



**T.C.  
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KABLO TAHRİKLİ BİR ÇİZİM ROBOTUNUN TASARIMI VE  
OPTİMİZASYONU**

**SERKAN TELCİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. METİN TOZ**

**DÜZCE, 2021**

**T.C.**  
**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KABLO TAHRİKLİ BİR ÇİZİM ROBOTUNUN TASARIMI VE  
OPTİMİZASYONU**

Serkan TELCİ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Metin TOZ

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Metin TOZ

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim YÜCEDAĞ

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Alpaslan Burak İNNER

Kocaeli Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 18/08/2021

## BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

18 Ağustos 2021

Serkan TELCİ



## TEŐEKKÖR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Metin TOZ'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen ve her kararında beni destekleyen öncelikle sevgili eşim Ümmü Gül TELCİ'ye, aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bana moral kaynağı olan, gözlerindeki parlamanın ve gülümsemelerinin her zaman güç verdiği canım kızlarım Sevde ve Zeynep'e sonsuz sevgilerimi sunuyorum.

18 Ağustos 2021

Serkan TELCİ

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

|                                                                                                                 |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                                                             | viii |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                                                                           | xii  |
| KISALTMALAR.....                                                                                                | xiii |
| SİMGELER .....                                                                                                  | xiv  |
| ÖZET .....                                                                                                      | xv   |
| ABSTRACT .....                                                                                                  | xvi  |
| 1. GİRİŞ.....                                                                                                   | 1    |
| 2. LİTERATÜR TARAMASI.....                                                                                      | 5    |
| 3. DÜZLEMSEL ÇİZİM ROBOTU VE TERS KİNEMATİK<br>HESABI.....                                                      | 14   |
| 4. OPTİMİZASYON .....                                                                                           | 18   |
| 4.1. SEZGİSEL ALGORİTMALAR.....                                                                                 | 18   |
| 4.2. GENETİK ALGORİTMALAR.....                                                                                  | 18   |
| 4.2.1. Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması.....                                                              | 20   |
| 4.2.2. Seçilim .....                                                                                            | 20   |
| 4.2.3. Çaprazlama.....                                                                                          | 21   |
| 4.2.4. Mutasyon.....                                                                                            | 21   |
| 4.3. ÖNERİLEN GEOMETRİK OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI VE AMAÇ<br>FONKSİYON TANIMI.....                                 | 21   |
| 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....                                                                                    | 25   |
| 5.1. OPTİMİZASYON 1: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN ÜÇGEN RESMİ İÇİN KÖŞE<br>SAYISI 3 OLARAK SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI ..... | 25   |
| 5.2. OPTİMİZASYON 2: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN ÜÇGEN RESMİ İÇİN KÖŞE<br>SAYISI 4 OLARAK SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI ..... | 27   |
| 5.3. OPTİMİZASYON 3: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN ÜÇGEN RESMİ İÇİN KÖŞE<br>SAYISI 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....        | 28   |
| 5.4. OPTİMİZASYON 4: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN ÜÇGEN RESMİ İÇİN KÖŞE<br>SAYISI 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....        | 30   |
| 5.5. OPTİMİZASYON 5: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN ÜÇGEN RESMİ İÇİN KÖŞE<br>SAYISI 8 OLARAK SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI ..... | 31   |
| 5.6. OPTİMİZASYON 6: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN BEŞGEN RESMİ İÇİN<br>KÖŞE SAYISININ 3 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....    | 32   |
| 5.7. OPTİMİZASYON 7: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN BEŞGEN RESMİ İÇİN<br>KÖŞE SAYISININ 4 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....    | 33   |
| 5.8. OPTİMİZASYON 8: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN BEŞGEN RESMİ İÇİN<br>KÖŞE SAYISININ 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....    | 34   |
| 5.9. OPTİMİZASYON 9: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN BEŞGEN RESMİ İÇİN<br>KÖŞE SAYISININ 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....    | 36   |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.10. OPTİMİZASYON 10: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN BEŞGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 8 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....      | 37 |
| 5.11. OPTİMİZASYON 11: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN DÖRTGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 3 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....     | 38 |
| 5.12. OPTİMİZASYON 12: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN DÖRTGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 4 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....     | 39 |
| 5.13. OPTİMİZASYON 13: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN DÖRTGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....     | 41 |
| 5.14. OPTİMİZASYON 14: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN DÖRTGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....     | 42 |
| 5.15. OPTİMİZASYON 15: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN DÖRTGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 8 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....     | 43 |
| 5.16. OPTİMİZASYON 16: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN TİK RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 3 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....         | 45 |
| 5.17. OPTİMİZASYON 17: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN TİK RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 4 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....         | 46 |
| 5.18. OPTİMİZASYON 18: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN TİK RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....         | 47 |
| 5.19. OPTİMİZASYON 19: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN TİK RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....         | 48 |
| 5.20. OPTİMİZASYON 20: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN TİK RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 8 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....         | 50 |
| 5.21. OPTİMİZASYON 21: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN TİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 3 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....        | 51 |
| 5.22. OPTİMİZASYON 22: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN TİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 4 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....        | 52 |
| 5.23. OPTİMİZASYON 23: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN TİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....        | 53 |
| 5.24. OPTİMİZASYON 24: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN TİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....        | 55 |
| 5.25. OPTİMİZASYON 25: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN TİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 8 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....        | 56 |
| 5.26. OPTİMİZASYON 26: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN SPİRAL RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 3 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....      | 57 |
| 5.27. OPTİMİZASYON 27: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN SPİRAL RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 4 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....      | 58 |
| 5.28. OPTİMİZASYON 28: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN SPİRAL RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....      | 60 |
| 5.29. OPTİMİZASYON 29: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN SPİRAL RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....      | 61 |
| 5.30. OPTİMİZASYON 30: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN SPİRAL RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 8 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....      | 62 |
| 5.31. OPTİMİZASYON 31: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN YARIM DAİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 3 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI ..... | 64 |
| 5.32. OPTİMİZASYON 32: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN YARIM DAİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 4 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI ..... | 65 |
| 5.33. OPTİMİZASYON 33: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN YARIM DAİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI ..... | 66 |
| 5.34. OPTİMİZASYON 34: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN YARIM DAİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI ..... | 68 |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.35. OPTİMİZASYON 35: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN YARIM DAİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 8 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI ..... | 69 |
| 5.36. OPTİMİZASYON 36: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN YILDIZ RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 3 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....      | 70 |
| 5.37. OPTİMİZASYON 37: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN YILDIZ RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 4 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....      | 71 |
| 5.38. OPTİMİZASYON 38: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN YILDIZ RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....      | 73 |
| 5.39. OPTİMİZASYON 39: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN YILDIZ RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....      | 74 |
| 5.40. OPTİMİZASYON 40: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN YILDIZ RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 8 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI .....      | 75 |
| 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....                                                                                     | 78 |
| 7. KAYNAKLAR.....                                                                                                | 80 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                                   | 84 |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Robot çeşitleri a) Seri robot b) Paralel robot [2].                                                                                    | 2  |
| Şekil 1.2. Cablerobot hareket simülatörü [7].                                                                                                     | 3  |
| Şekil 3.1. Mekanizmanın üç adet bağlantı noktası kullanılarak elde edilen formu.                                                                  | 14 |
| Şekil 3.2. Kalem ve köşe bağlantılarının detayları.                                                                                               | 15 |
| Şekil 4.1. Genetik algoritma akış diyagramı.                                                                                                      | 20 |
| Şekil 4.2. Bu çalışmada kullanılan örnek resimler a) Üçgen b) Beşgen c) Dörtgen d) Tik e) Tire f) Spiral g) Yarım Daire h) Yıldız.                | 22 |
| Şekil 4.3. Önerilen geometrik optimizasyon işlemi akış diyagramı.                                                                                 | 24 |
| Şekil 5.1. Önerilen geometrik optimizasyon ara yüzü.                                                                                              | 25 |
| Şekil 5.2. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.   | 26 |
| Şekil 5.3. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.                                     | 27 |
| Şekil 5.4. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.   | 28 |
| Şekil 5.5. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.                                     | 28 |
| Şekil 5.6. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.   | 29 |
| Şekil 5.7. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.                                     | 29 |
| Şekil 5.8. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.   | 30 |
| Şekil 5.9. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.                                     | 31 |
| Şekil 5.10. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.  | 32 |
| Şekil 5.11. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.                                    | 32 |
| Şekil 5.12. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. | 33 |
| Şekil 5.13. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.                                   | 33 |
| Şekil 5.14. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. | 34 |
| Şekil 5.15. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.                                   | 34 |
| Şekil 5.16. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. | 35 |
| Şekil 5.17. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.                                   | 35 |
| Şekil 5.18. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. | 36 |
| Şekil 5.19. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.                                   | 37 |

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.20. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....  | 38 |
| Şekil 5.21. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                     | 38 |
| Şekil 5.22. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. .... | 39 |
| Şekil 5.23. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                    | 39 |
| Şekil 5.24. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. .... | 40 |
| Şekil 5.25. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                    | 40 |
| Şekil 5.26. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. .... | 41 |
| Şekil 5.27. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                    | 42 |
| Şekil 5.28. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. .... | 43 |
| Şekil 5.29. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                    | 43 |
| Şekil 5.30. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. .... | 44 |
| Şekil 5.31. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                    | 44 |
| Şekil 5.32. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....     | 45 |
| Şekil 5.33. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                        | 46 |
| Şekil 5.34. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....     | 47 |
| Şekil 5.35. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                        | 47 |
| Şekil 5.36. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....     | 48 |
| Şekil 5.37. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                        | 48 |
| Şekil 5.38. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....     | 49 |
| Şekil 5.39. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                        | 49 |
| Şekil 5.40. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....     | 50 |
| Şekil 5.41. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                        | 51 |
| Şekil 5.42. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....    | 51 |
| Şekil 5.43. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                       | 52 |
| Şekil 5.44. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....    | 53 |

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.45. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                           | 53 |
| Şekil 5.46. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....        | 54 |
| Şekil 5.47. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                           | 54 |
| Şekil 5.48. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....        | 55 |
| Şekil 5.49. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                           | 56 |
| Şekil 5.50. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....        | 57 |
| Şekil 5.51. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                           | 57 |
| Şekil 5.52. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....      | 58 |
| Şekil 5.53. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                         | 58 |
| Şekil 5.54. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....      | 59 |
| Şekil 5.55. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                         | 59 |
| Şekil 5.56. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....      | 60 |
| Şekil 5.57. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                         | 61 |
| Şekil 5.58. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....      | 62 |
| Şekil 5.59. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                         | 62 |
| Şekil 5.60. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....      | 63 |
| Şekil 5.61. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                         | 63 |
| Şekil 5.62. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. .... | 64 |
| Şekil 5.63. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                    | 65 |
| Şekil 5.64. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. .... | 66 |
| Şekil 5.65. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                    | 66 |
| Şekil 5.66. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. .... | 67 |
| Şekil 5.67. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                    | 67 |
| Şekil 5.68. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. .... | 68 |
| Şekil 5.69. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                    | 69 |

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.70. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. .... | 70 |
| Şekil 5.71. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                    | 70 |
| Şekil 5.72. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....      | 71 |
| Şekil 5.73. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                         | 71 |
| Şekil 5.74. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....      | 72 |
| Şekil 5.75. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                         | 72 |
| Şekil 5.76. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....      | 73 |
| Şekil 5.77. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                         | 74 |
| Şekil 5.78. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....      | 75 |
| Şekil 5.79. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                         | 75 |
| Şekil 5.80. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü. ....      | 76 |
| Şekil 5.81. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.....                                         | 76 |
| Şekil 5.82. Deney sayısı - kablo uzunlukları grafiği.....                                                                                                   | 77 |
| Şekil 5.83. Deney sayısı - mekanizma alanları grafiği. ....                                                                                                 | 77 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 3.1. Nokta koordinatları.....                                                    | 16 |
| Çizelge 3.2. Oluşan bağ uzunlukları.....                                                 | 16 |
| Çizelge 3.3. Mekanizma görüntüleri.....                                                  | 17 |
| Çizelge 5.1. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar. ....      | 26 |
| Çizelge 5.2. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar. ....      | 27 |
| Çizelge 5.3. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar. ....      | 28 |
| Çizelge 5.4. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar. ....      | 30 |
| Çizelge 5.5. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar. ....      | 31 |
| Çizelge 5.6. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar.....      | 32 |
| Çizelge 5.7. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar.....      | 33 |
| Çizelge 5.8. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar.....      | 34 |
| Çizelge 5.9. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar.....      | 36 |
| Çizelge 5.10. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar.....     | 37 |
| Çizelge 5.11. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar. ....   | 38 |
| Çizelge 5.12. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar. ....   | 39 |
| Çizelge 5.13. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar. ....   | 41 |
| Çizelge 5.14. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar. ....   | 42 |
| Çizelge 5.15. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar. ....   | 43 |
| Çizelge 5.16. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar. ....       | 45 |
| Çizelge 5.17. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar. ....       | 46 |
| Çizelge 5.18. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar. ....       | 47 |
| Çizelge 5.19. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar. ....       | 48 |
| Çizelge 5.20. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar. ....       | 50 |
| Çizelge 5.21. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar. ....      | 51 |
| Çizelge 5.22. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar. ....      | 52 |
| Çizelge 5.23. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar. ....      | 53 |
| Çizelge 5.24. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar. ....      | 55 |
| Çizelge 5.25. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar. ....      | 56 |
| Çizelge 5.26. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar.....     | 57 |
| Çizelge 5.27. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar.....     | 58 |
| Çizelge 5.28. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar.....     | 60 |
| Çizelge 5.29. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar.....     | 61 |
| Çizelge 5.30. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar.....     | 62 |
| Çizelge 5.31. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar. .. | 64 |
| Çizelge 5.32. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar. .. | 65 |
| Çizelge 5.33. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar. .. | 66 |
| Çizelge 5.34. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar. .. | 68 |
| Çizelge 5.35. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar. .. | 69 |
| Çizelge 5.36. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar.....     | 70 |
| Çizelge 5.37. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar.....     | 71 |
| Çizelge 5.38. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar.....     | 73 |
| Çizelge 5.39. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar.....     | 74 |
| Çizelge 5.40. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar.....     | 75 |

## KISALTMALAR

|         |                                                    |
|---------|----------------------------------------------------|
| AWS     | Otomatik depo sistemi                              |
| CDPR    | Kablo kontrollü paralel robot                      |
| CDM     | Kablo ile çalışan manipölatör                      |
| GA      | Genetik Algoritma                                  |
| JTDO    | Ortak tork bozukluğu gözlemcisi                    |
| RA-CDPR | Yedekli çalıştırılan Kablo kontrollü paralel robot |



## SİMGELER

|                    |                                                                                                       |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $b$                | Kablo bağlantı noktası                                                                                |
| $k_a$              | Kalem koordinat sisteminde kalem alt bağlantı noktası                                                 |
| $k_u$              | Kalem koordinat sisteminde kalem üst bağlantı noktası                                                 |
| $l$                | Kalem bağlantı noktası                                                                                |
| $min_u$ ve $max_u$ | Resim üzerinden elde edilen çalışma uzayı sınırlarının her bir eksendeki minimum ve maximum değerleri |
| $p$                | Uç işlevci uç noktasının koordinatları                                                                |
| $R$                | Yönelim matrisi                                                                                       |
| $x_k$              | Uç işlevci bağlantı noktalarının Z koordinatları                                                      |
| $x_u$              | Uç işlevci bağlantı noktalarının Z koordinatları                                                      |



## ÖZET

### KABLO TAHRIKLİ BİR ÇİZİM ROBOTUNUN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Serkan TELCİ

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Metin TOZ

Ağustos 2021, 83 sayfa

Bu tez çalışmasında, düzlemsel kablo kontrollü bir çizim robotu için geometrik optimizasyon yapan bir sistem önerilmiş ve bu sistemin çalışması sırasında parametrelerin belirlenebilmesi için kullanıcı ara yüzü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen bu sistem, kullanıcıdan aldığı örnek bir resim ve robot mekanizmasının köşe nokta sayısı için; o resmin çizilebilmesini sağlayacak robotun optimum geometrik tasarımını önermektedir. Sistem, geliştirilen ara yüzü kullanarak giriş olarak, çizilmesi istenilen resmi ve kablo kontrollü robot için istenilen köşe noktası sayısını almaktadır. Devamında bu bilgileri kullanarak giriş resminin çizilebilmesini sağlayacak olan robot mekanizmasının kablo uzunluklarını ve kabloların kaleme bağlantı noktalarını optimize etmekte, çıkan sonuçlara göre optimum mekanizmayı önermektedir. Optimizasyon aracı olarak Genetik Algoritma (GA) kullanılmıştır. Önerilen sistemin test edilmesi amacıyla sekiz farklı resim ve her resim için beş farklı köşe nokta sayısı girilerek geometrik optimizasyon yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

**Anahtar sözcükler:** Düzlemsel çizim robotu, Genetik algoritma, Kablo kontrollü robot, Optimizasyon, Paralel robot.

## **ABSTRACT**

### **DESIGN AND OPTIMIZATION OF A CABLE DRIVEN DRAWING ROBOT**

Serkan TELCİ

Düzce University

Institute of Graduate Studies, Department of Electrical-Electronics and Computer  
Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Metin TOZ

August 2021, 83 pages

In this thesis, a geometric optimization system is proposed for a planar cable-driven drawing robot and a user interface design has been carried out in order to determine the parameters during the operation of this system. For this proposed system, a sample picture taken from the user and the number of corner points of the robot mechanism; It proposes the optimum geometric design of the robot, which will enable that picture to be drawn by the robot. Using the developed interface, the system takes the desired picture and the number of corner points for the cable-driven robot as input, and by using this information, it optimizes the cable lengths of the robot mechanism and the connection points of the cables to the pen, which will enable the input picture to be drawn, and proposes the optimum mechanism according to the results. Genetic Algorithm was used as an optimization tool. In order to test the proposed system, geometric optimization was made by entering eight different images and five different corner points for each image, and the results were presented comparatively.

**Keywords:** Cable driven robot, Genetic algorithm, Optimization, Parallel robot, Planar drawing robot.

## 1. GİRİŞ

Uzun yıllar boyunca insanların yardımcılara ihtiyaçları olmuştur. İlk başlarda her şeyi insan gücü ile yapmışlar, teknolojinin gelişmesi ile birlikte insanların kontrol ettiği makineler üretmişlerdir. Zamandan tasarruf etme isteği ile birlikte aynı kalitede ürün geliştirebilme ihtiyacı makinelere olan ihtiyacı artırmıştır. Hem zamandan tasarruf hem kaliteden ödün vermeme isteği hem üretilen ürünün daha düşük ücretlere üretilmesinin istenmesi otomasyon sistemlerinin gelişmesini tetiklemiştir. Otomasyon sistemleri hataları en aza indirgerken standartlaştırılmış üretimi sağlamaktadır. İnsanlar güçlerinin yetmediği yerlerde makinelere ihtiyaç duymuşlardır. Geliştirdikleri makineleri zamanla insan kontrolü olmadan da kendi başlarına çalışabilecek hale getirmişlerdir. Otomasyon sistemlerinin uygulamalarında en fazla kullanılan elemanlarından birisi de robotlardır. Robotlar; makine mühendisliği, elektrik ve elektronik mühendisliği ve bilgisayar mühendisliği gibi birçok çok disiplinin ortak çalışma alanıdır. Robotlar, bir yazılım aracılığı ile yönetilen, yararlı bir amaç ve insanlığın işini kolaylaştırıp, gereksiz güç kaybını önleyen, zamandan tasarruf ettiren karmaşık makinelerdir [1]. Günümüz üretim teknolojisindeki hızlı gelişim, bu teknolojilerde kullanılan robotlarda da gittikçe artan düzeyde yüksek hassasiyet ve konumlandırma yeteneklerinin gerekliliğine sebep olmaktadır. Robotlar seri ve paralel olmak üzere iki çeşitte ele alınabilir. Seri robotlar tabandan uç işlevciye kadar uzanan motorlarla kontrol edilen bir dizi bağlantı olarak tanımlanabilir. Çoğu zaman, omuz, dirsek ve bilek şeklinde kelimelerle ifade edilen insan biçiminde bir kol yapısına sahiptirler. Paralel robotlar ise taban ile uç işlevci arasında en az iki bağlantının (bacak veya kol) bulunduğu, seri robotlara göre daha hızlı ve daha doğru çalıştığı düşünülen robotlardır [2]. Seri robot ve paralel robot örnekleri Şekil 1.1’de görülmektedir.



a)



b)

Şekil 1.1. Robot çeşitleri a) Seri robot b) Paralel robot [2].

Bu durum son yıllarda üretimin hemen her alanında kullanılan seri robot mekanizmalarının yerine paralel robot mekanizmalarının kullanımı düşüncesine sebep olmuştur. Bunun nedeni paralel robot mekanizmalarının seri robotlardan daha yüksek konumlanma hassasiyeti, yüksek güç uygulama yeteneği ve kendi kütlelerine oranla kaldırabilecekleri yük miktarlarının daha fazla olmasıdır [3].

Paralel robot ismindeki paralel kelimesi seri robotların tersine uç işlevcinin birden fazla bağlantı ile desteklenmesinden gelmektedir. Paralel kelimesi geometrik anlamda kullanılmamıştır. Paralelden kasıt bağlantı doğrularının birbirlerine paralel olması değil, bağlantıların beraber hareket etmesidir. Teknolojideki son gelişmelerle birlikte özellikle yüksek hassasiyetin önemli olduğu endüstriyel uygulamalarda paralel robotlar, seri robotlara göre hızlı çalışmaları, kararlı, dayanıklı ve yük kapasitelerinin daha yüksek olması dolayısıyla sıklıkla kullanılmaktadır. Kablo kontrollü paralel robotlar (CDPR'ler), temel çerçeve ve hareketli platformdan oluşur. Motorlar tarafından hareket ettirilen kasknaklar tarafından yönlendirilen kablolar hareketli platforma tutturulmuştur. Bu kablolar hareket üretmek veya çalışma alanı boyunca hareketli platforma kuvvet uygulamak için kullanılır. CDPR'ler, büyük çalışma alanı, yüksek taşıma yükü, yüksek hız ve ivme gibi kabloların sağladığı çeşitli avantajlar nedeniyle sanayide giderek daha fazla kullanılmaktadır [4], [5]. CDPR'ler, sabit boyuttaki paralel robotlara kıyasla daha geniş bir çalışma alanına sahip tasarım çözümlerine izin vermektedir [6]. Şekil 1.2'de hareket benzetimi yapılabilmesi için geliştirilmiş, 8 kablo ile uç işlevcinin hareket ettirilmesi prensibine dayanan CDPR örneği görülmektedir.



Şekil 1.2. Cablerobot hareket simülatörü [7].

İlk CDPR'ler endüstriyel uygulamalar için tasarlanmıştır. RoBoCrane, 1989 yılında Amerika Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü'nde (NIST) uygulanan ilk kabloyla çalışan paralel robot olarak kabul edilmektedir [8]. Bu robot; kesme, şekillendirme, bitirme, kaldırma ve konumlandırma gibi birkaç farklı uygulama için kullanılmıştır. Son yıllarda Japonya, İtalya, Fransa ve Almanya'da birkaç CDPR önerilmiş ve geliştirilmiştir. Örneğin Falcon-7, ultra yüksek hızlı ve küçük aktüatörlere sahip bir Japon robotudur [9]. Yedi kabloyla kontrol edilen bu robot, yüksek hassasiyet ve sertlik gerektiren uygulamalar için kullanılmıştır. Kablo kontrollü robotlar, klasik paralel mekanizmalara kıyasla geniş çalışma alanları ve yüksek sertlikleri nedeniyle inşaat görevleri için de kullanılır. Örneğin Pinto ve ark. [10], mimari projeleri için dört serbestlik dereceli bir robot olan SPIDER robot'u önermişlerdir. CDPR'ler ayrıca rehabilitasyon sistemi [11], arama kurtarma işlemlerinde kullanılacak termal kameralarla yaralının yerini algılayan kurtarma robotu [12], radyo teleskopu [13] vb. diğer birçok farklı uygulamada da kullanılmıştır. Literatüre bakıldığında kablo kontrollü robotlar konusunda birçok optimizasyon çalışmaları yapıldığı görülmektedir. Bazı çalışmalarda kablo gerginlikleri optimize edilirken [14]–[16], bazı çalışmalarda uç işlevci ile kabloların bağlantı noktaları optimize edilmiş [17], [18], bazı çalışmalarda ise mekanizma çalışma alanı optimize edilmiştir [19], [20].

Bu tez çalışmasında, düzlem üzerine çizilecek bir resim için kullanılacak kablo kontrollü paralel robotun geometrik optimizasyonunu yapan bir sistem önerilmektedir. Geliştirilen

algoritma; sisteme girdi olarak verilen resim ve köşe noktası sayısı üzerinden, verilen resmin çizilebilmesini sağlayacak mekanizmanın köşe noktası koordinatlarının, mekanizmanın en az alanı kaplayacak şekilde optimize edilerek bulunmasını sağlamaktadır. Önerilen sistem; 3, 4, 5, 6 ve 8 köşe noktası üzerinden sekiz farklı formdaki resim ile çalıştırılmış, oluşan minimum bağ uzunlukları, bulunan köşe noktaları ve kalem bağlantı noktaları kaydedilmiştir. Ayrıca köşe noktası sayısının ve çizilmesi istenilen resmin; mekanizmada kullanılması gereken maksimum bağ uzunluğu üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

Çalışma şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde robot, seri ve paralel robot, kablo kontrollü robot, optimizasyon, genetik algoritma ve kablo kontrollü robot mekanizma örnekleri konuları hakkında bir literatür taraması yapılmıştır. Üçüncü bölümde önerilen düzlemsel, kablo kontrollü paralel robotun tanıtımı ve ters kinematik hesabı sunulmuş, örnek köşe noktaları üzerinden oluşan bağ uzunlukları ve mekanizma görselleri verilmiştir. Dördüncü bölümde robotun optimizasyonu için kullanılan optimizasyon problemi tanımlanmış ve GA ile bu optimizasyon probleminin çözümü için önerilen amaç fonksiyon sunulmuştur. Beşinci bölümde örnek resim ve bağlantı nokta sayıları kullanılarak önerilen sistem test edilmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Altıncı bölümde ise sonuçlar değerlendirilerek çalışma sonuçlandırılmıştır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Robotlar, mekanik sistemleri ve bunlarla ilişkili kontrol ve algılama sistemlerini bilgisayar algoritmalarına bağlı olarak çalıştıran ve akıllı davranan makinelerdir. Yeniden programlanabilirler. Maddeleri, parçaları ve aletleri, programlanmış hareketlerle yapılacak işe göre taşıyan veya işleyen çok fonksiyonlu makinelerdir [21]. Tezin bu bölümünde kablo kontrollü robot örneklerine yer verilmiş ve tez çalışmasının literatüre katkısı değerlendirilmiştir.

Seri robotlar, sabit çerçeveden uç kısmına doğru birbirine eklemlerle tutturulmuş bağlardan oluşur. Bu bağlardan her birine koordinat sistemi eklenerek bağlar arasındaki ilişkiyi veren matrisler bulunur. Bağlar üzerinden bulunan matrisler sıralı şekilde dönüşüm matrisleriyle ilişkilendirilir. Bu ilişkiye ileri kinematik denir. İleri kinematik, robotun uç noktasının yönelimini ve konumunu sabit çerçeveye göre ifade eder [22]. Seri robotların tasarımlarının kolay, çalışma uzaylarının geniş ve kinematik analizlerinin basit olmasına rağmen, paralel robotlar hem endüstride hem de akademik çalışmalarda seri robotlara kıyasla daha sık tercih edilmektedir [3]. Paralel robot mekanizmaları genel olarak bir temel çerçeve ve bir uç işlevci çerçevesinin birden fazla robot kolunun kullanılması ile birbirine bağlanması şeklinde tasarlanırlar [23]. Bu durum hem benzer amaçlar için kullanılabilecek muhtemel paralel robot mekanizma tasarımı sayısını arttırmakta hem de mekanizma tasarımını zorlaştırmaktadır. CDPR'lerde; uç işlevci birden fazla kablo ile paralel olarak desteklenmekte ve kabloların uzunlukları eyleyici (aktüator) yardımı ile değiştirilerek hareket sağlanmaktadır. CDPR'ler, basit ve hafif mekanik yapısı, büyük çalışma alanları, birimsel (modular) geometrileri, kolay taşınabilirlikleri ve yüksek hızlarda hareket edebilme gibi özellikleri ile geleneksel paralel robotlara göre birçok avantaja sahiptirler. Bu özelliklerden dolayı, CDPR'ler malzeme taşıma ve yerleştirme, tıbbi uygulamalarda rehabilitasyon cihazları, oyun simülatörleri ve endüstriyel uygulamalar gibi birçok alanda kullanılabilmektedirler [24].

Literatürde geçen kablo kontrollü robotlar ile yapılan çalışmalar incelendiğinde aşağıda yer verilmiş olan örnekler karşımıza çıkmaktadır.

Zhiwei Cui ve arkadaşları [25], 8 adet kablo ile kontrol edilen bir CPDR tasarlamışlar, kablo gerginliklerini hesaplayabilmek için çeşitli yöntemler önermişlerdir. Önerdikleri yöntemler, geometrik hesaplama yöntemlerini kullanmaktadır. Ayrıca, optimizasyon sonuçlarının doğruluğunu değerlendirmek için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Önerdikleri optimizasyon yöntemlerini kullanarak elde ettikleri sonuçların söz konusu doğruluğunu değerlendirmişler ve analiz etmişlerdir.

Kablo gerginliklerinin optimize edildiği bir diğer çalışmada ise Yupeng Zou ve arkadaşları [18], alt ekstremitte bozukluğu olan hastalara yardımcı olmak için, hastanın motor işlevlerini eski haline getirmek ve yaşam kalitelerini iyileştirmek için hareketli bir kablo tahrikli rehabilitasyon robotu tasarlamışlardır. Robot, alt ekstremitenin duruşunu ve kuvvetini kontrol ederek alt ekstremitelerin kapsamlı eğitimlerini gerçekleştirebilmektedir. Robot, farklı rehabilitasyon aşamalarındaki hastalara pasif, asistan ve aktif mod ile rehabilitasyon eğitimi yapmalarına yardımcı olabilmektedir.

Da Song ve arkadaşları [26], CDPR'nin kablo gerginliğini optimize etme üzerine yaptıkları çalışmalarında, robotun yörüngesini izlemek için uygun bir gerilim dağıtım yöntemi önermişlerdir. CDPR'lerin çalışma alanını belirlemek için bir dışbükey analiz yöntemi ve yedekli olarak çalıştırılan altı serbestlik dereceli CDPR'lerin boyutunu belirlemek için gruplanmış koordinat iniş yöntemi kullanmışlardır. Kablo yerleşimini değiştirerek ve fazladan çalıştırılan CDPR'ler için geometrik analiz yöntemini kullanarak, 3-B uzayda mobil platformun maksimum dönüş açısını belirlemişlerdir. CDPR'ler, kablo gerginliğini ayarlamak için gerçek zamanlı kontrol gerektirir. Bu sorunu çözmek için, yinelemesiz iki serbestlik dereceli çalıştırma yedeklemesi CDPR'si için gerçek zamanlı bir kablo gerginliği dağıtım algoritması önermişlerdir. Önerdikleri gerilim dağıtım algoritmasını, optimize edilmiş altı serbestlik dereceli sekiz kablolu CDPR'ye uygulamışlar ve mevcut diğer kablo gerilim dağıtım algoritmalarıyla karşılaştırmışlardır. Simülasyon sonuçları ile önerdikleri kablo gerilimi dağıtım algoritmasının başarılı çalıştığını göstermişlerdir.

Hongyi Xu ve arkadaşları [27], elastik olarak deforme olan tel yapıları ile daha az tel kullanarak gerçekleştirilebilecek kablo kontrollü sistemler üzerine çalışmışlardır. Bu tel yapıları hafif, dayanıklı ve CNC bükme makineleri kullanılarak birkaç dakika içinde bükülebilir. Tüketici sınıfı donanımlarda üretime uygun kinetik tel karakterlerin tasarımı için bir hesaplama tekniği sunmuşlardır. Teknik girdi olarak bir eğri ağı veya iskelet animasyonu almışlar, ardından kullanıcı tarafından seçilen hedeflere veya anahtar

karelere mümkün olduğunca yakın eşleşen kabloyla çalışan, uyumlu bir yapı tahmin etmişlerdir.

Xinyu Geng ve arkadaşları [14], CDPR'lerdeki kablolardaki gevşekliği ve aşırı gerginliği önlemek için bir algoritma önermişlerdir. Sundukları kablolardaki gerilimi dengeleme algoritmasının geçerliliğini ve uygulanabilirliğini 2 normlu ikinci dereceden programlama sonuçları ile karşılaştırarak doğrulamışlardır.

Hamed Jamshidifar ve arkadaşları [28], istenmeyen dış bozulmaları istenen yönde en aza indirmek için sertlik optimizasyonunu amaçlayan CDPR'lerin sertlik artırıcı etkileri ve artıklık çözünürlüğünü incelemişlerdir. Kısıtlı kabloların CDPR'nin sertlik gelişimi üzerindeki potansiyel etkilerini göstermişlerdir. Buna göre, kabloların gerginlik yedeklilik sorununu formüle etmişlerdir. Geliştirdikleri modeli ve önerdikleri artıklık çözümleme yaklaşımını, translasyon sertliğini en üst düzeye çıkarmak için gerçek bir depolama robotu üzerinde deneysel olarak test etmişlerdir. Teorik ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlar, önerdikleri optimizasyon yaklaşımının geçerliliğini göstermişlerdir.

Kömür gang ayırımı, yeşil madencilik için önemli bir konudur. P. Liu ve arkadaşları [29], dört kablo ile sürülen gang kepçesi ile kömür gang toplama robotu adını verdikleri, makine görüş sistemine dayalı kömür ve gangin ayrılması için robot geliştirmişlerdir. Kömür gang toplama robotunun yapısal stabilitesi hakkında daha fazla bilgi bulmak için eşdeğer pozisyon çalışma alanına odaklanmışlardır. İlk olarak, kömür gang toplama robotunun kinematik ve kinetostatik modellerini, kömür gang toplama robotunun yapısal stabilitesi üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir.

Kablo kontrollü manipülatörlerin tasarımı, kabloların tek yönlü yapısı nedeniyle karmaşıktır, bu da ekstra aktüatörlere ve sınırlı çalışma alanlarına neden olur. Ayrıca, kabloların özel düzenlemesi ve robot pozunun geometrisi, istenen bir eklem torkunu gerçekleştirmek için gereken kablo gerilimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yeterince karmaşık bir robot için, tatmin edici bir kablo mimarisinin tanımlanması zor olabilir. Çok sayıda yedek aktüatöre, çalışma alanı boyutuna ve kablo gerginliklerine bağlı olarak performans sınırlamalarına neden olabilir. Joshua T. Bryson ve arkadaşları [30], belirli bir görev için optimize edilmiş kablo yönlendirmeleri tasarlamak için, stok sistemlerinin optimizasyonu ile birlikte kablo sistemlerinin çalışma alanı analizine ilişkin önceki araştırmalardan yararlanmışlar, yürüme hareketi yapan bir kablo kontrollü robot ayağı üzerinden, metodoloji uygulamasını göstermek için motive edici bir örnek olarak

kullanmışlardır. Metodolojinin bileşenlerini açıklamışlar ve süreci örnek probleme uygulamışlardır. İstenen görevi gerçekleştirmek için gerekli kontrol edilebilir çalışma alanını sağlayan ve robotun bu görevi en az kablo gerilimi ile gerçekleştirmesini sağlayan optimum bir kablo yönlendirmesini tanımlamışlardır.

Kablo ile çalışan manipülatörler (CDM) rijit bağlantılar yerine kablolarla sürülen özel bir paralel manipülatör sınıfıdır. Kabloların tek taraflı sürüş özelliği nedeniyle, CDM'lerin pozitif kablo gerginliklerini korumak için yedekli harekete geçirme gerekmektedir. Çalıştırma yedekliliğinin bir sonucu olarak, belirli bir CDM pozu için sonsuz sayıda olası kablo gerginliği çözümü vardır. Wen Bin Lim ve arkadaşları [31], CDM'lerin ayarlanabilir gerilim çözümü elde etmek için bir gerilim optimizasyon yöntemi önermişlerdir. Ayarlanabilir gerilim çözümü önemlidir çünkü gerilim sınırlarından kaçınılmasını ve CDM'nin sertliğinin düzenlenmesini sağlar. Gerilim seviyesi endeksleri, istenen kablo gerginlik seviyesini ayarlamamanın sistematik ve pratik bir yolunu sağlamak için sunulmuştur. Simülasyon sonuçlarıyla yöntemin hesaplamalı olarak etkili olduğunu ve gerilim çözümlerinin gerilim seviyesi endeksleri değiştirilerek manipüle edilebildiğini göstermişler, simülasyon sonuçlarını deneysel çalışmalarla doğrulamışlardır.

Zhengyu Wang ve arkadaşları [15], kablo kontrollü minimal cerrahi robotunun uç efektörü için eklem tork bozulma gözlemcisine (JTDO) dayalı yeni bir kenetleme kuvveti tahmin yöntemi önermişlerdir. Çalışmada motor içerisindeki kablo uzunluklarının hesaplanması noktasında geri yayılım yapay sinir ağı algoritması kullanılarak kablo gerginlikleri hesaplanmış, gerçek kablo gerginliği ile tahmini kablo gerginliği arasındaki farklar gözlemlenmiştir.

CDPR'ler, potansiyel olarak daha fazla yapısal sertlik, daha fazla doğruluk ve daha yüksek taşıma yükü-ağırlık oranları dâhil olmak üzere seri manipülatörlere göre birçok avantaj sunmaktadır. Bununla birlikte, CDPR'ler sınırlı moment direnci / egzersiz kabiliyetlerine ve nispeten küçük çalışma alanlarına sahiptirler. Her birinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları olan bu sınırlamaların üstesinden gelmek için çeşitli yöntemler düşünülmüştür. Michael Anson ve arkadaşları [32], sisteme taban hareketliliğinin eklenmesi yöntemi üzerinde durmuşlardır.

Weifang Wang ve arkadaşları [33], otomatik depo sistemleri için raftan paketi alma – rafa paketi geri koyma platformu olarak benimsenen kablo tahrikli paralel mekanizmanın enerji tüketimi ve kablo gerginliği optimizasyonuna odaklanmışlardır. Kablo tahrikli

paralel mekanizma için hareketli platformun hareketi, sert uzuv yerine kabloların uzunluklarının değiştirilmesiyle kontrol edilir. Otomatik depo sistemlerinde geleneksel depolama işlemi ile karşılaştırıldığında, kablo tahrikli paralel mekanizmanın yüksek hız, yüksek alan kullanımı ve düşük enerji tüketimi gibi önemli avantajları vardır. Çünkü robot mekanizması basittir, kütlesi küçüktür ve hızlı hareket eder. Net fiziksel anlamı olan ve hesaplama verimliliğini artırabilecek minimum kablo kuvveti dağılımının optimizasyon yöntemini sunmuşlardır. Daha sonra, aynı hareket altında farklı kablo kuvvet dağılımlarına sahip depo sisteminin enerji tüketimini incelemişlerdir. Sonuç olarak, minimum kablo kuvveti dağılımı optimizasyon yönteminin depo sisteminin toplam enerji tüketimini azaltmak için yararlı olduğunu göstermişlerdir.

Zonggao Mu ve arkadaşları [34], konsantrik tel tahrikli mekanizmadan oluşan bir mekanizma geliştirmişler ve eş merkezli tel tahrikli manipülatör için eş zamanlı olarak son pozisyon ve son yönü çözmek için bir biarc yöntemi önermişlerdir. İlk olarak, eş merkezli tel tahrikli manipülatörün konfigürasyonu, dış düğümlerin toplam bükülme açısı, iç düğümlerin toplam bükülme açısı ve istenen yön vektörü gibi tipik biarc parametreleri ile parametrelendirmişler, ardından temel modül parametrelerine, uç yönüne ve bükülme açısına dayalı görev konfigürasyonu optimizasyonunu detaylandırmışlardır. Son olarak, tipik 'S' konfigürasyonu ile kalın bağırsak muayenesinde yörünge takibi için tasarlanmış manipülatör üzerinde simüle ederek denemişlerdir. Sonuç olarak, önerdikleri yöntemin kinematik ve ayar planlamasının makul çözümlerini sağlayabildiğini ve alınan sonuçlarla aynı zamanda eş merkezli tel tahrikli manipülatörün, son derece yoğun bir alanda istenen yörüngeyi izleyebildiğini göstermişlerdir.

Huajie Hong ve arkadaşları [19], CDPR'lerin çalışma uzayı optimizasyonu üzerine yapıkları çalışmada, karmaşık yapıdaki kablo kontrollü robotların topolojik mimari tasarımları ve optimizasyonları için daha çok teorik çalışmaya ihtiyaç olduğunu savunmuşlardır. Bu nedenle, uygulanan kablo kontrollü mimarileri ve ilgili teorik çalışmaları gözden geçirmişler ve özetlemişlerdir. Paralel, seri ve diferansiyel mimarinin yanı sıra, Jacobian matrisine dayanan çalışma alanı analizi, parçacık sürüsü optimizasyonu ve genetik algoritma ve grafik teorisine dayanan kinematik tasarım gibi teorileri ve yöntemleri de açıklamışlardır. Çalışmalarını mimarinin özellikleri ve teori çalışmaları ile sonuçlandırmışlardır.

Çalışma alanı optimizasyonu üzerine yoğunlaşan başka bir çalışmada Jeffrey M. Friesen ve arkadaşları [35], gerginlikten esinlenen uyumlu üç serbestlik dereceli robotik mafsalları geliştirmişlerdir. İlk olarak eklem teorik konfigürasyon alanını en üst düzeye çıkarmak için geometri seçimini ve optimizasyonunu tartışmışlar, daha sonra, çok sayıda kablo tahrikli mekanizmaya kolayca genelleştirilebilen mekatronik tasarım çözümlerinin birçoğunu göstermişler ve bu mekanizmaların geliştirdikleri prototipe kıyasla performans karşılaştırmalarını yapmışlardır. Daha sonra fiziksel prototiplerinin kontrol edilebilir sertliği üzerine sonuçlar sunmuşlar, son olarak, eklem 0,95 metre mesafeden 7 kg'lık bir kütleyi kaldırabilen prototiplerinin gücünü göstermişlerdir. Geliştirdikleri prototip üzerinde çalışma alanı optimizasyonu için daha fazla çalışma yapılması gerektiğine, hem çalışma alanı boyutunu hem de konumlandırma doğruluğunu kullanan dizinlenmiş bir optimizasyonun, optimize edilmiş topoloji için daha iyi sonuçlar verebileceğine değinmişlerdir.

Javad Bolboli ve arkadaşları [17], kablo tahrikli paralel robotun sertliğini analiz etmişler ve daha sonra sertliğe uygun çalışma alanı kavramını sunmuşlardır. Sıkıştırılmış çerçevenin her birindeki iç kuvvetlerin belirlenen değerleri için anahtar kapatma çalışma alanı ve sertlik matrisinin analizi bu çalışmanın alanını belirlemektedir. Analiz sırasında kabloların uç işlevciye bağlanacağı noktaların optimizasyonunu yapmışlar, optimizasyon sonucunda ulaşılan parametre değerlerini kullanarak tasarladıkları geometrik robotun sertliğe uygun çalışma alanındaki çalışmasını doğrulamak için düzlemsel bir kablo robotu üzerindeki simülasyon sonuçlarını sunmuşlardır.

Robert L. Williams ve arkadaşları [36], yeni bir kablo tabanlı metroloji sistemi sunmuşlardır. Sunulan sistemde altı kabloyu zemine monte edilmiş dize saksılarından hareketli cisme veya ilgilenilen araca paralel olarak bağlamışlardır. Kartezyen pozlama, geri besleme kontrolü ve diğer amaçlar için, altı kablonun uzunluklarını okuyarak ve kapalı formülü ileri poz kinematiği kullanarak belirlemişlerdir. Sistemin çalışmasını göstermek için deneysel veriler sunmuşlar, mutlak doğruluk ve ölçüm çözünürlüğünü incelemişler ve çeşitli hata kaynaklarını tartışmışlardır. Önerdikleri gerçek zamanlı kablo tabanlı metroloji sisteminin, mevcut ticari Kartezyen metroloji teknolojilerinden daha az karmaşık ve daha ekonomik olduğunu ortaya koymuşlardır.

Gun Rae Cho ve arkadaşları [37], MR güdümlü biyopsi iğne manipülatörü için doğru pozisyon kontrolü yapabilen bir boşluk dengeleyici önermişlerdir. Uzun kablo tahrikli şanzımana sahip olan robot MR uyumluluğunu garanti eder, ancak geri tepme problemi

nedeniyle hassasiyette bozulmaya sahiptir. Sorunu çözmek için, kontrol girdisinin sürekliliği ile ilgili Prandtl-Ishlinskii modeline dayanan bir boşluk dengeleyici önermişlerdir. Geri tepme modelini tanımlamak için parçacık sürü optimizasyonunu kullanmışlardır. Deneyler yoluyla, önerdikleri kompensatörün boşluk hatasını önemli ölçüde azaltabildiğinden ve biyopsi operasyonu için yeterli doğruluğu sağlayabildiğinden bahsetmişlerdir.

Ramy Meziane ve arkadaşları [38], kablo kontrollü robotlarda, etkileşime giren iki kablonun birbirine karışmasını önlemek ve böylece kablo mekanizması geometrisini korumak için etkileşimli bir kontrol yaklaşımı sunmuşlardır. Bu yaklaşımda, kontrolör kabloların karışmasını önlemek için itici bir kuvvet üretilmektedir. Bu nedenle, görev kablo tahrikli paralel mekanizmanın geometrik sınırları dâhilinde yürütülmektedir. Kontrolör tarafından uygulanan itici kuvvet, paralel mekanizmanın herhangi bir kablo çifti arasındaki minimum mesafenin gradyanından türetilmektedir. Kablolar arasındaki bu minimum mesafe, ilgili optimizasyon sorununun Karush-Kuhn-Tucker koşullarından hesaplanmaktadır. Yaklaşımı test etmişler ve yedi kablo tarafından yönlendirilen bir robot mekanizması üzerinde doğrulamışlardır.

Luca Barbazza ve arkadaşları [39], düzlemsel, ayrışmamış, kablo ile çalışan bir mikro-makro robot sunmuşlardır. Sistem, kablo kontrollü paralel bir robota bağlı pasif seri manipülatörden oluşmaktadır. Sistem, engellerin var olduğu durumlarda büyük çalışma alanlarında noktadan noktaya hareket gerektiren uygulamalar için tasarlanmıştır. Seri kol, kablo kontrollü robot tarafından erişilemeyecek noktalara ulaşılmasını sağlamaktadır. Sistemin noktadan noktaya hareketler için kontrol edilebilir hale gelebilmesi için diferansiyel çerçeve uygulamışlardır.

Bin Zi ve arkadaşları [40], kablolar ile pnömatik arteriyel kasları (PAM) yönlendiren bir bel rehabilitasyon robotu tasarlamışlardır. Mekanizma tasarımı sürecinde, insan vücudu yapısı, bel hareket özellikleri ve aktüatörlerin sürüş özellikleri, hibrit tahrikli bel rehabilitasyon robotunu (HWRR) uygun maliyetli, güvenli, esnek ve iyi hale getirmek için önemli faktörlerdir. Hasta güvenliğini sağlamak için iyileştirilecek hastanın pozisyonunu ve yönünü ölçmek için çeşitli sensörler kullanılmıştır. HWRR'yi; bel büküm cihazı ve alt ekstremité çekiş cihazı olmak üzere iki bağımsız paralel robota ayırmışlardır. Daha sonra bu iki cihazı sırasıyla analiz etmiş ve değerlendirmişlerdir. İnsan vücudunun HWRR'deki karakterleri göz önüne alındığında, bel ve alt ekstremitéyi sırasıyla bir yay ve bağlantı olarak kabul etmişler, ters kinematik ve statik hesabını incelemişlerdir. Ters

kinematik ve statik değerlere dayanarak, PAM'ın kasılma parametresinin etkisini bel büküm cihazının optimizasyonunda düşünmüşler ve parçacık sürü optimizasyonunu (PSO) kullanarak optimize etmişlerdir. Jacobian matrisinin uygulanabilir çalışma alanı üzerindeki durumunu da hesaplayarak yaptıkları optimizasyonun bir sonucu olarak, optimum bir rehabilitasyon robotu tasarımı elde etmişlerdir.

Shan Zhang ve arkadaşları [20], tekerlekli sandalyeye monte robotik manipülatörler için doğru kablo tahrikli paralel - seri (hibrit) bir bağlantı önermişlerdir. Eklem, kabloyla çalışan, sıkıştırma yayı destekli hibrit bir mekanizmadır. Ardından, eklem sertliği modelini türetmek için statik modelleme yoluyla kinematik analiz ve kablo gerginliği analizi oluşturmuşlar, son olarak, Matlab ile birlikte dört farklı yük durumunda kablo ile çalışan sertlik ayar analizini yapmışlardır. Hafif yapısı, ayarlanabilir sertlikte oluşu ve geniş çalışma alanı ile öne çıkan kablo bağlantılı hibrit mafsallı, tekerlekli sandalyeye monte robotik manipülatörler için büyük bir kullanım potansiyeli sağladığını savunmuşlardır.

Edoardo Idá ve arkadaşları [41], kendi kendini kalibre eden, sensörler aracılığıyla çalışan kablo kontrollü paralel robotun (CDPR) ilk konum tahmini problemine odaklanmışlardır. İlk konum tahmininin yalnızca ileri kinematik yoluyla gerçekleştirilemeyeceğini, mekanik denge koşullarının da dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır. İleri kinematik çözümünün kablo uzunluğu ölçümlerine dayandığına, ancak robot kendini kalibre eden sensörler ile donatılmışsa, kabloların başlangıç değerlerinin bilinmediğine dikkat çekmişlerdir. Bu noktada kablo uzunlukları ve döner makara açılarında artımlı ölçümler yapılması gerekmektedir. İlk konum tahminini, veri toplama algoritmasına göre otomatik olarak oluşturulan doğrusal olmayan en küçük kare optimizasyon problemi (NLLS) olarak formüle etmişlerdir. Ek olarak, kendi kalibrasyon prosedürünü otomatikleştirmeyi amaçlayan bir veri toplama algoritması ve bir başlangıç değer seçim prosedürü önermişler ve 3 kablolu 6 serbestlik dereceli bir robot üzerindeki simülasyon sonuçlarını paylaşmışlardır.

Fei Zhang ve arkadaşları [42], otomatik depo sistemi (AWS) için yedekli çalıştırılan kablo kontrollü paralel robotların (RA-CDPR) geometri konfigürasyonlarına ve platform parametrelerinin optimizasyonuna odaklanmışlardır. Potansiyel yapısal avantajları nedeniyle, RA-CDPR'lerin, sık otomatik geri alma / depolama işlemlerinde yüksek bir yük kütlesi ve düşük kablo gerilimi elde etmek için AWS'deki geleneksel istifleyicilerin yerini almasını önermişlerdir. RA-CDPR'lerin mobil platform parametrelerinden

minimum kablo gerilimini optimize etmek için kriter olarak belirlemişlerdir. Optimizasyon yöntemini bir 6-DOF RA-CDPR üzerinde denemişler ve optimal sonuçları statik denge koşulları altında simüle ederek uygulamışlardır. Hem simülasyon sonuçları hem de deneysel sonuçlar, optimum sonuçların faydalı yük kütlelerini önemli ölçüde artırabildiğini ve AWS'nin kablo gerilimini azaltabildiğini doğrulamıştır.

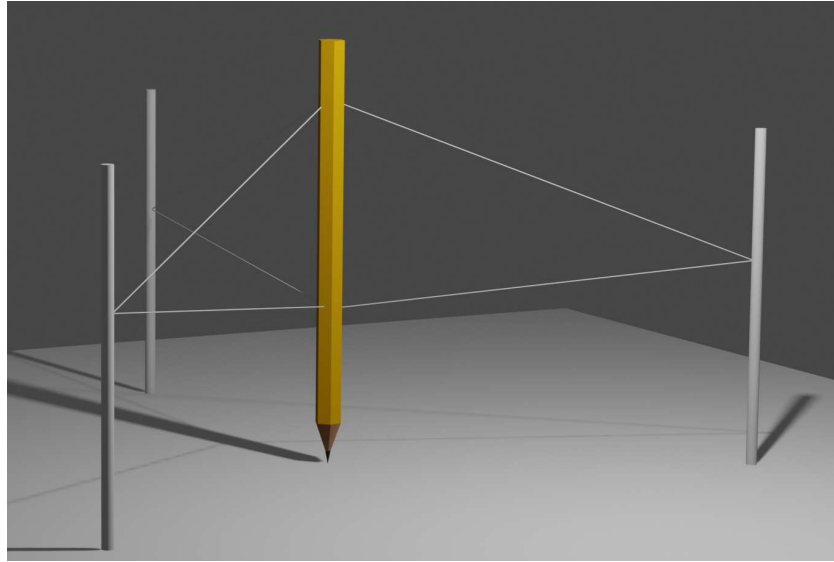
Jeffrey Hanafie ve arkadaşları [43], sadece dört kablo ile uzamsal askıya alınmış CDPR boyut optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Mobil platformun boyutunu ve mobil platforma bağlantı noktalarının konumlarını optimize etmişler, böylece mobil platformun afet alanında hızlı yaşam taraması için termal sensör taşıyabilecek şekilde gerçekleştirilmesini sağlamışlardır.

Literatürde geçen çalışmalar incelendiğinde kablo kontrollü robotların akademik çalışmalara sıklıkla konu edildiği görülmektedir. Kimi çalışmalar robot ile ilgili parametrelerin optimizasyonuna dayanırken kimi çalışmalar kablo kontrollü robotların farklı çalışma alanlarına uygulanabildiğini göstermektedir. Çalışmalar incelendiğinde, sağlık alanı başta olmak üzere, depo sistemleri, kömür gang ayırıştırma işlemleri gibi birçok farklı alanda kablo kontrollü robotlar kullanılmaktadır ve her geçen gün kullanıldıkları alanlar artmaktadır. Literatürde bulunan çalışmalar optimizasyon üzerine değinse de; hem mekanizma optimizasyonu hem uç işlevci bağlantı noktaları optimizasyonu hem de robot parametrelerinin dinamik şekilde belirlenerek giriş resmi ve köşe sayısına göre optimizasyon işleminin yapıyor olması tez çalışmasını diğer çalışmalardan ayıran nokta olmuştur.

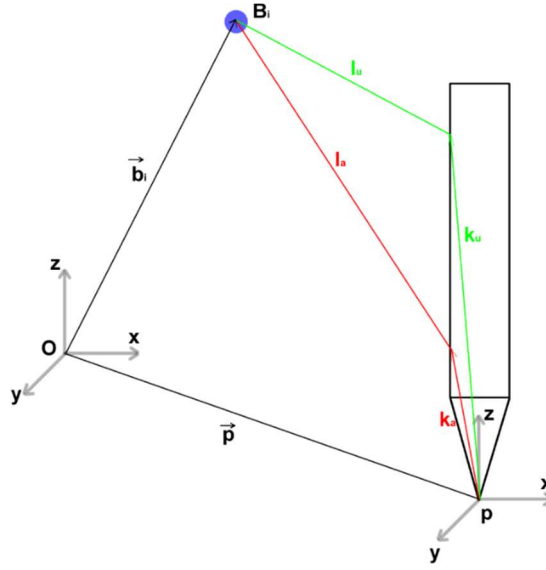
### 3. DÜZLEMSEL ÇİZİM ROBOTU VE TERS KİNEMATİK HESABI

Bu bölümde optimizasyonu gerçekleştirilen kablo kontrollü düzlemsel paralel çizim robotu tasarımı ve ters kinematik hesabı sunulmuştur. Bu tez çalışmasında konu edilen robota benzer çalışmalara literatürden iki örnek şu şekilde verilebilir. Süzen ve arkadaşlarının çalışmalarında yazı tahtası üzerine çizim yapabilecek iki kablo ile kontrol edilen bir robot tasarlamışlardır [44]. Hamori ve diğerleri ise sabit platform üzerine monte edilen ve motorlara bağlı eksenlerle kolun hareketi sonucunda çizimin gerçekleştiği bir robot tasarlanmışlardır [45]. Bu çalışmada bu mekanizmalardan farklı olarak bağlantı noktalarının değişebildiği ve yapılacak işe göre optimize edilebilen bir sistem önerilmektedir.

Aşağıda önerilen mekanizmanın iki farklı çizimi sunulmuştur. Şekil 3.1’de mekanizmanın üç adet bağlantı noktası kullanılarak elde edilen formu, Şekil 3.2’de ise kalem ve köşe bağlantılarının detayları sunulmuştur. İlk şekilde görüldüğü gibi mekanizma tam olarak yapacağı çizime uygun bir tasarımla elde edilmektedir.



Şekil 3.1. Mekanizmanın üç adet bağlantı noktası kullanılarak elde edilen formu.



Şekil 3.2. Kalem ve köşe bağlantılarının detayları.

Şekil 3.2'ye göre mekanizmanın ters kinematik denklemlerinin elde edilmesi için ilk olarak sabit platform ve kalem üzerine aynı yönelime sahip iki farklı Kartezyen koordinat sistemi yerleştirilmiştir. Ardından ters kinematik denklemler için gerekli vektörel tanımlamalar bu koordinat sistemlerine göre gerçekleştirilmiştir. Buna göre; sabit platform koordinat sistemine göre; kalemin uç noktasının koordinatları  $p$ ,  $i$ . kablo bağlantı noktası  $b_i$  ( $i=1,2,..$  bağlantı nokta sayısı) ve kalem bağlantı noktaları ise  $l_a$  ve  $l_u$  vektörleri ile ifade edilmiştir. Kalem üzerindeki bağlantı noktalarının kalem koordinat sistemine göre konumları ise  $k_u$  ve  $k_k$  vektörleri ile tanımlanmıştır. Bu tanımlara göre mekanizmanın ters kinematik denklemleri her bir bağlantı noktası ile kalem arasındaki bağ uzunluklarını verecek şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

*Üst kablo bağlantıları için;*

$$b_i + l_u = P + Rk_u \quad (3.1)$$

*Alt kablo bağlantıları için;*

$$b_i + l_a = P + Rk_a \quad (3.2)$$

Denklemlerde  $R$  matrisi, kalem koordinat sisteminin sabit koordinat sistemine göre yönelimini ifade eden  $3 \times 3$  lük yönelim matrisidir. Denklem (3.1) ve (3.2) yeniden düzenlenirse bağ uzunlukları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$l_u = \text{norm}(P + Rk_u - b_i) \quad (3.3)$$

$$l_a = \text{norm}(P + Rk_a - b_i) \quad (3.4)$$

Bu denklemlere göre üç bağlantı noktasına sahip örnek bir mekanizma tasarımı üzerinden beş farklı köşe noktası ve kalem bağlantı noktası üzerinden çalıştırıldığında girdi değerleri ve oluşan bağ uzunlukları aşağıdaki gibi bulunmuştur. Tüm deneyler için p noktası  $p =$

$[0 \ 0 \ 0]$  ve yönelim matrisi  $R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  şeklinde alınmıştır.

Üç köşe noktası üzerinden; b1, b2 ve b3 köşe noktaları ile kaleme bağlantı noktaları olan  $k_a$  ve  $k_u$  değerleri deney numaraları ile birlikte Çizelge 3.1’de, programın Çizelge 3.1’deki koordinatlara göre çalıştırılmasıyla birlikte, oluşan mekanizmanın bağ uzunlukları deney numaralarına göre Çizelge 3.2’deki gibi elde edilmiştir. Deneyler sonucunda oluşan mekanizmaların görselleri Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.1. Nokta koordinatları.

| No | b1                        | b2                       | b3                       | ka                 | ku                  |
|----|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|---------------------|
| 1  | $[-28.29 \ -154.02 \ 15]$ | $[137.73 \ 152.12 \ 15]$ | $[-73.21 \ -3.68 \ 15]$  | $[0.2 \ 0 \ 1.63]$ | $[0.2 \ 0 \ 11.84]$ |
| 2  | $[75.53 \ 97.39 \ 15]$    | $[-89.52 \ 99.21 \ 15]$  | $[31.77 \ -96.59 \ 15]$  | $[0.2 \ 0 \ 9.23]$ | $[0.2 \ 0 \ 19.13]$ |
| 3  | $[64.81 \ -80.43 \ 15]$   | $[-92.21 \ 45.46 \ 15]$  | $[44.73 \ 48.43 \ 15]$   | $[0.2 \ 0 \ 4.03]$ | $[0.2 \ 0 \ 13.50]$ |
| 4  | $[30.82 \ 70.7 \ 15]$     | $[50.85 \ -57.83 \ 15]$  | $[-45.33 \ -22.93 \ 15]$ | $[0.2 \ 0 \ 1.42]$ | $[0.2 \ 0 \ 15.05]$ |
| 5  | $[38.46 \ 76.52 \ 15]$    | $[82.94 \ -67.79 \ 15]$  | $[-48.51 \ -17.38 \ 15]$ | $[0.2 \ 0 \ 6.14]$ | $[0.2 \ 0 \ 12.17]$ |

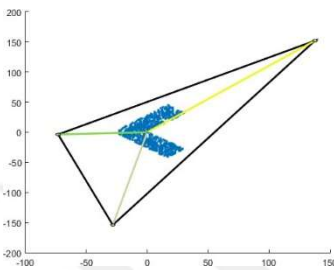
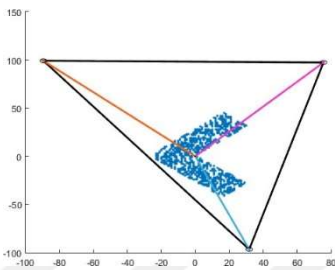
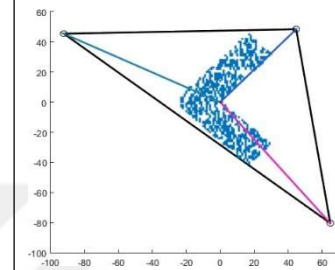
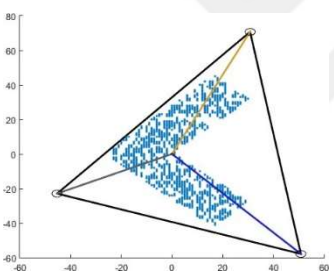
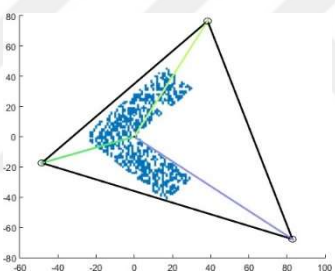
Çizelge 3.2. Oluşan bağ uzunlukları.

| No | $l_{u1}$ | $l_{a1}$ | $l_{u2}$ | $l_{a2}$ | $l_{u3}$ | $l_{a3}$ |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1  | 157.20   | 156.66   | 74.71    | 73.57    | 205.51   | 205.09   |
| 2  | 123.26   | 123.19   | 101.78   | 101.70   | 133.89   | 133.83   |
| 3  | 103.75   | 103.18   | 66.7     | 65.81    | 103.57   | 103      |
| 4  | 78.23    | 77.05    | 52.76    | 50.98    | 78.06    | 76.87    |

Çizelge 3.2. (devam) Oluşan bağ uzunlukları.

|   |       |      |       |      |        |     |
|---|-------|------|-------|------|--------|-----|
| 5 | 86.01 | 86.6 | 52.47 | 51.8 | 107.33 | 107 |
|---|-------|------|-------|------|--------|-----|

Çizelge 3.3. Mekanizma görüntüleri.

| Mekanizma Görüntüsü 1                                                              | Mekanizma Görüntüsü 2                                                              | Mekanizma Görüntüsü 3                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|   |   |  |
| Mekanizma Görüntüsü 4                                                              | Mekanizma Görüntüsü 5                                                              |                                                                                     |
|  |  |                                                                                     |

## 4. OPTİMİZASYON

Optimizasyon, belirli bir problemin çözümüne ulaşmak için var olan çözüm seçeneklerinden en uygunun seçilmesi sürecidir. En iyi ya da en uygun çözüme ulaşmak amacıyla belli parametrelere ve belli kısıtlara göre problemin çözülmesi temeline dayanır. Optimizasyon algoritmaları elektronik olarak ifade edilebilecek bilgiye dönüştürülebilen her türlü problemi çözebilecek yetenektedir. Geçmişten günümüze, karşılaşılan problemlerin çözülmesi amacıyla bir çok optimizasyon teknikleri geliştirilerek değişik alanlara uygulanmıştır [46]. Problemleri çözmek için sezgisel optimizasyon algoritmaları ve klasik çözüm yöntemleri mevcuttur. Son yıllarda özellikle doğal süreçlerden esinlenilmiş birçok optimizasyon algoritması geliştirilmiştir [47]. Bu tez çalışmasında sezgisel optimizasyon algoritmalarından genetik algoritma kullanılmıştır.

### 4.1. SEZGİSEL ALGORİTMALAR

Gerçek hayatta var olan bir problemin optimizasyon algoritmaları kullanılarak çözülmesi noktasında sezgisel algoritmalar kullanılmaktadır. Gerçek hayattaki sorun öncelikle matematiksel olarak bir modele dökülür ve algoritma oluşan bu matematiksel formülü kullanarak en iyi çözüme en kısa sürede ulaşmayı hedefler. Optimizasyon algoritmaları her zaman en optimal çözümün bulunacağını garanti etmez. Algoritmalar değerlendirilirken ne kadar kısa sürede ne kadar optimal çözüme ulaşabildiğine göre değerlendirilir ve etkililikleri bu kıstasa göre belirlenir.

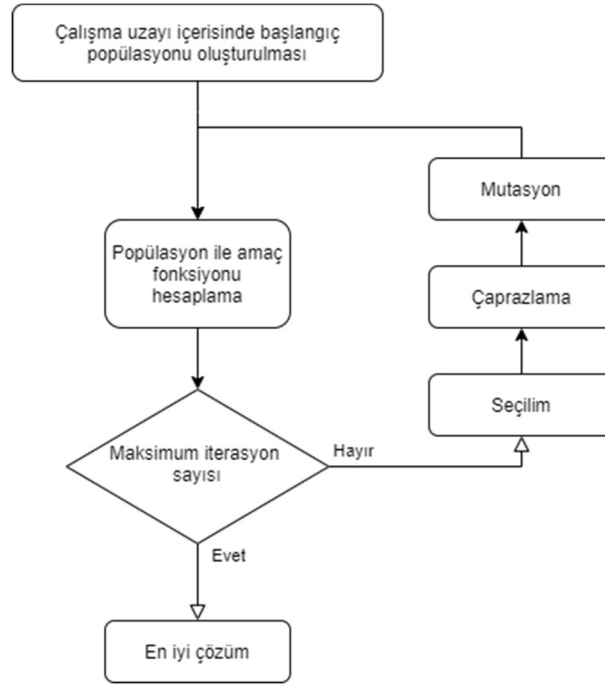
Genetik algoritma, sürü zekası, tabu araması, benzetmeli tavlama, yapay sinir ağları ve destekçi vektör makinesi algoritmaları sezgisel optimizasyon algoritmalarındandır.

### 4.2. GENETİK ALGORİTMALAR

Genetik algoritmalar, doğal seçim ilkelerine dayanan bir arama ve optimizasyon algoritmasıdır. Temel ilkeleri John Holland tarafından ortaya atılmıştır. Genetik algoritmalar kullanılarak, fonksiyon optimizasyonu, çizelgeleme, mekanik öğrenme, tasarım, hücresel üretim gibi alanlarda uygulamalar geliştirilmektedir. Olasılık kurallarına göre çalışan genetik algoritmalar, yalnızca amaç fonksiyonuna gereksinim

duyar. Çözüm uzayının tamamını değil belirli bir kısmını tarar, böylece etkin arama yaparak çok daha kısa bir sürede çözüme ulaşırlar [48]. Genetik algoritmalar doğadaki evrim fikrinden yola çıkarak üretilmiş ve iyi olanın hayatta kalması mantığı üzerine oturtulmuş programlardır [49]. Genetik algoritma çalışmaya belli kurallar ve sınırlar içerisinde üretilen başlangıç popülasyonu ile başlar. Dolayısıyla ilk aşama başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıdır. Sonra popülasyon içerisindeki üyeler amaç fonksiyonuna parametre olarak verilir. Genetik algoritma içerisinde çözüme ulaştırılması gereken problemler amaç fonksiyonun verdiği hesaplama sonuçlarına göre ya minimizasyon problemi olarak ya da maksimizasyon problemi olarak ele alınmalıdır. Tez çalışması içerisinde mekanizmanın alanı en küçük olacak şekilde bir optimizasyon yapılacağından bu tezdeki problem minimizasyon problemi olarak ele alınmıştır.

Sıralanan sonuçlara göre popülasyon içerisinde istenilen sonuca götüren bireyler seçilir. Bu seçim işlemi doğru sonuca yaklaştıran bireyleri kullanarak daha iyi bireyler üretebilmek için önemlidir. Amaç fonksiyon sonucunda sıralama işlemi ardından seçilen bireyler kendi aralarında çaprazlanarak farklı bireylerden farklı özellikleri almış yeni bireyler oluşturulur. Yeni üretilen bireyler, popülasyonu devam ettirecek özellikte ve farklılıkta olmama ihtimallerinden dolayı mutasyon işlemine tabi tutulurlar. Mutasyon sonucunda oluşan yeni popülasyon tekrar amaç fonksiyona gönderilir ve belirlenen jenerasyon sayısı kadar bu süreç tekrar ettirilir. Her jenerasyonda hep en iyiler seçilip o bireylerden yeni bireyler üretildiği için belirlenen jenerasyon sayısı kadar çalışıldığında optimal çözüme ulaşılması beklenmektedir. Genetik algoritmanın çalışmasına yönelik akış diyagramı Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Genetik algoritma akış diyagramı.

#### 4.2.1. Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması

Genetik algoritma içerisinde popülasyonda olması istenilen jenerasyon sayısı belirlenir. Üretilcek ve hesaba katılacak her birey için değer aralığı belirlenmesi önemlidir. Bireyler belirlenen aralıklarda olacak şekilde üretilir. Genetik algoritma, çözüm olduğu varsayılan rassal üretilmiş değerlerle global çözümü aramaya başlar. Ancak başlangıç popülasyonu olarak üretilen bu rassal değerlerin hepsi birbirinin aynı olabilir, birbirine çok yakın yerlerde kümelenmiş olabilir ve bu kümelenen yerler global çözümden çok uzakta olabileceği gibi lokal çözümlere yakın olabilir [50]. Bu yüzden başlangıç popülasyonu belirlenen aralıkta rastgele üretilen değerlerden oluşmaktadır ve algoritmanın başarılı şekilde optimum sonuca ulaşip ulaşmamasında belirleyici olabilmektedir.

#### 4.2.2. Seçilim

Her jenerasyon içerisinde üretilen bireyler ve yeni üretilecek bireyler belirli şartlara uygun şekilde üretilmelidir. Her bir jenerasyonda hangi bireylerin popülasyondan çıkarılıp hangi bireylerin yola devam edeceğinin kararının verilebilmesi için iyi olan elemanın hangisi olduğuna genetik algoritmanın karar verebilmesi gerekmektedir. Bu yüzden algoritma içerisinde uygunluk fonksiyonu olarak da adlandırılan amaç fonksiyonu oluşturulmalıdır. Var olan bir problem matematiksel ifade edilebildiği, değişkenlerin ve

aralıkların belirlenebildiği ve çalışma uzayı sınırlarına karar verilebildiği sürece genetik algoritma sayesinde çözüme ulaşılabilir [48].

#### **4.2.3. Çaprazlama**

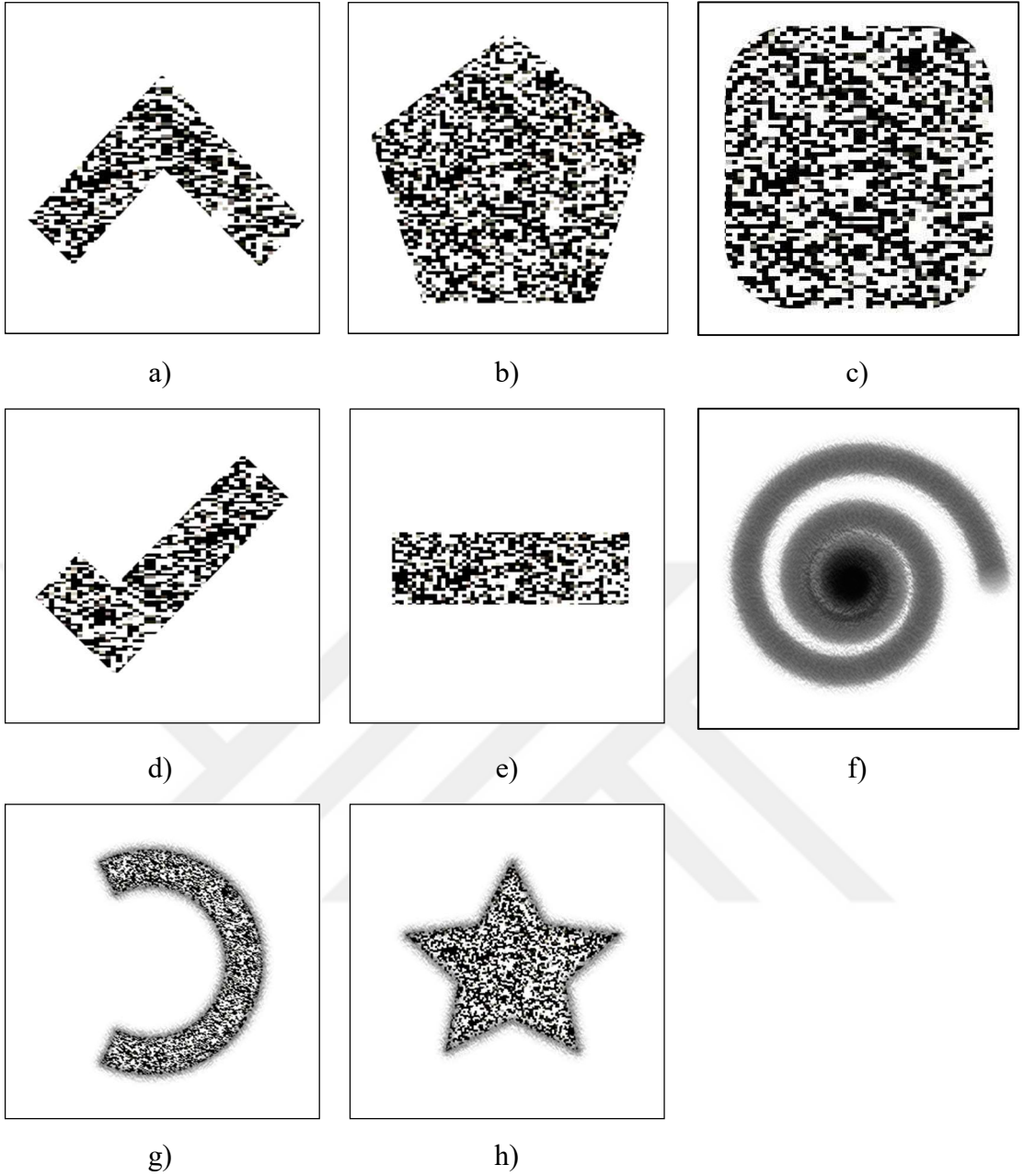
Çaprazlama genetik algoritma içinde yeni birey üretme aşamasında birden fazla bireyin farklı özelliklerinin çaprazlanması sonucu yeni birey üretme aşamasıdır. Çaprazlama işleminde amaç genleri iyi olan bireylerin iyi genlerinin yeni nesillere aktarılmasıdır. Genlerin seçimi ve hangi genlerle çaprazlanacağı noktasında kullanılan farklı çaprazlama teknikleri mevcuttur. Bunlardan bazıları; tek noktalı çaprazlama, iki noktalı çaprazlama, düzenli çaprazlama, pozisyona dayalı çaprazlama, sıraya dayalı çaprazlama, sıralı çaprazlama ve doğrusal sıralı çaprazlamadır [51].

#### **4.2.4. Mutasyon**

Çaprazlama işlemi sonucunda oluşan bireyler benzerlik gösterebilir ve kendilerine özel bir dizilişe sahip olmayabilir. Bu gibi benzer özellik taşıyan bireylerin birbirinden farklılaştırılması noktasında mutasyon işlemi kullanılmaktadır. Kısaca mutasyon, bir geni ortaya çıkaran kromozomların değişmesidir. Genetik algoritmalarda bir genin kromozomların genetik çeşitliliğini korumak için kullanılır. [52]

### **4.3. ÖNERİLEN GEOMETRİK OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI VE AMAÇ FONKSİYON TANIMI**

Bu bölümde, seçilen düzlemsel çizim robotunun geometrik optimizasyonu için önerilen amaç fonksiyon tanımlanmıştır. Ayrıca optimizasyon aracı olarak kullanılan Genetik Algoritma kısaca tanıtılmış ve sistemin genel bir akış diyagramı verilmiştir. Gerçekleştirilen geometrik optimizasyonda hedef en kısa kablo uzunluklarını elde etmektir. Bunun için mekanizmanın hem verilen çizimi istenilen köşe sayısına sahip bir robot ile gerçekleştirebilecek hem de önceden belirlenmiş kısıtlara uyacak şekilde optimize edilmesi gerekir. Buna göre çizim robotu için kısıtlar, seçilen resmin boyutları ve köşe sayılarıdır. Buna göre bu çalışmada seçilen resimler Şekil 4.2’de verilmiştir. Köşe sayıları ise kullanıcı tarafından belirlenmektedir.



Şekil 4.2. Bu çalışmada kullanılan örnek resimler a) Üçgen b) Beşgen c) Dörtgen d) Tik e) Tire f) Spiral g) Yarım Daire h) Yıldız.

Yapılacak geometrik optimizasyonun kısıtları kullanıcının verdiği köşe nokta sayıları ve seçilen şekil ile belirlenen alandır. Amaç seçilen şekli çizebilecek ve belirlenen köşe bağlantı noktası sayısına sahip mekanizmayı en kısa bağ uzunlukları ile tasarlamaktır. Bu kısıtlar ve ikinci bölümde sunulan ters kinematik denklemler kullanılarak amaç fonksiyon aşağıdaki gibi tanımlanabilir. Tanımlanan amaç fonksiyon alt ve üst bağ uzunlukları için ayrı ayrı formüle edilmektedir.

$$A = \text{norm}(P + Rk_{ki} - B_i) \quad (4.1)$$

$$A = \text{norm}(P + Rk_{ui} - B_i) \quad (4.2)$$

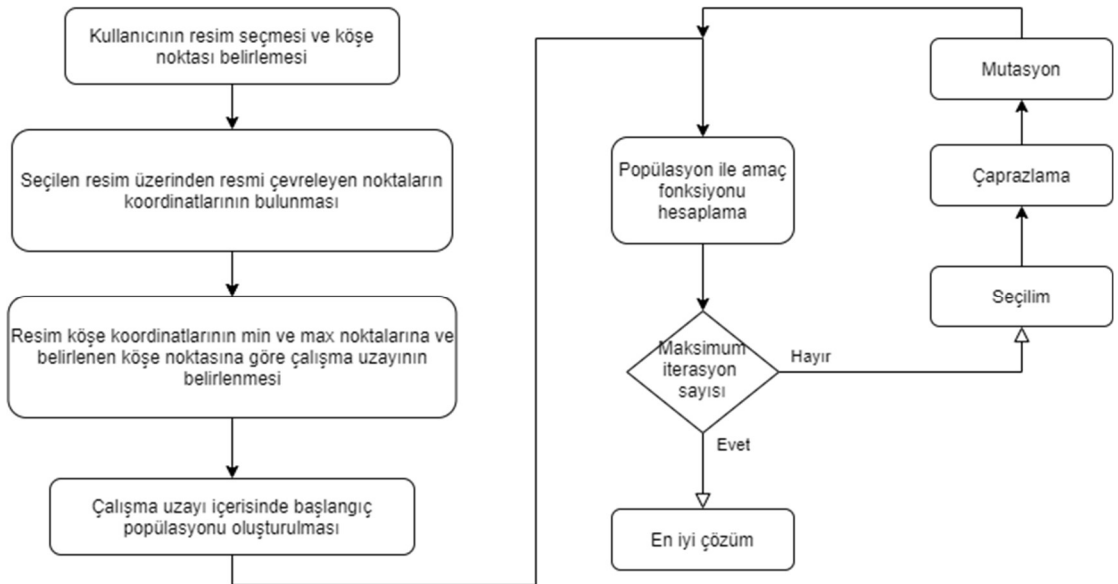
Denklemden A amaç fonksiyon, *norm* ise vektör uzunluğunu veren fonksiyondur. Ayrıca optimizasyonda  $k_k = [0.2 \ 0 \ x_k]$  ve  $k_u = [0.4 \ 0 \ x_u]$  olarak alınmıştır. Bu ifadelerdeki  $x_k$  ve  $x_u$  değerleri mekanizmanın optimize edilecek kalem bağlantı noktalarının z koordinatlarıdır.

Mekanizmanın optimizasyonu için tasarlanan sistemde kullanıcı tarafından resim ve bağlantı nokta sayısı girildikten sonra ilk olarak seçilen resim 100x100 piksel olacak şekilde yeniden boyutlandırılmış daha sonra çizilmesi istenilen noktaların çıkarılabilmesi için siyah beyaz resme çevrilmiş ve siyah olan piksel değerleri çizilecek olan noktalar olarak okunmuştur. Optimize edilmek istenilen robot mekanizması resmin dış noktalarını çizemediği sürece resim üzerindeki tüm noktaları çizilebileceğinden; sadece resmin dış çerçevesine bakılması algoritmanın çalışma süresini kısıltacaktır. Bu nedenle resim üzerindeki çizilmesi istenilen siyah noktalar MATLAB yazılımının *convhull* fonksiyonu yardımıyla sadece dış noktalar dikkate alınacak şekilde yeniden hesaplanmıştır. Resim 100x100 piksele çevrilmiş olsa da, *convhull* fonksiyonu çalıştırıldıktan sonra elde edilen noktalar çizilecek resmin gerçek noktalarını verdiğinden, çalışma uzayı elde edilen çerçeve noktaların minimum ve maksimum değerlerine göre dinamik bir şekilde belirlenmiştir. Ayrıca hesaplamalarda kullanılması için kalem uzunluğu 20 cm olarak girilmiştir. Aynı zamanda köşe noktalarına ek olarak kabloların kaleme bağlanacağı noktalar da optimize edilmektedir. Bunun için, kalemin 20 cm olarak dikkate alınan boyunda ilk 10 cm içerisinde rastgele bir nokta, 10-20 cm arasındaki kısımda ise başka bir rastgele nokta belirlenecek şekilde kalem bağlantı noktaları üretilmektedir. Üretilen bu noktalar da amaç fonksiyonunda kullanılmakta, en düşük bağ uzunluğuna götüren kalem bağlantı noktaları dikkate alınarak yeni kalem bağlantı noktaları üretilmektedir. Dolayısıyla optimizasyon problemi içerisinde hem köşe noktaları hem kalem bağlantı noktaları optimize edilmektedir. Bu tanımlamalara göre amaç fonksiyon ve kısıtlar birlikte Denklem (4.3)'teki gibi ifade edilebilir.

$$A = \begin{cases} \min(\text{norm}(P + Rk_{ki} - B_i)) \\ \min(\text{norm}(P + Rk_{ui} - B_i)) \\ 0 < x_k < 10 \\ 10 < x_u < 20 \\ \min_u < P_x, P_y, P_z < \max_u \end{cases} \quad (4.3)$$

Denklem (4.3)'te,  $P_x, P_y$  ve  $P_z$  uç işlevci noktasının Kartezyen koordinat sistemindeki konumunu,  $\min_u$  ve  $\max_u$  ise resim üzerinden elde edilen çalışma uzayı sınırlarının her bir eksenindeki minimum ve maximum değerlerini ifade etmektedir.

Bu çalışmada önerilen geometrik optimizasyon işlemi için GA kullanılmıştır. Genetik algoritma kullanılarak yapılan optimizasyonda, ilk olarak, okunan resim sonucu oluşan çalışma uzayı içerisinde 100 popülasyonlu rastgele köşe noktaları belirlenmektedir. Oluşan noktalar amaç fonksiyona gönderilerek mekanizmanın bağ uzunlukları hesaplatılmaktadır. Ardından, hesaplama sonucu elde edilen bağ uzunlukları minimizasyon problemi olarak ele alınarak en düşük bağ uzunluğunu veren köşe noktalarından yeni bireyler üretilmektedir. Yeni jenerasyonun daha kısa bağ uzunluğu verecek şekilde üretilmesi sağlanmaktadır. Buna göre önerilen optimizasyon sürecinin akış diyagramı aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.3. Önerilen geometrik optimizasyon işlemi akış diyagramı.

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde önerilen sistem kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sunulmuştur. Optimizasyon uygulaması geliştirilme aşamasında MATLAB programı kullanılmıştır. Kullanıcının resim seçmesi ve köşe noktası sayısı belirlemesi için bir ara yüz oluşturulmuştur. Oluşturulan ara yüz Şekil 5.1’de görülmektedir.



Şekil 5.1. Önerilen geometrik optimizasyon ara yüzü.

Şekil 5.1 yardımıyla kullanıcıdan resim dosyası seçmesi ve köşe noktası sayısı girmesi sağlanmaktadır. Kullanıcın “BAŞLA” butonuna basmasıyla optimizasyon işlemi başlamaktadır. Bu çalışmada geliştirilen sistemin test edilmesi için 8 farklı resim ve 5’er farklı köşe noktası sayısı belirlenmiştir, bu şekilde toplam 40 adet optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve sonuçları sunulmuştur. Optimizasyon işleminde kullanılan örnek resimler Şekil 4.2’de verilmiştir. Geliştirilen sistem ile yapılan toplam kırk optimizasyon işlemi aşağıda sunulmuştur.

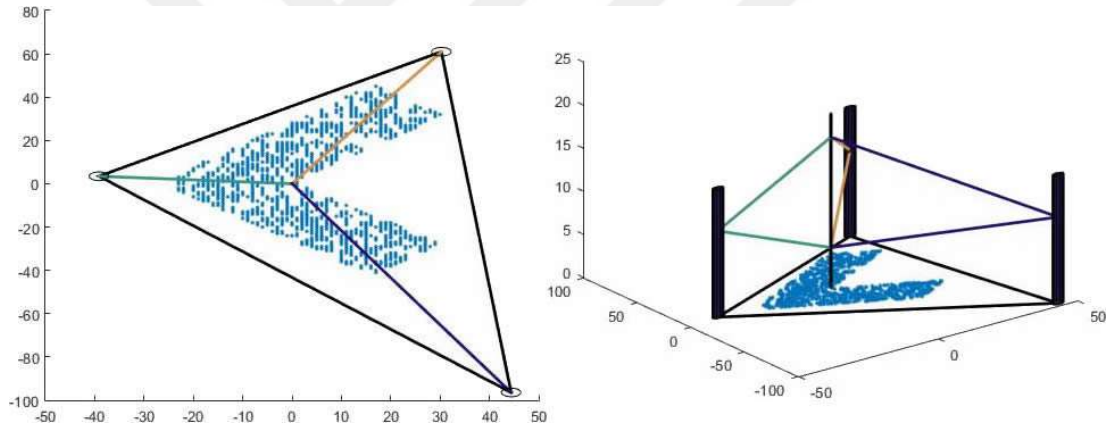
### 5.1. OPTİMİZASYON 1: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN ÜÇGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISI 3 OLARAK SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Algoritma ara yüzü üzerinden Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi seçilerek ve köşe noktası sayısı 3 girilerek algoritma çalıştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilen köşe noktalarının koordinatları, kaleme bağlantı noktalarının ( $k_u$  ve  $k_a$ ) koordinatları, kablo uzunlukları ve oluşan mekanizmanın alanı Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar.

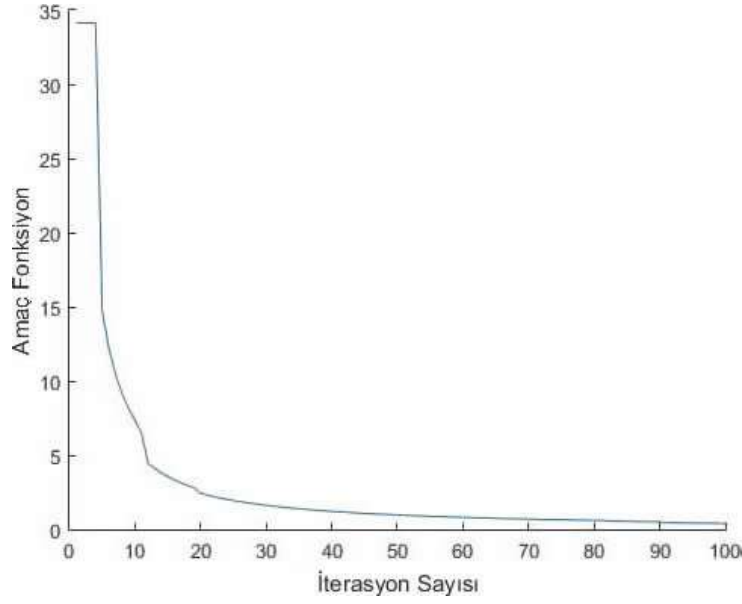
|                              |                                                                                                                       |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [44.41 \quad -96.40 \quad 15]$<br>$b_2 = [30.27 \quad 60.97 \quad 15]$<br>$b_3 = [-39.15 \quad 3.48 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 4.84]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 17.66]$                                                 |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.396                                                                                                                 |
| Mekanizmanın alanı           | 5868                                                                                                                  |

Çizelge 5.1’deki veriler incelendiğinde kablo uzunluklarının 0.396 birim ve mekanizma alanı 5868 birim-kare olacak şekilde hesaplanmıştır. Bu veriler ile elde edilen mekanizmanın üstten ve yandan görünümü ise Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

Şekil 5.2’ye bakıldığında önerilen yöntemin 3 tane bağlantı noktası için optimum sonucu elde ettiği görülebilmektedir. Bunu göstermek için ayrıca algoritmanın iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği de incelenebilir. Bu grafik Şekil 5.3’te verilmiştir.



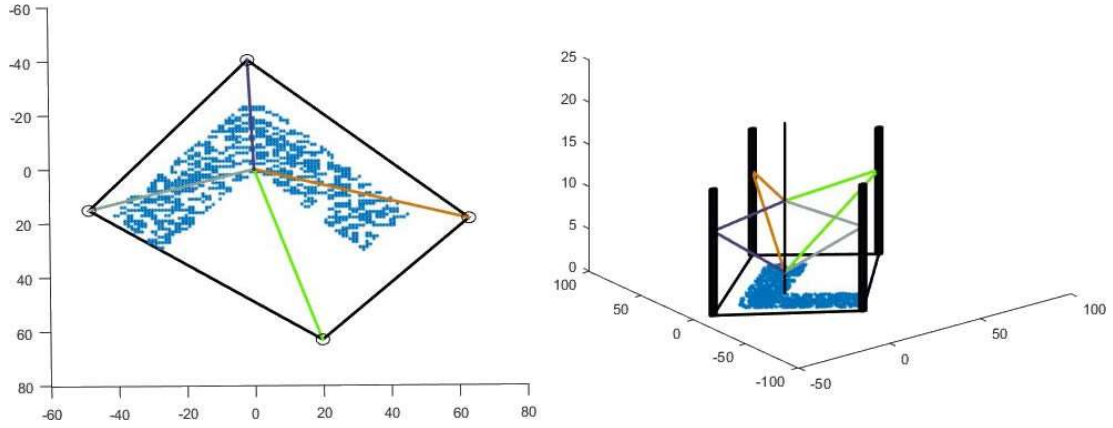
Şekil 5.3. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

Çizelge 5.1’de verilen bilgiler ile Şekil 5.3 incelendiğinde genetik algoritmanın başarılı şekilde çalıştığı ve verilen girdilere göre mekanizmayı optimize ettiği görülmektedir. Diğer on dört optimizasyon işlemi için aşağıda sadece giriş değişkenleri ve elde edilen sonuçlar tablo ve grafiklerle sunulmuştur. Değerlendirme ise tüm sonuçlara göre tüm optimizasyon işlemlerinden sonra yapılmıştır.

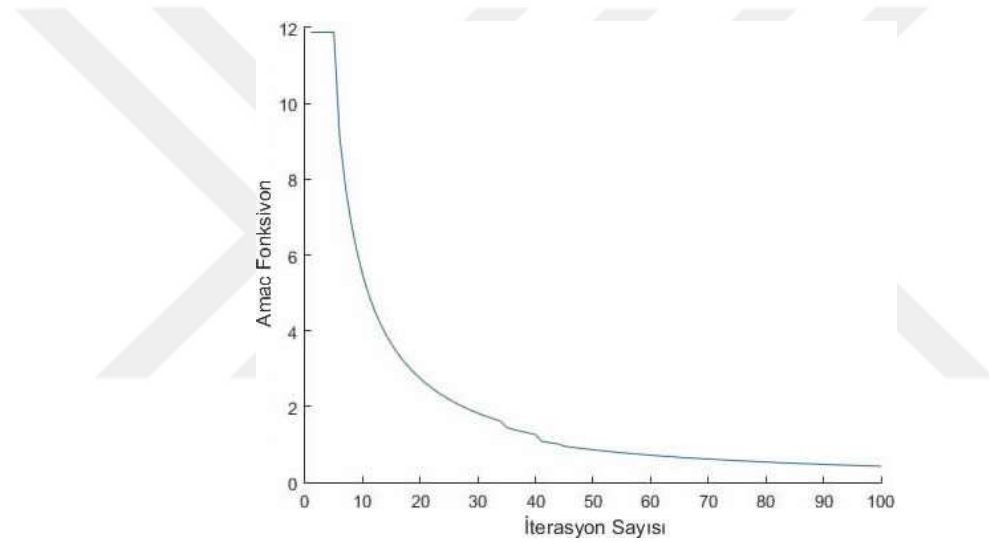
## 5.2. OPTİMİZASYON 2: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN ÜÇGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISI 4 OLARAK SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.2. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                   |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 63.24 \quad 19.72 \quad 15]$<br>$b_2 = [ 18.39 \quad 62.98 \quad 15]$<br>$b_3 = [-15.06 \quad -48.61 \quad 15]$<br>$b_4 = [-40.40 \quad -1.66 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 2.69]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 11.13]$                                                                                             |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.424                                                                                                                                                             |
| Mekanizmanın alanı           | 5745                                                                                                                                                              |



Şekil 5.4. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.



Şekil 5.5. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

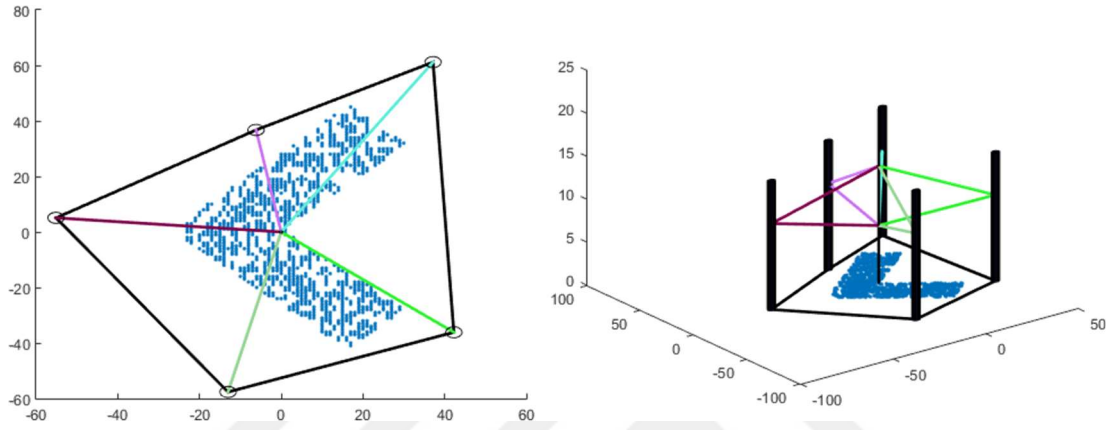
### 5.3. OPTİMİZASYON 3: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN ÜÇGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISI 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.3. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar.

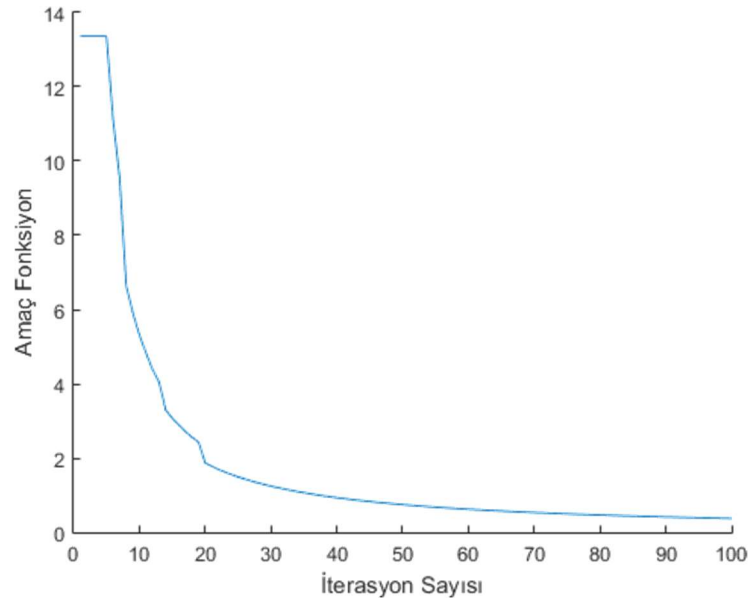
|                              |                                        |
|------------------------------|----------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [-55.11 \quad 5.09 \quad 15]$   |
|                              | $b_2 = [42.26 \quad -26.12 \quad 15]$  |
|                              | $b_3 = [-13.03 \quad -57.65 \quad 15]$ |
|                              | $b_4 = [37.16 \quad 61.18 \quad 15]$   |
|                              | $b_5 = [-6.17 \quad 36.75 \quad 15]$   |

Çizelge 5.3. (devam) Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 5 köşe noktası için oluşan sonuçlar.

|                          |                                                       |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| Kalem bağlantı noktaları | $k_a = [0.2 \ 0 \ 6.84]$<br>$k_u = [0.2 \ 0 \ 13.78]$ |
| Oluşan kablo uzunlukları | 0.373                                                 |
| Mekanizmanın alanı       | 6907                                                  |



Şekil 5.6. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

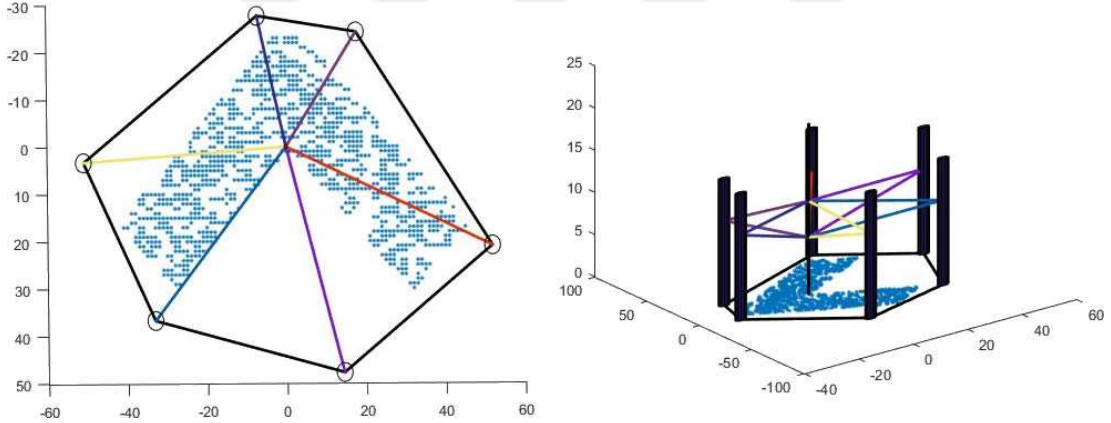


Şekil 5.7. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

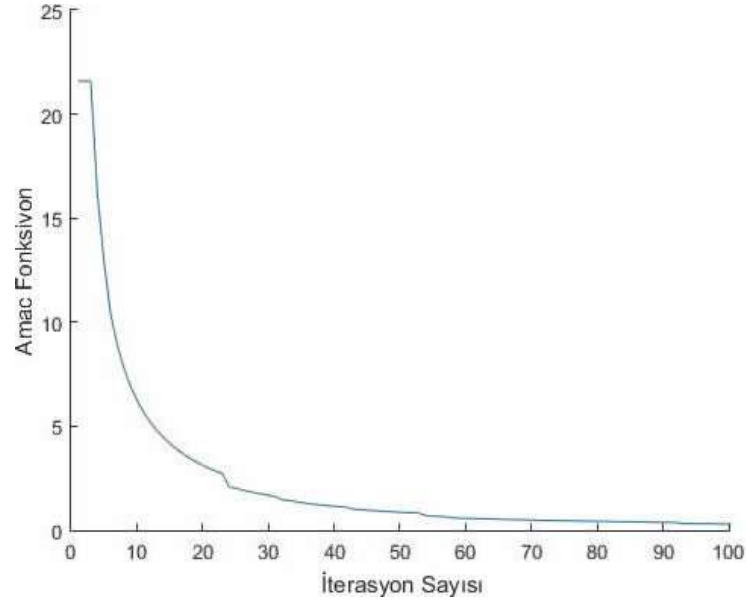
#### 5.4. OPTİMİZASYON 4: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN ÜÇGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISI 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.4. Şekil 4.2'de verilen üçgen resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [20.97 \quad 51.79 \quad 15]$<br>$b_2 = [36.71 \quad -33.14 \quad 15]$<br>$b_3 = [47.77 \quad 14.34 \quad 15]$<br>$b_4 = [-24.27 \quad 17.80 \quad 15]$<br>$b_5 = [3.25 \quad -51.00 \quad 15]$<br>$b_6 = [-27.70 \quad -7.07 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 6.93]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 11.22]$                                                                                                                                                                           |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.299                                                                                                                                                                                                                                           |
| Mekanizmanın alanı           | 4888                                                                                                                                                                                                                                            |



Şekil 5.8. Şekil 4.2'de verilen üçgen resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

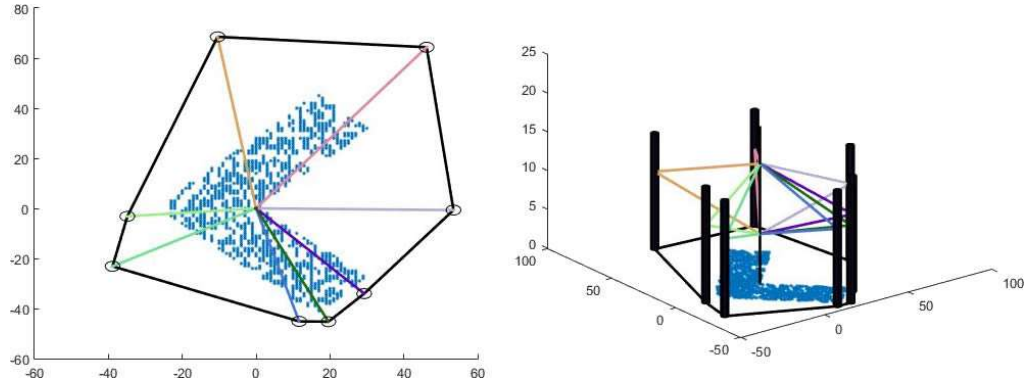


Şekil 5.9. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

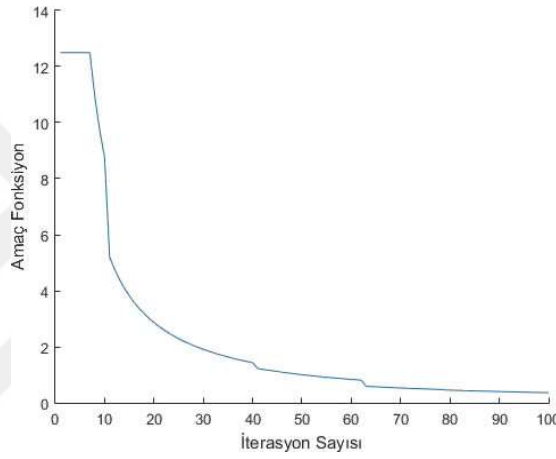
#### 5.5. OPTİMİZASYON 5: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN ÜÇGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISI 8 OLARAK SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.5. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 11.66 \quad -45.15 \quad 15]$<br>$b_2 = [ 29.27 \quad -34.06 \quad 15]$<br>$b_3 = [-38.87 \quad -23.13 \quad 15]$<br>$b_4 = [ 46.17 \quad 64.36 \quad 15]$<br>$b_5 = [ 19.59 \quad -45.28 \quad 15]$<br>$b_6 = [ 53.45 \quad -0.69 \quad 15]$<br>$b_7 = [-10.41 \quad 68.52 \quad 15]$<br>$b_8 = [-34.85 \quad -3.19 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 6.57]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 15.64]$                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.361                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Mekanizmanın alanı           | 7624                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |



Şekil 5.10. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

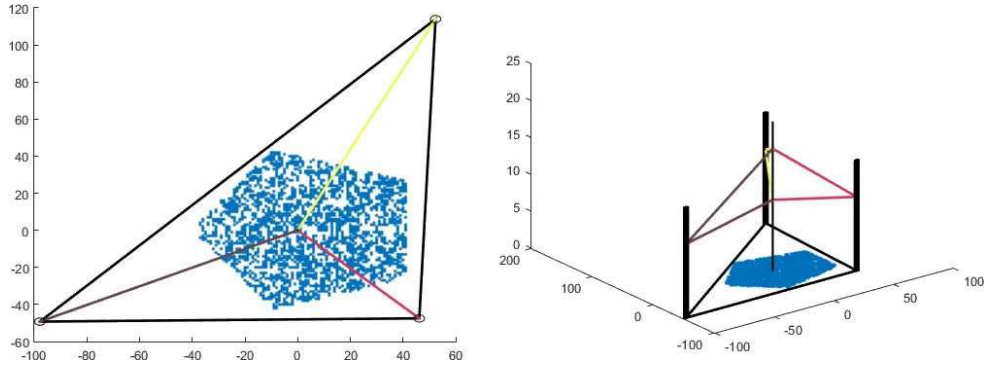


Şekil 5.11. Şekil 4.2’de verilen üçgen resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

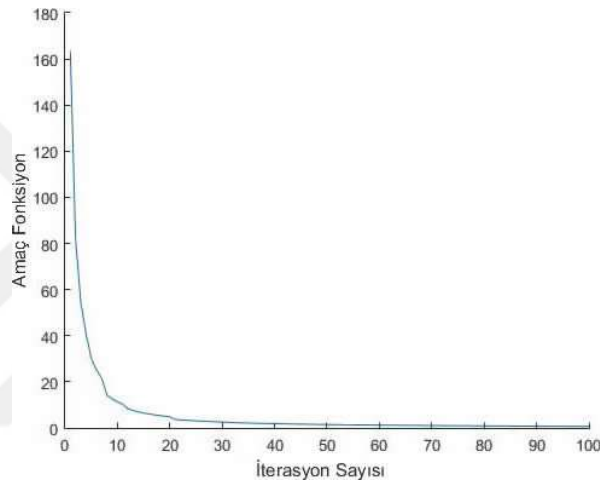
## 5.6. OPTİMİZASYON 6: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN BEŞGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 3 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.6. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                            |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 52.35 \quad 113.99 \quad 15]$<br>$b_2 = [-97.87 \quad -49.26 \quad 15]$<br>$b_3 = [ 46.18 \quad -47.51 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 9.81]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 16.76]$                                                      |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.661                                                                                                                      |
| Mekanizmanın alanı           | 11627                                                                                                                      |



Şekil 5.12. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.



Şekil 5.13. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

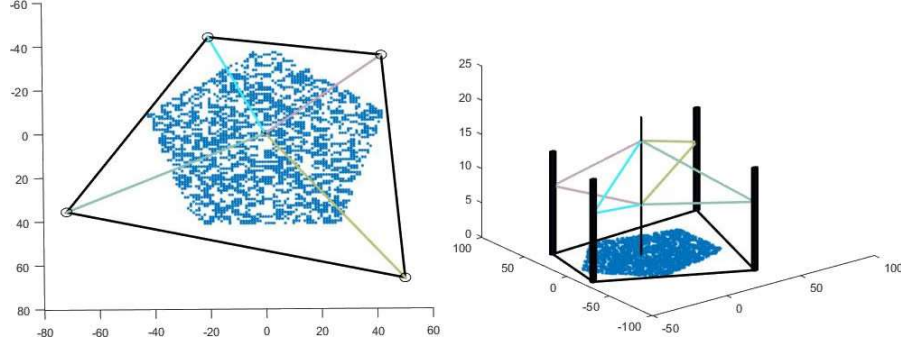
## 5.7. OPTİMİZASYON 7: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN BEŞGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 4 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.7. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar.

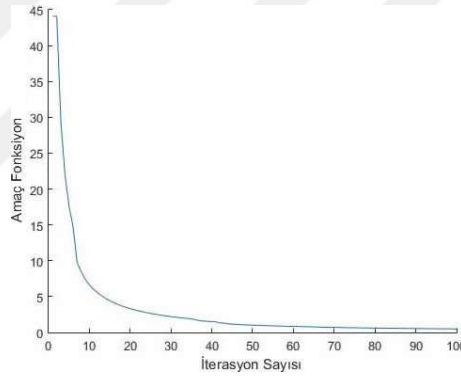
|                              |                                                                                                                                                                  |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [-35.64 \quad 42.07 \quad 15]$<br>$b_2 = [35.53 \quad -71.82 \quad 15]$<br>$b_3 = [66.25 \quad 49.96 \quad 15]$<br>$b_4 = [-44.14 \quad -20.24 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 7.57]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 16.91]$                                                                                            |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.493                                                                                                                                                            |

Çizelge 5.7. (devam) Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 4 köşe noktası için oluşan sonuçlar.

|                    |      |
|--------------------|------|
| Mekanizmanın alanı | 8784 |
|--------------------|------|



Şekil 5.14. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.



Şekil 5.15. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

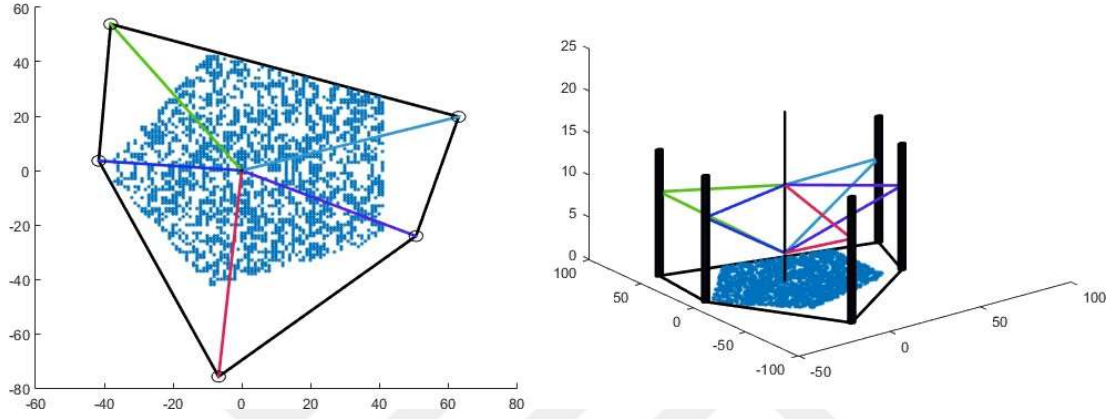
## 5.8. OPTİMİZASYON 8: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN BEŞGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.8. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar.

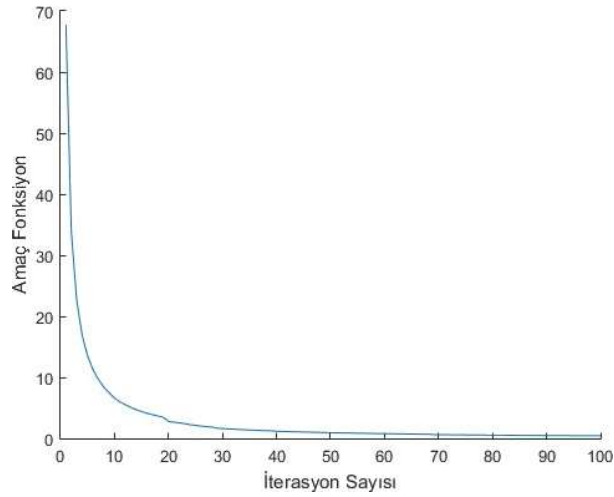
|                              |                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 63.16 \quad 19.77 \quad 15]$<br>$b_2 = [ -6.72 \quad -75.84 \quad 15]$<br>$b_3 = [ 50.75 \quad -14.13 \quad 15]$<br>$b_4 = [-38.12 \quad 53.88 \quad 15]$<br>$b_5 = [-41.61 \quad 3.55 \quad 15]$ |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Çizelge 5.8. (devam) Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 5 köşe noktası için oluşan sonuçlar.

|                          |                                                       |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| Kalem bağlantı noktaları | $k_a = [0.2 \ 0 \ 3.56]$<br>$k_u = [0.2 \ 0 \ 11.67]$ |
| Oluşan kablo uzunlukları | 0.421                                                 |
| Mekanizmanın alanı       | 7991                                                  |



Şekil 5.16. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

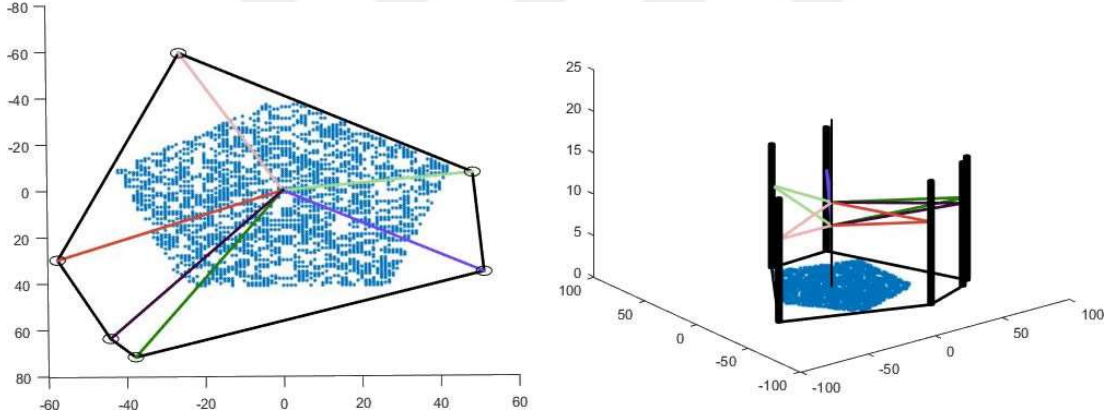


Şekil 5.17. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

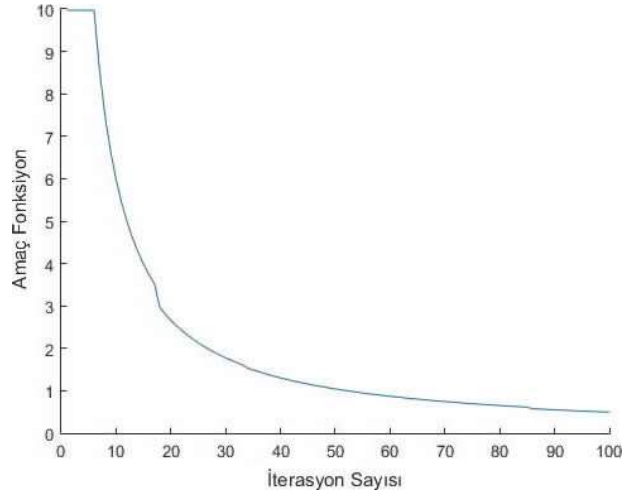
## 5.9. OPTİMİZASYON 9: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN BEŞGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.9. Şekil 4.2'de verilen beşgen resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 37.92 \quad -38.63 \quad 15]$<br>$b_2 = [ -7.96 \quad 56.43 \quad 15]$<br>$b_3 = [ 47.44 \quad 38.19 \quad 15]$<br>$b_4 = [-45.97 \quad -49.74 \quad 15]$<br>$b_5 = [ 65.08 \quad 1.65 \quad 15]$<br>$b_6 = [-36.39 \quad 15.44 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 8.21]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 11.35]$                                                                                                                                                                               |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.403                                                                                                                                                                                                                                               |
| Mekanizmanın alanı           | 8038                                                                                                                                                                                                                                                |



Şekil 5.18. Şekil 4.2'de verilen beşgen resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

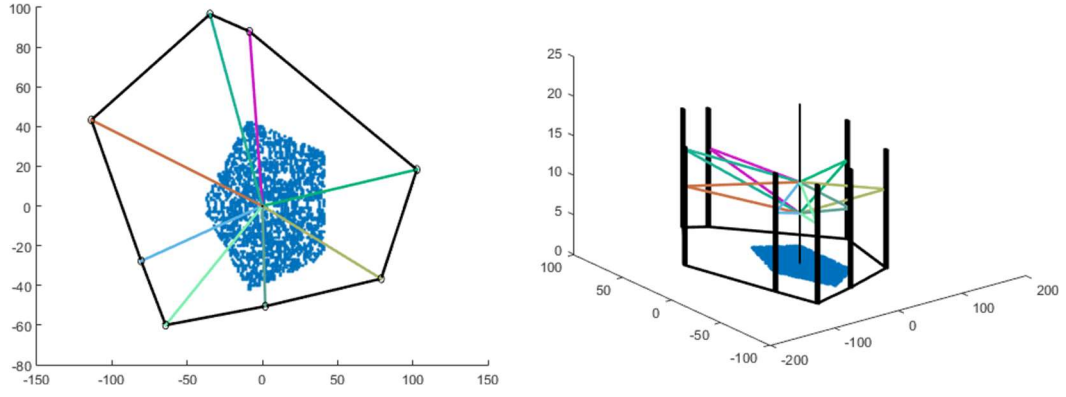


Şekil 5.19. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

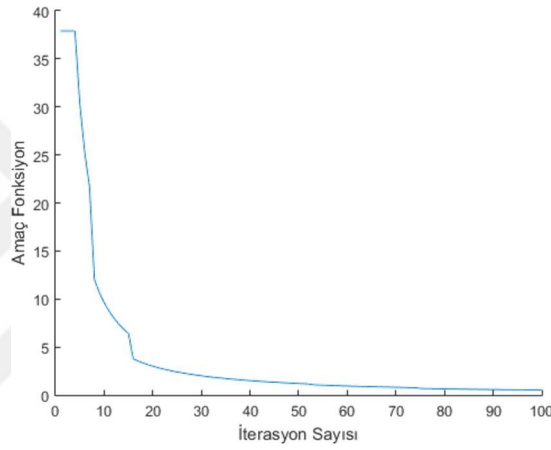
#### 5.10. OPTİMİZASYON 10: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN BEŞGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 8 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.10. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 79.01 \quad -36.66 \quad 15]$<br>$b_2 = [ -34.82 \quad 96.65 \quad 15]$<br>$b_3 = [ -64.31 \quad -60.01 \quad 15]$<br>$b_4 = [ 102.76 \quad 18.34 \quad 15]$<br>$b_5 = [ -113.72 \quad 43.33 \quad 15]$<br>$b_6 = [ -8.50 \quad 87.90 \quad 15]$<br>$b_7 = [ -80.61 \quad -27.74 \quad 15]$<br>$b_8 = [ 1.95 \quad -50.54 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 5.56]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 10.5]$                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.512                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Mekanizmanın alanı           | 21558                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |



Şekil 5.20. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

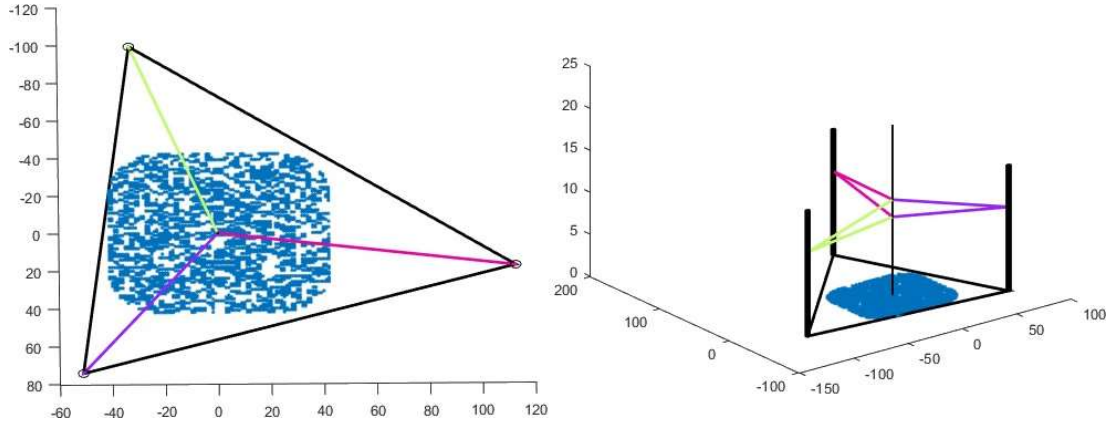


Şekil 5.21. Şekil 4.2’de verilen beşgen resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

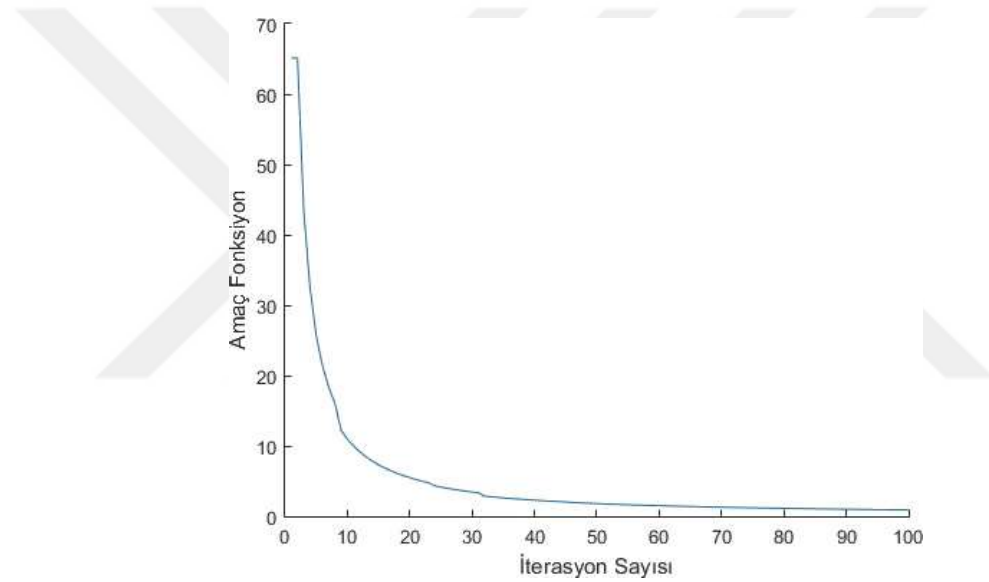
### 5.11. OPTİMİZASYON 11: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN DÖRTGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 3 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.11. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                            |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 17.55 \quad 112.64 \quad 15]$<br>$b_2 = [-99.32 \quad -33.04 \quad 15]$<br>$b_3 = [ 74.15 \quad -51.25 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 9.46]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 11.52]$                                                      |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.900                                                                                                                      |
| Mekanizmanın alanı           | 13699                                                                                                                      |



Şekil 5.22. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.



Şekil 5.23. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

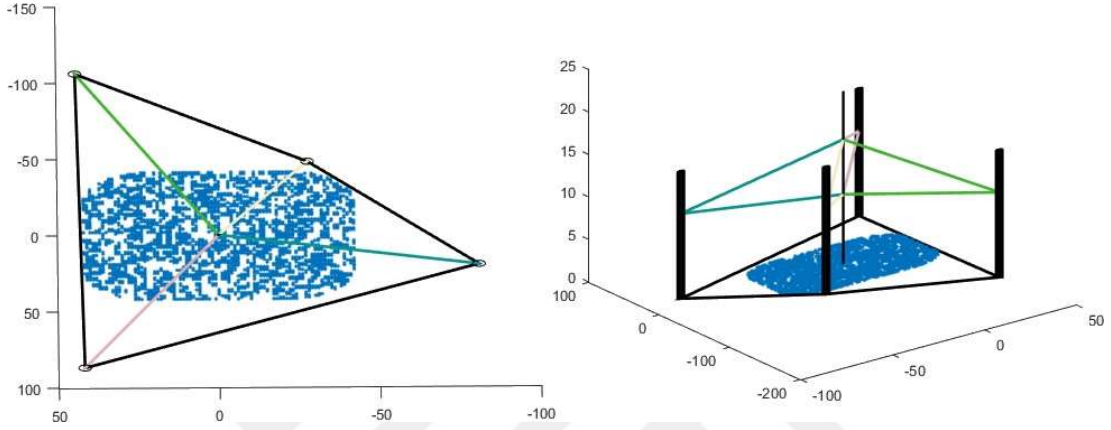
## 5.12. OPTİMİZASYON 12: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN DÖRTGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 4 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.12. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar.

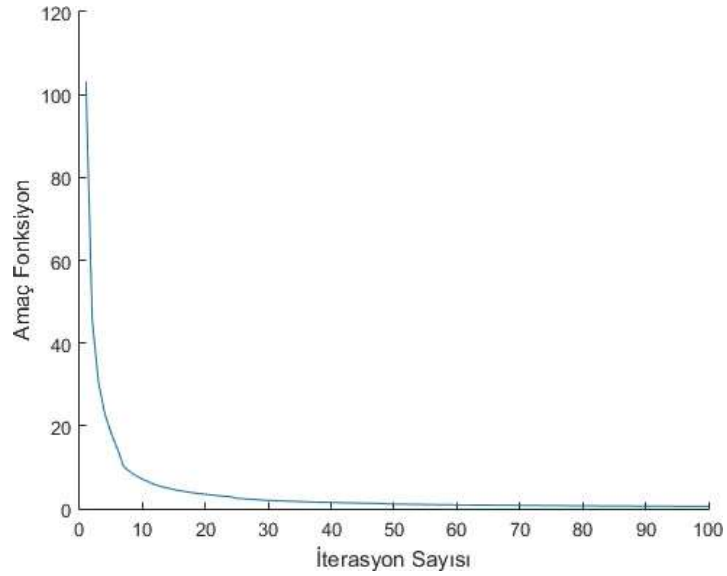
|                              |                                         |
|------------------------------|-----------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 44.26 \quad -106.11 \quad 15]$ |
|                              | $b_2 = [ 41.92 \quad 86.75 \quad 15]$   |
|                              | $b_3 = [-80.84 \quad 19.85 \quad 15]$   |
|                              | $b_4 = [-27.73 \quad -47.91 \quad 15]$  |

Çizelge 5.12. (devam) Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 4 köşe noktası için oluşan sonuçlar.

|                          |                                                       |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| Kalem bağlantı noktaları | $k_a = [0.2 \ 0 \ 8.30]$<br>$k_u = [0.2 \ 0 \ 14.76]$ |
| Oluşan kablo uzunlukları | 0.559                                                 |
| Mekanizmanın alanı       | 12809                                                 |



Şekil 5.24. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

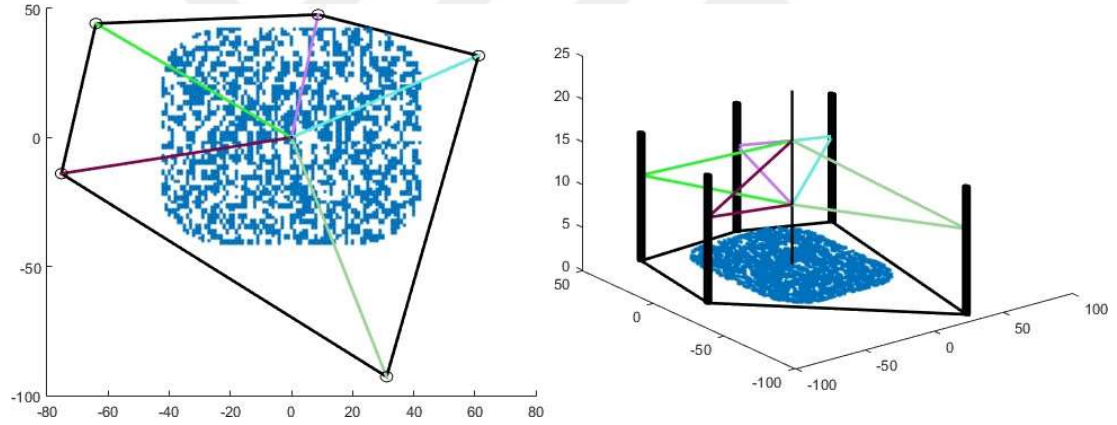


Şekil 5.25. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

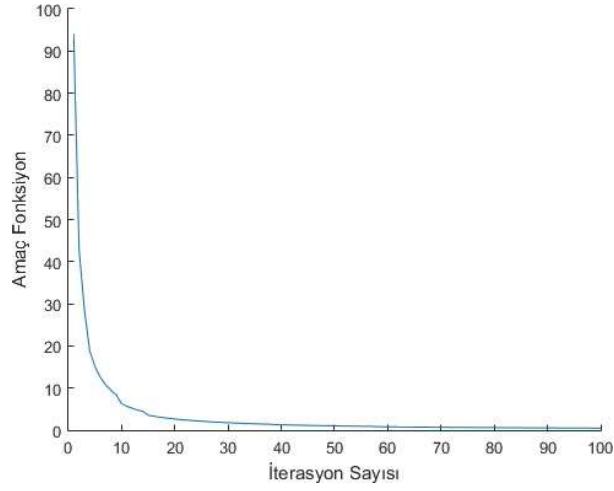
### 5.13. OPTİMİZASYON 13: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN DÖRTGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.13. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [-75.29 \quad -13.98 \quad 15]$<br>$b_2 = [-63.98 \quad 44.19 \quad 15]$<br>$b_3 = [31.14 \quad -92.70 \quad 15]$<br>$b_4 = [61.25 \quad 31.69 \quad 15]$<br>$b_5 = [8.74 \quad 47.65 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 7.13]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 14.60]$                                                                                                                                   |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.484                                                                                                                                                                                                   |
| Mekanizmanın alanı           | 12188                                                                                                                                                                                                   |



Şekil 5.26. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

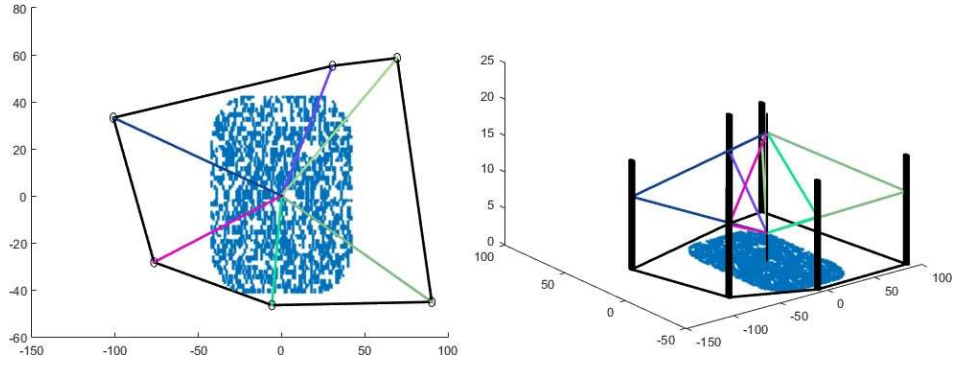


Şekil 5.27. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

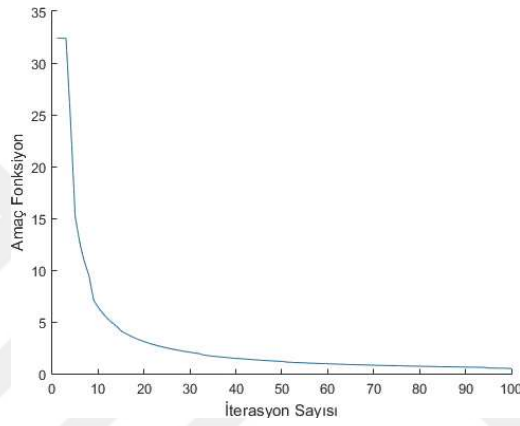
#### 5.14. OPTİMİZASYON 14: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN DÖRTGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.14. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ - 76.65 \quad - 28.28 \quad 15]$<br>$b_2 = [ \quad 69.50 \quad 58.65 \quad 15]$<br>$b_3 = [ \quad 30.61 \quad 55.33 \quad 15]$<br>$b_4 = [ \quad 90.30 \quad - 45.18 \quad 15]$<br>$b_5 = [-101.10 \quad 33.24 \quad 15]$<br>$b_6 = [ \quad - 5.79 \quad 46.55 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 4.01]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 17.82]$                                                                                                                                                                                                              |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.482                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Mekanizmanın alanı           | 15186                                                                                                                                                                                                                                                                              |



Şekil 5.28. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.



Şekil 5.29. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

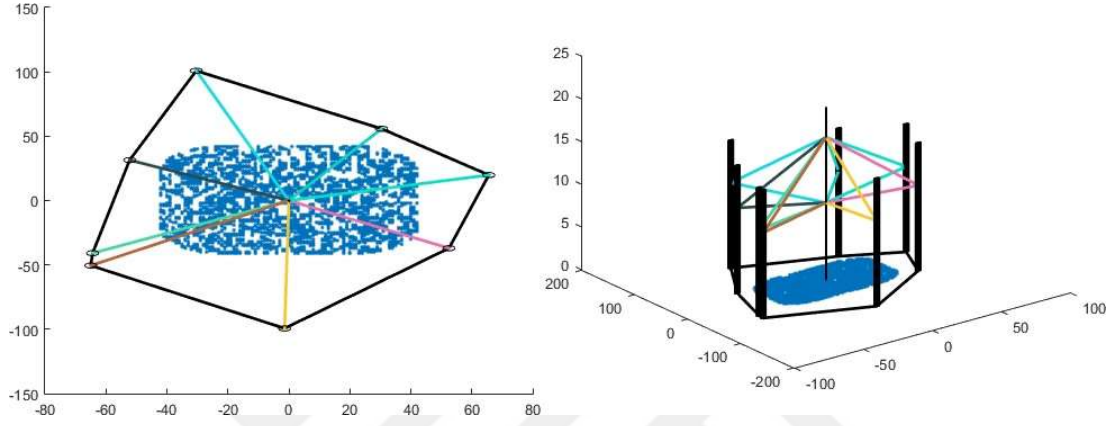
### 5.15. OPTİMİZASYON 15: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN DÖRTGEN RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 8 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.15. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar.

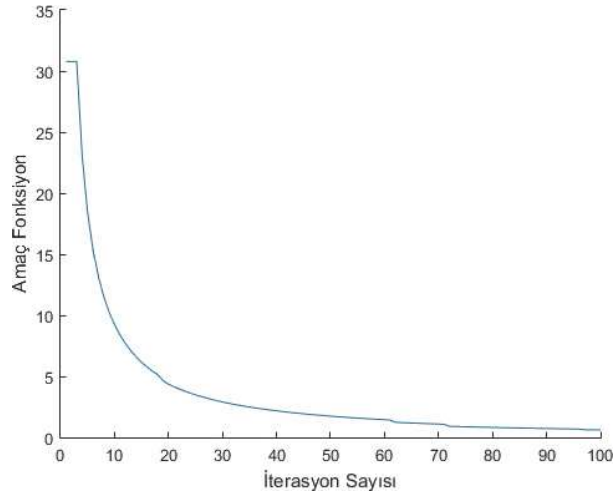
|                              |                                        |
|------------------------------|----------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 65.60 \quad 19.81 \quad 15]$  |
|                              | $b_2 = [ 30.43 \quad 55.77 \quad 15]$  |
|                              | $b_3 = [-64.37 \quad -40.87 \quad 15]$ |
|                              | $b_4 = [-64.97 \quad -50.51 \quad 15]$ |
|                              | $b_5 = [ 52.52 \quad -37.03 \quad 15]$ |
|                              | $b_6 = [-30.37 \quad 100.82 \quad 15]$ |
|                              | $b_7 = [ -1.40 \quad -99.37 \quad 15]$ |
|                              | $b_8 = [-52.23 \quad 31.43 \quad 15]$  |

Çizelge 5.15. (devam) Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 8 köşe noktası için oluşan sonuçlar.

|                          |                                                       |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| Kalem bağlantı noktaları | $k_a = [0.2 \ 0 \ 9.22]$<br>$k_u = [0.2 \ 0 \ 16.89]$ |
| Oluşan kablo uzunlukları | 0.614                                                 |
| Mekanizmanın alanı       | 16004                                                 |



Şekil 5.30. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

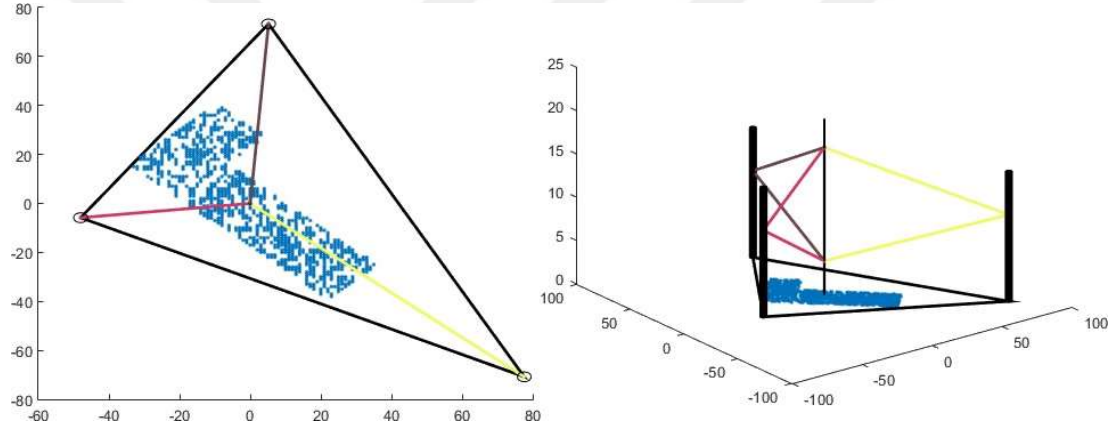


Şekil 5.31. Şekil 4.2’de verilen dörtgen resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

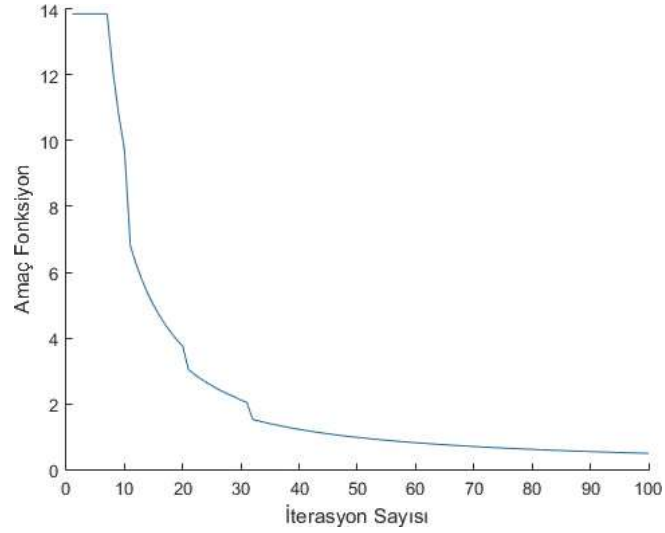
### 5.16. OPTİMİZASYON 16: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN TİK RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 3 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.16. Şekil 4.2'de verilen tik resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                       |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [77.58 \quad -70.81 \quad 15]$<br>$b_2 = [5.18 \quad 73.32 \quad 15]$<br>$b_3 = [-48.03 \quad -5.83 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 4.02]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 17.11]$                                                 |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.486                                                                                                                 |
| Mekanizmanın alanı           | 6699                                                                                                                  |



Şekil 5.32. Şekil 4.2'de verilen tik resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

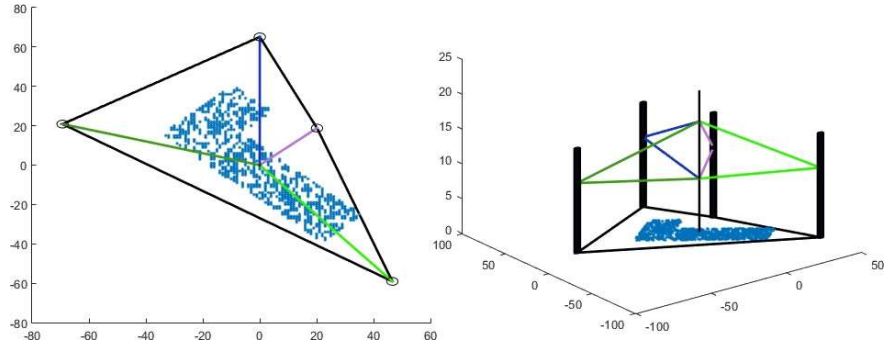


Şekil 5.33. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

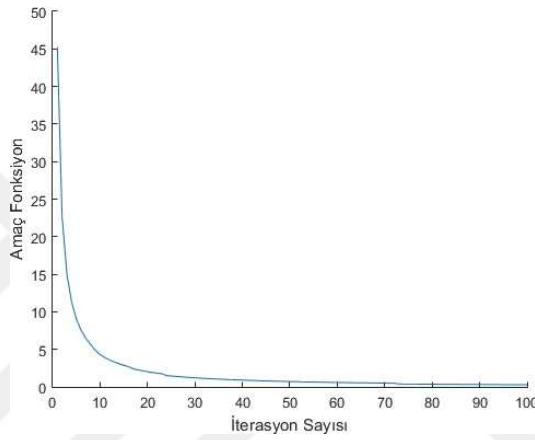
#### 5.17. OPTİMİZASYON 17: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN TİK RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 4 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.17. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                  |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 46.61 \quad -59.09 \quad 15]$<br>$b_2 = [-69.29 \quad 20.85 \quad 15]$<br>$b_3 = [ 0.04 \quad 65.14 \quad 15]$<br>$b_4 = [ 20.13 \quad 18.81 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 7.78]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 15.99]$                                                                                            |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.283                                                                                                                                                            |
| Mekanizmanın alanı           | 5507                                                                                                                                                             |



Şekil 5.34. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.



Şekil 5.35. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

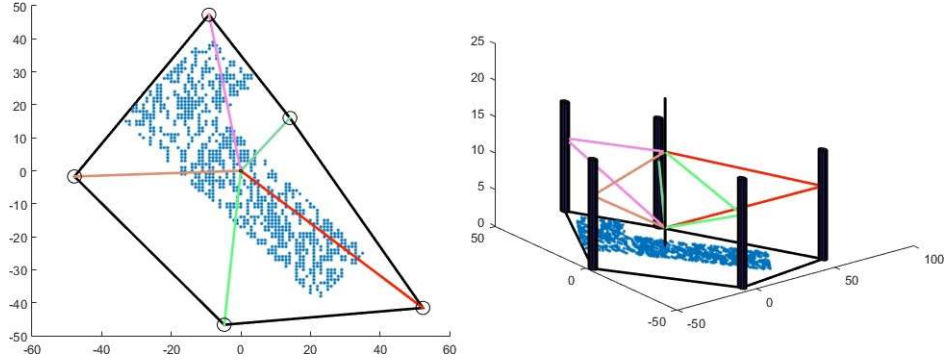
### 5.18. OPTİMİZASYON 18: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN TİK RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.18. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar.

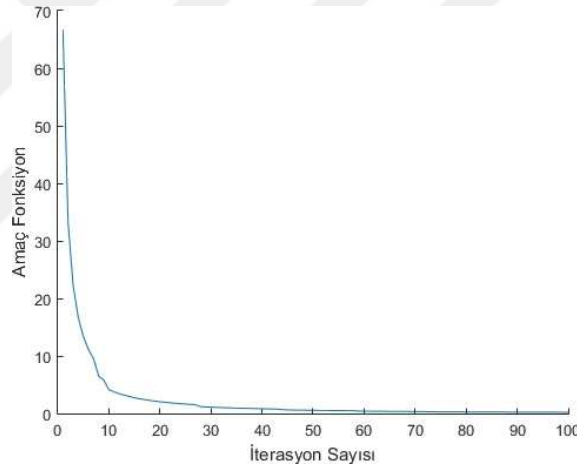
|                              |                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 52.33 \quad -41.56 \quad 15]$<br>$b_2 = [ -9.16 \quad 47.32 \quad 15]$<br>$b_3 = [-47.82 \quad -1.73 \quad 15]$<br>$b_4 = [ -4.78 \quad -46.68 \quad 15]$<br>$b_5 = [ 14.12 \quad 16.01 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 2.59]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 13.02]$                                                                                                                                       |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.212                                                                                                                                                                                                       |

Çizelge 5.18. (devam) Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 5 köşe noktası için oluşan sonuçlar.

|                    |      |
|--------------------|------|
| Mekanizmanın alanı | 4691 |
|--------------------|------|



Şekil 5.36. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.



Şekil 5.37. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

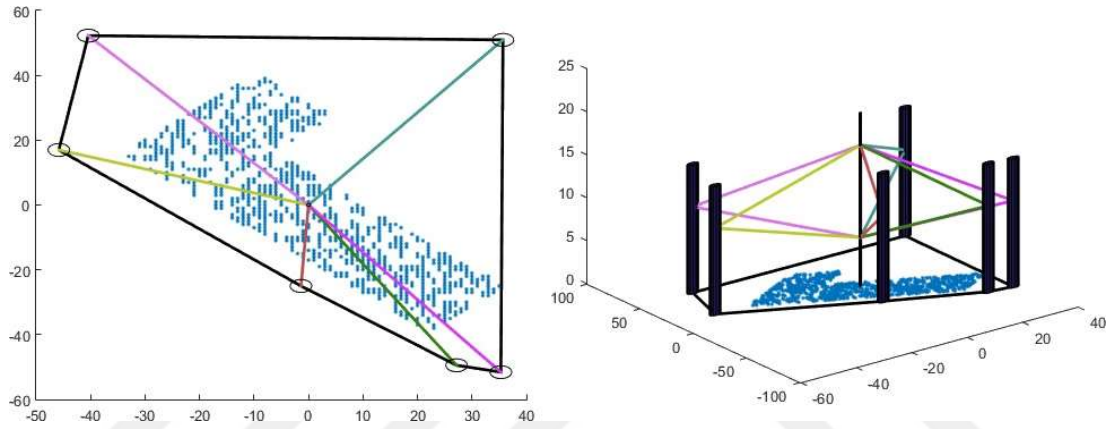
## 5.19. OPTİMİZASYON 19: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN TİK RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.19. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar.

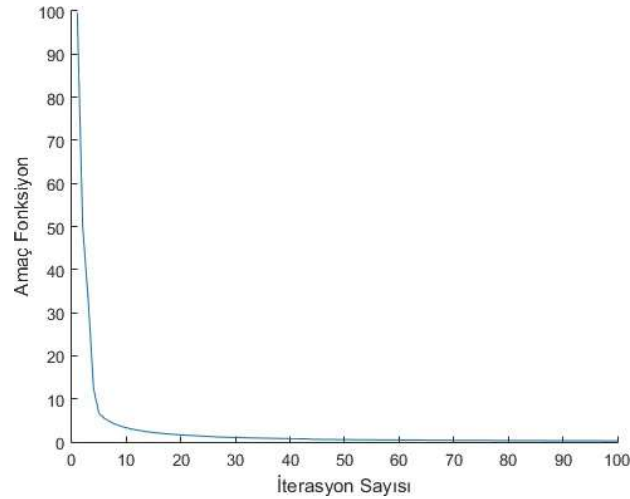
|                              |                                                                                                                          |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 35.31 \quad -51.58 \quad 15]$<br>$b_2 = [ 35.70 \quad 50.95 \quad 15]$<br>$b_3 = [-40.42 \quad 52.25 \quad 15]$ |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Çizelge 5.19. (devam) Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 6 köşe noktası için oluşan sonuçlar.

|                          |                                                                                                                           |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                          | $b_4 = [ 27.19 \quad -49.46 \quad 15]$<br>$b_5 = [-45.82 \quad 16.97 \quad 15]$<br>$b_6 = [ -1.39 \quad -24.99 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 5.87]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 16.61]$                                                     |
| Oluşan kablo uzunlukları | 0.266                                                                                                                     |
| Mekanizmanın alanı       | 5767                                                                                                                      |



Şekil 5.38. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

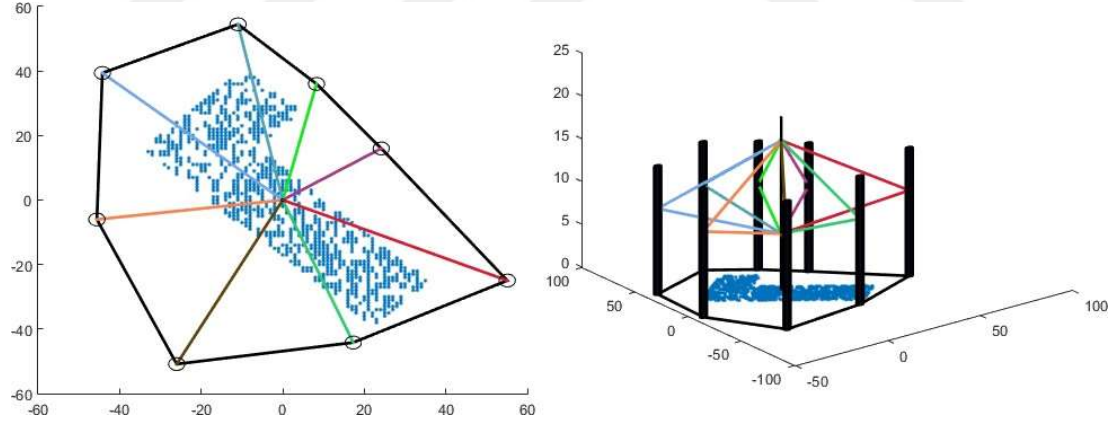


Şekil 5.39. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

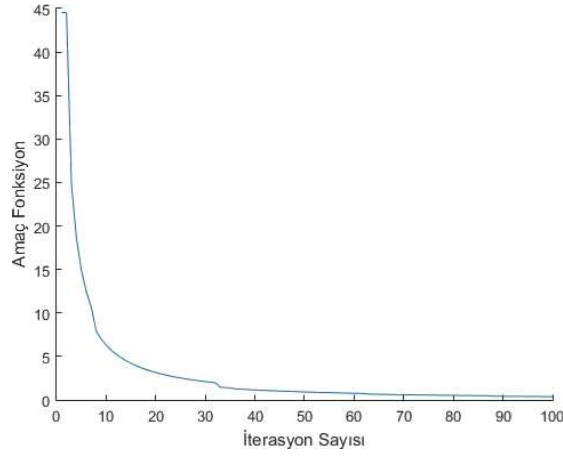
## 5.20. OPTİMİZASYON 20: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN TİK RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 8 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.20. Şekil 4.2'de verilen tik resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 24.17 \quad 15.99 \quad 15]$<br>$b_2 = [ 55.07 \quad -24.95 \quad 15]$<br>$b_3 = [-25.99 \quad -50.86 \quad 15]$<br>$b_4 = [-44.22 \quad 39.39 \quad 15]$<br>$b_5 = [-10.96 \quad 54.48 \quad 15]$<br>$b_6 = [-45.57 \quad -6.03 \quad 15]$<br>$b_7 = [ 17.31 \quad -44.18 \quad 15]$<br>$b_8 = [ 8.29 \quad 36.01 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 6.74]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 17.63]$                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.378                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Mekanizmanın alanı           | 6649                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |



Şekil 5.40. Şekil 4.2'de verilen tik resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

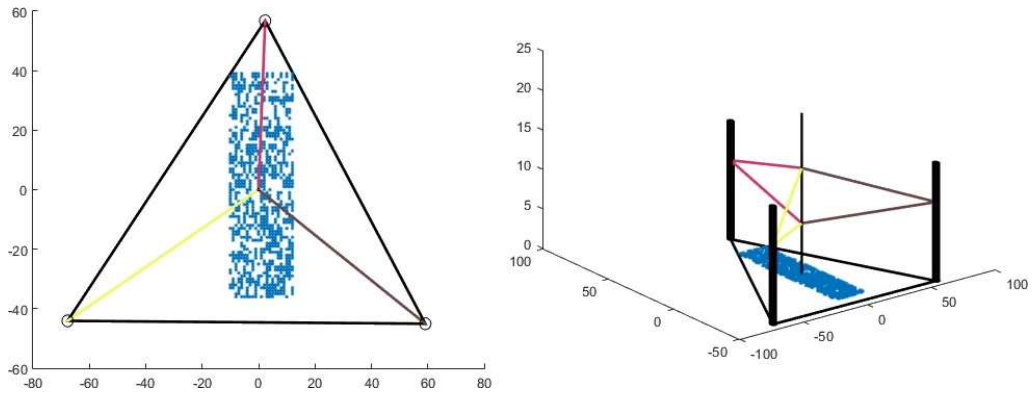


Şekil 5.41. Şekil 4.2’de verilen tik resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

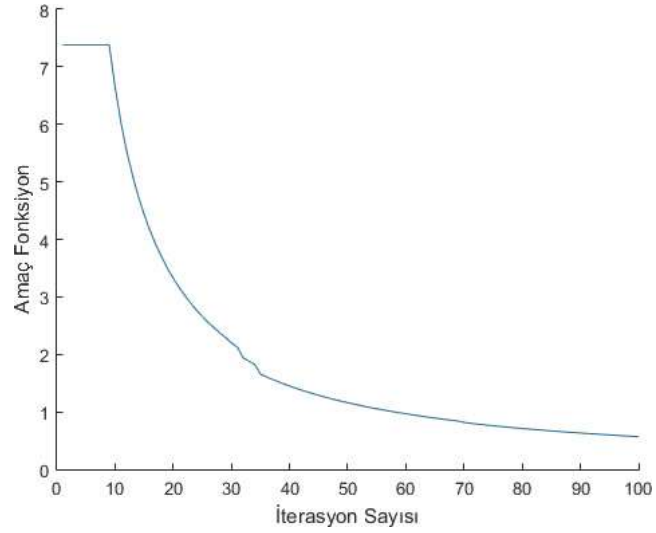
## 5.21. OPTİMİZASYON 21: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN TİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 3 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.21. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                        |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [-67.72 \quad -44.09 \quad 15]$<br>$b_2 = [59.12 \quad -45.04 \quad 15]$<br>$b_3 = [2.33 \quad 56.76 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 6.46]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 13.46]$                                                  |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.568                                                                                                                  |
| Mekanizmanın alanı           | 6429                                                                                                                   |



Şekil 5.42. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

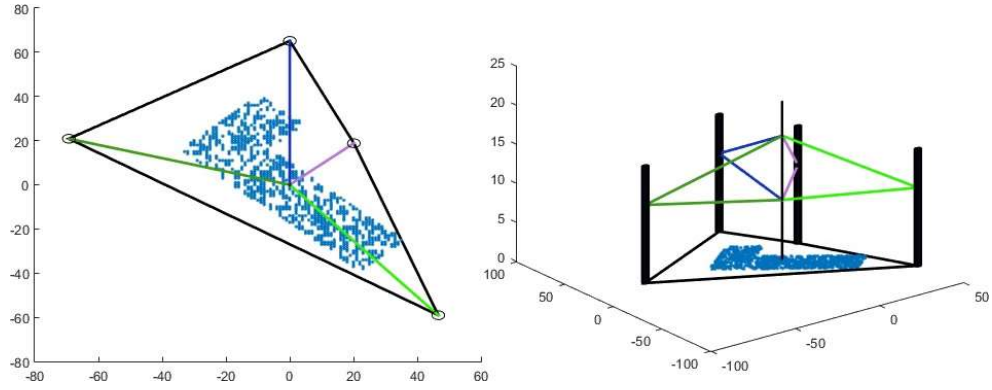


Şekil 5.43. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

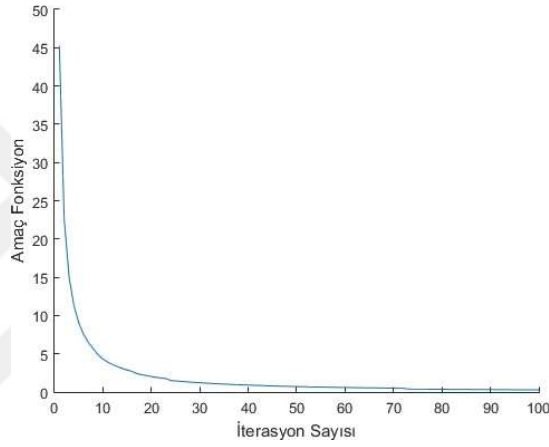
## 5.22. OPTİMİZASYON 22: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN TİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 4 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.22. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                         |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ -6.55 \quad -63.54 \quad 15 ]$<br>$b_2 = [ -36.74 \quad 66.73 \quad 15 ]$<br>$b_3 = [ 54.30 \quad 29.67 \quad 15 ]$<br>$b_4 = [ -27.09 \quad 15.28 \quad 15 ]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 7.78]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 15.99]$                                                                                                   |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.283                                                                                                                                                                   |
| Mekanizmanın alanı           | 5507                                                                                                                                                                    |



Şekil 5.44. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.



Şekil 5.45. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

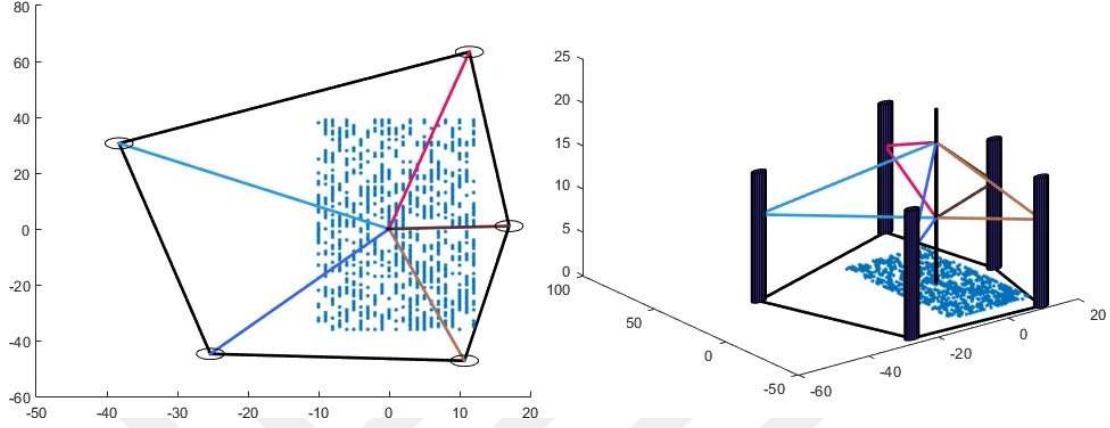
### 5.23. OPTİMİZASYON 23: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN TİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.23. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar.

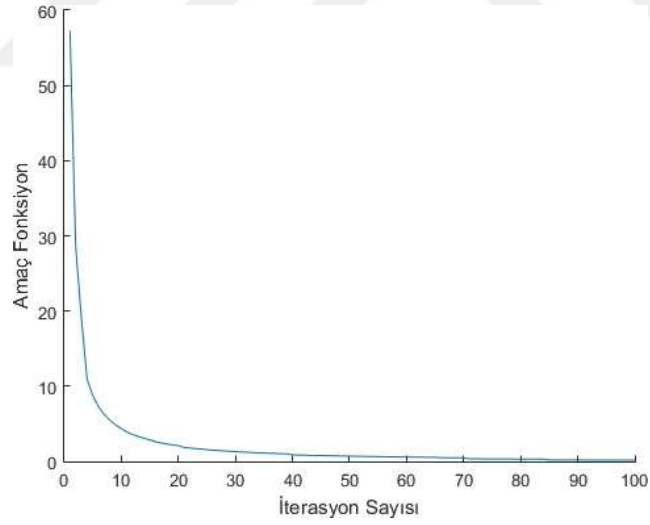
|                              |                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [-25.33 \quad -44.79 \quad 15]$<br>$b_2 = [11.38 \quad 63.40 \quad 15]$<br>$b_3 = [-38.27 \quad 30.64 \quad 15]$<br>$b_4 = [10.69 \quad -47.25 \quad 15]$<br>$b_5 = [17.02 \quad 0.99 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 7.76]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 16.51]$                                                                                                                                   |

Çizelge 5.23. (devam) Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 5 köşe noktası için oluşan sonuçlar.

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| Oluşan kablo uzunlukları | 0.169 |
| Mekanizmanın alanı       | 4411  |



Şekil 5.46. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

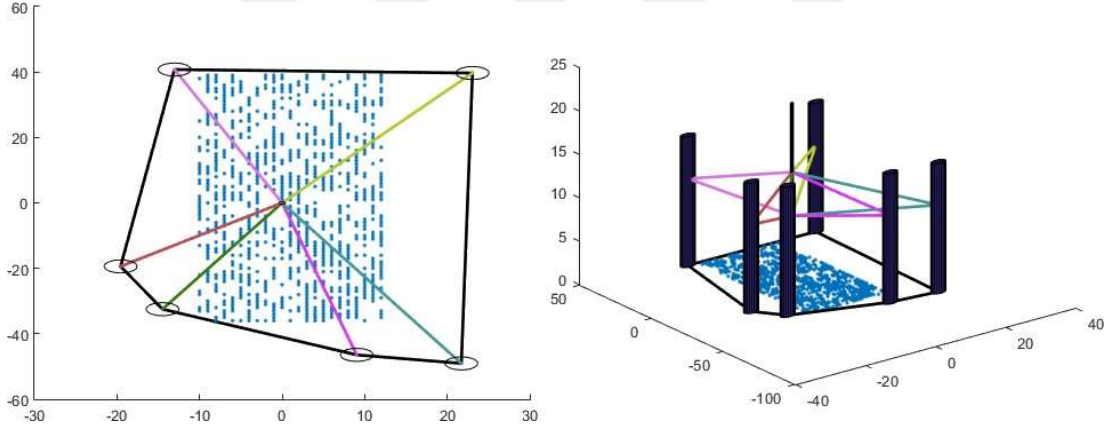


Şekil 5.47. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

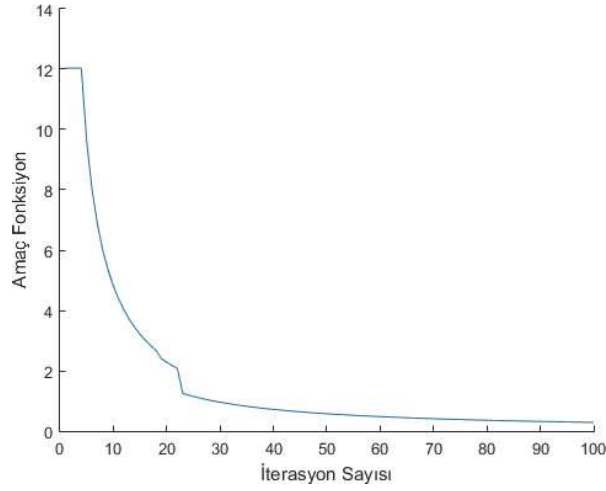
#### 5.24. OPTİMİZASYON 24: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN TİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.24. Şekil 4.2'de verilen tire resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [9.04 \quad -46.44 \quad 15]$<br>$b_2 = [21.71 \quad -49.04 \quad 15]$<br>$b_3 = [-13.03 \quad 40.76 \quad 15]$<br>$b_4 = [-14.49 \quad -32.48 \quad 15]$<br>$b_5 = [23.06 \quad 39.69 \quad 15]$<br>$b_6 = [-19.57 \quad -19.40 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 7.39]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 12.42]$                                                                                                                                                                              |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.287                                                                                                                                                                                                                                              |
| Mekanizmanın alanı           | 3192                                                                                                                                                                                                                                               |



Şekil 5.48. Şekil 4.2'de verilen tire resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

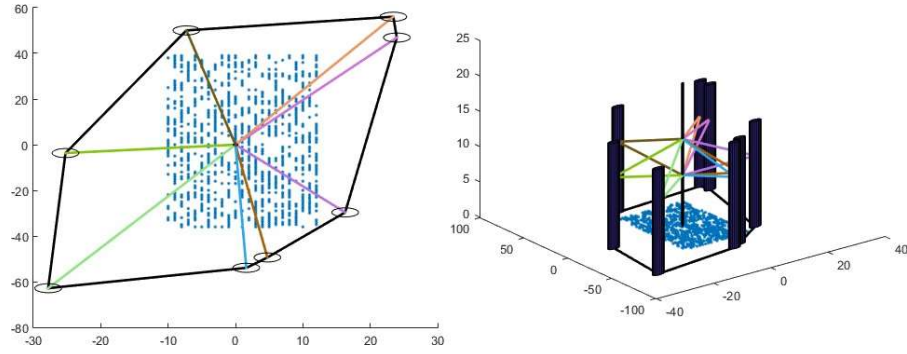


Şekil 5.49. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

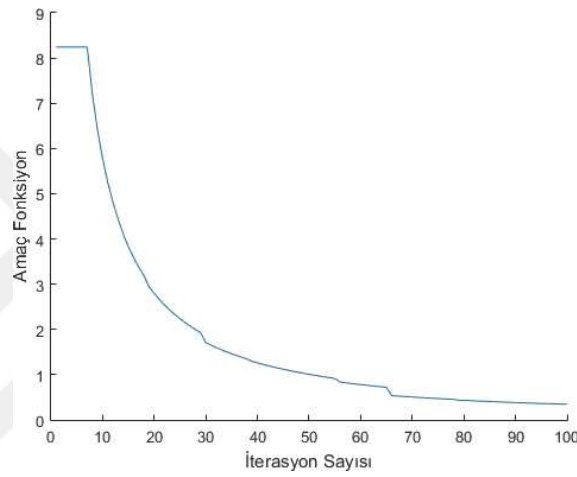
## 5.25. OPTİMİZASYON 25: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN TİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 8 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.25. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [-27.80 \quad -62.87 \quad 15]$<br>$b_2 = [23.94 \quad 46.92 \quad 15]$<br>$b_3 = [-7.29 \quad 50.06 \quad 15]$<br>$b_4 = [1.61 \quad -53.95 \quad 15]$<br>$b_5 = [23.42 \quad 56.07 \quad 15]$<br>$b_6 = [-25.23 \quad -3.67 \quad 15]$<br>$b_7 = [4.74 \quad -49.40 \quad 15]$<br>$b_8 = [16.28 \quad -29.67 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 7.33]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 12.45]$                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.346                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Mekanizmanın alanı           | 4256                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |



Şekil 5.50. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

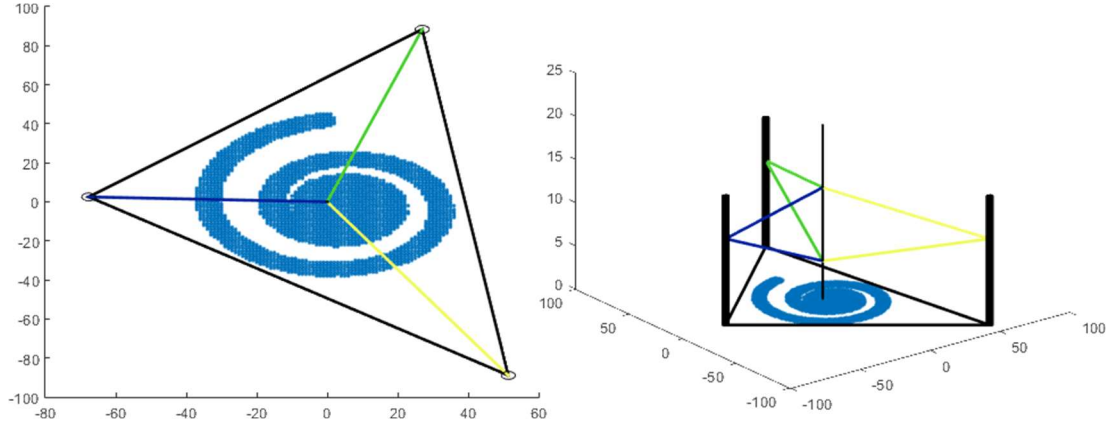


Şekil 5.51. Şekil 4.2’de verilen tire resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

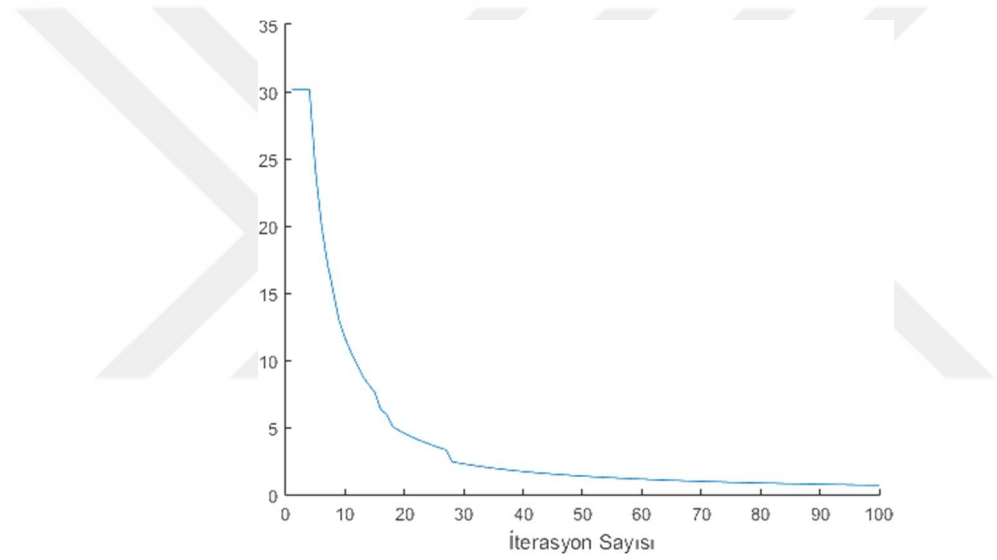
## 5.26. OPTİMİZASYON 26: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN SİRAL RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 3 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.26. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                         |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 26.97 \quad 88.38 \quad 15]$<br>$b_2 = [ 51.41 \quad -88.91 \quad 15]$<br>$b_3 = [-67.69 \quad 2.52 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 4.60]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 13.12]$                                                   |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.680                                                                                                                   |
| Mekanizmanın alanı           | 9440                                                                                                                    |



Şekil 5.52. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.



Şekil 5.53. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

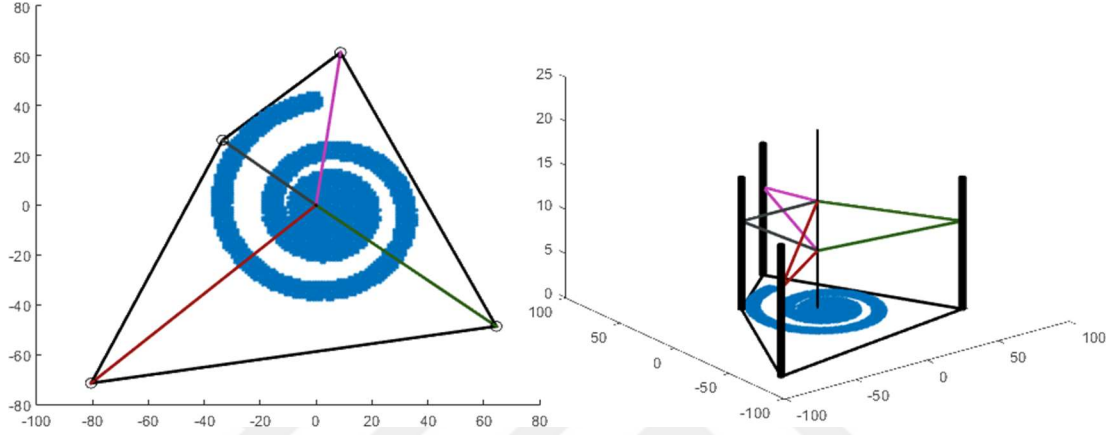
## 5.27. OPTİMİZASYON 27: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN SİRAL RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 4 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.27. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar.

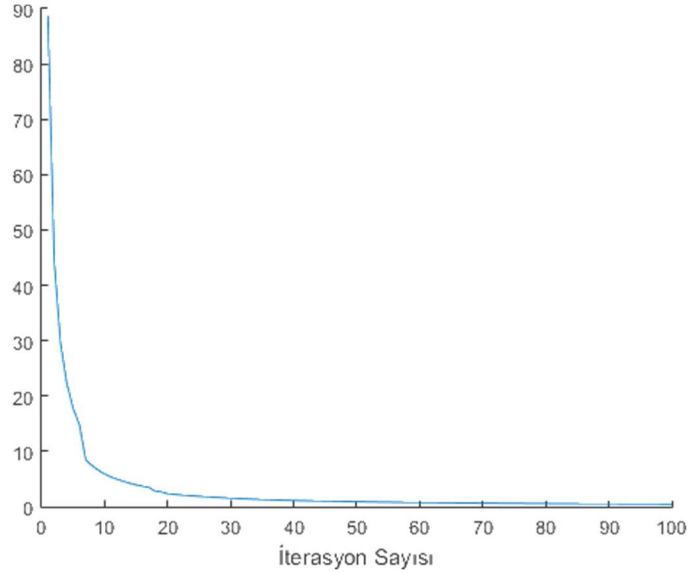
|                              |                                                                                                                                                                               |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [-80.53 \quad -71.51 \quad 15]$<br>$b_2 = [ \quad 8.76 \quad 61.34 \quad 15]$<br>$b_3 = [ \quad 64.54 \quad -48.68 \quad 15]$<br>$b_4 = [-33.48 \quad 26.11 \quad 15]$ |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Çizelge 5.27. (devam) Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 4 köşe noktası için oluşan sonuçlar.

|                          |                                                       |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| Kalem bağlantı noktaları | $k_a = [0.2 \ 0 \ 6.67]$<br>$k_u = [0.2 \ 0 \ 12.30]$ |
| Oluşan kablo uzunlukları | 0.434                                                 |
| Mekanizmanın alanı       | 9851                                                  |



Şekil 5.54. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

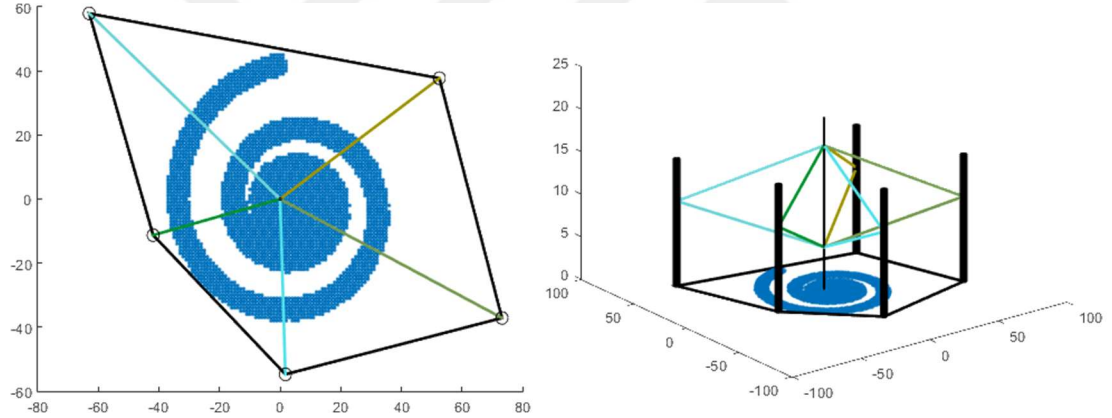


Şekil 5.55. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

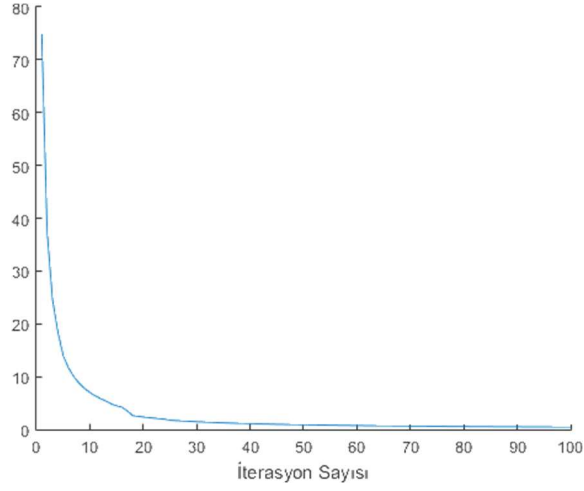
## 5.28. OPTİMİZASYON 28: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN SİRAL RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.28. Şekil 4.2'de verilen spiral resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [-63.01 \quad 57.95 \quad 15]$<br>$b_2 = [ \quad 1.73 \quad -54.74 \quad 15]$<br>$b_3 = [ \quad 73.24 \quad -37.13 \quad 15]$<br>$b_4 = [ \quad 52.57 \quad 37.73 \quad 15]$<br>$b_5 = [-41.91 \quad -11.29 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 5.13]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 17.11]$                                                                                                                                                         |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.436                                                                                                                                                                                                                         |
| Mekanizmanın alanı           | 9769                                                                                                                                                                                                                          |



Şekil 5.56. Şekil 4.2'de verilen spiral resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

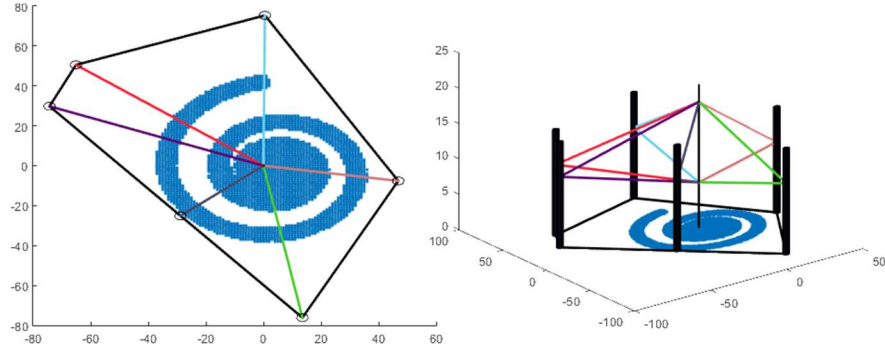


Şekil 5.57. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

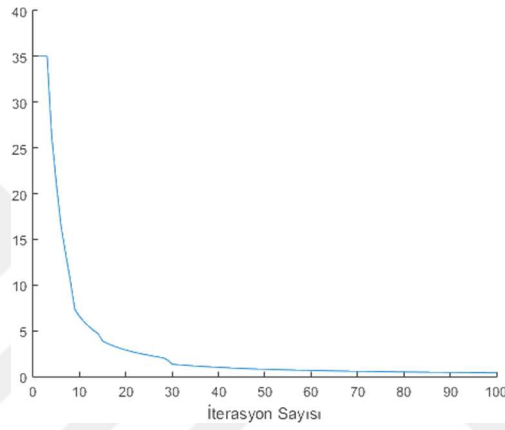
## 5.29. OPTİMİZASYON 29: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN SİRAL RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.29. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 46.84 \quad - 7.61 \quad 15]$<br>$b_2 = [ 13.55 \quad - 76.14 \quad 15]$<br>$b_3 = [-74.30 \quad 29.78 \quad 15]$<br>$b_4 = [-65.12 \quad 50.53 \quad 15]$<br>$b_5 = [ 0.53 \quad 75.32 \quad 15]$<br>$b_6 = [-28.78 \quad - 25.13 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 6.58]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 17.98]$                                                                                                                                                                                  |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.393                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Mekanizmanın alanı           | 9499                                                                                                                                                                                                                                                   |



Şekil 5.58. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.



Şekil 5.59. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

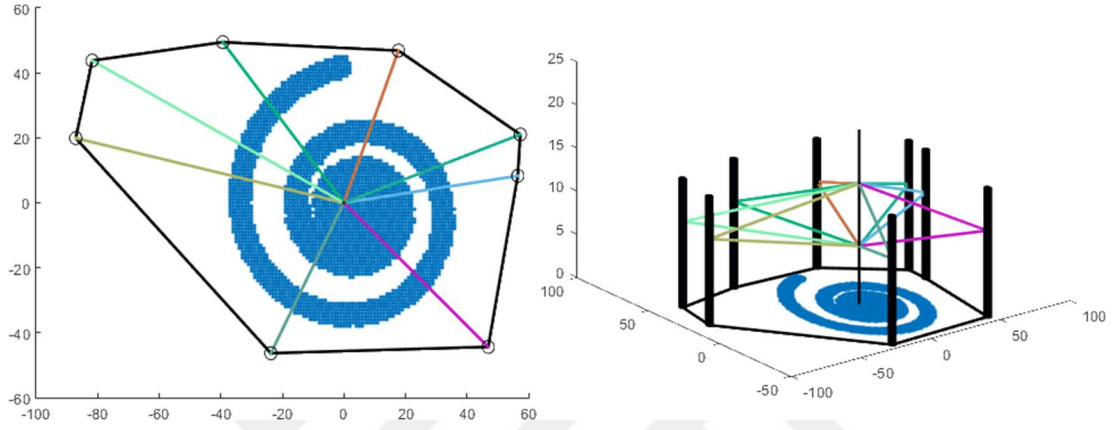
### 5.30. OPTİMİZASYON 30: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN SİRİAL RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 8 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.30. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar.

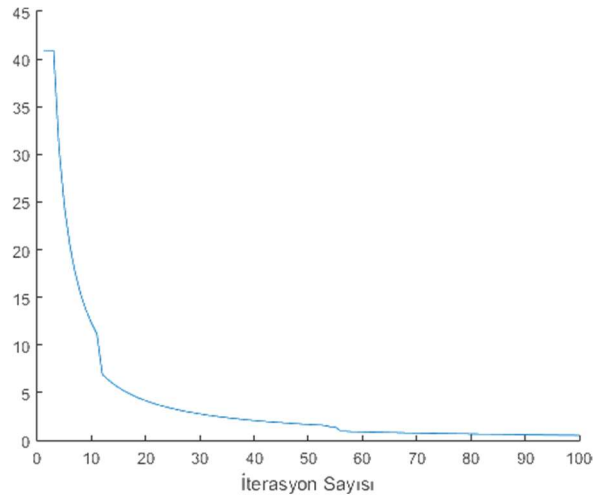
|                              |                                        |
|------------------------------|----------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [-87.13 \quad 19.91 \quad 15]$  |
|                              | $b_2 = [ 57.34 \quad 21.03 \quad 15]$  |
|                              | $b_3 = [-81.81 \quad 43.79 \quad 15]$  |
|                              | $b_4 = [-39.35 \quad 49.47 \quad 15]$  |
|                              | $b_5 = [ 17.71 \quad 49.89 \quad 15]$  |
|                              | $b_6 = [ 46.92 \quad -44.38 \quad 15]$ |
|                              | $b_7 = [ 56.53 \quad 8.29 \quad 15]$   |
|                              | $b_8 = [-23.73 \quad -46.32 \quad 15]$ |

Çizelge 5.30. (devam) Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 8 köşe noktası için oluşan sonuçlar.

|                          |                                                       |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| Kalem bağlantı noktaları | $k_a = [0.2 \ 0 \ 6.90]$<br>$k_u = [0.2 \ 0 \ 14.13]$ |
| Oluşan kablo uzunlukları | 0.528                                                 |
| Mekanizmanın alanı       | 10448                                                 |



Şekil 5.60. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

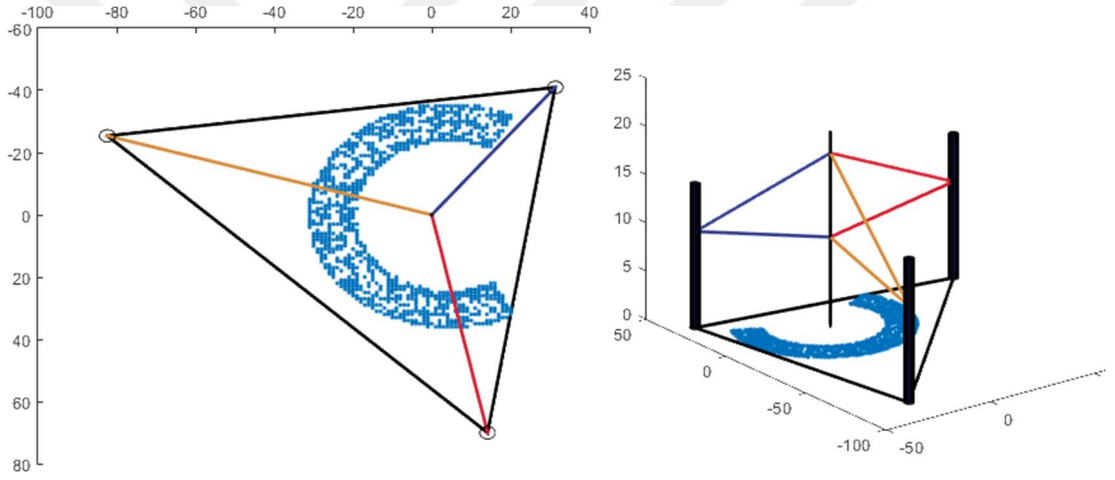


Şekil 5.61. Şekil 4.2’de verilen spiral resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

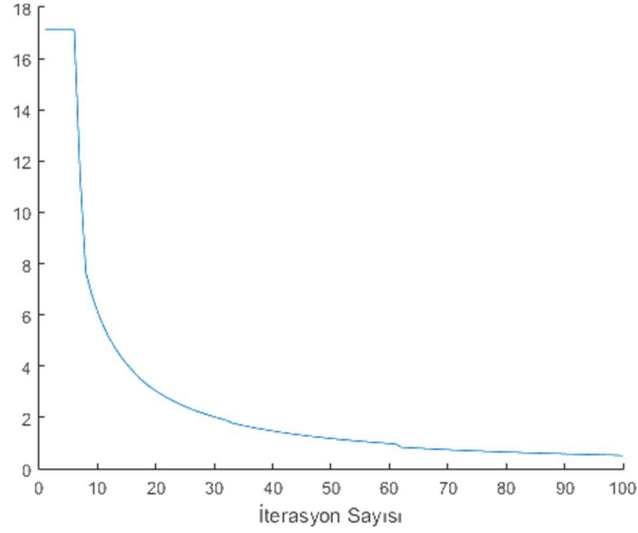
### 5.31. OPTİMİZASYON 31: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN YARIM DAİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 3 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.31. Şekil 4.2'de verilen yarım daire resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                         |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [-25.39 \quad -82.39 \quad 15]$<br>$b_2 = [70.07 \quad 14.16 \quad 15]$<br>$b_3 = [-40.98 \quad 31.34 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 9.41]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 18.16]$                                                   |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.518                                                                                                                   |
| Mekanizmanın alanı           | 6182                                                                                                                    |



Şekil 5.62. Şekil 4.2'de verilen yarım daire resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

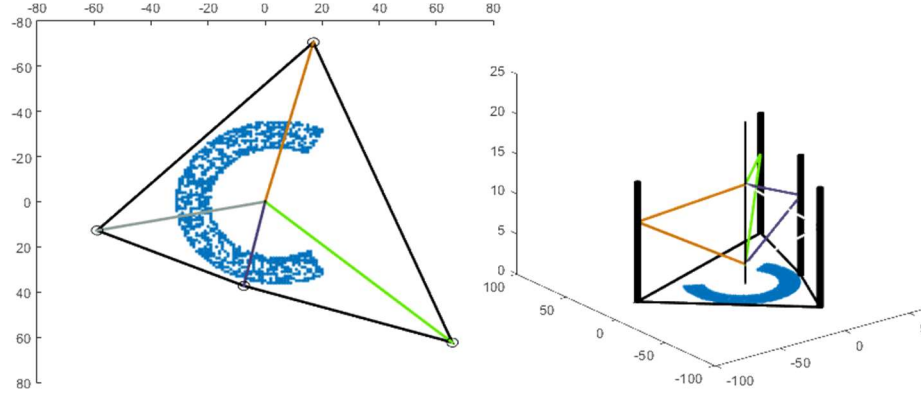


Şekil 5.63. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

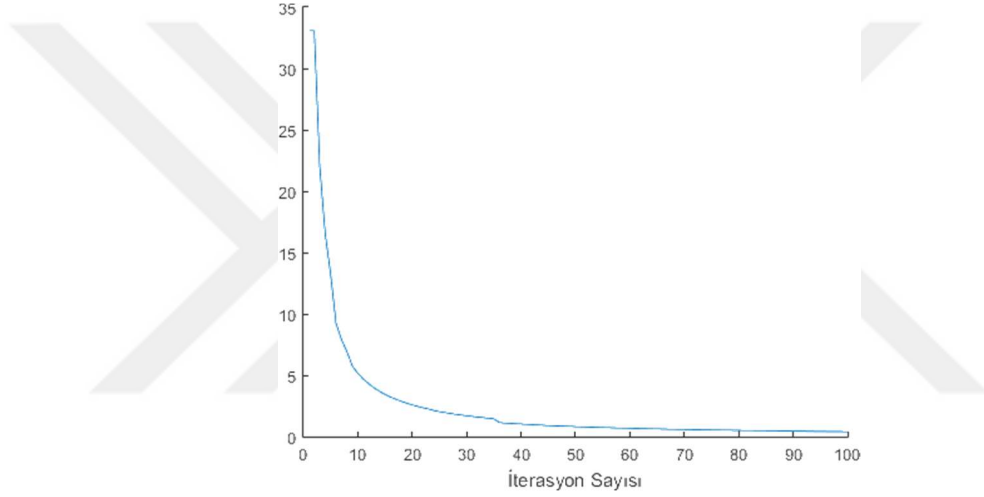
### 5.32. OPTİMİZASYON 32: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN YARIM DAİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 4 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.32. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                   |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 62.37 \quad 65.69 \quad 15]$<br>$b_2 = [-70.65 \quad 16.92 \quad 15]$<br>$b_3 = [ 12.73 \quad -58.93 \quad 15]$<br>$b_4 = [ 37.29 \quad -7.45 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 2.56]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 12.57]$                                                                                             |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.398                                                                                                                                                             |
| Mekanizmanın alanı           | 7331                                                                                                                                                              |



Şekil 5.64. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.



Şekil 5.65. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

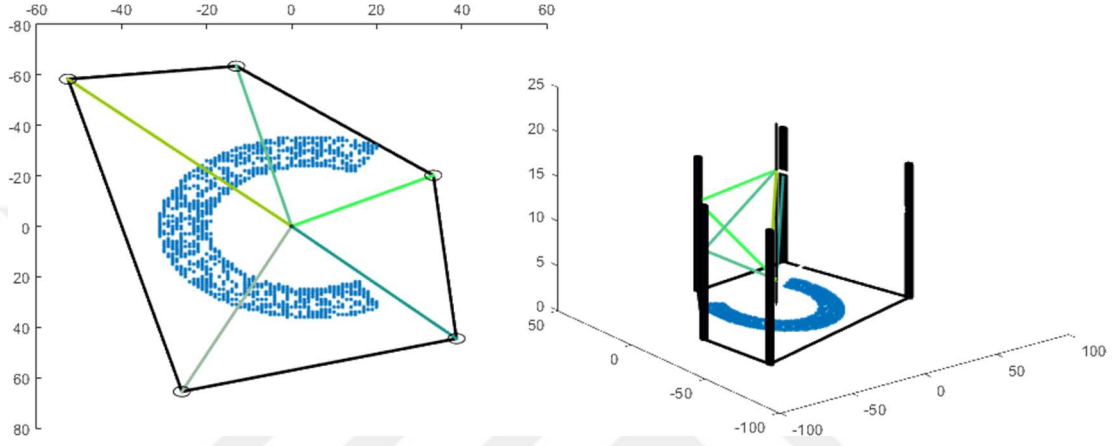
### 5.33. OPTİMİZASYON 33: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN YARIM DAİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.33. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar.

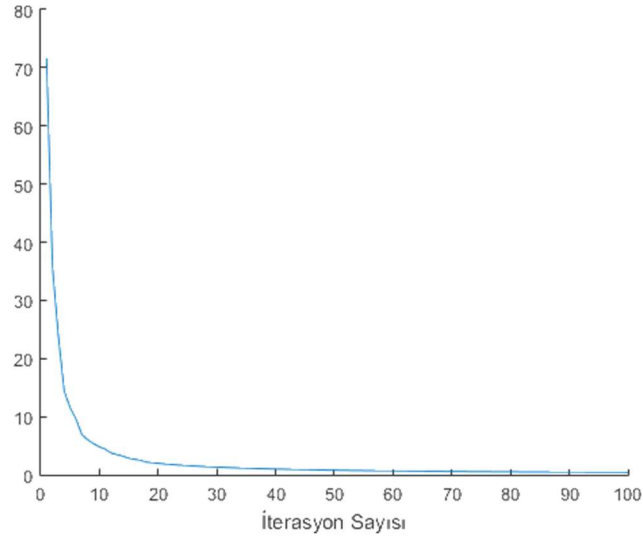
|                              |                                |
|------------------------------|--------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 65.54 \ -25.81 \ 15]$ |
|                              | $b_2 = [-58.35 \ -52.61 \ 15]$ |
|                              | $b_3 = [ 44.53 \ -38.80 \ 15]$ |
|                              | $b_4 = [-63.53 \ -13.02 \ 15]$ |
|                              | $b_5 = [-20.20 \ 33.38 \ 15]$  |

Çizelge 5.33. (devam) Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 5 köşe noktası için oluşan sonuçlar.

|                          |                                                       |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| Kalem bağlantı noktaları | $k_a = [0.2 \ 0 \ 2.89]$<br>$k_u = [0.2 \ 0 \ 15.20]$ |
| Oluşan kablo uzunlukları | 0.391                                                 |
| Mekanizmanın alanı       | 7941                                                  |



Şekil 5.66. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

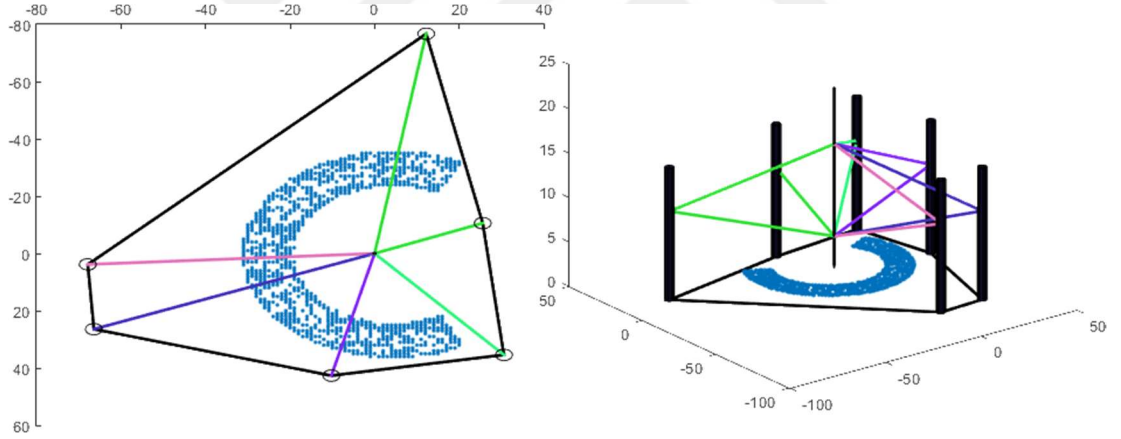


Şekil 5.67. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

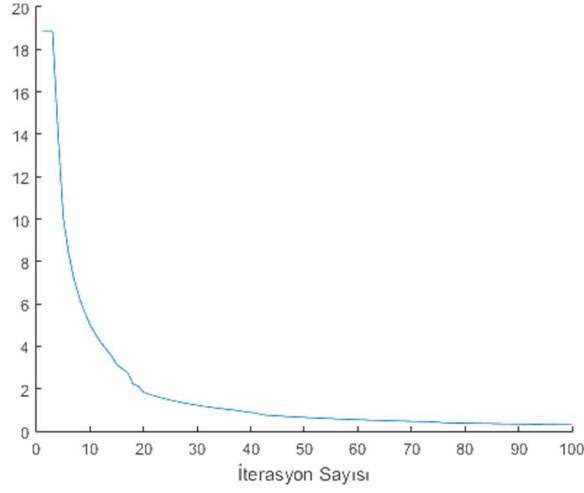
### 5.34. OPTİMİZASYON 34: ŞEKİL 4.2'DE VERİLEN YARIM DAİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.34. Şekil 4.2'de verilen yarım daire resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [26.43 \quad -66.43 \quad 15]$<br>$b_2 = [-76.70 \quad 12.20 \quad 15]$<br>$b_3 = [42.65 \quad -10.24 \quad 15]$<br>$b_4 = [3.83 \quad -67.87 \quad 15]$<br>$b_5 = [35.40 \quad 30.60 \quad 15]$<br>$b_6 = [-10.59 \quad 25.58 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 3.63]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 14.04]$                                                                                                                                                                            |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.300                                                                                                                                                                                                                                            |
| Mekanizmanın alanı           | 6995                                                                                                                                                                                                                                             |



Şekil 5.68. Şekil 4.2'de verilen yarım daire resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

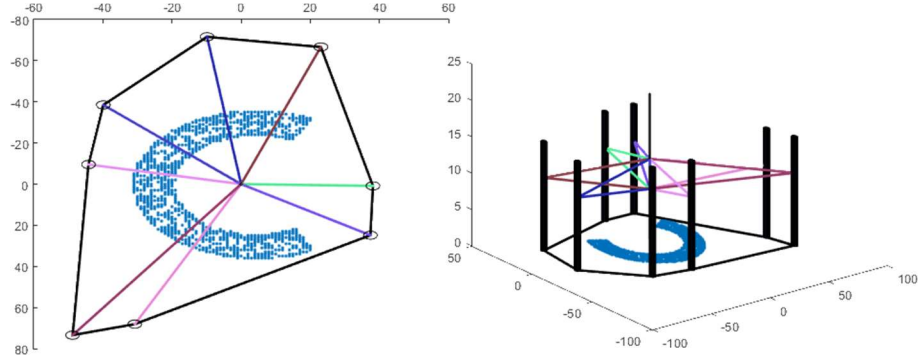


Şekil 5.69. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

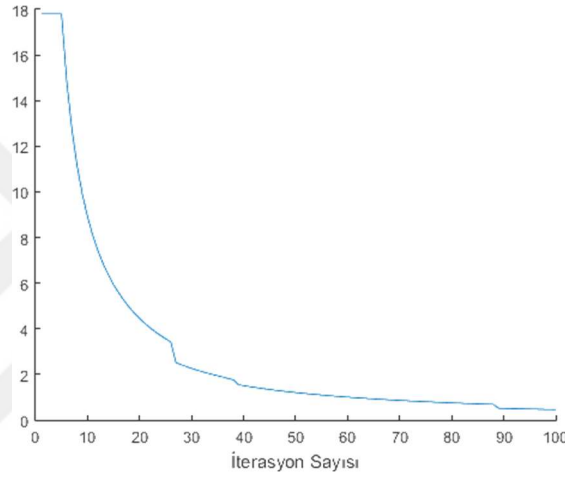
### 5.35. OPTİMİZASYON 35: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN YARIM DAİRE RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 8 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.35. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [-66.66 \quad 32.07 \quad 15]$<br>$b_2 = [ \quad 0.87 \quad 38.16 \quad 15]$<br>$b_3 = [ \quad 24.86 \quad 37.42 \quad 15]$<br>$b_4 = [ \quad 68.12 \quad -30.76 \quad 15]$<br>$b_5 = [-38.49 \quad -39.87 \quad 15]$<br>$b_6 = [ \quad 73.45 \quad -48.75 \quad 15]$<br>$b_7 = [-71.62 \quad - \quad 9.85 \quad 15]$<br>$b_8 = [ \quad -9.52 \quad -44.17 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 7.29]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 11.42]$                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.459                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Mekanizmanın alanı           | 8835                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |



Şekil 5.70. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

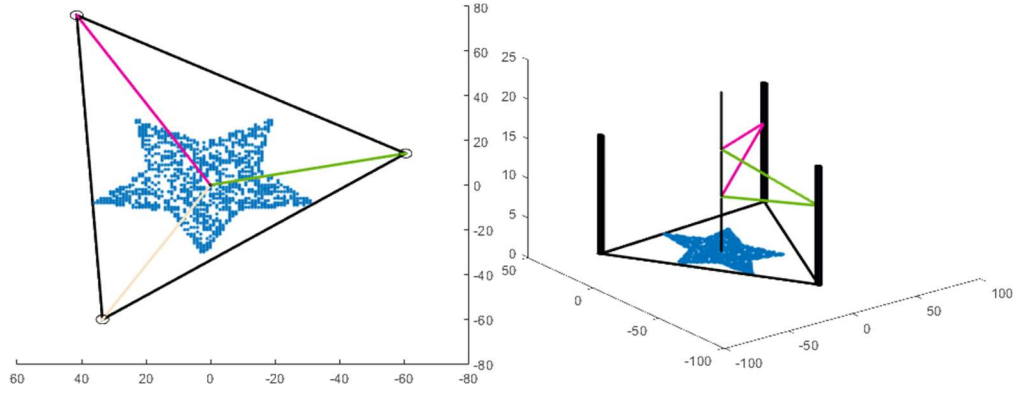


Şekil 5.71. Şekil 4.2’de verilen yarım daire resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

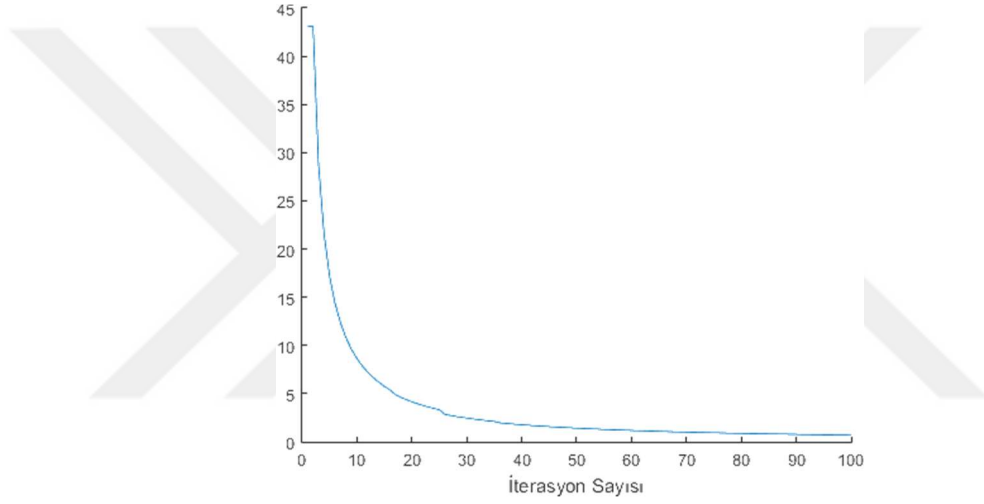
### 5.36. OPTİMİZASYON 36: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN YILDIZ RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 3 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.36. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 3 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                          |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 14.13 \quad -60.59 \quad 15]$<br>$b_2 = [ 76.04 \quad 41.49 \quad 15]$<br>$b_3 = [-60.23 \quad 33.50 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 7.16]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 13.14]$                                                    |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.691                                                                                                                    |
| Mekanizmanın alanı           | 6708                                                                                                                     |



Şekil 5.72. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.



Şekil 5.73. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

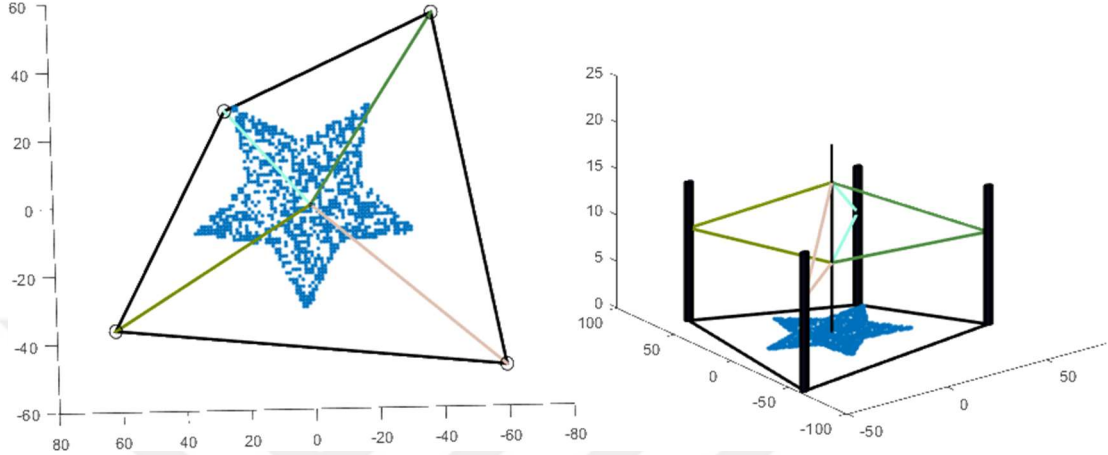
### 5.37. OPTİMİZASYON 37: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN YILDIZ RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 4 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.37. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 4 köşe noktası için sonuçlar.

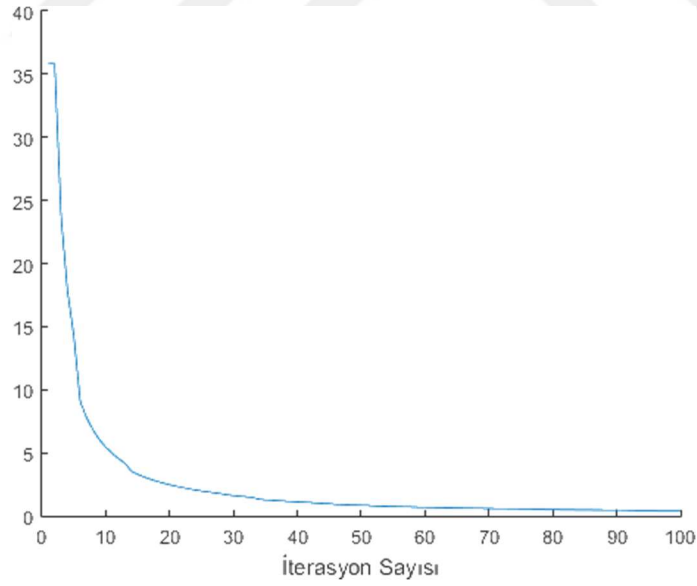
|                              |                                                                                                                                                                  |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [-47.94 \quad -59.45 \quad 15]$<br>$b_2 = [-36.23 \quad 61.69 \quad 15]$<br>$b_3 = [55.88 \quad -39.28 \quad 15]$<br>$b_4 = [27.89 \quad 25.88 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 7.66]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 16.36]$                                                                                            |

Çizelge 5.37. (devam) Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 5 köşe noktası için oluşan sonuçlar.

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| Oluşan kablo uzunlukları | 0.386 |
| Mekanizmanın alanı       | 7759  |



Şekil 5.74. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

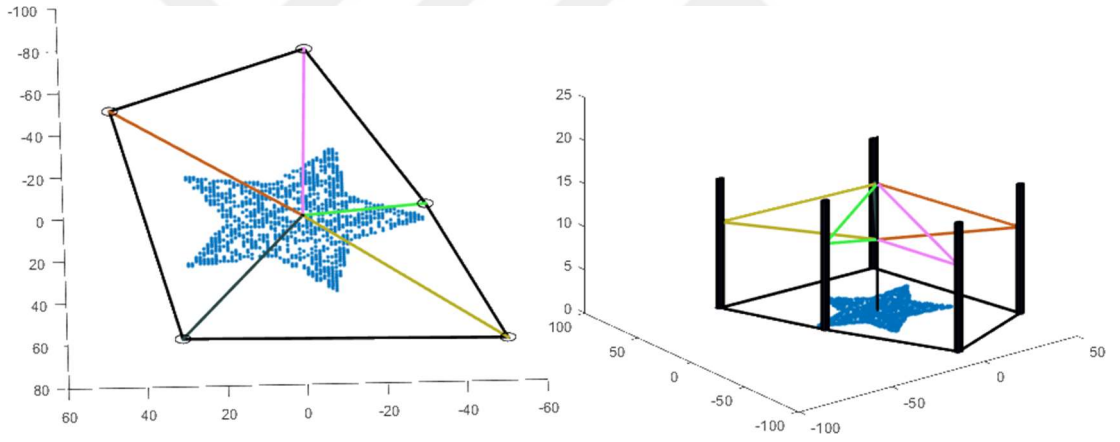


Şekil 5.75. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

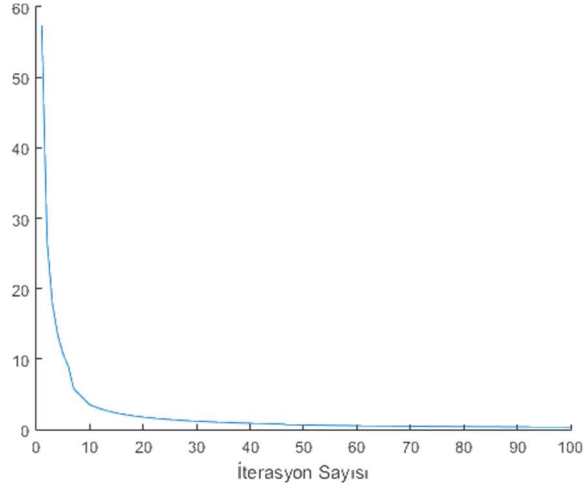
### 5.38. OPTİMİZASYON 38: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN YILDIZ RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 5 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.38. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 5 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [-50.41 \quad 59.72 \quad 15]$<br>$b_2 = [ \quad 47.51 \quad -51.01 \quad 15]$<br>$b_3 = [ \quad 30.97 \quad 57.58 \quad 15]$<br>$b_4 = [ \quad -1.68 \quad -79.01 \quad 15]$<br>$b_5 = [-30.81 \quad -4.50 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 8.42]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 14.92]$                                                                                                                                                         |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.313                                                                                                                                                                                                                         |
| Mekanizmanın alanı           | 8702                                                                                                                                                                                                                          |



Şekil 5.76. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 5 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.

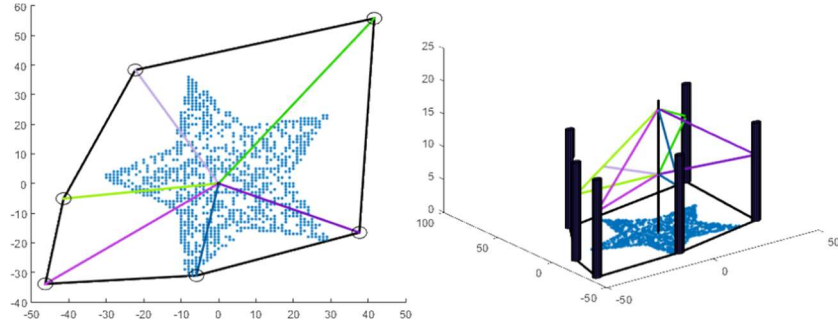


Şekil 5.77. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 5 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

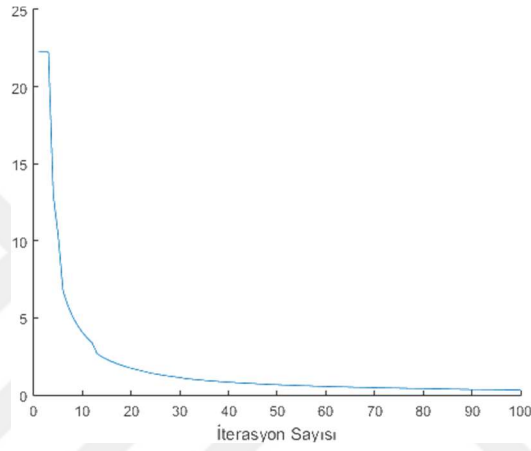
### 5.39. OPTİMİZASYON 39: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN YILDIZ RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 6 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.39. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 6 köşe noktası için sonuçlar.

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 37.69 \quad -16.55 \quad 15]$<br>$b_2 = [-41.43 \quad -5.11 \quad 15]$<br>$b_3 = [-22.26 \quad 38.34 \quad 15]$<br>$b_4 = [-46.32 \quad -33.92 \quad 15]$<br>$b_5 = [ 41.66 \quad 55.78 \quad 15]$<br>$b_6 = [ -5.90 \quad -31.09 \quad 15]$ |
| Kalem bağlantı noktaları     | $k_a = [0.2 \quad 0 \quad 9.05]$<br>$k_u = [0.2 \quad 0 \quad 19.06]$                                                                                                                                                                                 |
| Oluşan kablo uzunlukları     | 0.322                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Mekanizmanın alanı           | 5505                                                                                                                                                                                                                                                  |



Şekil 5.78. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.



Şekil 5.79. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

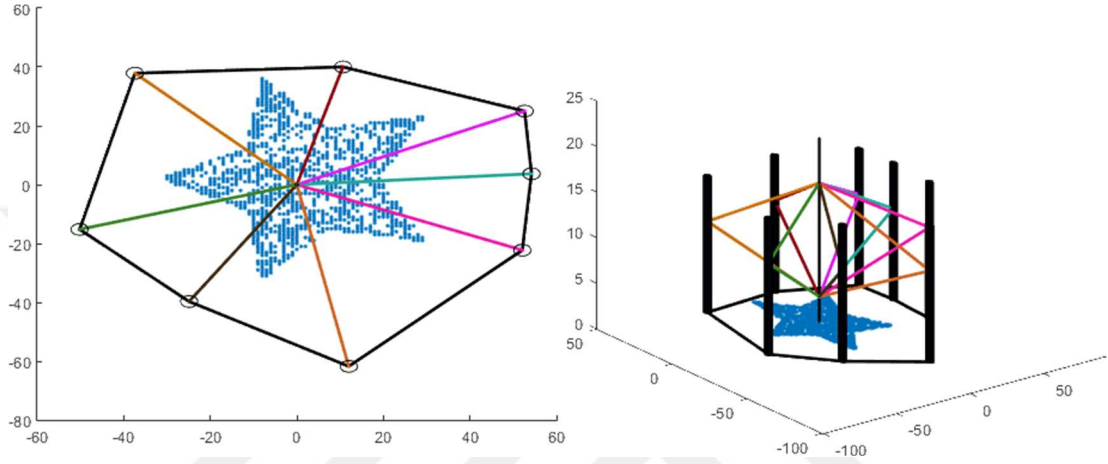
#### 5.40. OPTİMİZASYON 40: ŞEKİL 4.2’DE VERİLEN YILDIZ RESMİ İÇİN KÖŞE SAYISININ 8 SEÇİLİP ÇALIŞTIRILMASI

Çizelge 5.40. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 8 köşe noktası için sonuçlar.

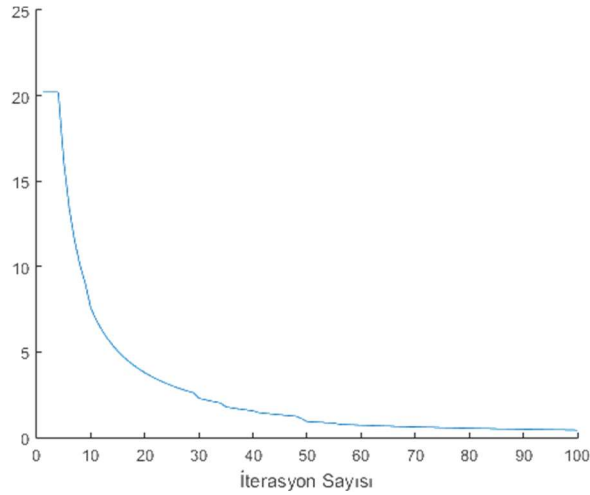
|                              |                                        |
|------------------------------|----------------------------------------|
| Köşe noktaları koordinatları | $b_1 = [ 54.24 \quad 3.69 \quad 15]$   |
|                              | $b_2 = [-37.40 \quad 37.88 \quad 15]$  |
|                              | $b_3 = [ 52.10 \quad -22.27 \quad 15]$ |
|                              | $b_4 = [-50.20 \quad -15.21 \quad 15]$ |
|                              | $b_5 = [-24.91 \quad -39.73 \quad 15]$ |
|                              | $b_6 = [ 12.01 \quad -61.77 \quad 15]$ |
|                              | $b_7 = [ 52.63 \quad 25.01 \quad 15]$  |
|                              | $b_8 = [ 10.65 \quad 40.03 \quad 15]$  |

Çizelge 5.40. (devam) Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 8 köşe noktası için oluşan sonuçlar.

|                          |                                                       |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| Kalem bağlantı noktaları | $k_a = [0.2 \ 0 \ 2.98]$<br>$k_u = [0.2 \ 0 \ 15.47]$ |
| Oluşan kablo uzunlukları | 0.431                                                 |
| Mekanizmanın alanı       | 7678                                                  |



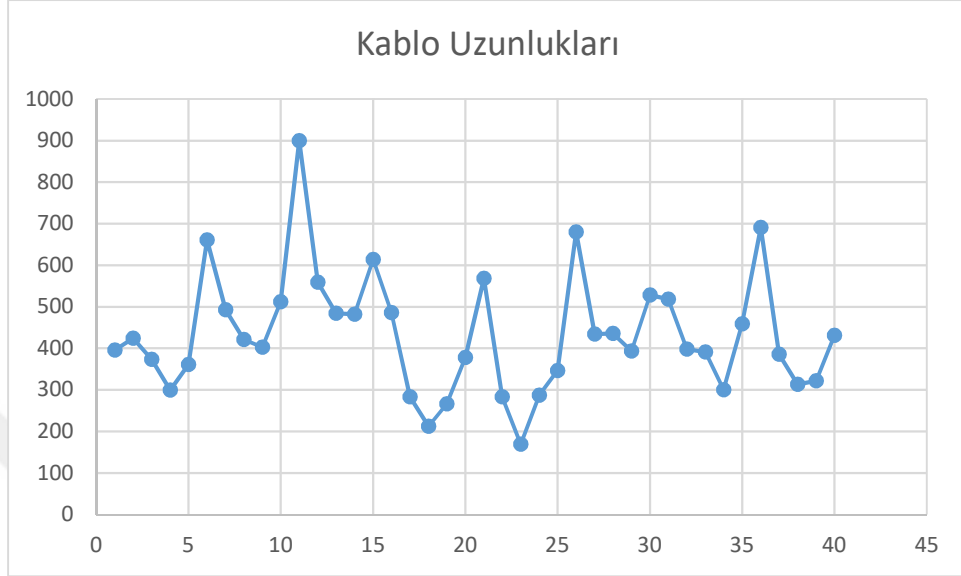
Şekil 5.80. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 8 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü.



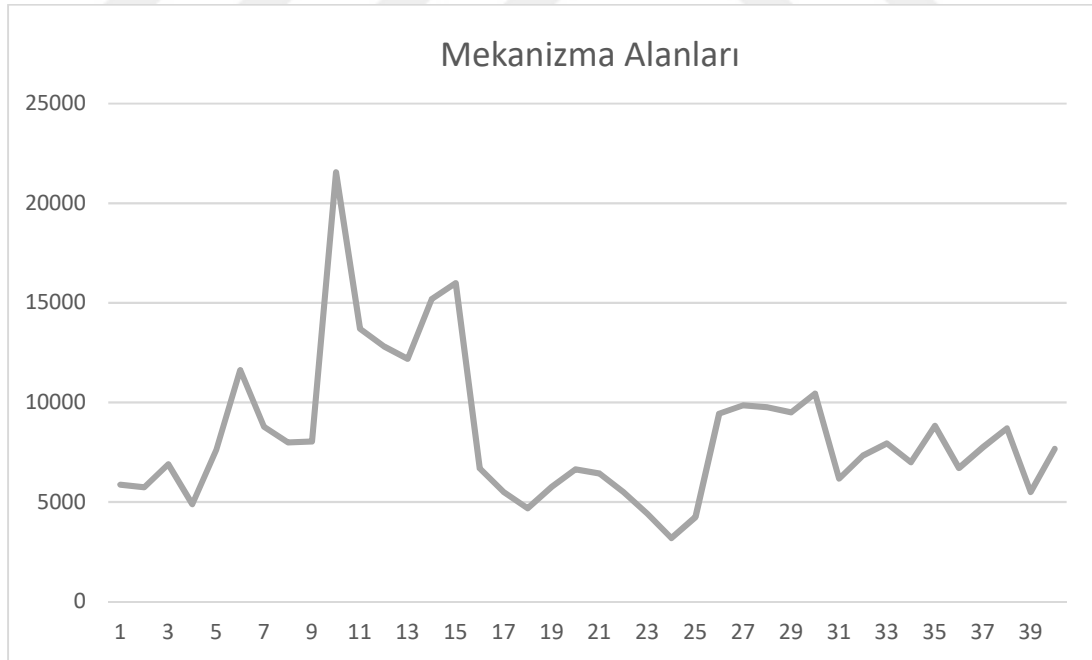
Şekil 5.81. Şekil 4.2’de verilen yıldız resmi ve 8 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği.

Yapılan tüm optimizasyon işlemleri değerlendirildiğinde algoritmanın hem köşe sayısı değişiminde hem de resim değişiminde optimum çözümlere yakınsamaya devam ettiği görülmektedir. Özellikle köşe nokta sayısı değiştikçe daha kısa bağ uzunlukları ile seçilen

resme en yakın bağlantı noktalarının seçildikleri görülmektedir. Yapılan 40 deney sonucunda oluşan kablo uzunlukları grafiksel olarak Şekil 5.82’de, oluşan mekanizma alanları grafiksel olarak Şekil 5.83’te verilmiştir.



Şekil 5.82. Deney sayısı - kablo uzunlukları grafiği.



Şekil 5.83. Deney sayısı - mekanizma alanları grafiği.

Son olarak amaç fonksiyon değerleri ile iterasyon sayıları arasındaki grafikler de algoritmanın optimum çözümlere başarılı bir şekilde yakınsadığını göstermektedir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında düzlemsel kablo kontrollü çizim robotu için geometrik optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon sürecinde kullanıcının mekanizmanın çizmesi istenilen resmi ve köşe bağlantı nokta sayısını seçmesinin ardından, mekanizmanın köşe noktaları ve köşe noktaları ile uç işlevci arasında bulunan kabloların uç işlevciye bağlantı noktalarının optimizasyonunun yapılması sağlanmıştır. Önerilen sistem 40 farklı optimizasyon seçeneği ile test edilmiş ve elde edilen sonuçlar algoritmanın başarılı bir şekilde mekanizmanın optimizasyonunu yapabildiğini göstermiştir.

Sonuçlar ayrıntılı incelendiğinde, üçgen formdaki ilk resim için, minimum kablo uzunluğu olan 0.299 birim ile minimum mekanizma alanı olan 48889 birim kare değerlerine 6 köşe noktası üzerinden çalıştırılan optimizasyon sonucunda ulaşılmıştır.

Beşgen formdaki ikinci resim için, minimum kablo uzunluğu olan 0.403 birim değerine 6 köşe noktası üzerinden ulaşılabilirken, minimum mekanizma alanı olan 7991 birim kare değerine 5 köşe noktası üzerinden ulaşılabilmiştir.

Dörtgen formdaki üçüncü resim için, minimum kablo uzunluğu 6 köşe noktası sayısında bulunurken, minimum mekanizma alanına 5 köşe noktası üzerinden ulaşılmıştır.

Tik işareti formundaki dördüncü resim için, hem minimum kablo uzunluğu hem de minimum mekanizma alanı değerlerine 5 köşe noktasına sahip olan mekanizma optimizasyonunda ulaşılmıştır.

Tire şeklindeki düz çizgi formundaki beşinci resim için, 5 köşe noktasına sahip mekanizmada minimum bağ uzunluğu ve 6 köşe noktasına sahip mekanizmada minimum alan bulunmuştur.

Spiral formundaki altıncı resim ve yarım daire formundaki yedinci resim ile ilgili sonuçlar incelendiğinde minimum kablo uzunluğuna 6 köşe noktası üzerinden ulaşılmışken, en küçük mekanizma alanı değerine 3 köşe noktası üzerinden ulaşılmıştır.

Yıldız formdaki sekizinci resim üzerinden gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları incelendiğinde ise; en küçük kablo uzunluğuna 5 köşe noktası üzerinden ulaşılmışken, en küçük mekanizma alanı değerine 6 köşe noktası üzerinden ulaşılmıştır.

Tüm deneyler incelendiğinde girdi resminin formundan ve kapladığı alanın azlığından kaynaklı, en düşük kablo uzunluğu ve mekanizma alanı değerlerine düz çizgi formunda olan beşinci resimde ulaşılmıştır.

Sonuçlar değerlendirildiğinde optimizasyon sonucu oluşan mekanizmaların bağ uzunluklarının optimizasyonun çalıştığı resmin kapladığı alan ile orantılı olduğu görülmektedir. Tüm deneylerde minimum değerlere genellikle 5 ya da 6 köşe sayısı örneklerinde ulaşılmıştır. Köşe sayısının fazla olması mekanizmaya daha fazla dinamiklik katarken özellikle 8 köşe noktası için optimizasyon süreci zorlaşmaktadır. Dolayısıyla köşe sayısını artırmak süreci iyileştirir gibi bir sonuca varılamamaktadır.

Tez çalışmasının literatüre katkıları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Belirlenen mekanizma köşe noktası sayısına ve seçilen resme göre dinamik olarak çalıştırılan algoritma sonucunda farklı zamanlarda farklı mekanizma ihtiyaçlarına optimum çözümler sunulması için dinamik bir sistem önerilmiştir.
- Giriş resmine ve köşe sayısına göre çok parametrelili bir optimizasyon probleminin çözümü önerilmiştir.
- Ayrıca, tez çalışması kapsamında 1 adet uluslararası makale yayımlanmıştır.

Bunların yanında yapılan çalışmaya ek olarak aşağıdaki çalışma konuları önerilebilir:

- Geliştirilmek istenilen bir mekanizma üzerinden optimum çözüm için optimizasyon sürecine köşe sayısı da dahil edilip, sistem sonucunda köşe noktası koordinatları ve uç işlevci bağlantı noktalarına ek köşe sayısının da algoritma tarafından önerilmesi sağlanabilir.
- Optimizasyon sürecinde kullanılan algoritma değiştirilerek sistemin farklı optimizasyon algoritmalarında vereceği sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Girdi resminin köşe noktalarının çıkarılması noktasında farklı görüntü işleme teknikleri denenerek optimizasyon çıktıları analiz edilebilir.
- Hesaplamalar noktasında kablo gerginlikleri de hesaba katılabilir.
- Kablo kontrollü robot mekanizması iki boyutlu resim çizilmesi üzerinden geliştirilmiş olup, benzer mekanizma ve optimizasyon süreci üç boyutlu çıktı üretebilecek mekanizmalar üzerine uygulanabilir.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] E. A. Aydoğan, G. Doğru, ve Y. Kaşıkçı, “Kablo İle Sürülen Paralel Robot”, *Director*, c. 15, sayı 40, ss. 6–13, 2018.
- [2] Anonim (2021, 18 Temmuz). *Seri ve Paralel Robotlar - Yapay Zeka ve Benzetim Sistemleri Arge Lab*. [Çevrimiçi]. Erişim: <http://yapbenzet.kocaeli.edu.tr/seri-paralel-robotlar/>.
- [3] M. Toz, “Asimetrik Üç Serbestlik Dereceli Bir Düzlemsel Paralel Robot Mekanizmasının Kinematik Analizi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2018.
- [4] A. Martin, S. Caro ve P. Cardou, “Design of a Cable-Driven Parallel Robot with Grasping Device”, *Procedia Cirp*, 2018, c. 70, ss. 290–295.
- [5] M. Hassan ve A. Khajepour, “Optimization of actuator forces in cable-based parallel manipulators using convex analysis”, *IEEE Transactions on Robotics*, c. 24, sayı 3, ss. 736–740, 2008.
- [6] I. Ben Hamida, M. A. Laribi, A. Mlika, L. Romdhane, S. Zeghloul ve G. Carbone, “Multi-Objective optimal design of a cable driven parallel robot for rehabilitation tasks”, *Mechanism and Machine Theory*, c. 156, s. 104141, 2021.
- [7] P. Miermeister, M. Lachele, R. Boss, C. Masone, C. Schenk, J. Tesch, M. Kerger, H. Teufel, A. Pott ve H. H. Bulthoff, “The CableRobot simulator large scale motion platform based on Cable Robot technology”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, c. 2016, ss. 3024–3029, 2016.
- [8] J. Albus, R. Bostelman ve N. Dagalakı, “Nist Spider, a robot crane”, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, c. 97, sayı 3, ss. 373–385, 1992.
- [9] X. Tang, “An overview of the development for cable-driven parallel manipulator”, *Advances in Mechanical Engineering*, c. 2014. 2014.
- [10] A. M. Pinto, E. Moreira, J. Lima, J. P. Sousa ve P. Costa, “A cable-driven robot for architectural constructions: a visual-guided approach for motion control and path-planning”, *Autonomous Robots*, c. 41, sayı 7, ss. 1487–1499, 2017.
- [11] X. Cui, W. Chen, X. Jin ve S. K. Agrawal, “Design of a 7-DOF Cable-Driven Arm Exoskeleton (CAREX-7) and a Controller for Dexterous Motion Training or Assistance”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, c. 22, sayı 1, ss. 161–172, 2017.
- [12] J. P. Merlet ve D. Daney, “A portable, modular parallel wire crane for rescue operations”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, ss. 2834–2839, 2010.
- [13] B. Y. Duan, Y. Y. Qiu, F. S. Zhang ve B. Zi, “On design and experiment of the feed cable-suspended structure for super antenna”, *Mechatronics*, c. 19, sayı 4, ss. 503–509, 2009.

- [14] X. Geng, M. Li, Y. Liu, Y. Li, W. Zheng ve Z. Li, “Analytical tension-distribution computation for cable-driven parallel robots using hypersphere mapping algorithm”, *Mechanism and Machine Theory*, c. 145, s. 103692, 2020.
- [15] Z. Wang, D. Wang, B. Chen, L. Yu, J. Qian ve B. Zi, “A Clamping Force Estimation Method Based on a Joint Torque Disturbance Observer Using PSO-BPNN for Cable-Driven Surgical Robot End-Effectors”, *Sensors*, c. 19, s. 23, 2019.
- [16] Y. Zou, K. Liu, N. Wang, J. Li, X. Geng ve K. Chang, “Design and Optimization of Movable Cable-Driven Lower-Limb Rehabilitation Robot”, *3rd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics*, ss. 714–719, 2019.
- [17] J. Bolboli, M. A. Khosravi ve F. Abdollahi, “Analysis of the Stiffness Feasible Workspace of the Cable-Driven Parallel Robots”, *5th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, ss. 45–50, 2018.
- [18] Y. Zou, N. Wang, X. Wang, H. Ma ve K. Liu, “Design and Experimental Research of Movable Cable-Driven Lower Limb Rehabilitation Robot”, *IEEE Access*, c. 7, ss. 2315–2326, 2019.
- [19] H. Hong, J. Ali ve L. Ren, “A review on topological architecture and design methods of cable-driven mechanism”, *Advances in mechanical engineering*, c. 10, sayı 5, ss. 1–14, 2018
- [20] S. Zhang, D. Cao, B. Hou, S. Li, H. Min ve X. Zhang, “Analysis on variable stiffness of a cable-driven parallel-series hybrid joint toward wheelchair-mounted robotic manipulator”, *Advances in Mechanical Engineering*, c. 11, sayı 4, ss. 1–12, 2019.
- [21] Anonim (2021, 18 Temmuz). Robot Nedir? - Yapay Zeka ve Benzetim Sistemleri Arge Lab. [Çevrimiçi]. Erişim: <http://yapbenzet.kocaeli.edu.tr/robot-nedir/>.
- [22] A. Kurtoğlu, *Robot Tekniği*, İstanbul, Türkiye: Papatya Yayıncılık, 2011.
- [23] M. Toz ve S. Kucuk, “Dexterous workspace optimization of an asymmetric six-degree of freedom Stewart–Gough platform type manipulator”, *Robotics and Autonomous Systems*, c. 61, sayı 12, ss. 1516–1528, 2013.
- [24] C. Gosselin, “Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives”, *Mechanical Engineering Reviews*, c. 1, sayı 1, 2014.
- [25] Z. Cui, X. Tang, S. Hou ve H. Sun, “Non-iterative geometric method for cable-tension optimization of cable-driven parallel robots with 2 redundant cables”, *Mechatronics*, c. 59, ss. 49–60, 2019.
- [26] D. Song, L. Zhang ve F. Xue, “Configuration Optimization and a Tension Distribution Algorithm for Cable-Driven Parallel Robots”, *IEEE Access*, c. 6, ss. 33928–33940, 2018.
- [27] H. Xu, E. Knoop, S. Coros ve M. Bäcker, “Bend-It: Design and Fabrication of Kinetic Wire Characters”, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, c. 37, sayı 6, ss 1-15, 2018.
- [28] H. Jamshidifar, A. Khajepour, B. Fidan ve M. Rushton, “Kinematically-Constrained Redundant Cable-Driven Parallel Robots: Modeling, Redundancy Analysis, and Stiffness Optimization”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, c. 22, sayı 2, ss. 921–930, 2017.

- [29] P. Liu, H. W. Ma, X. H. Zhang ve X. Z. Qiao, “On the Equivalent Position Workspace for a Coal Gangue Picking Robot”, *Journal of Physics: Conference Series*, c. 1267, sayı 1, 2019.
- [30] J. T. Bryson, X. Jin ve S. K. Agrawal, “Optimal design of cable-driven manipulators using particle swarm optimization”, *Journal of mechanisms and robotics*, c. 8, sayı 4, 2016.
- [31] W. Bin Lim, S. H. Yeo ve G. Yang, “Optimization of tension distribution for cable-driven manipulators using tension-level index”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, c. 19, sayı 2, ss. 676–683, 2014.
- [32] M. Anson, A. Alamdari ve V. Krovi, “Orientation Workspace and Stiffness Optimization of Cable-Driven Parallel Manipulators With Base Mobility”, *Journal of Mechanisms and Robotics*, c. 9, sayı 3, 2017.
- [33] W. Wang, X. Tang ve Z. Shao, “Study on Energy Consumption and Cable Force Optimization of Cable-Driven Parallel Mechanism in Automated Storage/Retrieval System”, *Second International Conference on Soft Computing and Machine Intelligence*, ss. 144–150, 2016.
- [34] Z. Mu, P. Wang, Z. Li ve W. Xu, “A Biarc Method for Kinematics and Configuration Planning of Concentric Wire-Driven Manipulators”, *IEEE Access*, c. 7, ss. 151439–151448, 2019.
- [35] J. M. Friesen, J. L. Dean, T. Bewley ve V. Sunspiral, “A Tensegrity-Inspired Compliant 3-DOF Compliant Joint”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, ss. 3301–3306, 2018.
- [36] R. L. Williams, J. S. Albus ve R. V. Bostelman, “3D cable-based Cartesian metrology system”, *Journal of Robotic Systems*, c. 21, sayı 5, ss. 237–257, 2004.
- [37] G. R. Cho, S.-T. Kim ve J. Kim, “Backlash Compensation for Accurate Control of Biopsy Needle Manipulators having Long Cable Transmission”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, c. 19, sayı 5, ss. 675–684, 2018.
- [38] R. Meziane, P. Cardou ve M. J. D. Otis, “Cable interference control in physical interaction for cable-driven parallel mechanisms”, *Mechanism and Machine Theory*, c. 132, ss. 30–47, 2019.
- [39] L. Barbazza, D. Zanotto, G. Rosati ve S. K. Agrawal, “Design and Optimal Control of an Underactuated Cable-Driven Micro-Macro Robot”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, c. 2, sayı 2, ss. 896–903, 2017.
- [40] B. Zi, G. Yin ve D. Zhang, “Design and optimization of a hybrid-driven waist rehabilitation robot”, *Sensors*, c. 16, sayı 12, 2016.
- [41] E. Idá, J.-P. Merlet ve M. Carricato, “Automatic Self-Calibration of Suspended Under-Actuated Cable-Driven Parallel Robot using Incremental Measurements”, *International Conference on Cable-Driven Parallel Robots*, c. 74, ss. 333–344, 2019.
- [42] F. Zhang, W. Shang, B. Zhang ve S. Cong, “Design Optimization of Redundantly Actuated Cable-Driven Parallel Robots for Automated Warehouse System”, *IEEE Access*, c. 8, ss. 56867–56879, 2020.

- [43] J. Hanafie, L. Nurahmi, S. Caro ve B. Pramujati, “Design optimization of spatial four cables suspended cable driven parallel robot for rapid life-scan”, *AIP conference proceedings*, c. 1983, sayı 1, ss. 60007, 2018.
- [44] A. A. Süzen, O. Ceylan, A. Çetin ve A. Ulusoy, “Arduino Kontrollü Çizim Robotu”, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 8, sayı 1, ss. 79-87, 2017.
- [45] Á. Hámori, J. Lengyel ve B. Reskó, “3DOF drawing robot using LEGO-NXT”, *IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems*, ss. 293–295, 2011.
- [46] M. Y. Özsağlam ve M. Çunkaş, “Particle Swarm Optimization Algorithm for Solving Optimization Problems”, *Journal of Polytechnic-Politeknik Dergisi*, c. 11, sayı 4, ss. 299–305, 2008.
- [47] Pakize Erdoğan, “Doğadan Esinlenen Optimizasyon Algoritmaları ve Optimizasyon Algoritmalarının Optimizasyonu”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 4, ss. 293–304, 2016.
- [48] D. E. Goldberg ve J. H. Holland, “Genetic Algorithms and Machine Learning”, *Machine Learning*, c. 3, sayı 2, ss. 95–99, 1988.
- [49] F. Çalışkan, H. Yüksel ve M. Dayık, “Genetik Algoritmaların Tasarım Sürecinde Kullanılması”, *Teknik Bilimler Dergisi*, c. 6, sayı 2, 2016.
- [50] B. Gürsu ve M. C. İnce, “Başlangıç popülasyonu düzgün dağılımlı bir genetik algoritma”, *28. YA/EM Ulusal Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [51] M. Gerşil ve T. Palamutçuoğlu, “Ders Çizelgeleme Probleminin Melez Genetik Algoritmalar İle Performans Analizi”, *Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, c. 6, sayı 1, ss. 242–262, 2013.
- [52] Anonim (2021, 03 Ağustos). *Mutasyon (genetik algoritma)*. [Çevrimiçi]. Erişim: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Mutasyon\\_\(genetik\\_algoritma\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Mutasyon_(genetik_algoritma)).

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Serkan TELCİ

Yabancı Dili : İngilizce

## ÖĞRENİM DURUMU

| Derece    | Alan                                   | Okul/Üniversite                             | Mezuniyet Yılı |
|-----------|----------------------------------------|---------------------------------------------|----------------|
| Y. Lisans | Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Müh. | Düzce Üniversitesi                          | 2021           |
| Lisans    | Bilgisayar Mühendisliği                | Süleyman Demirel Üniversitesi               | 2017           |
| Lisans    | Bilgisayar Sistemleri Öğretmenliği     | Süleyman Demirel Üniversitesi               | 2013           |
| Lise      | Bilişim Teknolojileri Alanı            | Aydın Anadolu Teknik Listesi ve Teknik Lise | 2009           |

## YAYINLAR

- 1- S. TELCİ, *Ionic Framework Kullanarak Mobil Uygulama (Android ve IOS) Geliştirme*, Ankara, Türkiye: Seçkin Yayıncılık, ss. 392, 2019.
- 2- S. TELCİ ve M. TOZ, “Değişken Bağlantı Nokta Sayısına Sahip Kablo Kontrollü Düzlemsel Bir Paralel Robot Mekanizmasının Geometrik Optimizasyonu”, *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, c. 3, sayı 1, ss. 24-43, 2021.