



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ASİMETRİK ÜÇ SERBESTLİK DERECELİ BİR DÜZLEMSEL
PARALEL ROBOT MEKANİZMASININ TASARIMI VE
OPTİMİZASYONU**

CAHİT EMRE CANDAN

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

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ METİN TOZ**

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Asimetrik Üç Serbestlik Dereceli Bir Düzlemsel Paralel Robot
Mekanizmasının Tasarımı ve Optimizasyonu

Cahit Emre Candan tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Metin TOZ
Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Devrim AKGÜN
Sakarya Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Metin TOZ
Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa AYYILDIZ
Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 01/07/2019

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.

01 Temmuz 2019

Cahit Emre CANDAN

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Metin TOZ'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili Eşim Tuğba Betül, Oğlum Erdem Selim ve İşyerim Erdemir T.A.Ş.'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

01 Temmuz 2019

Cahit Emre CANDAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	viii
KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. SERİ VE PARALEL ROBOTLAR.....	3
2.1. SERİ ROBOTLAR	3
2.2. PARALEL ROBOTLAR	4
2.2.1. Simetrik ve Asimetrik Paralel Robotlar	4
2.3. SERİ VE PARALEL ROBOT KIYASLAMA.....	6
3. ALO (KARINCA ASLANI OPTİMİZASYON) ALGORİTMASI... 8	
4. ÜÇ SD'LI ASİMETRİK PARALEL ROBOT MEKANİZMASININ GEOMETRİK OPTİMİZASYONU	11
4.1. RPR2RRR1 TİPİ ASİMETRİK 3-SD LI PARALEL ROBOT MEKANİZMASI İÇİN GEOMETRİK OPTİMİZASYON PROBLEMİ TANIMI.....	13
4.3. KISIT KOMBİNASYONU 1.....	16
4.4. KISIT KOMBİNASYONU 2.....	17
4.5. KISIT KOMBİNASYONU 3.....	18
4.6. KISIT KOMBİNASYONU 4.....	19
4.7. RPR TİPİ BACAĞIN UZUNLUĞUNUN MEKANİZMANIN ÇALIŞMA UZAYINA ETKİSİ	20
4.8. KISIT KOMBİNASYONU 5.....	21
4.9. KISIT KOMBİNASYONU 6.....	22
4.10. KISIT KOMBİNASYONU 7.....	23
4.11. RRR TİPİ BACAĞIN HER İKİ PARÇASININ UZUNLUĞUNUN MEKANİZMANIN ÇALIŞMA UZAYINA ETKİSİ.....	24
4.12. KISIT KOMBİNASYONU 8.....	24
4.13. KISIT KOMBİNASYONU 9.....	25
4.14. KISIT KOMBİNASYONU 10.....	26
4.15. ÜÇ İŞLEVÇİ KENAR UZUNLUĞUNUN ETKİSİ	27
4.16. KISIT KOMBİNASYONU 11.....	28
4.17. KISIT KOMBİNASYONU 12.....	29

4.18. KISIT KOMBİNASYONU 13.....	30
4.19. KISIT KOMBİNASYONU 14.....	31
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	36
6. KAYNAKLAR.....	37
ÖZGEÇMİŞ	39



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Örnek Seri Robot (Kuka-160) [11].....	3
Şekil 2.2. Örnek Altı Eksenli Stewart Platformu.....	5
Şekil 2.3. 3-CCC Asimetrik Paralel Robot [3].	6
Şekil 3.1. Karınca aslanı avlanma stratejisi	8
Şekil 3.2. ALO algoritması akış şeması.....	10
Şekil 4.1. RPR2RRR1 tipi 3-SD'li asimetrik paralel robot mekanizması.	11
Şekil 4.2. Çalışma uzayı tespiti için kullanılacak düzlemsel bölge.	13
Şekil 4.3. Kısıt kombinasyonu 1 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.....	17
Şekil 4.4. Kısıt kombinasyonu 2 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.....	18
Şekil 4.5. Kısıt kombinasyonu 3 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.....	19
Şekil 4.6. Kısıt kombinasyonu 4 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.....	20
Şekil 4.7. Kısıt kombinasyonu 5 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.....	21
Şekil 4.8. Kısıt kombinasyonu 6 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.....	22
Şekil 4.9. Kısıt kombinasyonu 7 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.....	23
Şekil 4.10. Kısıt kombinasyonu 8 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.....	25
Şekil 4.11. Kısıt kombinasyonu 9 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.....	26
Şekil 4.12. Kısıt kombinasyonu 10 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.....	27
Şekil 4.13. Kısıt kombinasyonu 11 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.....	29
Şekil 4.14. Kısıt kombinasyonu 12 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.....	30
Şekil 4.15. Kısıt kombinasyonu 13 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.....	31
Şekil 4.16. Kısıt kombinasyonu 14 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.....	32

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. Seri - Paralel Robot Kıyas Tablosu [24].....	7
Çizelge 4.1. Optimizasyon sonuçlarına göre belirlenen bacak ve uç işlevci kenar uzunlukları.....	33
Çizelge 4.2. Kısıt ifadeleri ve elde edilen çalışma uzayı şekilleri özet olarak.	33



KISALTMALAR

SD	Serbestlik Derecesi
ALO	Karınca Aslanı Optimizasyonu
R	Dönel Eklem
$\underline{R}$	Aktif Dönel Eklem
P	Prizmatik Eklem
$\underline{P}$	Aktif Prizmatik Eklem
O(x, y)	Temel çerçeve koordinat sistemi merkezi
P(u, v)	Uç işlevci çerçevesi koordinat sistemi merkezi
d_i	RPR tipi bacakların eklem değişkeni (i=1, 2, 3)
l_i	RRR tipi bacağı oluşturan bağların uzunlukları (i=1,2)
t	Uç işlevci kenar uzunluğudur

SİMGELER

λ	Serbestlik derecesi
θ	Aktif eklem değişkeni
σ	Yönelim açısı

ÖZET

ASİMETRİK ÜÇ SERBESTLİK DERECELİ BİR DÜZLEMSEL PARALEL ROBOT MEKANİZMASININ TASARIMI ve OPTİMİZASYONU

Cahit Emre CANDAN

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Metin TOZ

Temmuz 2019, 38 sayfa

Paralel robot mekanizmaları seri robotlara göre yüksek konumlanma hassasiyetleri ve yüksek kuvvet uygulama yetenekleri nedeniyle son yıllarda hem endüstride hem de literatürde sıkça tercih edilen mekanizmalardır. Bu tez çalışmasında da asimetrik üç serbestlik dereceli bir paralel robot mekanizmasının geometrik optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan optimizasyonda algoritma olarak Karınca Aslanı Optimizasyon Algoritması kullanılmış ve mekanizmanın farklı bacak türlerinin mekanizmanın çalışma uzayına olan etkisi incelenmiştir. Bunun için farklı kısıt kombinasyonları kullanılarak mekanizmanın çalışma uzayı hesaplanmıştır. Ayrıca her bir kısıt kombinasyonu ile elde edilen mekanizmanın performansı, hem sayısal hem de grafiksel olarak sunulmuştur.

Anahtar sözcükler: Asimetrik paralel robot mekanizması, Optimizasyon, Karınca Aslanı Algoritması.

ABSTRACT

DESIGN AND OPTIMIZATION OF AN ASYMMETRIC 3-DOF PLANAR PARALLEL ROBOT MECHANISM

Cahit Emre CANDAN

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronics
and Computer Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Metin TOZ

July 2019, 38 pages

Parallel robot mechanisms are highly preferred in the industry and literature in recent years due to their high positioning accuracy and high force application capabilities over serial robots. In this thesis, geometric optimization of an asymmetric three degree of freedom parallel robot mechanism has been realized. In the optimization, the Ant Lion Optimization Algorithm was used as the algorithm and the effect of different leg types on the workspace of the mechanism was investigated. For this purpose, the workspace of the mechanism was calculated using different constraint combinations. In addition, the performance of the mechanism obtained with each constraint combination is presented both numerically and graphically.

Keywords: Asymmetrical parallel robot mechanism, Optimization, Ant Lion Optimization Algorithm.

1. GİRİŞ

Teknolojinin hızlı ilerleyişi insanoğlunun iş yapabilme yeteneklerini de hızlı bir şekilde geliştirmektedir. Basit makineler ile başlayan ‘makinelerin insanoğlunun hayatında yer alması’ süreci günümüzde robot mekanizmaları ile devam etmektedir. Robot kelimesi insan aklına ilk olarak insansı makineleri getirirse de robot aslında birçok alanda insan uzuvlarını taklit eden otonom bir makinedir. Robotların kullanım alanlarına bakıldığında genel olarak endüstri, tıp ve askeri alan gibi alanlar ile karşılaşılsa da günümüzde genellikle her alanda robot kullanım örneklerine rastlamak mümkündür. Robot mekanizmaları Dördüncü Sanayi ve Endüstri Devrimi olarak da anılan süreçte de “akıllı robotlar” olarak yerlerini almışlardır [1].

Endüstriyel robotlar günümüzde kullanılan üretim tekniklerinin en önemli bileşenlerinden biridir. Bu amaçla kullanılan robotlarda da yüksek hassasiyet ve konumlanma yeteneklerinin varlığı son derece önemlidir. 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 robotlara göre daha yüksek konumlanma hassasiyeti, kuvvet uygulama yeteneği ve kaldırabileceği yük / kendi kütlesi oranına sahip olmalarıdır [2]. Ancak seri robot mekanizmaları için söz konusu olan tasarım kolaylığı ve çalışma uzayı genişliği paralel robot mekanizmaları için geçerli değildir. Paralel robot mekanizmaları bacak yapıları açısından genel olarak simetrik ve asimetrik olarak ikiye ayrılabilir. Simetrik mekanizmaların tasarım, kontrol ve üretimi asimetrik olanlara göre çok daha kolaydır.

Paralel robot mekanizmaları diğer bir açıdan da iki temel sınıf halinde değerlendirilebilmektedir. Bunlar uzaysal(spatial) ve düzlemsel(planar) paralel robot mekanizmalarıdır [3]. Düzlemsel paralel robot mekanizmaları paralel robot mekanizmalarının 3-SD ne sahip bir türüdür. Bu robot mekanizmalarının uç işlevci platformları iki boyutlu bir düzlemde konum değiştirirken aynı zamanda bu düzleme dik bir eksen boyunca yönelim değiştirebilmektedir [4]. Bu mekanizmaların en çok bilinenleri simetrik yapıdaki 3-RRR (R:Dönel Ekleme, R: Aktif Dönel Ekleme) ile 3-RPR

(P: Aktif Prizmatik Eklem) tipi düzlemsel paralel robot mekanizmalarıdır. Her iki mekanizmanın tasarımı ve performans değerlendirmesi ile ilgili olarak literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Chandra ve Rolland, çalışmalarında 3-RPR tipi düzlemsel paralel robot mekanizmasının ileri kinematik problem çözümünü Genetik Algoritma ve Benzetilmiş Tavlama gibi bazı meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarını hibrit bir şekilde kullanarak gerçekleştirmişlerdir [5]. Caro ve arkadaşları, 3-RPR mekanizmalarının hassasiyeti (sensitivity) ile ilgili gerçekleştirdikleri çalışmalarında iki farklı hassasiyet indisi tanımlamışlar ve ayrıca bu mekanizmaların çalışma uzayı, hassasiyet ve kuvvet uygulama yeteneği (dexterity) ne göre karşılaştırılabilirlikleri için bir metot önermişlerdir [6]. Jiang ve Gosselin, çalışmalarında 3-RPR tipi mekanizmaların tekil nokta analizlerini yapmışlar ve sonuç olarak temel çerçeve ve uç işlevci platformlarının eşkenar üçgen olduğu tasarımlarda maksimum tekil noktadan bağımsız çalışma uzayı elde edildiğini göstermişlerdir [7]. Varedi-Koulaei ve arkadaşları, dönel eklemlerin kendi yapısındaki boşlukların (joint-clearance) 3-RRR tipi mekanizmaların performansı üzerindeki etkilerini incelemişler ve mekanizmaların performansını arttırmak için bacakların uzunluklarını ve kütle merkezlerinin yerlerini esas alan bir optimizasyon gerçekleştirmişlerdir [8]. Cervantes-Sánchez ve arkadaşları, 3-RRR tipi paralel robot mekanizmaları için homojen yapıda bir Jacobian matrisi elde edilmesini sağlayan bir yöntem ve mekanizma hızını arttırmak için bir optimizasyon prosedürü önermişlerdir [9]. Küçük ise çalışmasında 3-RRR tipi mekanizmaların eyleyici güç tüketimlerini optimize etmiştir [10]. Bunun için optimum bağ uzunluklarını ve platform kütlelerini hesaplamıştır.

Bu tez çalışmasında da literatürde yer alan simetrik mekanizmalardan farklı olarak, [2] tarafından önerilen ve 3-RPR yapısındaki simetrik bir düzlemsel robot mekanizmasının bir bacağının RRR tipi bacak ile değiştirilmesi ile elde edilen üç SD'li dereceli düzlemsel paralel robot mekanizmasının geometrik optimizasyonu konu edinmiştir. Bu mekanizma RPR2RRR1 olarak isimlendirilmiştir. Tez çalışmasında bu mekanizmanın geometrik optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve geometrik yapıdaki değişimlerin mekanizmanın çalışma uzayına etkisi incelenmiştir. Ayrıca yapılan bacak değişikliğinin mekanizmanın performansına katkısı mekanizmanın literatürde yer alan simetrik eşdeğeri ile karşılaştırma yapılarak da incelenmiştir.

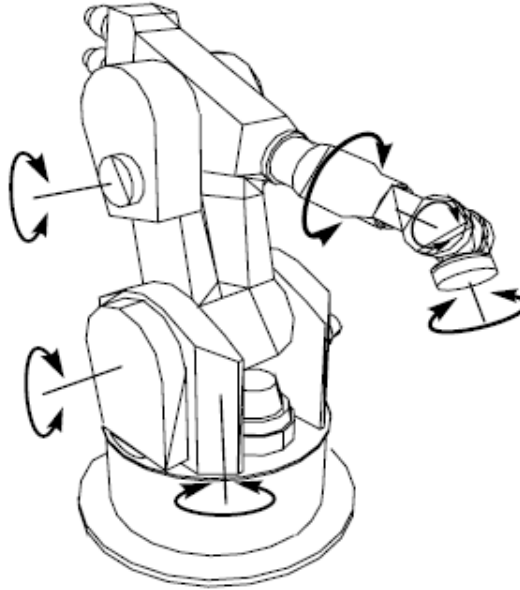
Bir sonraki bölümde seri robot, paralel robot, simetrik ve asimetrik paralel robotlar ve bunlar arasındaki karşılaştırmalara yer verilmiştir.

2. SERİ VE PARALEL ROBOTLAR

Seri ve paralel robot mekanizmaları literatürde en sık karşılaşılan robot mekanizmalarıdır. Bu bölümde ilk olarak seri ve paralel robotların kısa tanıtımı yapılmıştır. Ardından da tez çalışmasının temelini teşkil eden simetrik ve asimetrik robot mekanizmaları ve bunlar arasındaki farklara yer verilmiştir.

2.1. SERİ ROBOTLAR

Seri Robotlar genel olarak endüstri alanında kullanılmaktadırlar. Bu robotlar çoğunlukla amaca yönelik geliştirilmiş robotlardır. Çalışma yapısı sabit yüzeye oturtulmuş, tabandan uç işlevciye kadar çeşitli bağlantı elamanları ile bağlanmış ve motorlarla çalıştırılan eklemler şeklinde tasarlanmıştır. Genel yapısı insan uzuvlarına benzerlik gösterir. Omuz, dirsek ve bilek ya da kısaca antropomorfik (insan biçiminde) kol yapısına sahiptirler. Seri Robotlara, robot kolu da denir. Örnek bir seri robot Şekil 2.1’de sunulmuştur.



Şekil 2.1. Örnek Seri Robot (Kuka-160) [11].

2.2. PARALEL ROBOTLAR

Paralel Robotlar(Manipülör)'in kökeni 1800'li yılların sonunda Maxwell(1890) [12] tarafından yayınlanan ilk makaleye dayanmaktadır. Bu çalışmadan sonra 1942 yılında Pollard [13] tarafından patenti alınan ve araba boyamak için kullanılan bir diğer paralel mekanizma ve Gough [14] tarafından 1962 yılında lastik testi için tasarlanan mekanizmaya rastlanılmaktadır. 1965 yılında ise D. Stewart [15] başka bir alanda, uçuş simülörü olarak paralel manipülörü kullanmıştır. Bu ilk mekanizmalardan sonra literatürde birçok farklı farklı paralel robot mekanizması tasarımı yer almıştır. Bunların bazı örnekleri için [16]-[21]' e bakılabilir. Paralel robot tasarımında yer alan robot bacaklarının sayısı ve türlerinin çeşitliliği bu mekanizmaların birçok farklı formda tasarlanmasının önünü açmıştır. Bununla birlikte bir mekanizmanın paralel robot mekanizması olarak tanımlanabilmesi için o mekanizmanın en az bir kapalı çevrime sahip olması gerekir. Bu mekanizmalarda kullanılan eklemlerinin çoğu pasif eklemlerdir ve genellikle bir bacak için bir aktif eklem kullanılır. Ancak son zamanlarda özellikle silindirik ve düzlemsel eklemlerin kullanılması ile bir bacakta iki aktif eklemin bulunduğu çalışmalarda literatürde yer almaktadır örnek olarak [3]'e bakılabilir. Bu mekanizmalarda seri robotlarda kullanılan dönel ve prizmatik eklemlerin yanı sıra küresel, universal ve düzlemsel eklemler de kullanılmakta ve bu eklem çeşitliliği de bu mekanizmaların çeşitliliğini ayrıca geliştirmektedir. Endüstri açısından paralel robotlara bakıldığında ise en yaygın kullanım alanı bulan mekanizmaların altı serbestlik derecesine sahip hareket simülasyon cihazı (Stewart platformu) ve amaca uygun farklı serbestlik derecelerine sahip olarak tasarlanan ve hızlı toplama ve yerleştirme için kullanılan Delta robotudur. Bu robotların formları teleskopik bacak ve altıgen şeklindedir.

2.2.1. Simetrik ve Asimetrik Paralel Robotlar

Paralel robotlar sahip oldukları bacak yapıları ve eklem türlerine göre simetrik ve asimetrik olarak ikiye ayrılabilirler [22]. Buna göre bir paralel robot mekanizmasının simetrik olabilmesi için aşağıdaki şartları sağlaması gerekir [2].

1. Mekanizmanın uç işlevci platformunun sahip olduğu serbestlik derecesi ile mekanizmanın bacak sayısı aynı olmalıdır
2. Mekanizmanın tüm bacaklarında aktif eklemler ve sıralamaları aynı olmalıdır.
3. Tüm bacaklarda aynı tip eyleyici kullanılmalıdır.

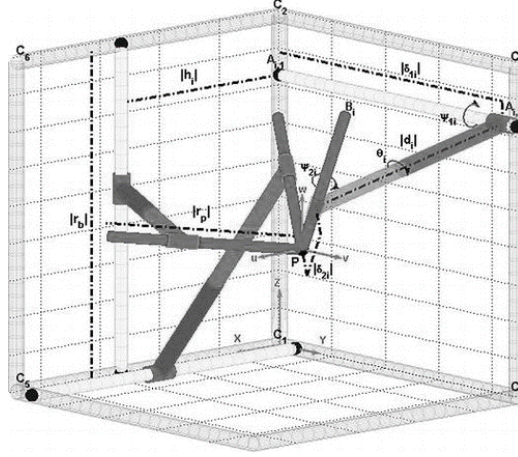
Simetrik paralel robot mekanizmalarının en çok bilineni Stewart Platform olarak da bilinen altı serbestlik dereceli mekanizmadır. Bu mekanizma Şekil 2.2’de sunulmuştur.



Şekil 2.2. Örnek Altı Eksenli Stewart Platformu.

Stewart platform mekanizmasında şekilde görüldüğü gibi her bacak aynı eklem dizilişine ve aynı aktif (prizmatik) ekleme sahiptir ve mekanizmanın serbestlik derecesi ile bacak sayısı aynıdır.

Yukarıda verilen şartları sağlamayan mekanizmalara asimetrik mekanizmalar denilmektedir. Simetrik paralel robot mekanizmalarının tasarımı, kinematik ve dinamik analiz ve kontrolü asimetrik olanlara göre çok daha kolaydır. Bunun nedeni tüm bu analizler yapılırken sadece bir bacak için yapılan hesaplamaların diğer tüm bacaklar için kolayca uygulanabilir olmasıdır. Simetrik mekanizmaların bu avantajına rağmen yukarıda sıralanan şartlar göz önüne alındığında bu şartların aslında muhtemel mekanizma tasarımı sayısını sınırlandıracağı açıktır. Bu nedenle literatürde son yıllarda simetrik olanlardan ziyade asimetrik mekanizmalara daha fazla ilgi gösterildiği görülmektedir. Son yıllarda yapılan bazı asimetrik mekanizma örnekleri için [3, 23]’e bakılabilir. Örnek altı serbestlik dereceli bir asimetrik paralel robot mekanizması Şekil 2.3 de sunulmuştur.



Şekil 2.3. 3-CCC Asimetrik Paralel Robot [3].

Bu tez çalışmasında da [2] tarafından önerilen üç serbestlik derecesine sahip asimetrik düzlemsel paralel robot mekanizması konu edinmiştir.

2.3. SERİ VE PARALEL ROBOT KIYASLAMA

Herhangi bir üretim süreci için bir robotun seçimi, uygulama türü (*tehlikeli, tekrarlayan ve sıkıcı, kesin vb.*), görev gereksinimleri (*SD, hız, doğruluk, tekrarlanabilirlik*), yük gereksinimleri, çalışma alanı, ekonomik gerekçelendirme, programlama süresi, bakım vb. gibi birçok farklı faktöre bağlıdır. Dolayısıyla paralel veya seri robotların herhangi birinin diğerinden tüm yönleri ile daha üstün olduğu söylenemez. Bununla birlikte seri ve paralel robotlar sahip oldukları birçok özellik açısından birbirlerinden farklılaşmaktadırlar. Bu özellikler Çizelge 2.1’de özet olarak sunulmuştur. Çizelge 2.1’e göre iki robot türünün de farklı avantaj ve dezavantajlara sahip olduğu görülmektedir. Örneğin, paralel robotlar seri robotlara kıyasla daha yüksek genel sertlik, daha yüksek hassasiyet, düşük atalet ve daha yüksek çalışma hızlarına sahiptirler [3, 23]. Bununla birlikte, bu avantajlara karşılık paralel robotların küçük ve karmaşık çalışma uzayı, zor mekanik tasarım ve daha karmaşık kinematik ve kontrol algoritmaları gibi dezavantajlara sahip oldukları da görülmektedir.

Çizelge 2.1. Seri - Paralel Robot Kıyas Tablosu [24].

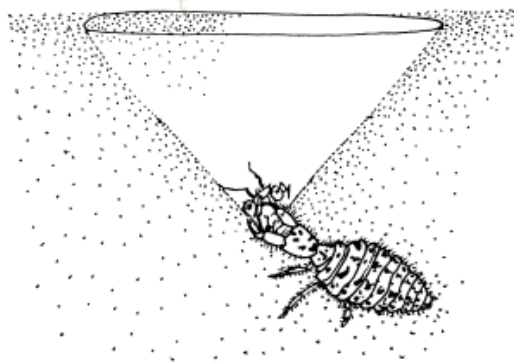
Özellikler	Seri Robotlar	Paralel Robotlar
Çalışma Uzayı	Geniş	Küçük ve karmaşık
İleri kinematik çözümü	Kolay	Çok zor
Ters Kinematik çözümü	Zor	Kolay
Konum hatası	Birikimli	Ortalama
Kuvvet hatası	Ortalama	Birikimli
Maksimum Kuvvet hatası	Minimum aktüatör kuvveti ile sınırlıdır	Tüm aktüatör kuvvetlerinin toplamı
Sertlik	Düşük	Yüksek
Dinamik özellikler	Zayıf, özellikle boyut arttıkça	Çok Yüksek
Dinamiği modelleme ve çözme	Göreceli olarak basit	Çok Karmaşık
Durağanlık	Geniş	Küçük
Uygulama alanı	Farklı çok sayıda alanlarda özellikle sanayide	Şu anda sınırlı sayıda sanayide özellikle
Yük / ağırlık oranı	Düşük	Yüksek
Hız ve İvme	Düşük	Yüksek
Hareketin Kesinliği	Düşük	Yüksek
Bileşen tekdüzeliği	Düşük	Yüksek
Kalibrasyon	Göreceli olarak basit	Karmaşık
Çalışma Uzayı / Robot Boyut Oranı	Yüksek	Düşük

Sonuç olarak her iki robot türünün de farklı uygulamalar için diğerinden daha avantajlı olacağı açıktır. Tez konusu paralel robotlar daha çok hareket simülatörleri, ultra hassas konumlandırma cihazları, tıbbi uygulamalar, ultra hızlı toplama ve mikro robotlar gibi uygulamalarda başarılı sonuçlar üretmektedirler.

Bir sonraki bölümde bu mekanizmanın geometrik yapısı ve tez çalışması kapsamında kullanılan Karınca Aslanı Optimizasyon Algoritması sunulmuştur.

3. ALO (KARINCA ASLANI OPTİMİZASYON) ALGORİTMASI

2015 yılında Seyedalı Mirjalili [25] tarafından ortaya konulan bu optimizasyon algoritması aslında karınca aslanının kendine özgü avlanmasından esinlenilmiştir. Literatürde bakıldığında kontrolcü tasarımı, yük sevkiyat problemi, rota planlaması, esnek süreç planlaması, üretim çizelgeleme, optimizasyon tabanlı regülatör, optimal topluluk tespiti, optimal filtre tasarımı ve güç sistemleri optimizasyon problemleri gibi mühendislik alanlarında ALO algoritmasının kullanıldığı görülmektedir [26]. Karınca Aslanı larva evresindeki ilginç beslenme davranışlarından dolayı bu ismi alan yırtıcı bir böcek türüdür. Karınca aslanları karıncaların bulunduğu bölgelere tuzaklarını dairesel bir yol çizerek bir koni şeklinde oluştururlar. Bu tuzağın dibine yani koninin sivri ucuna kendilerini gömerek tuzağa düşecek karıncaları beklerler. Karıncalar konik tuzağa girdiğinde tuzaktan çıkmasını engellemek ve tuzağın dibine kaydırmak amacıyla karınca aslanları kum fırlatmaya başlarlar. Sonunda tuzağın dibine kaydıkları karıncaları büyük çeneleri ile yutarlar. Her bir avlanma işinden sonra karınca aslanları tuzaklarını yeni bir av için hazır hale getirirler. Bu avlanma mekanizması Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Karınca aslanı avlanma stratejisi

Karınca aslanlarının avlanma stratejisinin matematiksel modelinin ilk aşaması rastgele yürüyüşlerin modellenmesidir [26]:

$$Z(s) = \begin{bmatrix} 0 \\ gentop(2s(w1) - 1) \\ gentop(2s(w2) - 1) \\ \dots \\ gentop(2s(w_n) - 1) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Burada n maksimum iterasyon sayısı, w rastgele yürüyüş adımları, $gentop$ kümülatif toplam ve $s(w)$ aşağıda tanımı verilen bir stokastik (değişken veya rastlantısal) fonksiyondur [26]:

$$s(w) = \begin{cases} 1, & \text{if rand} > 0.5 \\ 0, & \text{if rand} \leq 0.5 \end{cases} \quad (3.2)$$

Rastgele yürüyüşe başlayan karıncaları arama uzayında tutmak için aşağıdaki formülle bu yürüyüşleri normalize etmek gerekmektedir [26]:

$$Z_i^w = \frac{(z_i^w - a_i)(d_i^w - c_i^w)}{(b_i - a_i)} + (c_i^w) \quad (3.3)$$

Buradaki i değişken sayısını, t iterasyon sayısını, a minimum rastgele yürüyüşünü, b maksimum rastgele yürüyüşünü, c ve d her bir iterasyonda güncellenen karınca aslanı pozisyonlarının sırasıyla minimum ve maksimum değerlerini göstermektedir. Matematiksel modelin bir sonraki aşaması karıncaların tuzağa girmesi sürecinin modellendiği aşamadır. Bu aşamada karınca tuzağa girdiğinde, karınca aslanı onları tuzağın dibine çekmek için kum fırlatmaya başlar.

$$c_i^w = Antlion_i^w + c^w \quad (3.4)$$

$$d_i^w = Antlion_i^w + d^w \quad (3.5)$$

$$c^w = c^w \cdot I^{-1} \quad (3.6)$$

$$d^w = d^w \cdot I^{-1} \quad (3.7)$$

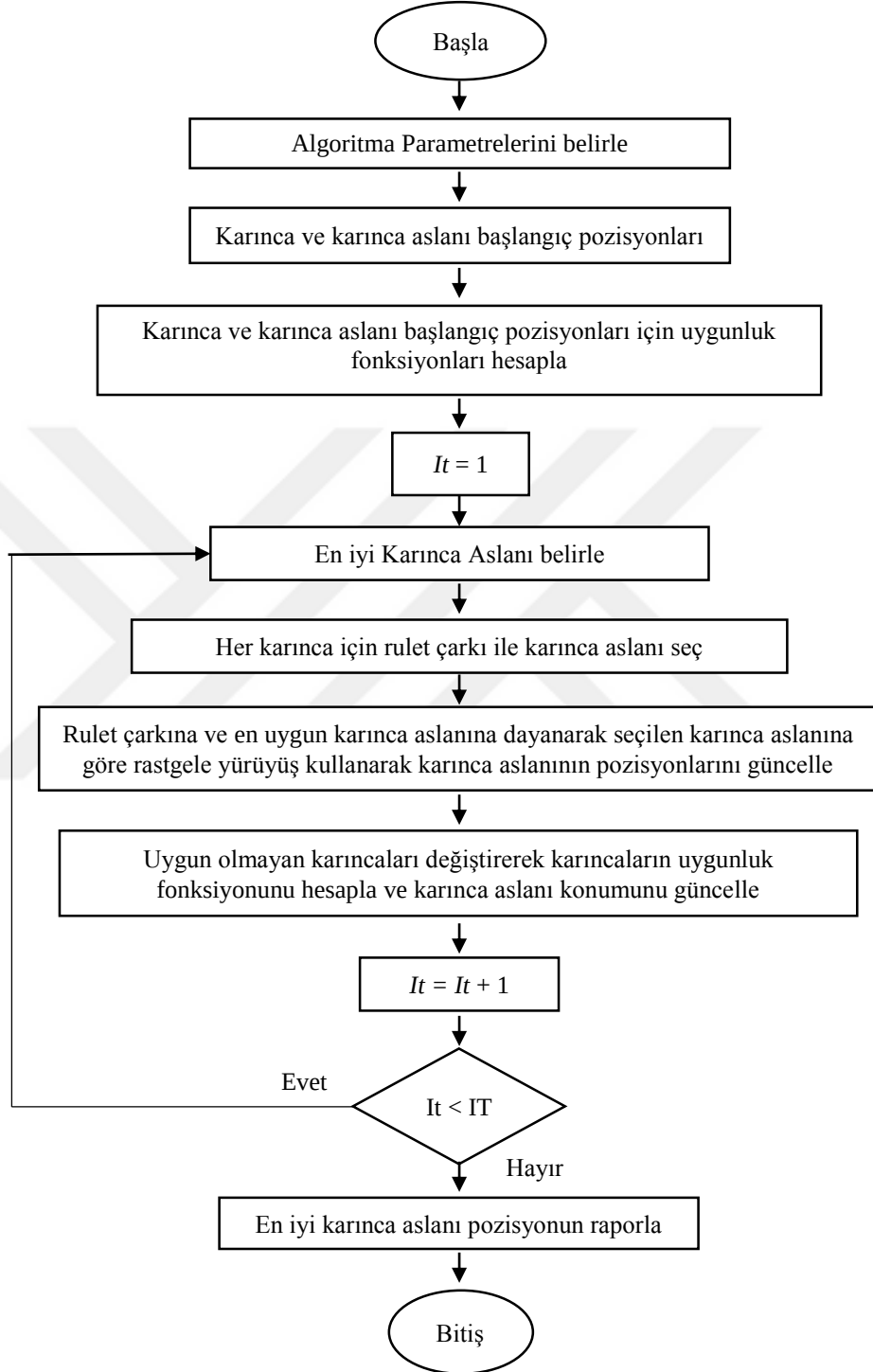
Burada I kaydırma oranını göstermektedir ve optimizasyon sırasında belirli oranlarda artırılır. Bu mekanizmanın ayrıntıları Mirjalili'nin çalışmasında [25] bulunabilir. Eşitlik (3) yardımıyla karıncalar rulet tekerleği ile seçilen karınca aslanı ve elit karınca aslanı etrafında dolaşırlar. Bu şekilde karıncaların yeni pozisyonları aşağıdaki gibi güncellenir:

$$Ant_i^w = 0.5(R_A^w + R_E^w) \quad (3.8)$$

Burada Ant_i^w iterasyondaki i . karıncayı ifade etmektedir. Karınca aslanı tuzağın dibine kaydırıldığı karıncaları yediğinde kendi pozisyonunu Eşitlik (9)'a göre günceller:

$$\text{if}(Ant_i^w) < f(Antlion_i^w), Antlion_i^w = Ant_i^w \quad (3.9)$$

Burada $Antlion_i^w$ w. iterasyondaki i . karınca aslanını, Ant_i^w w. iterasyondaki i . karıncayı ifade eder. Şekil 3.2’de ALO algoritmasının akış şeması verilmiştir.

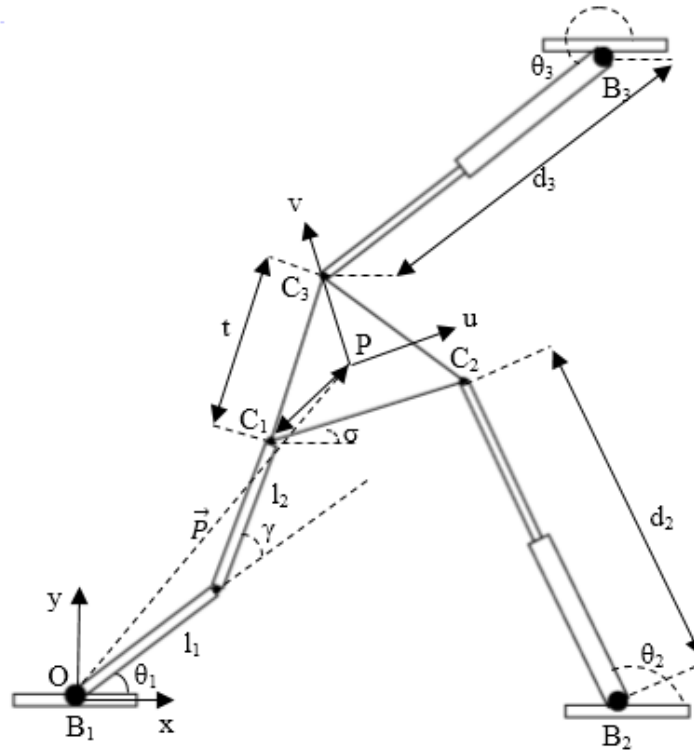


Şekil 3.2. ALO algoritması akış şeması.

Bir sonraki bölümde ALO algoritması kullanılarak üç serbestlik dereceli bir asimetrik düzlemsel paralel robotun geometrik optimizasyonu sunulmuştur.

4. ÜÇ SD'Lİ ASİMETRİK PARALEL ROBOT MEKANİZMASININ GEOMETRİK OPTİMİZASYONU

Bu tez çalışmasına konu edilen mekanizma [2] tarafından önerilmiş 3-SD li bir asimetrik paralel robot mekanizmasıdır. Mekanizma üçgen şeklindeki temel çerçevenin yine üçgen yapıdaki uç işlevci çerçevesine iki $\underline{RPR}$ ve bir $\underline{RRR}$ tipi bacak ile bağlanması sonucunda oluşmaktadır. Bu bacaklardan $\underline{RPR}$ tipi bacakların prizmatik eklemleri, $\underline{RRR}$ tipi bacağın ise ilk dönel eklemi aktif, diğer tüm eklemler ise pasiftir. Bu mekanizmanın örnek bir çizimi Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. RPR2RRR1 tipi 3-SD'li asimetrik paralel robot mekanizması.

Şekilde yer alan değişkenler ve sabitler şu şekilde ifade edilebilirler;

$O(x, y)$: Temel çerçeve koordinat sistemi merkezi

$P(u, v)$: Uç işlevci çerçevesi koordinat sistemi merkezi

d_i : RPR tipi bacakların eklem değişkeni ($i=1, 2, 3$)

- l_i : RRR tipi bacağı oluşturan bağların uzunlukları ($i=1,2$)
 θ : RRR tipi bacak için aktif eklem değişeni (açı)
 σ : uç işlevcinin temel çerçeveye göre yönelim açısı
 t : uç işlevci kenar uzunluğudur.

Tez çalışması kapsamında mekanizmanın geometrik optimizasyonu ile çalışma uzayının maksimum yapılması hedeflenmiştir. Bu amaçla mekanizmanın çalışma uzayının belirlenebilmesi için mekanizmaya ait ters kinematik denklemlerin yazılması gerekmektedir. Ters kinematik denklemler yazılırken mekanizmanın uç işlevci konum ve yönelim bilgileri kullanılarak bacaklardaki aktif eklem değişkenleri bulunur. Buna göre Şekil 4.1'e göre mekanizmanın ters kinematik denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir [4].

$$d_2^2 = A_x^2 + A_y^2 \quad (4.1)$$

$$d_3^2 = D_x^2 + D_y^2 \quad (4.2)$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(F, E) + \text{atan2}\left(\pm \sqrt{F^2 + E^2 - \left(\frac{E^2 + F^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1}\right)}, \frac{E^2 + F^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1}\right) \quad (4.3)$$

Denklemlerde;

$$A_x = P_x + \cos(\sigma) c_{2x} - \sin(\sigma) c_{2y} - B_{2x} \quad (4.4)$$

$$A_y = P_y + \sin(\sigma) c_{2x} + \cos(\sigma) c_{2y} - B_{2y} \quad (4.5)$$

$$D_x = P_x + \cos(\sigma) c_{3x} - \sin(\sigma) c_{3y} - B_{3x} \quad (4.6)$$

$$D_y = P_y + \sin(\sigma) c_{3x} + \cos(\sigma) c_{3y} - B_{3y} \quad (4.7)$$

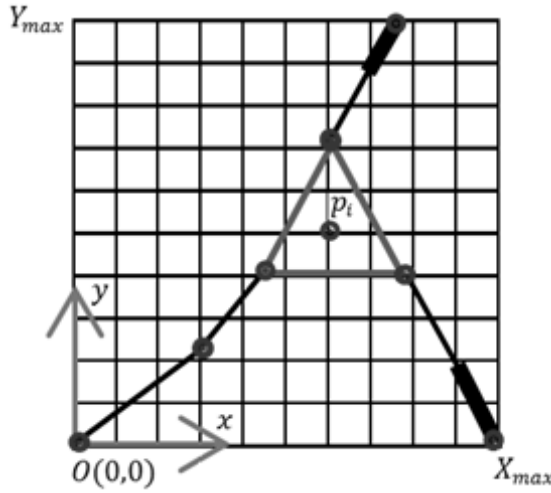
$$E = P_x + \cos(\sigma) c_{1x} - \sin(\sigma) c_{1y} \quad (4.8)$$

$$F = P_y + \sin(\sigma) c_{1x} + \cos(\sigma) c_{1y} \quad (4.9)$$

şeklindedir.

Bu ifadelerde geçen $P = [P_x \ P_y]$ ve $B_i = [B_{ix} \ B_{iy}]$ $i = (1,2,3)$ sırasıyla uç işlevci platformunun ağırlık merkezi ile bacakların temel çerçeve ile bağlantı noktalarının konumlarını O koordinat sistemine göre ifade eden vektörler ve $c_i = [c_{ix} \ c_{iy}]$ $i = (1,2,3)$ ise bacakların uç işlevci ile bağlantı noktalarının konumlarını P koordinat sistemine göre ifade eden vektörlerdir. Bu ifadelerin nasıl elde edildiğine dair detaylı bilgi için [2] makalesine bakılabilir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen optimizasyonun amacı en iyi çalışma uzayına sahip mekanizmanın tasarlanmasıdır. Bunun için mekanizma için ulaşılabilir çalışma uzayı tanımlanmalıdır. Ulaşılabilir çalışma uzayı hesaplanırken öncelikle mekanizmanın uç işlevcisi için aday çalışma uzayı noktaları belirlenmiştir. Bu noktalar belirlenirken mekanizma bir düzlemsel mekanizma olduğu için ilk olarak düzlemde temel çerçeve ile sınırlı bir üçgensel alan aşağıdaki gibi bir ızgara şeklinde tanımlanmıştır.



Şekil 4.2. Çalışma uzayı tespiti için kullanılacak düzlemsel bölge.

Şekil 4.2’de ızgaranın her bir noktası mekanizmanın çalışma uzayı için aday bir noktadır. Bir nokta için yapılacak ters kinematik çözümlerde Denklemler (4.1) ve (4.2) ile elde edilecek bacak değişkenleri (d_1, d_2, θ_1) eğer mekanizmanın geometrik yapısının sınırlarına uyuyorsa bu durumda o nokta bir çalışma uzayı noktası olarak kabul edilecektir. Üçgensel bölgenin sınırları iki boyutlu düzlemde temel çerçevenin bacaklarla bağlantı noktaları ile belirlenmektedir. Ayrıca, mekanizmanın RRR tipi bacağının temel çerçeve bağlantı noktasının bu mekanizmanın hem kinematik analizi için hem de çalışma uzayı analizi için kullanılan $O(x,y)$ referans koordinat sisteminin merkezinde olduğu kabul edilmiştir.

4.1. RPR2RRR1 TİPİ ASİMETRİK 3-SD Lİ PARALEL ROBOT MEKANİZMASI İÇİN GEOMETRİK OPTİMİZASYON PROBLEMİ TANIMI

Bir paralel robot mekanizmasının geometrik optimizasyonunda hedef o mekanizmanın en

iyi performansı verecek geometrik ölçüler ile tasarlanmasıdır. Bu çalışmaya konu edilen mekanizmanın hem uç işlevcisi hem de temel çerçevesi üçgensel yapıdadır. Bu iki çerçeve birbirlerine iki $\underline{RPR}$ ve bir $\underline{RRR}$ tipi bacak kullanılarak bağlanmıştır. Bu çalışmada amaç bu mekanizmanın en iyi çalışma uzayını sağlayacak şekilde geometrik ölçülerinin optimizasyon yolu ile bulunmasıdır. Bunun için ilk adım mekanizmanın geometrik yapısını değişkenler yardımı ile bir optimizasyon problemi şeklinde ifade etmek gerekir. Öncelikle bazı kabullerin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada önerilen mekanizmanın hem temel çerçevesinin hem de uç işlevcisinin çerçevesinin eşkenar üçgen yapısında olduğu ve temel çerçevenin kenar uzunluğunun sabit 100 br olduğu kabul edilmiştir. Önerilen optimizasyon problemi için kullanılan diğer değişkenler ise yapılan bu kabullerle orantılı olarak şu şekilde tanımlanmıştır.

t_k : temel çerçeve kenar uzunluğu

u_k : uç işlevci kenar uzunluğu

l_1 : $\underline{RRR}$ tipi bacağı oluşturan ilk bağ uzunluğu

l_2 : $\underline{RRR}$ tipi bacağı oluşturan ikinci bağ uzunluğu

RPR_{max} : $\underline{RPR}$ tipi bacak maksimum uzunluğu

Önerilen tez çalışmasında mekanizmanın geometrik optimizasyonu için temel çerçeve kenar uzunluğu esas alınmış ve diğer değişkenlerin bu uzunluğa göre en iyi hangi uzunlukta olmaları gerektiği araştırılmıştır. Bunun için her bir değişkenin minimum ve maksimum sınırları temel çerçeve kenar uzunluğuna orantılı şekilde değiştirilmiş ve bu değişimlerin çalışma uzayı optimizasyonuna etkisi incelenmiştir.

Buna göre; $t_k = 100$ br olmak üzere; u_k , l_1 , l_2 ve RPR_{max} değişkenlerindeki alt ve üst sınır uzunluklar aşağıdaki gibi değiştirilerek her bir değişiklik için bu sınırlar dahilinde geometrik optimizasyon yapılmıştır. Elde edilen tüm optimizasyon sonuçları değerlendirilerek nihai en iyi mekanizma sonuç olarak elde edilmiştir. Yapılan optimizasyonda fiziksel olarak mümkün olan durumu ifade edebilmek için $\underline{RPR}$ tipi bacaklar için bu bacakların açık halinin (silindir + piston) uzunluğu ile tam kapalı (silindir) halinin uzunluğu arasında aşağıdaki ilişki tüm optimizasyon işlemlerinde bir kısıt olarak tanımlanmıştır. Buna göre $\underline{RPR}$ tipi bir bacağının açık halinin (silindir + piston) uzunluğu herhangi bir aday uzunluk için silindir uzunluğunun iki katından bir eksik olacak şekilde belirlenmiştir. Bunun nedeni gerçek uygulamalarda piston uzunluğunun silindir uzunluğundan büyük olamayışıdır. Çalışma uzayı belirlenirken

sadece uygun piston değerleri ile ulaşılabilen noktalar hesaba dahil edilmiştir. Denklemlerde yer alan RPR_{max} değişkeni $\underline{RPR}$ tipi bacak için bu bacağının açık halinin uzunluğunu göstermektedir.

$$\left(\frac{RPR_{max}}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{RPR_{max}}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max} \quad (4.10)$$

Denklem 4.11 de verilen genel kısıt tanımı dışında temel çerçeve kenar uzunluğu ile orantılı olacak şekilde diğer kısıt ifadeleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$0.1t_k < u_k < t_k * oran \quad (4.11)$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < t_k * oran \quad (4.12)$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < t_k * oran \quad (4.13)$$

Bu tez çalışmasında yukarıda verilen her bir değişkenin mekanizmanın çalışma uzayına katkısını ayrı ayrı değerlendirebilmek için denklemler de yer alan *oran* değişkeni, u_k , l_1, l_2 ve RPR_{max} kısıt ifadeleri için [0.5 1] aralığında 0.5/3 birimlik bir çözünürlük ile tanımlanmış ve geometrik optimizasyon yapılmıştır. Yapılan geometrik optimizasyonda her bir değişkenin etkisini diğerlerinden ayrı olarak ortaya koyabilmek için belirlenen aralıkta 14 farklı kısıt kombinasyonu için optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Yapılan optimizasyon için çalışma uzayı olarak temel çerçeve ile sınırlı bir üçgensel alan belirlenmiştir. Bu alan için sınırlar temel çerçevenin bacaklar ile bağlantı noktaları olarak alınmış ve $X_{max} = Y_{max} = t_k$ olarak alınmış ve ızgara çözünürlüğü ise 1 olarak kabul edilmiştir. Bu kısıtlar ve mekanizmanın ters kinematik denklemleri kullanılarak yapılacak geometrik optimizasyon probleminin tanımı için gerekli bir aday çözüm şu şekilde yazılabilir.

$$S=[u_k \ l_1 \ l_2 \ RPR_{max}]$$

Denklemden S bir aday çözümü ifade etmektedir. Denkleme göre bir aday çözüm; uç işlevci kenar uzunluğu, $\underline{RRR}$ tipi bacağın iki parçasının uzunlukları ve $\underline{RPR}$ tipi bacakların açık halinin uzunluğunu içerecektir. Son olarak önerilen optimizasyon problemi için amaç fonksiyon ise şu şekilde yazılabilir.

$$f = \max(\sum p_i) \ (i = 0,1,2,3, \dots, n) \quad (4.14)$$

Denklemden yer alan f amaç fonksiyonu, p_i ise önerilen aday çözüm ile yapılan tasarımın ulaşabildiği her bir çalışma uzayı noktasıdır. Buna göre en çok çalışma uzayı noktasına ulaşabilen tasarım en iyi tasarım olarak kabul edilecektir. Optimizasyon süresince

mekanizmanın uç işlevcisinin yöneliminin 0 derece olduğu kabul edilmiştir ($\sigma=0$).

Optimizasyon probleminin çözümü için Mirjalili [25] tarafından geliştirilen ve karınca aslanlarının avlanma davranışlarını temel alan ALO algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma nüfus tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır. ALO algoritmasının detayları için [25] teki çalışmaya bakılabilir. Bir sonraki bölümde yapılan geometrik optimizasyon ile ilgili muhtemel kısıt kombinasyonları ve bu kısıt kombinasyonlarının her biri için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Kısıt kombinasyonları düzenlenirken bacak yapıları ve uç işlevci kenar uzunluğu için farklı kombinasyonlar kullanılmıştır.

4.2. RPR tipi bacağın uzunluğunun mekanizmanın çalışma uzayına etkisi

Bu bölümde dört farklı kısıt kombinasyonu kullanılarak RPR tipi bacakların uzunluğunun mekanizmanın çalışma uzayına etkisi incelenmiştir. Bunun için aşağıdaki kısıt kombinasyonları kullanılarak geometrik optimizasyon yapılmıştır.

4.3. KISIT KOMBİNASYONU 1

Tanımlanan kısıt ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$t_k = 100 \text{ br}$$

$$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < t_k$$

$$\left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max}$$

Önerilen kısıt ifadelerine göre geometrik optimizasyon yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre çizilen mekanizma ve çalışma uzayı da Şekil 4.3’de sunulmuştur.

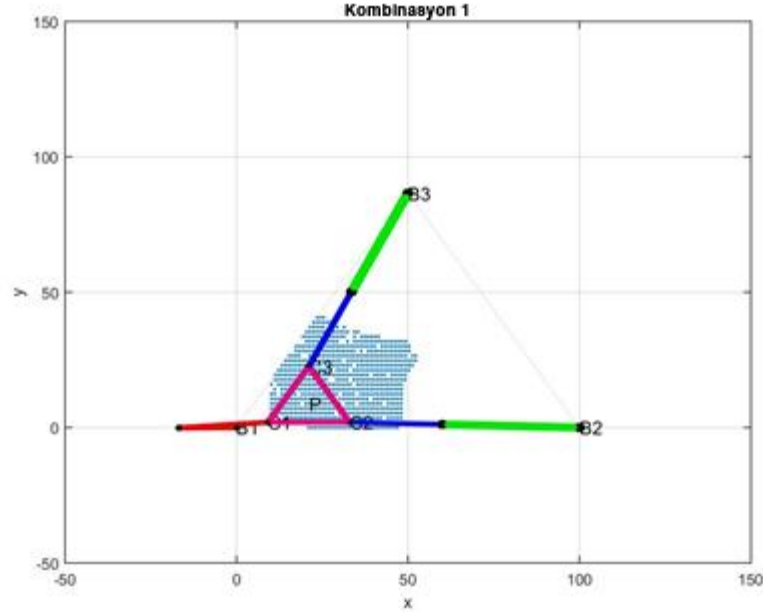
$$u_k = 23.8264 \text{ br}$$

$$l_1 = 16.6692 \text{ br}$$

$$l_2 = 48.1688 \text{ br}$$

$$RPR_{max} = 78.5114 \text{ br}$$

Ulaşılabilen çalışma uzayı nokta sayısı = 714



Şekil 4.3. Kısıt kombinasyonu 1 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.

4.4. KISIT KOMBİNASYONU 2

Tanımlanan kısıt ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$t_k = 100 \text{ br}$$

$$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < 0.5t_k$$

$$\left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max}$$

Önerilen kısıt ifadelerine göre geometrik optimizasyon yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre çizilen mekanizma ve çalışma uzayı da Şekil 4.4’de sunulmuştur.

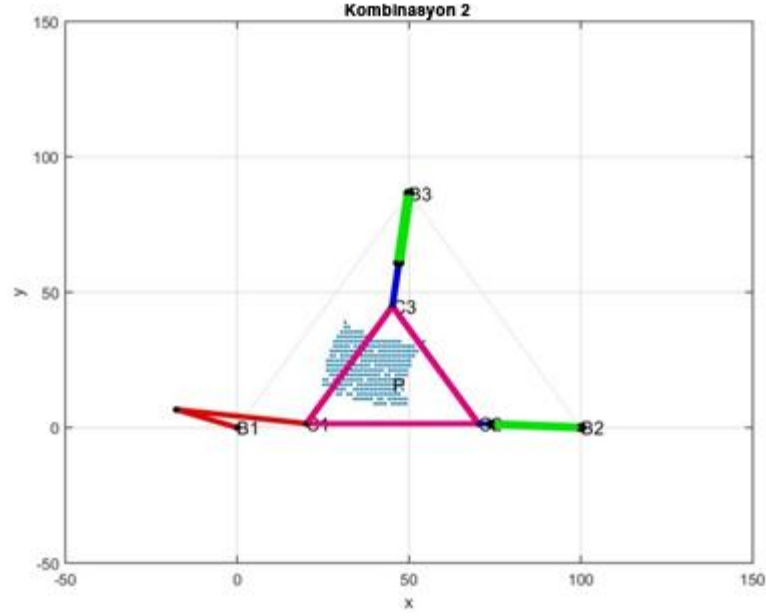
$$u_k = 50 \text{ br}$$

$$l_1 = 18.7817 \text{ br}$$

$$l_2 = 50 \text{ br}$$

$$RPR_{max} = 50 \text{ br}$$

Ulaşılabilen çalışma uzayı nokta sayısı = 312



Şekil 4.4. Kısıt kombinasyonu 2 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.

4.5. KISIT KOMBİNASYONU 3

Tanımlanan kısıt ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$t_k = 100 \text{ br}$$

$$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < \left(0.5 + \frac{0.5}{2}\right)t_k$$

$$\left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max}$$

Önerilen kısıt ifadelerine göre geometrik optimizasyon yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre çizilen mekanizma ve çalışma uzayı da Şekil 4.5’de sunulmuştur.

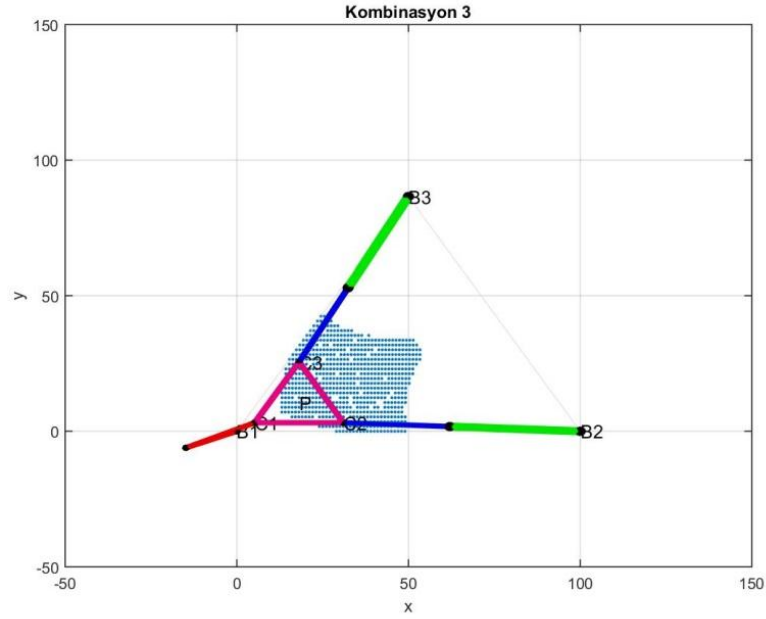
$$u_k = 25.8442 \text{ br}$$

$$l_1 = 16.0106 \text{ br}$$

$$l_2 = 48.8627 \text{ br}$$

$$RPR_{max} = 74.7925 \text{ br}$$

Ulaşıla bilinen çalışma uzayı nokta sayısı = 709



Şekil 4.5. Kısıt kombinasyonu 3 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.

4.6. KISIT KOMBİNASYONU 4

Tanımlanan kısıt ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$t_k = 100 \text{ br}$$

$$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < \left(0.5 + \frac{0.5}{3}\right)t_k$$

$$\left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max}$$

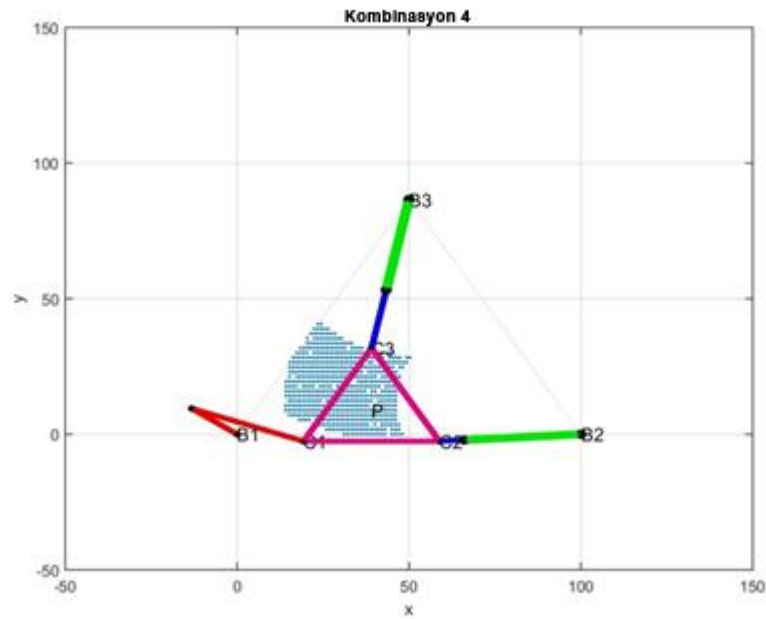
Önerilen kısıt ifadelerine göre geometrik optimizasyon yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre çizilen mekanizma ve çalışma uzayı da Şekil 4.6'da sunulmuştur.

$$u_k = 39.5779 \text{ br}$$

$$l_1 = 16.2155 \text{ br}$$

$$l_2 = 43.4209 \text{ br}$$

Ulaşıla bilinen çalışma uzayı nokta sayısı = 583



Şekil 4.6. Kısıt kombinasyonu 4 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.

4.7. RPR TİPİ BACAĞIN UZUNLUĞUNUN MEKANİZMANIN ÇALIŞMA UZAYINA ETKİSİ

1, 2, 3, 4 kısıt kombinasyonlarında RPR tipi bacağın uzunluğunun mekanizmanın çalışma uzayına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre artan RPR tipi bacak uzunluğu, mekanizmanın çalışma uzayı genişliğine olumlu katkı yapmakla birlikte, mekanizmanın çalışma uzayı bu bacakların uzunlukları arttıkça, daha çok mekanizmanın RRR tipi bacağının çevresinde olduğu görülmektedir. Buna göre uzayan RPR bacak yapısı her ne kadar mekanizmanın çalışma uzayını genişletse de neden olduğu fiziksel sınırlılık, mekanizmanın çalışma uzayının RPR tipi bacaklara yakın olarak oluşmasına da engel olmaktadır.

Bir sonraki kombinasyonlarda RRR tipi bacağı oluşturan parçaların (l_1, l_2) uzunluğundaki değişimin mekanizmanın çalışma uzayına katkısı incelenecektir.

4.8. KISIT KOMBİNASYONU 5

Tanımlanan kısıt ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$t_k = 100 \text{ br}$$

$$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < t_k$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < 0.5t_k$$

$$\left(\frac{RPR_{max}}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{RPR_{max}}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max}$$

Önerilen kısıt ifadelerine göre geometrik optimizasyon yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre çizilen mekanizma ve çalışma uzayı da Şekil 4.7’de sunulmuştur.

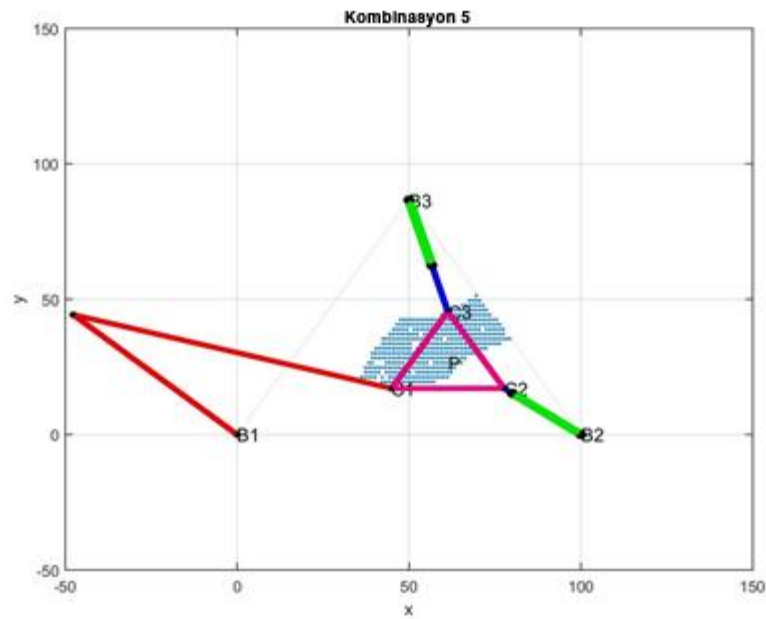
$$u_k = 32.7960 \text{ br}$$

$$l_1 = 65.0429 \text{ br}$$

$$l_2 = 98.2297 \text{ br}$$

$$RPR_{max} = 48.8904 \text{ br}$$

Ulaşıla bilinen çalışma uzayı nokta sayısı = 435



Şekil 4.7. Kısıt kombinasyonu 5 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.

4.9. KISIT KOMBİNASYONU 6

Tanımlanan kısıt ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$t_k = 100 \text{ br}$$

$$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < \left(0.5 + \frac{0.5}{2}\right)t_k$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < 0.5t_k$$

$$\left(\frac{RPR_{max}}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{RPR_{max}}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max}$$

Önerilen kısıt ifadelerine göre geometrik optimizasyon yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre çizilen mekanizma ve çalışma uzayı da Şekil 4.8’de sunulmuştur.

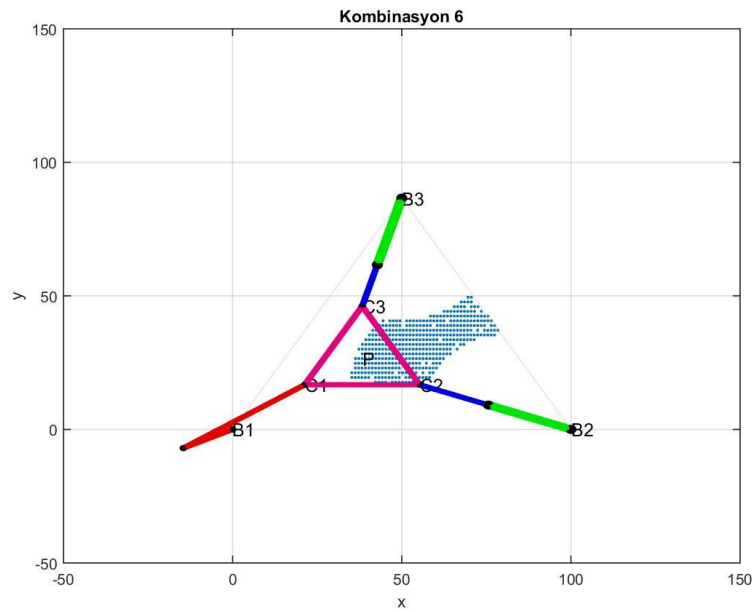
$$u_k = 33.9377 \text{ br}$$

$$l_1 = 16.1383 \text{ br}$$

$$l_2 = 73.0085 \text{ br}$$

$$RPR_{max} = 50 \text{ br}$$

Ulaşılabilen çalışma uzayı nokta sayısı = 429



Şekil 4.8. Kısıt kombinasyonu 6 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.

4.10. KISIT KOMBİNASYONU 7

Tanımlanan kısıt ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$t_k = 100 \text{ br}$$

$$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < \left(0.5 + \frac{0.5}{3}\right)t_k$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < 0.5t_k$$

$$\left(\frac{RPR_{max}}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{RPR_{max}}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max}$$

Önerilen kısıt ifadelerine göre geometrik optimizasyon yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre çizilen mekanizma ve çalışma uzayı da Şekil 4.9’da sunulmuştur.

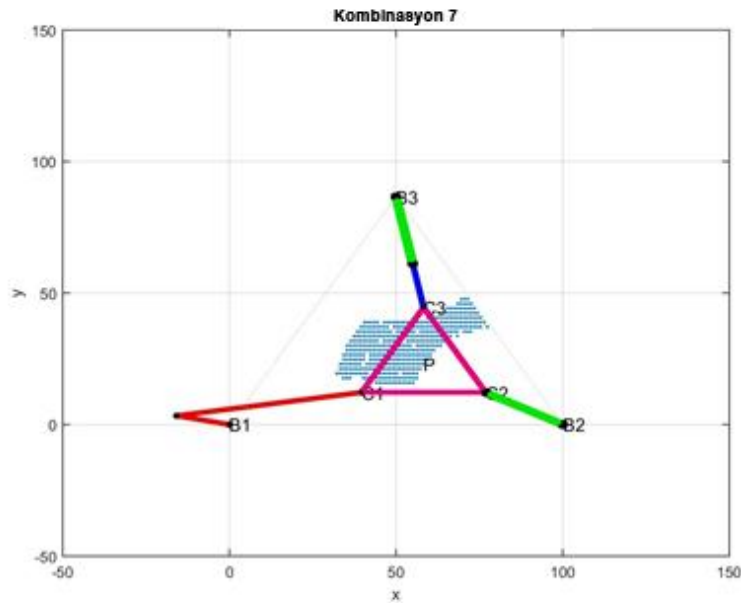
$$u_k = 37.2346 \text{ br}$$

$$l_1 = 16.1119 \text{ br}$$

$$l_2 = 66.5574 \text{ br}$$

$$RPR_{max} = 49.9967 \text{ br}$$

Ulaşılabilen çalışma uzayı nokta sayısı = 419



Şekil 4.9. Kısıt kombinasyonu 7 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.

4.11. RRR TİPİ BACAĞIN HER İKİ PARÇASININ UZUNLUĞUNUN MEKANİZMANIN ÇALIŞMA UZAYINA ETKİSİ

Kombinasyonlar 5, 6 ve 7 de tanımlanan kısıtlar ile elde edilen sonuçlara bakıldığında RRR tipi bacağın her iki parçasının uzunluğunun mekanizmanın çalışma uzayına etki ettiği görülmektedir. Diğer taraftan bu etkinin RPR tipi bacaklardaki değişimlerle karşılaştırıldığında daha sınırlı olduğu da görülmektedir. Bu durumun mekanizmadaki RPR tipi bacak sayısı ile ilgili olduğu değerlendirilmektedir. Sebebi mekanizmada iki adet RPR tipi bacak bulunurken, sadece bir tane RRR tipi bacak bulunmaktadır. Ancak her ne kadar RRR tipi bacak uzunluklarındaki değişiklikler, çalışma uzayı genişliğine daha az katkı sağlasa da çalışma uzayının dağılımına RPR tipi bacaklardan daha farklı katkı sağladığı ve mekanizmanın çalışma uzayının hem temel çerçeve ağırlık merkezine yakın bölgelerde, hem de RPR tipi bacaklara yakın bölgelerde yoğunlaştığı görülmektedir.

Bir sonraki bölümlerde sabit bacak uzunluklarına karşılık uç işlevci kenar uzunluğu değiştirilerek geometrik optimizasyon gerçekleştirilecektir.

4.12. KISIT KOMBİNASYONU 8

Tanımlanan kısıt ifadeleri aşağıdaki gibidir

$$t_k = 100 \text{ br}$$

$$0.1t_k < u_k < t_k$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < 0.5t_k$$

$$\left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max}$$

Önerilen kısıt ifadelerine göre geometrik optimizasyon yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre çizilen mekanizma ve çalışma uzayı da Şekil 4.12’de sunulmuştur.

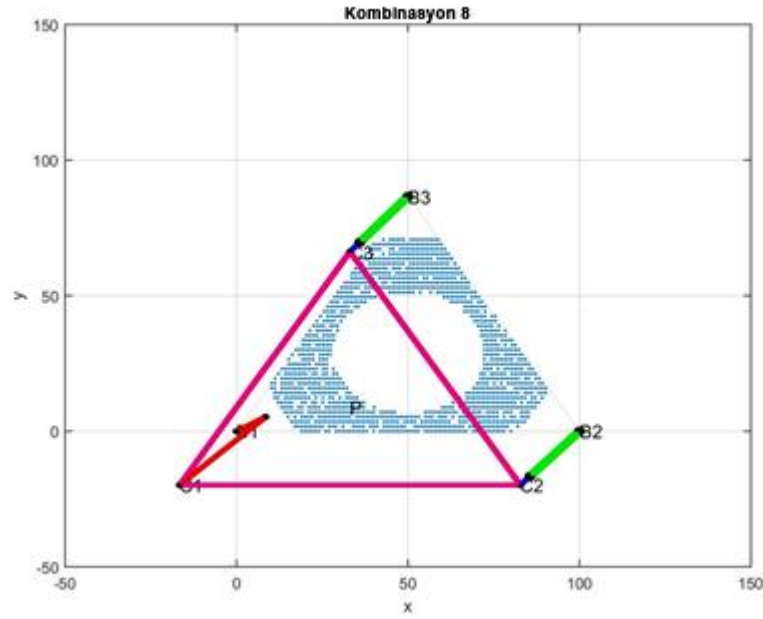
$$u_k = 99.3678 \text{ br}$$

$$l_1 = 10 \text{ br}$$

$$l_2 = 49.3389 \text{ br}$$

$$RPR_{max} = 42.9201 \text{ br}$$

Ulaşıla bilinen çalışma uzayı nokta sayısı = 1215



Şekil 4.10. Kısıt kombinasyonu 8 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.

4.13. KISIT KOMBİNASYONU 9

Tanımlanan kısıt ifadeleri aşağıdaki gibidir

$$t_k = 100 \text{ br}$$

$$0.1t_k < u_k < (0.5 + 0.5/2)t_k$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < 0.5t_k$$

$$\left(\frac{RPR_{max}}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{RPR_{max}}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max}$$

Önerilen kısıt ifadelerine göre geometrik optimizasyon yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre çizilen mekanizma ve çalışma uzayı da Şekil 14’de sunulmuştur.

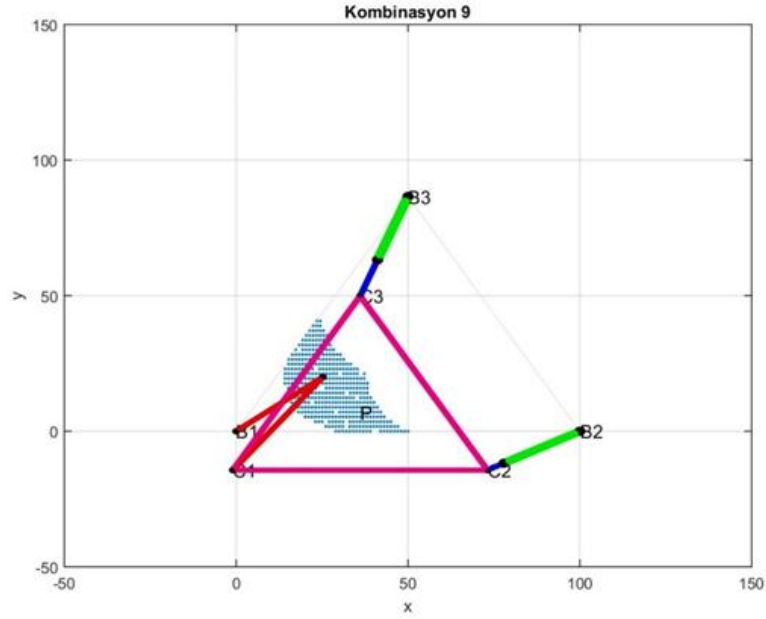
$$u_k = 74.1273 \text{ br}$$

$$l_1 = 32.1880 \text{ br}$$

$$l_2 = 45.9426 \text{ br}$$

$$RPR_{max} = 48.9859 \text{ br}$$

Ulaşıla bilinen çalışma uzayı nokta sayısı = 413



Şekil 4.11. Kısıt kombinasyonu 9 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.

4.14. KISIT KOMBİNASYONU 10

Tanımlanan kısıt ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$t_k = 100 \text{ br}$$

$$0.1t_k < u_k < (0.5 + 0.5/3)t_k$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < 0.5t_k$$

$$\left(\frac{RPR_{max}}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{RPR_{max}}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max}$$

Önerilen kısıt ifadelerine göre geometrik optimizasyon yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre çizilen mekanizma ve çalışma uzayı da Şekil 13'de sunulmuştur.

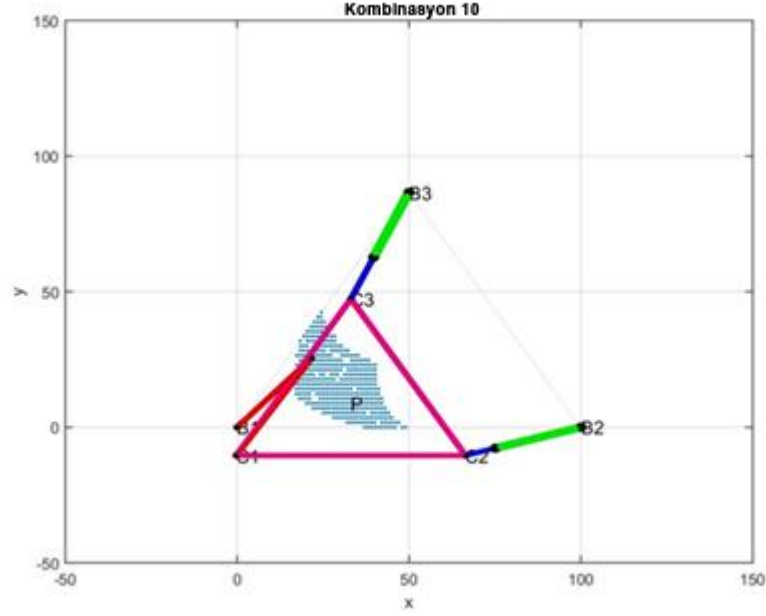
$$u_k = 66.6665 \text{ br}$$

$$l_1 = 33.2544 \text{ br}$$

$$l_2 = 46.0143 \text{ br}$$

$$\text{RPR}_{\max} = 50 \text{ br}$$

Ulaşıla bilinen çalışma uzayı nokta sayısı = 394



Şekil 4.12. Kısıt kombinasyonu 10 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.

4.15. UÇ İŞLEVCI KENAR UZUNLUĞUNUN ETKİSİ

Uç işlevci kenar uzunluğunun etkisini incelemek amacıyla yapılan geometrik optimizasyon sonuçlarına bakıldığında uç işlevci kenar uzunluğunun neredeyse temel çerçeve kenar uzunluğu ile aynı uzunluğa sahip olduğu durumda çalışma uzayı genişliğinin en fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca bu durumda çalışma uzayının şeklinin düzgün bir dairesel yapı şeklinde olduğu da görülmektedir. Bu sonuçlar göstermektedir ki birbirine yakın büyüklükteki temel ve uç işlevci çerçeveleri mekanizmanın çalışma uzayı açısından en iyi duruma gelmesini sağlamaktadır. Diğer taraftan bakıldığında, çalışma uzayının şekil olarak dairesel olduğu görülmektedir. Yani mekanizmanın temel çerçevesinin ağırlık merkezi kısmı ulaşılabilir değildir. Bu durumun bu şekilde tasarlanacak bir mekanizmanın pratik kullanımını engelleyeceği açıktır.

Son olarak bacak uzunluklarının her iki bacak tipi için temel çerçeve kenar uzunluğu ile sınırlı olduğu kombinasyon ve tüm kısıtların temel çerçeve kenar uzunluğu ile sınırlı olduğu kombinasyon için optimizasyon yapılmış ve sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

4.16. KISIT KOMBİNASYONU 11

Tanımlanan kısıt ifadeleri aşağıdaki gibidir

$$t_k = 100 \text{ br}$$

$$0.1t_k < u_k < t_k$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < t_k$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < 0.5t_k$$

$$\left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max}$$

Önerilen kısıt ifadelerine göre geometrik optimizasyon yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre çizilen mekanizma ve çalışma uzayı da Şekil 4.13’de sunulmuştur.

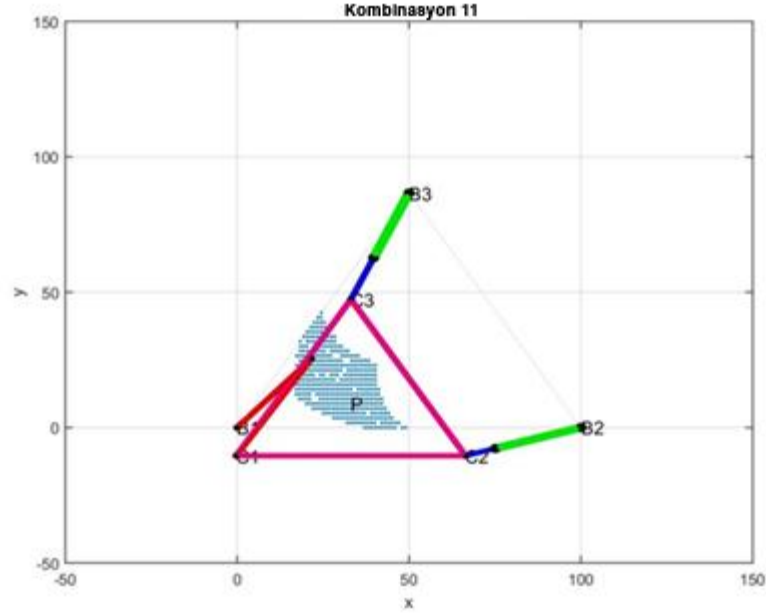
$$u_k = 99.9938 \text{ br}$$

$$l_1 = 65.2445 \text{ br}$$

$$l_2 = 79.1906 \text{ br}$$

$$RPR_{max} = 42.6693 \text{ br}$$

$$\text{Ulaşıla bilinen çalışma uzayı nokta sayısı} = 1297$$



Şekil 4.13. Kısıt kombinasyonu 11 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.

4.17. KISIT KOMBİNASYONU 12

Tanımlanan kısıt ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$t_k = 100 \text{ br}$$

$$0.1t_k < u_k < t_k$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < t_k$$

$$\left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max}$$

Önerilen kısıt ifadelerine göre geometrik optimizasyon yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre çizilen mekanizma ve çalışma uzayı da Şekil 4.14’de sunulmuştur.

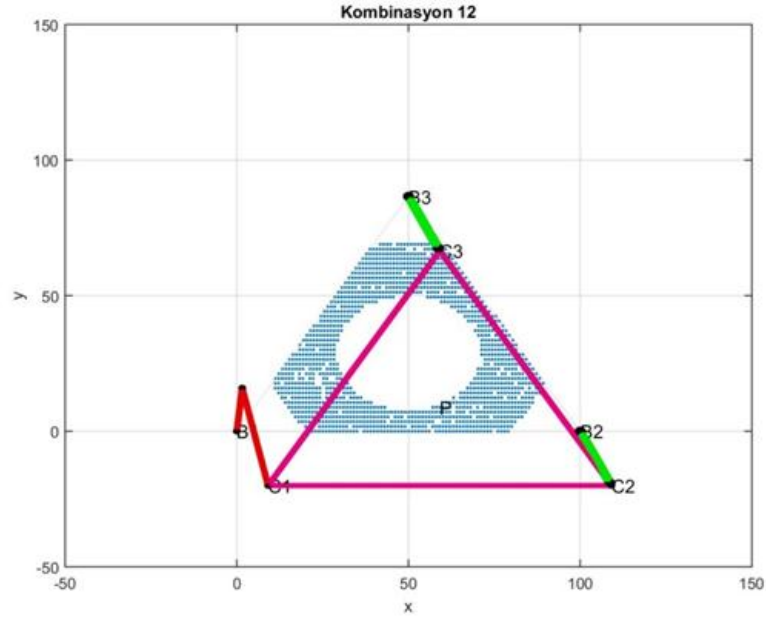
$$u_k = 99.977 \text{ br}$$

$$l_1 = 16.031 \text{ br}$$

$$l_2 = 44.8288 \text{ br}$$

$$RPR_{max} = 40.9886 \text{ br}$$

Ulaşıla bilinen çalışma uzayı nokta sayısı = 1324



Şekil 4.14. Kısıt kombinasyonu 12 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.

4.18. KISIT KOMBİNASYONU 13

Tanımlanan kısıt ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$t_k = 100 \text{ br}$$

$$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < t_k$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < t_k$$

$$\left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{(RPR_{max})}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max}$$

Önerilen kısıt ifadelerine göre geometrik optimizasyon yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre çizilen mekanizma ve çalışma uzayı da Şekil 4.15’de sunulmuştur.

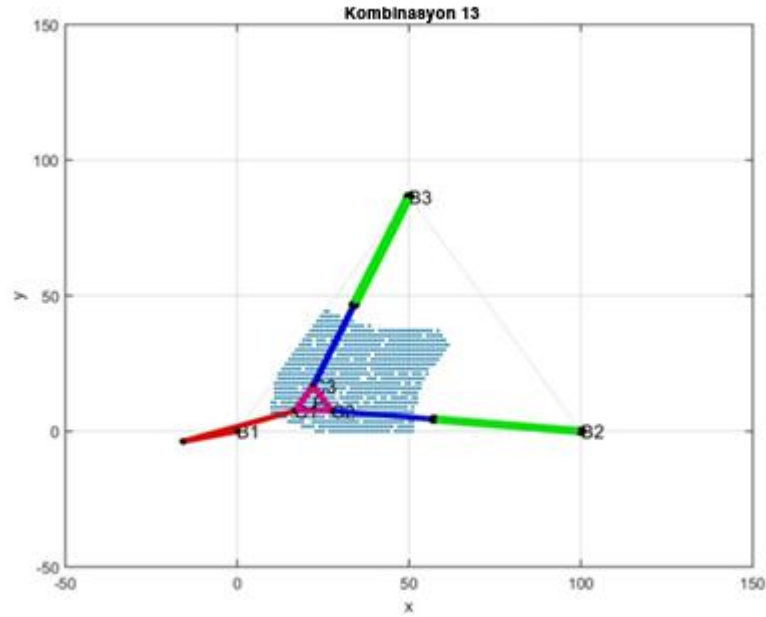
$$u_k = 10.7152 \text{ br}$$

$$l_1 = 16.0967 \text{ br}$$

$$l_2 = 64.8423 \text{ br}$$

$$RPR_{max} = 84.8673 \text{ br}$$

Ulaşıla bilinen çalışma uzayı nokta sayısı = 885



Şekil 4.15. Kısıt kombinasyonu 13 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.

4.19. KISIT KOMBİNASYONU 14

Tanımlanan kısıt ifadeleri aşağıdaki gibidir

$$t_k = 100 \text{ br}$$

$$0.1t_k < u_k < (0.5/2)t_k$$

$$0.1t_k < l_1, l_2 < (0.5 + 0.5/2)t_k$$

$$0.1t_k < RPR_{max} < t_k$$

$$\left(\frac{RPR_{max}}{2} + 1\right) < d_1 < RPR_{max} \text{ ve } \left(\frac{RPR_{max}}{2} + 1\right) < d_2 < RPR_{max}$$

Önerilen kısıt ifadelerine göre geometrik optimizasyon yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlara göre çizilen mekanizma ve çalışma uzayı da Şekil 4.16'de sunulmuştur.

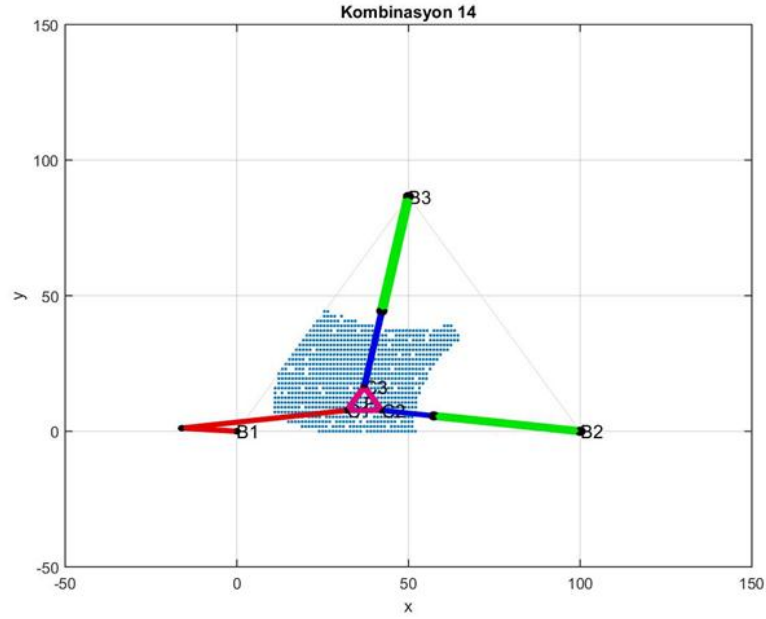
$$u_k = 10.1141 \text{ br}$$

$$l_1 = 16.0670 \text{ br}$$

$$l_2 = 69.7447 \text{ br}$$

$$RPR_{max} = 84.8812 \text{ br}$$

Ulaşıla bilinen çalışma uzayı nokta sayısı = 903



Şekil 4.16. Kısıt kombinasyonu 14 ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen mekanizma ve çalışma uzayı.

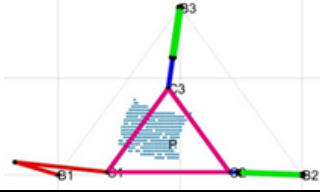
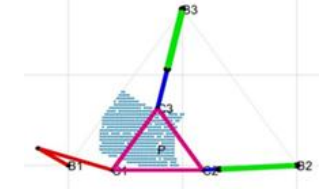
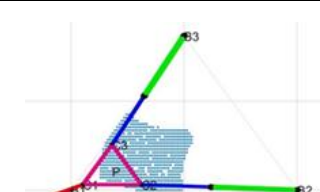
Yapılan bu son geometrik optimizasyonda, hem çalışma uzayının şekli, hem de genişliği açısından oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak şunu da belirtmek gerekir ki gerçek uygulamalarda mekanizmanın uç işlevci büyüklükleri, yapılacak işe göre değiştiği için uç işlevcinin belirli bir değerden daha küçük kenar uzunluğuna sahip olacak şekilde tasarlanması mümkün olmayacaktır.

Yapılan tüm optimizasyon işlemleri ve sonuçlarını birlikte değerlendirebilmek için aşağıda bu işlemleri özetleyen iki tablo sunulmuştur. Tabloların ilkinde elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre belirlenen bacak ve uç işlevci kenar uzunlukları yer alırken diğerinde kısıt ifadeleri ve çalışma uzayı şekilleri verilmiştir.

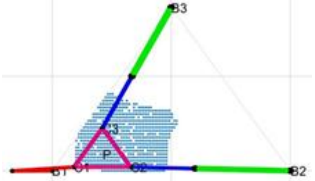
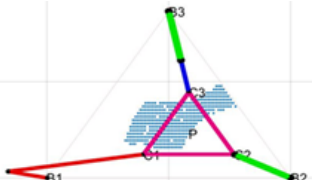
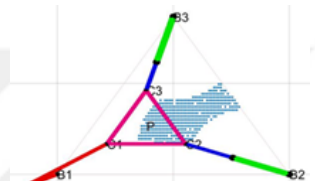
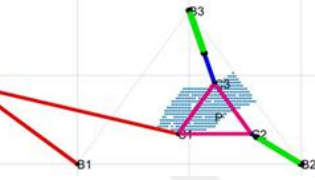
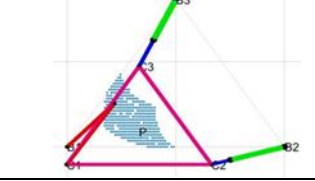
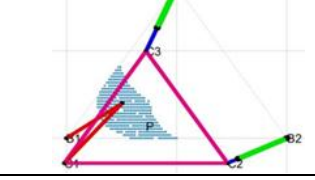
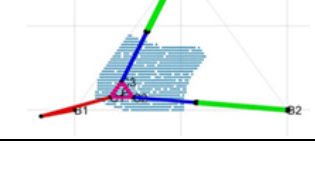
Çizelge 4.1. Optimizasyon sonuçlarına göre belirlenen bacak ve uç işlevci kenar uzunlukları

Kombinasyon	u_k (br)	l_1 l_2 (br)	RPR_{max} (br)	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı
#1	50	50	50	312
#2	50	50	67	583
#3	50	50	75	709
#4	50	50	99	714
#5	50	67	50	419
#6	50	75	50	429
#7	50	99	50	435
#8	67	50	50	394
#9	75	50	50	413
#10	99	50	50	1215
#11	50	99	99	885
#12	99	50	99	1324
#13	99	99	50	1297
#14	25	75	99	903

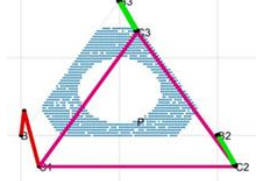
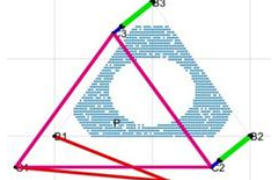
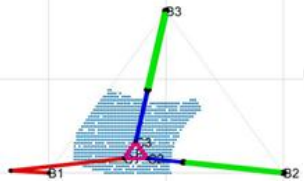
Çizelge 4.2. Kısıt ifadeleri ve elde edilen çalışma uzayı şekilleri özet olarak.

Kombinasyon #1	$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$ $0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$ $0.1t_k < RPR_{max} < 0.5t_k$		Piston uzunluğu, temel çerçeve kenar uzunluğunun %50'si kadar olduğunda
	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı	312	
Kombinasyon #2	$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$ $0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$ $0.1t_k < RPR_{max} < \left(0.5 + \frac{0.5}{3}\right)t_k$		Piston uzunluğu, temel çerçeve kenar uzunluğunun %67 kadar olduğunda
	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı	583	
Kombinasyon #3	$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$ $0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$ $0.1t_k < RPR_{max} < \left(0.5 + \frac{0.5}{2}\right)t_k$		Piston uzunluğu, temel çerçeve kenar uzunluğunun %75 kadar olduğunda
	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı	709	

Çizelge 4.2.(Devam). Kısıt ifadeleri ve elde edilen çalışma uzayı şekilleri özet olarak.

Kombinasyon #4	$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$ $0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$ $0.1t_k < RPR_{\max} < t_k$		Dönel eklem, temel çerçeve kenar uzunluğunun %50 kadar olduğunda
	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı	714	
Kombinasyon #5	$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$ $0.1t_k < l_1, l_2 < \left(0.5 + \frac{0.5}{3}\right)t_k$ $0.1t_k < RPR_{\max} < 0.5t_k$		Dönel eklem, temel çerçeve kenar uzunluğunun %67 kadar olduğunda
	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı	419	
Kombinasyon #6	$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$ $0.1t_k < l_1, l_2 < \left(0.5 + \frac{0.5}{2}\right)t_k$ $0.1t_k < RPR_{\max} < 0.5t_k$		Dönel eklem, temel çerçeve kenar uzunluğunun %75 kadar olduğunda
	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı	429	
Kombinasyon #7	$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$ $0.1t_k < l_1, l_2 < t_k$ $0.1t_k < RPR_{\max} < 0.5t_k$		Dönel eklem, temel çerçeve kenar uzunluğunun 1br eksiği kadar olduğunda
	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı	435	
Kombinasyon #8	$0.1t_k < u_k < \left(0.5 + \frac{0.5}{3}\right)t_k$ $0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$ $0.1t_k < RPR_{\max} < 0.5t_k$		Uç işlevcinin kenar uzunluğu, temel çerçeve kenar uzunluğunun %67 kadar olduğunda
	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı	394	
Kombinasyon #9	$0.1t_k < u_k < \left(0.5 + \frac{0.5}{2}\right)t_k$ $0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$ $0.1t_k < RPR_{\max} < 0.5t_k$		Uç işlevcinin kenar uzunluğu, temel çerçeve kenar uzunluğunun %75 kadar olduğunda
	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı	413	
Kombinasyon #10	$0.1t_k < u_k < t_k$ $0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$ $0.1t_k < RPR_{\max} < 0.5t_k$		Uç işlevcinin kenar uzunluğu, temel çerçeve kenar uzunluğunun 1br eksiği kadar olduğunda
	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı	1215	
Kombinasyon #11	$0.1t_k < u_k < 0.5t_k$ $0.1t_k < l_1, l_2 < t_k$ $0.1t_k < RPR_{\max} < t_k$		Uç işlevcinin kenar uzunluğu, temel çerçeve kenar uzunluğunun %50 kadar olduğunda
	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı	885	

Çizelge 4.2.(Devam). Kısıt ifadeleri ve elde edilen çalışma uzayı şekilleri özet olarak.

Kombinasyon #12	$0.1t_k < u_k < t_k$ $0.1t_k < l_1, l_2 < 0.5t_k$ $0.1t_k < RPR_{\max} < t_k$			Dönel eklemin, temel çerçeve kenar uzunluğunun %50 kadar olduğunda
	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı	1324		
Kombinasyon #13	$0.1t_k < u_k < t_k$ $0.1t_k < l_1, l_2 < t_k$ $0.1t_k < RPR_{\max} < 0.5t_k$			Piston uzunluğu, temel çerçeve kenar uzunluğunun %50'si kadar olduğunda
	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı	1297		
Kombinasyon #14	$0.1t_k < u_k < \left(\frac{0.5}{2}\right)t_k$ $0.1t_k < l_1, l_2 < \left(0.5 + \frac{0.5}{2}\right)t_k$ $0.1t_k < RPR_{\max} < t_k$			Optimizasyon kombinasyonunda ağırlık merkezine yakın oluşan çalışma uzayı en uygun kabul edilen kombinasyondur
	Çalışma Uzayı Nokta Sayısı	903		

Sonuç olarak bu iki tabloya bakıldığında en iyi çözümün 14. Kombinasyon ile mümkün olduğu görülmüştür. Bir sonraki bölümde tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında üç serbestlik dereceli asimetrik düzlemsel bir robot mekanizmasının geometrik optimizasyonu ele alınmıştır. Sunulan geometrik optimizasyon modelinde yer alan muhtemel her bir kısıt kombinasyonu tek tek ele alınmış ve elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilerek her bacak için muhtemel kombinasyon ile elde edilen en iyi mekanizma sunulmuştur. Tüm geometrik optimizasyon uygulamalarında problemin çözümü için ALO algoritması kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre;

1. Önerilen mekanizmanın çalışma uzayının asimetriye sebep olan RRR tipi bacağa doğru genişlediği dolayısıyla asimetrik yapının çalışma uzayına olumlu katkı yaptığı görülmüştür.
2. Kenar uzunlukları açısından özellikle uç işlevcinin mümkün olduğunca küçük kenar uzunluğuna sahip olmasının çalışma uzayının genişliğine katkı sağladığı görülmüştür.

Ancak burada şunu söylemek gerekir ki; uç işlevcinin kenar uzunluğu robot mekanizmasının kullanım amacına göre belirli sınırlar içerisinde olmalıdır. Bu sınırlar tasarım aşamasında göz önünde bulundurulmalıdır. Her ne kadar yapılan çalışma uzayı analizi önerilen mekanizmanın geniş çalışma uzayına sahip olduğunu gösterse de paralel robot mekanizmalarının performans analizleri için bu değerlendirme gerekli ama yeterli değildir. Bunlara ek olarak performans değerlendirmesi amacıyla mekanizmanın çalışma uzayındaki noktalara kuvvet uygulama yeteneklerinin de değerlendirilmesi gerekir. Bu tür değerlendirmelerin ileriki çalışmalarda yapılması ayrıca planlanmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- [1] F.Yılmaz, “Robotlar hayatımızda,” *FSM İlmî Araştırmalar İnsan ve Toplum Bilimleri Dergisi*, s. 12, 2018
- [2] M. Toz, “Asimetrik üç serbestlik dereceli bir düzlemsel paralel robot mekanizmasının kinematik analizi,” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 22, s. 1, ss.75-84, 2018.
- [3] M. Toz, 6 serbestlik dereceli asimetrik paralel robotların çalışma uzayı eniyilemesi ve benzetim yazılımının gerçekleştirilmesi, Doktora tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2013.
- [4] S. Kucuk, “Simulation and design tool for performance analysis of planar parallel manipulators,” *Simulation*, c. 88, s. 5, ss. 542-556, 2012.
- [5] R. Chandra, L. Rolland, “On solving the forward kinematics of 3RPR planar parallel manipulator using hybrid metaheuristics,” *Applied Mathematics and Computation*, c. 217, s. 22, ss. 8997-9008, 2011.
- [6] S. Caro, N. Binaud, P. Wenger, “Sensitivity analysis of 3-RPR planar parallel manipulators,” *Journal of Mechanical Design ASME DC*, c. 131, s. 12, ss. 121005-121013, 2009.
- [7] Q. Jiang, C. M. Gosselin, (2006). The maximal singularity-free workspace of planar 3-RPR parallel mechanisms, *2006 International Conference on Mechatronics and Automation*, (ss. 142-146).
- [8] S. M. Varedi-Koulai, H. M. Daniali, M. Farajtabar, B. Fathi M. Shafiee-Ashtiani, “Reducing the undesirable effects of joints clearance on the behavior of the planar 3-RRR parallel manipulators,” *Nonlinear Dynamics*, c. 86, s. 2, ss. 1007–1022, 2016.
- [9] J. Jesús Cervantes-Sánchez, J. M. Rico-Martínez, I. J. Brabata-Zamora, J. D. Orozco-Muñiz, “Optimization of the translational velocity for the planar 3-RRR parallel manipulator”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, c. 38, s. 6, ss. 1659–1669, 2016.
- [10] S. Kucuk, “Energy minimization for 3- RRR fully planar parallel manipulator using particle swarm optimization,” *Mechanism and Machine Theory*, c. 62, ss. 129-149, 2013.
- [11] Bruyninckx. H, (2005). *Serial robots*, In The Robotics WEBook., ss.117.
- [12] J.P. Clerc, U.A. Tol, G.J. Wiens, (2002). *Deburring using a micro/macro parallel kinematic machine*, Proceedings Conference on Recent Advances in Robotics.
- [13] W. L. Pollard (1942), *Position Controlling Apparatus*, US Patent No: 2.286.571.
- [14] V.E. Gough, S.G. Whitehall, (1962). Universal tyre test machine, *Proceedings of Ninth International Congress FISITA.*, (ss. 177).
- [15] D. Stewart, “A platform with six degrees of freedom”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.*, c. 80, ss. 371-386, 1965.

- [16] Karouia M., Hervé J. M., "Asymmetrical 3-dof spherical parallel mechanisms," *European Journal of Mechanics - A/Solids*, c. 24, ss. 47-57, 2005.
- [17] Meng J., Liu G., Li Z., "A geometric theory for analysis and synthesis of sub-6DOF parallel manipulators," *IEEE Transactions on Robotics*, c. 23, ss. 625-649, 2007.
- [18] Liu G. F., Meng J., Xu J. J., Li Z. X., (2003). Kinematic synthesis of parallel manipulators: a Lie theoretic approach, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (ss. 27-31).
- [19] Simoni R., Doria C. M., (2010). Group and graph theories applied to the analysis of mechanisms and parallel robots, *XXXIII Congresso Nacional de Matematica Aplicada e Computacional*, (ss. 20-23).
- [20] Kong X., Gosselin C. M., (2007). Type synthesis of parallel mechanisms, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, Germany.
- [21] Kim J., Park F. C., Ryu S. J., Kim J., Hwang J. C., Park C., Iurascu C. C., "Design and analysis of a redundantly actuated parallel mechanism for rapid machining," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, c.17, ss.423-434, 2001.
- [22] Tsai L. W., (1999). *Robot analysis: The mechanics of serial and parallel manipulators*, John Wiley&Sons.
- [23] M. Özdemir, "Tekil konumlardan geçen paralel robotlar için hareket planlamasında optimizasyon," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, c.32, s. 4, ss.1089-1096, 2017.
- [24] Pandilov Z., Dukovski V., (2014). *Comparison of the characteristics between serial and parallel robots*, Acta Tehnica Corviniensis – Bulletin of Engineering Tome VII.
- [25] Mirjalili. S, "The ant lion optimizer," *Advances in Engineering Software*, c. 83, ss. 80-98, 2015.
- [26] Kılıç H., Yüzgeç U., "Kutulama problemi için geliştirilmiş karınca aslanı optimizasyonu algoritması," *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, c. 11 , s. 2, ss. 13-19, 2018.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Cahit Emre CANDAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 22.12.1987 / Karadeniz Ereğli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : cahitemrecandan@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Öğretmenliği	Girne Amerikan Üniversitesi	2010
Lise	Bilgisayar / Yazılım	Karabük Anadolu Meslek Lisesi	2006

YAYINLAR

Candan C.E., Toz M., Geometric Optimization of Asymmetric 3-DOF Planar Parallel Robot Mechanism with ALO Algorithm, IEEE 2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT) DOI: 10.1109/CEIT.2018.8751943