

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ROBOT KOLU TASARIMINDA DİNAMİK ESNEK YAPI
MODELİ KULLANARAK TAHRİK GRUBU VE MEKANİK
YAPININ TÜMLEŞİK OPTİMİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

Musa Özgün GÜLEÇ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2023

**ROBOT KOLU TASARIMINDA DİNAMİK ESNEK YAPI
MODELİ KULLANARAK TAHRİK GRUBU VE MEKANİK
YAPININ TÜMLEŞİK OPTİMİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

**Musa Özgün GÜLEÇ
(503142021)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şeniz ERTUĞRUL

HAZİRAN 2023

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**INTEGRATED DRIVE-TRAIN AND MECHANICAL STRUCTURE
OPTIMIZATION USING DYNAMIC FLEXIBLE STRUCTURE
MODEL IN ROBOT MANIPULATOR DESIGN**

Ph.D. THESIS

**Musa Özgün GÜLEÇ
(503142021)**

Department of Mechanical Engineering

Mechanical Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr.Şeniz ERTUĞRUL

JUNE 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503142021 numaralı Doktora Öğrencisi Musa Özgün GÜLEÇ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ROBOT KOLU TASARIMINDA DİNAMİK ESNEK YAPI MODELİ KULLANARAK TAHRİK GRUBU VE MEKANİK YAPININ TÜMLEŞİK OPTİMİZASYONU” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Şeniz ERTUĞRUL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ata MUĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet İ. Can DEDE
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Doç. Dr. Yağız BAYRAKTAROĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Koray Kadir ŞAFAK
Yeditepe Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Mayıs 2023**
Savunma Tarihi : **12 Haziran 2023**





Eşime ve oğluma,



ÖNSÖZ

Optimizasyonun, robot tasarımı veya diğer dinamik sistem tasarımlarında kullanılmasının sağladığı faydaların gözlemlenmesi, araştırmacıları bu konuda çalışmaya yöneltmiştir. Öyle ki, artık tasarım optimizasyonu bir gereklilik haline dönüşmeye başlamıştır.

Son yıllarda bu konudaki çalışmaların artışı, benim de doktora çalışmamı robot kolu tasarımında tahrik grubu ve mekanik yapının tümleşik optimizasyonu konusu üzerine seçmemi teşvik etmiştir. Doktora çalışmam ve elde ettiğim sonuçlar ile hem dünya literatürüne hem de ülkemizde yapılan bu çalışma sayesinde ülkemize, elimden geldiği kadar katkı sağlamaya çalıştım.

Doktora tez çalışmamda başta danışmanım Prof.Dr. Şeniz ERTUĞRUL'a bütün doktora sürecimde benden hiçbir yardımı esirgemediği ve sürekli motivasyon sağladığı için, jüri üyeleri Prof.Dr. Ata MUĞAN ve Prof.Dr. Mehmet İsmet Can DEDE'ye tez çalışmam boyunca sağladıkları destek ve faydalı yönlendirmelerinden dolayı, son olarak sevgili eşim Esra GÜLEÇ ve oğlum Barış GÜLEÇ'e bütün çalışmalarım sırasında bana her zaman varlıklarını hissettirdikleri ve destek verdikleri için çok teşekkür ederim.

Mayıs 2023

Musa Özgün GÜLEÇ
(Makina Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	4
2. TAHRİK GRUBU KÜTÜPHANESİ	9
3. ÇOKLU PARAMETRE TAHMİNİ YÖNTEMİ İLE ESNEK YAPI DİNAMİK BENZETİMİ	13
4. BULUŞSAL YÖNTEM İLE OPTİMİZASYON	15
4.1 Buluşsal Optimizasyon Döngüsü	17
4.1.1 Adım 1 : Tasarım parametreleri ve kısıtların belirlenmesi	17
4.1.2 Adım 2 : Harmonic Drive® dişli kutusu seçimi	18
4.1.3 Adım 3 : Uzun kalınlıklarının belirlenip döngünün başlatılması ve motorların yeterliliğinin denetlenmesi	20
4.1.4 Adım 4 : Yetersiz motorların yeniden seçimi	21
4.1.5 Adım 5 : Harmonic Drive® dişli kutularının yeterliliğinin denetlenmesi	21
4.1.6 Adım 6 : Yetersiz olan Harmonic Drive® dişli kutularının yeniden seçimi	21
4.1.7 Adım 7 : Esnek yapı dinamik benzetim ortamında yapıların yeterliliğinin belirlenmesi	22
4.1.8 Adım 8 : Yetersiz yapı et kalınlıklarının arttırılması	27
4.1.9 Adım 9 : Acil durma anı için Harmonic Drive® dayanımının testi	28
4.1.10 Adım 10 : Acil durma senaryosuna dayanamayan Harmonic Drive® dişli kutularının yeniden seçimi	28
4.1.11 Adım 11 : Optimizasyonun sonlandırılması ve sonuçların elde edilmesi	29
4.2 Buluşsal Algoritma için Örnek Optimizasyon ve Sonuçları	29
5. BSGA-II İLE PARETO OPTİMUM ÇÖZÜM KÜMESİNİN ELDE EDİLMESİ	35
5.1 Akış Diyagramının Adımları	37
5.1.1 İlk nüfusun ' P_t ' oluşturulması	37
5.1.2 Bireylerin birbirini baskılama kuralları ve sıralanmaları	40
5.1.3 Çaprazlama, mutasyon ve yeni nüfusun ' Q_t ' elde edilmesi	41
5.1.4 Yoğunluk mesafesine göre sıralama	43
5.2 BSGA-II Yöntemi ile Yapılan Örnek Optimizasyon ve Sonuçları	44
5.2.1 Örnek 1 (ana örnek)	44
5.2.2 Örnek 2	51
5.2.3 Örnek 3	56
5.2.4 Örnek 4	60
5.2.5 Örnek 5	64

5.2.6 Örnek 6	69
5.2.7 Örnek 7	74
5.2.8 Örneklerin kıyaslanması	79
6. SONUÇLAR	83
6.1 Tezin Literatüre Katkısı.....	85
6.2 Tartışma	86
KAYNAKLAR.....	89
ÖZGEÇMİŞ	93



KISALTMALAR

BSGA	: Baskılanmayanları Sıralayan Genetik Algoritma
BSGA-II	: Baskılanmayanları Sıralayan Genetik Algoritma-II
BSGA-III	: Baskılanmayanları Sıralayan Genetik Algoritma-III
ÇAPSO	: Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu
ÇAGA	: Çok Amaçlı Genetik Algoritma
ÇADE	: Çok Amaçlı Diferansiyel Evrim
DH	: Denavit-Hartenberg
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
D/dk	: Dakikadaki Devir Sayısı
M1K	: Motor 1 Kütlesi (<i>kg</i>)
M2K	: Motor 2 Kütlesi (<i>kg</i>)
M3K	: Motor 3 Kütlesi (<i>kg</i>)
DK1K	: Dişli Kutusu 1 Kütlesi (<i>kg</i>)
DK2K	: Dişli Kutusu 2 Kütlesi (<i>kg</i>)
DK3K	: Dişli Kutusu 3 Kütlesi (<i>kg</i>)
U1K	: Uzu 1 Kütlesi (<i>kg</i>)
U2K	: Uzu 2 Kütlesi (<i>kg</i>)
U3K	: Uzu 3 Kütlesi (<i>kg</i>)
D.uzuv_{ic}	: Uzu iç çapı (<i>mm</i>)
SU1_{statik}	: 1. Uzu statik konumdaki sehim mitarı (<i>mm</i>)
SU2_{statik}	: 2. Uzu statik konumdaki sehim mitarı (<i>mm</i>)
SU3_{statik}	: 3. Uzu statik konumdaki sehim mitarı (<i>mm</i>)
L1	: Uzu 1 Uzunluğu (<i>mm</i>)
L2	: Uzu 2 Uzunluğu (<i>mm</i>)
L3	: Uzu 3 Uzunluğu (<i>mm</i>)



SEMBOLLER

E	: Elastisite Modülü (N/mm^2)
I	: Eylemsizlik Momenti (mm^4)
t	: Zaman
g	: Yer Çekim İvmesi (9,81) (m/s^2)





ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 : 3 Serbestlik Dereceli Robot DH Parametreleri.	2
Çizelge 1.2 : Tez Çalışmasının Literatürdeki En Yakın Çalışmalar ile Kıyası.....	8
Çizelge 2.1 : Maxon® DC Motor Teknik Verisi.....	10
Çizelge 2.2 : Harmonic Drive® Teknik Verisi.....	11
Çizelge 4.1 : Tasarım Parametreleri.	16
Çizelge 4.2 : Kısıtlar.	16
Çizelge 4.3 : 4 Serbestlik Dereceli Sanal Robot DH Parametreleri.	24
Çizelge 4.4 : Robot Yatay Konumda Açısız Hatalar Dahil Açık Değerleri.	26
Çizelge 4.5 : Örnek Optimizasyon Tasarım Parametreleri.....	29
Çizelge 4.6 : Örnek Optimizasyon Kısıtları.	29
Çizelge 4.7 : Örnek Optimizasyon Genel Sonuçları.	34
Çizelge 5.1 : BSGA-II Yöntemi Tasarım Parametreleri.	36
Çizelge 5.2 : BSGA-II Yöntemi Kısıtları.....	37
Çizelge 5.3 : Örnek 1 Optimizasyon Tasarım Parametreleri.....	45
Çizelge 5.4 : Örnek 1 Optimizasyon Kısıtları.	45
Çizelge 5.5 : Örnek 1 Pareto Optimum Çözüm Kümesi.....	50
Çizelge 5.6 : Örnek 1 Çözüm 12 Genel Sonuçları.....	52
Çizelge 5.7 : Örnek 2 Optimizasyon Tasarım Parametreleri.....	52
Çizelge 5.8 : Örnek 2 Optimizasyon Kısıtları.	52
Çizelge 5.9 : Örnek 2 Pareto Optimum Çözüm Kümesi.....	56
Çizelge 5.10 : Örnek 3 Optimizasyon Tasarım Parametreleri.....	57
Çizelge 5.11 : Örnek 3 Optimizasyon Kısıtları.	57
Çizelge 5.12 : Örnek 3 Pareto Optimum Çözüm Kümesi.....	61
Çizelge 5.13 : Örnek 4 Optimizasyon Tasarım Parametreleri.....	61
Çizelge 5.14 : Örnek 4 Optimizasyon Kısıtları.	61
Çizelge 5.15 : Örnek 4 Pareto Optimum Çözüm Kümesi.....	65
Çizelge 5.16 : Örnek 5 Optimizasyon Tasarım Parametreleri.....	66
Çizelge 5.17 : Örnek 5 Optimizasyon Kısıtları.	66
Çizelge 5.18 : Örnek 5 Pareto Optimum Çözüm Kümesi.....	70
Çizelge 5.19 : Örnek 6 Optimizasyon Tasarım Parametreleri.....	70
Çizelge 5.20 : Örnek 6 Optimizasyon Kısıtları.	70
Çizelge 5.21 : Örnek 6 Pareto Optimum Çözüm Kümesi.....	74
Çizelge 5.22 : Örnek 7 Optimizasyon Tasarım Parametreleri.....	74
Çizelge 5.23 : Örnek 7 Optimizasyon Kısıtları.	75
Çizelge 5.24 : Örnek 7 Pareto Optimum Çözüm Kümesi.....	79



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : 3 Serbestlik Dereceli Robot Kolu.....	3
Şekil 2.1 : Harmonic Drive® Dişli Kutusu Genel Geometrisi.	11
Şekil 3.1 : 5 Eşit Alt Uzva Bölünmüş Uzuv Görünümü.	14
Şekil 3.2 : Esnek Yapının Simmechanics® Ortamında Oluşturuluşu.	14
Şekil 3.3 : Ankastre Kiriş Sehimleri.....	14
Şekil 4.1 : Buluşsal Algoritma Akış Diyagramı.....	18
Şekil 4.2 : Uzuvlarda Oluşan Sehimler.	22
Şekil 4.3 : Sehim İçin Tasarlanan Sanal Robot Diyagramı.	23
Şekil 4.4 : Robot Yatay Konumu ve Serbest Cisim Diyagramı.....	24
Şekil 4.5 : Nominal Çalışma Durumunda Kullanılan Kübik Hız Profilleri.	30
Şekil 4.6 : Acil Durma Sırasında Kullanılan Trapez Hız Profilleri.....	30
Şekil 4.7 : Uzuv Et Kalınlıkları İterasyonu.....	31
Şekil 4.8 : Toplam Robot Kütlesi İterasyonu.....	31
Şekil 4.9 : Dinamik Hareket Sırasında Meydana Gelen Uç Konum Hata İterasyonu.	31
Şekil 4.10 : Motorların Kapasiteleri ile Dinamik Benzetim Tork Değerleri Kıyaslaması.	32
Şekil 4.11 : Acil Durma Tork Değerleri ile Harmonic Drive® T'_M Tork Limiti Kıyaslaması.	32
Şekil 4.12 : Dinamik Hareket Sırasındaki Uç Konum Hatası.....	33
Şekil 4.13 : Optimum Tasarım Görünümü.	33
Şekil 5.1 : Buluşsal Algoritma Akış Diyagramı.....	37
Şekil 5.2 : Yoğunluk Mesafesi (Crowding Distance) Yöntemi.....	44
Şekil 5.3 : BSGA-II Yörünge Planı	45
Şekil 5.4 : Örnek 1 Başlangıç Nüfusu	46
Şekil 5.5 : Örnek 1 İterasyon 1 Nüfus Grafiği	46
Şekil 5.6 : Örnek 1 İterasyon 10 Nüfus Grafiği	47
Şekil 5.7 : Örnek 1 İterasyon 20 Nüfus Grafiği	47
Şekil 5.8 : Örnek 1 İterasyon 30 Nüfus Grafiği	48
Şekil 5.9 : Örnek 1 İterasyon 40 (Final) Nüfus Grafiği.....	48
Şekil 5.10 : Örnek 1 Başlangıç ve Final Nüfus Grafiği	48
Şekil 5.11 : Örnek 1 Pareto Grafiğinin Evrimi	49
Şekil 5.12 : Örnek 1 Final Pareto Grafiği (İterasyon 40)	49
Şekil 5.13 : Örnek 1 Çözüm 12 Dinamik Hareket Sırasındaki Uç Konum Hatası...	50
Şekil 5.14 : Örnek 1 Çözüm 12 Motor Kapasiteleri, Harmonic Drive® Dişli Kutuları Dayanım Değerleri ve Benzetim Tork Değerlerinin Kıyaslanması	51
Şekil 5.15 : Örnek 1 Çözüm 12 Robot Tasarım Görünümü	51
Şekil 5.16 : Örnek 2 Başlangıç Nüfusu	53

Şekil 5.17 Örnek 2 Iterasyon 1 Nüfus Grafiği	53
Şekil 5.18 Örnek 2 Iterasyon 10 Nüfus Grafiği	53
Şekil 5.19 Örnek 2 Iterasyon 20 Nüfus Grafiği	54
Şekil 5.20 Örnek 2 Iterasyon 30 Nüfus Grafiği	54
Şekil 5.21 Örnek 2 Iterasyon 40 (Final) Nüfus Grafiği	54
Şekil 5.22 Örnek 2 Başlangıç ve Final Nüfus Grafiği	55
Şekil 5.23 Örnek 2 Pareto Grafiğinin Evrimi	55
Şekil 5.24 Örnek 2 Final Pareto Grafiği (İterasyon 40)	56
Şekil 5.25 Örnek 3 Başlangıç Nüfusu	57
Şekil 5.26 Örnek 3 Iterasyon 1 Nüfus Grafiği	58
Şekil 5.27 Örnek 3 Iterasyon 10 Nüfus Grafiği	58
Şekil 5.28 Örnek 3 Iterasyon 20 Nüfus Grafiği	58
Şekil 5.29 Örnek 3 Iterasyon 30 Nüfus Grafiği	59
Şekil 5.30 Örnek 3 Iterasyon 40 (Final) Nüfus Grafiği	59
Şekil 5.31 Örnek 3 Başlangıç ve Final Nüfus Grafiği	59
Şekil 5.32 Örnek 3 Pareto Grafiğinin Evrimi	60
Şekil 5.33 Örnek 3 Final Pareto Grafiği (İterasyon 40)	60
Şekil 5.34 Örnek 4 Başlangıç Nüfusu	62
Şekil 5.35 Örnek 4 Iterasyon 1 Nüfus Grafiği	62
Şekil 5.36 Örnek 4 Iterasyon 10 Nüfus Grafiği	62
Şekil 5.37 Örnek 4 Iterasyon 20 Nüfus Grafiği	63
Şekil 5.38 Örnek 4 Iterasyon 30 Nüfus Grafiği	63
Şekil 5.39 Örnek 4 Iterasyon 40 (Final) Nüfus Grafiği	63
Şekil 5.40 Örnek 4 Başlangıç ve Final Nüfus Grafiği	64
Şekil 5.41 Örnek 4 Pareto Grafiğinin Evrimi	64
Şekil 5.42 Örnek 4 Final Pareto Grafiği (İterasyon 40)	65
Şekil 5.43 Örnek 5 Başlangıç Nüfusu	66
Şekil 5.44 Örnek 5 Iterasyon 1 Nüfus Grafiği	67
Şekil 5.45 Örnek 5 Iterasyon 10 Nüfus Grafiği	67
Şekil 5.46 Örnek 5 Iterasyon 20 Nüfus Grafiği	67
Şekil 5.47 Örnek 5 Iterasyon 30 Nüfus Grafiği	68
Şekil 5.48 Örnek 5 Iterasyon 40 (Final) Nüfus Grafiği	68
Şekil 5.49 Örnek 5 Başlangıç ve Final Nüfus Grafiği	68
Şekil 5.50 Örnek 5 Pareto Grafiğinin Evrimi	69
Şekil 5.51 Örnek 5 Final Pareto Grafiği (İterasyon 40)	69
Şekil 5.52 Örnek 6 Başlangıç Nüfusu	71
Şekil 5.53 Örnek 6 Iterasyon 1 Nüfus Grafiği	71
Şekil 5.54 Örnek 6 Iterasyon 10 Nüfus Grafiği	71
Şekil 5.55 Örnek 6 Iterasyon 20 Nüfus Grafiği	72
Şekil 5.56 Örnek 6 Iterasyon 30 Nüfus Grafiği	72
Şekil 5.57 Örnek 6 Iterasyon 40 (Final) Nüfus Grafiği	72
Şekil 5.58 Örnek 6 Başlangıç ve Final Nüfus Grafiği	73
Şekil 5.59 Örnek 6 Pareto Grafiğinin Evrimi	73
Şekil 5.60 Örnek 6 Final Pareto Grafiği (İterasyon 40)	73
Şekil 5.61 Örnek 7 Yörünge Planı	75
Şekil 5.62 Örnek 7 Başlangıç Nüfusu	76
Şekil 5.63 Örnek 7 Iterasyon 1 Nüfus Grafiği	76

Şekil 5.64 Örnek 7 Iterasyon 10 Nüfus Grafiği	76
Şekil 5.65 Örnek 7 Iterasyon 20 Nüfus Grafiği	77
Şekil 5.66 Örnek 7 Iterasyon 30 Nüfus Grafiği	77
Şekil 5.67 Örnek 7 Iterasyon 40 (Final) Nüfus Grafiği.....	77
Şekil 5.68 Örnek 7 Başlangıç ve Final Nüfus Grafiği	78
Şekil 5.69 Örnek 7 Pareto Grafiğinin Evrimi	78
Şekil 5.70 Örnek 7 Final Pareto Grafiği (İterasyon 40)	78
Şekil 5.71 Farklı Taşıma Kapasiteleri İçin Pareto Grafikleri (1 kg, 2kg, 4kg)	80
Şekil 5.72 Farklı Boyutlar İçin Pareto Grafikleri	80
Şekil 5.73 Farklı Malzemeler İçin Pareto Grafikleri.....	81
Şekil 5.74 Farklı Hızlar İçin Pareto Grafikleri	81





ROBOT KOLU TASARIMINDA DİNAMİK ESNEK YAPI MODELİ KULLANARAK TAHRİK GRUBU VE MEKANİK YAPININ TÜMLEŞİK OPTİMİZASYONU

ÖZET

Robot kolu tasarımı yapılırken ilk öncelik, istenen dinamik başarımları ve istenen yapı mukavemetini sağlayan en hafif tasarımı elde etmektir. Bu başarımın belirleyicisi ise seçilen tahrik grubu ve uzuvların yapılarıdır. Robot kolunda tahrik grubu ve uzuvlar, dinamik sistemle birlikte hareket halindedir. Bu da tahrik grubunu hem sisteme güç sağlayan hem de güç harcayan bir hale getirir. Daha güçlü bir tahrik grubu sistemin dinamik başarımına olumlu katkıda bulunacaktır ama aynı zamanda kütle artışı sebebiyle sistemin hem dinamik başarımına olumsuz etki sunacak hem de yapıya gelen yükü arttıracaktır. Bunun devamında ise yapıyı daha sağlam hale getirmek için kalınlığı arttırılmak zorunda kalınacak ve bu da tekrar dinamik başarıma olumsuz etki olarak geri dönecektir. Sonuç olarak bu kadar başarımlar düşüşü tekrar tahrik grubunun revize edilmesine sebep olabilecektir. Bu kısır döngü aslında bir robot kolu tasarımının ne kadar karmaşık olduğunu ve defalarca iterasyona ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Bu yöntem sonuçta optimum değil ama sadece beklentileri karşılayabilen bir tasarımın elde edilmesini sağlamaktadır.

Bu karışık ve zorlu tasarım şekli, bir optimizasyon yöntemiyle sorunun çözülmesi gerektiği fikrinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu tez çalışmasında, tahrik grubu ve yapı et kalınlığının tümleşik optimizasyonu yapılarak optimum robot kol tasarımının elde edilmesi hedeflenmiştir. Önerilen yöntemi göstermek için 3 serbestlik dereceli bir robot kolu seçilmiştir. Tahrik grubunun seçileceği kapsamlı bir tahrik grubu kütüphanesi kurulmuştur. Bu kütüphanede 31 farklı Maxon® motor ve 675 farklı Harmonic Drive® dişli kutusu bütün teknik verileri ile birlikte yer almaktadır. Uzuvların yapısı ise birer boru olarak seçilmiştir. Optimizasyonun belirlemeye çalıştığı değişkenler tahrik grubu (motor ve dişli kutuları) ve boru tipindeki uzuv yapılarının et kalınlıklarıdır.

Çalışmada 2 farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan birincisi deneme yanılma prensibine dayanan buluşsal bir optimizasyon algoritmasıdır. Amaç fonksiyonu tektir ve toplam robot kütlelerinin en aza indirilmesidir. Robottan beklenen dinamik başarımlar tasarım parametresiyken, robotun dinamik hareket sırasında yapıların sehiminden dolayı yapacağı en büyük uç konum hatası ise optimizasyon probleminin kısıtı olarak önceden belirlenmiştir. Bir başka deyişle, kısıtlara bağlı tek amaç fonksiyonu olan bir optimizasyon problemi oluşturulmuştur. Optimizasyon döngüsü ise amacı robot kütlelerini en aza indirmek olduğu için kısıt ve tasarım parametrelerini elde edene kadar tasarım kütlelerini arttırmakla görevlidir ve deneme yanılma yöntemine dayalıdır. Optimizasyon döngüsü Matlab® ortamında oluşturulmuştur. Tahrik grubu kütüphanesi matris formunda yine Matlab® ortamına aktarılmıştır. Tahrik grubu yeterliliğini gözlemlemek için Simmechanics® ortamında katı yapı dinamik benzetim

ortamı kurulmuştur. Uzun yapılarının dinamik hareket sırasında ne kadar sehim yapacağını ve bu sehimlerden dolayı uç konumunda oluşacak hatayı gözlemlemek için ise ayrıca esnek yapı dinamik benzetim ortamı çoklu parametre tahmini yöntemiyle yine Simmechanics® ortamında kurulmuştur.

İlk yöntemin tek amaç fonksiyonuna sahip olması yüzünden ancak tekil bir sonuç verebiliyor olması, aynı zamanda katı ve esnek yapı benzetim ortamlarının ayrı ayrı çalışıp tahrik grubunu ve yapıyı ardışık olarak birbirinden bağımsız değerlendirmesi; çalışmanın biraz daha ileri taşınması gerektiğini ortaya çıkarmıştır. Ardından, çoklu amaç fonksiyonlu bir problemin oluşturulması ve eş zamanlı benzetim ortamında hem tahrik grubunun hem de yapıların eş zamanlı optimize edilmesi fikirleri ortaya çıkmıştır. Bu doğrultuda, ikinci yöntem olarak çoklu amaç fonksiyonu oluşturup baskılanmayanları sıralayan genetik algoritma-II (BSGA-II) ("Non-Dominated sorted genetic algorithm-II, NSGA-II") yöntemi kullanılarak Pareto optimum çözüm kümesi elde edilmiştir. Bu yöntemin kazançlarından ilki yapılarda meydana gelen sehimlerden dolayı dinamik hareket sırasında uç konumunda oluşan hataların en büyük değeri bir kısıt olmaktan çıkarılıp, en aza indirilmek üzere amaç fonksiyonuna dönüştürülmesidir. Bu sayede birincisi toplam robot kütlesi, ikincisi de uç konum hatası olmak üzere iki adet en aza indirilmek istenen amaç fonksiyonları oluşturulmuştur. Böylece, artık sadece kısıtları karşılayan tekil bir sonuç yerine iki amaç fonksiyonuna da hizmet eden ve tasarımcıya seçme imkanı sunan bir Pareto optimum çözüm kümesi elde edilmiştir. Bu yöntemdeki diğer kazanç ise, ilk yöntemdeki katı yapı dinamik benzetimin ortadan kaldırılıp hem tahrik grubunun hem de yapıların sadece esnek yapı dinamik benzetim ortamında eş zamanlı değerlendirilmesine olanak tanınmasıdır. Bu sayede dinamik hareket sırasında meydana gelen sehimlerin oluşturduğu titreşim ve iç kuvvetlerin dinamik başarımda (ihtiyaç duyulan torkun artması) meydana getirdiği olumsuz etkinin de gözlemlenmesi sağlanmış ve daha gerçekçi bir benzetim ortamı kullanılmıştır. Her iki yöntemin detaylı hallerine ve her ikisi için yapılan örnek optimizasyon sonuçlarına tez içerisinde yer verilmiştir.

Yapılan çalışmaların literatüre olan katkılarından ilki esnek yapı dinamik benzetim ortamının kullanılması ile yapı ve tahrik grubunun birbirlerine olan etkisinin de gözlemlenebildiği eş zamanlı bir benzetim ortamının oluşturulmuş olmasıdır. Diğer katkı ise geniş bir tahrik grubu kütüphanesinin bu optimizasyon döngüsüne entegre edilmesidir. Ayrıca, optimizasyon algoritması tasarım parametreleri ve kısıtları ile tamamen değişkenlere bağlı olarak oluşturulmuş, bu sayede birçok farklı ölçüde robot tasarımının yapılabilmesine olanak sağlarken, sunduğu sonuçların optimum olduğunu da garanti etmektedir. Son olarak yöntem baskılanmayanları sıralayan genetik algoritma-II ile desteklenmesi sayesinde çoklu amaç optimizasyon problemine Pareto optimum çözüm kümesini sunarak tasarımcıya seçim yapma hakkı vermektedir.

INTEGRATED DRIVE-TRAIN AND MECHANICAL STRUCTURE OPTIMIZATION USING DYNAMIC FLEXIBLE STRUCTURE MODEL IN ROBOT MANIPULATOR DESIGN

SUMMARY

The first priority when designing the robot arm is to achieve the minimum weight design that provides the desired dynamic performance and structural strength. The determinant of this success is the selected drive-train and the structures of the links. In the robot arm, the drive-train and the links are in motion with the dynamic system. This makes the drive train both a power supplier and a power consumer. A more powerful drive-train will increase the dynamic performance of the system, but at the same time, it will negatively affect the dynamic performance of the system due to the weight increase and, will increase the load on the structure. Then, the thickness will have to be increased to make the structure more robust, and this will again have a negative effect on dynamic performance. As a result, such a decrease in performance may cause the drive-train to be revised again. This vicious circle actually shows how complex the design of a robot arm is and needs many iterations. This method can only provide a design that is not optimal but only meets expectations.

This complex and difficult design methodology creates the idea that the problem should be solved with an optimization method. In this thesis, it is aimed to obtain the optimum robot arm design via the integrated optimization of the drive-train and structure. A robot arm with 3 degrees of freedom is chosen to demonstrate the proposed method. An extensive drive-train library has been created from which to select the drive group. In this library, 31 different Maxon[®] motors and 675 different Harmonic Drive[®] gearboxes are included with all their technical data. The structure of the links was chosen as a pipe. The variables that the optimization tries to determine are the drive-trains (motors and gearboxes) and the wall thicknesses of the links.

Two different methods were used in the study. The first one is a heuristic optimization algorithm based on the trial and error principle. It has a mono-objective function and is to minimize the total robot weight. While the desired dynamic performance is the design parameter, the maximum endpoint error that occurs due to the deflection of the structures during the dynamic motion is predetermined as the constraint of the optimization problem. In other words, an optimization problem that has a mono-objective function and is dependent on constraints is created. The optimization cycle is responsible for increasing the design weight until the constraint and design parameters are achieved, since its one and only objective function is obtaining a minimum-weight robot, and the optimization algorithm is based on a trial and error method. The optimization cycle was created in the Matlab environment. The drive-train library was transferred to the Matlab[®] environment again in matrix form. A rigid body dynamic simulation environment has been set up in Simmechanics[®] to observe drive-train capability. In order to observe the deflection of the links

during the dynamic motion and the error that will occur in the endpoint due to these deflections, the flexible body dynamic simulation environment was also set up in the Simmechanics[®] environment via lumped parameter estimation method.

Since the first method has a mono-objective function, it can only yield a singular result, and at the same time, rigid and flexible body dynamic simulation environments work separately and evaluate the drive-train and the structure sequentially and independently of each other. All these disadvantages reveal the necessity of carrying the study further. Then, the ideas of creating a multi-objective optimization problem, and simultaneous optimization of both the drive-train and the structures in the same simulation environment emerged. Finally, as a second method, a multi-objective optimization problem was created and Pareto optimum solution set was obtained by using the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II ("NSGA-II") method.

The first benefit of NSGA-II method is that the maximum value of the endpoint errors that occur due to the deflections in the links during the dynamic motion is removed from being a constraint and converted into an objective function to be minimized. Then, multi-objective functions which are minimizing the total robot weight and endpoint error due to the deflection were created. Thereby, instead of a unique solution that only meets the constraints, a Pareto optimum solution set is obtained, which serves both objective functions and allows the designer to choose. Another benefit of this method is that the rigid body dynamic simulation in the first method is eliminated, allowing simultaneous evaluation of both the drive-train and the structures only in the flexible body dynamic simulation environment. In this way, the negative effect of vibration and internal forces caused by the deflections during the dynamic motion on dynamic performance (increasing the required torque) was also observed, and a more realistic simulation environment was used. Detailed versions and sample optimization results for both methods are included in the thesis.

One of the contributions of the studies to the literature is the creation of a simultaneous simulation environment in which the effect of the structure and the drive-train on each other can be observed by using the flexible body dynamic simulation environment. The other contribution is the integration of an extensive drive-train library into this optimization cycle. In addition, the optimization algorithm has been created completely depending on the variables with the design parameters and constraints, thus allowing many different sizes of robot design to be made, while also guaranteeing optimum results. Finally, the method is supported by NSGA-II, giving the designer the right to choose by presenting the Pareto optimum solution set of the multi-objective optimization problem.

In order to show the successes of the methods, an example for the heuristic method and 7 examples for the NSGA-II method are given.

One of the examples of the NSGA-II methods is used to compare with the heuristic method. Then it is observed that the NSGA-II method can give better results than the heuristic method. Besides, while the heuristic method is restricted to only one solution, NSGA-II can present a Pareto optimum solution set and the designer can select one of them according to its needs.

Other examples show the effects of design parameters and constraints on the Pareto front. The first 2 examples show how the Pareto front changes with robot sizes. Then it is observed that the robot dimensions are the most effective criteria on the Pareto front.

The next 2 examples provide to observe the effect of payload on the Pareto front. An increment in payload moves the Pareto front right and up direction. However, it is observed that the payload effect is not bigger than the dimension effect.

The next example shows the effects of material (steel or aluminum) on the Pareto front. In this robot design, the aluminum structure gives better results. It does not mean that aluminum is better than steel for all robot designs. The performance of the aluminum and steel is also dependent on other design parameters and constraints too.

The final example indicates the effects of robot manipulator speed on the Pareto front. After changing the maximum speed of the robot arm, the total duration increases and acceleration decreases. However, they are not linearly dependent on each other. An increment in maximum speed increases the total duration a lot, but it has little effect on acceleration. Therefore, changing the maximum speed of the robot arm does not have a serious effect on the Pareto front.

All these examples not only show the Pareto front changes but also proves that the algorithm can be used in different types of robot manipulator design via its variable-dependent structure.

This method can only present optimum conceptual designs. To create a final optimum design, it needs an extra topology optimization consecutively. On the other hand, it also needs predetermined robot sizes, which means that the kinematic and workspace optimization should be done before this method. Finally, overall design optimization needs controller optimization. Therefore, in future work, this algorithm can be expanded with kinematic, topology, workspace, and controller optimizations to find the final optimum design.

In this study, the backlashes of the gearboxes are neglected. In future work, their backlashes can be added to the dynamic simulation environment to create a more realistic model.

In all nominal operations, the cubic velocity profile is selected in dynamic simulations. However, generally, robot arms in the industry use quintic trajectory to eliminate sudden acceleration changes. In future work, by selecting a quintic trajectory, the total robot weights and deflection in the bodies can be decreased.

Finally, there is no controller in the dynamic simulation environment. Therefore, Simmechanics forces the robot arm to follow the trajectory perfectly with zero error. If a controller is added to the dynamic simulation, it also permits an amount of overshoot during the sudden changes in acceleration and decreases the necessary torque during the motion. Especially in the cubic velocity profile, this effect increases due to is has sudden acceleration change points. Therefore, in future work, a controller can be added to the existing simulation to eliminate this effect and creates a more realistic model.

All in all, this method only shows how NSGA-II method can be adapted to a dynamic system design optimization problem. Then, it shows how the flexible body dynamic

simulation environment is created. Finally, it is an example of how an extensive drive-train library is used in a robot design optimization problem. This suggested method is only an example of a dynamic system design optimization. It is not restricted to a robot design and can be adapted or reformed to any dynamic system design.



1. GİRİŞ

Uzuvların yapıları ve tahrik grubu bir robot kolu tasarımında belirlenmesi ve optimize edilmesi gereken en önemli iki bileşendir. Tasarımdan beklenen dinamik başarımlar, kaldırabileceği yük kapasitesi, uzuvlara izin verilen sehim miktarı gibi tasarım parametreleri ve kısıtlar altında doğru tasarımı konvensiyonel yöntemlerle elde etmek çokça iterasyona ihtiyaç duymakta, çok fazla zaman kaybına sebep olmakta ve sonuç olarak sadece kısıtlara ve tasarım parametrelerine cevap veren herhangi bir tasarımın oluşmasını sağlayabilmektedir. Özellikle tahrik grubunun dinamik sistemle birlikte hareket halinde olduğu robot kolu sistemlerinde, tahrik grubunun sadece kapasitesi değil kendi kütlesi de tasarım adına çok önemli hale gelmektedir. Aynı durum robot kolu uzuvlarının yapı seçimlerinde de geçerlidir. Yapının daha mukavemetli olması demek daha ağır bir tasarım ve sonuç olarak daha güçlü tahrik grubuna ihtiyaç duyulması anlamına gelmektedir. Öteki taraftan, daha güçlü bir tahrik grubu dinamik başarıma sadece olumlu katkıda bulunmayıp, kendi kütlesi arttığı için olumsuz etkide de bulunacaktır. Ayrıca, daha ağır tahrik grubu yapıya gelen yükü arttıracak ve sonuç olarak daha fazla sehime sebebiyet verecektir. Birbirleriyle tamamen çelişki halinde olan tahrik grubu ve yapı bileşenleri robot kolu tasarımını karmaşık bir tasarım problemi haline getirmekte ve akabinde birleşik bir optimizasyon yöntemi ile çözülmeye gerek olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışmasında öncelikle tezin amacı ve çalışmanın genel olarak içeriği anlatılmakta, devamında ise literatürde tasarım optimizasyonu olarak yapılan çalışmalar özetlenmekte ve bu tez çalışması ile aralarındaki farklar tartışılmaktadır. Tezin ilerleyen kısımlarında oluşturulmuş olan tahrik grubu kütüphanesinin içeriğinden bahsedilmektedir. Tezin devamında ise optimizasyon için kullanılan iki farklı yöntemin detaylı anlatımı ve örnek optimizasyon sonuçları yer almaktadır. Son olarak tez çalışması, sonuç bölümünde çalışma ile elde edilen sonuçların tartışılması ve literatüre olan katkısının anlatılmasından sonra son bulmaktadır.

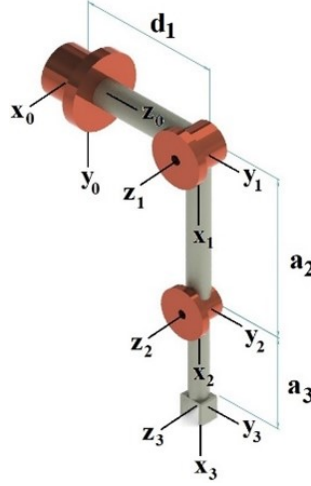
1.1 Tezin Amacı

Robot kolu tasarımındaki karmaşık problemin çözümlenmesi adına bu tez kapsamında Şekil 1.1’de görünen 3 serbestlik dereceli bir robot kolu için tahrik gruplarının ve yapı et kalınlıklarının tümleşik optimizasyon ile optimum tasarımının elde edilmesi üzerine çalışılmıştır. Önerilen optimizasyon probleminin optimize edilmek istenen değişkenleri 3 uzvun tahrik grupları (motor ve dişli kutuları) ve uzuv yapılarının et kalınlıklarıdır. Tahrik gruplarının seçilmesi için 31 farklı motor ve 675 farklı dişli kutusu içeren kapsamlı bir kütüphane oluşturulmuştur. Bu kütüphanede motor ve dişli kutularının bütün teknik özellikleri mevcuttur. Optimizasyon döngüsü bu kütüphaneyi sürekli olarak kullanmaktadır. Algoritma Matlab® ortamında yazılmış, dinamik benzetim ortamları ise yine Matlab® bünyesinde olan Simmechanics® ortamında oluşturulmuştur. Böylece bütün optimizasyon tek bir program çatısı altında tamamlanabilmiş, herhangi farklı bir program ile eş zamanlı benzetime ihtiyaç duyulmamıştır. Tez çalışması iki farklı yöntem ile ilerlemektedir. Bu iki yöntem de temel olarak toplam robot kütlesi ve dinamik hareket sırasında yapıda meydana gelen sehimlerden dolayı uç konumda oluşan konum hatasına eğilmektedir. İlk yöntemde tek amaç fonksiyonu toplam robot kütlesi, dinamik hareket sırasında oluşan uç konum hatası bir kısıt olarak belirlenmişken, ikinci yöntemde bu iki unsur iki farklı amaç fonksiyonu olarak atanmıştır. 3 serbestlik dereceli robot kolu DH parametreleri Çizelge 1.1’dek gibidir.

Çizelge 1.1 : 3 Serbestlik Dereceli Robot DH Parametreleri.

a_i	α_i	d_i	θ_i
0	$\pi/2$	d_1	$\pi/2 + \theta_1$
a_2	0	0	θ_2
a_3	0	0	θ_3

Tez çalışmasında ilk başta deneme yanılma yöntemine dayanan buluşsal bir algoritma kullanılmıştır. Bu yöntemde amaç fonksiyonu tektir ve toplam robot kütlelerinin en aza indirilmesidir. Dinamik hareket sırasında uzuvlarda meydana gelen sehimlerden dolayı oluşan uç konum hatalarının en büyük değeri ise bu optimizasyon probleminin kısıtı olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda dinamik başarımlar, robottan kaldırabilmesi



Şekil 1.1 : 3 Serbestlik Dereceli Robot Kolu.

beklenen yük, robotun en büyük hız ve ivme değerleri gibi birçok tasarım parametreleri ve kısıtları mevcuttur. Tek amaç toplam kütleyi en aza indirmek olduğu için, kısıtlar karşılanana kadar döngü çalışmakta, duruma göre yapı kalınlığını arttırarak, duruma göre ise tahrik grubunu büyüterek devam etmektedir. Bulunan ilk sonuç, optimizasyon probleminin sonucu olarak kabul edilmektedir. Tahrik grubunun başarımı Simmechanics® ortamında oluşturulan katı yapı benzetim ortamında test edilirken, yapıdaki sehim gözlemlemek ve dinamik hareket sırasındaki uç konum hatalarını belirlemek için esnek yapı dinamik benzetim ortamı yine Simmechanics® ortamında kurulmuştur. Esnek yapı dinamik benzetim ortamı çoklu parametre tahmini yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu yöntem kısaca uzuvların eşit sonlu bir sayıya bölünüp birbirlerine küresel mafsallarla bağlanmasıdır. Bu mafsallara ise her bir bölünmüş yapının yay katsayısı açısal birimde girilmiştir. Böylece yapıda meydana gelecek sehim, küresel mafsallar aracılığı ile tanımlanmıştır. Bu ilk yöntem kısıtlara bağlanmış ve kısıtları karşılayan ilk çözümü sunan bir yöntemdir. Ayrıca tek amaç fonksiyonu olduğu için sadece tek bir çözüm sunmaktadır. Bunların dışında, bu yöntemde ne yazık ki katı yapı dinamik benzetim ortamı tahrik grubunu belirlerken, esnek yapı benzetim ortamı ise yapı kalınlığını belirlemektedir ve bu yüzden yapıdaki sehimin dinamik başarıma etkisi gözlemlenememektedir.

Bütün bu eksiklikler yöntemin daha ileri götürülmesi ve çoklu amaç fonksiyonları oluşturup tek bir esnek yapı benzetim ortamı altında çözümlenmesi fikrini ortaya çıkarmıştır. Böylece ikinci yöntem olarak toplam robot kütlesinin en aza indirilmesi

ve dinamik hareket sırasında uzuvlarda meydana gelen sehimlerden dolayı uç konumda oluşan konum hatalarının en büyük değerinin en aza indirilmesi olmak üzere iki birbirinden bağımsız amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Bir başka deyişle, ilk yöntemde kısıt olan uç konum hatası bu yöntemde amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir. Artık iki amaç fonksiyonu olduğu için çoklu amaç fonksiyonu probleminin çözümlenmesi adına BSGA-II yöntemine başvurulmuş ve Pareto optimum çözüm kümesi elde edilmiştir. Ayrıca bu yöntemde sadece esnek yapı benzetim ortamı kullanılmıştır. Bu sayede yapıdaki sehimin oluşturduğu titreşim ve iç kuvvetlerin dinamik başarımına olan etkisi doğrudan elde edilmiştir. Bu ciddi bir etki olup aslında tahrik grubunun bu titreşimden dolayı daha güçlü olması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu yöntem ile robot kolu tasarımı gibi karmaşık bir problem için iki amaç fonksiyonu oluşturulup Pareto optimum çözüm kümesinin yani birden fazla olası çözümün elde edilmesine olanak sağlanmıştır. Bu da tasarımcıya seçme hakkı sunmaktadır. Birbiri ile çelişen bu iki amaç fonksiyonunun hangisinin daha önemli olduğunu tasarımcı belirlemekte ve ona göre çözüm kümesinden seçim yapabilmektedir. Örneğin, robot kütlelerinin çok fazla önemli olduğu bir yerde tasarımcı uç konum hatasından biraz daha feragat edip daha hafif olan seçeneği kullanabilirken, çok daha hassas konumlama ihtiyacı olan bir robot kolu tasarımı için uç konum hatası düşük ama kütlesi fazla olan seçeneği kullanabilir. Ayrıca, bazen iki çözüm arasında çok az kütle farkı ama çok fazla sehim farkı olabiliyor. Bu gibi durumda belki çoğu tasarımcı o kütle farkını kabul edip daha düşük uç konum hatası olanı tercih edebilir. Bunun tam tersi de olabilir. İki birbirine yakın çözüm arasında çok az uç konum hatası varken kütleleri arasında önemsenecek kadar fazla fark olabilir. Bu gibi farklılıklar Pareto ile elde edilen yöntemi ilk buluşsal yöntemle göre çok daha açık, bilgi verici, seçenek sunan bir yöntem haline getirmektedir. Kısıtlara bağlı olan ilk yöntemde tekil bir sonuç aramaya ve bulunan ilk sonucu kullanmaya mecburken, Pareto optimum çözüm kümesi bütün optimum çözümleri tasarımcıya sunmaktadır.

1.2 Literatür Araştırması

Robot tasarım optimizasyonu ile ilgili çalışmalar genel olarak yapı, denetleyici, tahrik grubu, boyutsal ve çalışma alanı optimizasyonlarından biri veya bunlardan

birkaçının tümleşik optimizasyonu olarak yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalar ise genel olarak tek amaç fonksiyonlu ve çoklu amaç fonksiyonlu çalışmalar olarak iki gruba ayrılmaktadır. İlk gruptaki çalışmalar ya doğrudan tek amaç fonksiyonuna sahip ya da birden fazla amaç fonksiyonunun ağırlıklarına göre toplamlarından oluşturulan yine tek amaç fonksiyonunun çözümünden ibarettir. Çoklu amaç fonksiyonlarına birer ağırlık katsayısı belirleyip, o ağırlıklarına göre toplamlarından oluşturulmuş tekil amaç fonksiyonu yöntemi, çoklu amaç fonksiyonuna sahip optimizasyon problemlerinin basite indirgenip çözümlenmesinde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bunun dışında ikinci grup çalışmalar ise doğrudan çoklu amaç fonksiyonuna sahip bir optimizasyon probleminin çözümüne odaklanmıştır. Pareto optimum çözüm kümesi çoklu amaç fonksiyonlu optimizasyon çözüm yöntemleri (BSGA, BSGA-II, BSGA-III, ÇAPSO, vs) kullanılarak elde edilmiştir. Tekil amaç fonksiyonu ile çözüm yapan ilk gruptaki çalışmalara göz atarsak, karşımıza ilk çıkan birleşik yapı ve denetleyici optimizasyonu çalışmasıdır [1]. Bir başka çalışmada ise dinamik başarıyı arttırmak için tahrik grubu optimizasyonu yapılmıştır ve tahrik grubu çalışma ömrü, sistemin dinamik başarıyı ve toplam maliyet konularına yoğunlaşmıştır [2]. Yörünge planının tahrik grubuna etkisi üzerine yapılan tahrik grubu optimizasyonu çalışması yine literatürde öne çıkan çalışmalardan biridir [3]. Bir başka tahrik grubu optimizasyonu çalışmasında ise optimizasyon döngüsü Matlab[®] ortamında kurulmuş, dinamik benzetim için ise ANSYS[®] programından faydalanılmıştır [4]. Amaç fonksiyonunun sadece toplam robot kütesinin en aza indirilmesi olan bu çalışmada birkaç model motor ve dişli kutusu içeren bir kütüphaneden faydalanılmıştır. Çalışmada, var olan bir robot tasarımının sadece kısıtlı bir seçenek arasından tahrik grubunun seçilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Aynı yazarlar var olan çalışmaya boyutsal optimizasyonu da ilave edip yeni bir çalışma daha ortaya koymayı başarmışlardır [5,6]. Amaç fonksiyonu yine sadece toplam robot kütesini en aza indirmek iken, var olan tahrik grubu optimizasyonuna ilave olarak uzuvların kinematik uzunluklarının optimizasyonu da birleşik optimizasyon yöntemiyle çözülmüştür. Son olarak aynı yazarlar tahrik grubu, boyutsal ve yapısal tümleşik optimizasyonunu aynı robot kolu çalışmasına uyarlamayı başarmışlardır [7]. 3 farklı programı birlikte kullanarak yapılan optimizasyon çalışmasında, döngü Matlab[®] ortamında kurulmuş, dinamik benzetim ADAMS[®]

programında yapılırken, statik yapısal analiz ANSYS[®] ortamında gerçekleştirilmiştir. Fakat amaç fonksiyonu yine tekildir ve toplam robot kütlesini en aza indirmektir. Bu çalışmaya çok benzeyen ve sadece boyutsal optimizasyonun olmadığı bir başka çalışma literatürde yerini almıştır [8]. Bir başka çalışmada ise yine tahrik grubu ve yapının tümleşik optimizasyonu üzerine yoğunlaşmıştır [9]. Kısıtlara bağlı olarak kurulmuş optimizasyon algoritmasında yine tek amaç fonksiyonu toplam robot kütlesini en aza indirilmesidir. Katı yapı dinamik benzerim ortamı ile tahrik grubu optimize edilip, ardışık olarak esnek yapı dinamik benzetim ortamında yapı optimize edilmiştir. Ayrıca oluşturulmuş tahrik grubu çok daha geniş ve kapsamlıdır. Literatürdeki bir başka çalışmada ise robotun kinematik ve dinamik başarımını arttırmak için uzuv boyutlarının optimizasyonu yapılmıştır [10]. Yapının katılığına olan etkisini göz önüne alarak boyutsal optimizasyon yapılan bir çalışma yine literatürde yerini almıştır [11]. Diğer tek amaç fonksiyonlu robot kolu optimizasyonu çalışmaları ise çalışma alanı optimizasyonu [12] ve doğrudan esnek yapı dinamik benzetim ortamı ile yapılan optimizasyon çalışmalarıdır [13-15].

İkinci grup olarak ayırdığımız diğer çalışmalar ise doğrudan çoklu amaç fonksiyonu yaratıp BSGA-II gibi çok amaçlı optimizasyon çözüm yöntemini kullanarak Pareto optimum çözüm kümesini elde eden çalışmalardır. İlk karşılaşılan çalışma düzlemsel bir robotun yapısal optimizasyon ile uzuvların ihtiyaç duyduğu torkları ayrı ayrı amaç fonksiyonunda değerlendirmektedir [16]. Aynı zamanda çalışmayı BSGA-II, çok amaçlı genetik algoritma (ÇAGA) ve çok amaçlı diferansiyel evrim (ÇADE) ile çözüm sonuçları kıyaslamaktadır. Bir başka çalışmada ise robot tutucu tasarımı BSGA-II yöntemiyle elde edilmiştir [17]. Literatürde paralel robot tasarım optimizasyonu için çoklu amaç fonksiyonu oluşturulup BSGA-II ile Pareto optimum çözüm kümesini elde eden çalışma da yer almaktadır [18]. Tasarım parametrelerinin geometrik uzunluklar olup amaç fonksiyonları enerji tüketimi, geçirgenlik ve boyutların en aza indirilmesi olan bir boyama robotu optimizasyonu yapıp Pareto optimum çözüm kümesinin elde edildiği bir çalışma da literatürde mevcuttur [19]. Amaç fonksiyonları kolların birbiriyle olan mekanik çarpışmaların en aza indirilmesi ve uzuv boyutlarının maksimizasyonu olan bir cerrahi robot optimizasyonu çalışması literatürde dikkat çeken bir başka çalışmadır [20]. BSGA-II yönteminin tercih

edildiği bir başka çalışmada ise tahrik grubu, uzuv boyutları, yörünge ve denetleyici parametreleri tümleşik olarak optimize edilmiştir [21,22]. Çalışmadaki amaç fonksiyonları toplam robot kütesinin, uygulama süresinin ve takip hatasının en aza indirilmesidir. Düzlemsel bir robot tasarımı üzerine olan çalışmada kapalı döngü kontrol sistemi oluşturulup denetleyici katsayının optimizasyonu ile yörünge takip hatası en aza indirilirken, tahrik grubu optimizasyonu bir benzetim ortamı yaratılmadan matematiksel model yardımıyla yapılmaktadır. Bütün bu parametrelerin birbirine olan etkisinin de gözlemlendiği ve buna göre hem tahrik grubunun hem uzuv boyutlarının hem de denetleyici parametrelerinin tümleşik olarak optimize edildiği değerli bir çalışmadır. Çalışmada kapsamlı bir tahrik grubu kütüphanesi yaratılmıştır. Bu tez çalışmasıyla arasında olan en büyük fark ise yapı optimizasyonunun çalışmada yer almamasıdır. Literatürde esnek yapı benzetim ortamı ile tahrik grubu ve yapı optimizasyonu ile ilgili bir çalışma daha yer almaktadır [23]. Amaç fonksiyonu dinamik hareket sırasında yapıdaki sehinden dolayı oluşan uç konum hatası ve toplam robot kütesinin en aza indirilmesidir. Çoklu amaç fonksiyonu olan problemin çözümü BSGA-II yöntemi ile yapılmıştır. Literatürde bu tez çalışmasına en yakın olan çalışmalar ile bu tezdeki çalışmaların kıyaslanması Çizelge 1.2’de görülmekte ve bu sayede çalışmanın literatüre olan katkısı net olarak gösterilmektedir.

Bu tez kapsamında birinci yöntem ile gerçekleştirilen çalışma tek amaç fonksiyonuna sahip ilk grupta yer alan çalışmalar arasında yer alırken, ikinci yöntem ile yapılan çalışma ise ikinci grup olan çoklu amaç fonksiyonlarının çözümüne odaklanan çalışmalardandır. Tez çalışmasında Pareto optimum çözüm kümesinin elde edildiği kısımdaki çalışmalar, temel olarak literatüre eş zamanlı esnek yapı dinamik benzetim ortamının yaratılıp yapıdaki titreşimler ve iç kuvvetlerin dinamik başarıma olan etkisinin ve dinamik kuvvetlerin yapıya olan etkisinin gözlemlenebildiği bir esnek dinamik benzetim ortamının oluşturulma yöntemini kazandırmaktadır. Ayrıca değişkenlere bağlı olması sayesinde çok farklı boyuttaki robot tasarımları sadece tasarım parametrelerinin ve kısıtlarının belirlenmesiyle elde edilebilmektedir. Son olarak bütün bu optimizasyon problemini çoklu amaç fonksiyonuna bağlayıp BSGA-II gibi bir optimizasyon yöntemiyle çözüme kavuşturup optimum çözüm kümesini elde etmeyi başarmıştır.

Çizelge 1.2 : Tez Çalışmasının Literatürdeki En Yakın Çalışmalar ile Kıyası.

Kaynak No	YaO ^a	DO ^b	TGO ^c	BO ^d	YO ^e	Dinamik Benzetim	Yapısal Analiz	Benzetim Tipi	Program	Amaç Fonksiyonu	Optimizasyon Algoritması ^h
Bu tez çalışması	X		X			Esnek	Esnek	Eş zamanlı	Matlab Sim-mechanics	Çoklu *	BSGA-II
1	X	X				Katı	SEM	Birlikte Benzetim	Matlab Adams MSC-Nastran	Tek-Ardışık**	Önerilen Yöntem
7	X		X	X		Katı	SEM	Birlikte Benzetim	Matlab Ansys	Tekil***	Gradyan olmayan tabanlı
8	X		X			Katı	SEM	Birlikte Benzetim	Adams Ansys	Tekil***	Karmaşık
9	X		X			Katı	Esnek	Ardışık	Matlab Sim-mechanics	Tekil***	Buluşsal
21		X	X		X	Mat. Model	Yok	Mat. Model	Tanımlı değil	Çoklu****	BSGA-II
23	X		X			Esnek	Esnek	Eş zamanlı	Matlab Sim-mechanics	Çoklu *	BSGA-II

^a Yapısal Optimizasyon.

^b Denetleyici Optimizasyonu.

^c Tahrik Grubu Optimizasyonu.

^d Boyutsal Optimizasyon.

^e Yörünge Optimizasyonu.

* Toplam robot kütlesinin ve dinamik hareket sırasında yapıdaki sehimden dolayı oluşan uç konum hatasının en aza indirilmesi.

** Yapı katılığını maksimize, yerleşme zamanı ve aşımı en aza indirmek için tekil amaç fonksiyonları ile ardışık optimizasyon.

*** Kısıtlar altında toplam robot kütlesinin en aza indirilmesi.

**** Toplam robot kütlesinin, uygulama süresinin ve takip hatasının en aza indirilmesi.

2. TAHRİK GRUBU KÜTÜPHANESİ

Robot kolu tasarımının en önemli aşamasından biri tahrik grubunun belirlenmesidir. Bunun sebebi ise robot kolu gibi bir tasarımda tahrik grubunun da dinamik sistem ile birlikte hareket halinde olmasıdır. Hareket halindeki tahrik grubu sisteme bir yandan enerji sağlarken bir yandan da kendi kütlesi sebebiyle enerji harcayacaktır. Bu sebeple ihtiyaç duyulan tork değerlerini talep edilen hızlarda sağlayabilen motorlardan ve bu tork değerlerine dayanabilen dişli kutularından en hafif olanlarına ihtiyaç vardır. Bu kadar hassas bir seçim yapabilmek için ise yeterli bir motor ve dişli kutusu kütüphanesi oluşturulması ve kütüphanedeki bütün motor ve dişli kutularının teknik verilerinin el altında olması gerekmektedir. Ayrıca bu tez çalışmasındaki amacın farklı tasarım parametreleri ve kısıtlar altında istenilen robotun tasarım optimizasyonunu otomatik yapabilen bir algoritma geliştirilmesi olduğu kabul edilirse, birçok boyutta motor ve dişli kutusu bilgisinin gerekliliği anlaşılabılır. Bu doğrultuda, 31 farklı Maxon® marka motor ve 675 farklı Harmonic Drive® dişli kutusu içeren kapsamlı bir kütüphane oluşturulmuştur. Tahrik grubunun yeterliliğini kontrol edecek olan dinamik benzetim ortamının ihtiyaç duyduğu bütün motor ve dişli kutusu teknik verisi bu kütüphane içerisinde yer almaktadır. Her benzetim sonrası uzuvların ihtiyaç duydukları tork değerleri motor kapasiteleriyle ve dişli kutularının dayanımları ile kıyaslanmaktadır. Kütüphane, dinamik benzetim ortamına seçilen motor ve dişli kutularının geometrik boyut ve kütle bilgisini temin etmekle görevli olduğu gibi, benzetim sonrasında ihtiyaç duyulan tork değerlerinin seçilen motor kapasiteleriyle ve dişli kutusu dayanım tork değerleriyle kıyaslanmasında kullanılacak bilgileri de sağlamaktadır.

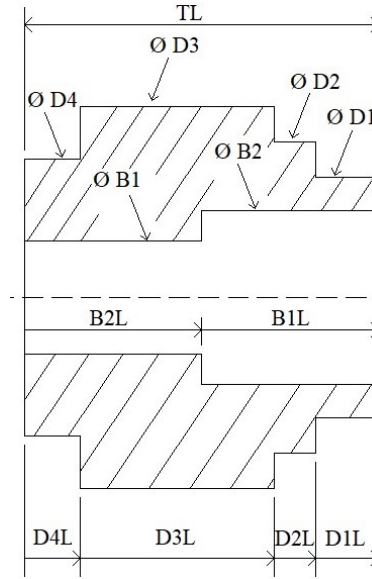
Optimizasyon probleminde kullanılacak toplamda 31 adet motor ve 675 adet dişli kutusu çeşitlerinin bütün katalog değerleri, çap, boy ve geometrik ölçüleri dahil listelenmiş ve kütlelerine göre sıralanmıştır. Bu sıralamalar ise Matlab® ortamında bir matris olarak yazılmıştır. DC motorlar yapıları gereği farklı hızlarda farklı tork değerlerini üretebilmektedir. Bu farklılığı tanımlamak için motorların

doğrusal olmayan tork-açısız hız grafikleri katalog grafiklerinden örnek noktalar alınıp polinoma benzetilmiştir. Eğri uydurma yöntemiyle oluşturulan motor tork-açısız hız eğrileri, bütün hız değerleri için motor tork kapasitelerinin kıyaslanabilmesine olanak sağlamaktadır. Bir başka deyişle, dinamik benzetim sonrası elde edilen tork değerleri motorların sadece kataloglarında yer alan limit tork değerleri ile değil, motorların bütün hız değerleri için üretebildiği tork değerleriyle ayrı ayrı kıyaslanabilmektedir. Bu yöntem ise motorların yeterliliğinin çok daha hassas bir yöntemle belirlendiğini göstermektedir.

Genel olarak kütüphanede bulunan bütün motorların geometrik şekilleri düz bir silindir olup tek bir çap ve boy bilgisi ile belirlenebilmektedir. Bu bilgiler optimiasyon sırasında seçilmiş motorların geometrik şekillerinin aynı anda Simmechanics® ortamına aktarılmasını sağlamaktadır. Söz konusu Harmonic Drive® dişli kutuları olduğunda ise sade bir silindirik şekilden bahsetmek pek mümkün olmamaktadır. Bu farklı şekilleri formulize edip kütüphanede şifrelemek için ise bütün Harmonic Drive® dişli kutuları gözlemlenmiştir. Ardından bütün dişli kutularını ifade edebilecek genel şeklin nasıl olması gerektiği ve kaç değişkenle ifade edilebileceği ortaya çıkarılmıştır. Bu doğrultuda bütün dişli kutularında en büyük 4 farklı dış çap ve 2 farklı iç çap ölçüsü olduğu belirlenmiştir. Bu çap ölçülerinin bir de genişliği olacağını öngörürsek, toplamda bütün dişli kutuları teknik resimleri 12 farklı ölçü ile genelleştirilmiştir. Şekil 2.1 kütüphanede yer alan Harmonic Drive® dişli kutularının genel geometrilerini göstermektedir. Ayrıca motor ve dişli kutularının kütüphaneye aktarılan teknik verileri sırasıyla Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de gösterilmiştir

Çizelge 2.1 : Maxon® DC Motor Teknik Verisi.

Motor Numarası	Tutma Torku (mNm)
Nominal Gerilim (V)	Zaman Sabiti (ms)
Nominal Tork (mNm)	Rotor Eylemsizliği (gcm ²)
Nominal Akım (mA)	En Yüksek Hız (D/dk)
Verimlilik (%)	En Fazla Eksenel Yük (N)
Güç (W)	En Fazla Radyal Yük (N)
Yüksüz Hız (D/dk)	Kütle (g)
Hız Sabiti (D/dk/V)	Hız-Tork Oranı (D/dk)/mNm)
Tork Sabiti (mNm/A)	Eğri Uydurma Polinom Derecesi
Yüksüz Akım (mA)	Uzunluk ve Çap (mm)



Şekil 2.1 : Harmonic Drive® Dişli Kutusu Genel Geometrisi.

Çizelge 2.2 : Harmonic Drive® Teknik Verisi.

Harmonic Drive® Numarası	2000 D/dk için Nominal Tork ($T_N - Nm$)
Ortalama Giriş Hız Limiti (gres) (D/dk)	Burulma Sertlik Torku 2 ($T_2 - mNm$)
Boyut	Anlık Tork Limiti ($T_M - Nm$)
Eylemsizlik Momenti (gcm^2)	Burulma Sertliği 1 ($K_1 - mNm/rad$)
Çevrim Oranı	En Yüksek Giriş Hızı (yağ) (D/dk)
Kütle (g)	Burulma Sertliği 2 ($K_2 - mNm/rad$)
Tekrar Edilebilir En Yüksek Tork ($T_R - Nm$)	En Yüksek Giriş Hızı (gres) (D/dk)
Hassasiyet (yay-dk)	Burulma Sertliği 3 ($K_3 - mNm/rad$)
Ortalama Tork Limiti ($T_A - Nm$)	Ortalama Giriş Hız Limiti (yağ) (D/dk)
Burulma Sertliği Torku 1 ($T_1 - mNm$)	Harmonic Drive® Geometrik Ölçüleri (D1-D1L-D2-D2L-D3-D3L-D4) -D4L-B1-B1L-B2-B2L-TL mm)

Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de yer alan teknik verilerin hepsi optimizasyon probleminde kullanılmamaktadır. Fakat ihtiyaç duyulması ihtimali için kütüphaneye kaydedilmiş ve istenildiği anda kullanıma hazır beklemektedirler. Dişli kutuları için verilen hız limitleri dişli kutusunun içerisine konulanan yağ veya gres olması durumuna göre değişiklik göstermektedir. Gres kullanımı aşınmayı geciktiriyor olsa da hız limitini düşürmektedir. Bu sebeple, bu tez çalışmasında sadece yağ ortamı için verilen hız limitleri dikkate alınmıştır.

Optimizasyon çalışmasındaki birincil amaç fonksiyonu toplam tasarım kütlelerinin en aza indirilmesi olduğu için kütüphane içerisinde hem motorlar hem de dişli kutuları

k t lelerine göre sıralanmışlardır. Bu sayede döngü sırasında üst sırada seçilen tahrik grubu elemanın alt sıradakilere göre daha hafif olduğu bilinmektedir. Aynı marka içerisindeki iki tahrik grubu elemanın başarımları doğrudan k t leleri ile de doğru orantılıdır. Bir başka deyişle, daha ağır bir motor daha yüksek tork üretebilirken, daha ağır bir dişli kutusu daha yüksek tork değerlerine dayanabilmektedir. Bu da yapılan sıralamanın aynı zamanda zayıftan güçlüye motor sıralaması ve de az dayanıklıdan daha çok dayanıklı dişli kutusu sıralaması olduğu anlamına da gelmektedir. Böylece, motor ve dişli kutusu numaraları dolaylı olarak seçilen tahrik grubunun kütle ve dayanımı hakkında bilgi sağlamaktadır.



3. ÇOKLU PARAMETRE TAHMİNİ YÖNTEMİ İLE ESNEK YAPI DİNAMİK BENZETİMİ

Dinamik benzetim, bir dinamik sistemin belirli bir yörüngede hareketi sırasında ihtiyaç duyduğu tork değerlerinin, yapının herhangi bir yerinin maruz kaldığı kuvvetin belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Buradaki asıl amaç kuvvet ve torku belirlemek olduğu için genellikle yapı katı olarak kabul edilmektedir. Yapının analizi ise farklı bir program üzerinde bağımsız olarak statik durum altında yapılmaktadır. Bu da yapının dinamik hareket sırasındaki davranışını ihmal etmek, aynı zamanda yapının bu davranışından dolayı oluşacak fazla kuvvet ve torkları da göz ardı etmek anlamına gelir.

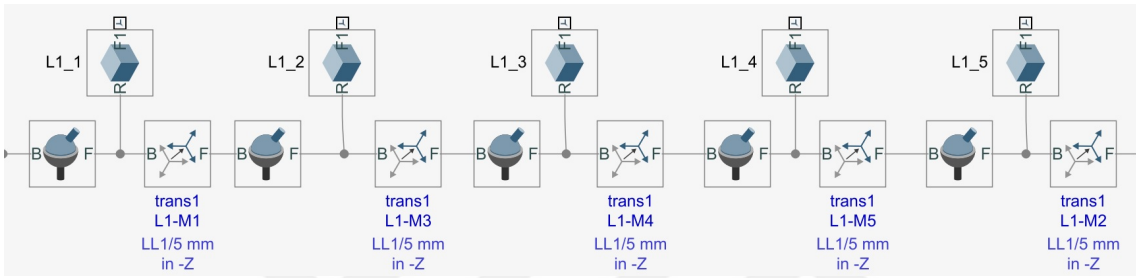
Bu doğrultuda, bu tez kapsamında esnek yapı ortamının dinamik benzetime dahil edilmesi ile yapı davranışının dinamik benzetime etkisi ve dinamik hareket sırasındaki kuvvetlerin yapıya olan etkisi gözlemlenebilmiş ve daha gerçekçi bir benzetim ortamı yaratılmıştır. Yapının dinamik hareket sırasındaki titreşimi ve bu titreşimden dolayı oluşan iç kuvvetlerin dinamik başarıma olan etkisi azımsanmayacak kadar fazladır. Öteki yandan, ivme altındaki bir yapıya gelen kuvvetler statik ortamda yapılan yapı analizinden çok daha değerli ve gerçekçidir.

Dinamik benzetimlerin yapılabildiği uygulamalardan birisi Matlab® programının Simmechanics® eklentisidir ve bu tez çalışmasında bütün dinamik benzetimler Simmechanics® ortamında yapılmıştır. Esnek yapının dinamik benzetim ile birleştirilmesi için çoklu parametre tahmini yöntemine başvurulmuştur. Bu yöntem ile kısaca uzuvlar eşit aralıklı sonlu bir sayıda alt uzuvlara ayrılırlar ve birbirlerine küresel mafsallarla bağlanırlar. Her bir kısmın açısallı yay sabiti ise küresel mafsalla tanımlanarak yapının esnekliği küresel mafsallar aracılığı ile gözlemlenebilir. Bu çalışmada her bir uzuv Şekil 3.1’de görüldüğü gibi 5 eşit alt uzva bölünmüş ve her biri birbirine küresel mafsallarla bağlanmıştır. Bu esnek yapının Simmechanics® ortamında nasıl oluşturulduğunu gösteren blok diyagramı ise Şekil 3.2’deki gibidir. Uzuvların Şekil 3.3’deki gibi ankastre giriş olduğu ve bir ucu serbest diğer ucunun sabit olduğu

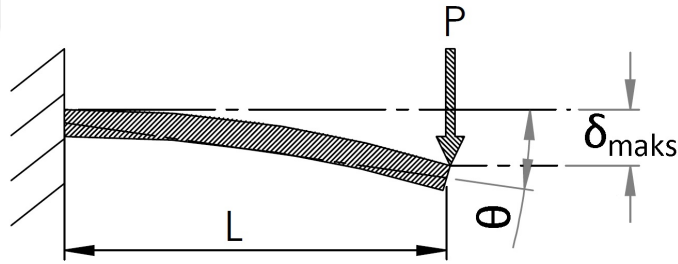
varsayılırsa, doğrusal yay sabiti denklem 3.1'deki gibi hesaplanabilir. Fakat küresel mafsala ancak açısai yay sabiti tanımlanabilir ve birim olarak ($Tork/rad = Nmm/rad$) olmalıdır. Bu sebeple denklem 3.1 L^2 ifadesi ile çarpılarak denklem 3.2'deki açısai yay sabiti elde edilir. Her bir uzun açısai yay sabiti ise denklem 3.3'deki gibidir.



Şekil 3.1 : 5 Eşit Alt Uzva Bölünmüş Uzun Görünümü.



Şekil 3.2 : Esnek Yapının Simmechanics® Ortamında Oluşturuluşu.



Şekil 3.3 : Ankastre Kiriş Sehim.

$$k_{dogrusal} \equiv \frac{P}{\delta_{maks}} \equiv \frac{P}{\theta * L} \equiv \frac{3EI}{L^3} (N/mm) \quad (3.1)$$

$$k_{acisal} \equiv \frac{P * L}{\theta} \equiv \frac{3EI}{L} (Nmm/rad) \quad (3.2)$$

$$k_{alt-uzuv} \equiv \frac{3EI}{L/5} (Nmm/rad) \quad (3.3)$$

4. BULUŞSAL YÖNTEM İLE OPTİMİZASYON

Bu tez çalışmasında iki farklı optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bunlardan ilki deneme yanılma prensibine dayanan buluşsal bir yöntemdir. Bu yöntemin tekil olan amaç fonksiyonu denklem 4.1'deki gibi toplam robot kütesinin en aza indirilmesidir. Robot kütesini belirleyenler ise 3 motor, 3 dişli kutusu ve 3 uzvun kütlelerinin toplamıdır. Optimizasyon döngüsünün değişkenleri ise motorlar, dişli kutuları ve boru şeklindeki uzuvların et kalınlıklarıdır. Esnek yapı benzetim ortamı sayesinde dinamik hareket sırasında yapıda meydana gelen sehimler de gözlemlenebilmektedir. Bu sehimlerden dolayı uç konumda titreşim meydana gelmekte ve bu titreşim grafiğinin en yüksek değeri ise en büyük uç konum hatasını vermektedir. Bu en büyük hata değeri bu yöntemde en aza indirilmesi istenen bir amaç fonksiyonu değildir ve doğrudan bir kısıt denklemine bağlanmıştır. Böylece amaç fonksiyonu tekil tutulmuştur ve bu yöntem tekil amaç fonksiyonu ile tekil bir sonuç sunabilmektedir.

$$TAF \equiv \min(M1K + M2K + M3K + DK1K + DK2K + DK3K + U1K + U2K + U3K)(kg) \quad (4.1)$$

Optimizasyon algoritması tamamen değişkenlere bağlı olarak geliştirilmiştir ve bu sayede çok farklı boyutlarda robot tasarımının optimize edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 robot tasarımı için gereken girdiler olan tasarım parametreleri ve kısıtları sırasıyla göstermektedir. İki farklı dinamik benzetim ortamı, optimizasyon döngüsü sırasında çalışmaktadır. Bunlardan ilki, katı yapı dinamik benzetim ortamıdır ve mekanik optimizasyonu üstlenip tahrik grubunun yeterliliğini kontrol ederken, ikincisi esnek yapı dinamik benzetim ortamı olup yapıda meydana gelecek yer değiştirmeleri elde etmek ve bu yer değiştirmelerden dolayı oluşan uç konum hatalarını kısıtlar ile kıyaslamak için kullanılmaktadır. Böylece tahrik grubu ve yapı ardışık iki dinamik benzetim ortamı ile ayrı ayrı değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.1 : Tasarım Parametreleri.

Istenen çalışma alanı ($d1, a2, a3$) – (mm)
En yüksek hıza ulaşma süresi (t_{maks}) – (s)
Yapının malzemesi (çelik - alüminyum)
Uzuvların başlangıç kalınlıkları (t_b) – (mm)
Uzuv kalınlıklarının artış miktarı (t_{artis}) – (mm)

Çizelge 4.2 : Kısıtlar.

Uzuvların en büyük tam tur periyodu ($t_{maks.periyot}$) – (s)
Motor güvenlik sabiti ($0 < M_{gs} < 1$)
Robot en yüksek taşıma kapasitesi (m_{maks}) – (kg)
Acil durma sırasında en yüksek yavaşlama ivmesi (ay_{acil}) – (m/s^2)
Harmonic Drive® en büyük izin verilen burulma miktarı (θ_{HD}) – (yay – dakika)
Dinamik hareket sırasında en büyük uç konum hatası ($uchata_{dinamik}$) – (mm)
En büyük statik uç konum hatası ($uchata_{statik}$) – (mm)

Tasarım parametrelerinin ve kısıtların belirlenmesinin ardından algoritma ilk olarak bu girdiler ışığında yörüngeleri hesaplamaktadır. Önerilen algoritmada iki farklı yörünge planı mevcuttur. Bunlardan birincisi, motorların en çok torka ihtiyacı olacağı 6 adet seri hareketin arka arkaya yapılmasını sağlayacak kübik hız profiline uyan yörüngelerdir. Bu 6 hareket tasarımı en çok zorlayacak hareketlerin özenle seçilmesi ile oluşmaktadır. Örneğin, yatay konumda sabit olan robotun yer çekimine ters yönde ivmelenmesi veya yine yer çekimine ters yönde yavaşlama ivmesi uygulaması gereken hareketler gibi. Bu hareketlerin yörüngeleri tasarım parametreleri ve kısıtlar ışığında robottan beklenen hız ve ivmeye göre değişkenlik göstermektedir. Bu yörünge planı, sistemin normal çalışması sırasında motor, Harmonic Drive® dişli kutularının ve yapı kalınlığının yeterli olup olmadığını kontrol ederken kullanılacaktır.

İkinci yörünge planı ise trapez hız profiline sahiptir ve acil bir durumda ani durma kararı verilirse oluşabilecek yüksek torklara Harmonic Drive® dişli kutularının anlık en yüksek dayanım tork limitinin yeterli olup olmadığını kontrol etmek için kullanılacaktır. Bu benzetimin ayrıca yapılmasındaki amaç ani durma sırasında ihtiyaç duyulan torkun motor değil belki de harici bir frenle uygulanması durumunda dişli kutularının dayanıp dayanamayacağını belirlemektir. Eğer harici bir fren sistemi söz konusu değilse dişli kutuları doğrudan motor kapasitelerine göre seçilebilmektedir.

Böylece, tahrik grubu optimizasyonu için oluşturulan katı yapı dinamik benzetim ortamı iki kez kullanılmaktadır. İlkinde başarılı olan dişli kutusu, motor takımları ve uzun çap ve kalınlıkları ikinci yörünge (ani durma) altında tekrar dinamik benzetime girerler ve bu sefer test edilmek istenen sadece Harmonic Drive® dişli kutularının anlık en yüksek dayanım tork limitlerinin yeterliliğidir. Bunda da başarılı olan motor dişli kutusu takımları bize optimum motor dişli kutusu sonucunu sunmaktadır. Fakat bu iki benzetim arasında yapıda meydana gelecek yer değiştirmeleri gözlemlemek için oluşturulan esnek yapı dinamik benzetim ortamı çalıştırılmaktadır. Sadece yapı yeterli görüldüğü takdirde üçüncü benzetim ortamına geçilmektedir.

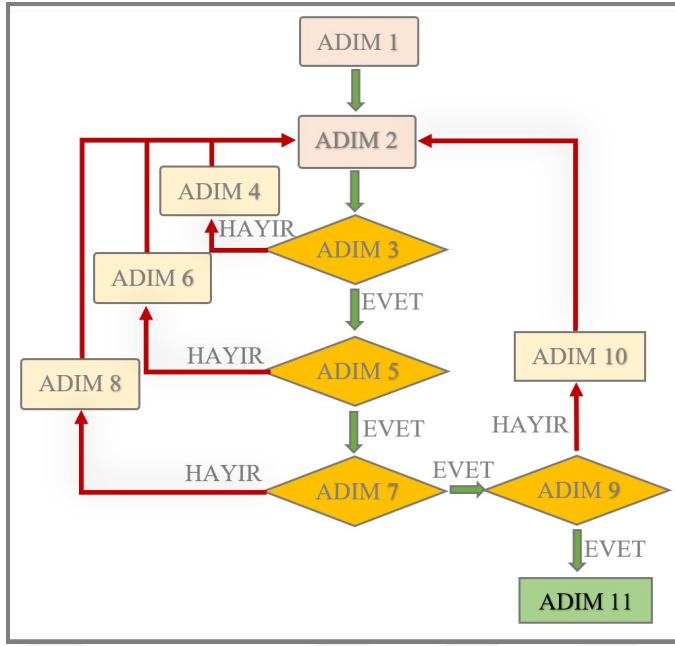
Daha detaylı anlatmak gerekirse, toplamda iki farklı benzetim ortamı bulunmaktadır. Bunlardan ilkinde yapı tamamen katı kabul edilmektedir ve tahrik grubu tasarım optimizasyonu için kullanılmaktadır. İkinci benzetim ortamında ise esnek yapıya sahip dinamik benzetim ortamıdır. Optimizasyon sırasında ise ilk olarak birinci (normal çalışma anında kullanılan) yörünge planı ile katı yapı dinamik benzetim ortamı çalıştırılmaktadır. Burada yeterli olan motor ve Harmonic Drive® dişli kutuları esnek yapı dinamik benzetim ortamına gönderilmekte ve yer değiştirmeler ile robot uç konum dinamik ve statik hataları hesaplanmaktadır. Bu kısımda da başarılı olunması durumunda ikinci (ani durma için oluşturulmuş) yörünge planı ile tekrar katı yapı dinamik benzetim ortamı çalıştırılmakta ve Harmonic Drive® dişli kutularının dayanımı kontrol edilmektedir.

4.1 Buluşsal Optimizasyon Döngüsü

Şekil 4.1’de optimizasyon döngüsünün çalışma prensibini detaylandırmak adına buluşsal algoritma akış diyagramı gösterilmektedir. Diyagramda belirtilen adımlar ise adım adım anlatılmaktadır.

4.1.1 Adım 1 : Tasarım parametreleri ve kısıtların belirlenmesi

Optimizasyon döngüsünün başlangıç adımı olan bu kısımda tasarımı istenen robot kolunun tasarım parametreleri ve kısıtları belirlenir. Daha sonra bu parametre ve kısıtlara göre uzuvların çıkacakları en yüksek açısal hızlar hesaplanır. En yüksek



Şekil 4.1 : Buluşsal Algoritma Akış Diyagramı.

hızlar da belirlendikten sonra ise normal çalışma ve ani durma durumları için gereken sırasıyla kübik ve trapez hız profiline sahip yörüngeler oluşturulur. Daha önce de bahsedildiği gibi normal çalışma senaryosu için robot kolunu en çok zorlayacak 6 farklı hareket kübik hız profili ile denenirken, acil durumlar için ani durma senaryosu oluşturulmuş ve bu senaryoda trapez hız profili daha keskin duruş sağlayacağı için tercih edilmiştir. Ayrıca ani durma sırasında kısıtlarda yer alan acil durma ivme değeri kullanılmıştır. Son olarak bu adımda tahrik grubu kütüphanesinde yer alan en hafif motorun her 3 uzuv için seçilmesi ile döngü başlamaya hazır hale getirilmiş olur.

4.1.2 Adım 2 : Harmonic Drive® dişli kutusu seçimi

Bu kısımda uzuvlar için ön dişli kutusu seçimi yapılmaktadır. İlk olarak tasarım parametreleri ve kısıtlara göre oluşan yörüngelerde uzuvların çıkacakları en yüksek hızlara dayanamayan dişli kutularının elenmesi yapılmaktadır. Yani ilk eleme Harmonic Drive® dişli kutularının en yüksek hız kapasitelerinin yeterli olup olmamasına göre yapılmaktadır. Daha sonra Adım 1’de seçilmiş motorlara uygun olmayan dişli kutularının elemesi yapılmaktadır. Bu elemadaki amaç çok fazla dişli kutusu seçeneğinin var olması fakat bunların birçoğunun seçilen motorlara uygun olmamasından dolayı en baştan eleyip optimizasyon süresini kısaltmaktır. Bu eleme

kabaca, seçilen motora göre çok fazla büyük veya çok küçük olan dişli kutularının listeden kaldırılmasıdır.

Büyüklik ve küçüklük kıyaslaması ise tork kapasitelerine göre yapılmaktadır. Burada kullanılan 2 kıyas mevcuttur. Motor tutma torku motorun uygulayabileceği en yüksek tork değeriye Harmonic Drive® *TN* tork limiti, katalog değerleri arasındaki en az torktur. İlk kıyaslamada motor tutma torkunun çıkıştaki büyüklüğü Harmonic Drive® tork limitlerinin en azına bile ulaşmıyor ise, bu, Harmonic Drive seçili motora göre gereksiz büyük anlamı gelir. İkinci kıyaslama ise, motor sürekli tork değeri, motorun katalog değerindeki en az tork limiti iken, Harmonic Drive® *TM* torku Harmonic Drive® dişli kutusunun dayanabildiği anlık en yüksek tork limitidir.

Böylece, eğer motor sürekli tork değerinin çıkıştaki büyüklüğü Harmonic Drive dişli kutusunun dayanabildiği en yüksek tork değerinden büyük ise, seçili motor Harmonic Drive® dişli kutusundan çok büyük olduğu anlamına gelir. Bu iki kıyaslama sonunda eldeki kütüphanedeki seçenekler iyice daraltılmaktadır.

Kıyaslamalar denklem 4.2 ve denklem 4.3’de daha net bir biçimde gösterilmiştir. Fakat daha önce de söylendiği gibi bu işlem, optimizasyon süresini kısaltmak için yapılan çok kaba bir eleme işlemidir.

$$\frac{\text{Motor tutma torku} \times \text{Harmonic Drive cevrim oranı}}{\text{Harmonic Drive 2000 D/dk tork limiti (TN)}} <_1 \quad (4.2)$$

$$\frac{\text{Motor en yuksek surekli tork} \times \text{Harmonic Drive cevrim oranı}}{\text{Harmonic Drive anlik en yuksek tork limiti (TM)}} >_2 \quad (4.3)$$

Bu elemeler sonrasında ortaya çıkan bütün uygun olabilecek Harmonic Drive® dişli kutuları kütlelerine göre düşükten yükseğe doğru sıralanır. Sonrasında en hafif olan Harmonic Drive® dişli kutusu her 3 uzuv için seçilir. Devamında ise uzuv et kalınlıklarının belirleneceği Adım 3’e geçilir.

¹ Motor küçük ise gereksiz büyük Harmonic Drive dişli kutularının elenmesi.

² Motor büyük ise o motor ile çalışamayacak kadar küçük olan Harmonic Drive dişli kutularının elenmesi.

4.1.3 Adım 3 : Uzuv kalınlıklarının belirlenip döngünün başlatılması ve motorların yeterliliğinin denetlenmesi

Bu aşamada ise en ince uzuv et kalınlığı seçilerek optimizasyona başlanması sağlanır. Boru şeklinde seçilmiş olan uzuvların kalınlıkları optimizasyon döngüsü içerisinde arttırılırken, boru iç çapı denklem 4.4'deki şekilde seçilen dişli kutusunun dış çaplarının aritmetik ortalaması olarak belirlenmektedir. Harmonic Drive® teknik ölçüleri Şekil 2.1'deki gibidir.

$$D_{uzuvic} \equiv \frac{D1 + D2 + D3 + D4}{4} \quad (4.4)$$

Seçilmiş olan bütün motor ve Harmonic Drive® dişli kutularının listede yer alan bütün katalog ölçüleri, kütleleri, eylemsizlikleri ve seçili uzuv kalınlıkları, uzuv iç ve dış çapları değişkenlere göre oluşturulmuş katı yapı dinamik benzetim ortamına gönderilir ve dinamik benzetim yapılır.

Seçilen motorların katalogdaki tork-D/dk grafiğinden elde edilen örnek noktalar ve katalog değerleri olarak kaydedilen tork-hız grafiğinin polinom derecesi kullanılarak, katalogda verilen grafiğin yaklaşık olarak benzetilmiş polinom hali elde edilir. Bir başka deyişle polinom uydurulur. Polinom derecesi ise, katalogdaki grafikten elde edilen örnek değerler kullanılarak her motor için test edilip bulunmuş olan değerdir.

Benzetim sonucu ortaya çıkan motorun uygulaması gereken tork değerleri ile motor kataloğundan uydurulan polinom kıyaslanır. Kıyaslamada, benzetim sonucu oluşan açısal hıza göre bütün tork değerlerinin, en fazla, polinomdaki aynı açısal hızdaki tork değerinin motor güvenlik sabiti ' M_{gs} ' ile çarpımı kadar olması istenmektedir. Bir başka deyişle, tork değerleri bütün açısal hızlarda ayrı ayrı kıyaslanmaktadır. Belirlenmiş iki değer değil, doğrudan iki grafik bütün açısal değerler için kıyaslanmaktadır. Kıyaslamada motor kapasitesinin tamamının kullanılmaması veya ilave tork ihtiyacı olabileceği için bir güvenlik çarpanı ile çarpılarak kontrol edilmektedir. Böylece hiçbir şekilde ihtiyaç duyulan tork değerleri motor kapasitesine ulaşmamaktadır.

Bütün bu aşamalardan sonra motorların uygun olup olmadığına karar verilmektedir. Uygun ise evet, değil ise hayır cevabı ile döngüye devam edilmektedir.

4.1.4 Adım 4 : Yetersiz motorların yeniden seçimi

Motorlardan en az bir tanesi uygun olmadığı için uygun olmayanlar için bir büyük olanı seçilir ve döngünün başına gidilir.

4.1.5 Adım 5 : Harmonic Drive® dişli kutularının yeterliliğinin denetlenmesi

Motor uygun olduğu için bir sonraki aşama olan dişli kutularının dayanımının denetlenmesi kısmına geçilir. İlk olarak benzetim sonucu oluşan tork değerlerinin ortalaması hesaplanır. Bu ortalama değer, Harmonic Drive® dişli kutusunun ortalama tork limiti ' TA ' ile kıyaslanır. Daha sonrasında benzetim sonucu oluşan tork değerlerinin en yüksek değeri Harmonic Drive® dişli kutusunun tekrar edilebilir en yüksek tork limiti ' TR ' ile kıyaslanır. Daha sonra, eğer çıkış hızı 2000 D/dk değerini görüyor ise, bu hız değerinde benzetimde oluşan tork değeri Harmonic Drive® dişli kutusunun 2000 D/dk değerindeki tork limiti ' TN ' ile kıyaslanır. Son olarak ise, dinamik benzetim tork değerleri, Harmonic Drive® burulma sertliği tork değerleri $T1, T2$ ve Harmonic Drive® burulma sertlik değerleri $K1, K2, K3$ kullanılarak, Harmonic Drive® dişli kutusunun yapacağı burulma miktarı yay-dakika biriminde hesaplanır. Bu oluşan burulma miktarı ise kısıt olarak verilen en fazla burulma θ_{HD} miktarı ile kıyaslanır.

Bütün bu kıyaslamalar sonucunda Harmonic Drive® dişli kutusunun uygun olup olmadığına karar verilir. Uygun ise evet, değil ise hayır cevabı ile döngüye devam edilmektedir.

4.1.6 Adım 6 : Yetersiz olan Harmonic Drive® dişli kutularının yeniden seçimi

Harmonic Drive® dişli kutularından en az birinin yeterli olmadığı anlamına gelir ve bir büyük dişli kutusu seçimi yapıp döngünün başına dönülür.

Eğer test edilen Harmonic Drive® dişli kutusundan daha büyük ölçüde bir dişli kutusu, elenerek oluşturulan dişli kutusu kütüphanesinde yer almıyor ise, bir büyük motor seçimi yapılarak döngünün başına gidilir.

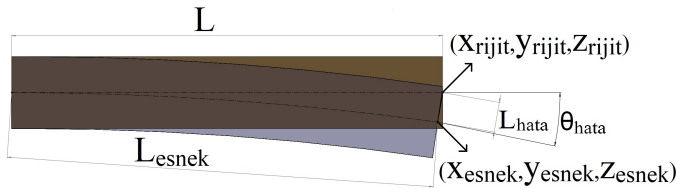
4.1.7 Adım 7 : Esnek yapı dinamik benzetim ortamında yapıların yeterliliğinin belirlenmesi

Harmonic Drive® dişli kutusunun ilk yörünge planına göre uygun olduğu anlamına gelir. Bu ise tasarımın tahrik grubu seçiminin tamamlandığı ve sadece yapı analizine ihtiyacı olduğu anlamına gelmektedir. Yapı analizi için oluşturulan esnek yapı dinamik benzetim ortamı çalıştırılmaktadır. Uzuvlara esneklik verildikten sonra denklem 4.12'deki şekilde yörünge boyunca robot uç konumunun anlık değeri ile ileri kinematikte elde edilen sonuçlar arasındaki fark hesaplanmaktadır. Bu ise doğrudan dinamik hareket sırasında robot uç konum hatasının bulunmasını sağlamaktadır. Bu değerlerin en büyüğü ise denklem 4.6'deki gibi optimizasyon probleminin kısıtları arasında yer alan ' $uchata_{dinamik}$ ' ile kıyaslanmaktadır.

$$P_{uc\ hata} \equiv |P_{uc\ esnek} - P_{uc\ rijit}| \quad (4.5)$$

$$maks(P_{uc\ hata}) > uchata_{dinamik} \Rightarrow \text{yapı yetersiz} \quad (4.6)$$

Daha sonra ise dinamik hareket sırasında hangi uzuvda meydana gelen sehmin uç konum hatasında en fazla etkisi olduğu belirlenmektedir. Bu doğrultuda benzetim ortamından her uzvun kendi sabit noktasına göre uç konumlarının koordinatları elde edilmiştir. Uzuvarların katı olduğu varsayıldığı zaman uç konumları zaten bilinmektedir. Sehimler sonucunda oluşan üçgen ve açı hatasının gösterimi Şekil 4.2'deki gibidir. Her uzuvda oluşan uç konum hatası ' L_{hata} ' ve açısal hata ' θ_{hata} ' denklem 4.7 ve denklem 4.8'deki gibi kosinüs teoremi ile elde edilmiştir.

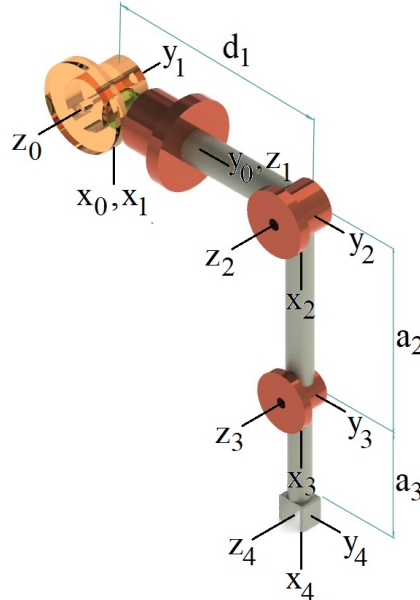


Şekil 4.2 : Uzuvlarda Oluşan Sehimler.

$$L_{hata} \equiv \sqrt{(z_{rijit} - L)^2 + y_{rijit}^2 + x_{rijit}^2} \quad (4.7)$$

$$\theta_{hata} \equiv \arccos \left(\frac{L_{hata}^2 - L^2 - L_{rijit}^2}{-2 \times L \times L_{rijit}} \right) \quad (4.8)$$

Birinci uzuvda meydana gelen sehim miktarının robot uç konumuna etkisini hesaplamak için Şekil 4.3’de görünen sanal 4 serbest dereceli robotun ileri kinematiği kullanılmıştır. 4 serbestlik dereceli robot DH parametreleri Çizelge 4.3’deki gibidir. Çizelge 4.3’deki DH parametreleri kullanılarak her bir uzvun ayrı ayrı robot uç konum hatasına etkisi hesaplanmaktadır. Bunun için ise ilk önce ikinci ve üçüncü uzuvların katı olduğu kabul edilip sadece birinci uzuvda sehim meydana geldiği varsayılmıştır. Bu doğrultuda sadece θ_{hata1} değeri ve normal yörünge kullanılarak robot uç konumu hesaplanmıştır. Elde edilen uç konum değerleri ise bütün uzuvlar katıymış gibi yani Çizelge 1.1’deki DH parametreleri kullanılarak elde edilen robot uç konumları ile kıyaslanmaktadır. Bu iki sonuçlar arasındaki fark ise birinci uzuvdaki sehimlerden dolayı robot uç konumunda oluşan hataları vermektedir. Hareket boyunca oluşan bu hataların en büyük değeri baz alınarak hesaplamalara devam edilmiştir. Aynı işlem sadece ikinci ve sadece üçüncü uzuvda sehim meydana geliyormuş gibi tekrar tekrar hesaplanmıştır. Böylece her uzuvda meydana gelen sehimlerin robot uç konumuna olan etkisi belirlenmiştir. Bunların arasında robot uç konumuna en fazla etkide bulunan uzvun kalınlığının arttırılmasına karar verilmektedir.

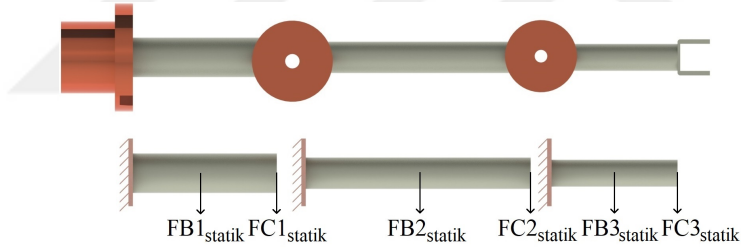


Şekil 4.3 : Sehimi için tasarlanan sanal robot diyagramı.

Çizelge 4.3 : 4 Serbestlik Dereceli Sanal Robot DH Parametreleri.

a_i	α_i	d_i	θ_i
0	$-\pi/2$	0	θ_{hata1}
0	$\pi/2$	d_2	θ_1
a_2	0	0	$\theta_2 + \theta_{hata2}$
a_3	0	0	$\theta_3 + \theta_{hata3}$

Böylece dinamik benzetim sırasında hareketin tamamı boyunca robot uç noktasında oluşan toplam sehım miktarı belirlenmiş olur. Sırada ise statik durumda en kötü konumda robot uç noktasının kendi kütlesinden ötürü oluşacak toplam sehımın hesabı vardır. Bu hesap için ise en kötü senaryo olan robotun tamamen yatay olduğu yani bütün kütlelerin tamamının robot uzuvlarının en fazla sehım yapmasına sebep olacağı konum seçilmiştir. Robotu bu konuma getirmek için ikinci eklemi 90 derece pozitif yönde döndürölmektedir. Robot yatay konumu Şekil 4.4'deki gibidir. Bunun dışında robot yatay konumdayken uzuv merkezlerine ve uzuv uç noktalarına uygulanan kuvvetler yine Şekil 4.4'deki serbest cisim diyagramında gösterilmiştir. Şekil 4.4'dek kuvvetlerin açılım denklemleri ise denklem 4.9 ile denklem 4.14 arasında belirtilmiştir.



Şekil 4.4 : Robot Yatay Konumu ve Serbest Cisim Diyagramı.

$$FB1_{statik} \equiv -\frac{U1K \times g}{1000} \quad (4.9)$$

$$FB2_{statik} \equiv -\frac{U2K \times g}{1000} \quad (4.10)$$

$$FB3_{statik} \equiv -\frac{U3K \times g}{1000} \quad (4.11)$$

$$FC1_{statik} \equiv -\frac{(M2K + DK2K + U2K + m_{maks} + M3K + DK3K + U3K) \times g}{1000} \quad (4.12)$$

$$FC2_{statik} \equiv -\frac{(m_{maks} + M3K + DK3K + U3K) \times g}{1000} \quad (4.13)$$

$$FC3_{statik} \equiv -\frac{m_{maks} \times g}{1000} \quad (4.14)$$

Bu kuvvetler altında uzuvlarda oluşan radyal sehım hesabı ise yine ankastre kirişde oluşan sehım hesabı yöntemi ile elde edilmiştir. Denklem 4.15 - 4.17 statik durumda sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü uzuvlarda meydana gelen sehımın hesaplanmasını göstermektedir. Bütün kuvvetler y doğrultusunda olduğu için bütün radyal sehımler de bu doğrultuda oluşacaktır.

$$SU1_{statik} \equiv \left(-\frac{FC1_{statik} \times L1^3}{3 \times E \times I1} - \frac{5 \times FB1_{statik} \times L1^3}{24 \times E \times I1} \right) (mm) \quad (4.15)$$

$$SU2_{statik} \equiv \left(-\frac{FC2_{statik} \times L2^3}{3 \times E \times I2} - \frac{5 \times FB2_{statik} \times L2^3}{24 \times E \times I2} \right) (mm) \quad (4.16)$$

$$SU3_{statik} \equiv \left(-\frac{FC3_{statik} \times L3^3}{3 \times E \times I3} - \frac{5 \times FB3_{statik} \times L3^3}{24 \times E \times I3} \right) (mm) \quad (4.17)$$

Hesaplanan radyal sehımlerden dolayı uzuvlardaki açısıl hata miktarları yine ankastre kiriş hesabına göre yapılmıştır. Denklem 4.18 - 4.20 sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü uzuvda statik durumdaki sehımlerden dolayı oluşan açısıl hataların denklemlerini göstermektedir.

$$\theta_{hata_{statik1}} \equiv \frac{SU1_{statik}}{d1} (rad) \quad (4.18)$$

$$\theta_{hata_{statik2}} \equiv \frac{SU2_{statik}}{a2} (rad) \quad (4.19)$$

$$\theta_{hata_{statik3}} \equiv \frac{SU3_{statik}}{a3} (rad) \quad (4.20)$$

Robot katı olarak kabul edildiğinde yatay konumda statik iken uç noktasının istenen konum vektörü denklem 4.21'deki şekilde olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

İstenen konum vektörü yapı katı kabul edildiğinde oluşan uç konumun x,y ve z koordinatlarından oluşmaktadır. Daha sonra ise uzuvlarda meydana gelen radyal sehimlerden dolayı uç noktanın gerçekte oluşan konum vektörü belirlenmektedir. Bunun için ise Çizelge 4.3'deki 4 serbestlik dereceli sanal robot için oluşturulmuş DH parametrelerinin kullanıldığı ileri kinematiğe, Çizelge 4.4'de belirtilen açı değerleri sırası ile girilmiştir. Böylece uç nokta gerçek konum vektörü hesaplanmıştır. Gerçek konum vektörü ise denklem 4.22'deki şekilde ifade edilmiştir. Gerçek konum vektörü gerçekte oluşan uç konumun x,y ve z koordinatlarından oluşmaktadır.

$$Pi_{statik} \equiv [Pix_{statik}; Piy_{statik}; Piz_{statik}] \equiv [0; 0; (d1 + a2 + a3)] \quad (4.21)$$

Çizelge 4.4 : Robot Yatay Konumda Açısal Hatalar Dahil Açı Değerleri.

$\theta_{hata_{statik1}}$
$\pi/2 + \pi/2 + \theta_{hata_{statik2}}$
$\theta_{hata_{statik3}}$

$$Pg_{statik} \equiv [Pgx_{statik}; Pgy_{statik}; Pgz_{statik}] \quad (4.22)$$

İstenen ve gerçek uç nokta konumları belirlendiğine göre artık robot uç noktasının konumunun robot statik olarak yatay konumda dururken yapacağı toplam konum hatası denklem 4.23'deki gibi belirlenebilir

$$Phata_{statik} \equiv \sqrt{(Pix_{statik} - Pgx_{statik})^2 + (Piy_{statik} - Pgy_{statik})^2 + (Piz_{statik} - Pgz_{statik})^2} \quad (4.23)$$

Artık dinamik benzetim sırasında oluşan uç nokta konum hataları ve statik durumdaki uç nokta konum hatası bilinmektedir. Hesaplanan statik uç konum hata değeri kısıt değerinden büyük ise yapı yetersiz ve kalınlaştırılması gerektiği anlamına gelmektedir. Statik uç nokta hatasının kısıt ile kıyaslanması denklem 4.24'deki gibidir.

$$Phata_{statik} > uchata_{statik} \Rightarrow \text{yapı yetersiz} \quad (4.24)$$

Eğer statik durumda da yapı yetersiz ise aynı dinamik durumda olduğu gibi hangi uzvun uç konum hatasına en çok katkıda bulunduğu belirlenir. Bunun için ise dinamik hareket sırasında yapılan değerlendirme gibi yine sırasıyla bütün uzuvlar esnek diğerleri katı kabul edilerek uç konum hataları elde edilir. Hangi durumda uç konum hatası en fazla ise o uzuv robot uç konum hatasına en fazla sebep olan uzuvdur ve ilk olarak kalınlaştırılması gereken uzuv olarak belirlenir.

Örnek olarak birinci uzuv esnek ama ikinci ve üçüncü uzuv katı kabul edilip uç konum hatası belirlenir. Bu sonuç birinci uzuvun uç konum hatasına etkisini göstermektedir. Aynı işlem ikinci ve üçüncü uzuv için tekrar edilir ve böylece hangi uzuvun zayıf kaldığı ve en çok hataya sebebiyet verdiği ortaya çıkarılır.

Eğer, hem statik durumda hem dinamik hareket sırasında meydana gelen robot uç konum hataları kısıtlardan düşük ise Evet cevabı ile 9. kısıma geçilir ve optimizasyona devam edilir.

Eğer, statik veya dinamik durumdan herhangi birinde kısıtlardan yüksek robot uç konum hatası oluştuysa, hayır cevabı ile 8. kısıma geçilir.

4.1.8 Adım 8 : Yetersiz yapı et kalınlıklarının arttırılması

Bu kısıma gelinmesinin amacı statik ve dinamik uç nokta konum hatalarından en az birinin kısıt değerlerinin üzerinde olmasıdır. Bu sebeple uzuvlardan doğru olanının kalınlaştırılması gerekmektedir. 7. kısımda hem statik hem dinamik durumda hangi uzvun robot uç konum hatasına en fazla sebep olduğu hesaplanmıştı. Bu bilgilerde kullanılarak uzuvlar aşağıdaki koşullara göre kalınlaştırılıp döngü başına dönlür.

* Eğer dinamik durumda robot uç konumuna en fazla hataya sebep olan uzuv ile statik durumda robot uç konumuna en fazla hataya sebep olan uzuv aynı ise bu uzuv artım miktarı kadar kalınlaştırılır.

* Eğer dinamik durumda robot uç konumuna en fazla hataya sebep olan uzuv ile statik durumda robot uç konumuna en fazla hataya sebep olan uzuv farklı ise iki uzuv da artım miktarı kadar kalınlaştırılır.

Uzuv kalınlıkları denklem 4.25’de ifade edildiği şekilde tasarım parametrelerinde belirlenen uzuv kalınlıklarının artış miktarı kadar arttırılır ve döngü 2. adımdan devam eder.

$$t_{uzuv_i} \equiv t_{uzuv_i} + t_{artis} \quad (4.25)$$

4.1.9 Adım 9 : Acil durma anı için Harmonic Drive® dayanımının testi

Uç konum hata miktarının istenen aralıkta olduğu, hem statik hem dinamik anlamda uç konum hata kısıtının içerisinde kaldığımız anlamına gelir. Artık ikinci acil durma senaryosu için üretilen yörünge planı altında katı yapı dinamik benzetim ortamında tekrar benzetim yapılacaktır. İkinci yörünge planının tek amacı ani durma sırasında Harmonic Drive® dişli kutularının dayanıp dayanamayacağını gözlemlemektir. Bu doğrultuda, bu aşamaya varmış olan motor, dişli kutuları ve yapıda meydana gelen sehimlerden kaynaklı oluşan uç konum hatası açısından sınırların altında kalan uzuvlar ani durma için planlanan yörünge ile katı yapı dinamik benzetime tekrar gönderilir.

Ani durma yörünge planında katı yapı dinamik benzetim sonucu oluşan en yüksek tork değeri ile Harmonic Drive® anlık en yüksek tork limiti ‘ TM ’ kıyaslanır. Bu kıyaslama sonucunda, Harmonic Drive® dişli kutusunun ani durma sırasında oluşacak torka dayanıp dayanamayacağına karar verilir.

Eğer dayanıyor ise evet, dayanmıyor ise hayır cevabı ile döngüye devam edilmektedir.

4.1.10 Adım 10 : Acil durma senaryosuna dayanamayan Harmonic Drive® dişli kutularının yeniden seçimi

Bu bölüm Harmonic Drive® dişli kutusunun 9. madde içinde elendiği anlamına gelmektedir. Bir büyük Harmonic Drive® dişli kutusu seçimi yapıp döngünün başına dönülür.

Eğer test edilen Harmonic Drive® dişli kutusundan daha büyük ölçüde bir dişli kutusu, elenerek oluşturulan Harmonic Drive® listesinde yer almıyor ise, bir büyük motor seçimi yapılarak döngünün başına gidilir.

4.1.11 Adım 11 : Optimizasyonun sonlandırılması ve sonuçların elde edilmesi

Döngünün son aşaması olan bu aşamada artık optimizasyon sonucu ortaya çıkmıştır ve bütün testlerden geçen optimum sonuç elde edilmiştir. Bu doğrultuda başarılı olan motor, Harmonic Drive® dişli kutularının numaraları, uzuv kalınlıkları, uzuv iç, dış çapları, bütün detayları ile diğer sonuçlar (burulma miktarı, en yüksek oluşan tork değerleri, sehim miktarları) ve sonucu ifade eden gerekli grafikler elde edilir.

4.2 Buluşsal Algoritma için Örnek Optimizasyon ve Sonuçları

Robot tasarım optimizasyonu için geliştirilen deneme yanılma prensibine dayanan buluşsal yöntemin kullanıldığı örnek bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 sırasıyla örnek optimizasyon probleminin tasarım parametrelerini ve kısıtlarını göstermektedir.

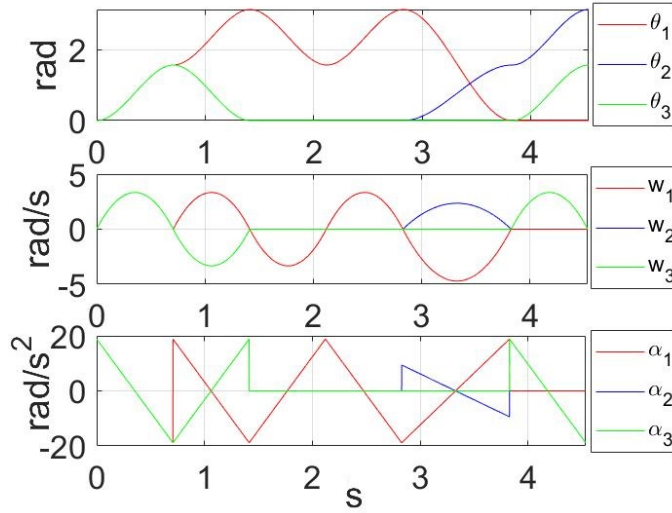
Çizelge 4.5 : Örnek Optimizasyon Tasarım Parametreleri.

Istenecek çalışma alanı ($d1, a2, a3$) – (mm)	(110, 100, 150) – mm
En yüksek hıza ulaşma süresi (t_{maks}) – (s)	0,5s
Yapının malzemesi (çelik - alüminyum)	Çelik
Uzuvların başlangıç kalınlıkları (t_b) – (mm)	3mm
Uzuv kalınlıklarının artış miktarı (t_{artis}) – (mm)	0,5mm

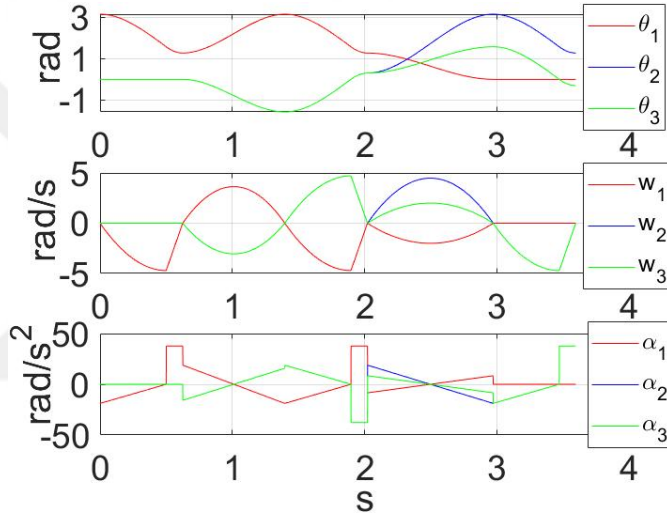
Çizelge 4.6 : Örnek Optimizasyon Kısıtları.

Uzuvların en büyük tam tur periyodu ($t_{maks.periyot}$) – (s)	1s
Motor güvenlik sabiti ($0 < M_{gs} < 1$)	0,9
Robot en yüksek taşıma kapasitesi (m_{maks}) – (kg)	1kg
Acil durma sırasında en yüksek yavaşlama ivmesinin normal ivmeye oranı (ay_{acil})	2
Harmonic Drive® en fazla izin verilen burulma miktarı (θ_{HD} - (yay – dakika))	10yay – dk
Dinamik hareket sırasında en büyük uç konum hatası ($uchata_{dinamik}$) – (mm)	1mm
En büyük statik uç konum hatası ($uchata_{statik}$) – (mm)	0,5mm

6 adet seri hareketten oluşan kübik hız profiline sahip yörünge planı da Şekil 4.5’de görülmektedir. Şekil 4.6 is acil durum sırasında kullanılacak trapez hız profiline sahip yörünge planını göstermektedir.



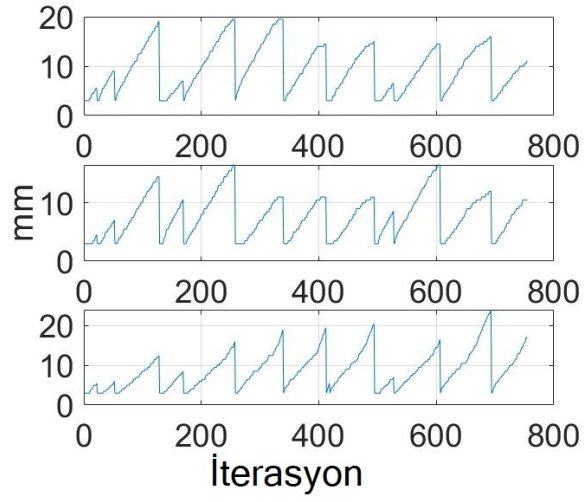
Şekil 4.5 : Nominal Çalışma Durumunda Kullanılan Kübik Hız Profilleri.



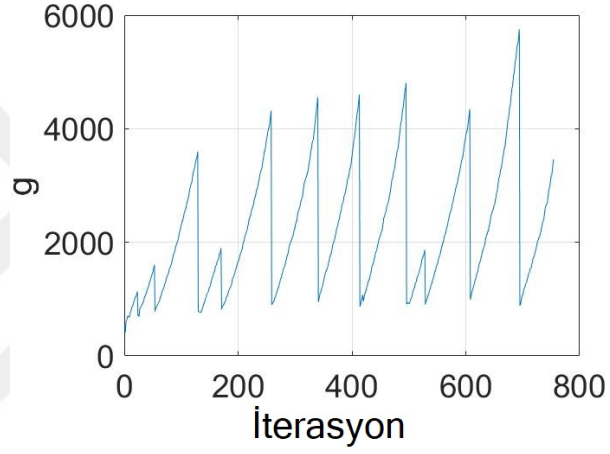
Şekil 4.6 : Acil Durma Sırasında Kullanılan Trapez Hız Profilleri.

Şekil 4.7 ise iterasyon boyunca uzuvların et kalınlıklarının değişimini göstermektedir. Aynı şekilde Şekil 4.8 ise toplam robot kütlelerinin iterasyon boyunca değişimini göstermektedir. Dinamik hareket sırasında uç konumunda meydana gelen hataların en büyük değerlerinin iterasyon boyunca değişimi ise Şekil 4.9'deki gibidir.

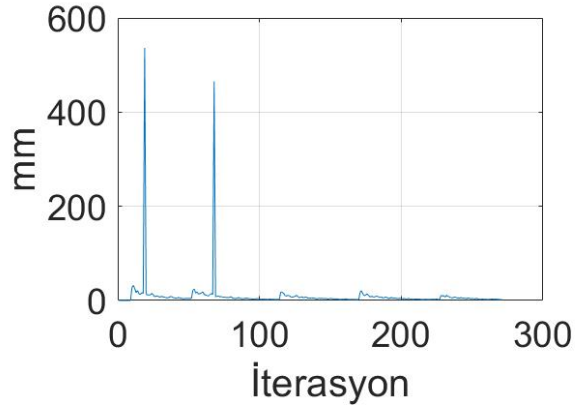
Motorların kapasiteleri ile dinamik benzetim ortamında oluşan tork değerleri bütün optimizasyon döngüsü içerisinde devamlı kıyaslanmaktadır. Şekil 4.10 ise final optimum tasarımın motor kapasiteleri ile o uzuvların dinamik benzetim ortamında ihtiyaç duydukları tork değerlerinin kıyaslamasını göstermektedir. Motor güvenlik sabiti ' M_{gs}' göz önüne alınarak yapılan optimizasyonda Şekil 4.10'de de görüldüğü



Şekil 4.7 : Uzun Et Kalınlıkları İterasyonu.

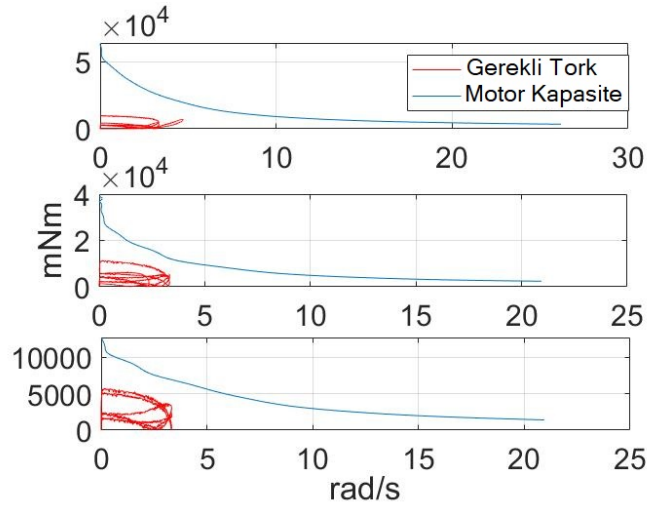


Şekil 4.8 : Toplam Robot Kütlesi İterasyonu.



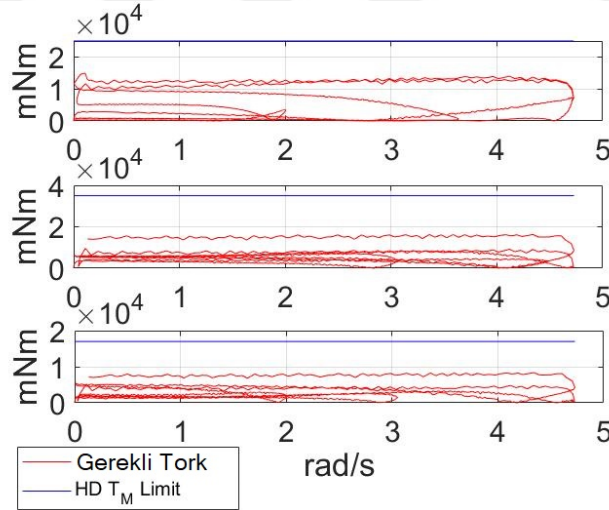
Şekil 4.9 : Dinamik Hareket Sırasında Meydana Gelen Uç Konum Hata İterasyonu.

gibi ihtiyaç duyulan tork değerleri ile motor kapasiteleri arasında belirli bir fark vardır. Bu farkın sebebi motor güvenlik sabitidir.



Şekil 4.10 : Motorların Kapasiteleri ile Dinamik Benzetim Tork Değerleri Kıyaslaması.

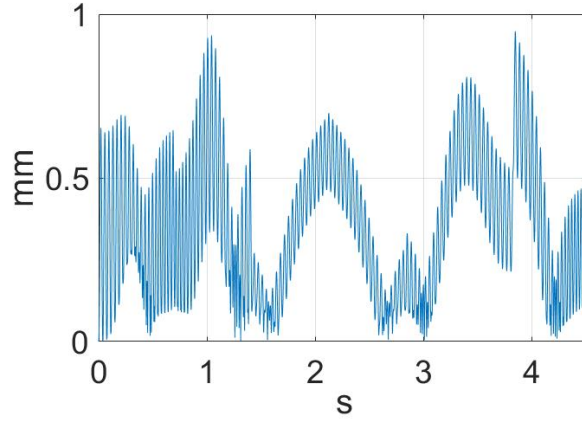
Acil durma senaryosu için üretilen trapez hız profiline sahip yörünge altında yapılan dinamik benzetim sonucu oluşan tork değerleri Harmonic Drive® anlık en yüksek tork limiti olan T_M tork limiti ile kıyaslanmaktadır. Örnek optimizasyon sonucu elde edilen optimum sonucun acil durma senaryosundaki tork değerleri ile seçilen dişli kutularının $'T_M'$ tork limiti kıyaslaması Şekil 4.11'deki gibidir.



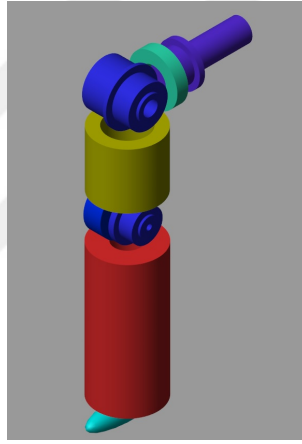
Şekil 4.11 : Acil Durma Tork Değerleri ile Harmonic Drive® $'T_M'$ Tork Limiti Kıyaslaması.

Şekil 4.12 ise optimum tasarımın dinamik hareket sırasında yapılarıdaki sehimlerden dolayı oluşan uç konum hata grafiğini göstermektedir. Dinamik hareket sırasında örnek optimizasyon kısıtlarında yer alan en büyük uç konum hata kısıtı $'uchata_{dinami}'_k$ 1mm

olarak belirlenmiştir ve Şekil 4.12 uç konumunda bu kısıtın üzerinde bir hata olmadığını göstermektedir. Optimizasyon sonucu ortaya çıkan tasarımın Simmechanics® ortamındaki görünümü ise Şekil 5.15’de verilmiştir.



Şekil 4.12 : Dinamik Hareket Sırasındaki Uç Konum Hatası.



Şekil 4.13 : Optimum Tasarım Görünümü.

Optimizasyon sonucu elde edilen optimum robot kolu tasarımının bütün genel sonuçları Çizelge 4.7’de detaylı olarak gösterilmektedir. Tasarım parametreleri ve kısıtlarla sonuç tablosu kıyaslandığı zaman, hiçbir değerin kısıt değerini aşmadığı görülmektedir. Toplam robot kütlesi 3458g olarak çıkmıştır. Toplamda 755 iterasyon 166317s yaklaşık olarak 2 gün sürmüştür. Bütün çalışmalar *Intel(R) Core(TM) i7 – 6700HQ CPU @ 2.60GHz 2.59GHz* işlemci ve 16,0 GB RAM sahibi bir bilgisayarda yapılmıştır.

Çizelge 4.7 : Örnek Optimizasyon Genel Sonuçları.

En büyük dinamik uç konum hatası	0,95mm
En büyük statik uç konum hatası	0,15mm
Motor 1	EC4-POLE-22-90 W
Harmonic Drive® 1	HFUC-2A-11-100
Uzuv 1 et kalınlığı	11mm
Uzuv 1 iç çapı	24,7mm
Uzuv 1 dış çapı	46,7mm
Motor 2	EC45-50 W
Harmonic Drive® 2	CPL-2A-14-80
Uzuv 2 et kalınlığı	10,5mm
Uzuv 2 iç çapı	37mm
Uzuv 2 dış çapı	58mm
Motor 3	EC45-30 W
Harmonic Drive® 3	HFUC-2A-11-50
Uzuv 3 et kalınlığı	17mm
Uzuv 3 iç çapı	24,7mm
Uzuv 3 dış çapı	58,7mm
Toplam robot kütlesi	3458g
Toplam iterasyon sayısı	755
Optimizasyon süresi	166317s

5. BSGA-II İLE PARETO OPTİMUM ÇÖZÜM KÜMESİNİN ELDE EDİLMESİ

İlk yöntemde robot kolu tasarım optimizasyonu için deneme yanılma prensibine dayanan buluşsal bir algoritma geliştirilmiştir. Bu ilk yöntemde motorlar, dişli kutuları ve yapı kalınlıkları dinamik benzetim sonuçlarının kısıtlarla kıyaslanması sonucuna göre tekrar yenilenmiş, kısıtların karşılandığı yerde ise döngü bitirilmiş ve tekil bir sonuç elde edilmiştir. Tek amaç fonksiyonu toplam robot kütlesinin en aza indirilmesi olan yöntemde dinamik hareket sırasında yapıdaki sehinden dolayı uç konumda oluşan hataların en büyük değeri ise bir kısıt değerine bağlanmıştır. Dolayısıyla tekil amaç fonksiyonu olan bir yöntemde tekil bir sonuç elde edilmiştir. Bu tekil sonuç arayışı ise aslında daha iyi bir sonuç olma ihtimali varken kısıtlara uyan ilk çözümün optimum çözüm olduğu yanılgısına sebep olmaktadır.

Bu doğrultuda çoklu amaç fonksiyonu yaratıp BSGA-II kullanılarak Pareto optimum çözüm kümesi elde etmeye çalışan ikinci yönteme başvurulmuştur. İlk yöntemde kısıt değeri ile kontrol edilmek istenen robot uç konum hatası bu yeni yöntemde en aza indirilmek istenen bir amaç fonksiyonuna çevrilmiştir. Böylece iki amaç fonksiyonu olan bir optimizasyon problemi oluşturulmuş ve dolayısıyla iki amaç fonksiyonuna da hizmet etmek zorunda kalan sistem doğal olarak tekil bir çözüm yerine optimum çözüm kümesi sunmaktadır. Bu çözüm kümesine literatürde Pareto adı verilmektedir. Pareto optimum çözüm kümesi genetik algoritma gibi bir sezgi üstü algoritma ile desteklenen ve elde edilen en iyi sonuçların amaç fonksiyonlarında oluşturdukları değerleri gösteren bir grafiktir. Böylece tasarımcı iki amaç fonksiyon değerlerini de gördüğü bir sonuç grafiği üzerinde kendi tasarımı için seçim hakkına sahip olur. Örneğin; sonuç kümesi içerisinde kütlesi çok az farklı ama uç konum hatası çok farklı olan iki çözüm arasında seçim yaparken kütleden biraz feragat edip çok daha katı bir tasarımı tercih edebilir. İlk yöntemde tekil bir sonuç ararken bulduğumuz ilk sonucu seçmek zorunda kaldığımızı düşünürsek, Pareto ortamdaki bütün uygun sonuçları gösterip tercih hakkı sunmaktadır.

Bu yeni yöntemde 2 amaç fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlardan ilki bir önceki yöntemdeki ile aynı olup denklem 5.1’de görüldüğü gibi toplam robot kütlelerinin en aza indirilmesidir. Diğer amaç fonksiyonu ise denklem 5.2’deki gibi dinamik hareket sırasında uzuvlarda meydana gelen sehimlerden dolayı robot uç konumunda meydana gelen hataların en büyük değerinin en aza indirilmesidir. Optimizasyon probleminin belirlemesini istediğimiz 9 değişken vardır. Bunlar 3 adet motor, 3 adet Harmonic Drive® dişli kutusu ve boru şeklindeki 3 uzvun et kalınlıklarıdır. Bu çalışma daha çok taslak tasarım optimizasyonuna ağırlık vermektedir. Final tasarım için elde edilen optimum taslak tasarımın topoloji optimizasyonuna ihtiyaç duyulabilir. BSGA-II yönteminin kullanıldığı bu optimizasyon döngüsünün tasarım parametreleri ve kısıtları ise sırasıyla Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de listelenmiştir. Optimizasyon döngüsü başlamadan önce ilk yöntemde de olduğu gibi öncelikle tasarım parametreleri ve kısıtlar ışığında 6 seri hareketten oluşan kübik hız profiline sahip yörüngeler dinamik benzetim ortamında kullanılmak üzere oluşturulurlar. Bu 6 seri hareket robot kolunun yapabileceği en zor hareketler olarak özenle belirlenmiştir. Bunlardan en önemlisi ise robot yatay konumdayken yer çekiminin tersi yönde ivmelenmesidir. Diğer hareketler yine hem tahrik gruplarını en çok zorlayacak hem de uzuvlara gelen yüklerin en çok olacağı hareketlerden oluşmaktadır.

$$AF_1 \equiv \min(M1K + M2K + M3K + DK1K + DK2K + DK3K + U1K + U2K + U3K)(kg) \quad (5.1)$$

$$AF_2 \equiv \min(Robot\ U\ \check{C}\ Konum\ Hatası)(mm) \quad (5.2)$$

Çizelge 5.1 : BSGA-II Yöntemi Tasarım Parametreleri.

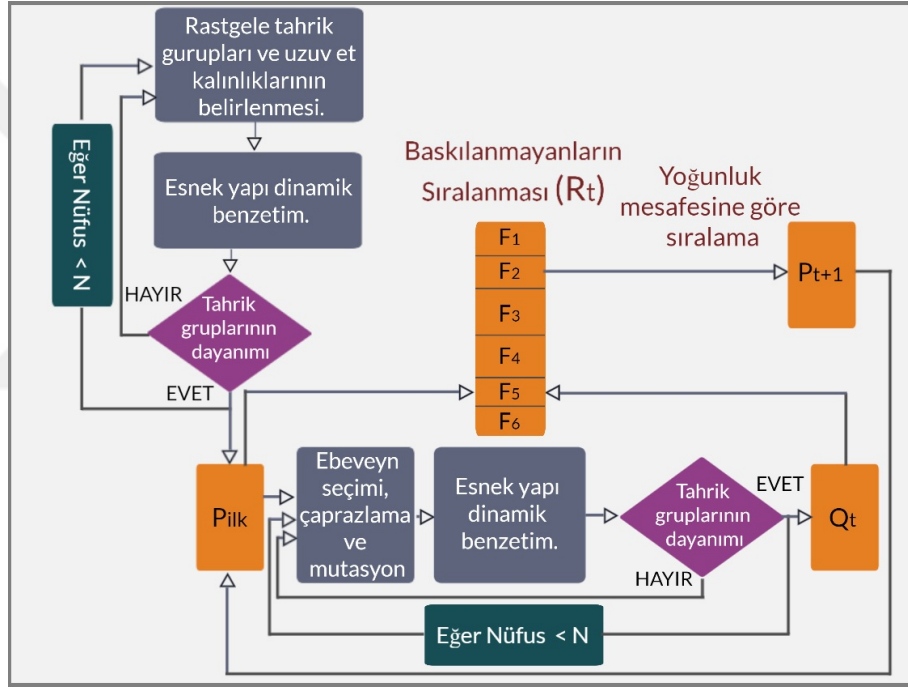
İstenen çalışma alanı $(d1, a2, a3) - (mm)$
En yüksek hıza ulaşma süresi $(tm_{maks}) - (s)$
Yapının malzemesi (çelik - alüminyum)
İterasyon sayısı (IT)
Nüfustaki toplam birey sayısı (N)
Mutasyon olma ihtimali $(\%)$

Çizelge 5.2 : BSGA-II Yöntemi Kısıtları.

Uzuvların en büyük tam tur periyodu ($t_{maks.periyot} - (s)$)
Motor güvenlik sabiti ($0 < M_{gs} < 1$)
Robot en yüksek taşıma kapasitesi ($m_{maks} - (kg)$)
Uzuvların et kalınlıklarını belirleme aralığı 1, 2, 3 [$t1, 2, 3_{min} - t1, 2, 3_{max}$]
Uzuv et kalınlık hassasiyeti (mm)

5.1 Akış Diyagramının Adımları

BSGA-II yönteminin robot kolu tasarım optimizasyonuna uyarlamasını özetleyen akış diyagramı Şekil 5.1'deki gibidir. Akış diyagramının ilerleyişi adım adım anlatılmaktadır.



Şekil 5.1 : Buluşsal Algoritma Akış Diyagramı.

5.1.1 İlk nüfusun ' P_t' ' oluşturulması

Optimizasyon döngüsü ' N ' adet bireyden oluşan ilk nüfusun ' P_t' ' rastgele oluşturulması ile başlamaktadır. İlk olarak tahrik grubu kütüphanesinden 3 adet motor rastgele seçilir. Bu yöntemdeki ilk farklılık ise Harmonic Drive® dişli kutularının bağımsız seçilmemeleridir. Bu yöntemde dişli kutuları motor seçimine bağımlı olarak seçilirler. Buradaki kriterler ise motorların uygulayabildiği en yüksek tork değerine dayanabilen,

aynı zamanda tasarım parametrelerine ve kısıtlara göre oluşturulan yörüngelerdeki en yüksek hızlara dayanabilen en hafif dişli kutusunu doğrudan belirlemektir. Bu yöntemde dişli kutularının harici bir fren sistemi ile durdurulması fikri ortadan kaldırılmış ve sisteme tek güç uygulayanın motorlar olduğu kabul edilmiştir. Böylece dişli kutularının motor kapasitesinden daha fazla bir tork değerine maruz kalması imkansız olmaktadır. Bu sebeple dişli kutuları doğrudan motor kapasitelerine ve yörüngelere göre seçilmiştir. Motor tork kapasitesi ve dişli kutusu dayanım tork değerleri ise iki aşamalı bir kıyaslama ile yapılmaktadır. Bunlardan ilki denklem 5.3'de görüldüğü gibi seçilmiş olan motorun uygulayabildiği en yüksek tork değeri olan tutma tork limiti tahrik grubu kütüphanesindeki bütün dişli kutularının anlık tork limiti $'T_M'$ ile kıyaslanır. Bu aşamayı geçemeyen dişli kutularının elenmesi ile yeni bir dişli kutusu kütüphanesi elde edilir. Bu yeni listeden ise denklem 5.4'de görüldüğü gibi seçilen motorun nominal tork limiti bu sefer kalan listedeki bütün dişli kutularının sürekli çalışmaya uygun ortalama tork limiti $'T_A'$ ile kıyaslanır. Bu kıyaslama sonucunda elenen dişli kutuları ile yeni bir dişli kutusu listesi elde edilir ve bu listedeki bütün dişli kutuları seçilen motorun kapasitesine uyumlu olarak kabul edilir.

$$HD \text{ Anlık Tork Limiti (TM)} > \text{Motor Tutma Torku} \quad (5.3)$$

$$HD \text{ Ortalama Tork Limiti (TA)} > \text{Motor Nominal Torku} \quad (5.4)$$

Motor kapasitesine göre uygun olan dişli kutularının elenerek yeni bir liste oluşturmasının ardından bu listedeki dişli kutularının bu sefer yörüngede ihtiyaç duyulan hızlara dayanıp dayanmadığı kontrol edilmektedir. Harmonic Drive® dişli kutusu kataloğunda yağ ve gres kullanma durumları için ayrı hız limitleri mevcuttur. Bu çalışmada dişli kutularının yağ ile kullanıldığı kabul edilmiş ve o hız limitleri ile kıyaslamalar yapılmıştır. Bu doğrultuda denklem 5.5 elenerek oluşan yeni dişli kutularının en yüksek giriş hızı (yağ) limitlerini, yörüngede oluşan en yüksek hız değeri ile kıyaslarken, denklem 5.6 dişli kutularının ortalama giriş hız limitlerini, yörüngedeki oluşan ortalama hız değeri ile kıyaslamaktadır. Bu kıyaslamalar sonucunda da elenen dişli kutuları artık seçime uygun Harmonic Drive®

dişli kutularının tam listesini oluşturmaktadır. Bu listedeki en hafif olan Harmonic Drive® dişli kutusu seçilerek döngüye devam edilir. Bu işlem 3 uzuv için tekrar edilip finalde 3 adet dişli kutusu seçimi tamamlanmış olmaktadır.

$$\text{HD En Yüksek Giriş Hız Limiti (Yağ)} > \text{En Yüksek Yörünge Hızı} \quad (5.5)$$

$$\text{HD Ortalama Giriş Hız Limiti (Yağ)} > \text{Ortalama Yörünge Hızı} \quad (5.6)$$

Motor ve Harmonic Drive® dişli kutularının seçimi tamamlandıktan sonra sırada uzuv et kalınlıklarını seçmek kalmıştır. Bu seçim ise tasarım parametrelerinde belirlenen uzuv et kalınlıkları aralıkları içerisinde rastgele belirlenmektedir. Bütün motorlar, dişli kutuları ve et kalınlıkları seçildikten sonra bunlar büyüklüklerine göre uygun uzuvlara yerleştirilirler. Yani rastgele seçimler her uzuv için ayrı ayrı yapılmaz. Toplu olarak seçim yapıldıktan sonra büyükten küçüğe doğru uzuvlara yerleştirilirler. Buradaki mantık ise bir seri robotta en güçlü motorun, en büyük dişli kutusunun ve en kalın uzvun hepsini taşıyacak olan ilk uzuvda olması gerekliliğinin çok açık olmasıdır. Bu doğrultuda en büyük tahrik grubu ve en kalın et kalınlığı ilk uzva, ikinci büyük tahrik grubu ve orta kalınlıktaki et kalınlığı ikinci uzva ve son olarak en hafif tahrik grubu ve en in ince et kalınlığı üçüncü uzva atanır.

Tasarım artık tam olarak belirlenmiştir ve bu tasarıma artık bir birey olarak bakılır ama bütün belirlenen bireyler doğrudan nüfusa eklenmezler. Optimizasyon probleminin amacı toplam robot kütlelerini ve uç konum hatasını en aza indirmektir, fakat bunu elde ederken tahrik grubunun yeterliliğini de garanti etmek zorundadır. Bu bağlamda, belirlenen bireyler esnek yapı dinamik benzetim ortamına gönderilirler. 6 adet en zorlayıcı hareketleri içeren yörüngelerle beraber dinamik benzetim ortamında seçilen bireylerin tahrik grubunun yeterliliği kontrol edilir. Yeterlilikler ilk yöntemde olduğu gibi motorların katalog değerlerinden eğri uydurma yöntemi ile elde edilen $Tork - D/dk$ eğrilerinin motor güvenlik sabiti de $'M_{gs}'$ göz önünde bulundurularak benzetim sonucu oluşan $Tork - D/dk$ eğrisi ile kıyaslanması ile yapılmaktadır. Hiçbir açısal hız

değerinde ihtiyaç duyulan tork değeri, motorun o açısal hız değerinde üretebileceği tork değerinin motor güvenlik sabiti ' M_{gs}' ile çarpılmış halinden büyük olmamalıdır. Bu kıyaslama iki eğrinin kıyaslamasıdır ve bütün D/dk değerlerindeki tork değerlerinin tek tek kıyaslanması anlamına gelir. Tahrik grubu yeterlilik testini de başarılı bir şekilde tamamlayan bireyler artık nüfusa eklenirler. Tasarım parametrelerinde belirlenen ' N' ' adet nüfus sayısı elde edilene kadar bu döngü devam eder ve yeni bireyler rastgele seçilip, uygun uzuvlara yerleştirilip esnek yapı dinamik benzetim ortamına gönderilirler. ' N' ' adet birey elde edildikten sonra artık ilk nüfus ' P_t' ' elde edilmiş demektir.

5.1.2 Bireylerin birbirini baskılama kuralları ve sıralanmaları

Optimizasyon probleminde birbiri ile çelişen 2 amaç fonksiyonu vardır. Bunlar, toplam robot kütlesinin en aza indirilmesi ve dinamik hareket sırasında yapıdaki sehimlerden dolayı oluşan uç konum hatalarının en büyük değerinin en aza indirilmesidir. Bu iki amaç fonksiyonunun yer aldığı grafik Pareto grafiği olarak adlandırılır. Bu grafikte bir bireyin her iki amaç fonksiyonundaki değeri gözlemlenmektedir.

Seçilen nüfustaki bütün bireylerin amaç fonksiyonlarındaki değerleri elde edilir. Dinamik hareket sırasında robot uç konumunda meydana gelen sehim ise toplu parametre tahmini “lumped parameter estimation” yöntemi ile belirlenmektedir. Bu yöntem 3’de detaylı olarak anlatılmıştır. Toplam robot kütlesi ise motorlar, dişli kutuları ve uzuvların toplam kütlelerinden ibarettir.

Bütün bireyler amaç fonksiyonlarındaki değerlerine göre tek tek birbirleriyle kıyaslanır ve bütün bireylerin toplamda kaç kez baskın olduğu ve kaç kez baskılandığı listelenir. Bu kıyaslamalarda hiçbir zaman bir başka birey tarafından baskılanmayan bireyler, hiç baskılanmamış (Non-dominated) bireylerdir ve aynı zamanda Pareto optimum çözüm kümesini oluşturan bireylerdir. Bu kıyaslama kısaca denklem 5.7’de özetlenmiştir.

$$\begin{array}{l}
 x, y \text{ bireyini baskılar} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Eğer } x \text{ her iki} \\
 \text{amaç fonksiyonunda} \\
 y \text{ 'den daha iyi ise} \\
 \\
 \text{VEYA;} \\
 \\
 x \text{ en az bir} \\
 \text{amaç fonksiyonunda} \\
 y \text{ 'den daha iyi,} \\
 \text{diğer amaç fonksiyonunda} \\
 \text{ise } y \text{ ile aynı ise}
 \end{array} \right. \quad (5.7)
 \end{array}$$

Bütün nüfus hiç baskılanmamış bireylerden en çok baskılanan bireylere doğru sıralanır. Bu sıralamada aynı sayıda baskılanmış bireyler, başka bireyleri baskıladıkları sayılara göre sıralanırlar. Yani ilk öncelik kaç kez baskılandığıdır ve ikinci öncelik kaç kez başkasından daha baskın oluşlarıdır.

5.1.3 Çaprazlama, mutasyon ve yeni nüfusun ' Q_t ' elde edilmesi

Sırada ise ' N ' adet bireyden oluşan nüfusa ' N ' adet yeni bireyi genetik algoritma çaprazlaması ve mutasyon işlemleri sonrasında elde etmek vardır. Çaprazlama yapılması için ebeveyn seçimleri ise Sıralama Tabanlı Seçim “Rank Based Selection” yöntemiyle belirlenmiştir. Bu yöntemde en çok baskılanan bireylere 1 ve daha az baskılananlara giderek daha yüksek rakam atanır. En yüksek rakam haliyle hiç baskılanmayan (Non-Dominated) bireylerin olur. Bireyler bu rakamlarla orantılı seçilme olasılığına sahip olurlar. Böylelikle, hiç baskılanmayan bireylerin ebeveyn olarak seçilme olasılığı fazlayken, en çok baskılanan bireylerin seçilme olasılığı düşük tutulmuş olur.

Çaprazlama için ikili sayı sisteminde bütün motor ve yapı kalınlıklarının yazılması gerekmektedir. Dişli kutuları ise çaprazlamaya girmemekte, daha önce bahsedildiği gibi seçilen motorlara ve yörünge'nin en yüksek hızına göre en hafif olanı otomatik olarak seçilmektedir. Motorlar kütlelerine göre kütüphanede sıralanmışlardır ve verilen sıra numarası doğrudan motorun kütle'sini ve boyutunu temsil etmektedir. Uzun kalınlıkları ise tasarım parametreleri sırasında belirlenmiş aralıkta ve hassasiyette

olmalıdır. Bu parametreler uzuv kalınlıklarının kaç basamaktan oluşacağını bildirmektedir. Kütüphanede toplamda 31 adet motor bulunmaktadır. 31 sayılı ikili sayı sisteminde 5 basamak ile ifade edilebilmektedir. Bütün motorların ve uzuv kalınlıklarının ikili sayı sistemine çevrilip yan yana yazıldığı dizi ise o bireyin kromozomunu oluşturmaktadır.

Örnek bir kromozom oluşturmak için 1-31 aralığında ilk uzuv için 26, ikinci uzuv için 15 ve üçüncü uzuv için 10 numaralı motoru seçtiğimizi varsayalım. Uzuv 1 için seçilen et kalınlığının $[3mm - 20mm]$ aralığından $8,1mm$, uzuv 2 için $[2mm - 18mm]$ aralığından $5,2mm$ ve uzuv 3 için $[1mm - 16mm]$ aralığından $3mm$ olduğunu varsayalım. Hassasiyetin $0,1mm$ olduğunu kabul edersek bütün olası uzuv kalınlıklarının ifade edilebilmesi için 8 basamağa ihtiyaç oluşmaktadır. Tabi 8 basamak ihtiyaç duyulan uzuv kalınlık seçeneklerinin hepsini fazlasıyla karşılamaktadır ve basamaklar açıkta kalmaktadır. Bu sorun en basit olarak normalizasyon uygulanarak çözümlenmiştir. Her bir motor da 5 basamak ile ifade edilebildiğine göre bir bireyi ifade eden kromozomda bu örnek için toplamda $(8 + 5) \times 3 \equiv 39$ basamak bulunmaktadır.

Bu yapılan örneğin ikili sayı sistemine çevrilmiş hali denklem 5.8'deki gibidir. Denklem 5.8'de ilk 15 basamak 5'erli olarak sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü motorları temsil ederken, devamındaki basamaklar 8'erli olarak sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü uzuvların et kalınlıklarını ifade etmektedir. Bu sayı dizisinin tamamı genetik algoritmada kromozom olarak isimlendirilmekte ve her bir basamak ise gen olarak adlandırılmaktadır.

$$[11010\ 01111\ 01010\ 01010000\ 00110011\ 00100010] \quad (5.8)$$

Çaprazlama çeşidi ise çok noktalıdır. Toplam gen sayısı ile orantılı bir sayıda rastgele aralıklarla bölünerek çaprazlama yapılmaktadır. Çaprazlama sonrasında ise kromozomlar tasarım parametrelerinde belirtilen mutasyon olma ihtimali oranında mutasyona uğrattılırlar. Böylece çeşitliliğin artırılması hedeflenmektedir. Çaprazlama ve mutasyon sonrasında elde edilen yeni motor, dişli kutusu ve et kalınlıkları ilk nüfus belirlenirken yapıldığı gibi kütleleri ve büyüklükleri ile orantılı olarak uzuvlara

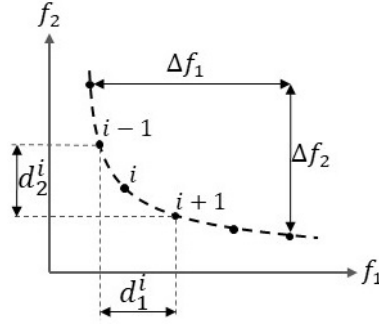
atanırlar. Kromozomun sıralaması da aynı bu büyüklüğe göre yeniden düzenlenir ve bu düzenlenen şekliyle oluşan yeni birey tahrik grubunun yeterliliğini test etmek adına esnek yapı dinamik benzetim ortamına gönderilir. Tahrik grubunun yeterliliği ilk nüfustaki bireylerde olduğu gibi test edilir ve seçilen bireyin başarılı olması durumunda oluşan yeni birey (çocuk) yeni nüfusa ' Q_t ' eklenir. ' N ' adet yeni birey elde edilene kadar bu döngüye devam edilir.

' N ' adet bireylere sahip olan ' P_{il_k} ' ve ' Q_t ' nüfusları birleştirilip baskılanmayanlardan en çok baskılananlara doğru sıralanmasıyla ' $2 \times N$ ' bireye sahip ' R_t ' nüfusu elde edilir. ' P_{il_k} ' olarak adlandırılan nüfus, her iterasyonda asıl değişen nüfustur ve ilk iterasyondan sonra ' P_t ' olarak isimlendirilecektir.

5.1.4 Yoğunluk mesafesine göre sıralama

' R_t ' nüfusu ' $2 \times N$ ' adet bireye sahiptir. Fakat iterasyon sonrası bu nüfusun sadece yarısı, yani yine ' N ' adeti seçilecektir. Fakat bu nüfusun ilk ' N ' çözümü doğrudan alınmaz. İlk olarak N . sırada olan bireyin kaç kez baskılanmış olduğuna bakılır. Yani, bir önceki kısımda gruplanmış olan bireylerin kaçınıcı sıradaki grubunda yer aldığına bakılır. Bundan önceki grupta yani sırada yer alan bireyler doğrudan yeni nüfusa aktarılırlar. Ama son grupta olan bireylerin belirli bir kısmı aslında " N " adet nüfusu elde etmek için gereken kadar bireyi alınacaktır. Burada ise bir seçim söz konusudur. Bu seçim ise yoğunluk mesafesi "crowding distance" yöntemiyle belirlenmektedir. Bu yöntemde son seçimi yapılacak olan gruptaki bireylerin her birinin birbirine olan uzaklıkları hesaplanır ve diğerlerine en uzak olandan yakın olana doğru sıralanırlar. En uzak olandan başlayıp ihtiyaç kadarı yeni nüfusa katılır. Bu yöntemdeki amaç birbirine çok yakın olan bireyleri seçmek yerine birbirinden uzak olanları seçip çeşitliliği arttırmaktır. Böylece bir sonraki iterasyon için yeni nüfus ' P_{t+1} ' elde edilmiş olur. Bu döngü toplam istenen iterasyon sayısı kadar tekrar edilir ve son iterasyondaki hiç baskılanmamış sonuçlar Pareto optimum çözüm kümesini dolayısıyla optimizasyon sonucunu oluştururlar.

Şekil 5.2 yoğunluk mesafesi "crowding distance" elemesini göstermektedir. Denklem 5.9 ise yoğunluk mesafesi "crowding distance" hesaplamasının formülasyonudur.



Şekil 5.2 : Yoğunluk Mesafesi (Crowding Distance) Yöntemi

$$d_i \equiv \frac{d_1^i}{\Delta f_1} + \frac{d_2^i}{\Delta f_2} \quad (5.9)$$

5.2 BSGA-II Yöntemi ile Yapılan Örnek Optimizasyon ve Sonuçları

Önerilen robot tasarım optimizasyonu yönteminin daha açık bir şekilde anlaşılabilmesi adına örnek optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bunlardan ilki buluşsal yöntemle elde edilen sonuçları kıyaslamak için BSGA-II yöntemi ile yapılan örnektir ve ana örnek olarak kabul edilmiştir. BSGA-II ile oluşturulmuş önerilen tasarım optimizasyon algoritmasının başka boyutlar ve farklı taşıma kapasiteleri için başarımlarını gözlemlemek için farklı örnek sonuçlar da elde edilmiştir. Bu örnekler aynı zamanda pareto optimum çözüm kümesinin farklı boyutlardaki ve taşıma kapasitelerindeki robot tasarımlarında nasıl değiştiğini göstermektedir. Devamında ise yapının alüminyum seçilmesi durumunu gösteren örnek yer almaktadır ve bu örnek ile alüminyum ve çelik hammadde seçimlerinin pareto optimum çözüm kümeleri kıyaslanmaktadır. Son olarak ise uzuvların daha yavaş hareket etmesi durumunda pareto grafiğinin değişimi gözlemlenmiştir. Bütün diğer örnekler ana örnekle kıyaslanıp tasarım parametreleri ve kısıtların pareto optimum çözüm kümesine etkisi gözlemlenmiştir. Ana örnek dışındaki bütün örneklerde uzuv kalınlık hassasiyeti 1 mm olarak değiştirilmiş ve aralıkları arttırılmıştır.

5.2.1 Örnek 1 (ana örnek)

Örnek optimizasyon için belirlenen tasarım parametreleri ve kısıtlar sırasıyla Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4’de listelenmiştir.

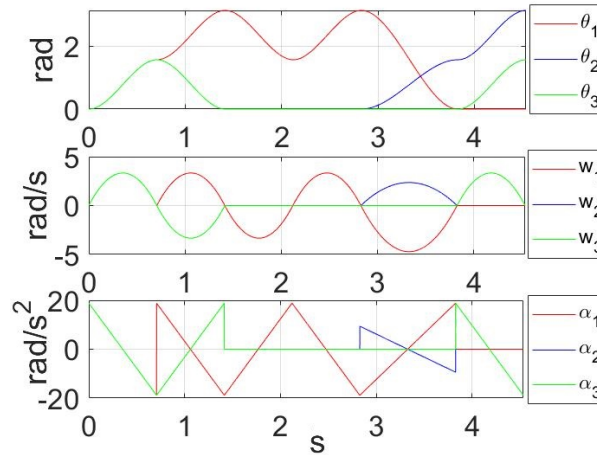
Çizelge 5.3 : Örnek 1 Optimizasyon Tasarım Parametreleri.

İstenen çalışma alanı ($d1, a2, a3$) – (mm)	(110, 100, 150)(mm)
En yüksek hıza ulaşma süresi (t_{maks}) – (s)	0,5s
Yapının malzemesi (çelik - alüminyum)	Çelik
İterasyon sayısı (IT)	40
Nüfustaki toplam birey sayısı (N)	25
Mutasyon olma ihtimali (%)	%20

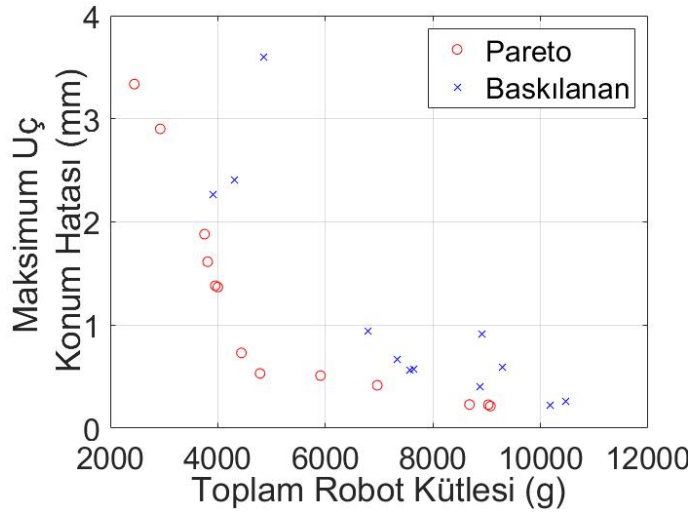
Çizelge 5.4 : Örnek 1 Optimizasyon Kısıtları.

Uzuvların en büyük tam tur periyodu ($t_{maks.periyot}$ – (s))	1s
Motor güvenlik sabiti ($0 < M_{gs} < 1$)	0,9
Robot en yüksek taşıma kapasitesi (m_{maks} – (kg))	1kg
Uzuv 1 için arama aralığı [$t1_{min} - t1_{max}$]	[3,0 – 20,0]mm
Uzuv 2 için arama aralığı [$t2_{min} - t2_{max}$]	[2,0 – 18,0]mm
Uzuv 3 için arama aralığı [$t3_{min} - t3_{max}$]	[1,0 – 16,0]mm
Uzuv et kalınlık hassasiyeti (mm)	0,1mm

Tasarım parametreleri ve kısıtlara göre 6 seri hareketin kübik hız profili ile yapıldığı yörüngeler Şekil 5.3’de gösterilmiştir. Bu yörünge planı buluşsal yöntemde nominal çalışma sırasında kullanılan yörünge planı ile aynıdır. Döngünün başlaması ve rastgele motor seçimi ve uzuv et kalınlığı seçimi ile elde edilen başlangıç nüfusu Şekil 5.4’deki gibidir.

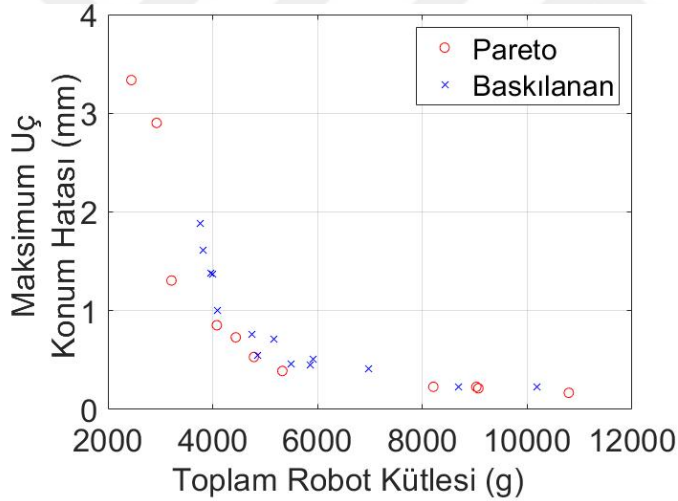
**Şekil 5.3 : BSGA-II Yörünge Planı**

Örnek optimizasyon için toplam iterasyon sayısı 'IT' 40 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.5 - 5.9 sırasıyla 1., 10., 20., 30. ve 40. yani en son iterasyon sonucu elde edilen nüfusların amaç fonksiyonlarındaki değerleri gösterilmiştir. Bütün nüfusun



Şekil 5.4 : Örnek 1 Başlangıç Nüfusu

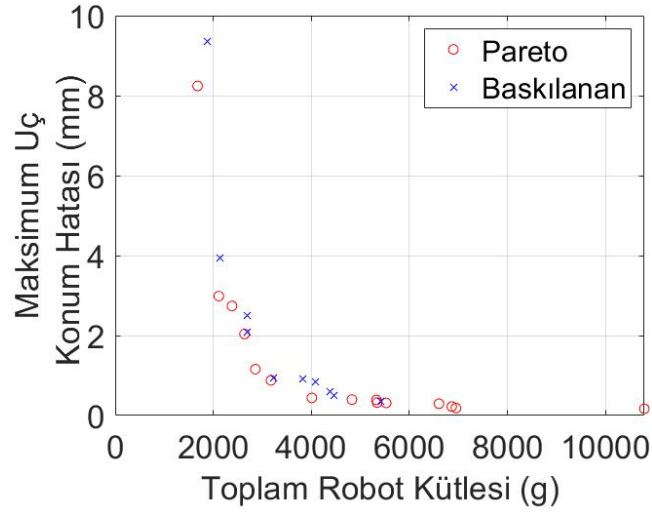
içerisinde hiç baskılanmayan bireyler ise Pareto grafiğini oluşturmaktadır. Şekil 5.10 ise başlangıç nüfusu ile 40. iterasyon sonrası elde edilen son nüfusun kıyaslamasını göstermektedir.



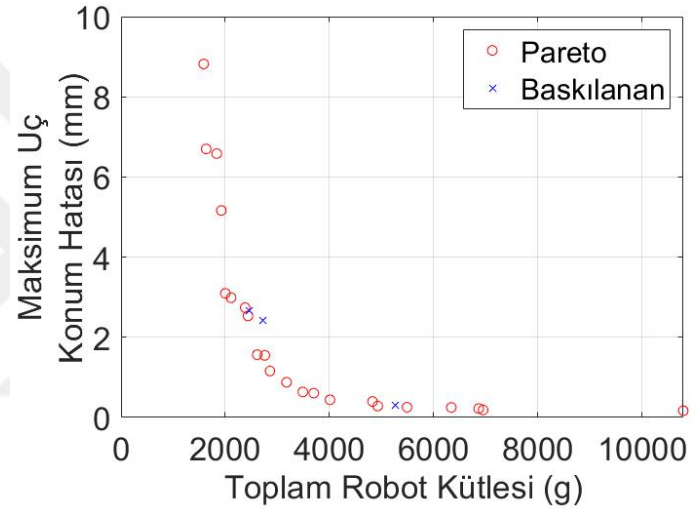
Şekil 5.5 : Örnek 1 Iterasyon 1 Nüfus Grafiği

Hiç baskılanmayan bireylerden oluşan Pareto grafiğinin iterasyon ilerledikçe geçirdiği evrim Şekil 5.11'deki gibidir.

Şekil 5.12 ise 40. iterasyon sonucu elde edilen son nüfustaki hiç baskılanmayanlardan oluşan Pareto grafiğini göstermektedir. Bu grafikte yer alan bireyler aynı zamanda optimizasyon sonucu elde edilen Pareto optimum çözüm kümesini oluşturmaktadır.



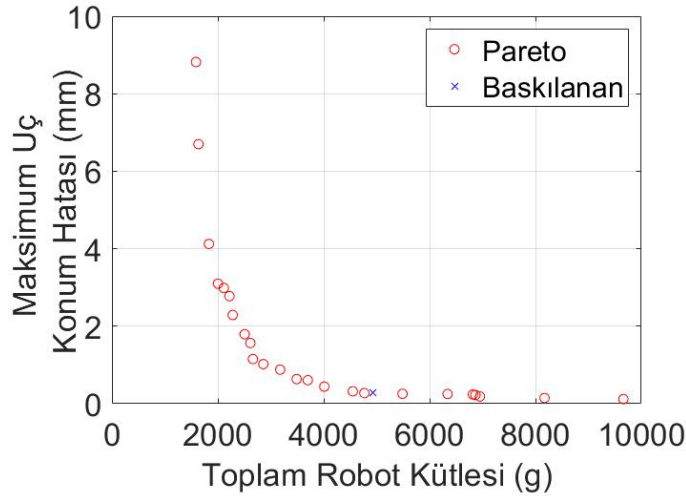
Şekil 5.6 : Örnek 1 Iterasyon 10 Nüfus Grafiği



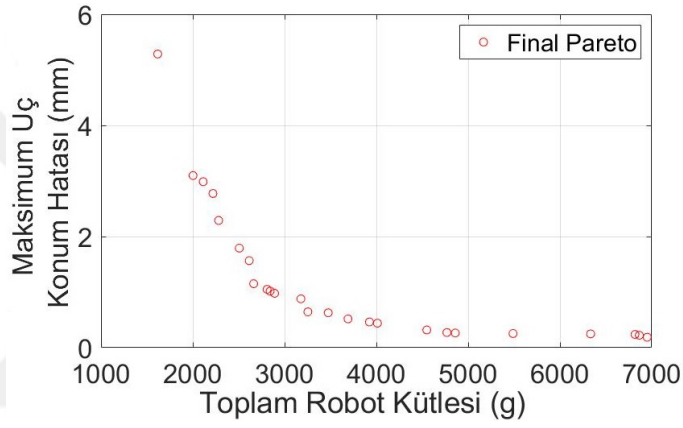
Şekil 5.7 : Örnek 1 Iterasyon 20 Nüfus Grafiği

Yapılan optimizasyon örneğinin 40. iterasyon sonrası elde edilen Pareto optimum çözüm kümesi Çizelge 5.5’de listelenmiştir. Çözüm kümelerinin arasından 12 numaralı çözüm örnek olarak seçilmiştir. Bu çözümün seçilmesinin sebebi ise buluşsal yöntemle elde edilen çözüme en yakın çözüm olmasıdır. Bu sayede iki yöntemin başarısı da kıyaslanabilmektedir. Çizelge 5.5’de görüldüğü gibi 12 numaralı çözümde $0,87mm$ en büyük uç konum hatası mevcuttur ve tasarımın toplam kütlesi $3177,3$ gramdır. 12 numaralı çözümün dinamik hareket sırasında yapıdaki sehimlerden dolayı meydana getirdiği uç konum hata grafiği Şekil 5.13’de verilmiştir.

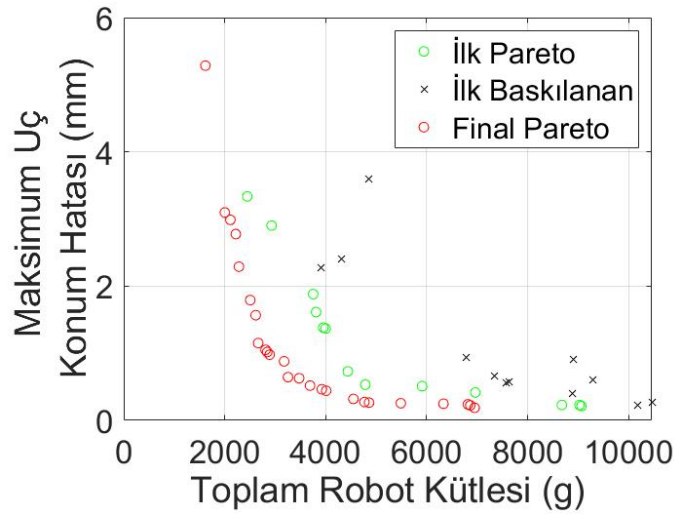
12 numaralı çözümün motor kapasitelerinin, Harmonic Drive® dişli kutularının dayanımlarının ve benzetim sonucu ihtiyaç duyulan tork değerlerinin kıyaslaması ise



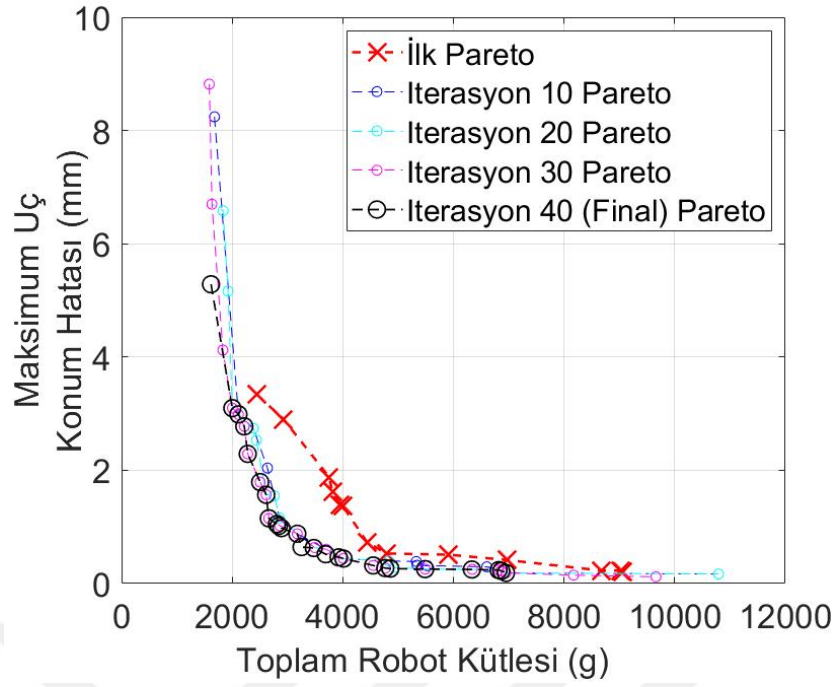
Şekil 5.8 : Örnek 1 Iterasyon 30 Nüfus Grafiği



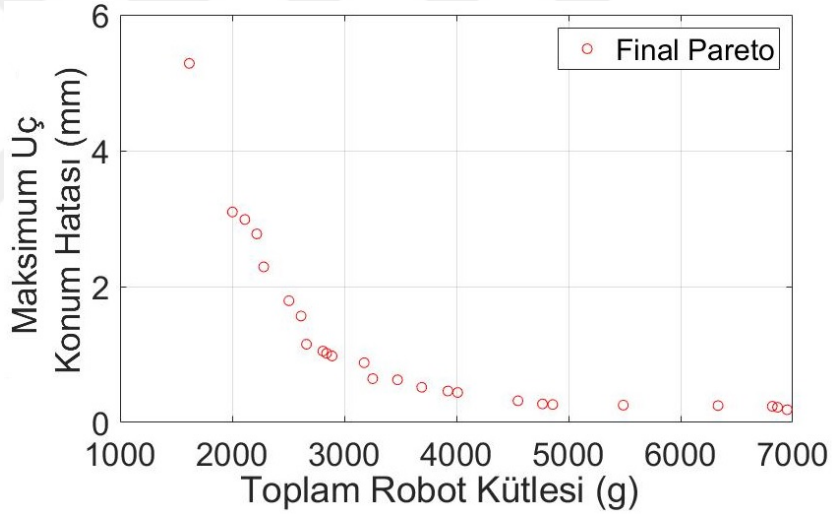
Şekil 5.9 : Örnek 1 Iterasyon 40 (Final) Nüfus Grafiği



Şekil 5.10 : Örnek 1 Başlangıç ve Final Nüfus Grafiği



Şekil 5.11 : Örnek 1 Pareto Grafiğinin Evrimi



Şekil 5.12 : Örnek 1 Final Pareto Grafiği (İterasyon 40)

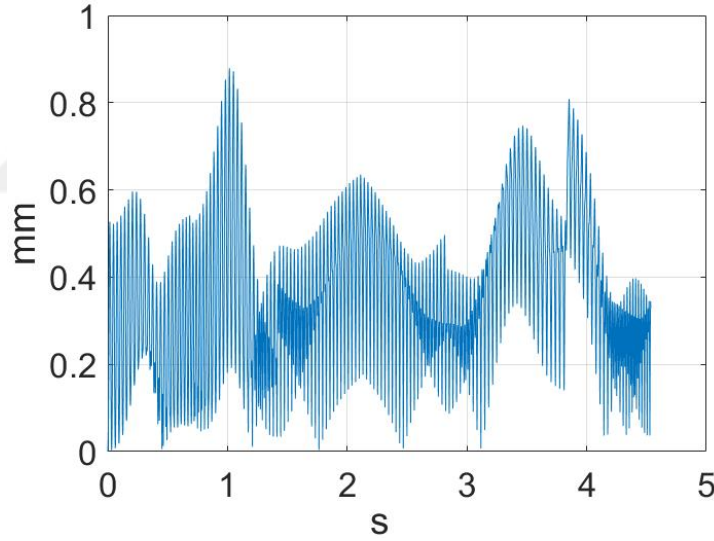
Şekil 5.14'deki gibidir. Şekil 5.14 ihtiyaç duyulan tork değerlerinin motor tork-D/dk eğrilerinin her zaman en az motor güvenlik sabiti ' M_{gs} ' oranında küçük olduğu görülmektedir.

Ayrıca Harmonic Drive® dişli kutularının dayanım tork değerleri ise motorların uygulayabileceği en yüksek tork değerlerinin üzerindedir ve bu sayede motorların dişli kutularına zarar vermesi engellenmiştir.

Çizelge 5.5 : Örnek 1 Pareto Optimum Çözüm Kümesi

Çözüm No	Toplam Robot Kütlesi (g)	Maks. Uç Konum Hatası (mm)	Çözüm No	Toplam Robot Kütlesi (g)	Maks. Uç Konum Hatası (mm)
1	1617,6	5,29	14	3475,3	0,63
2	2002,4	3,11	15	3690,9	0,54
3	2113,3	3,01	16	3924,0	0,46
4	2219,3	2,98	17	4011,3	0,44
5	2281,2	2,29	18	4549,3	0,34
6	2506,1	1,79	19	4767,8	0,32
7	2614,5	1,56	20	4859,3	0,27
8	2662,9	1,15	21	5488,6	0,26
9	2809,5	1,05	22	6333,6	0,25
10	2842,1	1,01	23	6817,4	0,24
11	2891,0	0,98	24	6865,0	0,22
12*	3177,3*	0,87*	25	6950,3	0,19
13	3253,3	0,64			

* Seçilen örnek optimum çözüm.

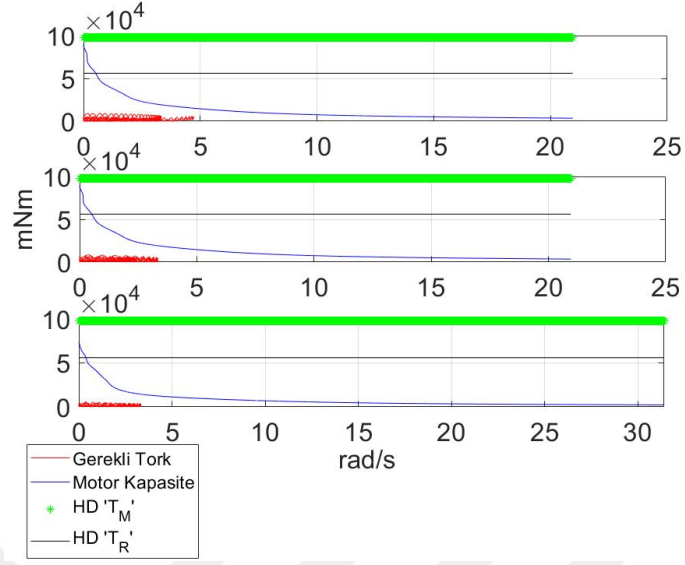


Şekil 5.13 : Örnek 1 Çözüm 12 Dinamik Hareket Sırasındaki Uç Konum Hatası

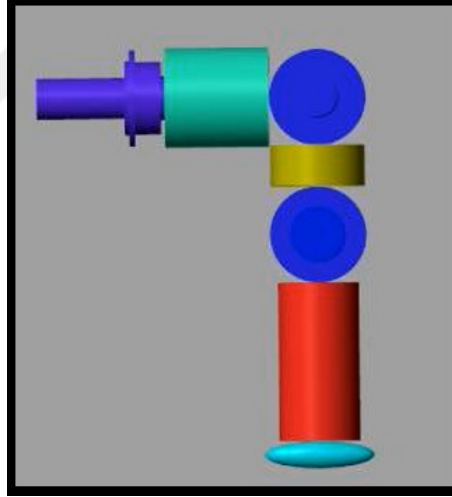
Şekil 5.15 ise seçilen 12 numaralı çözümdeki robot tasarımının benzetim ortamındaki görünümünü göstermektedir.

12 numaralı çözümde yer alan motorların, Harmonic Drive® dişli kutularının, uzuv et kalınlıklarının, toplam robot kütlesinin ve optimizasyon süresinin yer aldığı genel çözüm tablosu ise Çizelge 5.6'de listelenmiştir.

Bütün çalışmalar *Intel(R) Core(TM) i7 – 6700HQ CPU @ 2.60GHz 2.59GHz* işlemci ve 16,0 GB RAM sahibi bir bilgisayarda yapılmıştır.



Şekil 5.14 : Örnek 1 Çözüm 12 Motor Kapasiteleri, Harmonic Drive® Dişli Kutuları Dayanım Değerleri ve Benzetim Tork Değerlerinin Kıyaslanması



Şekil 5.15 : Örnek 1 Çözüm 12 Robot Tasarım Görünümü

5.2.2 Örnek 2

Bu örnekte ana örnekten farklı olarak sadece taşıma kapasitesi 2 kilografa çıkarılmıştır. Ayrıca toplam robot taşıma kapasitesinin artırılması ile uzuv et kalınlık aralıkları arttırılmıştır.

Örnek 2 için tasarım parametreleri ve kısıtlar Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8’de listelenmiştir.

Çizelge 5.6 : Örnek 1 Çözüm 12 Genel Sonuçları

En büyük dinamik uç konum hatası	0,87mm
Motor 1	EC – – 30 – 75W
Motor 2	EC – – 30 – 75W
Motor 3	EC – i – 40 – 70W
Harmonic Drive® 1	CPL – 2A – 20 – 50
Harmonic Drive® 2	CPL – 2A – 20 – 50
Harmonic Drive® 3	CPL – 2A – 20 – 50
Uzuv 1 Et Kalınlığı	10,1mm
Uzuv 2 Et Kalınlığı	8,1mm
Uzuv 3 Et Kalınlığı	3,3mm
Toplam Robot Kütlesi	3177,3g
Optimizasyon Süresi	280098s

Çizelge 5.7 : Örnek 2 Optimizasyon Tasarım Parametreleri.

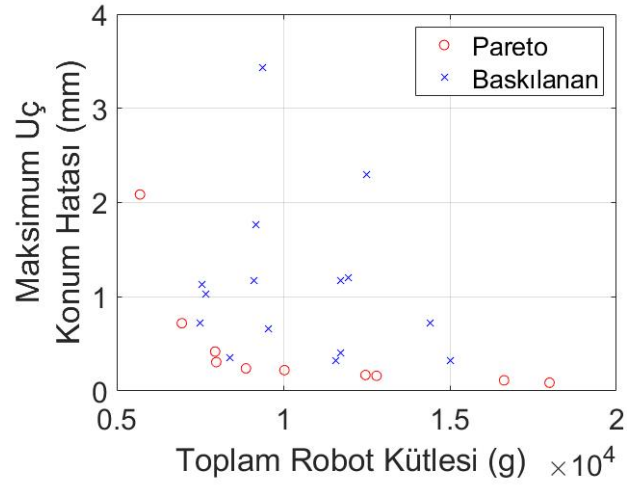
İstenen çalışma alanı ($d1, a2, a3$) – (mm)	(110, 100, 150)(mm)
En yüksek hıza ulaşma süresi (t_{maks}) – (s)	0,5s
Yapının malzemesi (çelik - alüminyum)	Çelik
İterasyon sayısı (IT)	40
Nüfustaki toplam birey sayısı (N)	25
Mutasyon olma ihtimali (%)	%20

Çizelge 5.8 : Örnek 2 Optimizasyon Kısıtları.

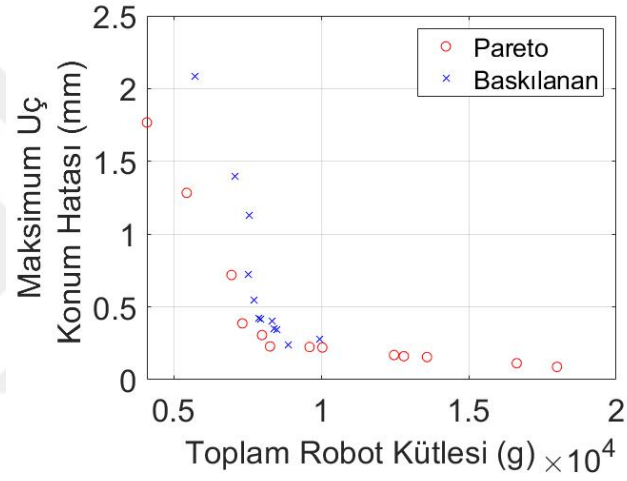
Uzuvların en büyük tam tur periyodu ($t_{maks.periyot}$ – (s))	1s
Motor güvenlik sabiti ($0 < M_{gs} < 1$)	0,9
Robot en yüksek taşıma kapasitesi (m_{maks} – (kg))	2kg
Uzuv 1 için arama aralığı [$t1_{min} - t1_{max}$]	[4 – 30]mm
Uzuv 2 için arama aralığı [$t2_{min} - t2_{max}$]	[3 – 28]mm
Uzuv 3 için arama aralığı [$t3_{min} - t3_{max}$]	[2 – 26]mm
Uzuv et kalınlık hassasiyeti (mm)	1mm

Döngünün başlaması ve rastgele motor seçimi ve uzuv et kalınlığı seçimi ile elde edilen başlangıç nüfusu Şekil 5.16'deki gibidir. Şekil 5.17 - 5.21 sırasıyla 1., 10., 20., 30. ve 40. yani en son iterasyon sonucu elde edilen nüfusların amaç fonksiyonlarındaki değerleri gösterilmiştir.

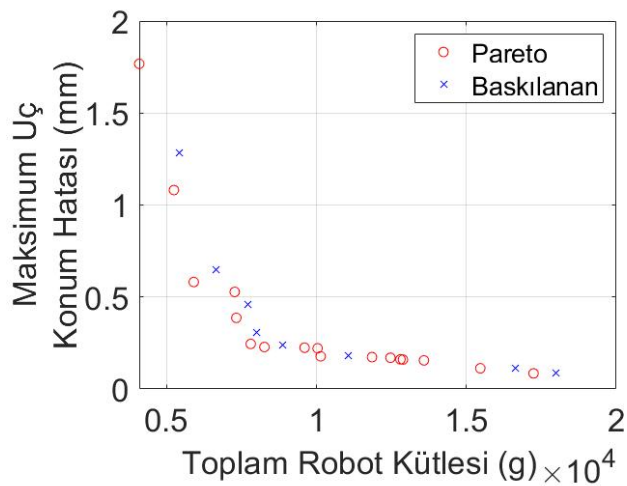
Şekil 5.22 ise başlangıç ve final nüfusun kıyaslamasını göstermektedir.



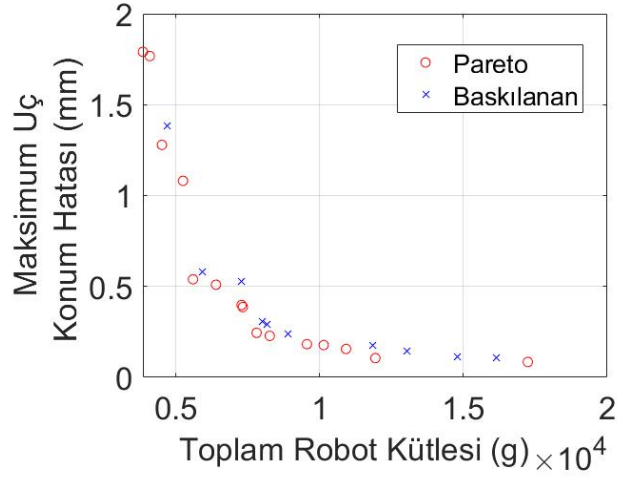
Şekil 5.16 : Örnek 2 Başlangıç Nüfusu



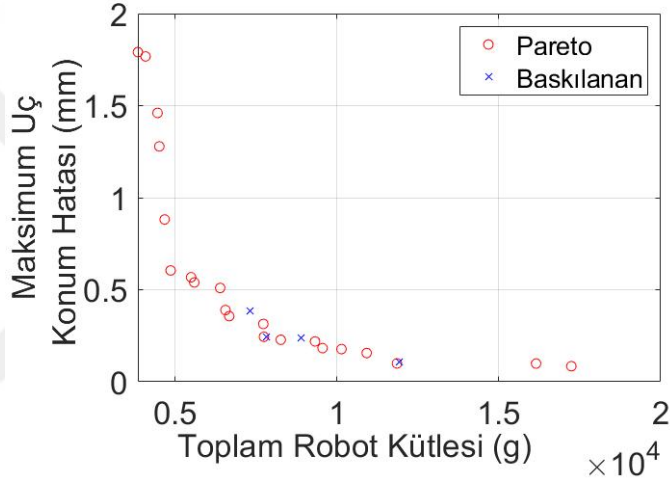
Şekil 5.17 : Örnek 2 Iterasyon 1 Nüfus Grafiği



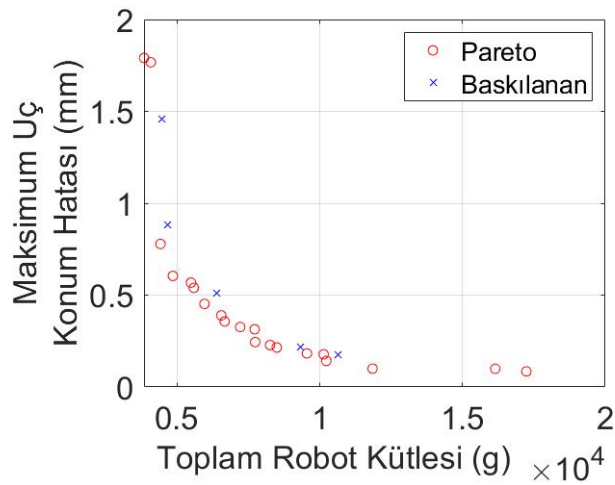
Şekil 5.18 : Örnek 2 Iterasyon 10 Nüfus Grafiği



Şekil 5.19 : Örnek 2 Iterasyon 20 Nüfus Grafiği



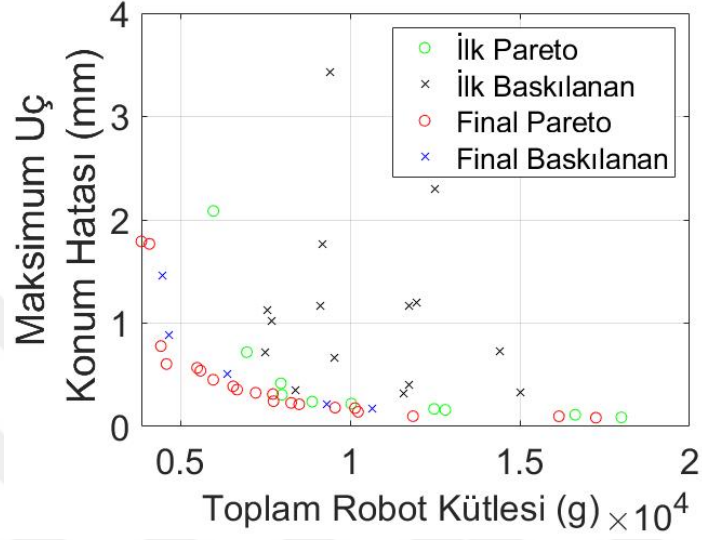
Şekil 5.20 : Örnek 2 Iterasyon 30 Nüfus Grafiği



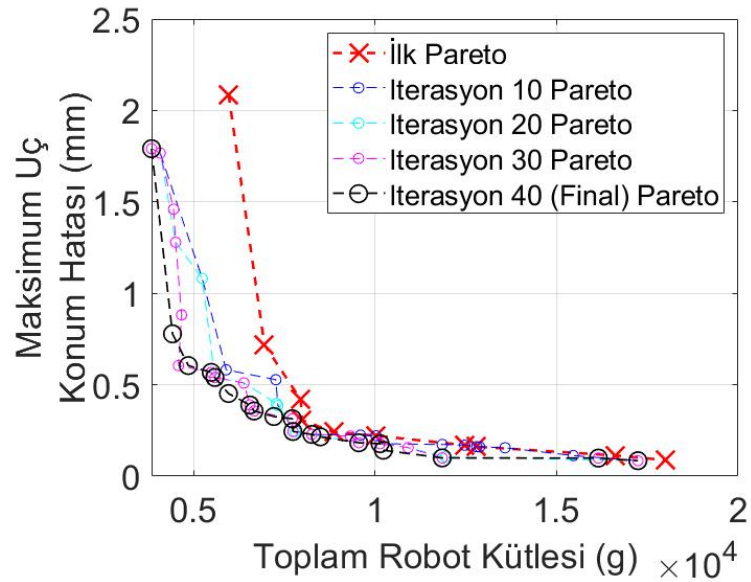
Şekil 5.21 : Örnek 2 Iterasyon 40 (Final) Nüfus Grafiği

Şekil 5.23 ise iterasyon ilerledikçe Pareto grafiğinin değişimini göstermektedir. Son 10 iterasyon arasında önemli bir fark olmaması optimizasyon döngüsünün iterasyon sayısının yeterli olduğunu göstermektedir.

Son olarak ise 5.24 40. iterasyon sonrası elde edilmiş baskılanmayan bireylerden oluşan final Pareto grafiğini göstermektedir.

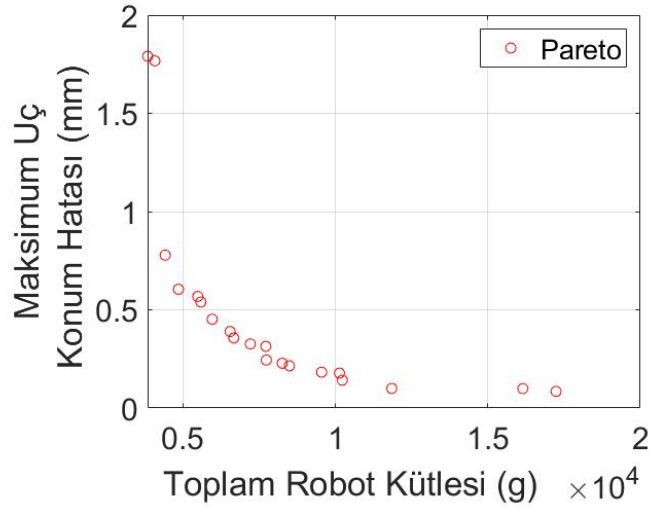


Şekil 5.22 : Örnek 2 Başlangıç ve Final Nüfus Grafiği



Şekil 5.23 : Örnek 2 Pareto Grafiğinin Evrimi

Örnek 2 sonucu elde edilen final Pareto optimum çözüm kümesinin amaç fonksiyonlarındaki değerleri Çizelge 5.9'deki gibidir.



Şekil 5.24 : Örnek 2 Final Pareto Grafiği (İterasyon 40)

Çizelge 5.9 : Örnek 2 Pareto Optimum Çözüm Kümesi

Çözüm No	Toplam Robot Kütlesi (g)	Maks. Uç Konum Hatası (mm)	Çözüm No	Toplam Robot Kütlesi (g)	Maks. Uç Konum Hatası (mm)
1	3845	1,791	11	7739	0,2443
2	4422	0,7783	12	8259	0,2281
3	4857	0,6047	13	8495	0,2148
4	5489	0,5677	14	9552	0,1826
5	5589	0,5395	15	10140	0,1775
6	5963	0,452	16	10230	0,1417
7	6551	0,3893	17	11850	0,0996
8	6668	0,3565	18	16150	0,0989
9	7213	0,3261	19	17240	0,0846
10	7721	0,3139			

5.2.3 Örnek 3

Örnek 3’de ise ana örnekten (Örnek 1) farklı olarak bu sefer taşıma kapasitesi 4 kilograma çıkarılmıştır. Ayrıca toplam robot taşıma kapasitesinin artırılması ile uzuv et kalınlık aralıkları artırılmıştır. Örnek 3 için tasarım parametreleri ve kısıtlar Çizelge 5.10 ve Çizelge 5.11’de listelenmiştir.

Döngünün başlaması ve rastgele motor seçimi ve uzuv et kalınlığı seçimi ile elde edilen başlangıç nüfusu Şekil 5.25’deki gibidir. Şekil 5.26 - 5.30 sırasıyla 1., 10., 20., 30. ve 40. yani en son iterasyon sonucu elde edilen nüfusların amaç fonksiyonlarındaki

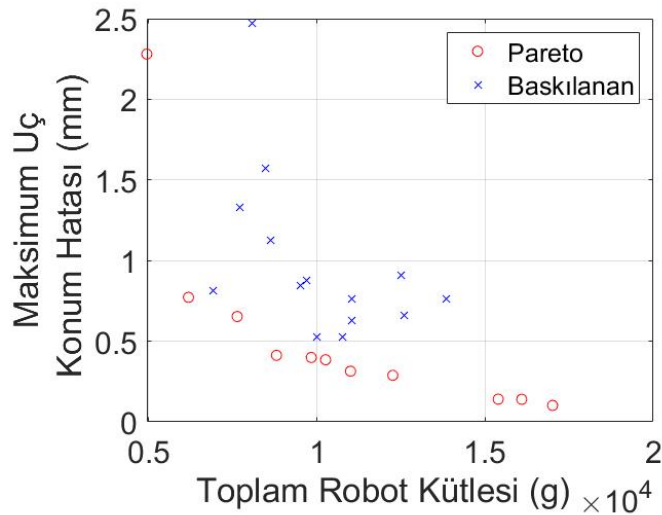
Çizelge 5.10 : Örnek 3 Optimizasyon Tasarım Parametreleri.

İstenen çalışma alanı ($d1, a2, a3$) – (mm)	(110, 100, 150)(mm)
En yüksek hıza ulaşma süresi (t_{maks}) – (s)	0,5s
Yapının malzemesi (çelik - alüminyum)	Çelik
İterasyon sayısı (IT)	40
Nüfustaki toplam birey sayısı (N)	25
Mutasyon olma ihtimali (%)	%20

Çizelge 5.11 : Örnek 3 Optimizasyon Kısıtları.

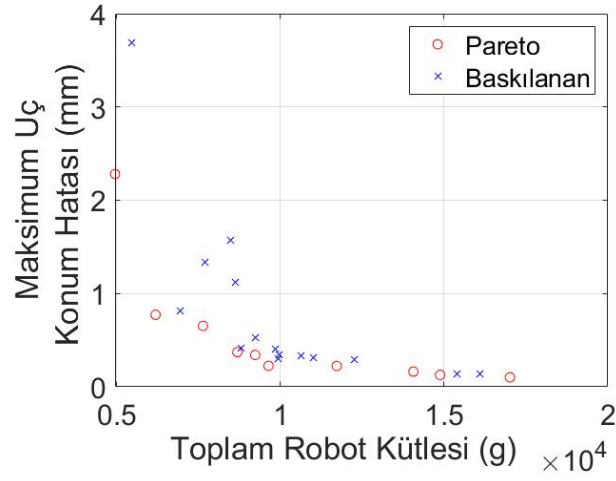
Uzuvların en büyük tam tur periyodu ($t_{maks.periyot}$ – (s))	1s
Motor güvenlik sabiti ($0 < M_{gs} < 1$)	0,9
Robot en yüksek taşıma kapasitesi (m_{maks} – (kg))	4kg
Uzuv 1 için arama aralığı [$t1_{min} - t1_{max}$]	[4 – 40]mm
Uzuv 2 için arama aralığı [$t2_{min} - t2_{max}$]	[3 – 36]mm
Uzuv 3 için arama aralığı [$t3_{min} - t3_{max}$]	[2 – 34]mm
Uzuv et kalınlık hassasiyeti (mm)	1mm

değerleri gösterilmiştir. Şekil 5.31 ise başlangıç ve final nüfusun kıyaslamasını göstermektedir. Şekil 5.32 ise iterasyon ilerledikçe Pareto grafiğinin değişimini göstermektedir. Son olarak ise 5.33 40. iterasyon sonrası elde edilmiş baskılanmayan bireylerden oluşan final Pareto grafiğini göstermektedir.

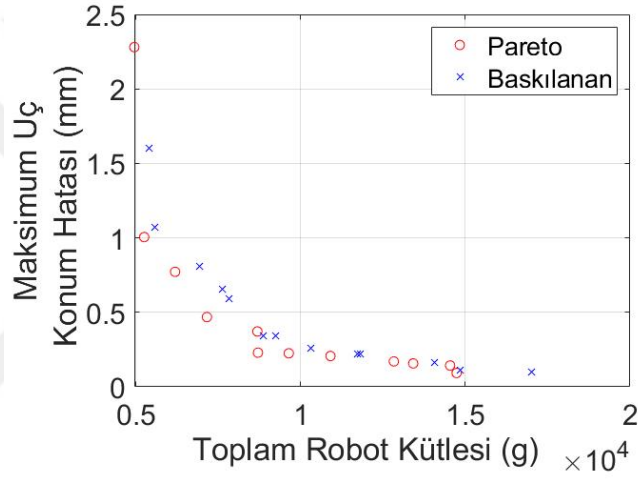


Şekil 5.25 : Örnek 3 Başlangıç Nüfusu

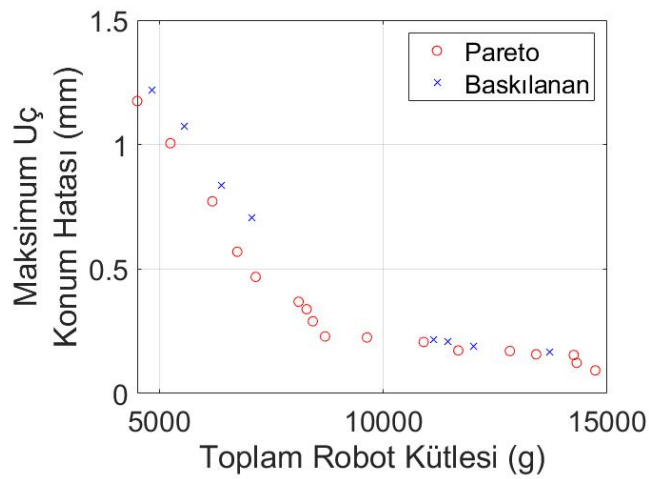
Örnek 3 sonucu elde edilen final Pareto optimum çözüm kümesinin amaç fonksiyonlarındaki değerleri Çizelge 5.12'deki gibidir.



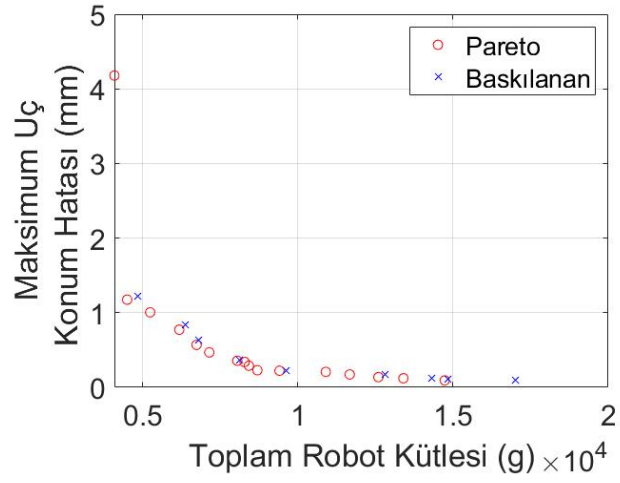
Şekil 5.26 : Örnek 3 Iterasyon 1 Nüfus Grafiği



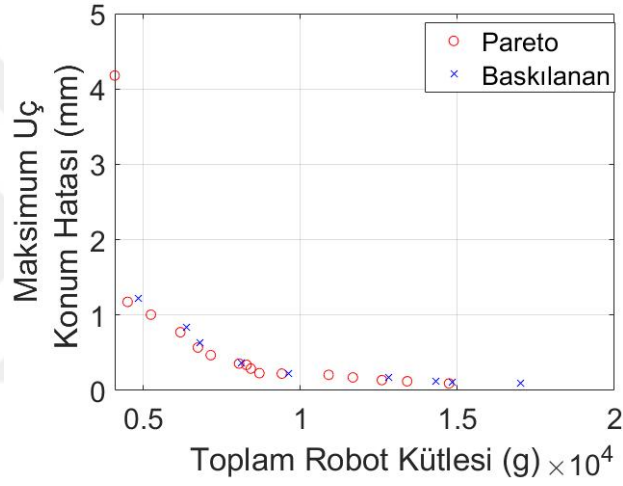
Şekil 5.27 : Örnek 3 Iterasyon 10 Nüfus Grafiği



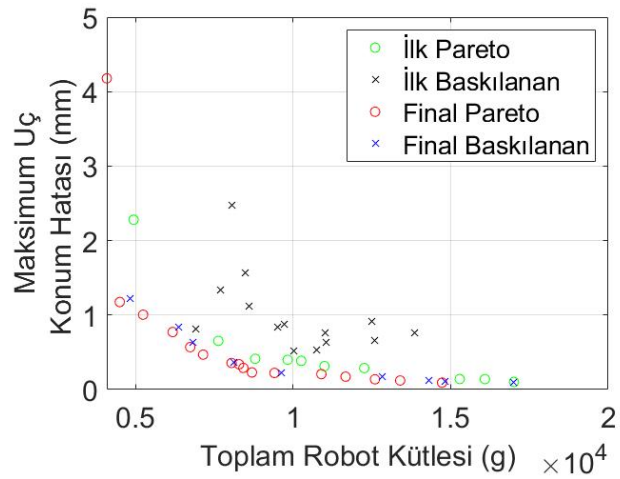
Şekil 5.28 : Örnek 3 Iterasyon 20 Nüfus Grafiği



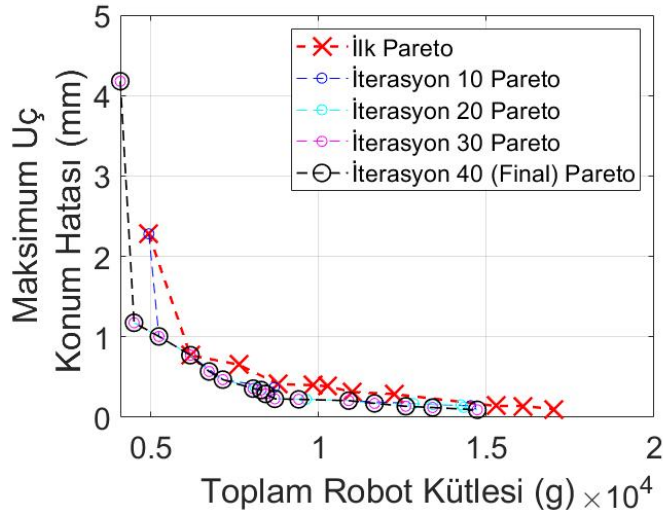
Şekil 5.29 : Örnek 3 Iterasyon 30 Nüfus Grafiği



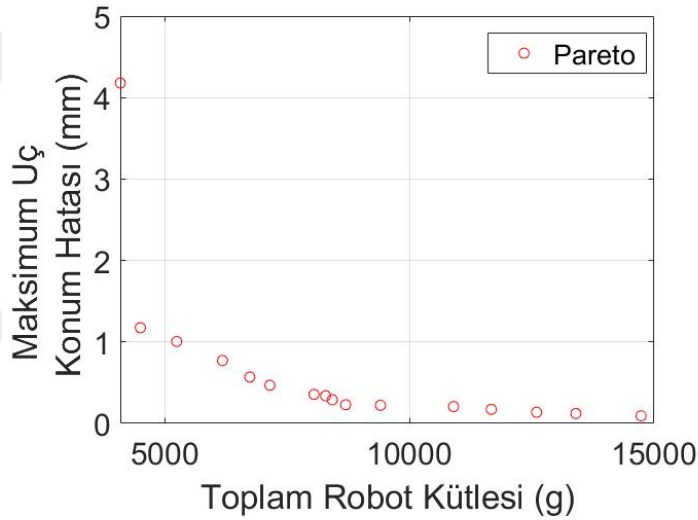
Şekil 5.30 : Örnek 3 Iterasyon 40 (Final) Nüfus Grafiği



Şekil 5.31 : Örnek 3 Başlangıç ve Final Nüfus Grafiği



Şekil 5.32 : Örnek 3 Pareto Grafiğinin Evrimi



Şekil 5.33 : Örnek 3 Final Pareto Grafiği (İterasyon 40)

5.2.4 Örnek 4

Bu örnekteki amaç farklı uzuv boylarına sahip bir robot tasarım optimizasyonunu BSGA-II yöntemi ile elde edip yöntemin başarımını gözlemlemektir. Bu yöntemi de ana örnek (Örnek 1) ile kıyaslayabilmek için robot taşıma kapasitesi tekrar 1 kilogram olarak belirlenmiş ve bu sefer sadece boyutları büyütülmüştür. Ayrıca uzuv boyutlarının artırılması ile uzuv et kalınlık aralıkları da artırılmıştır. Örnek 4 için tasarım parametreleri ve kısıtlar Çizelge 5.13 ve Çizelge 5.14’de listelenmiştir.

Çizelge 5.12 : Örnek 3 Pareto Optimum Çözüm Kümesi

Çözüm No	Toplam Robot Kütlesi (g)	Maks. Uç Konum Hatası (mm)	Çözüm No	Toplam Robot Kütlesi (g)	Maks. Uç Konum Hatası (mm)
1	4094	4,178	9	8426	0,29
2	4505	1,175	10	8699	0,2291
3	5245	1,005	11	9410	0,2229
4	6183	0,772	12	10900	0,2069
5	6740	0,5693	13	11670	0,1727
6	7150	0,4684	14	12600	0,1369
7	8052	0,3563	15	13400	0,1212
8	8288	0,3387	16	14700	0,09281

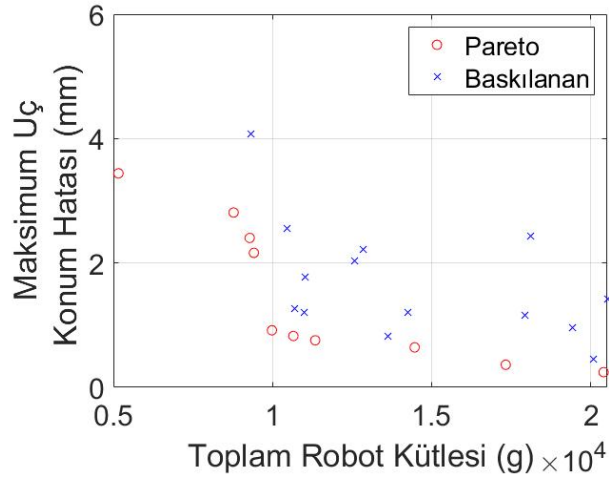
Çizelge 5.13 : Örnek 4 Optimizasyon Tasarım Parametreleri.

İstenen çalışma alanı ($d1, a2, a3$) – (mm)	(120, 150, 200)(mm)
En yüksek hıza ulaşma süresi (tm_{maks}) – (s)	0,5s
Yapının malzemesi (çelik - alüminyum)	Çelik
İterasyon sayısı (IT)	40
Nüfustaki toplam birey sayısı (N)	25
Mutasyon olma ihtimali (%)	%20

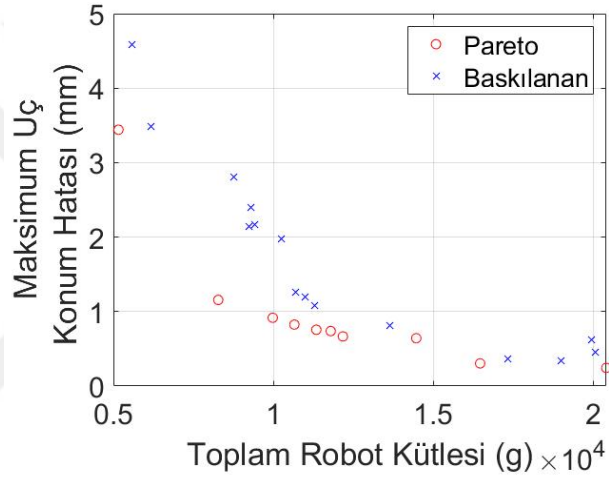
Çizelge 5.14 : Örnek 4 Optimizasyon Kısıtları.

Uzuvların en büyük tam tur periyodu ($t_{maks.periyot}$ – (s))	1s
Motor güvenlik sabiti ($0 < M_{gs} < 1$)	0,9
Robot en yüksek taşıma kapasitesi (m_{maks} – (kg))	1kg
Uzuv 1 için arama aralığı [$t1_{min} - t1_{max}$]	[5 – 44]mm
Uzuv 2 için arama aralığı [$t2_{min} - t2_{max}$]	[4 – 42]mm
Uzuv 3 için arama aralığı [$t3_{min} - t3_{max}$]	[3 – 40]mm
Uzuv et kalınlık hassasiyeti (mm)	1mm

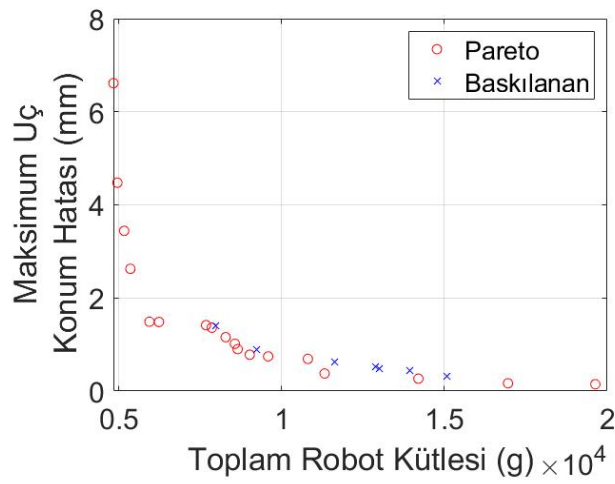
Döngünün başlaması ve rastgele motor seçimi ve uzuv et kalınlığı seçimi ile elde edilen başlangıç nüfusu Şekil 5.34'deki gibidir. Şekil 5.35 - 5.39 sırasıyla 1., 10., 20., 30. ve 40. yani en son iterasyon sonucu elde edilen nüfusların amaç fonksiyonlarındaki değerleri gösterilmiştir. Şekil 5.40 ise başlangıç ve final nüfusun kıyaslamasını göstermektedir. Şekil 5.41 ise iterasyon ilerledikçe Pareto grafiğinin değişimini göstermektedir. Son olarak ise 5.42 40. iterasyon sonrası elde edilmiş baskılanmayan bireylerden oluşan final Pareto grafiğini göstermektedir.



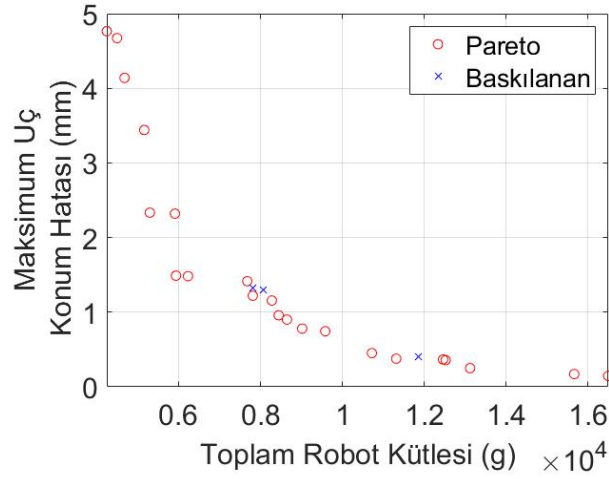
Şekil 5.34 : Örnek 4 Başlangıç Nüfusu



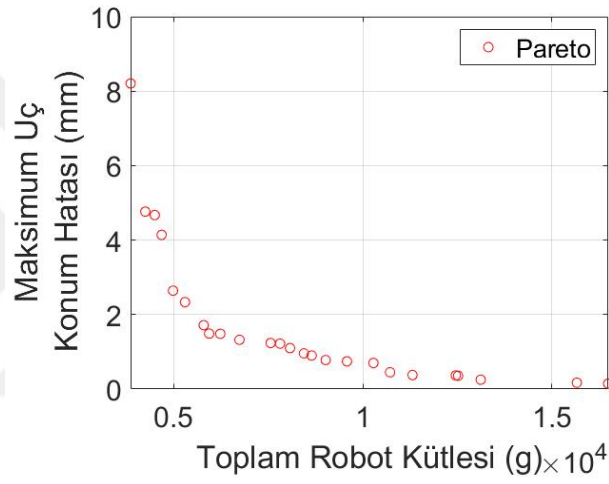
Şekil 5.35 : Örnek 4 Iterasyon 1 Nüfus Grafiği



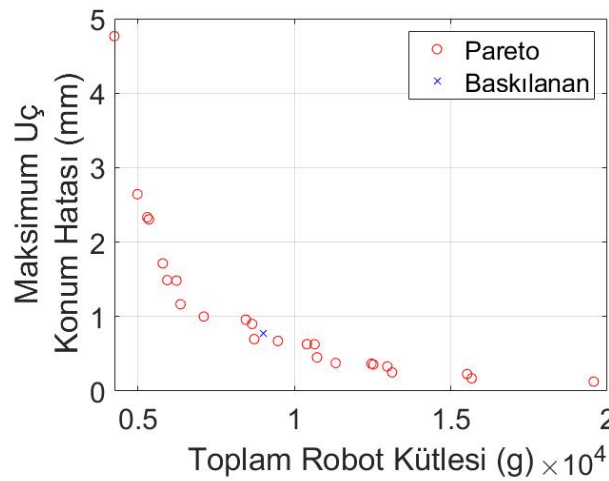
Şekil 5.36 : Örnek 4 Iterasyon 10 Nüfus Grafiği



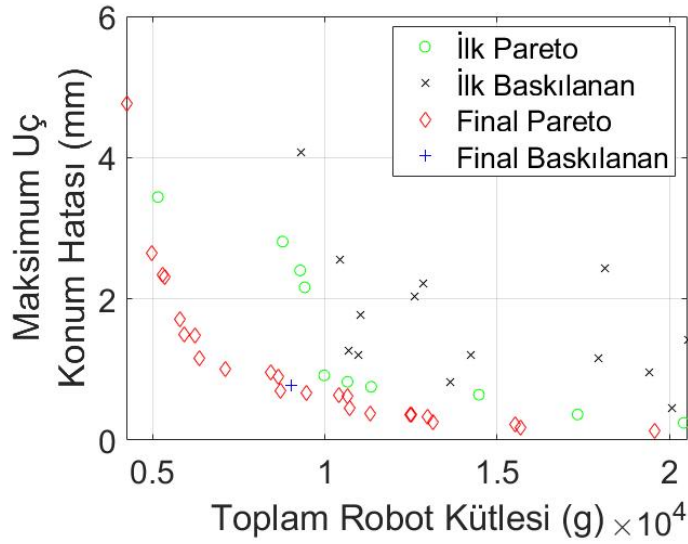
Şekil 5.37 : Örnek 4 Iterasyon 20 Nüfus Grafiği



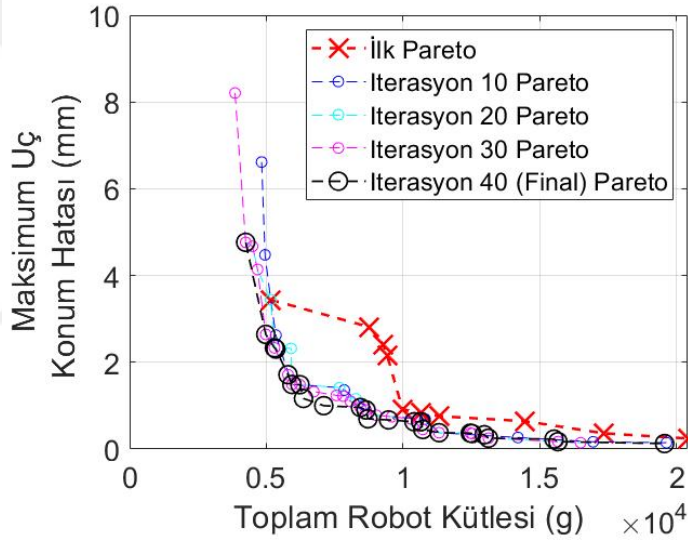
Şekil 5.38 : Örnek 4 Iterasyon 30 Nüfus Grafiği



Şekil 5.39 : Örnek 4 Iterasyon 40 (Final) Nüfus Grafiği



Şekil 5.40 : Örnek 4 Başlangıç ve Final Nüfus Grafiği

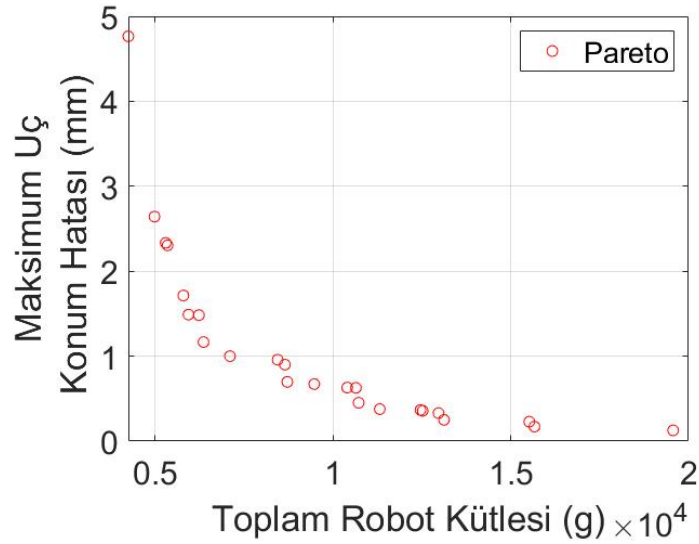


Şekil 5.41 : Örnek 4 Pareto Grafiğinin Evrimi

Örnek 4 sonucu elde edilen final Pareto optimum çözüm kümesinin amaç fonksiyonlarındaki değerleri Çizelge 5.15'deki gibidir.

5.2.5 Örnek 5

Örnek 5'de ise uzuv boyutları biraz daha büyük olan bir başka robot tasarım optimizasyon örneği gösterilmektedir. Robotun istenilen çalışma alanı yani boyutları dışında bütün tasarım parametreleri ve kısıtları ana örnek olan örnek 1 ile aynıdır. Ayrıca uzuv boyutlarının arttırılması ile uzuv et kalınlık aralıkları da arttırılmıştır.



Şekil 5.42 : Örnek 4 Final Pareto Grafiği (İterasyon 40)

Çizelge 5.15 : Örnek 4 Pareto Optimum Çözüm Kümesi

Çözüm No	Toplam Robot Kütlesi (g)	Maks. Uç Konum Hatası (mm)	Çözüm No	Toplam Robot Kütlesi (g)	Maks. Uç Konum Hatası (mm)
1	4245	4,765	13	9472	0,6716
2	4980	2,642	14	10400	0,6298
3	5297	2,334	15	10650	0,628
4	5348	2,305	16	10720	0,4513
5	5792	1,714	17	11320	0,3766
6	5936	1,489	18	12460	0,3667
7	6230	1,483	19	12520	0,357
8	6359	1,166	20	12970	0,3301
9	7102	1,00	21	13120	0,2507
10	8444	0,9585	22	15520	0,2287
11	8647	0,9008	23	15670	0,1709
12	8717	0,6972	24	19570	0,1267

Örnek 5 için tasarım parametreleri ve kısıtlar Çizelge 5.16 ve Çizelge 5.17’de listelenmiştir.

Döngünün başlaması ve rastgele motor seçimi ve uzuv et kalınlığı seçimi ile elde edilen başlangıç nüfusu Şekil 5.43’deki gibidir.

Şekil 5.44 - 5.48 sırasıyla 1., 10., 20., 30. ve 40. yani en son iterasyon sonucu elde edilen nüfusların amaç fonksiyonlarındaki değerleri gösterilmiştir.

Şekil 5.49 ise başlangıç ve final nüfusun kıyaslamasını göstermektedir. Şekil 5.50 ise iterasyon ilerledikçe Pareto grafiğinin değişimini göstermektedir.

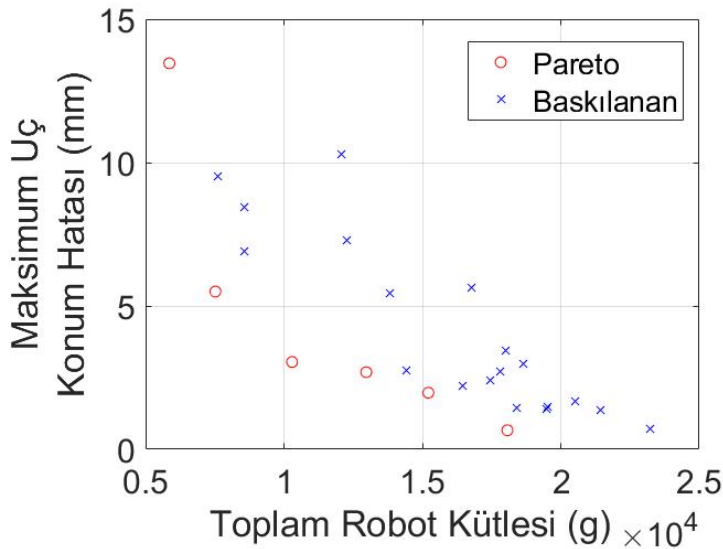
Son olarak ise 5.51 40. iterasyon sonrası elde edilmiş baskılanmayan bireylerden oluşan final Pareto grafiğini göstermektedir.

Çizelge 5.16 : Örnek 5 Optimizasyon Tasarım Parametreleri.

İstenen çalışma alanı ($d1, a2, a3$) – (mm)	(130, 200, 250)(mm)
En yüksek hıza ulaşma süresi (tm_{maks}) – (s)	0,5s
Yapının malzemesi (çelik - alüminyum)	Çelik
İterasyon sayısı (IT)	40
Nüfustaki toplam birey sayısı (N)	25
Mutasyon olma ihtimali (%)	%20

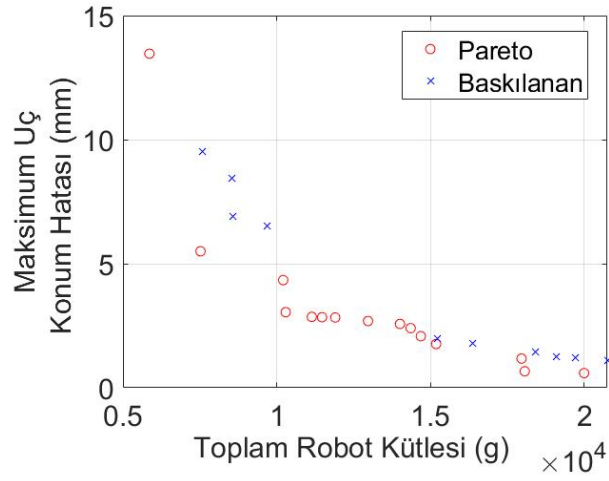
Çizelge 5.17 : Örnek 5 Optimizasyon Kısıtları.

Uzuvların en büyük tam tur periyodu ($t_{maks.periyot}$ – (s))	1s
Motor güvenlik sabiti ($0 < M_{gs} < 1$)	0,9
Robot en yüksek taşıma kapasitesi (m_{maks} – (kg))	1kg
Uzuv 1 için arama aralığı [$t1_{min} - t1_{max}$]	[5 – 44]mm
Uzuv 2 için arama aralığı [$t2_{min} - t2_{max}$]	[4 – 42]mm
Uzuv 3 için arama aralığı [$t3_{min} - t3_{max}$]	[3 – 40]mm
Uzuv et kalınlık hassasiyeti (mm)	1mm

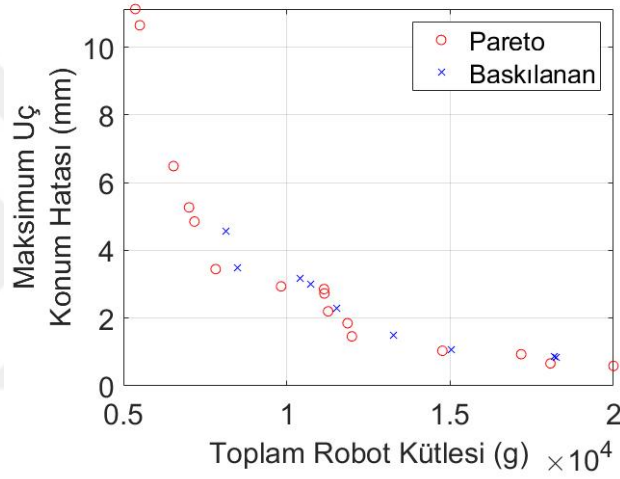


Şekil 5.43 : Örnek 5 Başlangıç Nüfusu

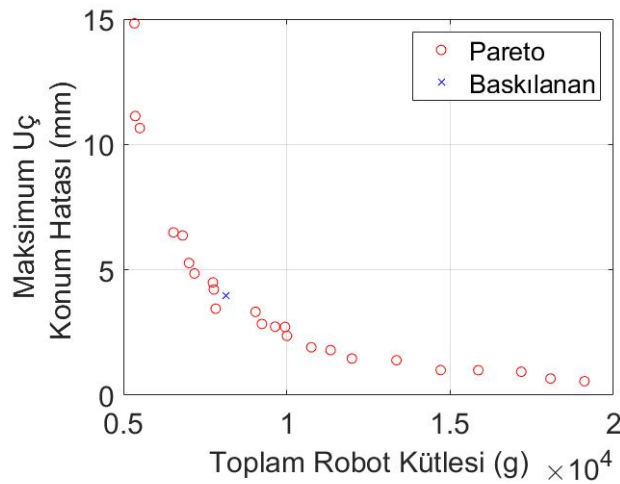
Örnek 5 sonucu elde edilen final Pareto optimum çözüm kümesinin amaç fonksiyonlarındaki değerleri Çizelge 5.18'deki gibidir.



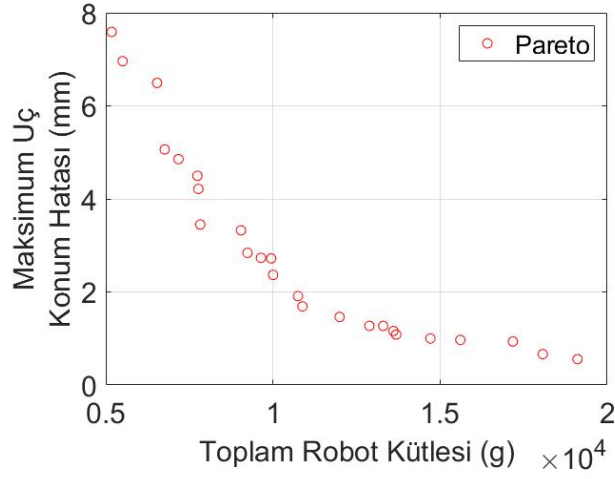
Şekil 5.44 : Örnek 5 Iterasyon 1 Nüfus Grafiği



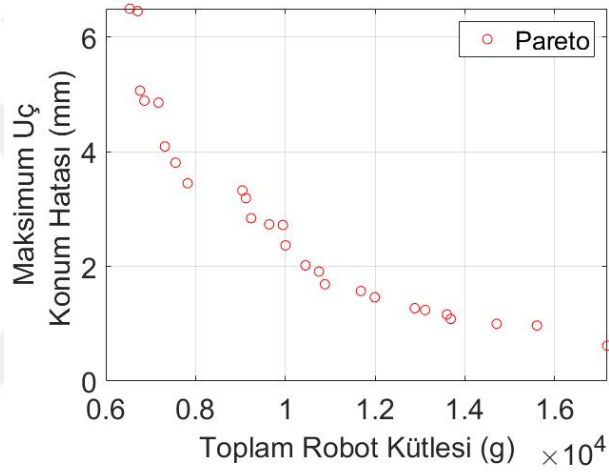
Şekil 5.45 : Örnek 5 Iterasyon 10 Nüfus Grafiği



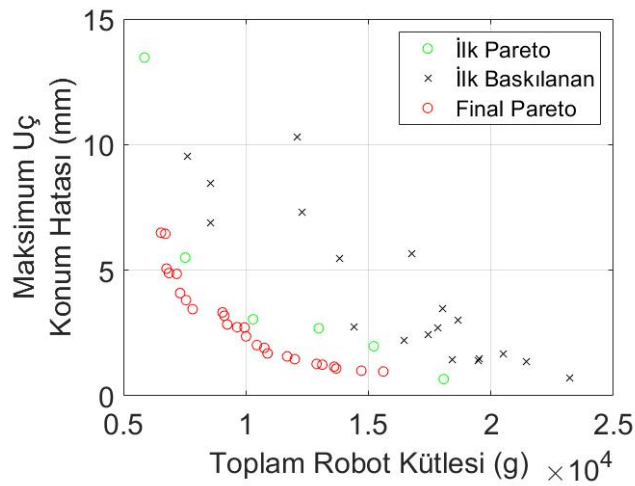
Şekil 5.46 : Örnek 5 Iterasyon 20 Nüfus Grafiği



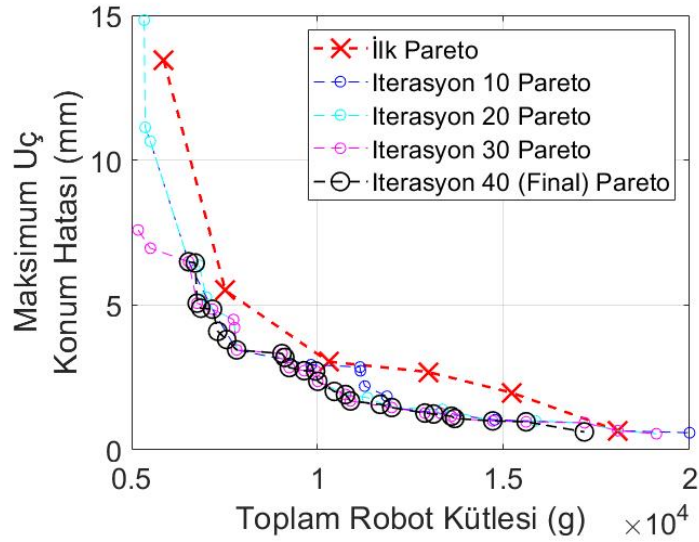
Şekil 5.47 : Örnek 5 Iterasyon 30 Nüfus Grafiği



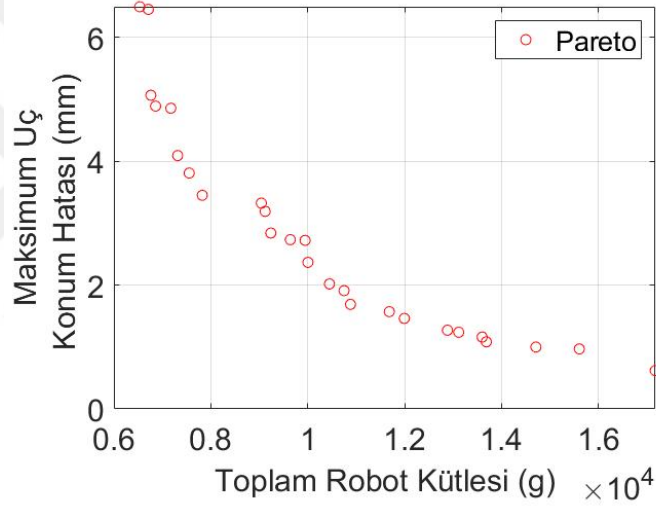
Şekil 5.48 : Örnek 5 Iterasyon 40 (Final) Nüfus Grafiği



Şekil 5.49 : Örnek 5 Başlangıç ve Final Nüfus Grafiği



Şekil 5.50 : Örnek 5 Pareto Grafiğinin Evrimi



Şekil 5.51 : Örnek 5 Final Pareto Grafiği (İterasyon 40)

5.2.6 Örnek 6

Örnek 6'nın amacı ise yapı malzemesinin alüminyum olması durumunu gözlemlemektir. Bu doğrultuda ana örnek olan Örnek 1 tasarım parametreleri ve kısıtlarından sadece yapı malzemesi alüminyum olarak değiştirilmiştir. Ayrıca yapının alüminyum olması sebebiyle uzuv et kalınlık aralığı arttırılmıştır. Örnek 6 için tasarım parametreleri ve kısıtlar Çizelge 5.19 ve Çizelge 5.20'de listelenmiştir.

Döngünün başlaması ve rastgele motor seçimi ve uzuv et kalınlığı seçimi ile elde edilen başlangıç nüfusu Şekil 5.52'deki gibidir. Şekil 5.53 - 5.57 sırasıyla 1., 10., 20., 30.

Çizelge 5.18 : Örnek 5 Pareto Optimum Çözüm Kümesi

Çözüm No	Toplam Robot Kütlesi (g)	Maks. Uç Konum Hatası (mm)	Çözüm No	Toplam Robot Kütlesi (g)	Maks. Uç Konum Hatası (mm)
1	6533	6,492	14	10450	2,018
2	6762	5,063	15	10750	1,91
3	6860	4,889	16	10880	1,688
4	7175	4,854	17	11680	1,571
5	7316	4,09	18	11990	1,461
6	7555	3,808	19	12890	1,271
7	7824	3,449	20	13120	1,239
8	9044	3,323	21	13600	1,16
9	9121	3,189	22	13690	1,083
10	9238	2,84	23	14710	0,9994
11	9641	2,733	24	15610	0,9686
12	9947	2,721	25	17170	0,6192
13	10010	2,366			

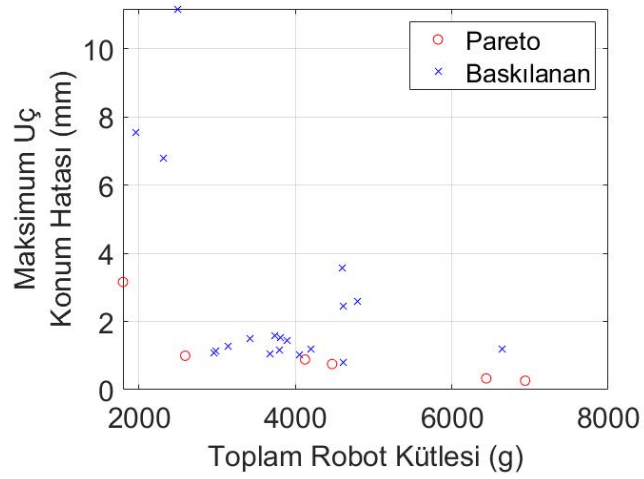
Çizelge 5.19 : Örnek 6 Optimizasyon Tasarım Parametreleri.

İstenen çalışma alanı ($d1, a2, a3$) – (mm)	(110, 100, 150)(mm)
En yüksek hıza ulaşma süresi (tm_{maks}) – (s)	0,5s
Yapının malzemesi (çelik - alüminyum)	Alüminyum
İterasyon sayısı (IT)	40
Nüfustaki toplam birey sayısı (N)	25
Mutasyon olma ihtimali (%)	%20

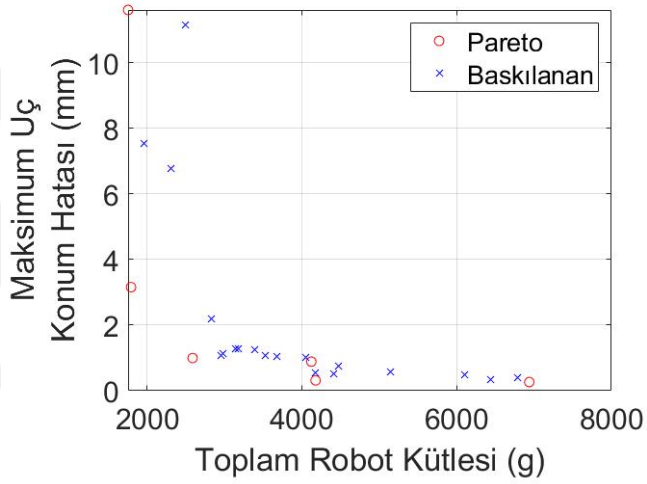
Çizelge 5.20 : Örnek 6 Optimizasyon Kısıtları.

Uzuvların en büyük tam tur periyodu ($t_{maks.periyot}$ – (s))	1s
Motor güvenlik sabiti ($0 < M_{gs} < 1$)	0,9
Robot en yüksek taşıma kapasitesi (m_{maks} – (kg))	1kg
Uzuv 1 için arama aralığı [$t1_{min} - t1_{max}$]	[4 – 32]mm
Uzuv 2 için arama aralığı [$t2_{min} - t2_{max}$]	[3 – 30]mm
Uzuv 3 için arama aralığı [$t3_{min} - t3_{max}$]	[3 – 28]mm
Uzuv et kalınlık hassasiyeti (mm)	1mm

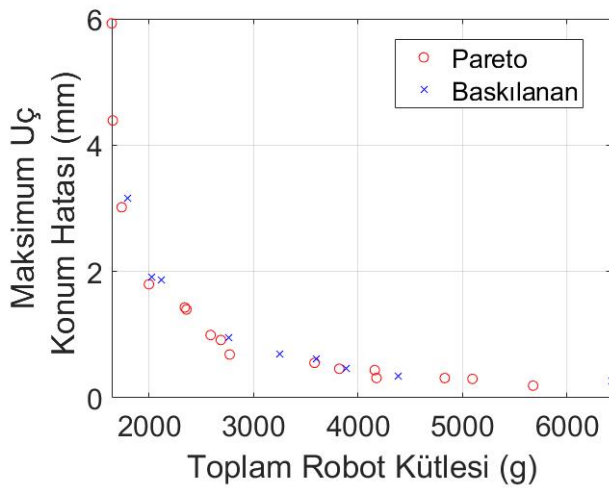
ve 40. yani en son iterasyon sonucu elde edilen nüfusların amaç fonksiyonlarındaki değerleri gösterilmiştir. Şekil 5.58 ise başlangıç ve final nüfusun kıyaslamasını göstermektedir. Şekil 5.59 ise iterasyon ilerledikçe Pareto grafiğinin değişimini göstermektedir. Son olarak ise 5.60 40. iterasyon sonrası elde edilmiş baskılanmayan bireylerden oluşan final Pareto grafiğini göstermektedir.



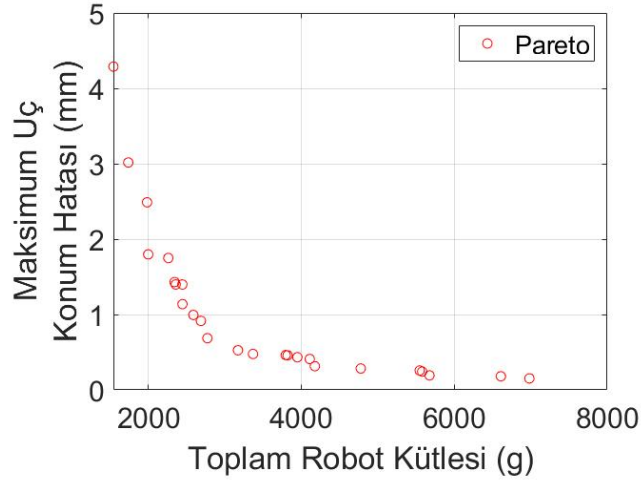
Şekil 5.52 : Örnek 6 Başlangıç Nüfusu



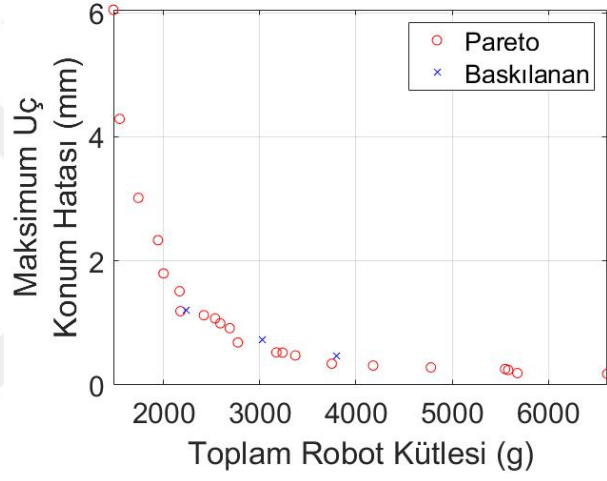
Şekil 5.53 : Örnek 6 Iterasyon 1 Nüfus Grafiği



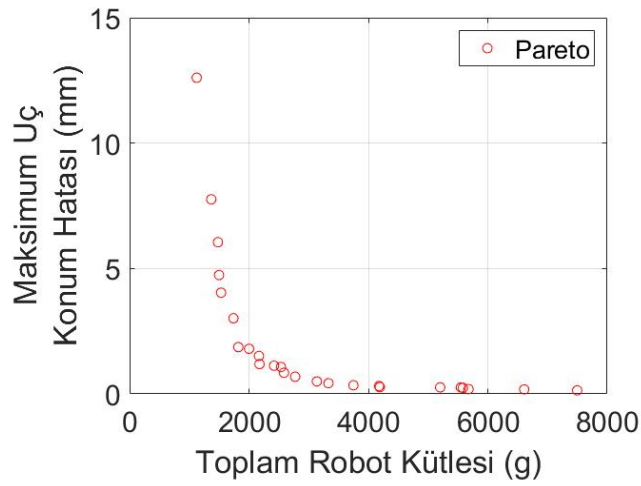
Şekil 5.54 : Örnek 6 Iterasyon 10 Nüfus Grafiği



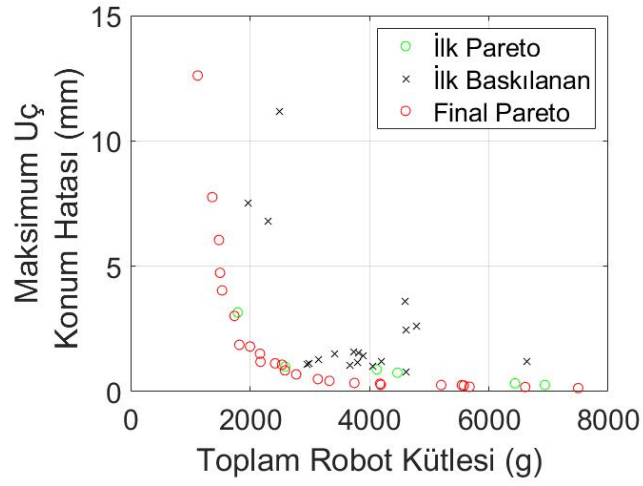
Şekil 5.55 : Örnek 6 Iterasyon 20 Nüfus Grafiği



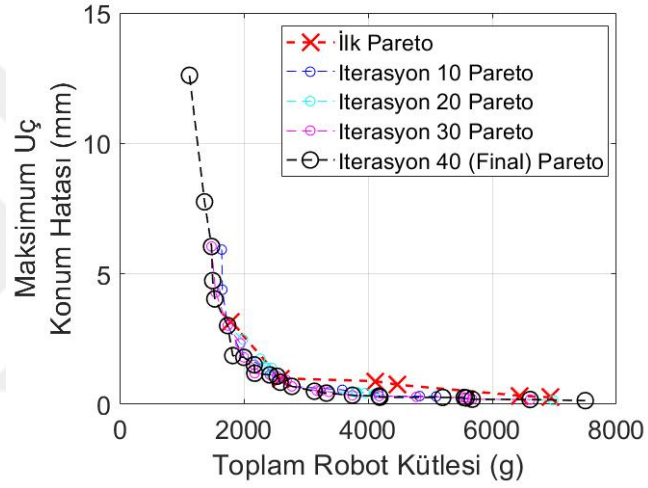
Şekil 5.56 : Örnek 6 Iterasyon 30 Nüfus Grafiği



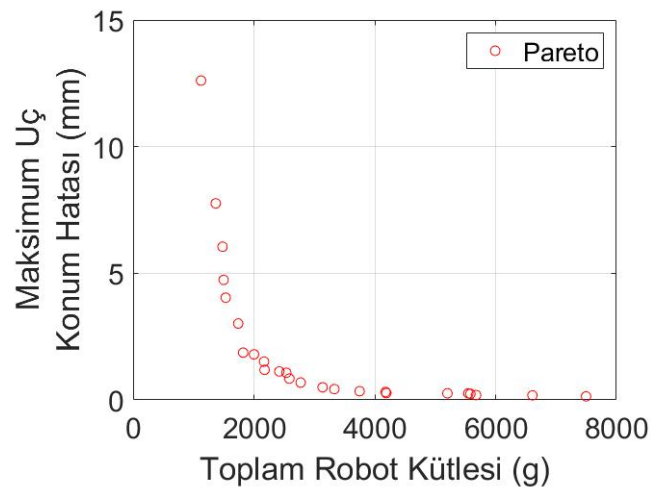
Şekil 5.57 : Örnek 6 Iterasyon 40 (Final) Nüfus Grafiği



Şekil 5.58 : Örnek 6 Başlangıç ve Final Nüfus Grafiği



Şekil 5.59 : Örnek 6 Pareto Grafiğinin Evrimi



Şekil 5.60 : Örnek 6 Final Pareto Grafiği (İterasyon 40)

Örnek 6 sonucu elde edilen final Pareto optimum çözüm kümesinin amaç fonksiyonlarındaki değerleri Çizelge 5.21'deki gibidir.

Çizelge 5.21 : Örnek 6 Pareto Optimum Çözüm Kümesi

Çözüm No	Toplam Robot Kütlesi (g)	Maks. Uç Konum Hatası (mm)	Çözüm No	Toplam Robot Kütlesi (g)	Maks. Uç Konum Hatası (mm)
1	1125	12,61	14	2773	0,6857
2	1368	7,759	15	3136	0,4987
3	1480	6,048	16	3331	0,4268
4	1499	4,738	17	3749	0,3437
5	1533	4,036	18	4178	0,3138
6	1739	3,016	19	4192	0,2704
7	1822	1,865	20	5203	0,2615
8	2000	1,798	21	5549	0,2573
9	2168	1,512	22	5582	0,2422
10	2176	1,189	23	5677	0,1924
11	2420	1,125	24	6610	0,1803
12	2536	1,073	25	7498	0,1403
13	2586	0,8431			

5.2.7 Örnek 7

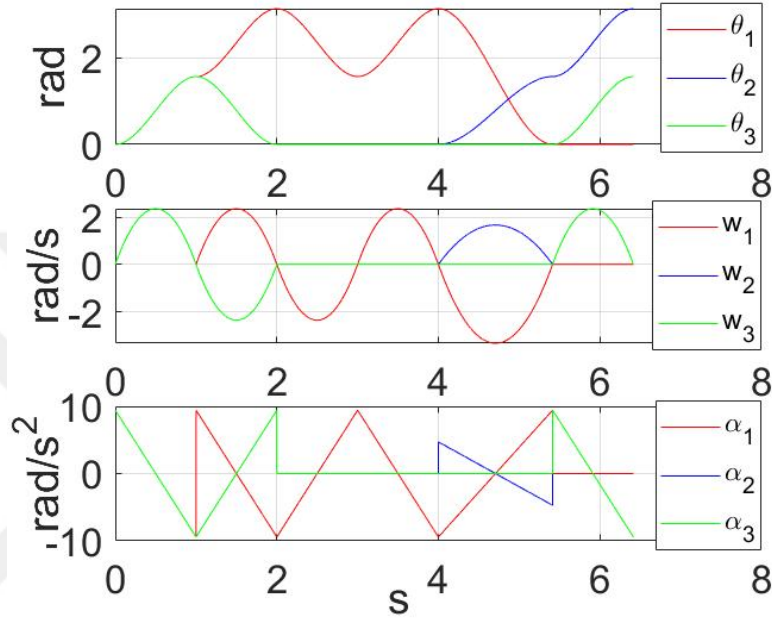
Örnek 7 ise yörüngenin maksimum hızının pareto grafiğine etkisini gözlemlemek için yapılmıştır. Bu amaçla kısıtlarda yer alan uzuvların maksimum tam tur süresi 2 katına çıkartılıp uzuv hızlarının azaltılması sağlanmıştır. Böylece önceki örneklerde yörüngede yer alan toplam hareketler 4,53 saniye sürerken Örnek 7'de bu süre 6,41 saniyeye çıkmıştır. Örnek 7 için tasarım parametreleri ve kısıtlar Çizelge 5.22 ve Çizelge 5.23'de listelenmiştir. Örnek 7 için kullanılan yörünge planı Şekil 5.61'deki gibidir.

Çizelge 5.22 : Örnek 7 Optimizasyon Tasarım Parametreleri.

İstenen çalışma alanı ($d1, a2, a3$) – (mm)	(110, 100, 150)(mm)
En yüksek hıza ulaşma süresi (tm_{maks}) – (s)	0,5s
Yapının malzemesi (çelik - alüminyum)	Çelik
İterasyon sayısı (IT)	40
Nüfustaki toplam birey sayısı (N)	25
Mutasyon olma ihtimali (%)	%20

Çizelge 5.23 : Örnek 7 Optimizasyon Kısıtları.

Uzuvların en büyük tam tur periyodu ($t_{maks.periyot} - (s)$)	2s
Motor güvenlik sabiti ($0 < M_{gs} < 1$)	0,9
Robot en yüksek taşıma kapasitesi ($m_{maks} - (kg)$)	1kg
Uzuv 1 için arama aralığı [$t_{1min} - t_{1max}$]	[4 – 26]mm
Uzuv 2 için arama aralığı [$t_{2min} - t_{2max}$]	[3 – 24]mm
Uzuv 3 için arama aralığı [$t_{3min} - t_{3max}$]	[2 – 22]mm
Uzuv et kalınlık hassasiyeti (mm)	1mm



Şekil 5.61 : Örnek 7 Yörünge Planı

Döngünün başlaması ve rastgele motor seçimi ve uzuv et kalınlığı seçimi ile elde edilen başlangıç nüfusu Şekil 5.62'deki gibidir.

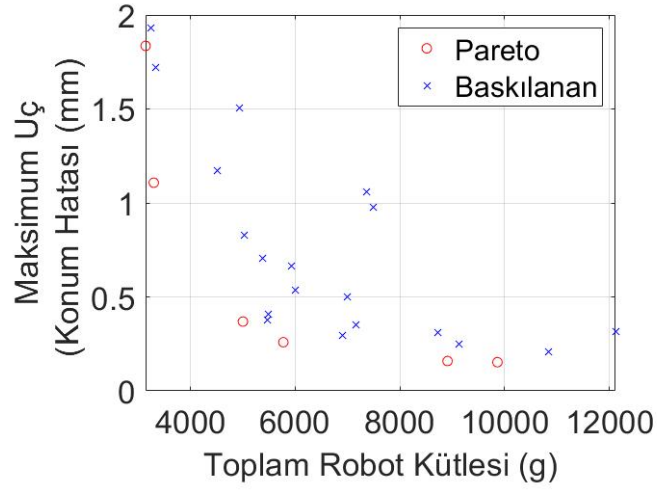
Şekil 5.63 - 5.67 sırasıyla 1., 10., 20., 30. ve 40. yani en son iterasyon sonucu elde edilen nüfusların amaç fonksiyonlarındaki değerleri gösterilmiştir.

Şekil 5.68 ise başlangıç ve final nüfusun kıyaslamasını göstermektedir.

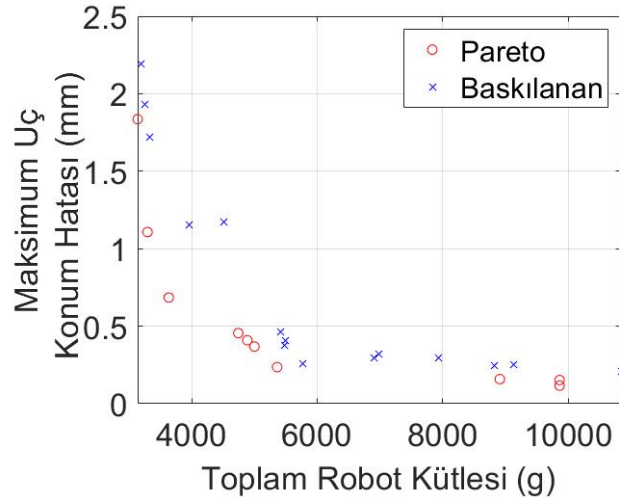
Şekil 5.69 ise iterasyon ilerledikçe Pareto grafiğinin değişimini göstermektedir.

Son olarak ise 5.70 40. iterasyon sonrası elde edilmiş baskılanmayan bireylerden oluşan final Pareto grafiğini göstermektedir.

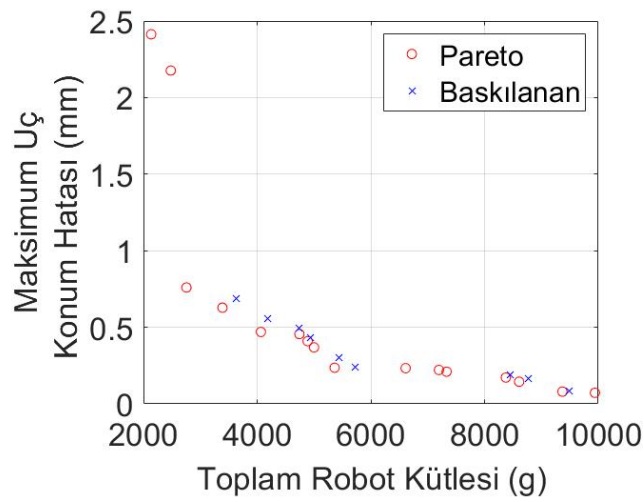
Örnek 7 sonucu elde edilen final Pareto optimum çözüm kümesinin amaç fonksiyonlarındaki değerleri Çizelge 5.24'deki gibidir.



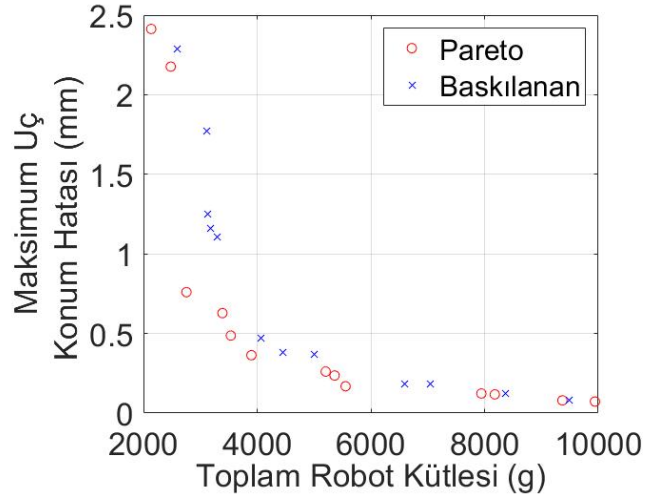
Şekil 5.62 : Örnek 7 Başlangıç Nüfusu



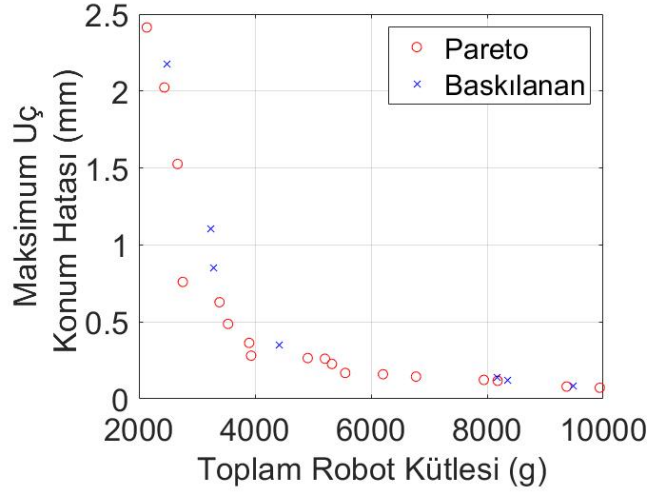
Şekil 5.63 : Örnek 7 Iterasyon 1 Nüfus Grafiği



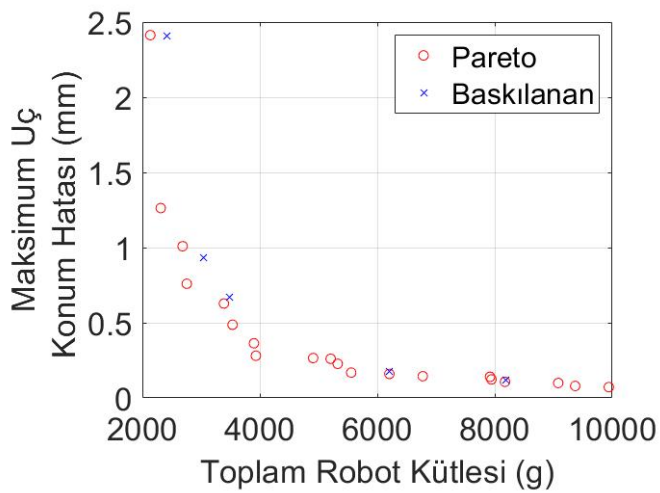
Şekil 5.64 : Örnek 7 Iterasyon 10 Nüfus Grafiği



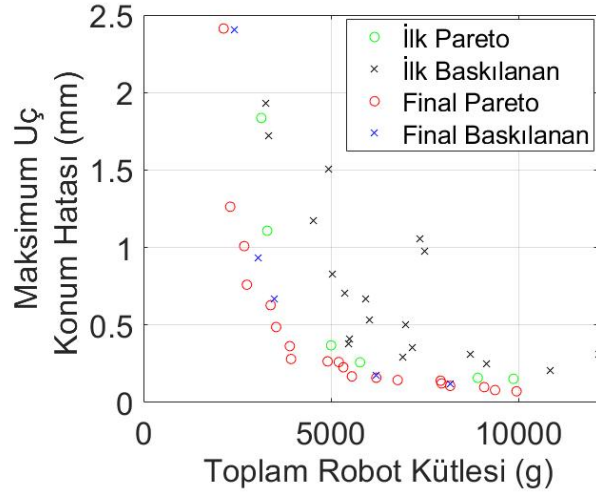
Şekil 5.65 : Örnek 7 Iterasyon 20 Nüfus Grafiği



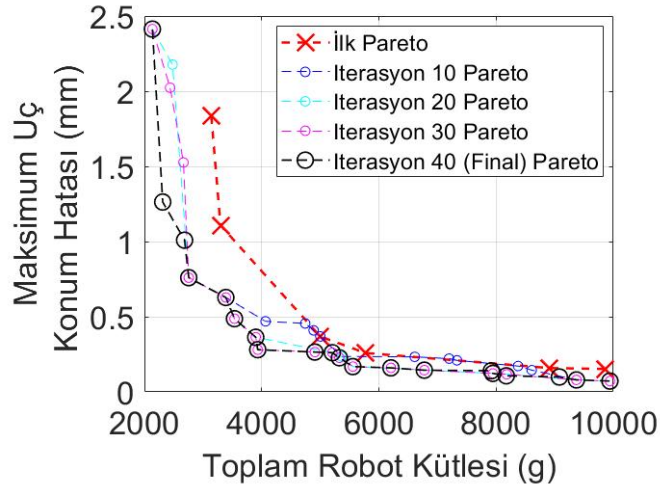
Şekil 5.66 : Örnek 7 Iterasyon 30 Nüfus Grafiği



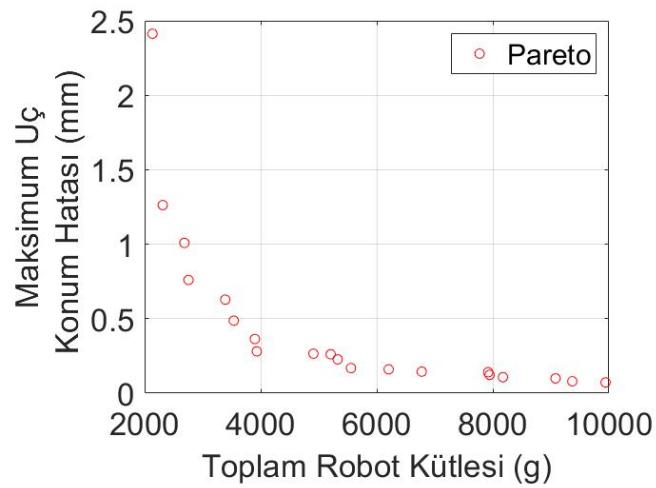
Şekil 5.67 : Örnek 7 Iterasyon 40 (Final) Nüfus Grafiği



Şekil 5.68 : Örnek 7 Başlangıç ve Final Nüfus Grafiği



Şekil 5.69 : Örnek 7 Pareto Grafiğinin Evrimi



Şekil 5.70 : Örnek 7 Final Pareto Grafiği (İterasyon 40)

Çizelge 5.24 : Örnek 7 Pareto Optimum Çözüm Kümesi

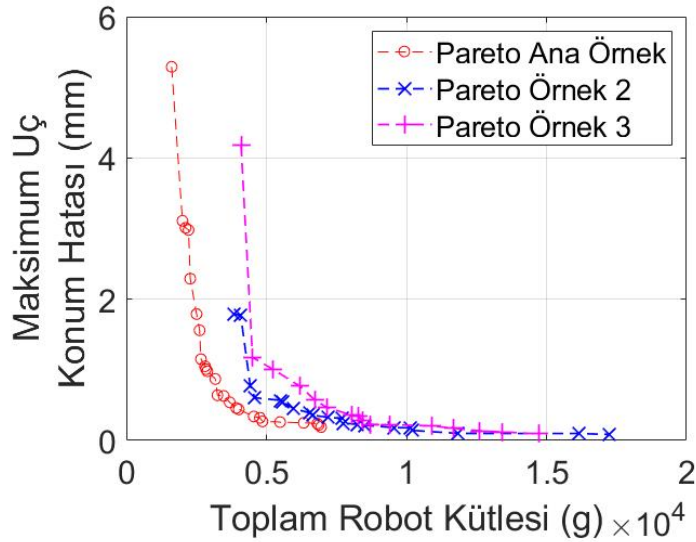
Çözüm No	Toplam Robot Kütlesi (g)	Maks. Uç Konum Hatası (mm)	Çözüm No	Toplam Robot Kütlesi (g)	Maks. Uç Konum Hatası (mm)
1	2136	2,413	11	5326	0,2269
2	2312	1,263	12	5556	0,1683
3	2685	1,009	13	6205	0,1598
4	2756	0,7598	14	6775	0,1445
5	3389	0,6279	15	7919	0,1405
6	3536	0,4869	16	7944	0,1231
7	3899	0,3635	17	8174	0,1071
8	3933	0,2807	18	9080	0,0991
9	4908	0,2651	19	9370	0,0798
10	5206	0,2607	20	9942	0,0723

5.2.8 Örneklerin kıyaslanması

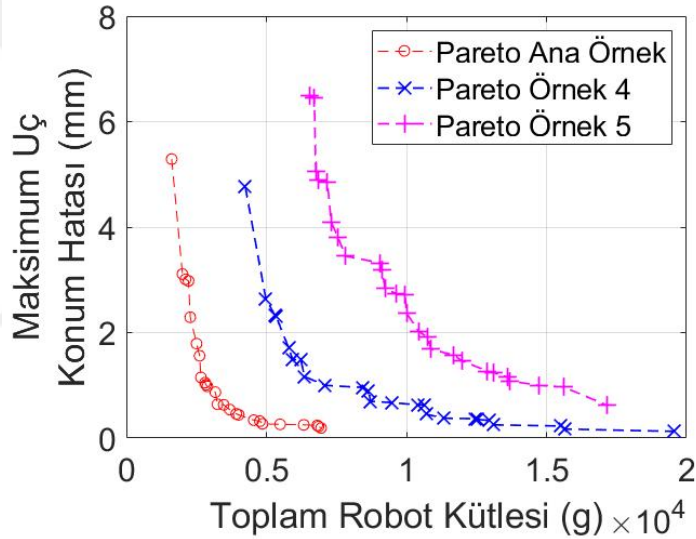
Bu tez çalışmasında oluşturulmuş BSGA-II algoritması ile 7 farklı örnek çözüm elde edilmiştir. Bunlardan ilki ana örnek olarak adlandırılmış ve diğer örnekler bu örnek ile kıyaslanmak üzere geliştirilmişlerdir. Örnek 2 ve örnek 3 ana örnek ile aynı boyutlara ve aynı yapı malzemesine (çelik) sahipken, taşıma kapasiteleri farklıdır. Ana örnekte 1 kilogram olan taşıma kapasitesi örnek 2 ve 3’de sırasıyla 2 ve 4 kilogram olarak değiştirilmiştir. Böylece taşıma kapasitesinin pareto optimum çözüm kümesine etkisi gözlemlenebilmiştir. Şekil 5.71 örnek 1 (ana örnek), 2 ve 3’ün kıyaslamasını göstermektedir.

Örnek 4 ve 5 ise ana örnekten (örnek1) sadece boyutsal olarak farklıdır. Aynı taşıma kapasitelerine ve yapı malzemelerine (çelik) sahiplerdir. Ana örnekte uzuv boyutları $[d1,a2,a3] = [110,100,150]$ iken, örnek 4 ve 5’de sırasıyla $[120,150,200]$ ve $[130,200,250]$ olarak değiştirilmiştir. Böylece uzuv boyutlarının pareto grafiğine etkisi gözlemlenebilmiştir. Şekil 5.72 Örnek 1 (ana örnek), 2 ve 3’ün pareto grafiklerinin kıyaslanmasını göstermektedir.

Örnek 6 ise ana örneğin sadece yapı malzemesinin alüminyum olarak değiştirilmiş halidir. Böylece yapı malzemesinin pareto grafiğine etkisi gözlemlenmiştir. Şekil 5.73 örnek 1 (ana örnek) ve örnek 6’nın pareto grafiklerinin karşılaştırmasını



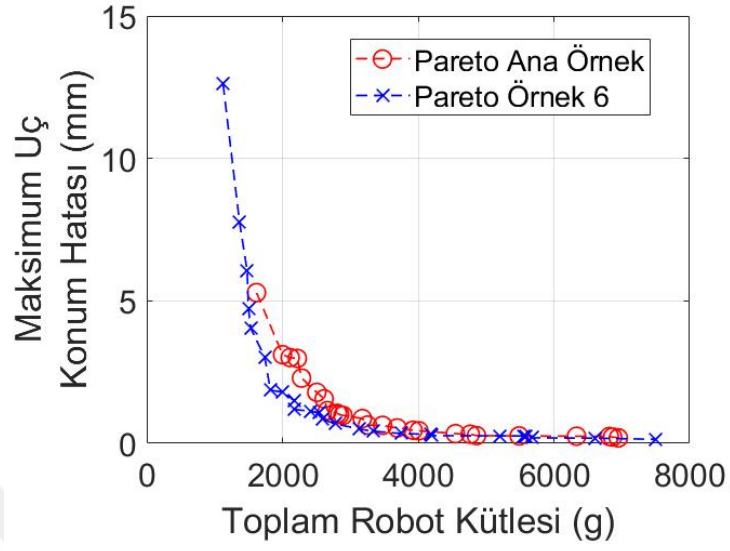
Şekil 5.71 : Farklı Taşıma Kapasiteleri İçin Pareto Grafikleri (1 kg, 2kg, 4kg)



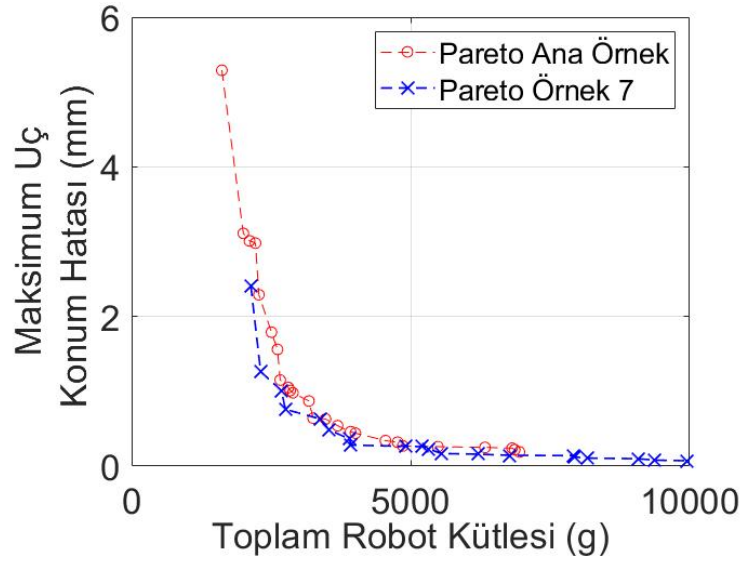
Şekil 5.72 : Farklı Boyutlar İçin Pareto Grafikleri

göstermektedir. Açık bir şekilde görüldüğü gibi alüminyum malzeme seçimi bu robot tasarımı için daha başarılıdır.

Son olarak Örnek 7 ana örneğin sadece daha yavaş bir yörünge planı ile denenmiş halidir. Ana örnekte belirlenen uzuv tam tur periyodu 2 katına çıkarılmış böylece uzuv hızları azalmış ve yörünge süresi artmıştır. Örnek 7 ile ana örneğin (Örnek 1) pareto grafiklerinin karşılaştırması Şekil 5.74'de gösterilmektedir. Yörünge yavaşlatılması beklenildiği gibi pareto grafiğinde daha hafif ve daha az uç konum hatası veren bireylerin elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 5.73 : Farklı Malzemeler İçin Pareto Grafikleri



Şekil 5.74 : Farklı Hızlar İçin Pareto Grafikleri



6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında 3 serbestlik dereceli bir robot kolunun taslak tasarımının optimizasyonu çalışılmıştır. Tasarımı değişkenleri olarak, tahrik grupları ve uzuv et kalınlıkları alınmıştır. Motor ve dişli kutusu gruplarının seçilebilmesi için kapsamlı bir tahrik grubu kütüphanesi kurulmuştur. Bu kütüphanede toplamda 31 adet motor ve 675 adet dişli kutusu bulunmaktadır. Yapının optimizasyonu ise dinamik hareket sırasında uzuvlardaki sehinden dolayı robot uç konumunda meydana gelen hataların en büyük değerini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Dinamik hareket sırasında uzuvlarda meydana gelen sehim gözlemlmek için ise Simmechanics® ortamında çoklu parametre tahmini yöntemi ile esnek dinamik benzetim ortamı oluşturulmuştur. Bütün benzetim ve döngünün sadece Matlab® ortamında olması ise bir başka programla birlikte benzetim yapma zorunluluğunu ortadan kaldırmıştır. Tahrik grubu ve yapıyı ayrı benzetim ortamlarında birlikte benzetim yaparak belirlenmesi, tahrik grubunun ve yapının birbirine olan etkisini ihmal etmek anlamına gelir. Esnek yapıya izin veren tek bir dinamik benzetim ortamı ise yapıdaki sehimlerden dolayı oluşan titreşimin dinamik sisteme olan etkisinin görülebilmesini sağlamıştır. Bir başka deyişle, titreşim ihtiyaç duyulan tork miktarlarının artmasına sebep olmakta ve tahrik grubu bu etki altında belirlenebilmektedir. Algoritma tamamen değişkenlere bağlı olarak geliştirilmiş ve tasarım parametreleri ve kısıtları değiştirerek çok farklı boyutlarda robot tasarım optimizasyonunu yapabilmektedir.

Optimizasyon 2 farklı yöntemle denenmiştir. Bunlardan ilki deneme yanılma prensibine dayanan buluşsal bir algoritmadır ve tek amaç fonksiyonu toplam robot kütlelerinin en aza indirilmesidir. Dinamik hareket sırasında meydana gelen uç konum hatasını bir kısıt olarak belirleyerek amaç fonksiyonunu tekil kalmaya zorlayan bir yöntemdir. Bu ise doğal olarak sadece kısıtlara ve tasarım parametrelerine uyan en hafif robot tasarımının elde edilmesini sağlayabilmektedir. İkinci yöntemde ise hem uç konum hatası hem de toplam kütle en aza indirilmek istenmiş ve bu doğrultuda

birbiriyle çelişen iki amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Çoklu amaç fonksiyonu olan bu sistemde ise BSGA-II yöntemi kullanılarak Pareto optimum çözüm kümesi elde edilmiştir. İki amaç fonksiyonuna da hizmet etmek zorunda olan bu yöntemde tasarımcıya birden fazla seçenek sunulabilmektedir.

2 yöntem için ayrı ayrı örnek optimizasyon yapılmış ve tez içerisinde sonuçları gösterilmiştir. Yöntemler birbirinden farklı prensibe dayanmaktadır ama kıyaslamak adına tasarım parametreleri iki örnek için de aynı tutulmuştur. Çizelge 4.7 buluşsal yöntem ile elde edilen sonuç tablosunu göstermektedir ve dinamik hareket sırasında en yüksek $0,95mm$ uç konum hatasına sebep olan tasarımın toplam kütlesi 3458 gramdır. İkinci yöntemde ise aynı tasarım parametreleri altında bir çözüm kümesi elde edilmiştir. Bu çözümlerin arasından ilk yönteme en yakın uç konum hatası veren 12 numaralı çözüm tercih edilmiştir. 12 numaralı çözümün sonuçları Çizelge 5.6'da listelenmiştir ve bu sonuca göre oluşan 3177,3 gram robot tasarımının uç konumunda en yüksek $0,87mm$ hata bulunmaktadır. İkinci yöntem ile elde edilen sonuç hem daha düşük uç konum hatasına hem de daha hafif bir robot tasarıma sahiptir. Bu ise BSGA-II yönteminin kullanıldığı ikinci yöntemin deneme yanılma prensibinin buluşsal algoritma ile kullanıldığı ilk yöntemden daha iyi sonuç verebildiğini göstermektedir. Buradaki en büyük etken ise ilk yöntemde uzuv et kalınlıklarının uç konumu azaltmak için arttırılma yönteminin çok sağlıklı çalışmamasından dolayıdır. Nitekim, ilk yöntemde uç konumda en çok hataya sebep olan uzuv et kalınlığı doğrudan arttırılmış ama bu artışın dinamik başarıma veya diğer uzuvların sehim miktarlarına olan etkisi düşünülmemiştir. Fakat ikinci yöntemde uzuv et kalınlığını veya tahrik grubunun büyütülmesine karar veren bir mekanizma olmaması algoritmayı özgür bırakmakta ve daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Aynı şekilde ilk yöntemde kısıt olarak belirlenen uç konum hatası yine ikinci yöntemde amaç fonksiyonuna dönüştürülmüş ve serbest bırakılmıştır. Bu da tekil çözüm yerine birden fazla seçenek sunabilen Pareto optimum çözüm kümesinin elde edilmesini sağlamıştır.

BSGA-II yöntemi 7 farklı tasarım üzerinde denenmiş ve sonuçları kıyaslanmıştır. Bu örneklerdeki asıl amaç robot taşıma kapasitesinin, boyutlarının, yapı malzemesinin ve uzuv hızlarının pareto grafiğine etkilerini ayrı ayrı gözlemleyebilmektir. Bu

doğrultuda elde edilen sonuçlardan ilki uzuv boyutlarının taşıma kapasitesine göre pareto grafiğine çok daha fazla etki etmesidir. Bu sonuç sabit tutulan diğer tasarım parametreleri ve kısıtların etkisi altında oluşan bir sonuçtur ve bütün robot tasarımları için genelleştirilemez. Bir başka elde edilen sonuç ise, ana örnek olarak seçilen robotun tasarımında çelik yapı yerine alüminyum kullanılmasının daha iyi çözümler üretmiş olmasıdır. Aynı şekilde bu sonuçta diğer tasarım parametreleri ve kısıtların etkisi altındadır ve bütün tasarımlar için genelleştirilemez. Son olarak ise uzuv hızlarının düşürülüp yörünge süresinin artırılması beklenildiği gibi daha hafif ve daha az uç konum hatası verebilen bireylerin elde edilmesini sağlamıştır. Sonuç olarak 7 farklı örnek sunulması ile önerilen algoritmanın farklı tasarım parametreleri ve kısıtlar altında da başarılı bir şekilde çalışabildiği gösterilmiştir.

6.1 Tezin Literatüre Katkısı

- Esnek yapı dinamik benzetim ortamının oluşturulması bu tez çalışmasının literatüre en önemli katkılarından biridir. Bu sayede hem yapı hem dinamik başarımlar eş zamanlı tek bir benzetim ortamında birbirlerine olan etkileri ile birlikte gözlemlenebilmektedir. Bir başka deyişle, yapı ve dinamik başarımlar birbirinden bağımsız analiz edilmemektedir. Bu sayede, bu tez çalışması, literatürde birden fazla programın ardışık olarak çalıştırılması ile yapı ve dinamik başarımın denetlendiği çalışmalara bir yenilik olarak hem yapı hem dinamik başarımın tek bir program çatısı altında eş zamanlı benzetim ortamında analiz edilebileceğini göstermektedir.
- Kapsamlı bir tahrik grubu kütüphanesinin optimizasyon döngüsüne dahil edilmesi ve tamamen değişkenlere bağlı bir döngü oluşturulması sayesinde çok farklı boyutlardaki robotların optimum tasarımlarının elde edilebilmesini sağlamaktadır. Bu sayede bu tez çalışması literatüre herhangi bir robotun optimum tasarımını elde edebilen değişkenlere bağlı bir algoritma örneği sunmaktadır.
- Amaç fonksiyonları robot kütlelerinin ve robot uç konum hatasının en aza indirilmesi olan optimizasyon probleminde BSGA-II yöntemi, optimizasyon yöntemi olarak seçilmiştir. Bu sayede Pareto optimum çözüm kümesi elde edilmiştir. Böylece

tasarımcının nasıl bir robot istediğini ilk başta tasarım parametreleri ve kısıtlarda belirlediği ve en sonunda iki amaç fonksiyonuna da aynı anda hizmet veren BSGA-II yöntemi sayesinde bir çözüm kümesi elde edip önceliğine göre seçim yapabilmesi sağlanmıştır. Sonuç olarak bu tez çalışması BSGA-II yönteminin bu kadar kapsamlı bir robot tasarım optimizasyonunda kullanılabileceğini göstererek literatüre katkıda bulunmaktadır.

6.2 Tartışma

Bu tez çalışması bir dinamik sistemin tahrik grubu ve yapısının birleşik optimizasyonu için kullanılabilecek bir yöntem önermektedir ve uygulama olarak 3 serbestlik dereceli bir robot kolu üzerinde çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar ise taslak tasarım olarak kullanılabilmekte ve nihai tasarım için ilave detaylara ihtiyaç duymaktadır. Yapının boru şeklinde belirlenmesi nihai tasarım yapılırken ilave topoloji optimizasyonu yapılmasını gerektirmektedir. Ayrıca nihai tasarımda rulman, bağlantı elemanları, kablolar gibi elemanların ilave edilmesi gerekmektedir. Robot tasarımının önemli bir diğer unsuru olan çalışma alanı ise bu yöntem kullanılmadan önce belirlenmesi veya optimize edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın devamı olarak kinematik optimizasyon, çalışma alanı optimizasyonu ve nihai tasarım için topoloji optimizasyonu bu çalışmaya entegre edilip optimize edilmiş bir robot tasarımı elde edilebilir.

Bir başka önemli unsur ise dişli kutularında ve diğer bağlantı elemanlarında oluşacak sürtünme etkisinin ihmal edilmiş olmasıdır. Her ne kadar Harmonic Drive® dişli kutularının boşluksuz olduğunu ifade edilse de, ihmal edilebilecek kadar küçük bir miktar boşluğa sahip olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada sadece katalog verilerinden faydalandığı için dişli kutusunda oluşacak boşluklar ihmal edilmiştir. Çalışmanın daha ileriye götürülmesi durumunda nihai tasarım optimizasyonu çalışması yürütülürse sürtünmeden dolayı oluşacak hatalar ve kayıplar, dişli kutularında meydana gelebilecek olası boşluklar dinamik benzetim ortamına doğrusal olmayan etki olarak ilave edilip daha gerçekçi bir modelleme elde edilebilir.

Bu tez çalışmasında nominal çalışma durumunda yörüngeler kübik hız profili ile oluşturulmuştur. Kübik hız profili ise ani ivme değişimleri içermesi sebebiyle yüksek tork ihtiyacı oluşturmaktadır. Endüstride yer alan robotlarda ise genellikle beşinci derece (kuintik) yörüngeler kullanılmaktadır. Dolayısıyla ani ivme değişimleri bu yörüngede yer almaması sayesinde hareketlerin çok daha yumuşak geçişe sahip olması sağlanmaktadır. Bu sebeple, bu tez çalışmasında kullanılan yörünge planı kuintik olarak seçilmesi durumunda daha düşük tork değerlerine ihtiyaç duyulması muhtemeldi ve daha hafif tahrik grubu ve uzuv et kalınlıklarının oluşması sağlanabilirdi. Fakat sürtünme, kayıplar, ilave eklenecek olan elemanların ağırlıkları gibi etkenler ihmal edildiği için daha zorlayıcı olan kübik hız profiline sahip yörüngeler tercih edilmiştir. Eğer çalışma ilerletilip, ihmal edilen etkilerinde yer aldığı daha gerçekçi bir model kullanılırsa yörünge planının da kuintik olarak seçilmesi daha doğru olacaktır.

Bir başka ihmal edilen etki ise benzetim ortamında bir denetleyicinin olmamasıdır. Denetleyici ile yörünge takip edilmediği için robot kolu dinamik benzetim ortamında verilen yörüngeyi sıfır hata ile takip etmeye zorlanmaktadır. Özellikle kübik hız profilinde robot kolunun ani ivme değişimleri sırasında yörüngeyi takip etmeye zorlanması, benzetim ortamında gerçekte oluşabilecek tork değerlerinden daha yüksek değerlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bir denetleyici tarafından yörünge takip ediliyor olsa robot yörüngeyi takip etmeye çalışırken bir miktar hata yapabilecek, özellikle ani ivme değişimlerinde aşımalar yaşanacak bu da geçişlerin daha yumuşak olmasına olanak sağlayabilecekti. Bir başka deyişle, gerçek bir robot tasarımında denetleyicinin var olması bu ani tork değişimlerinin daha yumuşak olmasını sağlayacak ve aslında oluşacak tork değerleri daha düşük olacaktır. Çalışmanın ilerletilmesi durumunda bir denetleyicinin dinamik benzetime eklenmesi ve hatta denetleyicinin de tasarımla birlikte optimize edilmesi benzetimin ve sonuçların çok daha gerçekçi olmasını sağlayacaktır.

Bu tez çalışması bir dinamik sistemin taslak tasarımı için tahrik grubunun ve yapısının tümleşik optimizasyon ile nasıl belirlenebildiğini göstermektedir. Özet olarak kinematik, çalışma alanı, topoloji ve denetleyici optimizasyonu, sürtünme etkisi, dişli kutularındaki boşluklar, ilave sistemde yer alacak elemanlar (rulman,bağlantı

elemanları vs.), kuintik yörünge ve denetleyicinin etkisi ilave edilip baştan sona bir nihai robot tasarım optimizasyonu elde edilebilir.

İlave olarak endüstride kullanılan UR5 model robot tasarımına benzer boyut ve kapasitede bir tasarım elde edilmeye çalışılmış fakat başarılı olunamamıştır. Başarısız olunmasının ana sebebi ihtiyaç duyulan torkları üretebilen motorların kütüphanede yer almamasıdır. Yukarıda bahsedilen kuintik yörünge planının kullanılması ve bir denetleyici ile birlikte benzetim yapılması daha gerçekçi sonuçlar verebilecek ve ihtiyaç duyulan torkların daha düşük çıkmasını sağlayacaktır. Motor kütüphanesinin de genişletilmesi ile UR5 veya bir başka endüstride bilinen bir robota benzer bir tasarım optimizasyonu önerilen algoritma ile çözümlenebilir. Başarısız olunmasının bir başka sebebi ise UR5 robotun konfigürasyonunun bu tez çalışmasında seçilen konfigürasyon gibi insansı olmamasıdır. İnsansı robot kollarında omuz, dirsek ve bilek kısmı tek bir doğru üzerinde çakışık durumdadır. Bu da yapıda bir bükümün olmaması ve daha az mukavemete sahip olması anlamına gelir. Bu yöntem en baştan UR5 gibi bir robot kolu konfigürasyonuna uyarlandıktan sonra, yörünge planının kuintik olarak seçilmesi, benzetim ortamına denetleyici ilave edilmesi ve motor kütüphanesinin genişletilmesi sonrasında doğrudan kıyaslanabilir bir optimum robot tasarım çözüm kümesi sunabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Albers, A. ve Ottnad, J.** (2009). Integrated Structural and Controller Optimization for Lightweight Robot Design, *9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, <https://doi.org/10.5281/zenodo.4661777>.
- [2] **Ge, L.Z., Chen, J., Li, R. ve Liang, P.** (2017). Optimization design of drive system for industrial robots based on dynamic performance, *Industrial Robot The International Journal of Robotics Research and Application*, 44/6, 765-775, <https://doi.org/10.1108/IR-10-2016-0251>.
- [3] **Pettersson, M. ve Ölvander, J.** (2009). Drive Train Optimization for Industrial Robots, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 25, No. 6, pp. 1419-1424, <https://doi.org/10.5281/zenodo.4661761>.
- [4] **Zhou, L., Bai, S. ve Hansen, M.R.** (2011). Design optimization on the drive train of a lightweight robotic arm, *Mechatronics* 21, 560-569, <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2011.02.004>.
- [5] **Zhou, L., Bai, S. ve Hansen, M.R.** (2011). Integrated Design Optimization of a 5-DOF Assistive Light-weight Anthropomorphic Arm, *The 15th International Conference on Advanced Robotics*, 978-1-4577-1159-6/11, <https://doi.org/10.5281/zenodo.4661758>.
- [6] **Zhou, L., Bai, S. ve Hansen, M.R.** (2012). Integrated dimensional and drive-train design optimization of a lightweight anthropomorphic arm, *Robotics and Autonomous Systems* 60, 113-122, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2011.09.004>.
- [7] **Zhou, L. ve Bai, S.** (2015). A New Approach to Design of a Lightweight Anthropomorphic Arm for Service Applications, *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 7 / 031001-1, <https://doi.org/10.1115/1.4028292>.
- [8] **Yin, H., Huang, S., He, M. ve Li, J.** (2016). An overall structure optimization for a lightweight robotic arm, *IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications*, <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2016.7603872>.
- [9] **Gulec, M. ve Ertugrul, S.** (2022). Integrated Drive Train and Structural Optimization for a Dynamic System: An Evolving Conceptual Design Algorithm, *8th International Conference on Control, Decision, and Information Technologies (Codit 2022)*, DOI : 10.1109/CoDIT55151.2022.9804091, Istanbul.

- [10] **Hwang, S., Kim, H., Choi, Y., Shin, K. ve Han, C.** (2017). Design Optimization Method for 7 DOF Robot Manipulator Using Performance Indices, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 18, No. 3, pp. 293-299, <https://doi.org/10.1007/s12541-017-0037-0>.
- [11] **Kivelä, T., Mattila, J. ve Puura, J.** (2017). A generic method to optimize a redundant serial robotic manipulator's structure, *Automation in Construction* 81, 172-179, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.006>.
- [12] **Kucuk, S. ve Bingul, Z.** (2006). Comparative study of performance indices for fundamental robot manipulators, *Robotics and Autonomous Systems* 54, 567-573, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2006.04.002>.
- [13] **Li, H., Yang, Z. ve Huang, T.** (2008). Dynamics and elasto-dynamics optimization of a 2-DOF planar parallel pick-and-place robot with flexible links, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 38:195–204, <https://doi.org/10.1007/s00158-008-0276-x>.
- [14] **Liang, M., Wang, B. ve Yan, T.** (2017). Dynamic optimization of robot arm based on flexible multi-body model, *Journal of Mechanical Science and Technology* 31 (8), 3747-3754, <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0717-9>.
- [15] **Tromme, E., Bröls, O., Alt, J.E., Bruyneel, M., Virlez, G. ve Duysinx, P.** (2013). Discussion on the optimization problem formulation of flexible components in multibody systems, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48:1189–1206, <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0952-3>.
- [16] **Saravanan, R., Ramabalan, S., Ebenezer, R.G.J. ve Natarajan, R.** (2009). Evolutionary bi-criteria optimum design of robots based on task specifications, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 41:386–406, <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1483-8>.
- [17] **Hassan, A. ve Abomoharam, M.** (2017). Modeling and design optimization of a robot gripper mechanism, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 46 (2017)94-103, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2016.12.012>.
- [18] **Unal, R., Kiziltas, G. ve Patoglu, V.** (2008). Multi-criteria Design Optimization of Parallel Robots, *IEEE RAM 2008*, <https://doi.org/10.5281/zenodo.648758.1>.
- [19] **Wu, J., Wang, X., Zhang, B. ve Huang, T.** (2021). Multi-objective optimal design of a novel 6-DOF spray-painting robot, *Robotica* (2021), 39, pp., <https://doi.org/10.1017/S026357472100031X>.
- [20] **Wang, W., Wang, W., Dong, W., Yu, H., Yan, Z. ve Du, Z.** (2015). Dimensional Optimization of a minimally invasive surgical robot system based on NSGA-II algorithm, *Advances in Mechanical Engineering*, DOI:10.1177/1687814014568541.

- [21] **Padilla-Garcia, E., Cruz-Villar, C., Rodriguez-Angeles, A. ve Moreno-Armendariz, M.** (2017). Concurrent optimization on the powertrain of robot manipulators for optimal motor selection and control in a point-to-point trajectory planning, *Advances in Mechanical Engineering*, DOI:10.1177/1687814017747368.
- [22] **Padilla-Garcia, E., Cruz-Villar, C. ve Rodriguez-Angeles, A.** (2015). Multi-Objective Design/Control Optimization on the Power Train of Robot Manipulators Using a Genetic Algorithm, *The 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan*, DOI:10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS13.079.
- [23] **Gulec, M. ve Ertugrul, S.** (2023). Pareto Front Generation for Integrated Drive-Train and Structural Optimisation of a Robot Manipulator Conceptual Design via NSGA-II, *Advances in Mechanical Engineering*, DOI:10.1177/16878132231163051.
- [24] **Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. ve Mayerivan, T.** (2002). A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, <https://doi.org/10.5281/zenodo.6487417>.



ÖZGEÇMİŞ

Adı SOYADI: Musa Özgün GÜLEÇ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2012, Yeditepe Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü.
- **Y. Lisans:** 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Sistem Dinamiği ve Kontrol Programı.

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2012 yılında Yeditepe Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü birincilik ile, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesini üçüncülük ile bitirdi.
- 2014 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sistem Dinamiği ve Kontrol Programında Yüksek Lisansını tamamladı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Gulec, M. O.** ve Ertugrul, S. (2023). Pareto Front Generation for Integrated Drive-Train and Structural Optimisation of a Robot Manipulator Conceptual Design via NSGA-II, Advances in Mechanical Engineering, DOI:10.1177/16878132231163051.
- **Gulec, M. O.** ve Ertugrul, S. (2022). Integrated Drive Train and Structural Optimization for a Dynamic System: An Evolving Conceptual Design Algorithm, 8th International Conference on Control, Decision, and Information Technologies (Codit 2022), DOI : 10.1109/CoDIT55151.2022.9804091 .

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Güleç, M. Ö.**, ve Ertuğrul, Ş. (2014). İnsansı Robot Kolu Tasarımı ve Yörünge Kontrolü, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK 2014), Kocaeli.
- Ertuğrul, Ş., Kaya, O., Türkmen, D., Eraslan, H., Tağlıoğlu, G. B., **Güleç, M. Ö.** (2021). İnsansı robot kolu tasarımı, benzetimi, kinestetik öğrenme, empedans kontrolü ve öneriler, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, DOI : 10.17341/gazimmfd.900459.

