



Değişken Bağlantı Nokta Sayısına Sahip Kablo Kontrollü Düzlemsel Bir Paralel Robot Mekanizmasının Geometrik Optimizasyonu
Geometrical Optimization of a Planar Cable Controlled Parallel Robot Mechanism with Variable Connection Points

Serkan TELCİ^{1,*}, Metin Toz²

¹Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye

²Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karamanoglu Mehmetbey Üniversitesi, Karaman, Türkiye

(Alındı: 11 Nisan 2021; Kabul edildi: 22 Haziran 2021)

Özet. Bu çalışmada düzlemsel kablo kontrollü bir çizim robotu için geometrik optimizasyon yapan bir sistem önerilmiştir. Bu sistem, kullanıcıdan aldığı örnek resmin robot tarafından çizilebilmesini sağlayacak optimum geometrik tasarımı önermektedir. Sistem giriş olarak, örnek resim ve kablo kontrollü robot için istenilen köşe noktası sayısını almakta ve bu bilgileri kullanarak robot mekanizmasının kablo uzunluklarını ve kabloların kaleme bağlantı noktalarını optimize etmektedir. Optimizasyon aracı olarak Genetik Algoritma kullanılmıştır. Önerilen sistemin test edilmesi amacıyla iki farklı resim ve üç farklı köşe noktası için geometrik optimizasyon yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: kablo kontrollü robot, paralel robot, düzlemsel çizim robotu, optimizasyon, genetik algoritma.

Abstract. In this study, a geometric optimization system is proposed for a planar cable driven drawing robot. This system proposes the optimum geometric design that will enable the robot to draw a sample picture taken from the user. The system takes the sample picture and the desired 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. Genetic Algorithm was used as an optimization tool. In order to test the proposed system, geometric optimization has been made for two different pictures and three different corner point numbers and the results obtained are presented comparatively.

Keywords: cable driven robot, parallel robot, planar drawing robot, optimization, genetic algorithm.

1. Giriş

Paralel manipulatörler teknolojiye son gelişmeler ile birlikte yüksek hassasiyet gerektiren birçok endüstriyel uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun nedeni paralel manipulatörlerin yüksek yük taşıma kapasitesine, dayanıklılığa ve doğruluğa, iyi kararlılığa, yüksek hız uygulamalarında çalıştırılabilirliğe, iyi bir dinamik performans ve hassas konumlandırma gibi özelliklere sahip olmasıdır. Kablo kontrollü paralel robotlar (CDPR'ler), temel çerçeve ve hareketli platformdan oluşur. Motorlar tarafından hareket ettirilen kasnaklar 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, yük taşıma kapasitesinin yüksek olması, yüksek hız ve ivme gibi kabloların sağladığı çeşitli avantajlar nedeniyle sanayide kullanımı giderek artmıştır.[1, 6]. CDPR'ler, sabit boyuttaki paralel robotlara kıyasla daha geniş bir çalışma alanına sahip tasarım çözümlerine izin verir [2]. 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[3]. Bu robot, birkaç farklı uygulama için kullanılmıştır, örn. kesme, şekillendirme, bitirme, kaldırma ve konumlandırma. 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[4]. Yedi kabloyla kontrol edilen bu robot, yüksek hassasiyet ve sertlik gerektiren uygulamalar için kullanılmıştır. Kablo robotları, klasik paralel mekanizmalara kıyasla geniş çalışma alanları ve yüksek sertlikleri nedeniyle inşaat görevleri için de kullanılır. Örneğin Pinto ve ark. [5], mimari projeleri için dört serbestlik dereceli bir robot olan SPIDER Robot'u önermişlerdir. CDPR'ler ayrıca rehabilitasyon

sistemi [7], arama kurtarma işlemlerinde kullanılacak termal kameralarla yaralının yerini algılayan kurtarma robotu [8], radyo teleskopu [9] vb. gibi diğer birçok farklı uygulamada kullanılmışlardır. Literatüre bakıldığında kablo kontrollü robotlar konusunda birçok optimizasyon çalışmaları yapıldığı görülmektedir. Bazı çalışmalarda kablo gerginlikleri optimize edilirken [10, 11, 12], bazı çalışmalarda uç işlevci ile kabloların bağlantı noktaları optimize edilmiş [13, 14], bazı çalışmalarda ise mekanizma çalışma alanı optimize edilmiştir [15, 16].

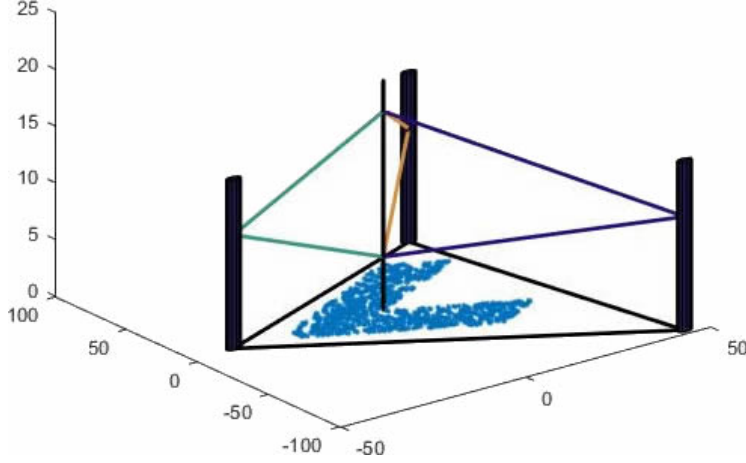
Bu çalışmada, bir düzlem üzerine çizilecek bir resim için kullanılacak bir kablo kontrollü paralel robotun geometrik optimizasyonunu yapan bir sistem önerilmektedir. Önerilen sistem, 3, 4 ve 6 köşe noktası üzerinden iki farklı formdaki resim ile çalıştırılmış, oluşan minimum bağ uzunlukları, bulunan 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 önerilen düzlemsel, kablo kontrollü paralel robotun tanıtımı ve ters kinematik hesabı sunulmuştur. Üçüncü bölümde robotun optimizasyonu için kullanılan optimizasyon problemi tanımlanmış ve GA ile bu optimizasyon probleminin çözümü için önerilen amaç fonksiyon sunulmuştur. Dördüncü bölümde örnek resim ve bağlantı nokta sayıları kullanılarak önerilen sistem test edilmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Son bölümde ise çalışma sonuçlandırılmıştır.

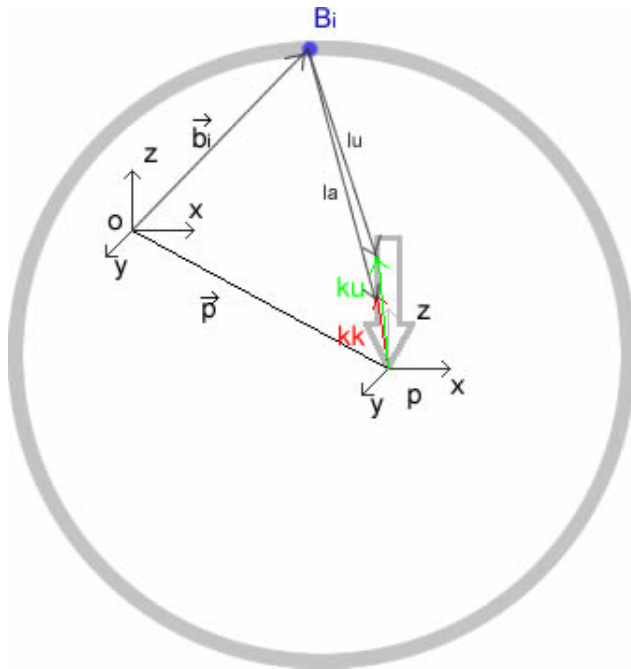
2. Düzlemsel Çizim Robotu ve Ters Kinematik Hesabı

Bu bölümde optimizasyonu gerçekleştirilen kablo kontrollü düzlemsel paralel çizim robotu tasarımı ve ters kinematik hesabı sunulmuştur. Bu çalışmada konu edilen robota benzer çalışmalara literatürden iki örnek şu şekilde verilebilir. Süzen ve diğ. çalışmalarında da yazı tahtası üzerine çizim yapabilecek iki kablo ile kontrol edilen bir robot tasarlamışlardır [17]. Hamori ve diğ. ise sabit platform üzerine monte edilen ve motorlara bağlı eksenlerle kolun hareketi sonucunda çizimin gerçekleştiği bir robot tasarlanmışlardır [18]. Bu çalışmada bu mekanizmalardan farklı olarak bağlantı noktaları değişebilen ve yapılacak işe göre optimize edilebilen bir sistem önerilmektedir.

Aşağıda önerilen mekanizmanın iki farklı çizimi sunulmuştur. Şekil 1’de mekanizmanın üç adet bağlantı noktası kullanılarak elde edilen formu, Şekil 2’de ise kalem ve köşe bağlantılarının detayları sunulmuştur. İlk şekilde görüldüğü gibi mekanizma tam olarak yapacağı çizime uygun bir tasarımla elde edilmektedir.



Şekil 1. Mekanizmanın üç adet bağlantı noktası kullanılarak elde edilen formu



Şekil 2. Kalem ve köşe bağlantılarının detayları

Şekil 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 sisteminde, 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;

$$b_i + l_u = P + Rk_u \quad (1)$$

Alt kablo bağlantıları için;

$$b_i + l_a = P + Rk_k \quad (2)$$

Denklemlerde R matrisi, kalem koordinat sisteminin sabit koordinat sistemine göre yönelimini ifade eden 3×3 lük yönelim matrisidir. Denklemler 1 ve 2 yeniden düzenlenirse bağ uzunlukları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$l_u = \text{norm}(P + Rk_u - b_i) \quad (3)$$

$$l_a = \text{norm}(P + Rk_k - b_i) \quad (4)$$

Bu denklemlere göre üç bağlantı noktasına sahip örnek bir mekanizma tasarımı şu şekilde olabilir. Köşe noktaları $b_1 = [44.41 \ -96.40 \ 15]$, $b_2 = [30.27 \ 60.97 \ 15]$ $b_3 = [-39.15 \ 3.48 \ 15]$, kalem bağlantı noktaları $k_k = [0.2 \ 0 \ 4.84]$ ve $k_u = [0.2 \ 0 \ 17.66]$, p noktası $p = [0 \ 0 \ 0]$ ve son olarak yönelim matrisi $R = [1 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 1]$ alınırsa bağ uzunlukları Tablo 1'deki gibi elde edilecektir.

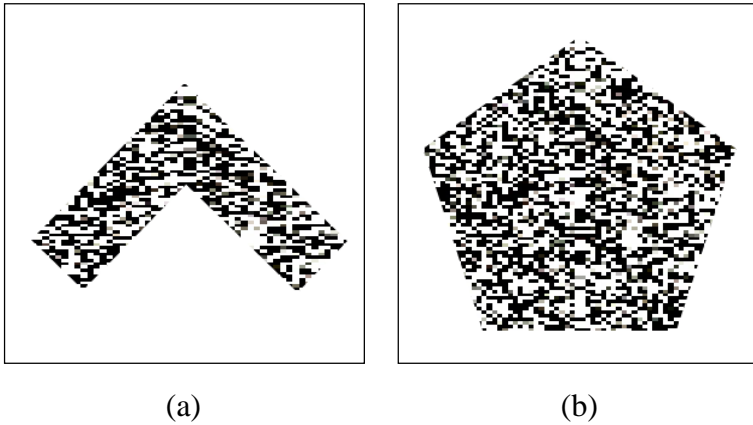
Tablo 1

Bağ uzunlukları

Kablo	l_{u1}	l_{a1}	l_{u2}	l_{a2}	l_{u3}	l_{a3}
Uzunluk	68.03	68.74	39.59	40.79	106.53	106.08

3. Önerilen Geometrik Optimizasyon Yaklaşımı ve Amaç Fonksiyon Tanımı

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 3'te verilmiştir. Köşe sayıları ise kullanıcı tarafından belirlenmektedir.



Şekil 3. Bu çalışmada kullanılan örnek resimler

Yapılacak geometrik optimizasyonunun 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.

$$A = \text{norm}(P + Rk_{ki} - B_i) \quad (5)$$

$$A = \text{norm}(P + Rk_{ui} - B_i) \quad (6)$$

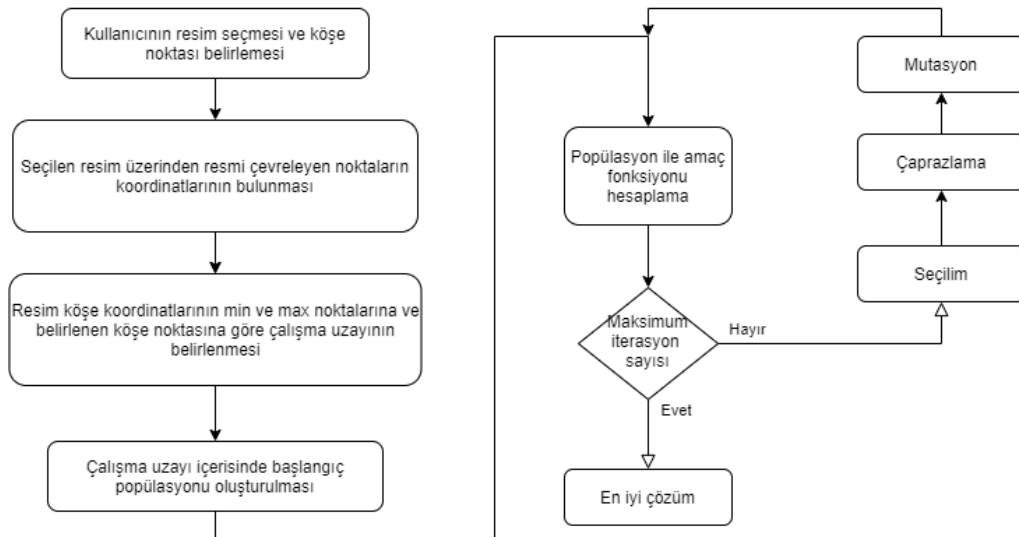
Denklemden A amaç fonksiyon, $norm$ ise vektör uzunluğunu veren fonksiyondur. Ayrıca optimizasyonda $k_k = [0.2 \ 0 \ x_k]$ ve $k_u = [0.4 \ 0 \ x_u]$ olarak alınmıştır. Bu ifadelerdeki x_k ve x_u değerleri mekanizmanın optimize edilecek kalem bağlantı noktalarının z koordinatlarıdır.

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 çizebildiği sürece resim üzerindeki tüm noktaları çizebileceğinden; sadece resmin dış çerçevesine bakılması algoritmanın çalışma süresini kısaltacaktır. 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 çalıştırdıktan sonra elde edilen noktalar çizilecek resmin gerçek noktalarını verdiğinden, çalışma uzayı elde edilen çerçeve noktalarının 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 aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$A = \begin{cases} \min(norm(P + Rk_{ki} - B_i)) \\ \min(norm(P + Rk_{ui} - B_i)) \\ 0 < x_k < 10 \\ 10 < x_u < 20 \\ \min_u < P_x, P_y, P_z < \max_u \end{cases} \quad (7)$$

Denklemdede, 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 maksimum değerlerini ifade etmektedir.

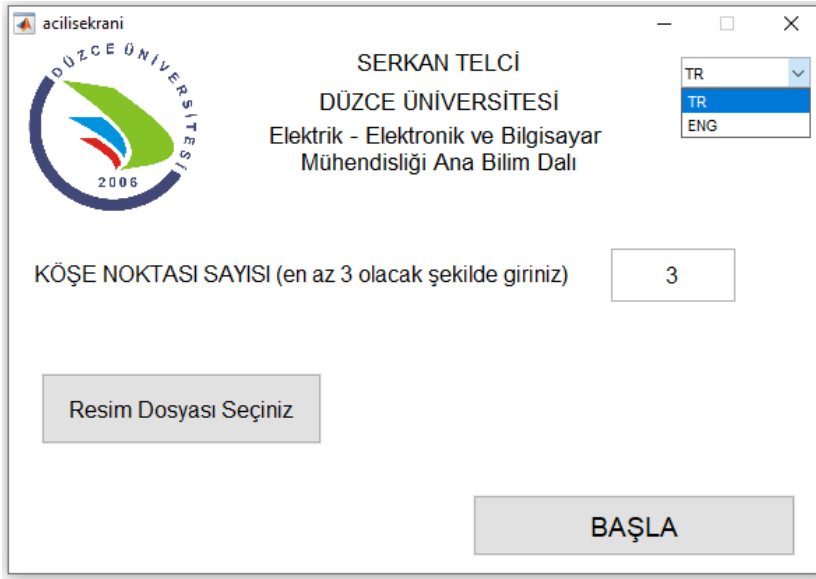
Genetik algoritmalar, doğal seçim ilkelerine dayanan bir arama ve optimizasyon algoritmasıdır. Temel ilkeleri John Holland tarafından ortaya atılmıştır. Genetik algoritmalar kullanılarak, fonksiyon optimizasyonu, çizelgeleme, mekanik öğrenme, tasarım, hücreyel üretim gibi alanlarda uygulamalar geliştirilmektedir. 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 [19]. Bu çalışmada önerilen geometrik optimizasyon işlemi için GA kullanılmıştır. Genetik algoritma kullanılarak yapılan optimizasyonda, ilk olarak, okunan resim sonucu oluşan çalışma uzayı içerisinde 100 popülasyona sahip rastgele köşe noktaları belirlenmektedir. Oluşan noktalar amaç fonksiyona gönderilerek mekanizmanın bağ uzunlukları hesaplatılmaktadır. Ardından, hesaplama sonucu elde edilen bağ uzunlukları minimize etme 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. Önerilen geometrik optimizasyon işlemi akış diyagramı

4. Deneysel Çalışmalar

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. Ara yüze Türkçe ve İngilizce dil seçenekleri eklenmiştir. Oluşturulan ara yüz Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Önerilen geometrik optimizasyon arayüzü

Şekil 5 yardımıyla kullanıcıdan resim dosyası seçmesi ve köşe noktası sayısı girilmesi sağlanmaktadır. Kullanıcının BAŞLA butonuna basmasıyla optimizasyon işlemi başlamaktadır. Bu çalışmada geliştirilen sistemin test edilmesi için 2 farklı resim ve 3'er farklı köşe noktası sayısı belirlenmiş, bu şekilde toplam 6 adet optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve sonuçları sunulmuştur. Örnek resimler Şekil 3'te verilmiştir. Geliştirilen sistem ile yapılan toplam altı optimizasyon işlemi aşağıda sunulmuştur.

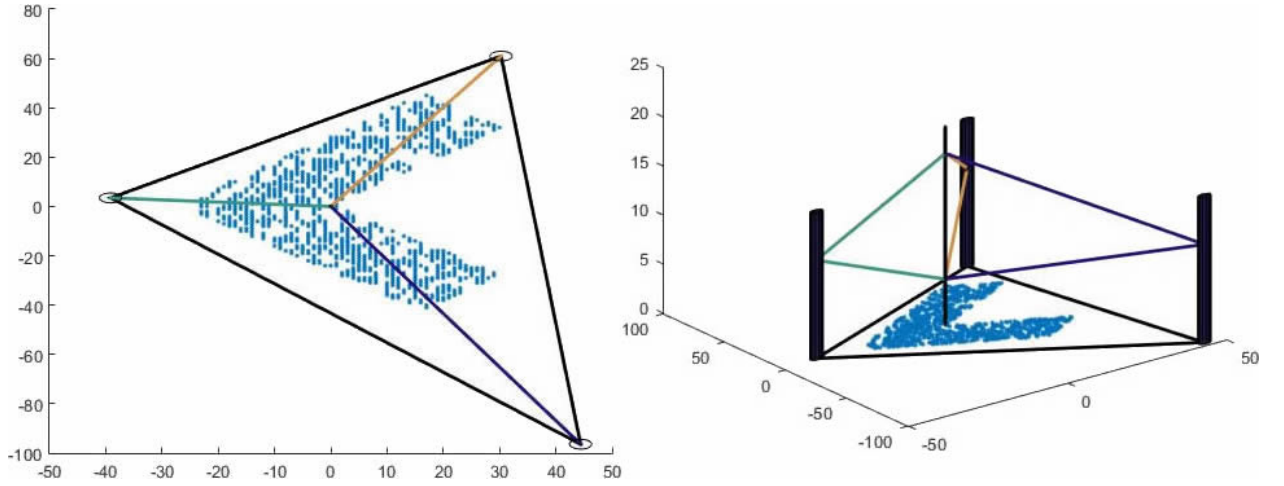
Optimizasyon1: Resim 3 a için köşe sayısı 3 olarak seçilip çalıştırılması: Algoritma arayüzü üzerinden Şekil 3 a'da verilen resim seçilerek ve köşe noktası sayısı 3 girilerek algoritma çalıştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilen köşe noktalarının koordinatları, kaleme bağlantı noktalarının (ku ve kk) koordinatları, kablo uzunlukları ve oluşan mekanizmanın alanı Tablo 2'te gösterilmiştir.

Tablo 2

Resim 3 a ve 3 köşe noktası için oluşan sonuçlar

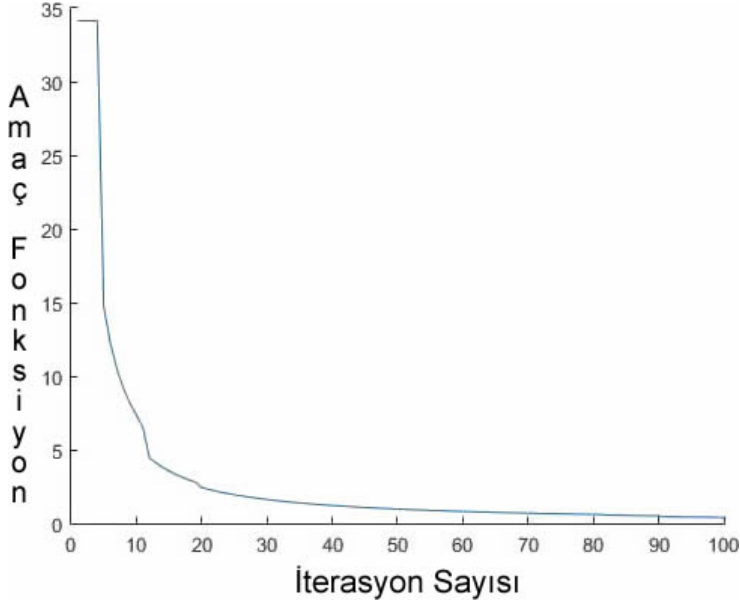
Köşe noktaları koordinatları	$\mathbf{b}_1 = [44.41 \quad -96.40 \quad 15]$ $\mathbf{b}_2 = [30.27 \quad 60.97 \quad 15]$ $\mathbf{b}_3 = [-39.15 \quad 3.48 \quad 15]$
Kalem bağlantı noktaları	$kk = [0.2 \quad 0 \quad 4.84]$ $ku = [0.2 \quad 0 \quad 17.66]$
Oluşan kablo uzunlukları	0.396
Mekanizmanın alanı	5868

Tablo 2’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 4’te verilmiştir.



Şekil 4: Resim 3 a ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünümü

Şekil 4’e 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’te verilmiştir.



Şekil 5. Resim 3 a ve 3 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği

Tablo 2’de verilen bilgiler ile Şekil 5 incelendiğinde genetik algoritmanın başarılı şekilde çalıştığı ve verilen girdilere göre mekanizmayı optimize ettiği görülmektedir.

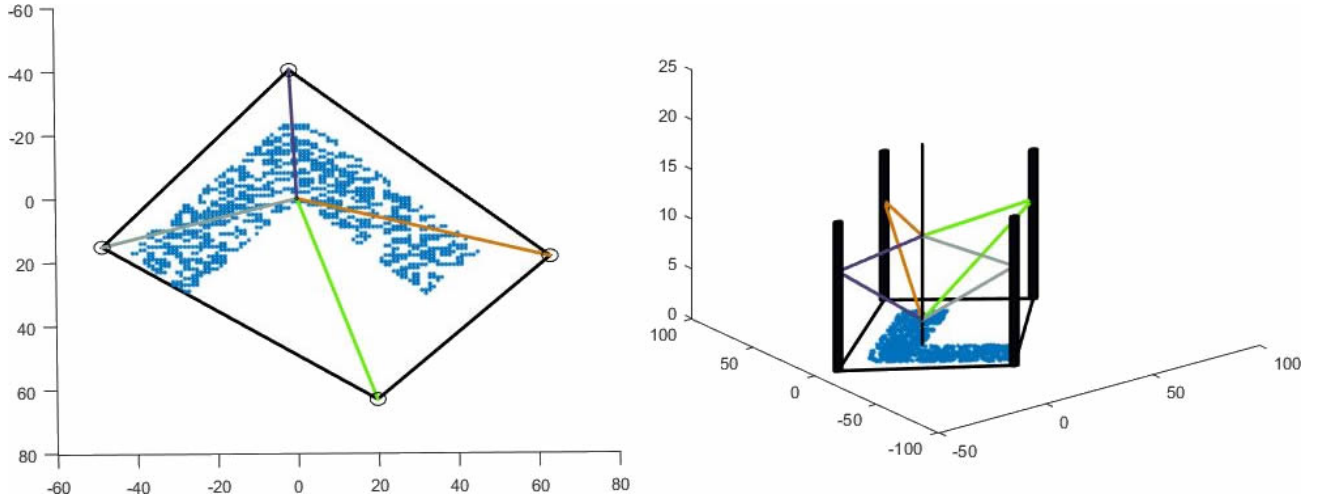
Diğer 5 optimizasyon işlemi için aşağıda sadece giriş değişkenleri ve elde edilen sonuçlar tablo ve grafiklerle sunulmuştur. Değerlendirme ise tüm sonuçlara göre tüm optimizasyon işlemlerinden sonra yapılmıştır.

Optimizasyon 2: Resim 3 a için köşe sayısı 4 olarak seçilip çalıştırılması:

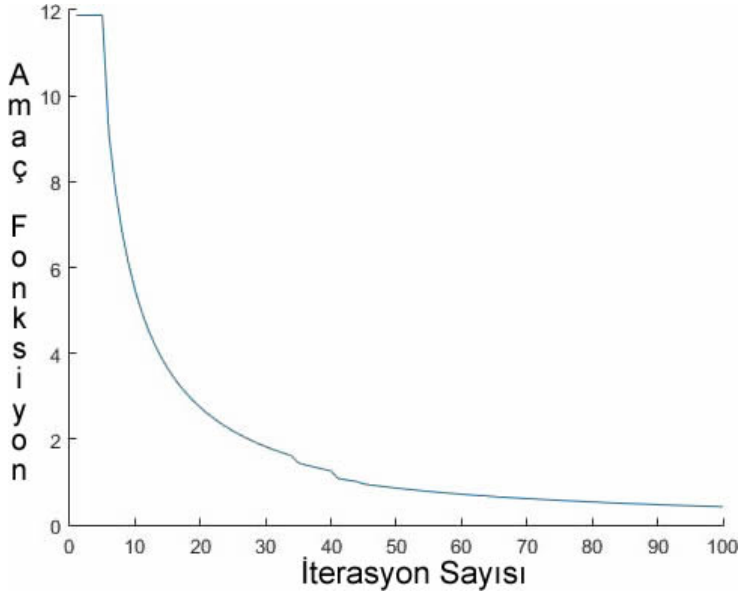
Tablo 3

Resim 3 a ve 4 köşe noktası için oluşan sonuçlar

Köşe noktaları koordinatları	$\mathbf{b}_1 = [63.24 \ 19.72 \ 15]$ $\mathbf{b}_2 = [18.39 \ 62.98 \ 15]$ $\mathbf{b}_3 = [-15.06 \ -48.61 \ 15]$ $\mathbf{b}_4 = [-40.40 \ -1.66 \ 15]$
Kalem bağlantı noktaları	$kk = [0.2 \ 0 \ 2.69]$ $ku = [0.2 \ 0 \ 11.13]$
Oluşan kablo uzunlukları	0.424
Mekanizmanın alanı	5745



Şekil 6. Resim 3 a ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü



Şekil 7. Resim 3 a ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği

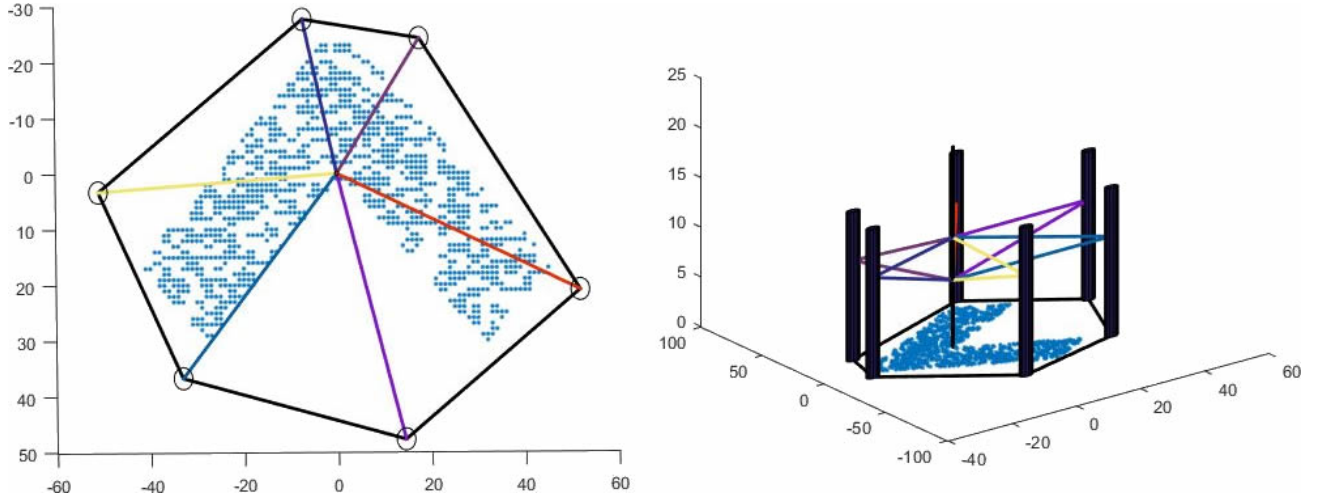
Optimizasyon 3: Resim 3 a için köşe sayısı 6 seçilip çalıştırılması:

Tablo 4

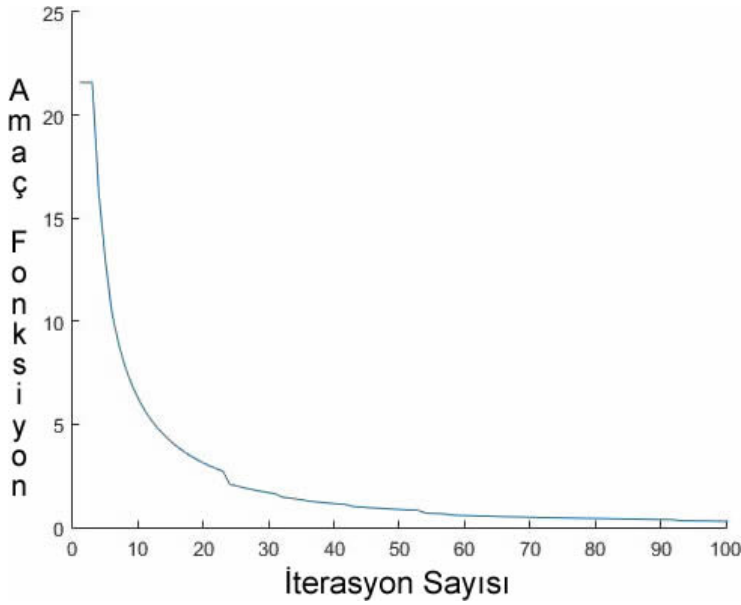
Resim 3 a ve 6 köşe noktası için oluşan sonuçlar

Köşe noktaları koordinatları	$\mathbf{b}_1 = [20.97 \ 51.79 \ 15]$
	$\mathbf{b}_2 = [36.71 \ -33.14 \ 15]$
	$\mathbf{b}_3 = [47.77 \ 14.34 \ 15]$

	$\mathbf{b}_4 = [-24.27 \ 17.80 \ 15]$
	$\mathbf{b}_5 = [3.25 \ -51.00 \ 15]$
	$\mathbf{b}_6 = [-27.70 \ -7.07 \ 15]$
Kalem bağlantı noktaları	$kk = [0.2 \ 0 \ 6.93]$
	$kk = [0.2 \ 0 \ 11.22]$
Oluşan kablo uzunlukları	0.299
Mekanizmanın alanı	4888



Şekil 8. Resim 3 a ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü



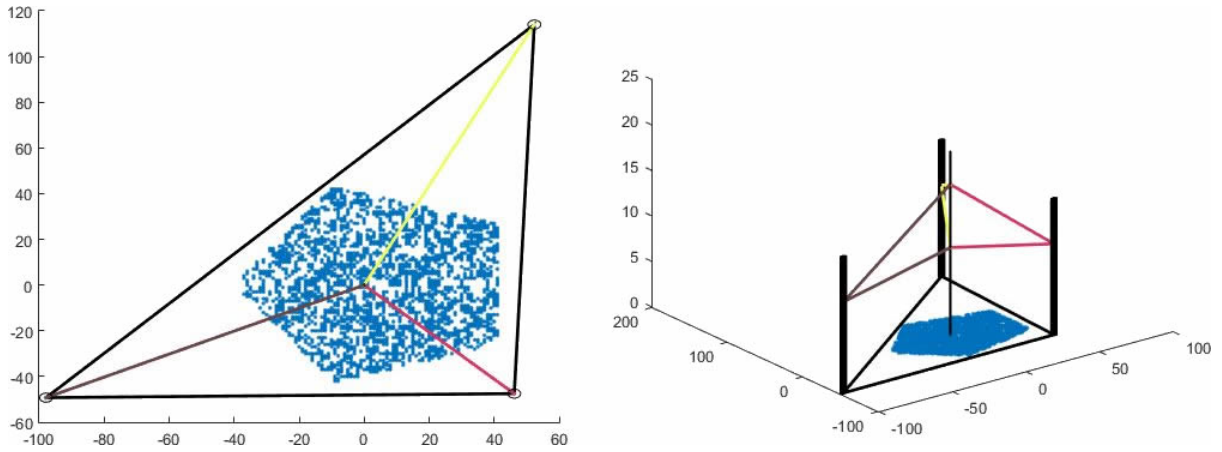
Şekil 9. Resim 3 a ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği

Optimizasyon 4: Resim 3 b için köşe sayısının 3 seçilip çalıştırılması:

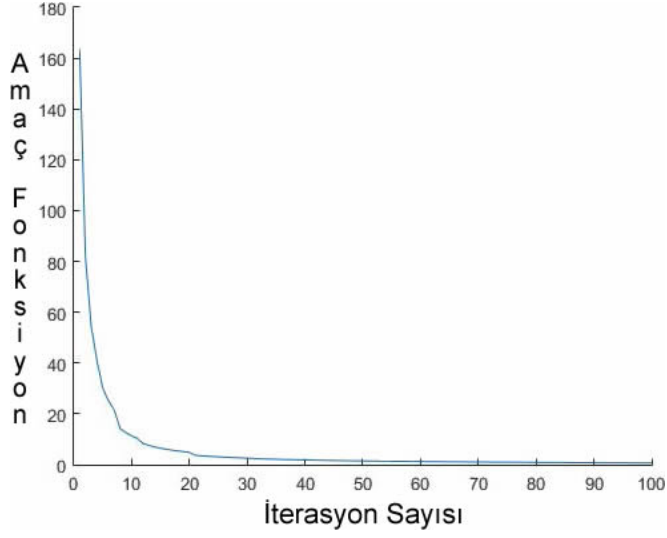
Tablo 5

Resim 3 b ve 3 köşe noktası için oluşan sonuçlar

Köşe noktaları koordinatları	$\mathbf{b}_1 = [52.35 \quad 113.99 \quad 15]$ $\mathbf{b}_2 = [-97.87 \quad -49.26 \quad 15]$ $\mathbf{b}_3 = [46.18 \quad -47.51 \quad 15]$
Kalem bağlantı noktaları	$kk = [0.2 \quad 0 \quad 9.81]$ $ku = [0.2 \quad 0 \quad 16.76]$
Oluşan kablo uzunlukları	0.661
Mekanizmanın alanı	11627



Şekil 10. Resim 3 b ve 3 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü



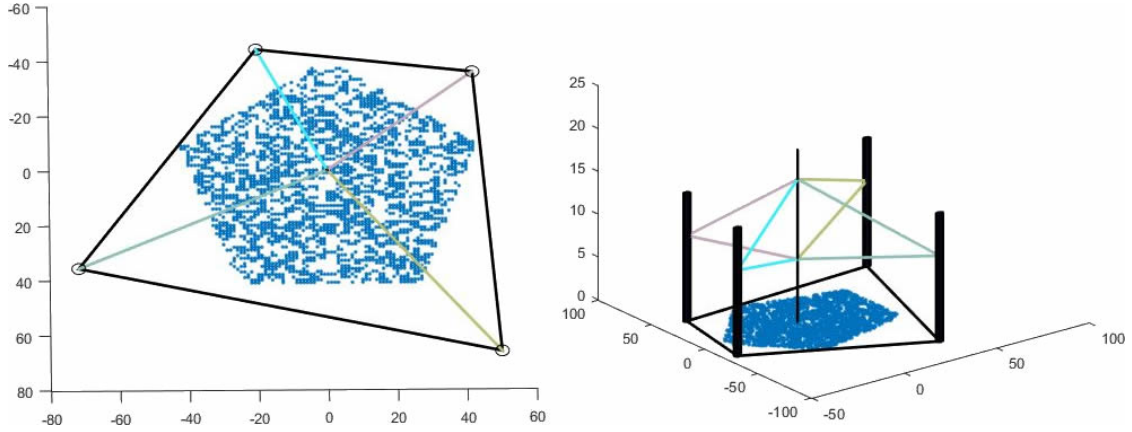
Şekil 11. Resim 3 b ve 6 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği

Optimizasyon 5: Resim 3 b için köşe sayısının 4 seçilip çalıştırılması:

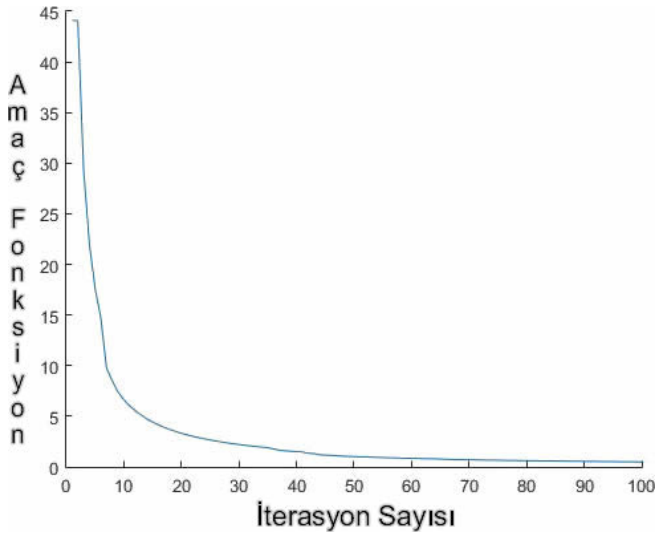
Tablo 6

Resim 3 b ve 4 köşe noktası için oluşan sonuçlar

Köşe noktaları koordinatları	$\mathbf{b}_1 = [-35.64 \quad 42.07 \quad 15]$ $\mathbf{b}_2 = [35.53 \quad -71.82 \quad 15]$ $\mathbf{b}_3 = [66.25 \quad 49.96 \quad 15]$ $\mathbf{b}_4 = [-44.14 \quad -20.24 \quad 15]$
Kalem bağlantı noktaları	$kk = [0.2 \quad 0 \quad 7.57]$ $ku = [0.2 \quad 0 \quad 16.91]$
Oluşan kablo uzunlukları	0.493
Mekanizmanın alanı	8784



Şekil 12. Resim 3 b ve 4 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü



Şekil 13. Resim 3 b ve 4 köşe noktası için iterasyon sayısı – amaç fonksiyon grafiği

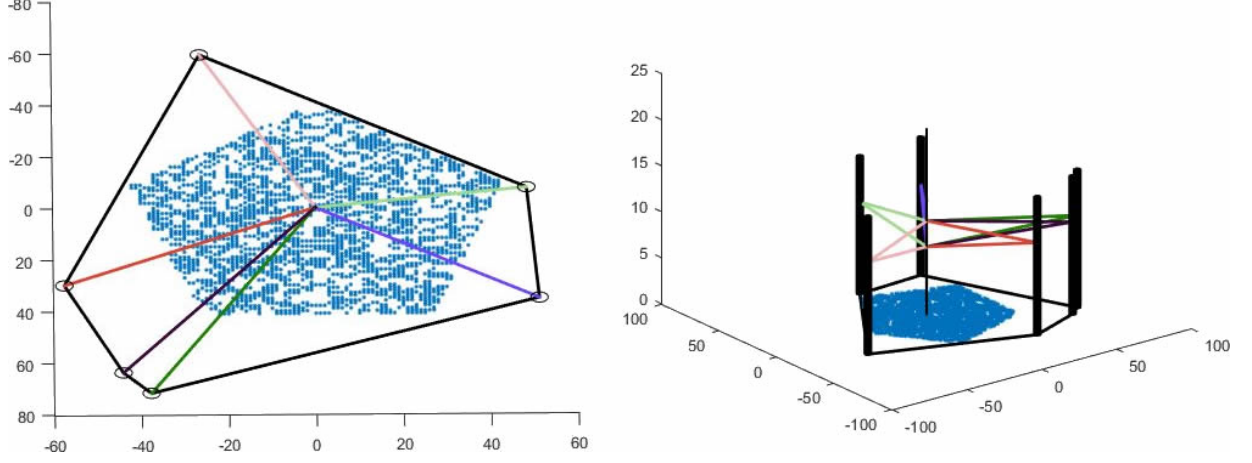
Optimizasyon 6: Resim 3 b için köşe sayısının 6 seçilip çalıştırılması:

Tablo 7

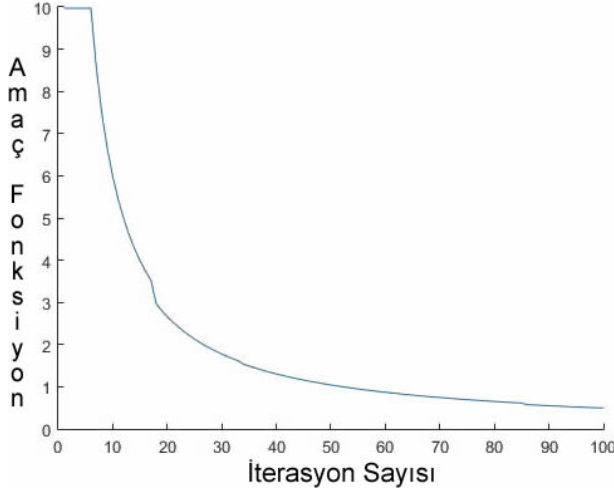
Resim 3 b ve 6 köşe noktası için oluşan sonuçlar

Köşe noktaları	$\mathbf{b}_1 = [37.92 \quad -38.63 \quad 15]$	$\mathbf{b}_2 = [-7.96 \quad 56.43 \quad 15]$
koordinatları	$\mathbf{b}_3 = [47.44 \quad 38.19 \quad 15]$	$\mathbf{b}_4 = [-45.97 \quad -49.74 \quad 15]$
	$\mathbf{b}_5 = [65.08 \quad 1.65 \quad 15]$	$\mathbf{b}_6 = [-36.39 \quad 15.44 \quad 15]$
Kalem bağlantı noktaları	$\mathbf{k}_k = [0.2 \quad 0 \quad 8.21]$	
	$\mathbf{k}_u = [0.2 \quad 0 \quad 11.35]$	
Oluşan kablo uzunlukları	0.403	

Mekanizmanın 8038
alanı



Şekil 14. Resim 3 b ve 6 köşe noktası üzerinden çalışan algoritma sonucu oluşan mekanizmanın üstten ve yandan görünüşü



Şekil 15. Resim 3 b ve 6 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. Bu sonuç önerilen teknik ile seçilen bir görevi minimum bağ uzunlukları ile gerçekleştirebilecek ve bağlantı noktalarının kolaylıkla güncellenebildiği kablo kontrollü robot mekanizmalarının tasarımının, sabit tasarıma sahip robotlara göre en temel avantajı olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, bağlantı noktalarının güncellenebilmesi sayesinde robotun yapacağı

görev değiştiği zaman robotun tamamıyla değiştirilmesi yerine sadece bağlantı noktalarının güncellenmesi ile aynı görev yerine getirilebilecektir. Bu durum özellikle maliyet ağısından bir avantaj olarak görülebilir. Son olarak amaç fonksiyon değerleri ile iterasyon sayıları arasındaki grafikler de algoritmanın optimum çözümlere başarılı bir şekilde yakınsadığını göstermektedir.

5. Sonuç

Bu çalışmada bir düzlemsel kablo kontrollü çizim robotu için geometrik optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon sürecinde kullanıcıdan mekanizmanın çizeceği resmi ve köşe bağlantı noktalarını seçmesi ardında da buna göre mekanizmanın ve uç işlevci bağlantı noktalarının optimizasyonunun yapılması sağlanmıştır. Önerilen sistem 6 farklı optimizasyon seçeneği ile test edilmiş ve elde edilen sonuçlar ile algoritmanın başarılı bir şekilde mekanizmanın ve uç işlevci bağlantı noktalarının konumunun optimizasyonunu yapabildiği gösterilmiştir.

Optimizasyon sonuçlarındaki görseller incelendiğinde, oluşan mekanizmanın kapladığı alanın optimum olabilmesi için, çizilmesi istenilen girdi resmi üzerinden köşe sayısı belirlenmesi gerektiği görülmektedir. Şekil 3 (a) ve Şekil 3 (b) için köşe sayısı artırıldığında oluşan mekanizmanın kapladığı alanın küçüldüğü görülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Martin A., Caro S., Cardou P., Design of a cable-driven parallel robot with grasping device, *Procedia Cirp*, 70: 290-295, (2018).
- [2] Hamida Ines B., et al., Multi-Objective optimal design of a cable driven parallel robot for rehabilitation tasks, *Mechanism and Machine Theory*, 156: 104141, (2021).
- [3] Albus J., Bostelman R., Dagalakis N., The Nist Spider, a robot Crane, *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 97.3: 373, (1992).
- [4] Tang X., An overview of the development for cable-driven parallel manipulator, *Advances in Mechanical Engineering*, 6: 823028, (2014).

- [5] Pinto A. M., et al., A cable-driven robot for architectural constructions: a visual-guided approach for motion control and path-planning, *Autonomous Robots*, 41.7: 1487-1499, (2017).
- [6] Hassan M., Khajepour A., Optimization of actuator forces in cable-based parallel manipulators using convex analysis, *IEEE Transactions on Robotics*, 24.3: 736-740, (2008).
- [7] Cui X., et al., 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*, 22.1: 161-172, (2016).
- [8] Merlet J.P., Daney D., A portable, modular parallel wire crane for rescue operations. In: 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, p. 2834-2839, (2010).
- [9] Duan B.Y., et al., On design and experiment of the feed cable-suspended structure for super antenna, *Mechatronics*, 19.4: 503-509, (2009).
- [10] Geng X., et al., Analytical tension-distribution computation for cable-driven parallel robots using hypersphere mapping algorithm, *Mechanism and Machine Theory* 145, (2020).
- [11] Wang Z., et al., A clamping force estimation method based on a joint torque disturbance observer using PSO-BPNN for cable-driven surgical robot end-effectors, *Sensors* 19.23, (2019).
- [12] Zou Y., et al., Design and optimization of movable cable-driven lower-limb rehabilitation robot, In: 2018 3rd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM). IEEE, p. 714-719, (2018).

- [13] Bolboli J., Khosravi M.A., Abdollahi F. Analysis of the stiffness feasible workspace of the cable-driven parallel robots, In: 2017 5th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM). IEEE, 2017. p. 45-50.
- [14] Zou Y., et al., Design and experimental research of movable cable-driven lower limb rehabilitation robot. *IEEE Access*, 7: 2315-2326, (2018).
- [15] Hong H., Ali J., Ren L., A review on topological architecture and design methods of cable-driven mechanism, *Advances in mechanical engineering*, 10.5: 1687814018774186, (2018).
- [16] Zhang S., et al., Analysis on variable stiffness of a cable-driven parallel–series hybrid joint toward wheelchair-mounted robotic manipulator, *Advances in Mechanical Engineering*, 11.4: 1687814019846289, (2019).
- [17] Süzen A.A., et al., Arduino Kontrollü Çizim Robotu, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8.Özel (Special) 1: 79-87, (2017).
- [18] Hamori A., Lengyel J., Resko B., 3DOF drawing robot using LEGO-NXT, In: 2011 15th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems. IEEE, p. 293-295, (2011).
- [19] Goldberg D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, USA, 1-7, (1989).