5.5200e-22		



Şekil 6.1 : Ortalama regresyonu hata dağılımı.

Oluşturulan bu modelin yeterli yaklaşıklıkla durumu temsil ettiği kabulüyle 3 parametrenin nominal değeri kullanılıp kalan iki parametreye bağlı olarak ortalama değerleri kontur grafik olarak EK-B’de listelenmiştir.

Grafiklerden de görüldüğü üzere verilen tanım aralıkları dahilinde ortalama değerlerde çok fazla bir değişim gözlemlenmemiştir.



Şekil 6.2 : Ortalama regresyonu hata normal dağılımı.

6.3 Standart Sapma İçin Regresyon

Rastgele değişken olan başlangıç parametrelerinin etkilerini gözlemlemek üzere tekrar edilen deney sonuçlarının standart sapma değerleri için de regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan kuadratik model: $f(A, B, C, D, E) = (-2.499 \times 10^{-3} + 2.179 \times 10^{-2} A + 8.275 \times 10^{-2} B - 1.263 \times 10^3 C + 1.391 D + 2.381 \times 10^{-2} E - 1.128 \times 10^{-2} A^2 - 4.514 \times 10^{-2} B^2 - 6.163 \times 10^{-2} E^2 - 3.714 \times 10^{-2} A B + 2.903 \times 10^{-2} A E + 1.974 \times 10^3 B C + 1.203 \times 10^3 C E - 3.986 D E)^{-\frac{1}{0.35}}$

şeklinindedir. Regresyon sonuç özeti Çizelge 6.4'te yer almaktadır.

Çizelge 6.4 : Standart sapma regresyon özeti.

	Tahmin	Std.Hata	t-değeri	Olasılık(> t)
(Kesişim)	-2.499e-03	3.779e-02	-0.066	0.947455
V1	2.179e-02	5.034e-02	0.433	0.666323
V2	8.275e-02	3.167e-02	2.613	0.010800
V3	-1.263e+03	5.188e+02	-2.434	0.017231
V4	1.391e+00	3.974e-01	3.501	0.000774
V5	2.381e-02	1.636e-02	1.456	0.149536
V1 ²	-1.128e-02	1.697e-02	-0.665	0.508208
V2 ²	-4.514e-02	1.575e-02	-2.866	0.005359
V5 ²	-6.163e-02	9.468e-03	-6.510	6.94e-09
V1 V2	-3.714e-02	1.674e-02	-2.218	0.029505
V1 V5	2.903e-02	1.119e-02	2.594	0.011341
V2 V3	1.974e+03	9.403e+02	2.099	0.039080
V3 V5	1.203e+03	7.049e+02	1.707	0.091796
V4 V5	-3.986e+00	7.567e-01	-5.267	1.22e-06

Artık standart hata: 0.004306 77 serbestlik derecesinde(SD)

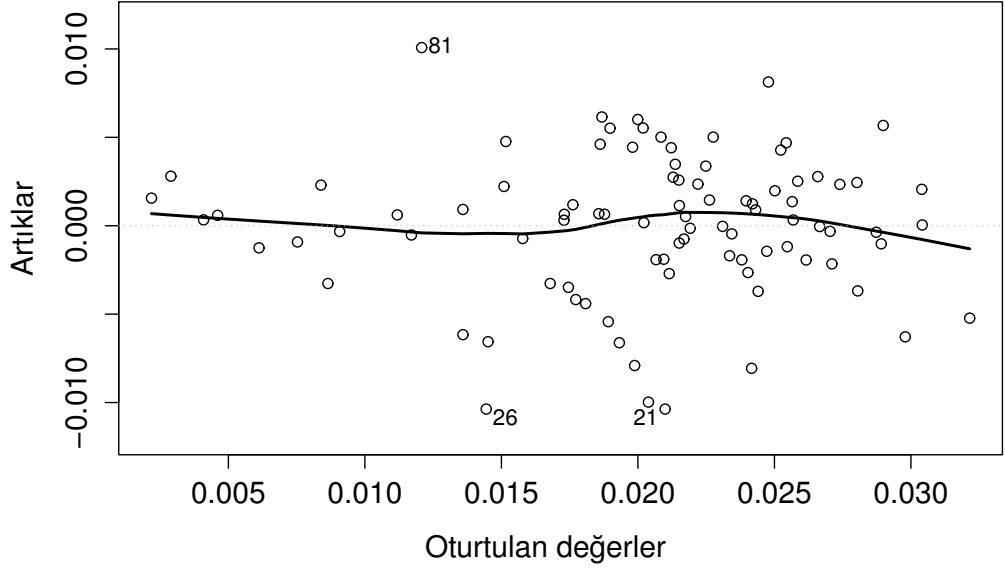
Çoklu R-kare: 0.7301 Ayarlanmış R-kare: 0.6845

F-istatistiği: 16.02 13 and 77 SD p-değeri: < 2.2e-16

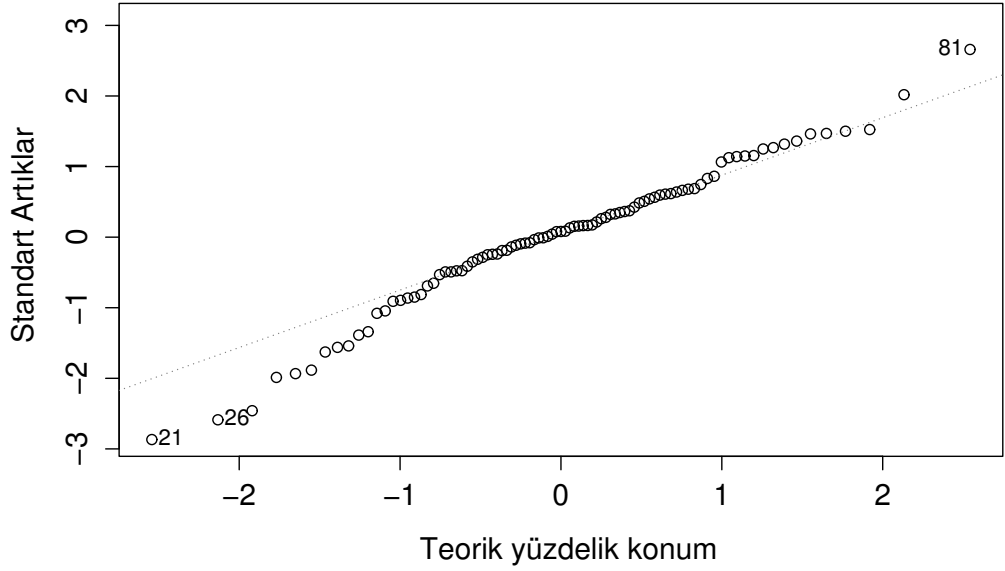
ve regresyonun ANOVA çizelgesi de Çizelge 6.5'te görülmektedir.

Çizelge 6.5 : Standart sapma regresyon ANOVA.

	SD	Toplam-kare	Ortalama-kare	F-değeri	Olasılık(>F)
V1	1	0.00032681	0.00032681	17.6262	7.149e-05
V2	1	0.00023332	0.00023332	12.5837	0.0006663
V3	1	0.00008750	0.00008750	4.7194	0.0329019
V4	1	0.00046125	0.00046125	24.8771	3.687e-06
V5	1	0.00058092	0.00058092	31.3317	3.205e-07
V1 ²	1	0.00006919	0.00006919	3.7319	0.0570618
V2 ²	1	0.00009275	0.00009275	5.0023	0.0282084
V5 ²	1	0.00104379	0.00104379	56.2960	9.155e-11
V1 V2	1	0.00009863	0.00009863	5.3198	0.0237752
V1 V5	1	0.00007098	0.00007098	3.8281	0.0540271
V2 V3	1	0.00018175	0.00018175	9.8025	0.0024632
V3 V5	1	0.00010078	0.00010078	5.4355	0.0223487
V4 V5	1	0.00051438	0.00051438	27.7426	1.221e-06
Artıklar	77	0.00142767	0.00001854		



Şekil 6.3 : Standart sapma regresyonu hata dağılımı.



Şekil 6.4 : Standart sapma regresyonu hata normal dağılımı.

Sekil 6.3 ve Şekil 6.4'te görüldüğü üzere hataların normal dağılımında olduğu kabulü oluşturulan model için yapılabilir. Ortalama için oluşturulan kontur grafikleri, standart sapma için de oluşturulmuş ve Ek C'de verilmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, dizayn optimizasyonu problemlerinde bilgisayar yükü problemini çözen vekil model yaklaşımının önündeki en büyük problemlerden biri olan “boyutluluğun laneti”, önerilen iki kritik hamle sayesinde, en azından statik gerilme analizi problemi için çözüme kavuşturulmuştur.

İlk olarak yapı taşı bloğu yaklaşımı ile problemden bağımsız bir genelliğe sahip vekil model oluşturma fikri ortaya konmuştur. Yapı taşı bloğu, dağıtık olarak yapılacak hesaplarda, model katsayıları problem içi bileşenlerde veya farklı problemlerde sabit kalacağından ötürü büyük avantaj sağlayacaktır.

İkinci olarak, büyük ölçekli bir problemin bu yapı taşlarından temsil edilmesi durumunda, yerel vekil model bilgilerinden, global davranışı tahmin etmek üzere kurulan ayrıklaştırma algoritması sayesinde de sistem tam anlamıyla çalışır duruma gelmiştir.

Sistemin yakınsaması örnek problemler üzerinden gözlemlenmiştir. Fakat akıllara bu yöntemin sonlu elemanlarla kıyasla ne derece bir kazanım sağlayacağı sorusu gelebilir. Vekil modeller, kendi başlarına denklem çözmek yerine, sonlu elemanlar modelinin temsil ettiği, parametre sayısının muazzam olduğu bir modeli istenildiği kadar az sayıda parametreye indirdiğinden, yapı taşı düzeyinde çok daha hızlı olduğu söylenebilir. Ayrıca vekil modeller paralel olarak çalıştırılacağı için geriye sadece iterasyon sayısı problemi kalmaktadır. Bu problem de kullanılan panel sayısından bağımsız olduğu örneklerden görüldüğü üzere, büyük ölçekli problemlerde sorun teşkil etmeyecektir.

7.1 Gelecek Çalışmalar

Bu tezin kapsamında, vekil modellere çok farklı bir bakış açısı getirildiği için, ancak çok kritik olan ayrıklaştırma algoritmasının çözümü gerçekleştirilmiştir. Yöntemin

tam anlamıyla uygulanabilmesi için gerekli diğer konular, iyileştirmeye açık durumlar ve olası ek çalışma alanları alt başlıklar halinde sunulmuştur.

7.1.1 Ayrıklaştırma algoritması

Her ne kadar örneklerle dayanıklı bir çözüm sistemi olduğu gösterilse de, algoritmanın iyileştirmeye açık olduğu aşikardır. Özellikle daha farklı problemler üzerinde de denemeler yapılarak çözüm önerileri geliştirilebilir.

7.1.2 Otomatik dizayn üretimi

Gerçek bir optimizasyon probleminde, analiz için bu tezdeki yaklaşım ve optimizasyon yöntemi olarak da bir çok seçenek bulunmaktadır. Fakat aday dizaynların, yapı taşı blokları üzerinden fizibil bir şekilde oluşturulduğu otomatik bir dizayn üretici mevcut değildir.

7.1.3 Kısıt metriği

Optimizasyon probleminde en önemli unsurların başında ve vekil modellerin genellikle kullanılma sebebi olan kısıtların iyi tanımlanması önemli sorundur. Yapı taşı bloğu seviyesinde ilk akla gelen maksimum gerilme veya yer değiştirme gibi kriterler, özellikle geometrinin gerçek hayattaki modelle birebir örtüşmemesinden ötürü çok gerçekçi olamamaktadır. Bu nedenle yapı taşı vekil modeller kurulurken çökme senaryolarına uyumlu metriklerin kurulması gerekmektedir.

7.1.4 Paralel Uygulama

Yöntemin dayandığı önemli avantajlardan biri olan paralelleştirme odaklı yapısı, güncel paralel mimarilerde uygulanması için çalışmalar gerektirmektedir. Özellikle akış işlemcileri olan grafik işlemcilerin kullanımı, yaklaşımın asıl performansının ortaya konmasına imkan sağlayacaktır.

7.1.5 Dinamik Problemler

Sunulan yaklaşım, statik problemlerin yerleştirilebilirliği değerlendirilerek oluşturulmuştur. Titreşim problemleri daha global bir ölçekte anlam kazandığından ötürü, farklı bir çözümü gerektirmektedir.

7.1.6 Gerçek deney verilerinin entegrasyonu

Vekil modeller istatistiki modeller olduğundan ötürü, gerçek deney verilerinin, sonlu elemanlar simülasyonu sonuçlarıyla beraber kullanımına izin vermektedir. Bu nedenle, aslında tezde üst sınır olarak belirtilen sonlu elemanlar modelinden daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmesi de olasıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Wells, M.** (2010). *Engineers: A History of Engineering and Structural Design*, New York: Routledge.
- [2] **Boyd, S. ve Vandenberghe, L.** (2004). *Convex optimization*, Cambridge: Cambridge university press.
- [3] **Dantzig, G.B.** (1951). Maximization of a linear function of variables subject to linear inequalities, *Activity Analysis of Production and Allocation, Proceedings of a Conference*, New York, s.339–347.
- [4] **Kirkpatrick, S., Jr., D.G. ve Vecchi, M.P.** (1983). Optimization by simulated annealing, *science*, 220(4598), 671–680.
- [5] **Darwin, C.** (1859). *The origin of species by means of natural selection: or, the preservation of favored races in the struggle for life*, London: John Murray.
- [6] **Holland, J.H.** (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence*, Cambridge, MA: MIT press.
- [7] **Dorigo, M.** (1992). Optimization, learning and natural algorithms, *Doktora Tezi*, Politecnico di Milano, Italy.
- [8] **Kennedy, J. ve Eberhart, R.** (1995). Particle swarm optimization, *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, cilt 4, Perth, Western Australia, s.1942–1948.
- [9] **Arora, J.** (2004). *Introduction to optimum design*, San Diego: Academic Press.
- [10] **Kang, B.S., Park, G.J. ve Arora, J.** (2006). A review of optimization of structures subjected to transient loads, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 31(2), 81–95.
- [11] **Sobieszczanski-Sobieski, J. ve Haftka, R.** (1997). Multidisciplinary aerospace design optimization: Survey of recent developments, *Structural Optimization*, 14(1), 1–23.
- [12] **Beyer, H.G. ve Sendhoff, B.** (2007). Robust optimization - A comprehensive survey, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196(33-34), 3190–3218.
- [13] **Yao, W., Chen, X., Luo, W., van Tooren, M. ve Guo, J.** (2011). Review of uncertainty-based multidisciplinary design optimization methods for aerospace vehicles, *Progress in Aerospace Sciences*, 47(6), 450–479.

- [14] **Valdebenito, M.A. ve Schueller, G.I.** (2010). A survey on approaches for reliability-based optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 42(5), 645–663.
- [15] **Marler, R.T. ve Arora, J.S.** (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6), 369–395.
- [16] **Grama, A., Karypis, G., Kumar, V. ve Gupta, A.** (2003). *Introduction to parallel computing*, USA: Addison Wesley, 2 sürüm.
- [17] **Alba, E. ve Tomassini, M.** (2002). Parallelism and evolutionary algorithms, *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(5), 443–462.
- [18] **Chan, T. ve Vorst, H.**, (1997). Approximate and Incomplete Factorizations, **D. Keyes, A. Sameh ve V. Venkatakrisnan**, (düzenleyenler), *Parallel Numerical Algorithms*, cilt 4 of *ICASE/LaRC Interdisciplinary Series in Science and Engineering*, Dordrecht: Springer Netherlands, s.167–202.
- [19] **Cosgrove, J., Diaz, J. ve Griewank, A.** (1992). Approximate inverse preconditionings for sparse linear systems, *International journal of computer mathematics*, 44(1-4), 91–110.
- [20] **Chan, T.F., Smith, B.F. ve Zou, J.** (1996). Overlapping Schwarz methods on unstructured meshes using non-matching coarse grids, *Numerische Mathematik*, 73(2), 149–167.
- [21] **Farhat, C. ve Roux, F.X.** (1991). A method of finite element tearing and interconnecting and its parallel solution algorithm, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 32(6), 1205–1227.
- [22] **Xu, J.C.** (1992). Iterative methods by space decomposition and subspace correction, *Siam Review*, 34(4), 581–613.
- [23] **Viana, F.A.C., Haftka, R.T. ve Steffen, Valder, J.** (2009). Multiple surrogates: how cross-validation errors can help us to obtain the best predictor, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 39(4), 439–457.
- [24] **Hardy, R.L.** (1971). Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces, *Journal of Geophysical Research*, 76(8), 1905–1915.
- [25] **Krige, D.G.** (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand, *J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa*, 52(6), 119–139.
- [26] **Haykin, S.S.** (2007). *Neural networks: a comprehensive foundation*, New Jersey: Prentice Hall Englewood Cliffs.
- [27] **Box, G.E. ve Hunter, J.S.** (1957). Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces, *The Annals of Mathematical Statistics*, 28(1), 195–241.
- [28] **Cortes, C. ve Vapnik, V.** (1995). Support-vector networks, *Machine Learning*, 20(3), 273–297.

- [29] **Pearson, K.** (1901). LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11), 559–572.
- [30] **Bandler, J.W., Biernacki, R.M., Chen, S.H., Grobelny, P.A. ve Hemmers, R.H.** (1994). Space mapping technique for electromagnetic optimization, *Ieee Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 42(12), 2536–2544.
- [31] **Pronzato, L. ve Mueller, W.G.** (2012). Design of computer experiments: space filling and beyond, *Statistics and Computing*, 22(3), 681–701.
- [32] **Wald, A.** (1945). Sequential tests of statistical hypotheses, *The Annals of Mathematical Statistics*, 16(2), 117–186.
- [33] **Zhou, Z.Z., Ong, Y.S., Nguyen, M.H., Lim, D. ve Ieee** (2005). A study on polynomial regression and Gaussian process global surrogate model in hierarchical surrogate-assisted evolutionary algorithm, *2005 Ieee Congress on Evolutionary Computation, Vols 1-3, Proceedings*, s.2832–2839.
- [34] **Bhattacharya, M.** (2007). Surrogate based EA for expensive optimization problems, *2007 Ieee Congress on Evolutionary Computation, Vols 1-10, Proceedings*, s.3847–3854.
- [35] **Jin, Y., Oh, S., Jeon, M. ve Ieee** (2010). Incremental approximation of nonlinear constraint functions for evolutionary constrained optimization, *2010 Ieee Congress on Evolutionary Computation (Cec)*.
- [36] **Won, K.S. ve Ray, T.** (2005). A framework for design optimization using surrogates, *Engineering Optimization*, 37(7), 685–703.
- [37] **Won, K.S., Ray, T. ve Ieee** (2004). Performance of Kriging and Cokriging based surrogate models within the unified framework for surrogate assisted optimization, *Cec2004: Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation, Vols 1 and 2*, s.1577–1585.
- [38] **Won, K.S., Ray, T. ve Tai, K.** (2003). A framework for optimization using approximate functions, *Cec: 2003 Congress on Evolutionary Computation, Vols 1-4, Proceedings*, s.1520–1527.
- [39] **Hsu, Y.L., Wang, S.G. ve Yu, C.C.** (2003). A sequential approximation method using neural networks for engineering design optimization problems, *Engineering Optimization*, 35(5), 489–511.
- [40] **Ju, B.H. ve Lee, B.C.** (2008). Reliability-based design optimization using a moment method and a Kriging metamodel, *Engineering Optimization*, 40(5), 421–438.
- [41] **Holmstrom, K.** (2008). An adaptive radial basis algorithm (ARBF) for expensive black-box global optimization, *Journal of Global Optimization*, 41(3), 447–464.

- [42] **Li, M., Li, G. ve Azarm, S.** (2008). A kriging metamodel assisted multi-objective genetic algorithm for design optimization, *Journal of Mechanical Design*, 130(3), 031401.
- [43] **Rodriguez, J.F., Renaud, J.E. ve Watson, L.T.** (1998). Trust region augmented Lagrangian methods for sequential response surface approximation and optimization, *Journal of Mechanical Design*, 120(1), 58–66.
- [44] **Laurenceau, J., Meaux, M., Montagnac, M. ve Sagaut, P.** (2010). Comparison of gradient-based and gradient-enhanced response-surface-based optimizers, *Aiaa Journal*, 48(5), 981–994.
- [45] **Paiva, R.M., Carvalho, A.R.D., Crawford, C. ve Suleman, A.** (2010). Comparison of surrogate models in a multidisciplinary optimization framework for wing design, *Aiaa Journal*, 48(5), 995–1006.
- [46] **Ong, Y.S., Nair, P.B. ve Keane, A.J.** (2003). Evolutionary optimization of computationally expensive problems via surrogate modeling, *Aiaa Journal*, 41(4), 687–696.
- [47] **Sakata, S., Ashida, F. ve Zako, M.** (2004). An efficient algorithm for Kriging approximation and optimization with large-scale sampling data, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(3-5), 385–404.
- [48] **Zhang, K.s., Han, Z.h., Li, W.j. ve Song, W.p.** (2008). Coupled aerodynamic/structural optimization of a subsonic transport wing using a surrogate model, *Journal of Aircraft*, 45(6), 2167–2171.
- [49] **Yang, G., Chen, D. ve Cui, K.** (2009). Response surface technique for static aeroelastic optimization on a high-aspect-ratio wing, *Journal of Aircraft*, 46(4), 1444–1450.
- [50] **Koch, P.N., Simpson, T.W., Allen, J.K. ve Mistree, F.** (1999). Statistical approximations for multidisciplinary design optimization: The problem of size, *Journal of Aircraft*, 36(1), 275–286.
- [51] **Kampolis, I.C., Zymaris, A.S., Asouti, V.G., Giannakoglou, K.C. ve Ieee** (2007). Multilevel optimization strategies based on metamodel-assisted evolutionary algorithms, for computationally expensive problems, *2007 Ieee Congress on Evolutionary Computation, Vols 1-10, Proceedings*, s.4116–4123.
- [52] **Jeong, S., Obayashi, S. ve Yamamoto, K.** (2006). A Kriging-based probabilistic optimization method with an adaptive search region, *Engineering Optimization*, 38(5), 541–555.
- [53] **Karakasis, M.K. ve Giannakoglou, K.C.** (2006). On the use of metamodel-assisted, multi-objective evolutionary algorithms, *Engineering Optimization*, 38(8), 941–957.
- [54] **Simpson, T.W. ve Mistree, F.** (2001). Kriging models for global approximation in simulation-based multidisciplinary design optimization, *Aiaa Journal*, 39(12), 2233–2241.

- [55] **Batill, S.M., Stelmack, M.A. ve Sellar, R.S.** (1999). Framework for multidisciplinary design based on response-surface approximations, *Journal of Aircraft*, 36(1), 287–297.
- [56] **Neufeld, D., Behdinan, K. ve Chung, J.** (2010). Aircraft wing box optimization considering uncertainty in surrogate models, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 42(5), 745–753.
- [57] **Saijal, K.K., Ganguli, R. ve Viswamurthy, S.R.** (2011). Optimization of helicopter rotor using polynomial and neural network metamodels, *Journal of Aircraft*, 48(2), 553–566.
- [58] **Yao, W., Chen, X., Ouyang, Q. ve van Tooren, M.** (2012). A surrogate based multistage-multilevel optimization procedure for multidisciplinary design optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 45(4), 559–574.
- [59] **Roux, W.J., Stander, N. ve Haftka, R.T.** (1998). Response surface approximations for structural optimization, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 42(3), 517–534.
- [60] **Agarwal, H. ve Renaud, J.E.** (2004). Reliability based design optimization using response surfaces in application to multidisciplinary systems, *Engineering Optimization*, 36(3), 291–311.
- [61] **Lee, J., Jeong, H. ve Kang, S.** (2008). Derivative and GA-based methods in metamodeling of back-propagation neural networks for constrained approximate optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 35(1), 29–40.
- [62] **Gholizadeh, S., Salajegheh, E. ve Torkzadeh, P.** (2008). Structural optimization with frequency constraints by genetic algorithm using wavelet radial basis function neural network, *Journal of Sound and Vibration*, 312(1-2), 316–331.
- [63] **Kim, D.W. ve Lee, J.** (2010). An improvement of Kriging based sequential approximate optimization method via extended use of design of experiments, *Engineering Optimization*, 42(12), 1133–1149.
- [64] **Toal, D.J.J. ve Keane, A.J.** (2012). Non-stationary Kriging for design optimization, *Engineering Optimization*, 44(6), 741–765.
- [65] **Gholizadeh, S. ve Salajegheh, E.** (2009). Optimal design of structures subjected to time history loading by swarm intelligence and an advanced metamodel, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198(37-40), 2936–2949.
- [66] **Sakata, S., Ashida, F. ve Zako, M.** (2003). Structural optimization using Kriging approximation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192(7-8), 923–939.

- [67] **Messac, A. ve Mullur, A.A.** (2008). A computationally efficient metamodeling approach for expensive multiobjective optimization, *Optimization and Engineering*, 9(1), 37–67.
- [68] **Annicchiarico, W.** (2007). Metamodel-assisted distributed genetic algorithms applied to structural shape optimization problems, *Engineering Optimization*, 39(7), 757–772.
- [69] **Eom, Y.S., Yoo, K.S., Park, J.Y. ve Han, S.Y.** (2011). Reliability-based topology optimization using a standard response surface method for three-dimensional structures, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43(2), 287–295.
- [70] **Luo, Z., Tong, L. ve Kang, Z.** (2009). A level set method for structural shape and topology optimization using radial basis functions, *Computers & Structures*, 87(7-8), 425–434.
- [71] **Yoo, K.S., Eom, Y.S., Park, J.Y., Im, M.G. ve Han, S.Y.** (2011). Reliability-based topology optimization using successive standard response surface method, *Finite Elements in Analysis and Design*, 47(7), 843–849.
- [72] **Wang, G.G., Dong, Z.M. ve Aitchison, P.** (2001). Adaptive response surface method - A global optimization scheme for approximation-based design problems, *Engineering Optimization*, 33(6), 707–733.
- [73] **Zhao, D. ve Xue, D.** (2011). A multi-surrogate approximation method for metamodeling, *Engineering with Computers*, 27(2), 139–153.
- [74] **Bouazizi, M.L., Ghanmi, S. ve Bouhaddi, N.** (2009). Multi-objective optimization in dynamics of the structures with nonlinear behavior: Contributions of the metamodels, *Finite Elements in Analysis and Design*, 45(10), 612–623.
- [75] **Rais-Rohani, M. ve Singh, M.N.** (2004). Comparison of global and local response surface techniques in reliability-based optimization of composite structures, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(5), 333–345.
- [76] **Sakata, S., Ashida, F. ve Zako, M.** (2007). Hybrid approximation algorithm with Kriging and quadratic polynomial-based approach for approximate optimization, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 70(6), 631–654.
- [77] **Zadeh, P.M., Toropov, V.V. ve Wood, A.S.** (2009). Metamodel-based collaborative optimization framework, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 38(2), 103–115.
- [78] **Kazemi, M., Wang, G.G., Rahnamayan, S. ve Gupta, K.** (2011). Metamodel-based optimization for problems with expensive objective and constraint functions, *Journal of Mechanical Design*, 133(1), 014505.
- [79] **Lee, J. ve Song, C.Y.** (2011). Role of conservative moving least squares methods in reliability based design optimization: a mathematical foundation, *Journal of Mechanical Design*, 133(12), 121005.

- [80] **Jakobsson, S., Patriksson, M., Rudholm, J. ve Wojciechowski, A.** (2010). A method for simulation based optimization using radial basis functions, *Optimization and Engineering*, 11(4), 501–532.
- [81] **Duddeck, F.** (2008). Multidisciplinary optimization of car bodies, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 35(4), 375–389.
- [82] **Forsberg, J. ve Nilsson, L.** (2005). On polynomial response surfaces and Kriging for use in structural optimization of crashworthiness, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 29(3), 232–243.
- [83] **Lanzi, L., Airoldi, A. ve Chirwa, C.** (2009). Application of an iterative global approximation technique to structural optimizations, *Optimization and Engineering*, 10(1), 109–132.
- [84] **Tzannetakis, N. ve Van de Peer, J.** (2002). Design optimization through parallel-generated surrogate models, optimization methodologies and the utility of legacy simulation software, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 23(2), 170–186.
- [85] **Huang, D., Allen, T.T., Notz, W.I. ve Miller, R.A.** (2006). Sequential kriging optimization using multiple-fidelity evaluations, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 32(5), 369–382.
- [86] **Sherali, H.D. ve Ganesan, V.** (2003). A pseudo-global optimization approach with application to the design of containerships, *Journal of Global Optimization*, 26(4), 335–360.
- [87] **Ray, T. ve Smith, A.** (2006). A surrogate assisted parallel multiobjective evolutionary algorithm for robust engineering design, *Engineering Optimization*, 38(8), 997–1011.
- [88] **Rodriguez, J.F., Perez, V.M., Padmanabhan, D. ve Renaud, J.E.** (2001). Sequential approximate optimization using variable fidelity response surface approximations, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 22(1), 24–34.
- [89] **Huang, D., Allen, T.T., Notz, W.I. ve Zeng, N.** (2006). Global optimization of stochastic black-box systems via sequential kriging meta-models, *Journal of Global Optimization*, 34(3), 441–466.
- [90] **Jeong, S., Obayashi, S. ve Ieee** (2005). Efficient global optimization (EGO) for multi-objective problem and data mining, *2005 Ieee Congress on Evolutionary Computation, Vols 1-3, Proceedings*, s.2138–2145.
- [91] **Jones, D.R., Schonlau, M. ve Welch, W.J.** (1998). Efficient global optimization of expensive black-box functions, *Journal of Global Optimization*, 13(4), 455–492.
- [92] **Apte, A.P. ve Wang, B.P.** (2008). Topology optimization using hyper radial basis function network, *AIAA Journal*, 46(9), 2211–2218.

- [93] **Wolpert, D.H. ve Macready, W.G.** (1997). No free lunch theorems for optimization, *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 1(1), 67–82.
- [94] **De Munck, M., Moens, D., Desmet, W. ve Vandepitte, D.** (2009). An efficient response surface based optimisation method for non-deterministic harmonic and transient dynamic analysis, *Cmes-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 47(2), 119–166.
- [95] **Igusa, T. ve Wan, Z.** (2003). Response surface methods for optimization under uncertainty, *Proceedings ICASP9 - the 9th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, s.1017–1023.
- [96] **Leary, S.J., Bhaskar, A. ve Keane, A.J.** (2003). A knowledge-based approach to response surface modelling in multifidelity optimization, *Journal of Global Optimization*, 26(3), 297–319.
- [97] **Lee, J.W., Min, B.Y., Byun, Y.H. ve Kim, S.J.** (2006). Multipoint nose shape optimization of space launcher using response surface method, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 43(1), 137–146.
- [98] **Mulani, S.B., Joshi, P., Li, J., Kapania, R.K. ve Shin, Y.S.** (2010). Optimal design of unitized structures using response surface approaches, *Journal of Aircraft*, 47(6), 1898–1906.
- [99] **Vafaeseefat, A.** (2011). Optimization of composite pressure vessels with metal liner by adaptive response surface method, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(11), 2811–2816.
- [100] **Venter, G., Haftka, R.T. ve Starnes, J.H.** (1998). Construction of response surface approximations for design optimization, *Aiaa Journal*, 36(12), 2242–2249.
- [101] **Fourment, L., Ducloux, R., Marie, S., Ejday, M., Monnereau, D., Masse, T. ve Montmitonnet, P.** (2010). Mono and multi-objective optimization techniques applied to a large range of industrial test cases using Metamodel assisted Evolutionary Algorithms, *10th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes (NUMIFORM 2010)*, cilt1252, s.833–840.
- [102] **Jones, D.R.** (2001). A taxonomy of global optimization methods based on response surfaces, *Journal of Global Optimization*, 21(4), 345–383.
- [103] **Keane, A.J.** (2003). Wing optimization using design of experiment, response surface, and data fusion methods, *Journal of Aircraft*, 40(4), 741–750.
- [104] **Leary, S.J., Bhaskar, A. ve Keane, A.J.** (2001). A constraint mapping approach to the structural optimization of an expensive model using surrogates, *Optimization and Engineering*, 2(4), 385–398.

- [105] **Lee, D.W., Kim, J.K., Kim, S.R. ve Lee, K.H.** (2011). Shape design of a tire contour based on approximation model, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(1), 149–155.
- [106] **Lee, K.H. ve Kang, D.H.** (2006). A robust optimization using the statistics based on kriging metamodel, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 20(8), 1169–1182.
- [107] **Sakata, S., Ashida, F. ve Zako, M.** (2007). On applying Kriging-based approximate optimization to inaccurate data, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196(13-16), 2055–2069.
- [108] **Zhou, Z.Z., Ong, Y.S., Nair, P.B. ve Ieee** (2004). Hierarchical surrogate-assisted evolutionary optimisation framework, *Cec2004: Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation, Vols 1 and 2*, s.1586–1593.
- [109] **Bjorkman, M. ve Holmstrom, K.** (2000). Global optimization of costly nonconvex functions using radial basis functions, *Optimization and Engineering*, 1(4), 373–397.
- [110] **Kitayama, S., Arakawa, M. ve Yamazaki, K.** (2011). Sequential approximate optimization using radial basis function network for engineering optimization, *Optimization and Engineering*, 12(4), 535–557.
- [111] **Regis, R.G. ve Shoemaker, C.A.** (2007). Improved strategies for radial basis function methods for global optimization, *Journal of Global Optimization*, 37(1), 113–135.
- [112] **Regis, R.G. ve Shoemaker, C.A.** (2005). Constrained global optimization of expensive black box functions using radial basis functions, *Journal of Global Optimization*, 31(1), 153–171.
- [113] **Lee, Y., Oh, S. ve Choi, D.H.** (2008). Design optimization using support vector regression, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22(2), 213–220.
- [114] **Simpson, T.W., Peplinski, J.D., Koch, P.N. ve Allen, J.K.** (2001). Metamodels for computer-based engineering design: Survey and recommendations, *Engineering with Computers*, 17(2), 129–150.
- [115] **Younis, A. ve Dong, Z.** (2010). Trends, features, and tests of common and recently introduced global optimization methods, *Engineering Optimization*, 42(8), 691–718.
- [116] **Li, M.** (2011). An improved Kriging-assisted multi-objective genetic algorithm, *Journal of Mechanical Design*, 133(7), 071008.
- [117] **Simpson, T.W., Booker, A.J., Ghosh, D., Giunta, A.A., Koch, P.N. ve Yang, R.J.** (2004). Approximation methods in multidisciplinary analysis and optimization: A panel discussion, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 27(5), 302–313.

- [118] **Wang, G.G. ve Shan, S.** (2007). Review of metamodeling techniques in support of engineering design optimization, *Journal of Mechanical Design*, 129(4), 370–380.
- [119] **Bookstein, F.L.** (1989). Principal warps - thin-plate splines and the decomposition of deformations, *Ieee Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(6), 567–585.
- [120] **Mackay, D.J.C.** (1992). A practical bayesian framework for backpropagation networks, *Neural Computation*, 4(3), 448–472.
- [121] **Box, G.E. ve Cox, D.R.** (1964). An analysis of transformations, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 26(2), 211–252.
- [122] **Stocki, R.** (2005). A method to improve design reliability using optimal Latin hypercube sampling, *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, 12(4), 393–411.

EKLER

EK A : 3 Panelli Örnek, Tek Serbestlik Sonuç Grafikleri

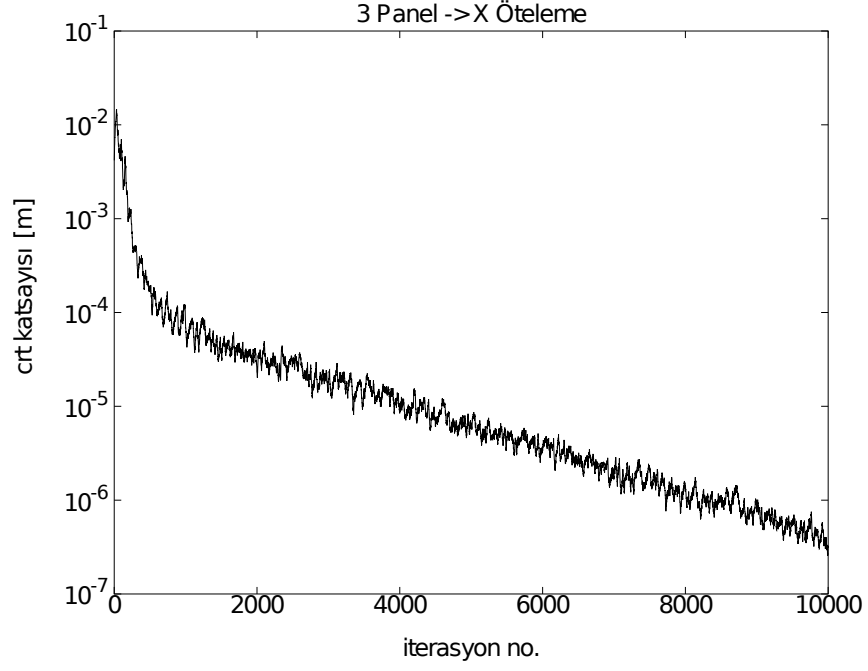
EK B : 9 Panelli Örnek, Tek Serbestlik Sonuç Grafikleri

EK C : 25 Panelli Örnek, Tek Serbestlik Sonuç Grafikleri

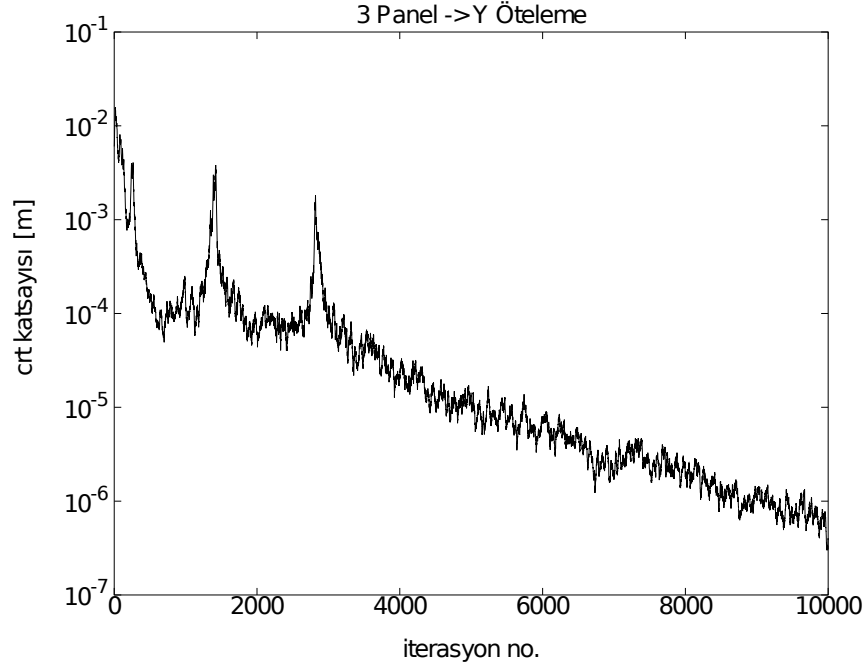
EK D : Hassaslık Analizi Ortalama Kontur Grafikleri

EK E : Hassaslık Analizi Standart Sapma Kontur Grafikleri

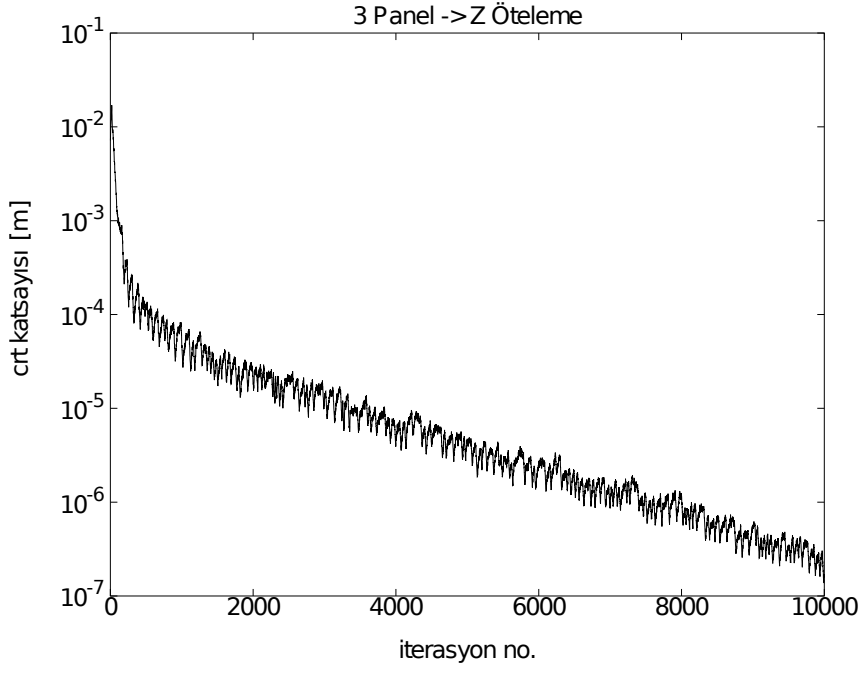
EK A: 3 Panelli Örnek, Tek Serbestlik Sonuç Grafikleri



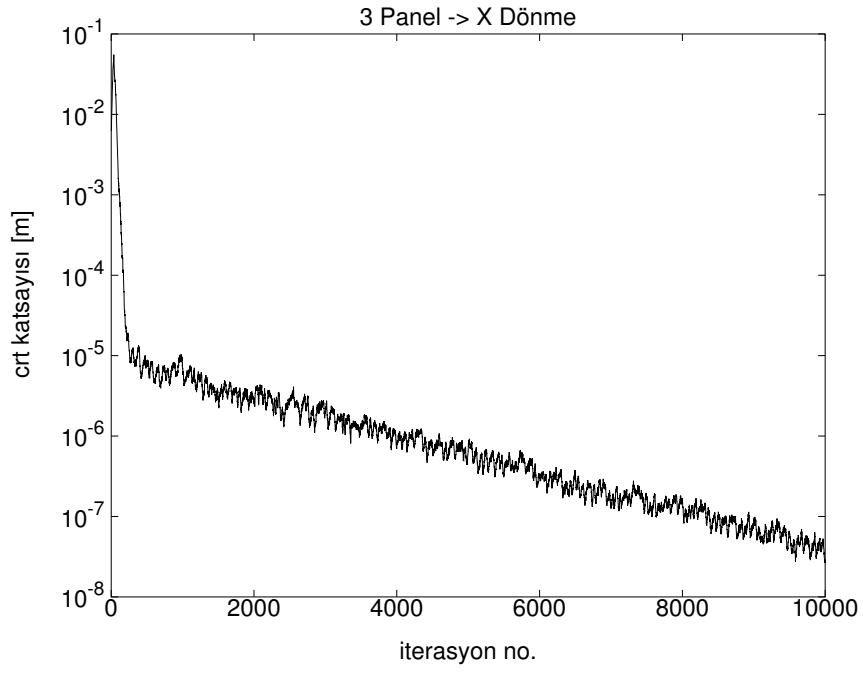
Şekil A.1 : 3 panel - güncelleme katsayısı X öteleme.



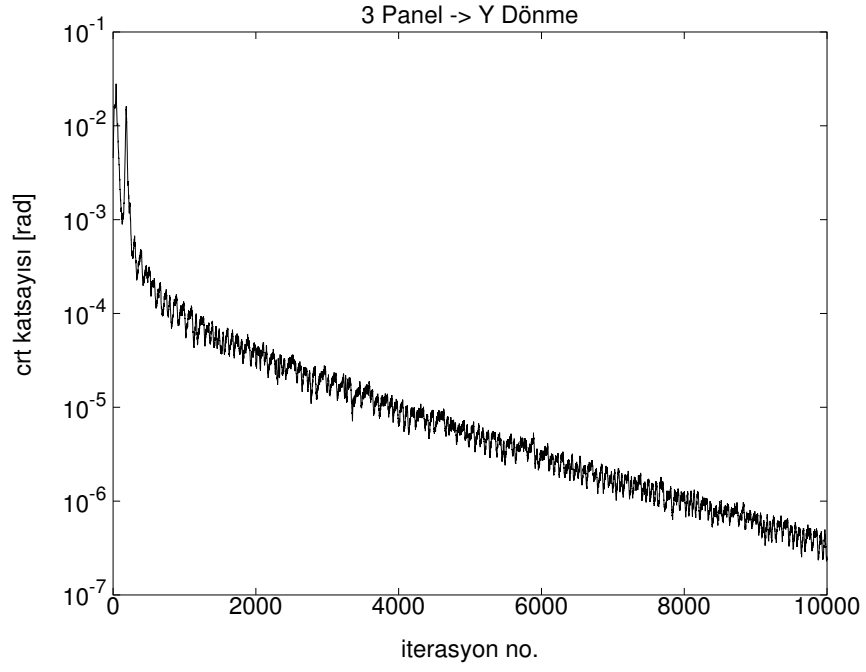
Şekil A.2 : 3 panel - güncelleme katsayısı Y öteleme.



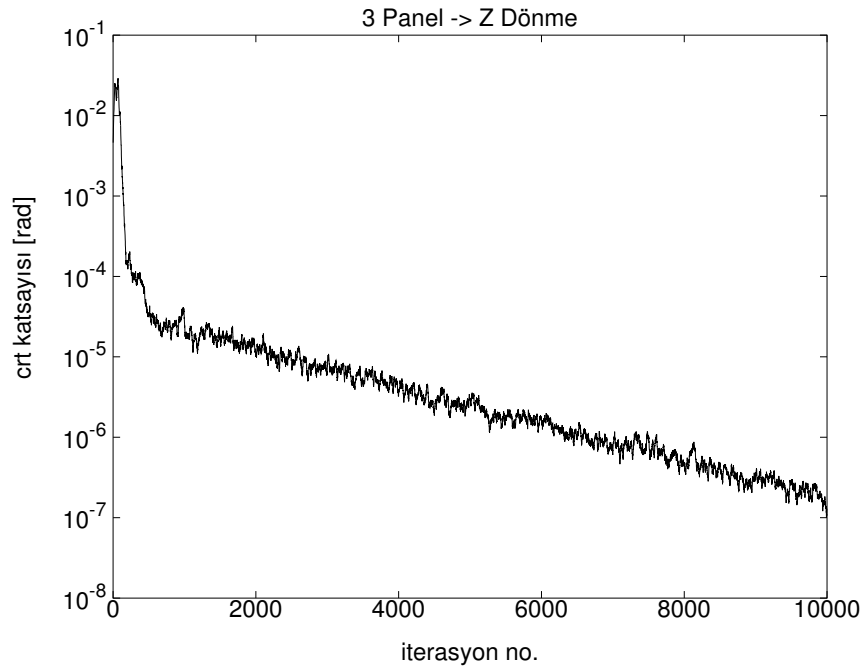
Şekil A.3 : 3 panel - güncelleme katsayısı Z öteleme.



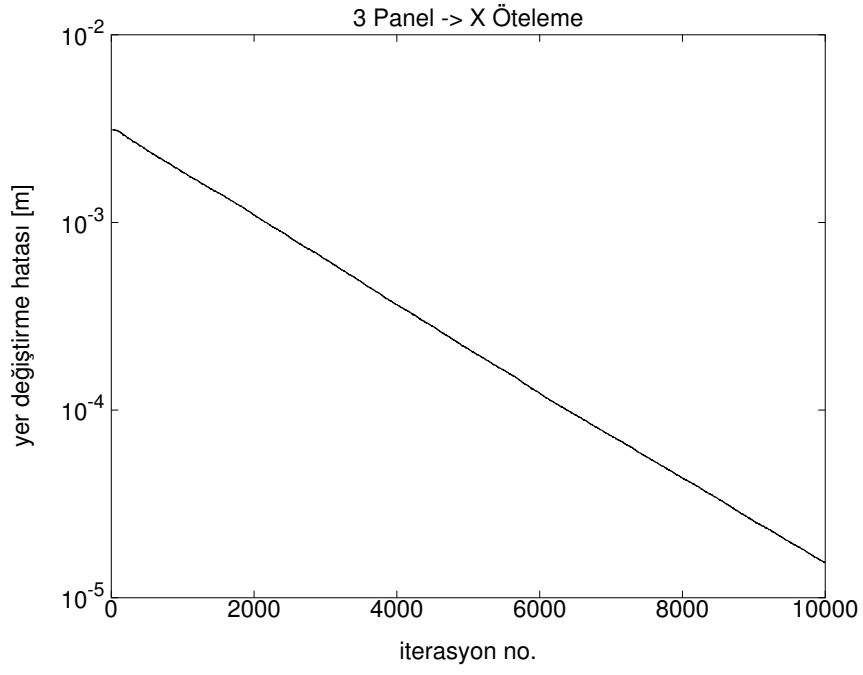
Şekil A.4 : 3 panel - güncelleme katsayısı X dönme.



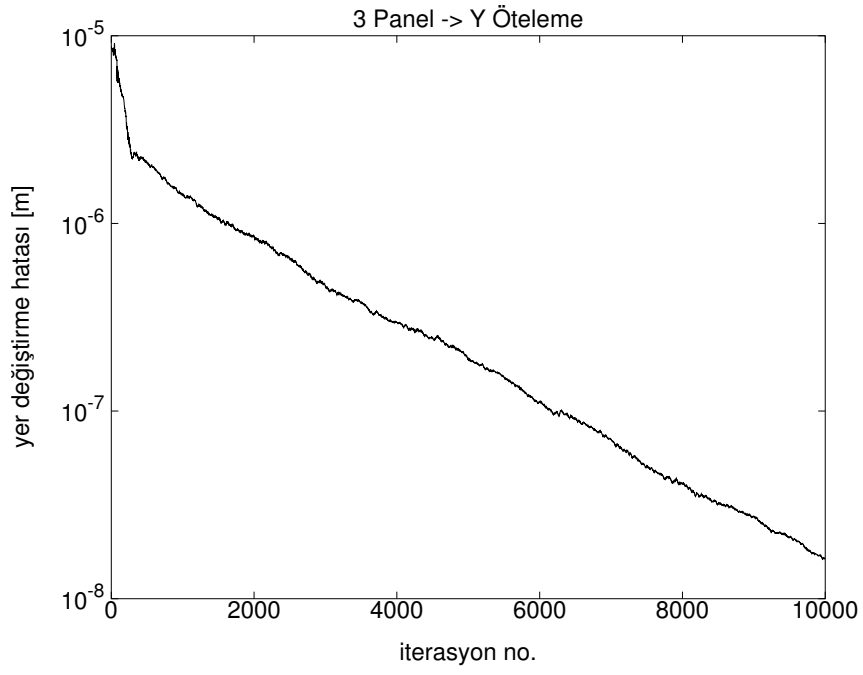
Şekil A.5 : 3 panel - güncelleme katsayısı Y dönme.



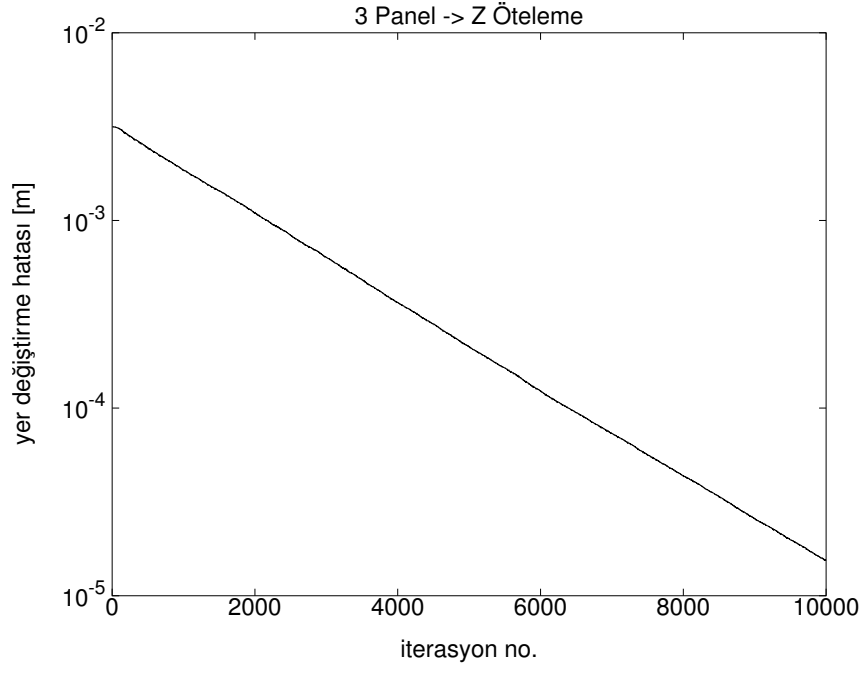
Şekil A.6 : 3 panel - güncelleme katsayısı Z dönme.



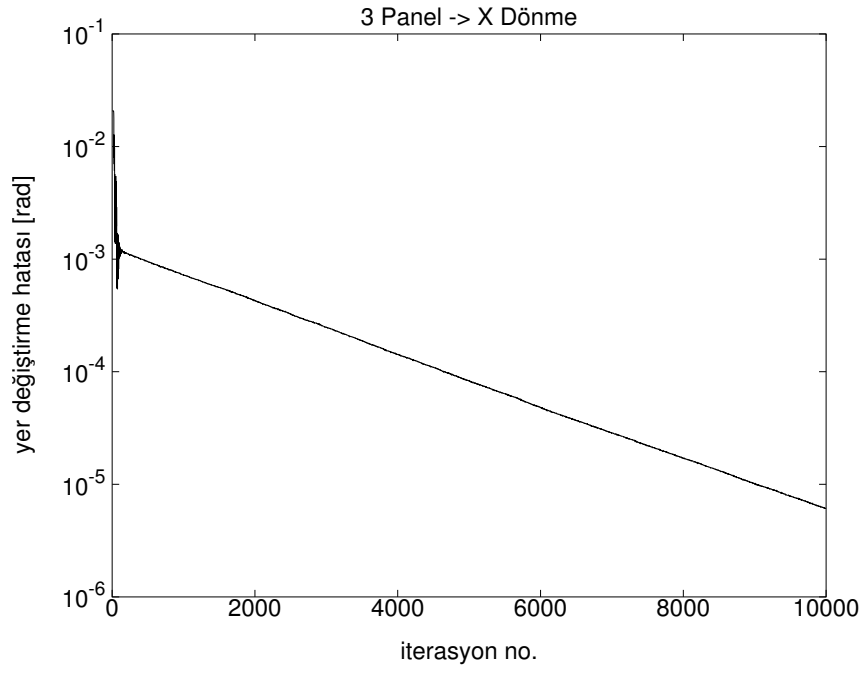
şekil A.7 : 3 panel - yer değiştirme hatası X öteleme.



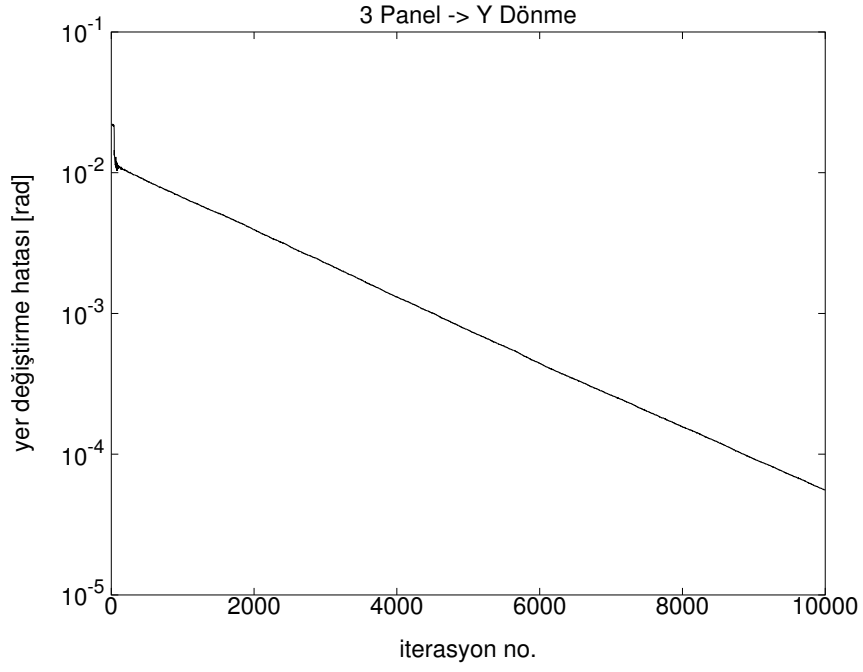
şekil A.8 : 3 panel - yer değiştirme hatası Y öteleme.



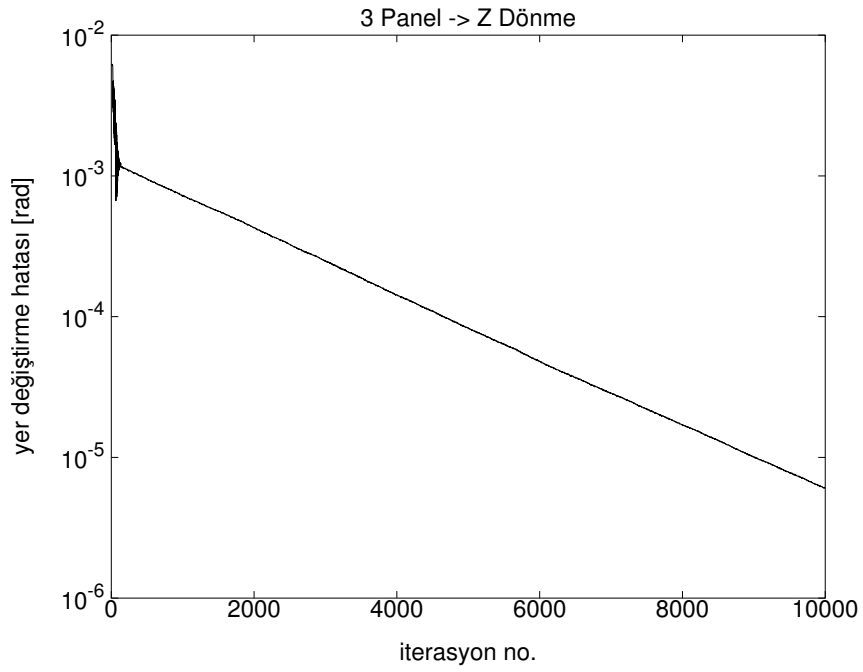
şekil A.9 : 3 panel - yer değiştirme hatası Z öteleme.



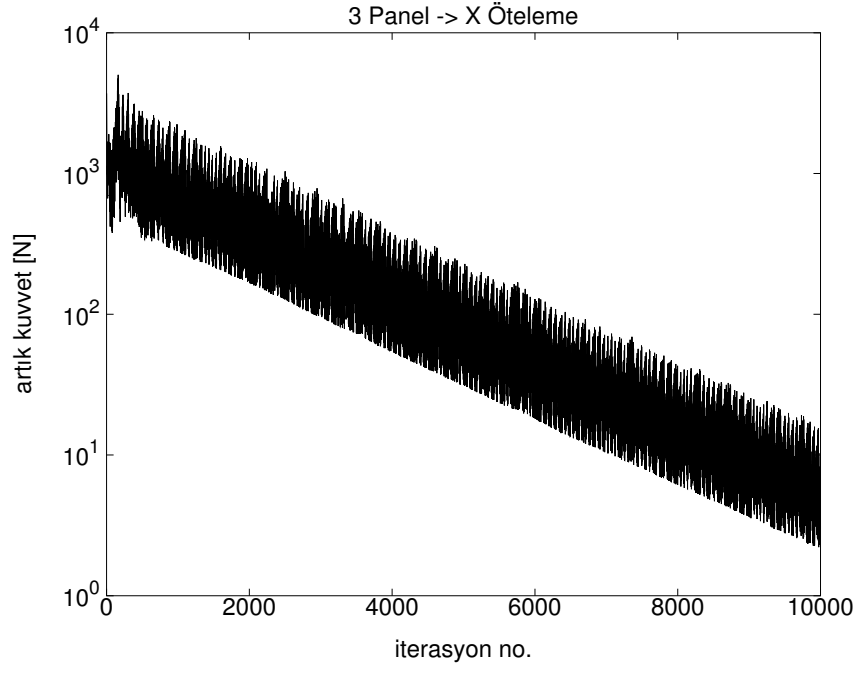
şekil A.10 : 3 panel - yer değiştirme hatası X dönme.



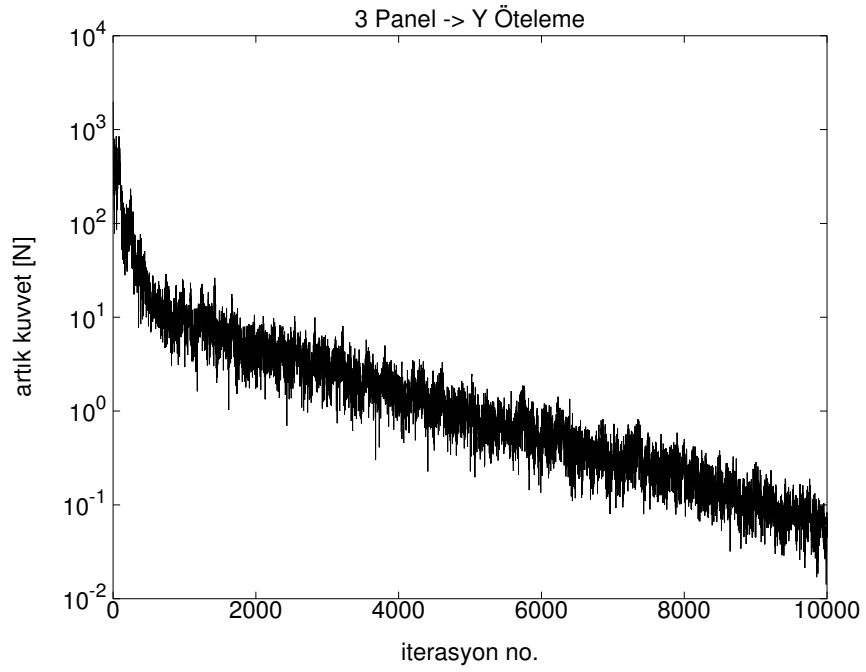
şekil A.11 : 3 panel - yer değiştirme hatası Y dönme.



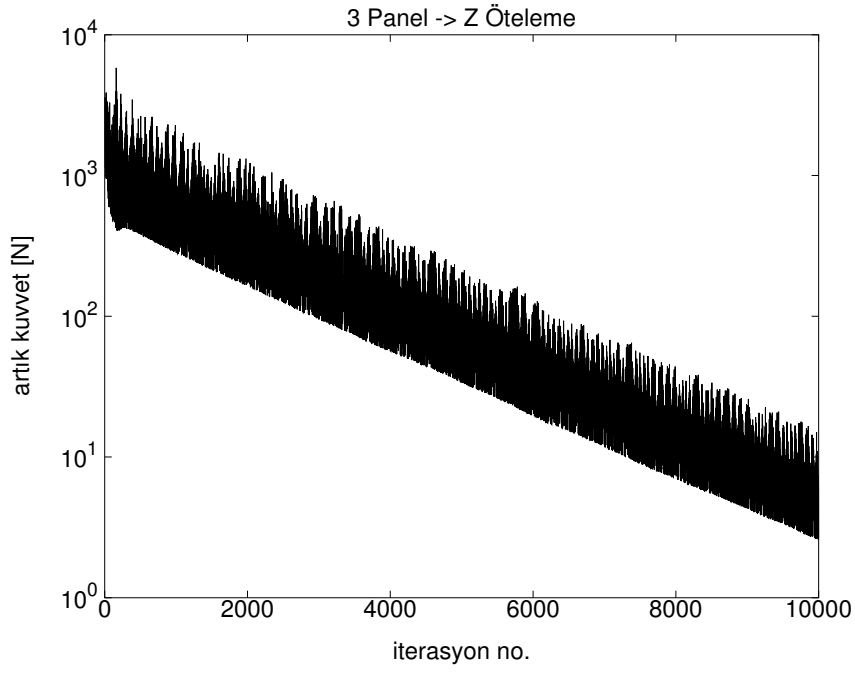
şekil A.12 : 3 panel - yer değiştirme hatası Z dönme.



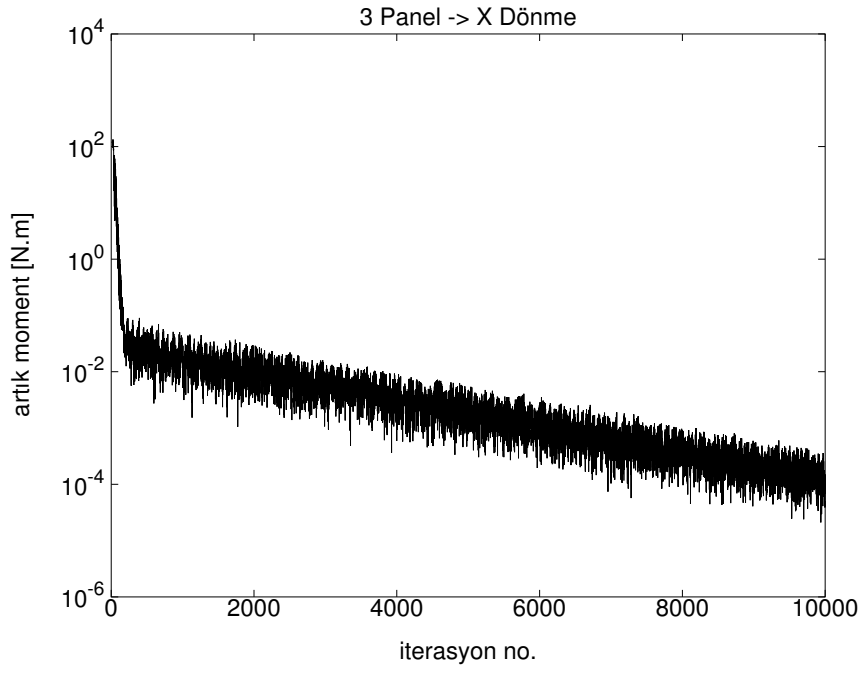
Şekil A.13 : 3 panel - artık kuvvet X öteleme.



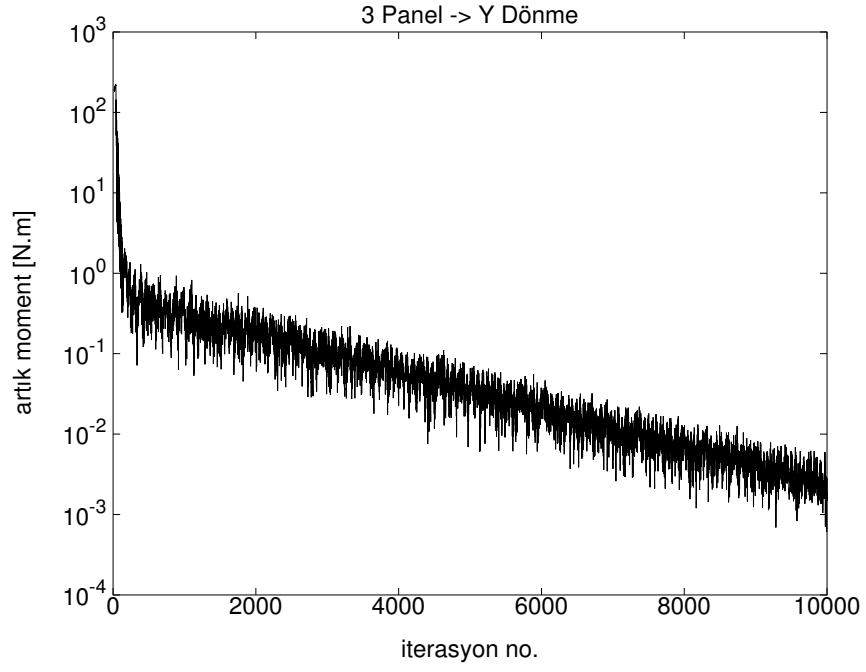
Şekil A.14 : 3 panel - artık kuvvet Y öteleme.



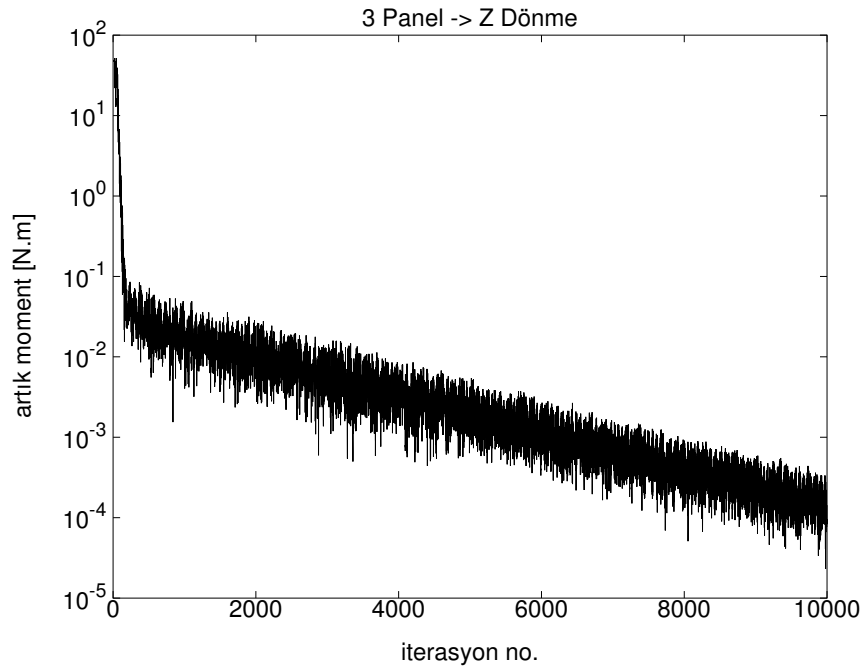
Şekil A.15 : 3 panel - artık kuvvet Z öteleme.



Şekil A.16 : 3 panel - artık moment X dönme.

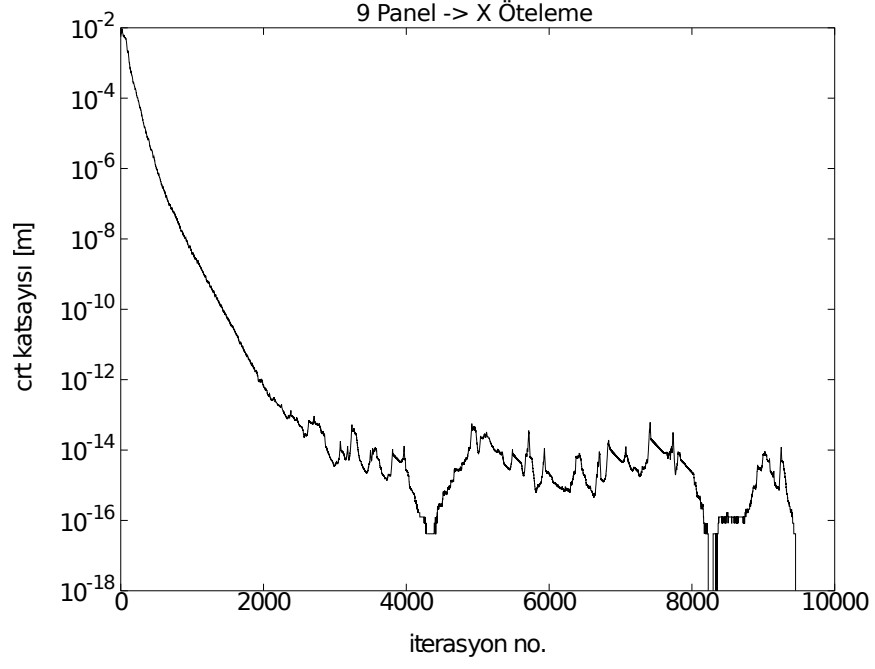


Şekil A.17 : 3 panel - artık moment Y dönme.

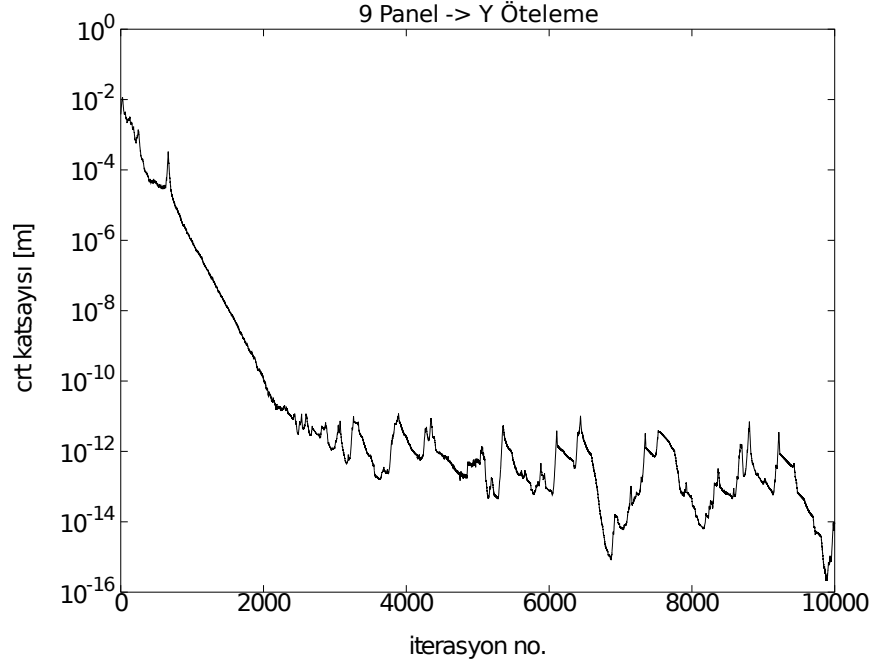


Şekil A.18 : 3 panel - artık moment Z dönme.

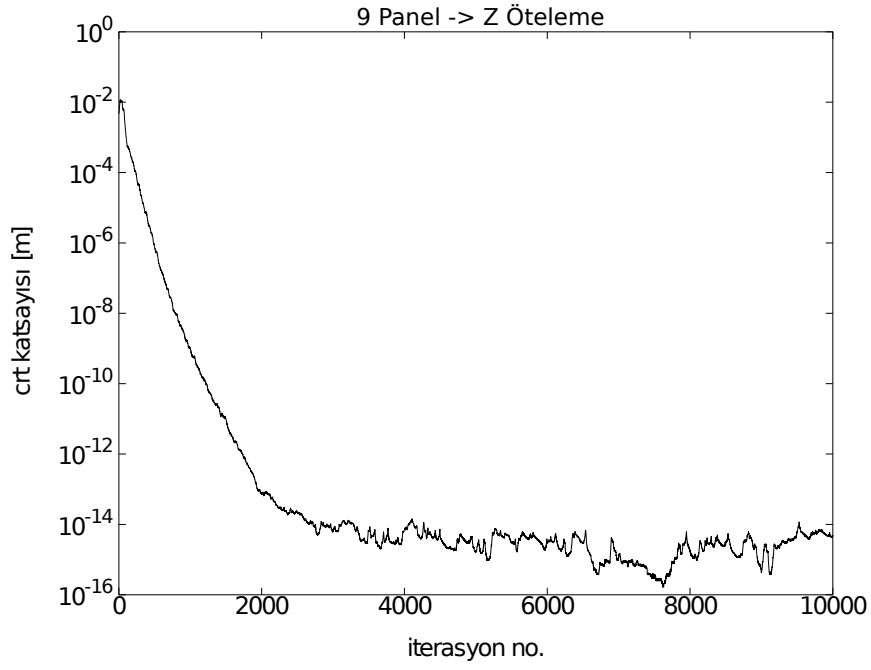
EK B: 9 Panelli Örnek, Tek Serbestlik Sonuç Grafikleri



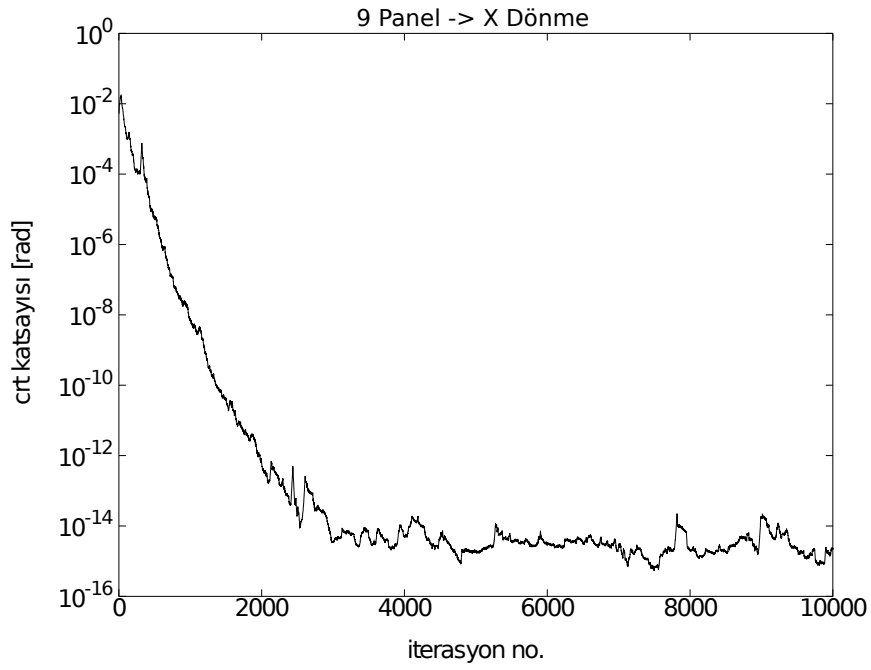
Şekil B.1 : 9 panel - güncelleme katsayısı X öteleme.



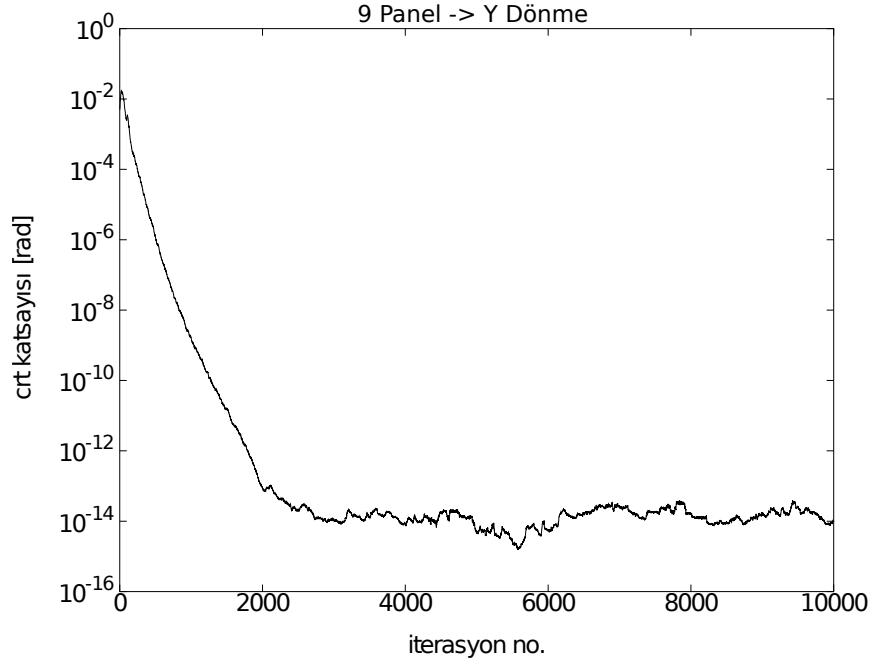
Şekil B.2 : 9 panel - güncelleme katsayısı Y öteleme.



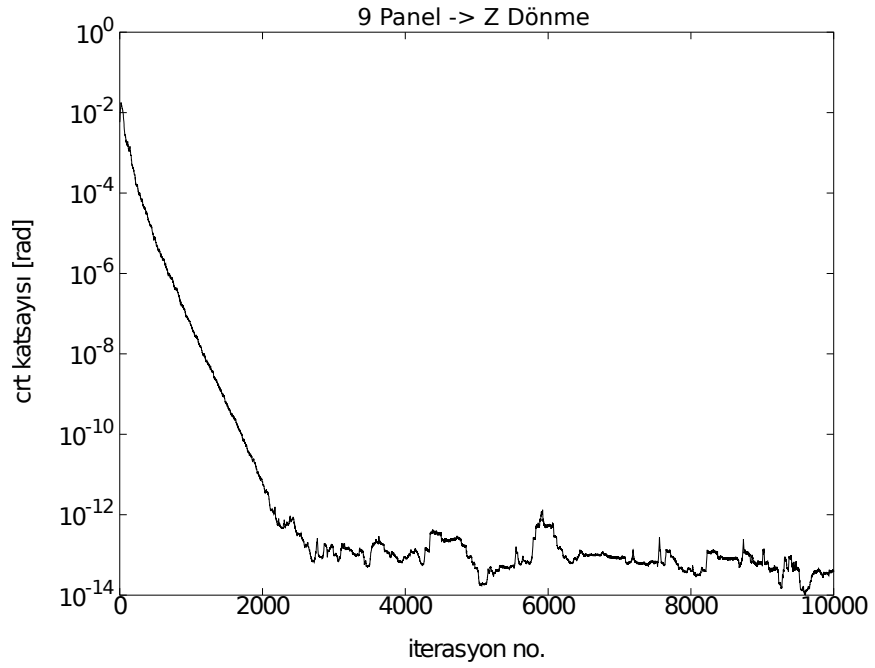
Şekil B.3 : 9 panel - güncelleme katsayısı Z öteleme.



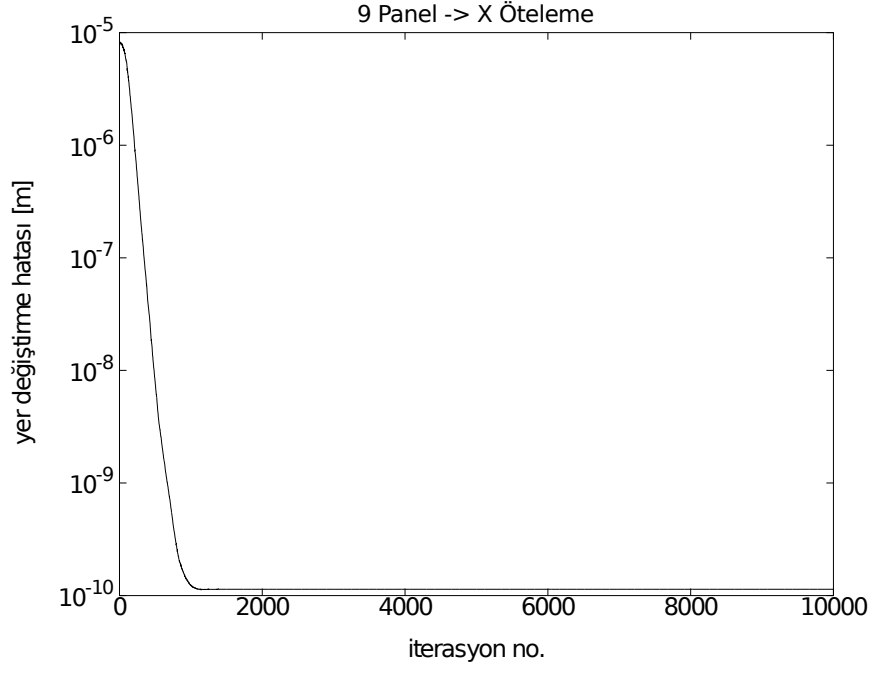
Şekil B.4 : 9 panel - güncelleme katsayısı X dönme.



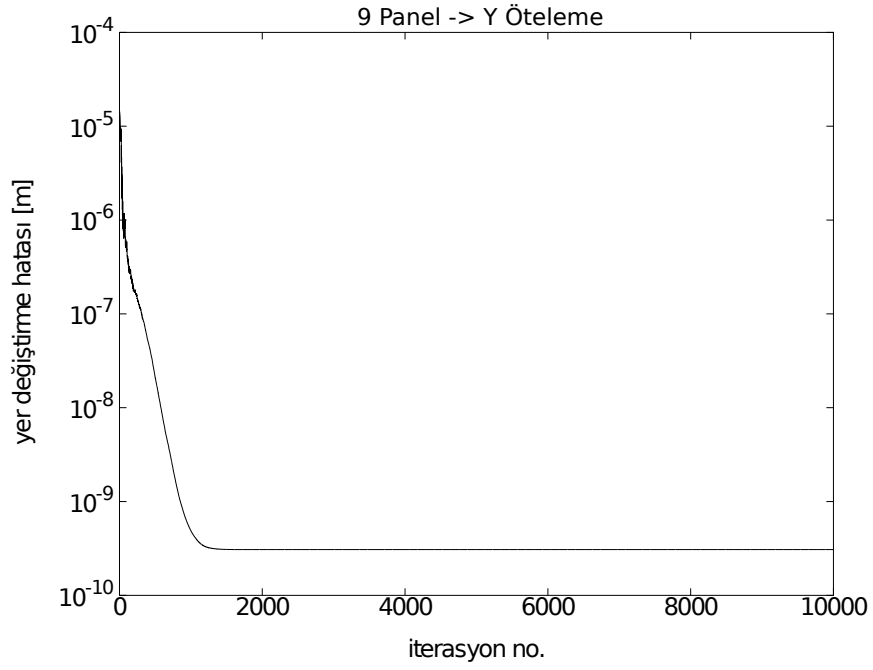
Şekil B.5 : 9 panel - güncelleme katsayısı Y dönme.



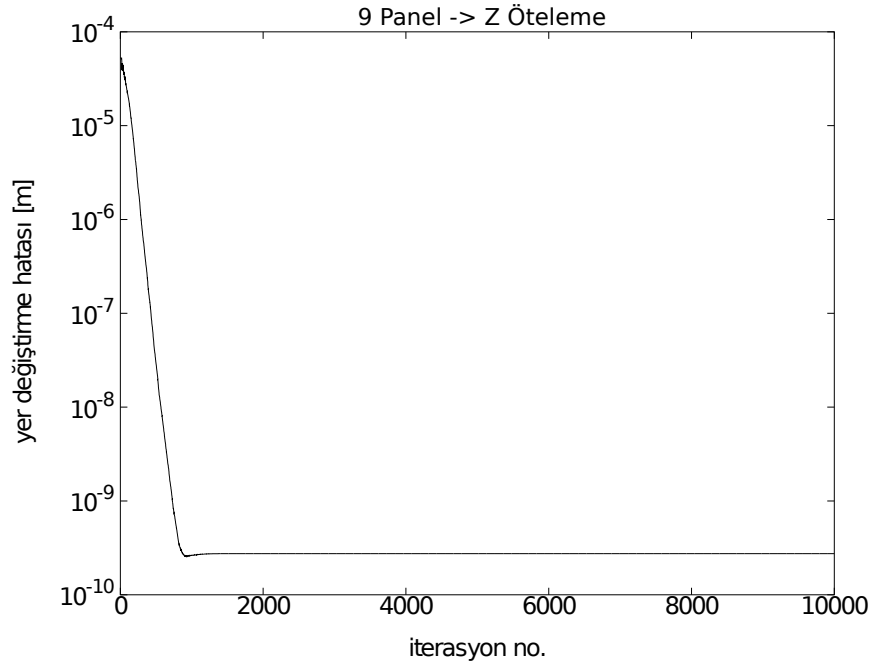
Şekil B.6 : 9 panel - güncelleme katsayısı Z dönme.



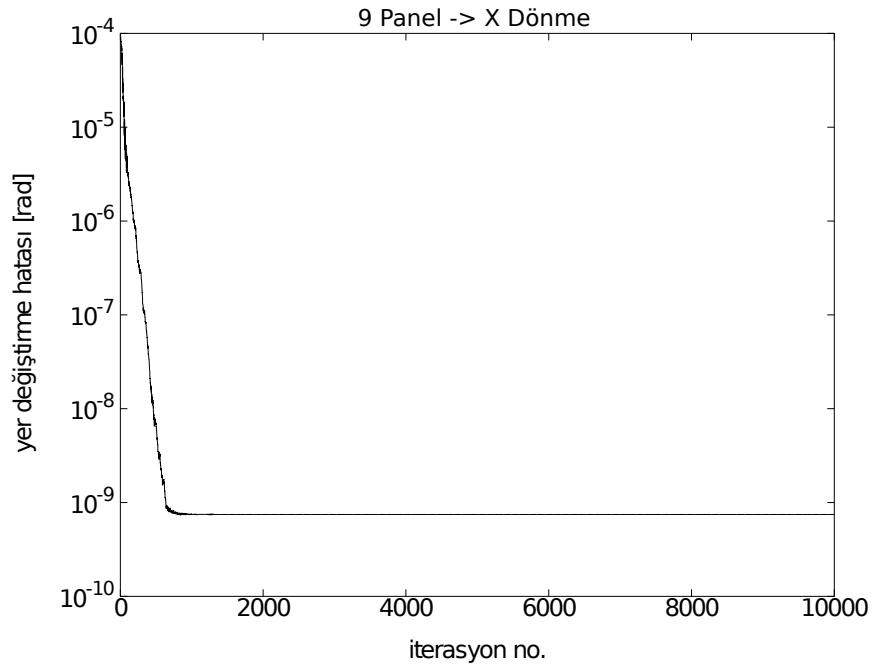
şekil B.7 : 9 panel - yer değiştirme hatası X öteleme.



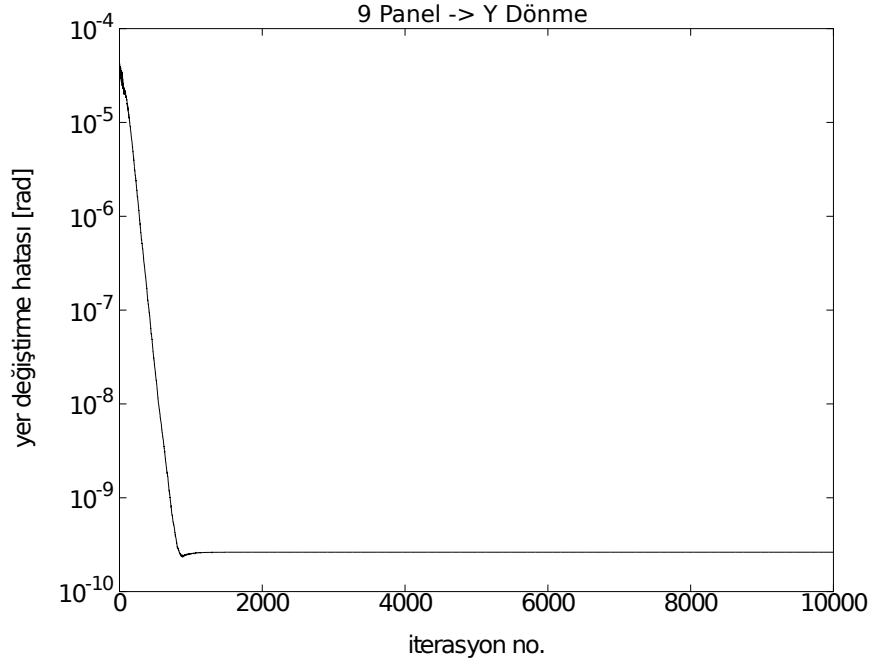
şekil B.8 : 9 panel - yer değiştirme hatası Y öteleme.



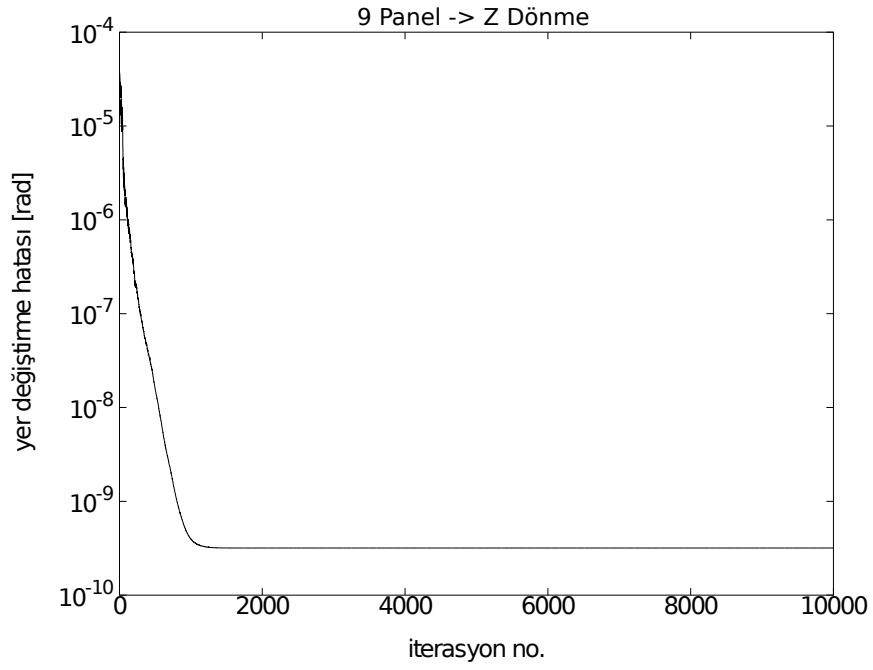
şekil B.9 : 9 panel - yer değiştirme hatası Z öteleme.



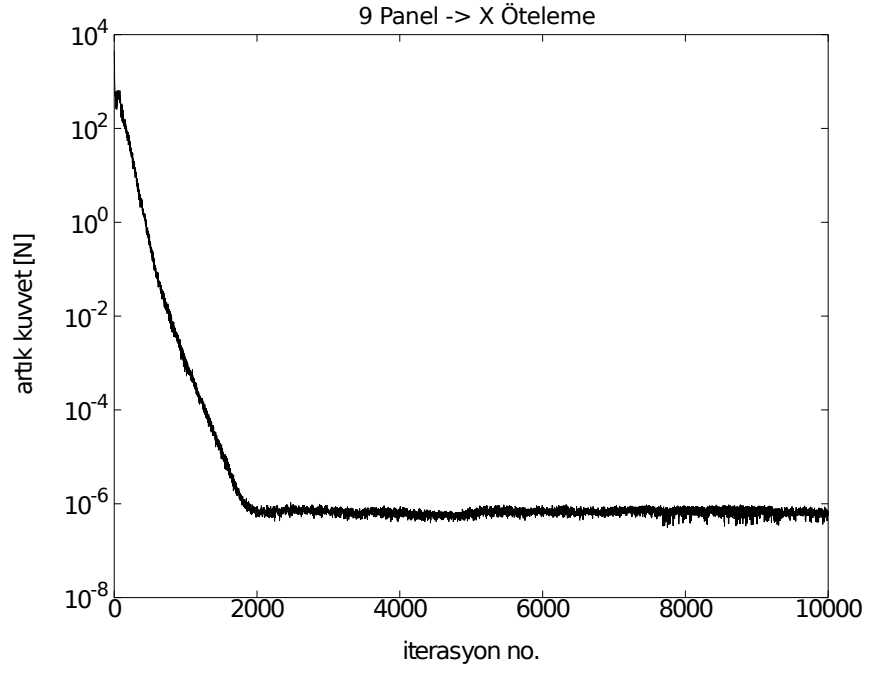
şekil B.10 : 9 panel - yer değiştirme hatası X dönme.



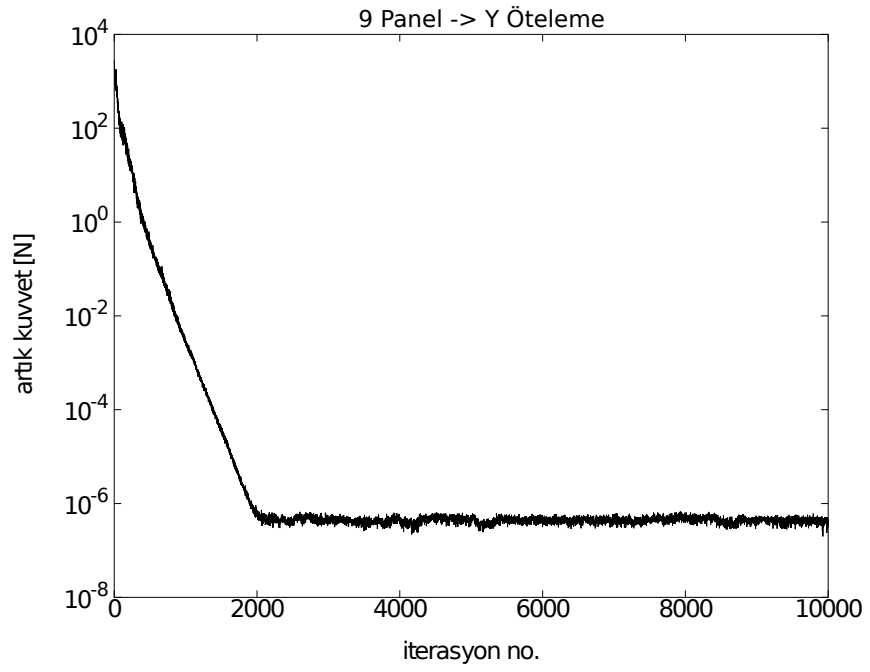
şekil B.11 : 9 panel - yer değiştirme hatası Y dönme.



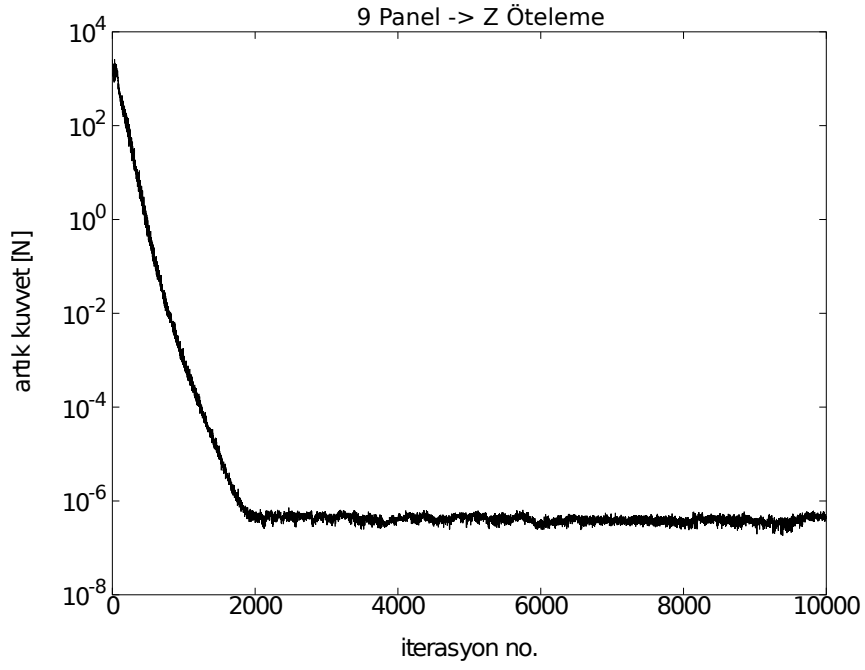
şekil B.12 : 9 panel - yer değiştirme hatası Z dönme.



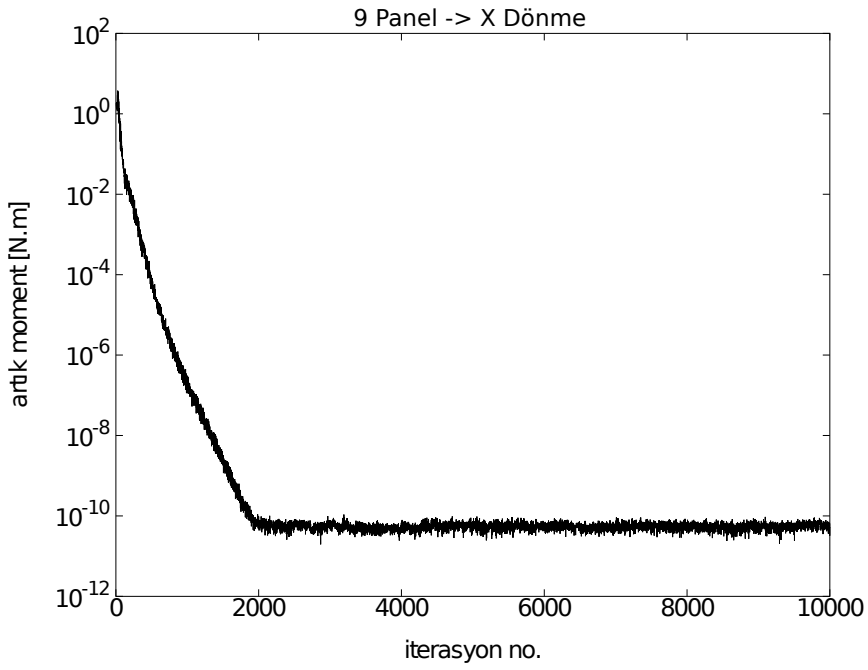
Şekil B.13 : 9 panel - artık kuvvet X öteleme.



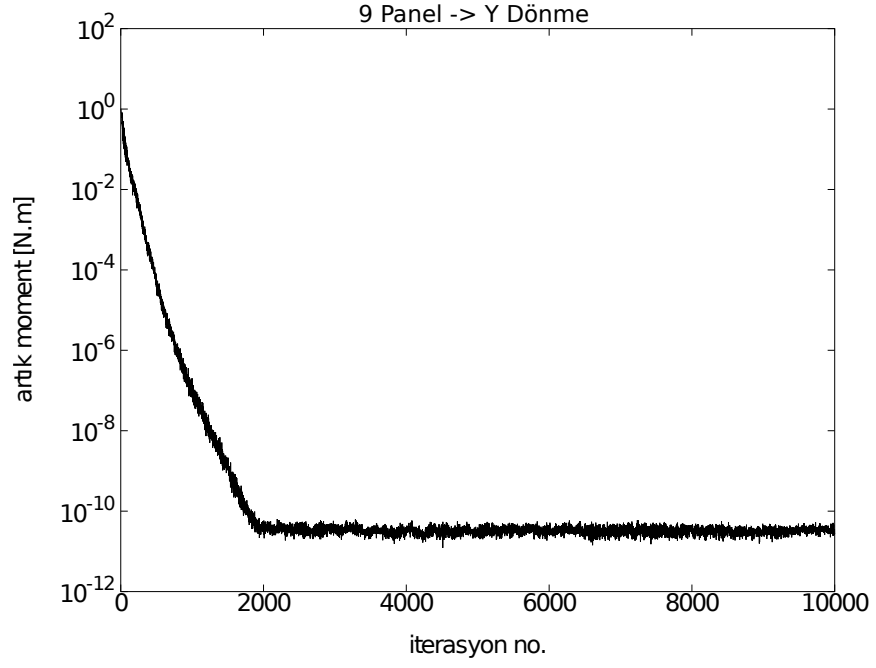
Şekil B.14 : 9 panel - artık kuvvet Y öteleme.



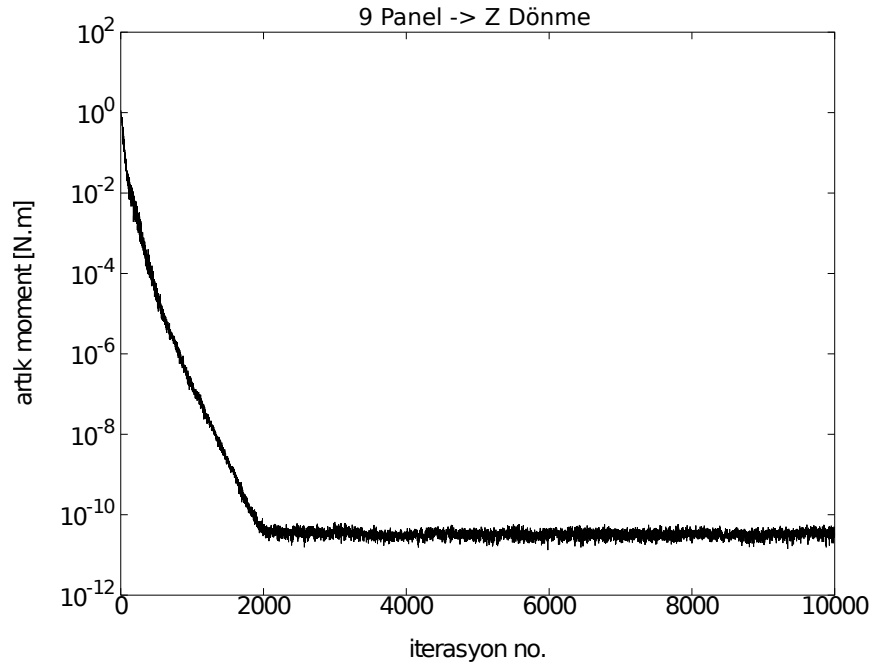
Şekil B.15 : 9 panel - artık kuvvet Z öteleme.



Şekil B.16 : 9 panel - artık moment X dönme.

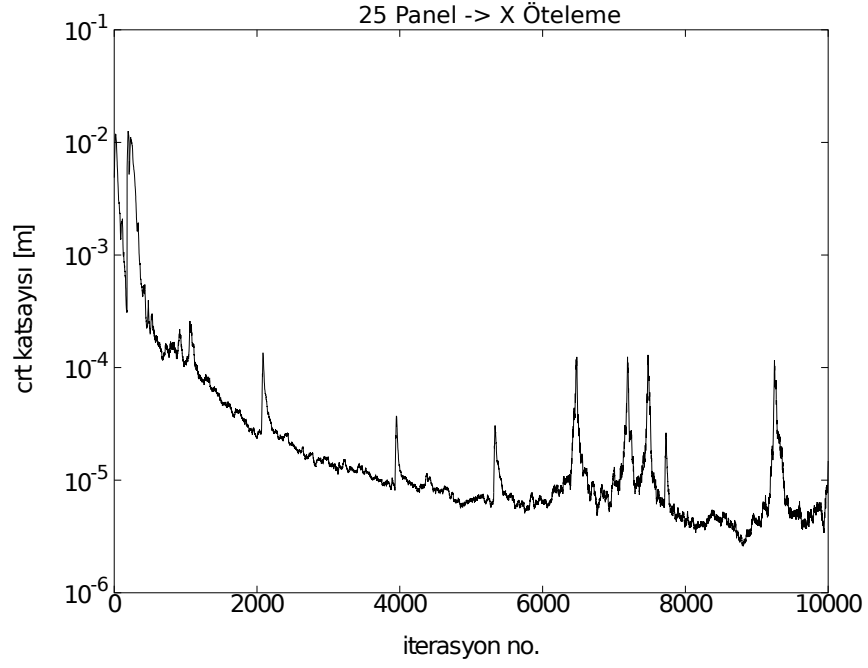


Şekil B.17 : 9 panel - artık moment Y dönme.

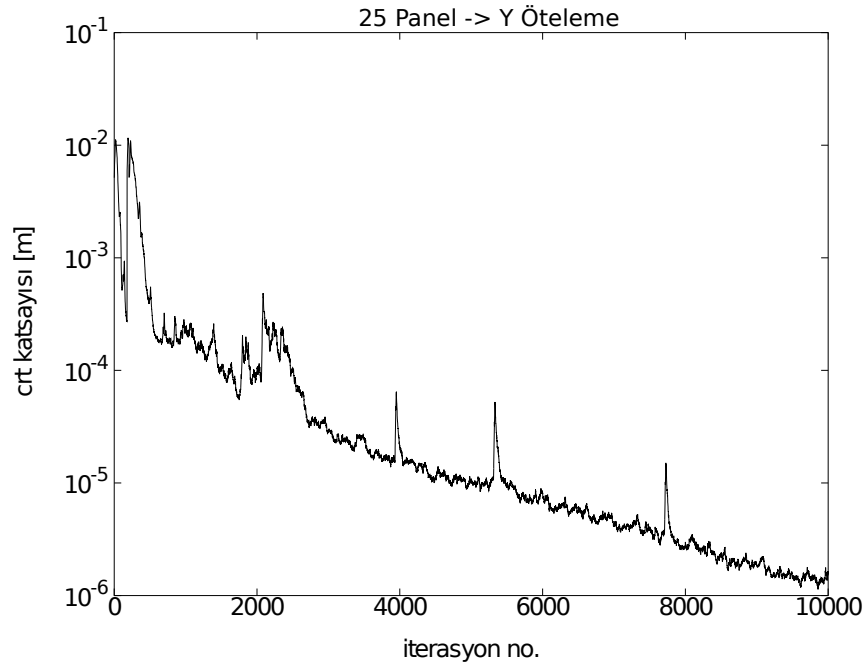


Şekil B.18 : 9 panel - artık moment Z dönme.

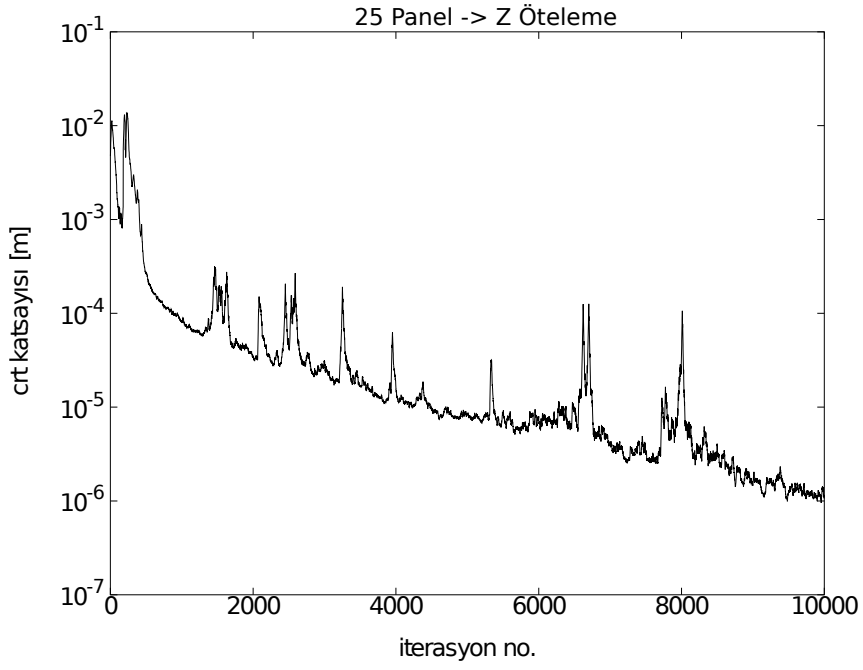
EK C: 25 Panelli Örnek, Tek Serbestlik Sonuç Grafikleri



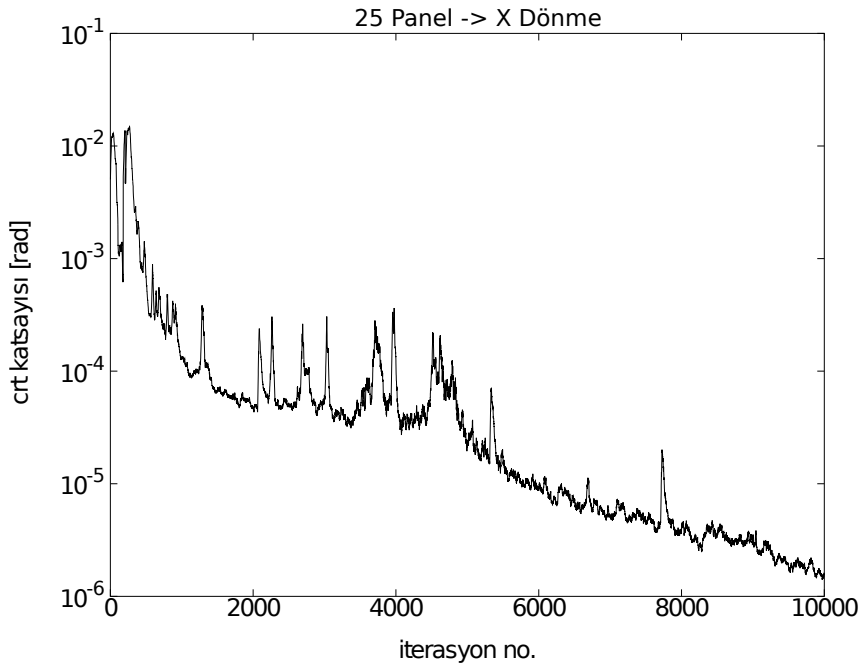
Şekil C.1 : 25 panel - güncelleme katsayısı X öteleme.



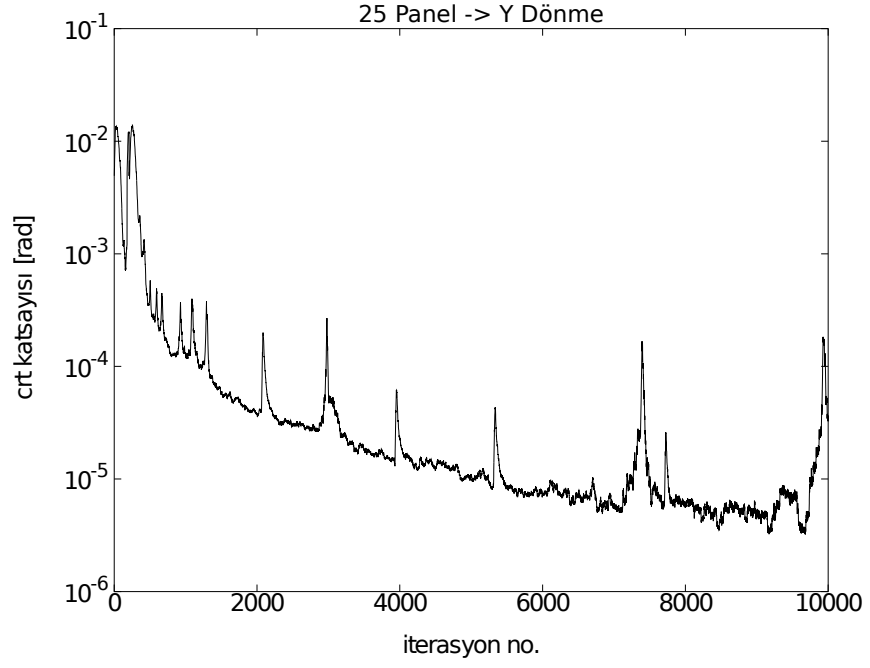
Şekil C.2 : 25 panel - güncelleme katsayısı Y öteleme.



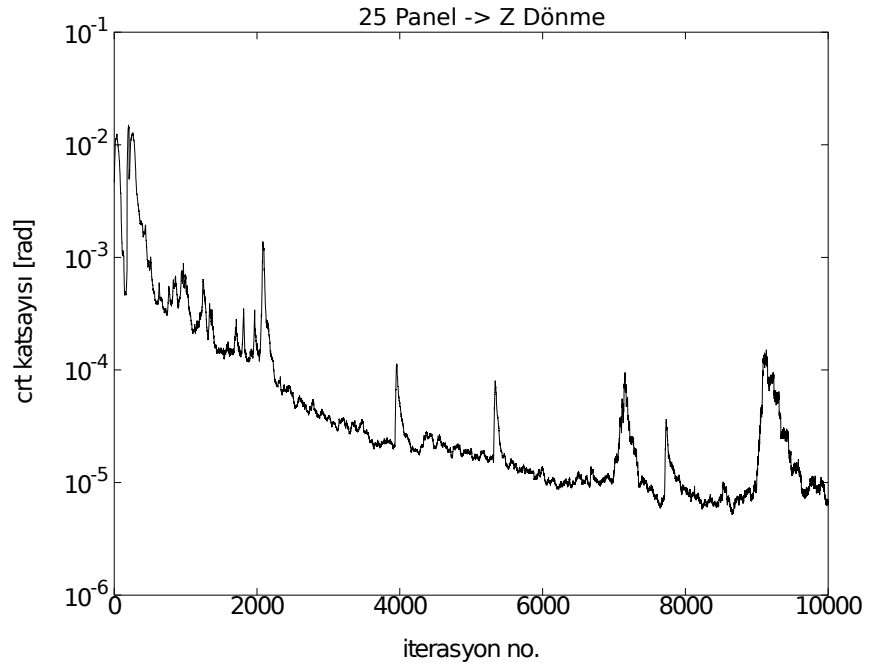
Şekil C.3 : 25 panel - güncelleme katsayısı Z öteleme.



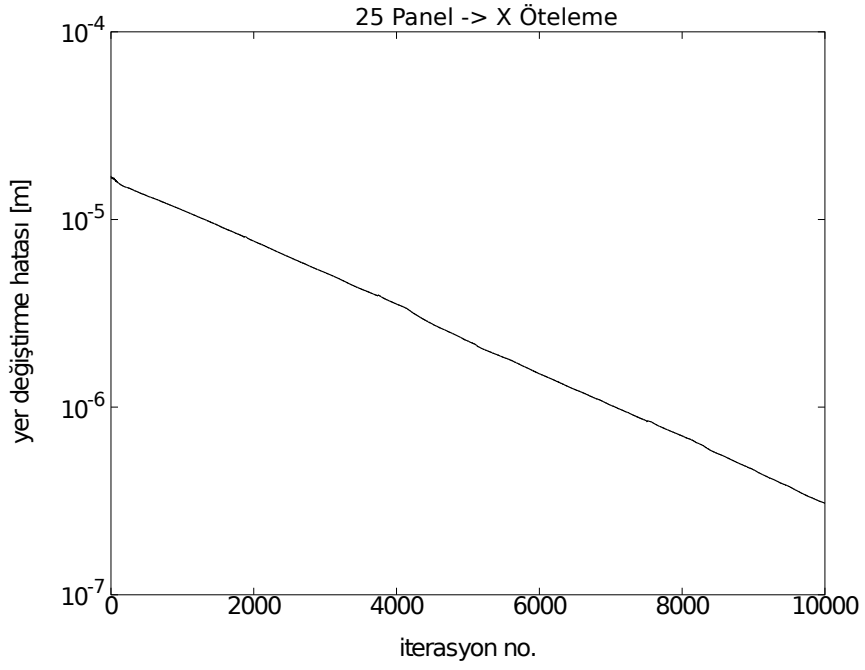
Şekil C.4 : 25 panel - güncelleme katsayısı X dönme.



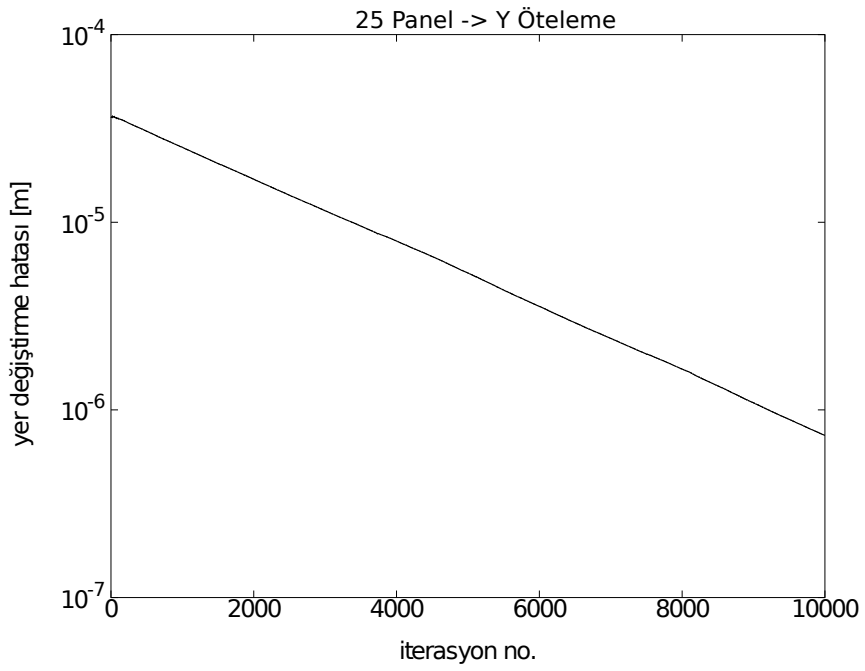
Şekil C.5 : 25 panel - güncelleme katsayısı Y dönme.



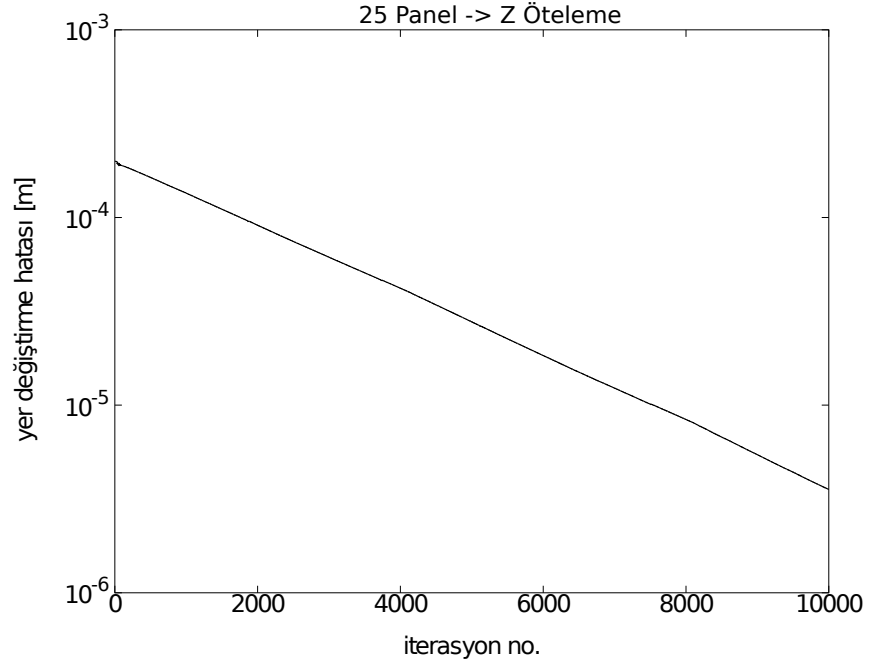
Şekil C.6 : 25 panel - güncelleme katsayısı Z dönme.



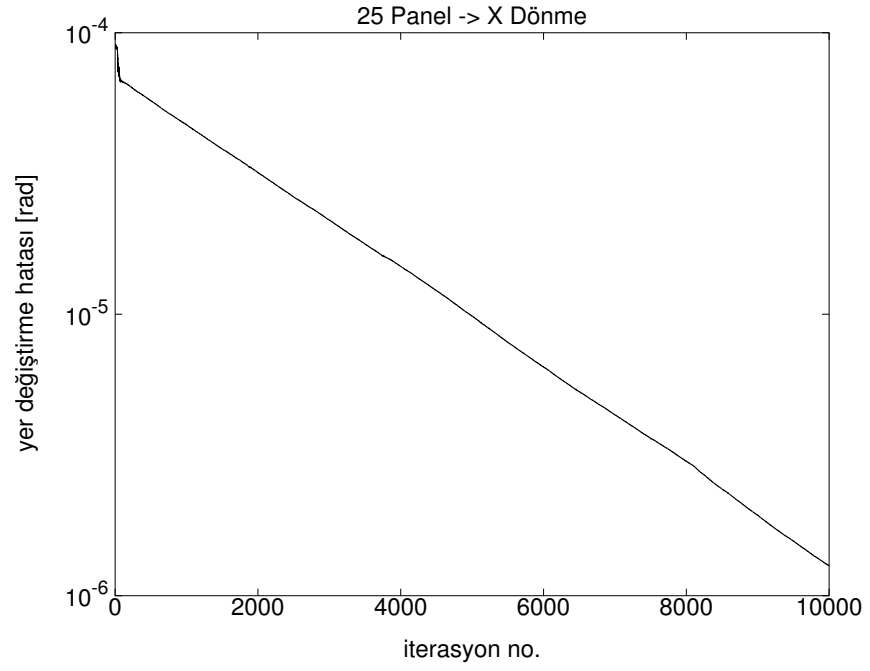
şekil C.7 : 25 panel - yer değiştirme hatası X öteleme.



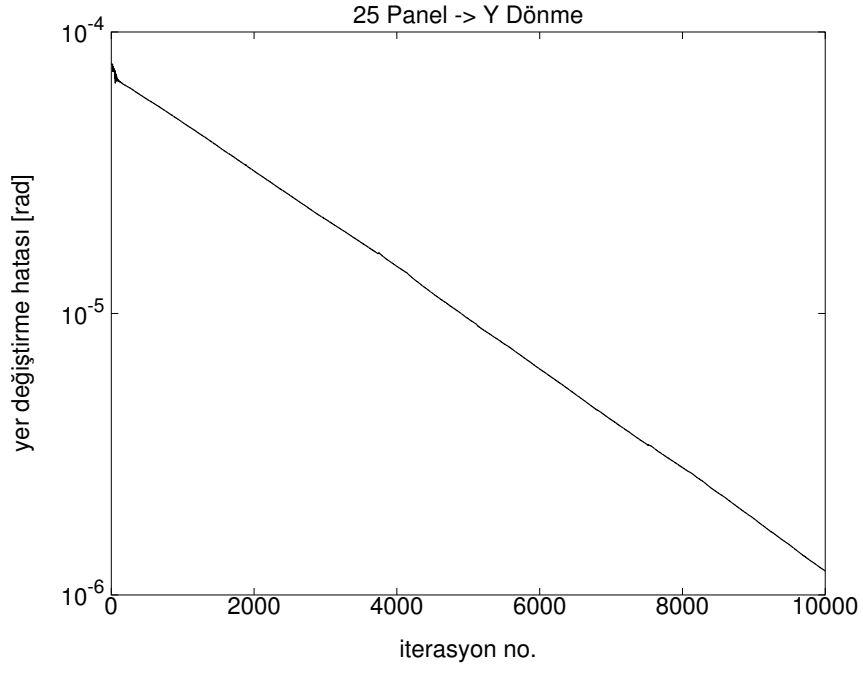
şekil C.8 : 25 panel - yer değiştirme hatası Y öteleme.



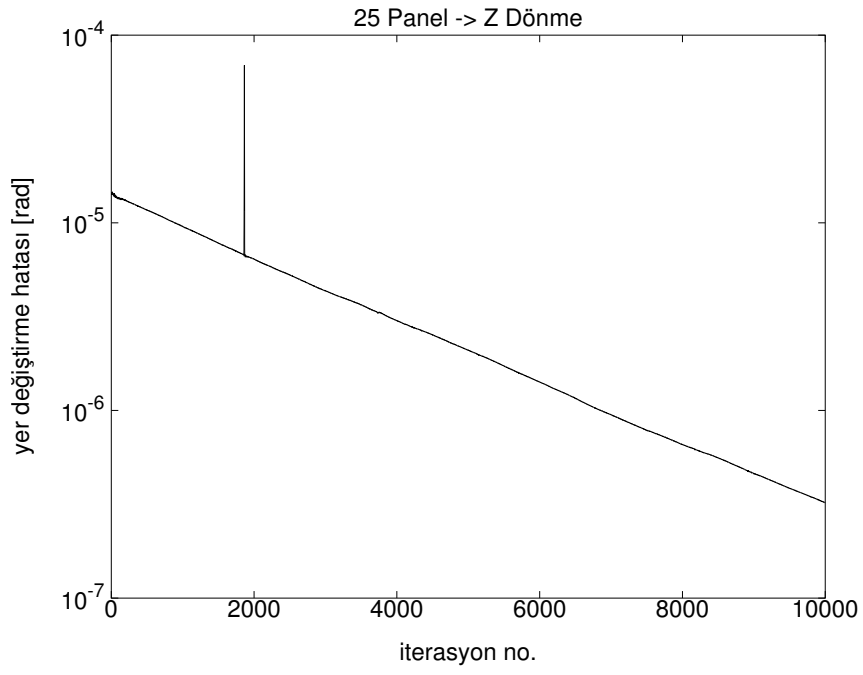
şekil C.9 : 25 panel - yer değiştirme hatası Z öteleme.



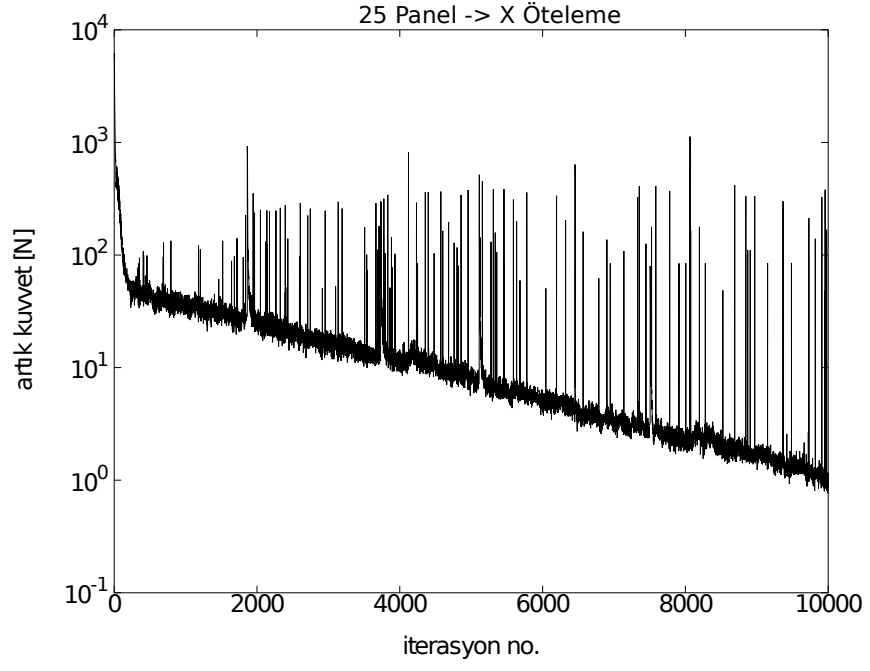
şekil C.10 : 25 panel - yer değiştirme hatası X dönme.



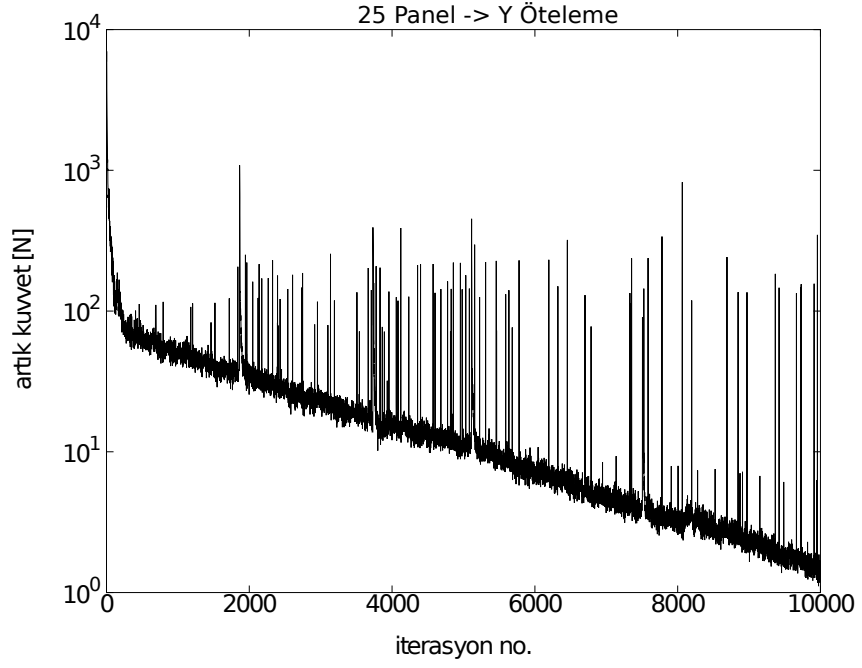
şekil C.11 : 25 panel - yer değiştirme hatası Y dönme.



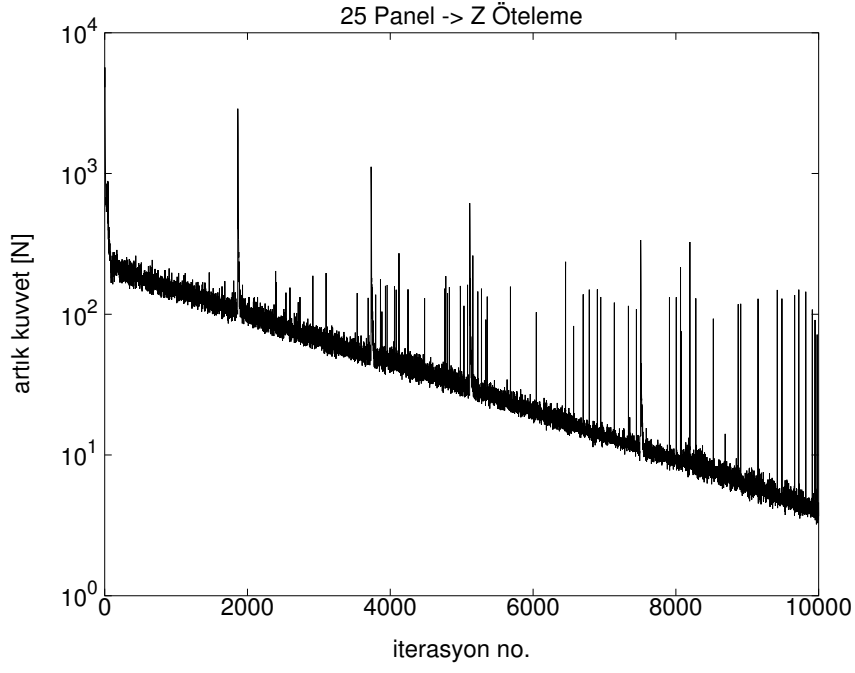
şekil C.12 : 25 panel - yer değiştirme hatası Z dönme.



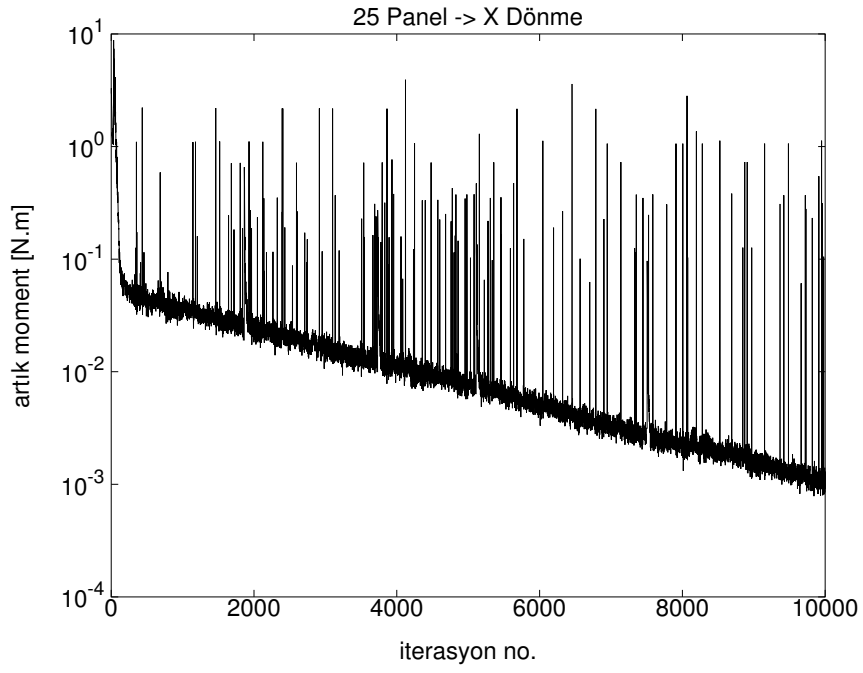
Şekil C.13 : 25 panel - artık kuvvet X öteleme.



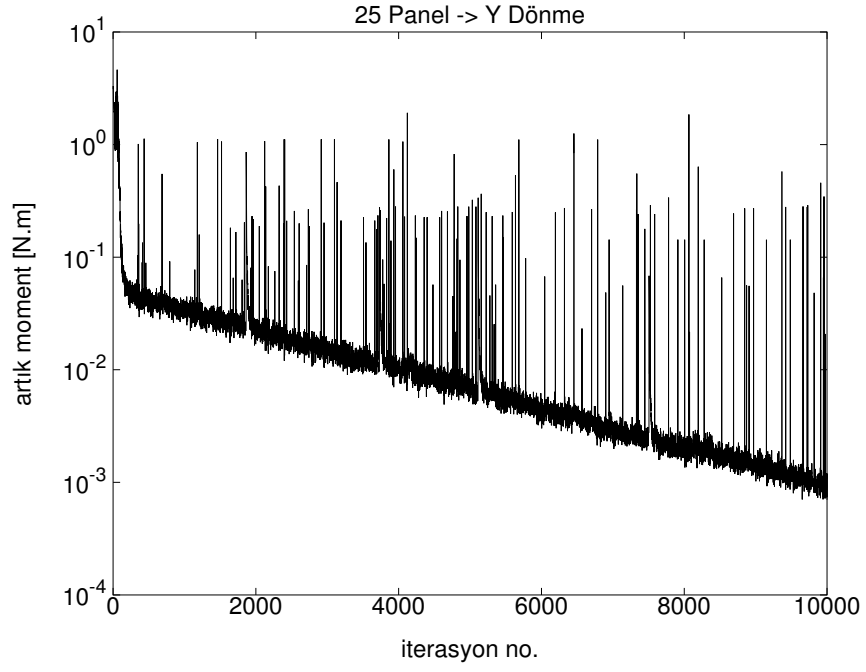
Şekil C.14 : 25 panel - artık kuvvet Y öteleme.



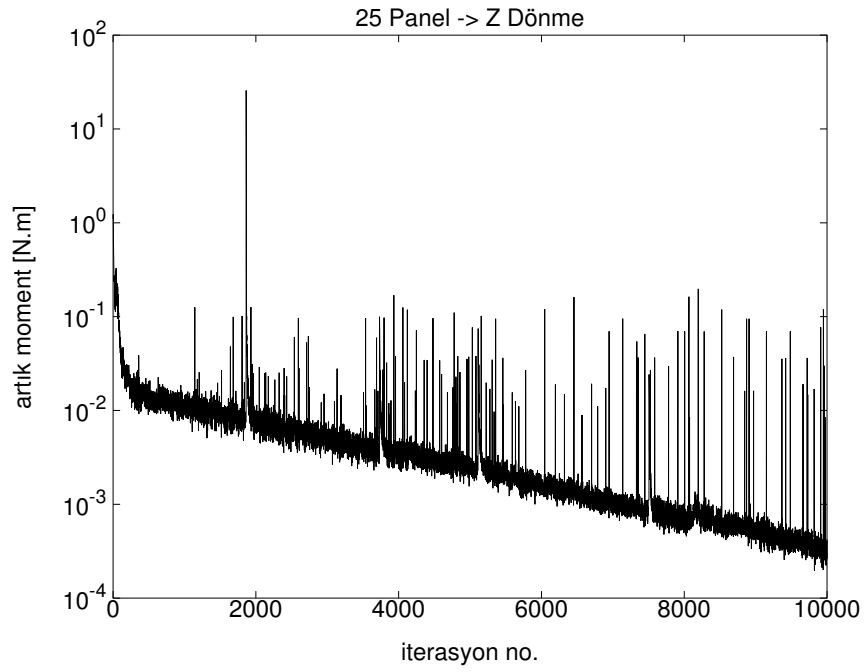
Şekil C.15 : 25 panel - artık kuvvet Z öteleme.



Şekil C.16 : 25 panel - artık moment X dönme.

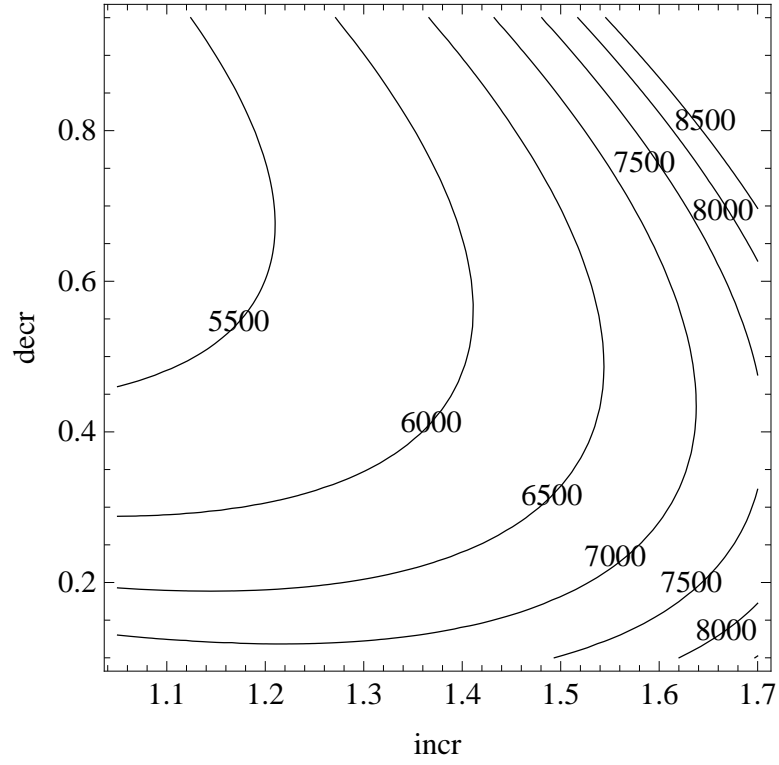


Şekil C.17 : 25 panel - artık moment Y dönme.

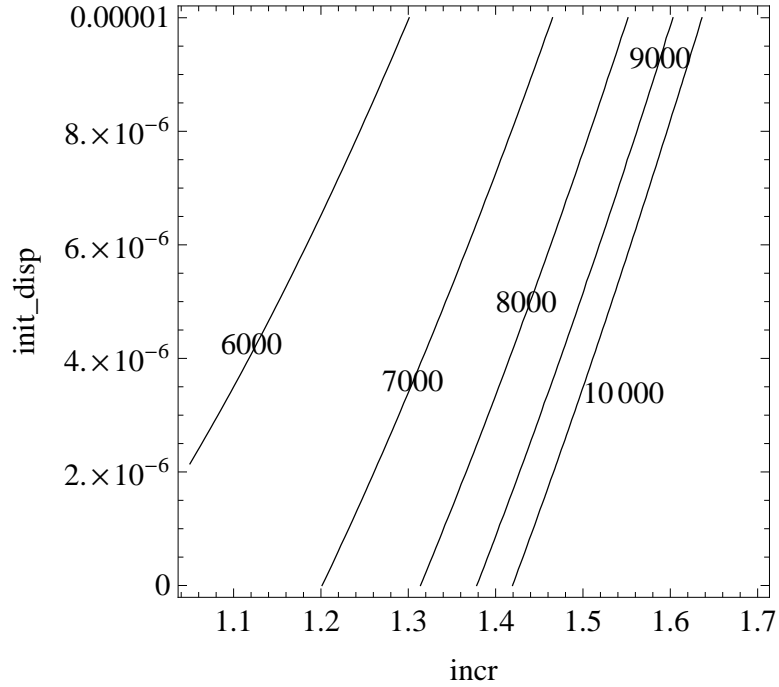


Şekil C.18 : 25 panel - artık moment Z dönme.

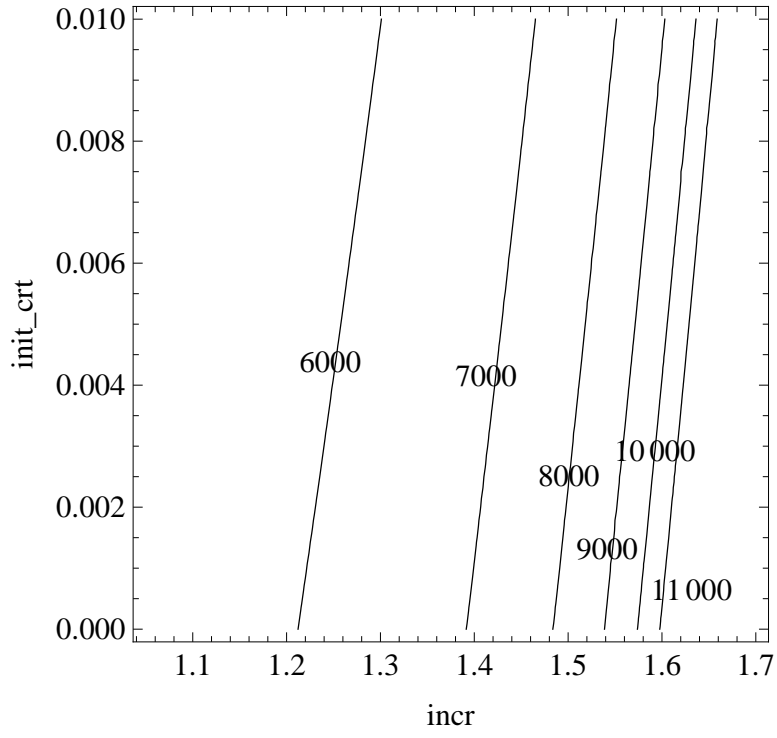
EK D: Hassaslık Analizi Ortalama Kontur Grafikleri



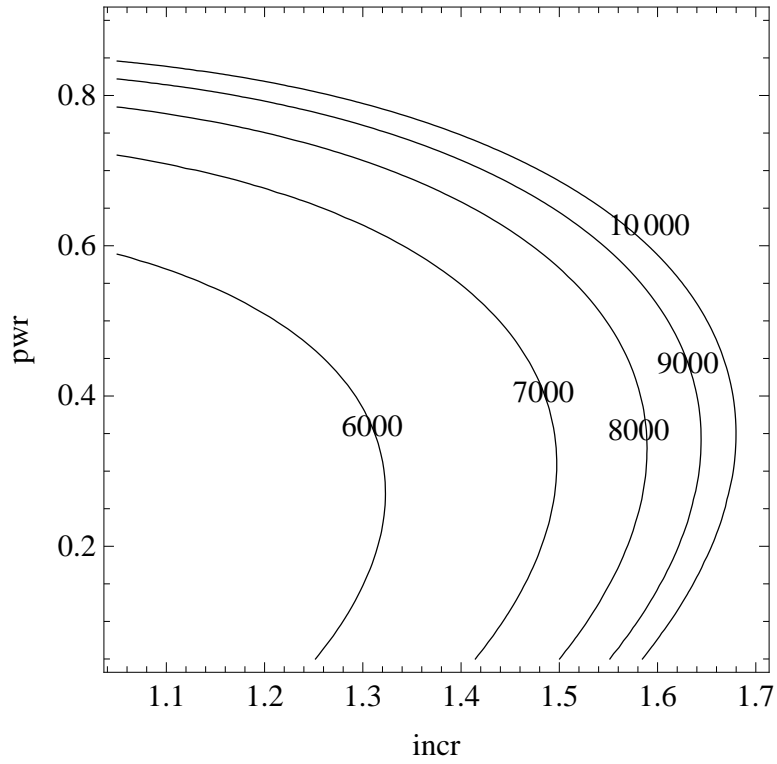
Şekil D.1 : Ortalama artık kuvvet/moment A-B.



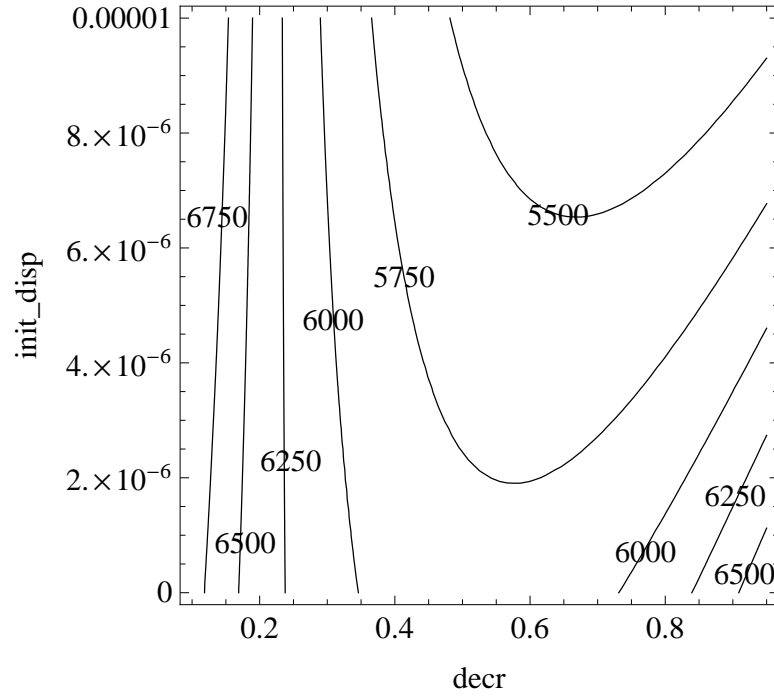
Şekil D.2 : Ortalama artık kuvvet/moment A-C.



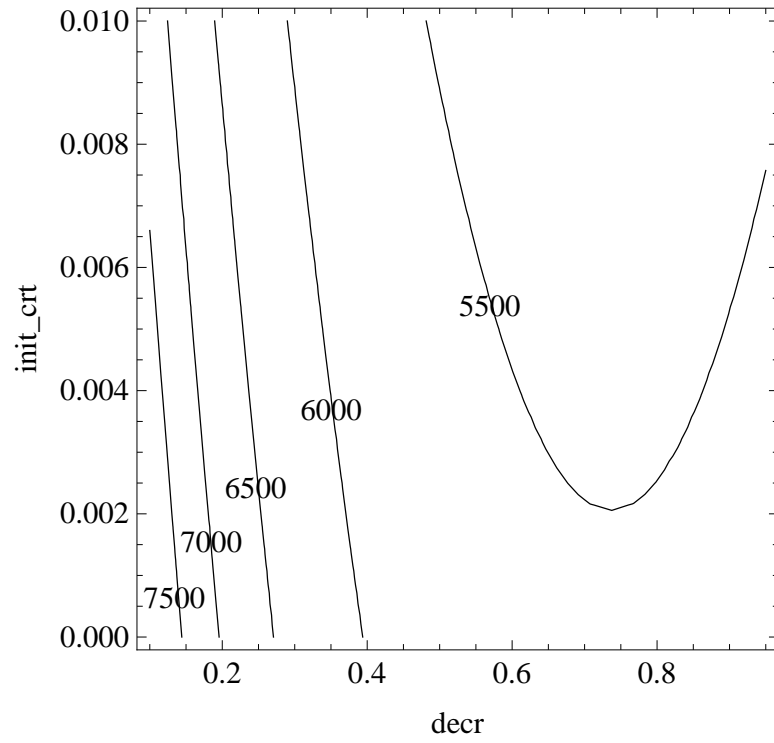
Şekil D.3 : Ortalama artık kuvvet/moment A-D.



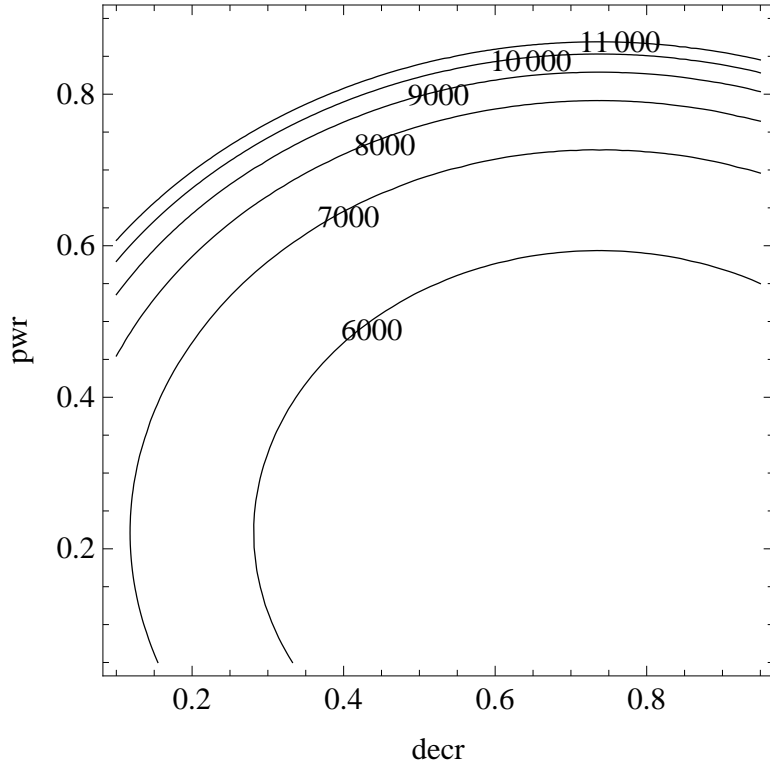
Şekil D.4 : Ortalama artık kuvvet/moment A-E.



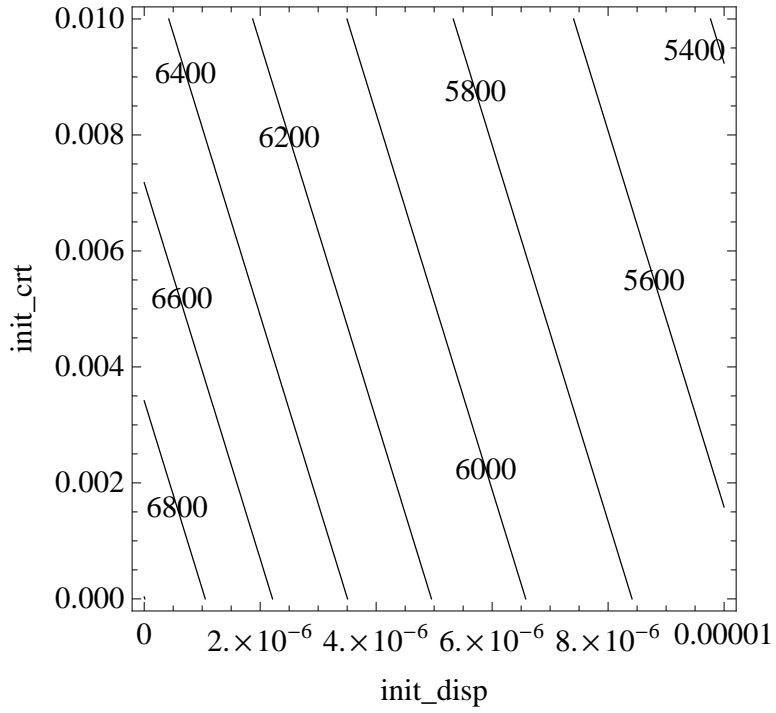
Şekil D.5 : Ortalama artık kuvvet/moment B-C.



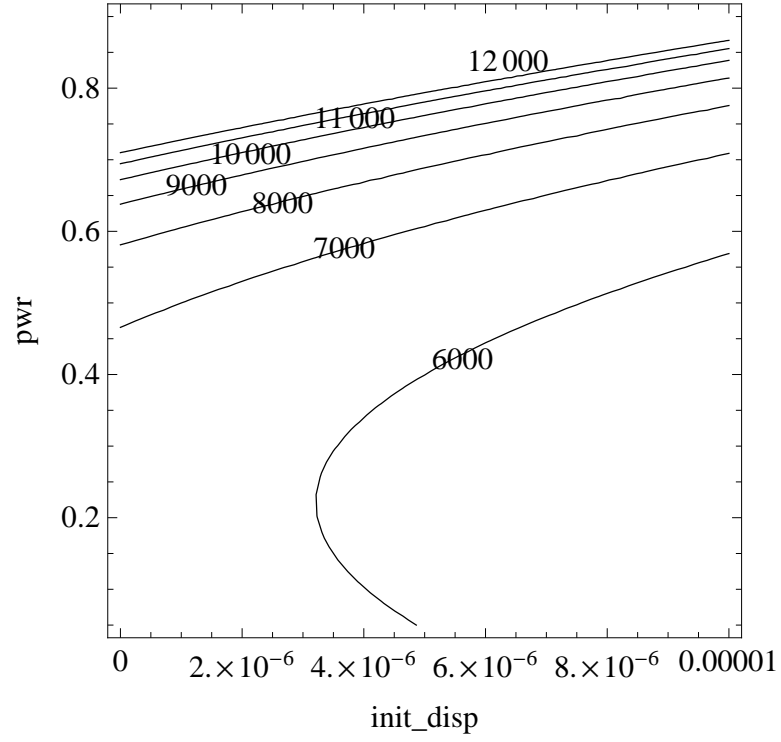
Şekil D.6 : Ortalama artık kuvvet/moment B-D.



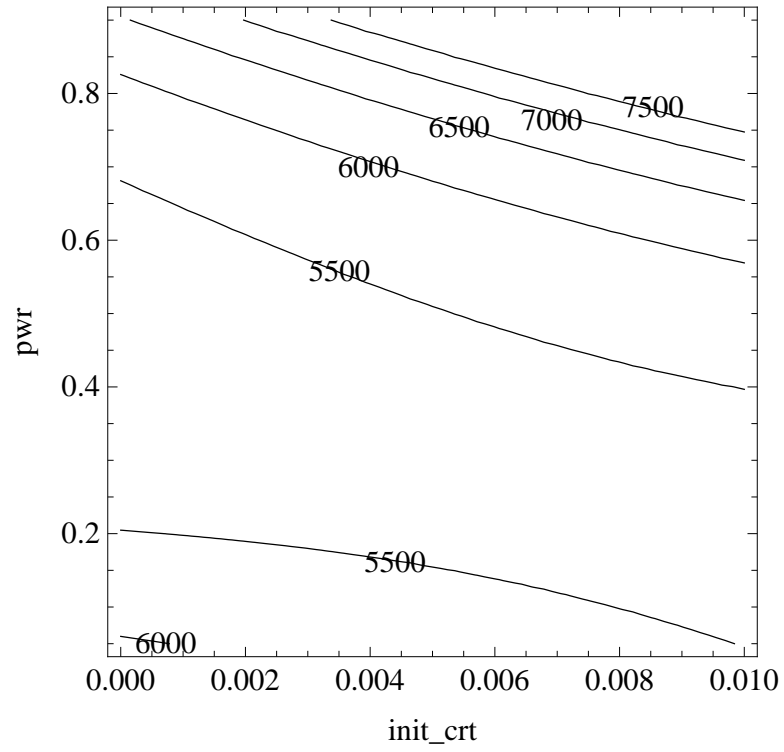
Şekil D.7 : Ortalama artık kuvvet/moment B-E.



Şekil D.8 : Ortalama artık kuvvet/moment C-D.

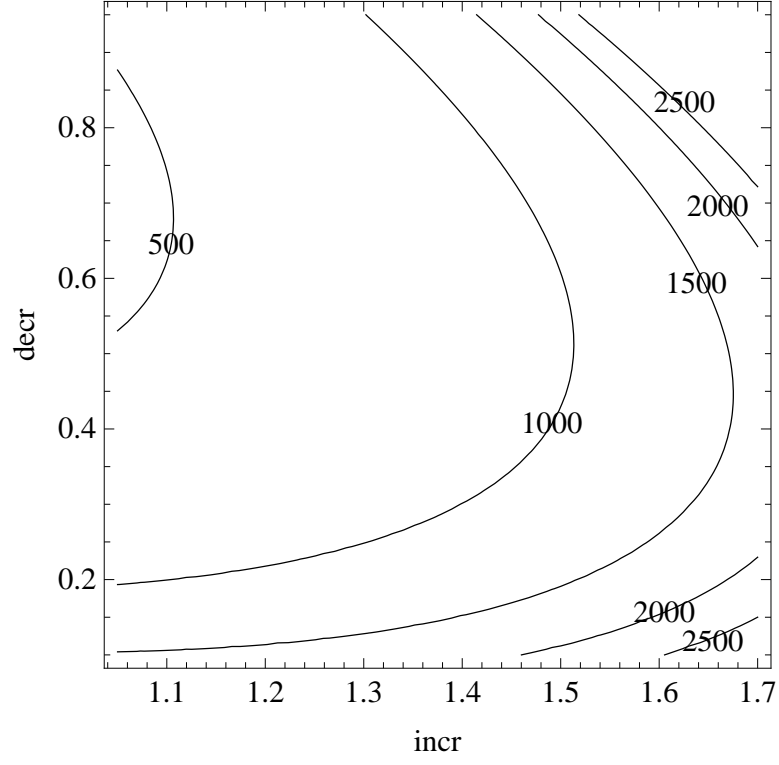


Şekil D.9 : Ortalama artık kuvvet/moment C-E.

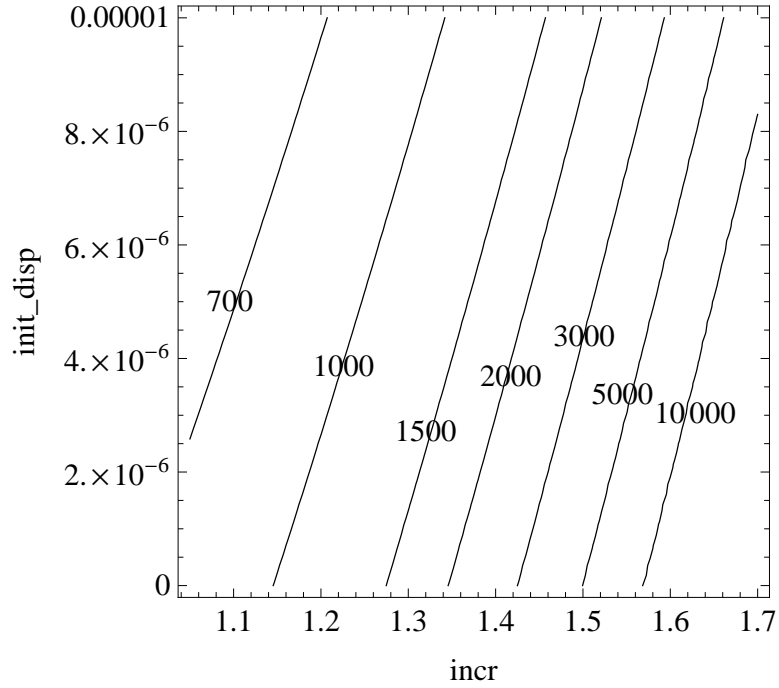


Şekil D.10 : Ortalama artık kuvvet/moment D-E.

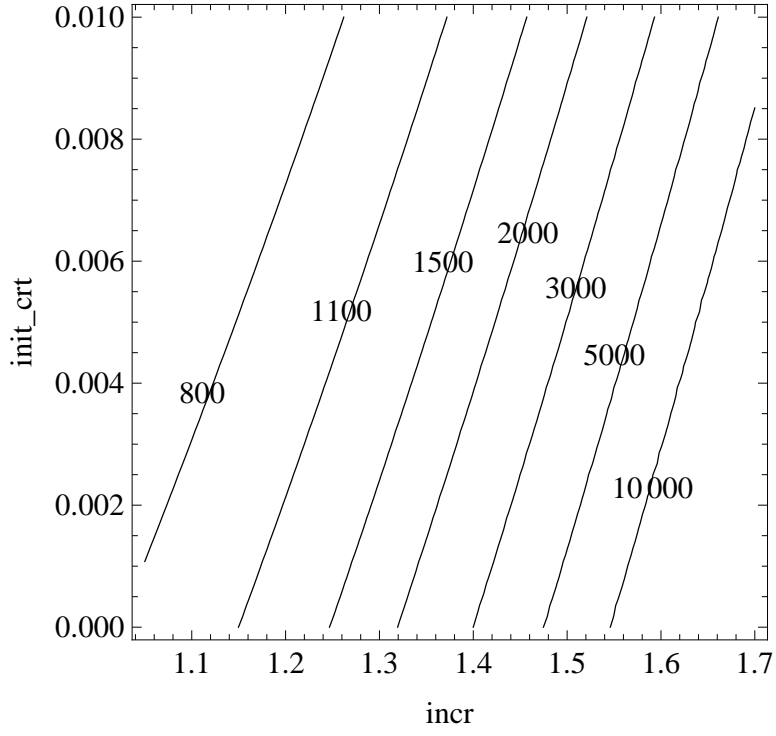
EK E: Hassaslık Analizi Standart Sapma Kontur Grafikleri



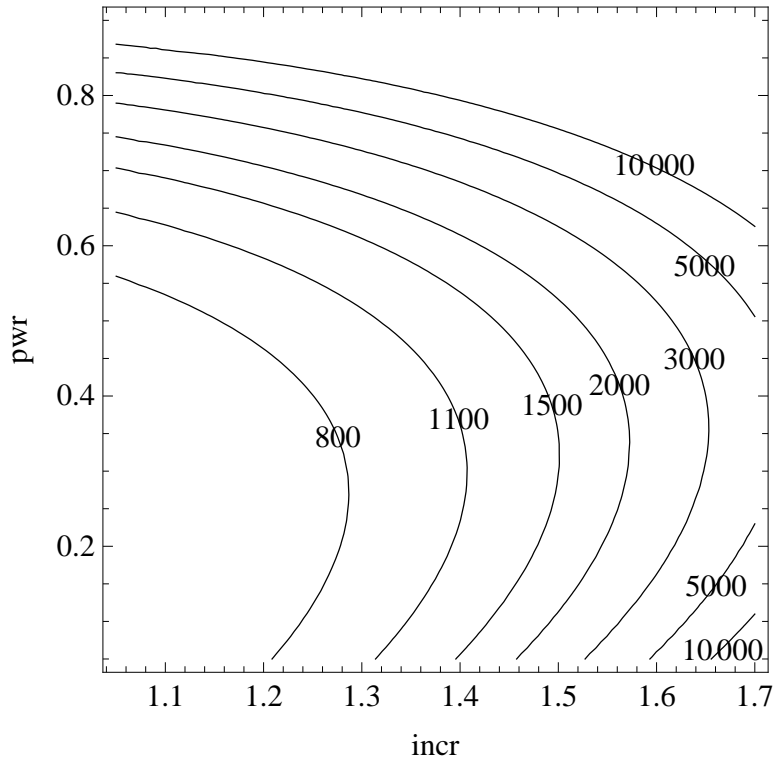
Şekil E.1 : Standart sapma artık kuvvet/moment A-B.



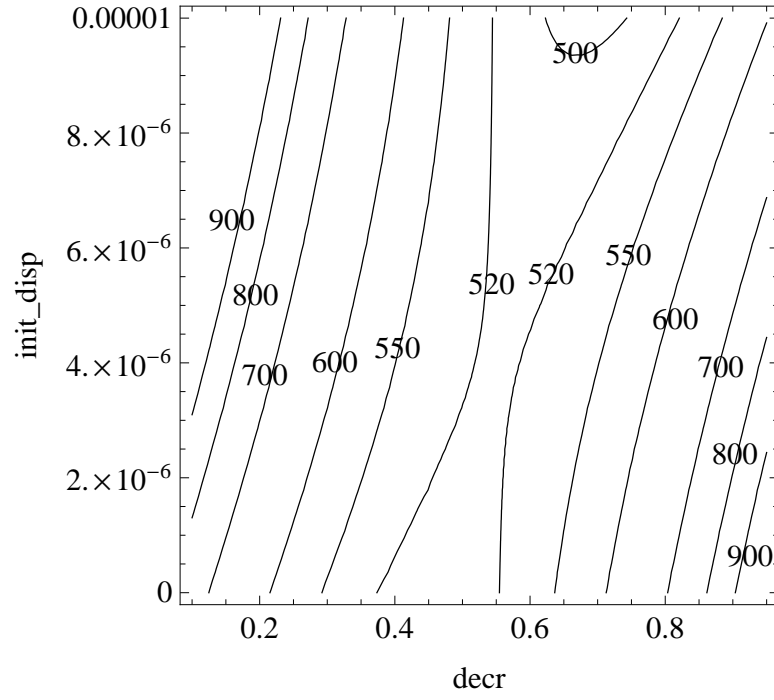
Şekil E.2 : Standart sapma artık kuvvet/moment A-C.



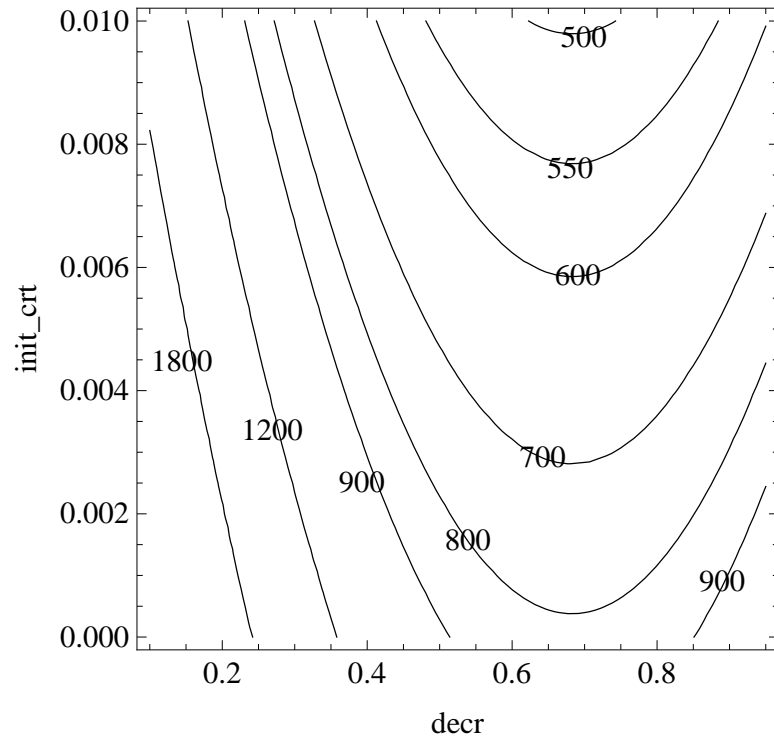
Şekil E.3 : Standart sapma artık kuvvet/moment A-D.



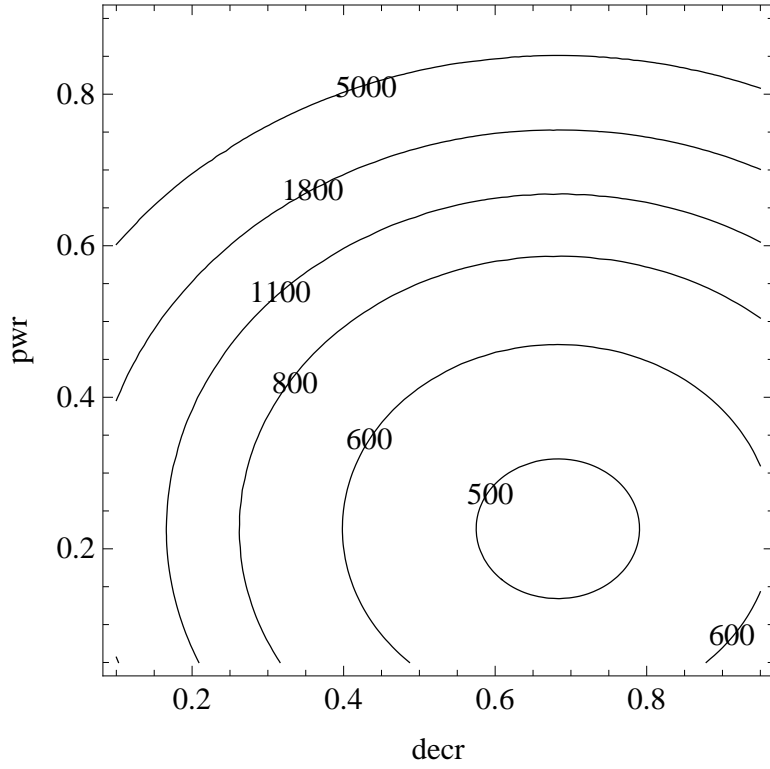
Şekil E.4 : Standart sapma artık kuvvet/moment A-E.



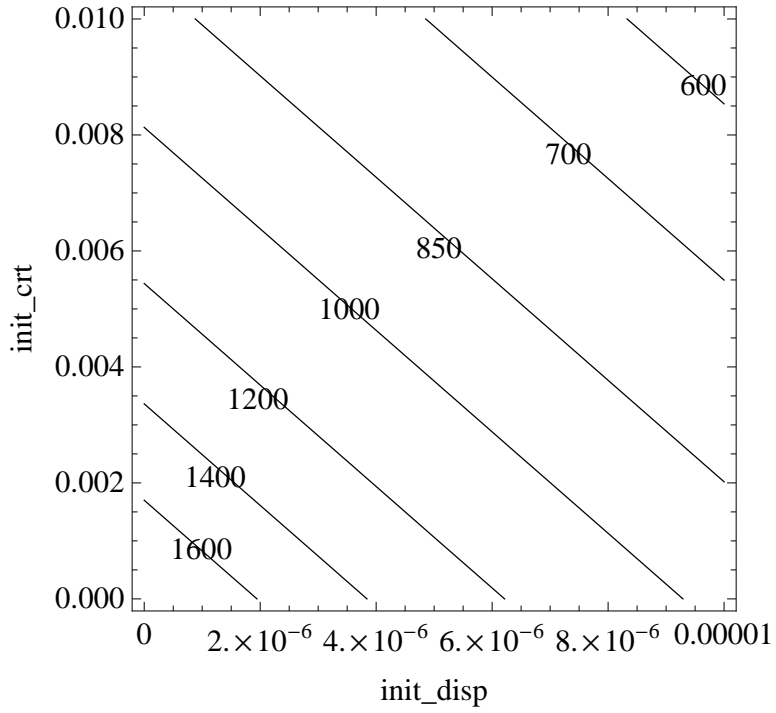
Şekil E.5 : Standart sapma artık kuvvet/moment B-C.



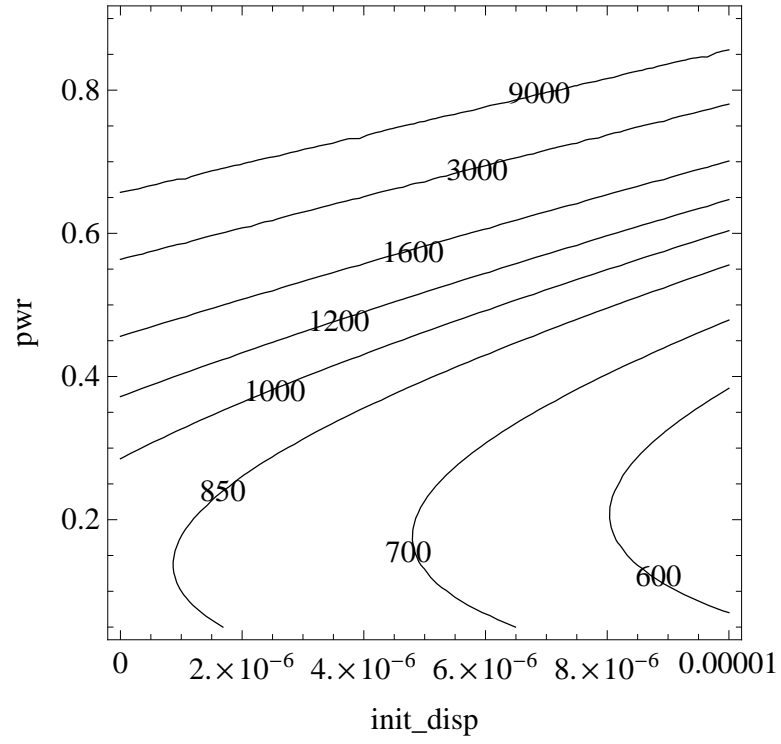
Şekil E.6 : Standart sapma artık kuvvet/moment B-D.



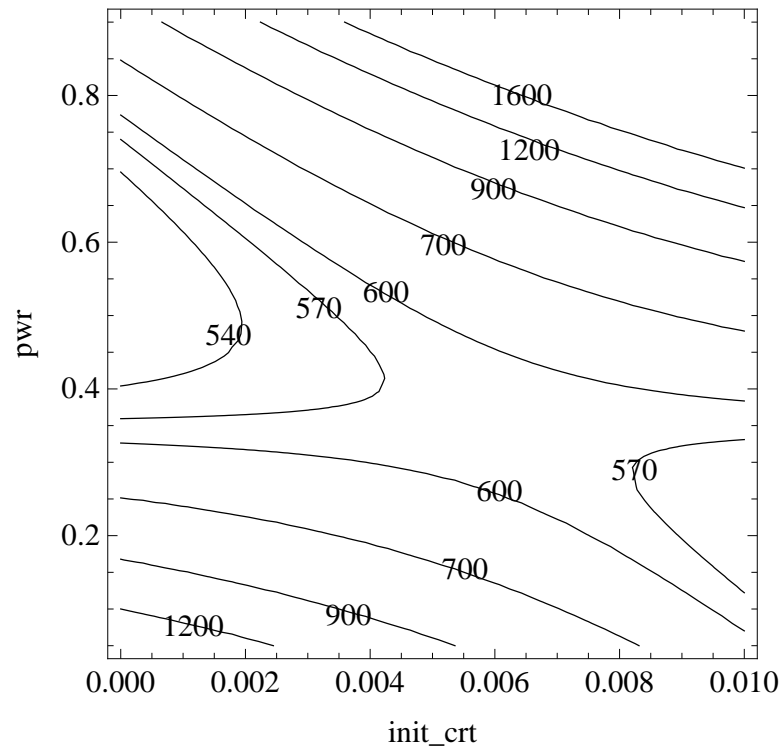
Şekil E.7 : Standart sapma artık kuvvet/moment B-E.



Şekil E.8 : Standart sapma artık kuvvet/moment C-D.



Şekil E.9 : Standart sapma artık kuvvet/moment C-E.



Şekil E.10 : Standart sapma artık kuvvet/moment D-E.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Serdar Aytekin KÖROĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 1982

Adres: Büyükdere Mah. Dereiçi Bağlar Yolu Sok. No:19/2 Sarıyer/İstanbul

E-Posta: info@serdarkoroglu.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi - Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği

Y. Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi - Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği

Mesleki Deneyim : 2010 - University of Florida - Ziyaretçi Araştırmacı
2005-(halen devam etmekte) İstanbul Teknik Üniversitesi - Araştırma Görevlisi
2004-2005 - Artı Mühendislik - Yapı Tasarımcısı

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Koroglu S.A., Ergin A. (2011). A decomposition algorithm for large scale surrogate models, *IMAM2011- International Maritime Association of East Mediterranean, Genoa, Italy.*

Koroglu S.A., Ergin A. (2012). A Domain Decomposition Algorithm for Surrogate Models of Ship Structures, *TEAM2012 - 26th Asia-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, Fukuoka, Japan.*

