T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL MEKANİZMA İLE ÇOK FONKSİYONLU TUTUCU TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Osman ACAR

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalını

Nisan-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Osman ACAR tarafından hazırlanan "Küresel Mekanizma ile Çok Fonksiyonlu Tutucu Tasarım ve Optimizasyonu" adlı tez çalışması 22/04/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri **İmza**

Başkan
Prof. Dr. Hacı SAĞLAM

Danışman
Prof. Dr. Hacı SAĞLAM

Üye
Prof. Dr. Ziya ŞAKA

Üye
Prof. Dr. Erol TÜRKEŞ

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Ziya ÖZÇELİK

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TINKIR

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Sait SEZGİN
FBE Müdürü

Bu tez çalışması ÖYP Koordinatörlüğü tarafından ÖYP-2017-049 numaralı proje ve S.Ü. B.A.P. Koordinatörlüğü 2019/18859 numaralı proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Osman ACAR

26/04/2021

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KÜRESEL MEKANİZMA İLE ÇOK FONKSİYONLU TUTUCU TASARIM VE OPTİMİZASYONU

Osman ACAR

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hacı SAĞLAM

Yıl, 84 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Hacı SAĞLAM
Prof. Dr. Ziya ŞAKA
Prof. Dr. Erol TÜRKEŞ
Dr. Öğr. Üyesi Ziya ÖZÇELİK
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TINKIR

İnsan gücü ile yapılan herhangi bir iş esnasında insan elinin tutma becerisi yapılan işin kalitesini etkilediği gibi robotik sistemlerde de tutma becerisi ürün kalitesini etkilemektedir. Bu tez çalışmasında, robotik tutucu parmağı için tahrik mekanizması olarak kullanılmak üzere en iyi hareket yörüngesini sağlayan optimum küresel dört-çubuk mekanizması araştırıldı.

İlk olarak, tutma işlemi için küresel bir düzlemde hareketin yörüngesi şematik olarak açıklandı. Böylelikle optimizasyon problemi tanımlandı. Optimizasyon işleminin amacı ve kısıtları detaylı olarak anlatıldı. Akabinde bu yörüngenin elde edilebilmesi için gerekli Ball-Burmester teorisinin özellikleri ve kullanımı izah edildi. Bu vesile ile küresel kinematik için Parametrik Euler-Savary denklemi oluşturularak uzuv boyutlarının hesabı basitleştirildi. Ball-Burmester noktalarının araştırılması için yeterli hassasiyete sahip bir Harmonik Arı Algoritması geliştirildi. Bu algoritma ile tanımlanan optimizasyon problemi çözüldü. Elde edilen sonuçlar için şematik mekanizma tasarımları matematik programları kullanılarak çizildi. Optimizasyon algoritmasından elde edilen sonuçlar arasında seçim kriterleri açıklandı. Neticede elde edilen boyutlar sayesinde küresel dört çubuk mekanizmasından oluşan üç parmaklı bir robotik tutucu prototipi katı modeli tasarlandı. Bu tasarımda küresel dört çubuk mekanizmasının biyel noktası bir parmak ucu olarak şekillendirildi. Bilgisayar programlarında tasarlanan bu dört çubuk mekanizmasının çeşitli geometrik özelliklere sahip cisimleri tutması incelendi. Muhtelif yüzeylere sahip cisimlerin statik kuvvet analizleri yapılarak tutma işleminde başarısı test edildi. Küresel mekanizmanın hareket yörüngesi boyunca parmak ucunda oluşacak kuvvet hesabı yapıldı.

İkinci olarak, katı modeli tasarlanan prototip imalatı için uygun yöntemler belirlendi. Ekonomik olması da göz önünde bulundurularak 3 boyutlu yazıcı teknolojisinde ABS malzeme kullanılarak %80 dolulukta 50 μm hassasiyette imalat yapıldı. İmalatı yapılan parçaların mafsal eksenlerinin bir merkez noktasında kesişmesi durumu kontrol edildi. Bütün parçalar montajlandıktan sonra robotik tutucunun parmak ucunun hareket yörüngesinin eğriliği deneysel bir yöntemle ölçüldü. Daha sonra tutucunun kavrama kabiliyeti tut yerleştir işlemi ile incelendi. Çeşitli boyutlarda cisimlerin tutulması işlemi gerçekleştirildiği esnada parmak ucu ve cisim arasındaki temas yüzeylerinde kuvvet sensörleri ile ölçümler yapıldı. Böylece, en uygun şekilde tasarlanmış mekanizmanın kuvvet aktarımı deneysel ölçümlerle ortaya çıkarıldı.

Anahtar Kelimeler: Ball-Burmester teorisi, Küresel dört çubuk mekanizması, Optimizasyon algoritması, Robotik tutucular, Yörünge eğrilik ölçümü, Temas kuvveti ölçümü.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

MULTI-FUNCTIONAL ROBOTIC GRIPPER DESIGN AND OPTIMIZATION BY USING SPHERICAL FOUR-BAR MECHANISM

Osman ACAR

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Hacı SAĞLAM

2021 Year, 84 Pages

Jury
Prof. Dr. Hacı SAĞLAM
Prof. Dr. Ziya ŞAKA
Prof. Dr. Erol TÜRKEŞ
Dr. Öğr. Üyesi Ziya ÖZÇELİK
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TINKIR

The grasp ability in robotic systems affects the quality of the product, just as the ability of human hand affects. In this thesis, the optimum spherical four-link mechanism that provides the best trajectory of motion to be used as the drive mechanism for the robotic gripper finger was investigated.

First, the trajectory of motion on a spherical plane for the grasping process was schematically explained, and the optimization problem was defined, the objective and constraints of the optimization process were explained in detail. Subsequently, the properties and use of Ball-Burmester theory required to obtain this trajectory were explained. Hereby, the calculation of link dimensions was simplified by creating the Parametric Euler-Savary equation for spherical kinematics. A Harmonic Bee Algorithm with sufficient precision was developed to search for Ball-Burmester points. The optimization problem defined by this algorithm has been solved. Schematic mechanism designs were drawn using mathematical programs for the obtained results. The selection criteria were explained among the results obtained from the optimization algorithm. Thanks to the resulting dimensions, a three-finger robotic gripper prototype solid model consisting of a spherical four-link mechanism was designed. In this design, the coupler point of the spherical four-link mechanism was shaped as a fingertip. The grasp ability of the four-link mechanism for objects with various geometric properties was examined. Static force analysis of objects with various surfaces was performed and its success in grasping process was tested. The force that will occur at the fingertip along the motion trajectory of the spherical mechanism was calculated.

Secondly, suitable methods were determined for manufacturing the prototype with a solid model. Considering that it is economical, manufacturing was made at 80% filling and 50 µm precision by using ABS material in 3D printer technology. The intersection of the joint axes of the manufactured parts at a central point was controlled. After all parts were assembled, the curvature of the motion trajectory of the fingertip of the robotic gripper was measured by an experimental method. Later, the grasp capability of the gripper was examined using the pick-place procedure. Measurements were made with force sensors at the contact surfaces between the fingertip and the object while grasping objects of various sizes. Thus, the force transmission of the optimally designed mechanism was revealed by experimental measurements.

Keywords: Ball-Burmester theory, Spherical four-bar mechanism, Optimization algorithm, Robotic grippers, Trajectory curvature measurement, Contact force measurement.

ÖNSÖZ

Son yarım yüzyılda robot teknolojilerindeki gelişmeler, endüstriyel ve sosyal ortamlarda robot teknolojilerinin kullanımını hızla artırdı. Bu gelişmeler toplumu, sanat içermeyen sürekli işlerde el emekçiliğinden zihin emekçiliğine dönüşüme zorlar hale geldi. Bu dönüşüm sırasında el emekçiliği konumuna robotlar yerleştirilmeye başlandı. Bu yerleşim aşamasında, robotik el ya da tutucular derinlemesine araştırılmaya başlandı. İnsan elinin becerisini karşılayabilecek robotik eller üzerine 1980 yılından sonra çalışmalar hızla arttı. Bunun yanında insan eline tam olarak benzemeyen ancak birçok tutma işlemini verimli bir şekilde yerine getirebilen robotik tutucular ile ilgili çalışmalar da büyük ilgi çekti. Böylece talaşlı imalat gibi endüstriyel alanlarda robotik tutucuların kullanılması yeterli görüldü. Bu tutucuların sıkıştırmalı ya da nesnenin çevresini sarmalı tutma operasyonlarında, kavrama kabiliyetleri ve çeşitli işlemlerin başarılı gerçekleştirilmesindeki performansları incelendi. Tutucu parmakları nesnelerin etrafını sarabilmek için birkaç mafsallı tasarlandığında tendonlar ya da diferansiyel mekanizmalar ile tahrik edilmesi gerektiği keşfedildi.

Bu tez çalışması, küresel mekanizmanın tutucu parmağı olarak kullanımının incelenmesini kapsamaktadır. Bu kapsamda küresel kinematik için parametrik Euler-Savary denklemi geliştirilerek küresel mekanizma boyut hesabı basitleştirilmiştir. Daha sonra 0,001 hassasiyette Harmonik Arı Algoritması geliştirilmiştir. Tutucu parmağı olarak kullanılması planlanan küresel dört-çubuk mekanizmasının yörünge ve boyutlarının optimizasyonu için amaç ve kısıt fonksiyonları oluşturulmuştur. Son olarak optimizasyon sonucu elde edilen boyutlar kullanılarak üç boyutlu yazıcıda gripper prototip parçalarının imalatı yapılmıştır. Tasarlanan küresel dört çubuk mekanizmasının çeşitli yüzeylere sahip nesneleri tutma esnasında parmak ucuna gelebilecek kuvvetler analizi edilmiştir. Daha sonra tutucunun performansı ile alakalı bazı deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde parmak ucu ile tutulan cisim arasında bir sensör ile kuvvet değerleri ölçülmüştür. Deney sonucunda tasarlanan mekanizmanın kuvvet aktarım grafiği elde edilmiştir ve tezin sonuç kısmında açıklanmıştır.

Bu çalışmanın teorik alt yapısını oluşturmamda büyük katkıları olan, yüksek lisansımın tamamında ve doktora çalışmamın 2017-2019 yılları arasında danışmanlığımı yürüten Prof. Dr. Ziya ŞAKA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Tezimin teorik alt yapısı ile alakalı doktora tezini paylaşan Dr. Öğr. Üyesi Ziya ÖZÇELİK'e teşekkür ederim. Sezgisel optimizasyon yöntemlerini öğreten Prof. Dr. Mete KALYONCU'ya, Selçuk Üniversitesi ÖYP koordinatörlüğü tarafından ÖYP-2017-049 numaralı proje ile desteklenen bu tezime ek olarak 19401081 numaralı Bilimsel Araştırmalar Projesi yürütücüsü olarak destek veren danışmanım Prof. Dr. Hacı SAĞLAM'a teşekkür ederim.

Tezim ile alakalı çalışmalarımı yürüttüğüm süreçte istişareleri ile destek vererek daima yanımda olan mesai arkadaşlarıma ve her durumda maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan eşime ve aileme müteşekkirim.

Osman ACAR
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **viii**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **4**

2.1. Tutucu İmalatçıları 7
2.2. Tendon tahrikli tutucular 10
2.3. Mekanizmalı tutucular 23

3. MATERYAL VE YÖNTEM **34**

3.1.Optimizasyon probleminin belirlenmesi 40
3.1.1. Amaç fonksiyonunun belirlenmesi 43
3.1.2. Optimizasyon kısıtları 43
3.1.3. Optimizasyon algoritması 45

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA **48**

4.1. Tutma Kabiliyetinin İncelenmesi 58
4.2. Yörünge Eğriliğinin Deneysel İncelenmesi 80

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER **83**

5.1 Sonuçlar 83
5.2 Öneriler 84

KAYNAKLAR **85**

EKLER ..... Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ÖZGEÇMİŞ ..... Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ω	; Açısal hız
$\omega_{x1}, \omega_{x2}, \omega_{x3}, \omega_{y2}, \omega_{y3}$	; Ani invaryantlar
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$	; Küresel mekanizma uzuv boyutları
$\theta_2, \theta_3, \theta_4$	; Küresel mekanizma mafsal açıları
θ_A	; u ve PA yayı arasındaki küresel açı
π_c	; Hareketli pol eğrisi
π_f	; Sabit pol eğrisi
κ_g	; Jeodezik eğrilik
γ	; Yardımcı küresel açı
γ_1, γ_3	; Sürtünme kuvveti yatay eksen açısı
λ	; Yardımcı küresel açı
ϕ	; Tutulacak nesne merkez ekseni ve Z ekseni arası açı
ρ	; Eğrilik yarı çapı
ρ_g	; Jeodezik eğrilik yarı çapı
u	; Küresel kinematikte noktanın çizgisel hızı
$\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$	; Bileşke tepki kuvveti ve normal tepki kuvveti arası açı
μ	; Biyel uzvu yardımcı küresel açı
μ_1, μ_2, μ_3	; Küresel obje yüzey normal tepki kuvveti açısı
$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$	; Burmester noktaları polinomu kat sayıları
t	; Yapay parametre
t_1, t_2, t_3, t_4	; Polinom kökleri
a, b	; Ani invaryantlar
$\dot{\mathbf{r}}$	; **r** yer konum vektörünün zamana göre türevi
$\ddot{\mathbf{r}}$	; **r** yer konum vektörünün zamana göre ikinci türevi

1. GİRİŞ

Tutma işlemi doğada birçok bitki ve hayvanda yaygın gözlemlenen bir işlemdir. Bu konudaki incelemeler Aristotle'in *De Partibus Animalium* adlı eseriyle başlamış ve Leonardo Da Vinci'nin *Codex Atlanticus* kitabındaki eklemli kanat çalışmalarıyla devam etmiştir. Tutucular üzerine araştırmalar günümüzde halen devam etmektedir. Tıbbi operasyonlarda, uzay araştırmalarında, zirai faaliyetlerde, nükleer operasyonlarda, imalat süreçlerinde ve daha birçok alanda tutucular kullanılmaktadır. Kullanım alanına göre daha etkin kullanım sağlayacak yöntemler araştırılmaktadır. Tutucularda ulaşılmak istenen düzey, tutma işleminde insan elinin sağladığı esneklik ve daha güçlü tutma performansıdır.

Robotik tutucular yarım asırdır bilimsel araştırma konusudur. Bu konu tutma yöntemlerine göre sınıflandırılmıştır; Şekil kapalı tutma, Kuvvet kapalı tutma, Yarı şekil kapalı ve yarı kuvvet kapalı tutma, Pnömatik kuvvet kapalı tutma, Manyetik tutma, Yapışkan tutma (Monkman ve ark., 2007). Bu araştırmada geliştirilen tutucu, Şekil ve Kuvvet kapalı tutma sınıflarına girmektedir. Çünkü yapısı nedeniyle, küresel mekanizmalar cismin etrafını sarıp hareketini kısıtlayabildiği gibi parmak uçları arasında bir cisme 3 farklı doğrultuda kesişen kuvvet uygulayarak dengede tutabilmektedir.

Şekil kapalı ve Kuvvet kapalı robotik tutucuların da kendi içinde mekanizma yapılarına göre sınıflandırılması mümkündür. Bunlardan bazıları; tendon tahrikli açık çevrim mekanizmalar, düşük tahrikli yarı pasif mekanizmalar, krank-biyel mekanizmaları, kayar uzuv bağlı paralellogram dört çubuk mekanizmalarıdır. Tendon tahrikli mekanizmalara Schunk firmasının 3 parmaklı tutucusu örnek olarak verilebilir. Düşük tahrikli tür mekanizmaları kullanan tutuculara ROBOTIQ 2F örnek gösterilebilir. Kayar uzuv bağlı paralellogram dört çubuk mekanizmalarının kullanıldığı tutuculara ROBOTIQ marka 3 parmaklı tutucu örnek olarak verilebilir. Bazı robotik tutuculardа eklemsiz parmaklar ile tutma yapılmaktadır. Bu tutucuların parmakları tek bir tahrik ile simetrik hareketler yaparak cismi sıkıştırarak tutma işlemi gerçekleştirirler. Bu tür mekanizmanın kullanıldığı robotik tutucu örneği ise Schunk firmasının iki parmaklı tutucuları olabilir. Bu tutucuların parmaklarını tahrik eden mekanizma, pnömatik silindirden ya da kam mekanizmalarından oluşmaktadır. Literatürde küresel mekanizmalar ile tutucu tasarımı hakkında tek serbestlik dereceli bir paralellogram mekanizması bulunmaktadır (Kocabas, 2009). Bu mekanizmada parmaklar birbirinden bağımsız çalışamadığı için düzensiz şekillerin tutulmasında sorun yaşanabilir.

Bu tez çalışmasında öne sürülen hipotezler;

1-) Küresel mekanizma ile hareket ettirilen bir tutucu parmağı eğer parmak ucu Büyük Daire Yayı (BDY)'na çok yakın bir yörüngede hareket ederse kuvvet kapalı formda tutma gerçekleştirebilir.

2-) Küresel mekanizma kullanılarak tasarlanan bir tutucu cisimlerin etrafını sarmak için fazladan tahrik elemanına ihtiyaç duymadan kavrama yapabilir.

3-) Küresel mekanizma ile oluşturulan tutucular şekil kapalı, kuvvet kapalı tutmayı aynı anda sağlayabilirler.

4-) Küresel mekanizmalı tutucular birbirinden bağımsız parmak tahriki sayesinde düzensiz geometriye sahip cisimleri de tutabilirler.

Bu çalışma kapsamında düzgün geometriye ve düzensiz geometriye sahip cisimlerin statik tutulması ile alakalı 3 kuvvet etkisi altında cisimlerin denge şartları incelendi. Bu şartları sağlayacak mekanizma tasarımı için gerekli optimizasyon problemi tanımlandı ve geometrik kısıtlar belirlendi. Bu optimizasyon probleminin çözümünde hareketin 90^{o}'lik kısmında biyel noktası yörüngesinin eğriliği sıfıra en yakın Ball-Burmester noktalarının ani invaryantlarının aranmasına uygun Harmonik Arı Algoritması (HAA) geliştirildi. Bu algoritma ile 0,001 hassasiyet ile Ball-Burmester noktaları için ani invaryant değerleri araştırıldı. Ball-Burmester noktaları kullanılarak öncelikle mekanizmanın biyel noktaları ve sonra sabit mafsal noktalarının koordinatları hesaplandı. Sabit mafsal koordinatları hesabı için küresel kinematikte Parametrik Euler-Savary denklemi geliştirildi. Bu denklem sayesinde uzuv boyutları hesaplanarak optimizasyon kısıtları içinde uzuv boyutları arasında belirli bir oran aralığını sağlama şartı ve Grashof teoremi kullanılarak mekanizma tipi ayrımı oluşturuldu. İstenilen yörünge şartlarını sağlayacak en uygun mekanizma boyutları elde edildi ve grafik olarak çizdirildi.

Tutma işlemine uygun bir katı model oluşturularak simülasyonları incelendi. Bu sayede çeşitli yapıdaki cisimlerin tutulmasına mâni olabilecek tasarım fazlalıkları elimine edilerek geometrik açıdan iyileştirildi. 3 boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak üretim yapıldı. Mekanizma parçaları montajlanarak bir kontrolcü ile servo motorlar tahrik edildi ve biyel noktası olarak isimlendirilen, robotik tutucuda parmak ucunu oluşturan kısmın yörüngesi bir deney düzeneğinde incelenerek eğriliği ölçüldü. Ölçümlerden %97 güvenilirlikte sonuç elde edildi. Tasarım prototipi ile çeşitli geometrideki cisimlerin tutulması işlemi gerçekleştirildi. Prototip toplamda 1,4 kg ağırlıkta, 12 cm iç ve 14 cm dış yarıçapta imal edildi. 1 cm ila 25 cm aralığında 9 kg'lık tutma sağladığı gözlemlendi.

Bu araştırma konusunda literatür araştırmalarına yer verilmeden önce tutucu literatüründe yaygın olarak kullanılan bazı teknik terimlerin açıklanması gerekmektedir. Bu terimler İngilizce olarak türetildiğinden açıklaması ve tercümesi en uygun şekilde bir kelime ile verilmiştir.

Serbestlik derecesi (Degree of freedom), sistemde bulunan bağımsız değişkenlerin sayısını ifade eder. Robotik tutuculardа serbestlik derecesi her bir parmağın mafsallarının serbestlik derecelerinin toplamına eşittir. Bir mafsalın bağımsız dönme ve öteleme hareketlerini gerçekleştirebildiği eksen sayısı serbestlik derecesini ifade etmektedir. Kapalı çevrim küresel ya da düzlemsel mekanizmalar kullanılan tutucuların serbestlik derecesi Grübler denklemi ile hesaplanır.

Düşük tahrikli (Underactuated), matematiksel olarak bir sistemin giriş vektörünün çıkış vektöründen daha düşük boyutta olması durumuna denir. Diğer bir ifade ile serbestlik derecesini oluşturan bağımsız tüm hareketleri sağlayabilmek için gerekli tahrik elemanı sayısının serbestlik derecesinden düşük olması durumudur. Genellikle serbestlik derecesini oluşturan elemanlardan bir ya da birkaç tanesine yay veya elastik bir pasif tahrik elemanı takılarak sisteme düşük tahrik özelliği kazandırılır.

Kavrama (Grasping), yönteme bakmaksızın bir nesnenin hareketlerini kısıtlayarak tüm dış etkiler altında hareketsiz vaziyette kalmasını sağlamaktır. Tutma (Gripping), belirli bir yöntem ile cismin hareketini kısıtlamaktır. Tutma işleminde dış etkiler altında hareketsiz kalma şartı yoktur. Endüstride kullanılan tutucuların çoğu sadece tutma işlemi gerçekleştirmektedir. Bu işlem kuvvet-kapalı (force-closure) ve şekil-kapalı (form-closure) yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Kuvvet-kapalı tutma işlemlerinde cisme etkiyen kuvvetler statik dengededir. Şekil-kapalı tutma işleminde ise tutulacak nesnenin etrafı sarılarak hareketi kısıtlanmaktadır.

Kararlılık (stability), tutma işleminde nesnenin konumunun hiç değişmeden kuvvet uygulanmasıdır. Jakobiyen matrisinin analizi ile tutma kararlılığı konusunda yorum yapılabilir. Jakobiyen matrisi benzer bir işlem esneklik (compliance) için de geçerlidir. Esneklik, tutulan cismin hareket ettirilebilmesi durumudur. Örnek olarak domates hasat eden bir robotik tutucu, domatesin düzensiz geometrik yüzeylerine rağmen zarar vermeden tutabilmesi tutucunun esnekliğine bağlıdır. Kararlılık ve esneklik robotik tutucuların işlem yaptığı operasyona göre değişiklik göstermektedir. Pim-delik montaj işleminde pimin deliğe girmesi için esneklik gerekir. Yani tutulan pimin deliğe yerleştirilmesi esnasında hareket edebilmelidir. Bu esneklik, empedans kontrolde kullanılarak montaj işleminin daha kısa sürede ve daha verimli gerçekleşmesini sağlar.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yapay el tasarım ve kullanımı ilk olarak Mısırlı mumyaların kollarında protez olarak keşfedilmiş olsa da ilk fonksiyonel yapay el kayıtları Gaius Plinius Secundus tarafından raporlanmıştır (Lemaire, 1829). Burada raporlanan yapay el, Romalı bir memurun Pön savaşları sonrası kaybettiği eli yerine protez olarak takılmıştır. İnsan elinin tutma kabiliyeti hakkında ilk yazılı kayıtlar ise, Aristotle'in, kendinden önceki meslektaşı Anaxagoras'ın insan eli ve beyni arasındaki ilişkiye yönelik tartışmalarına cevap veren açıklamaları *De Partibus Animalium* adlı eserinde yazmasıyla başlar. Bu açıklamalarda insan elinin tutma kabiliyetleri derinlemesine incelenerek beynin gelişimine etkisi ve böylece diğer canlılara göre üstünlüğü ifade edilmiştir. İnsan elinin tutma kabiliyeti en ince ayrıntısı ile ele alındığında, günümüz teknolojisi robotik eli Schunk SVH'ın bile bu kabiliyetlere ulaşamadığı açıkça görülmektedir.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan robotik tutucuların temeli, esasen Roma döneminde demircilerin sıklıkla kullandığı (Galli ve Sartorio, 2009) ve günümüzde halen kullanılan pense ve türevlerinin iki parmaklı mekanizmalarına dayanmaktadır. Günümüzde kullanımına pek rastlanmayan iç tutucunun temeli (Galli ve Sartorio, 2009)'de ve Vitruvius'un tutucu tasarımı (Togliani, 2019)'de sunulmuştur. Bunların çoğu tek mafsal ile birbirine bağlı şekillendirilmiş iki parçadan oluşmaktadır. Günümüzde esnek mekanizmalar olarak bilinen çalışmaların da temelini tıp için geliştirilen tutucu aletlerinde (Galli ve Sartorio, 2009) görmek mümkün. İtalya'daki Rönesans döneminde Leonardo Da Vinci ve Mariano Di Jacopo gibi hezârfenler daha bir çok tutma işlemi yapan aletler tasarlamışlardır (Ceccarelli, 2008). Bunları protez tasarımları takip etmiştir (D'Aliesio ve Ceccarelli, 2011).

Robot teknolojisinin gelişimi sürecinde tutucuların bir cismi kavraması esnasında tutma kararlılığı konusunda cisim ve tutucu temasının analizleri yapılmıştır (F, 1897; Salisbury ve Craig, 1982; Bicchi ve Kumar, 2000). Bu araştırmalar doğrultusunda tutma işleminin kararlılığını belirleyen bir matris (stiffness matris) oluşturulmuştur (Salisbury ve Craig, 1982; Howard ve Kumar, 1996). Özellikle montaj hatlarında ihtiyaç duyulan esnek tutma kabiliyeti üzerine çalışmalar yapılarak servo kazanımı denilen katsayıların elde edilmesi ile empedans kontrol çalışmaları başlatılmıştır (Cutkosky ve Kao, 1989).

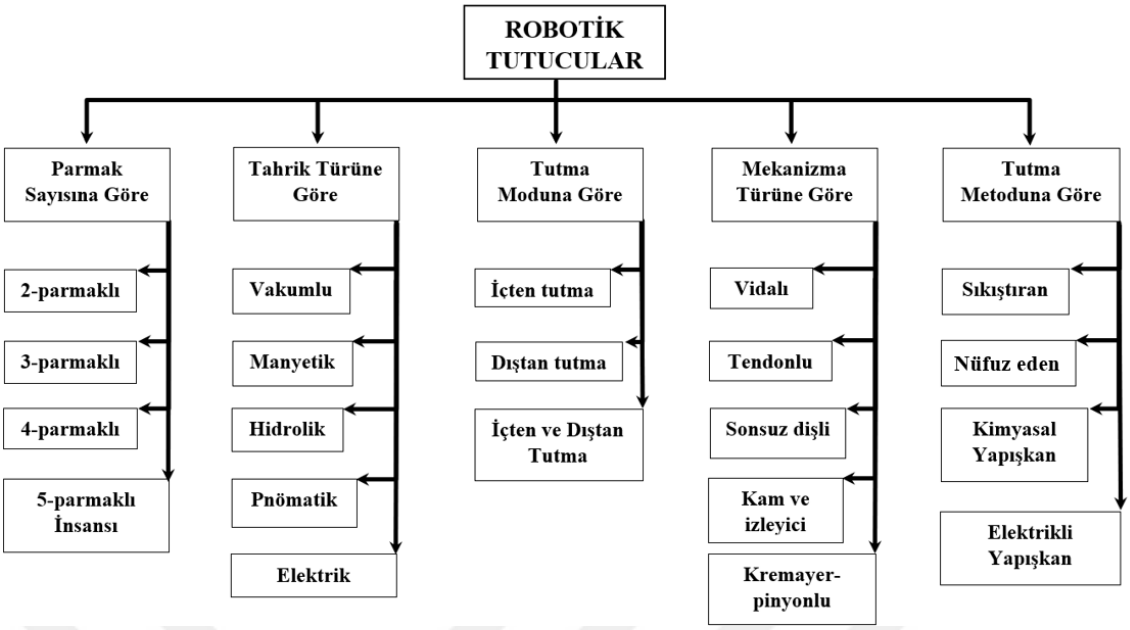
Robotik biliminin başlangıcından beri robotik manipülatörler ile çevrenin etkileşimi birçok araştırmaya konu olmuştur. En eski robot kullanımı, bir nesnenin tutulup önceden belirlenen bir konuma yerleştirilmesi işlemidir. Bu nedenledir ki tutma

işlemi, robotların yapması istenilen öncelikli görevlerdendir. Bir robotik tutucunun tasarımı, metal objelerin tutulması için vinçlere monteli elektromıknatıs kadar basit veya çok serbestlik dereceli eklemli yapıya sahip antropomorfik el (Kaboli ve ark., 2015) veya protez tasarımı (Cerulo ve ark., 2017) kadar karmaşık olabilir. Karmaşık tasarımlar birbiriyle bağlı birçok hareketli parçalar içerir ve çevresiyle etkileşime geçerek tutulacak nesneleri hareket ettirip kullanıcıya geri bildirim sağlayabilir (Kobayashi ve ark., 2011).

Robotik tutucu literatürü çok sayıda araştırmalar içermesine rağmen, her türlü tutma işlemine tek tür bir tutucu tasarımının yeterli kabiliyeti sağlamamasından dolayı muhtelif tutma işlemleri için araştırmalar devam etmektedir. Bu nedenle endüstride hususi işlemler için uygun tutucular kullanılır. Bir torna aynasının ayakları ve matkap mandren ayakları yüksek yükler altında çalışabilen tutucular olarak değerlendirilebilir. Ancak montaj hatlarında bir parçanın bir yerden alınıp başka bir yere konulması ya da montajı gibi işlemlerde daha düşük yüklere dayanıklı hafif ama hızlı tutucular gereklidir.

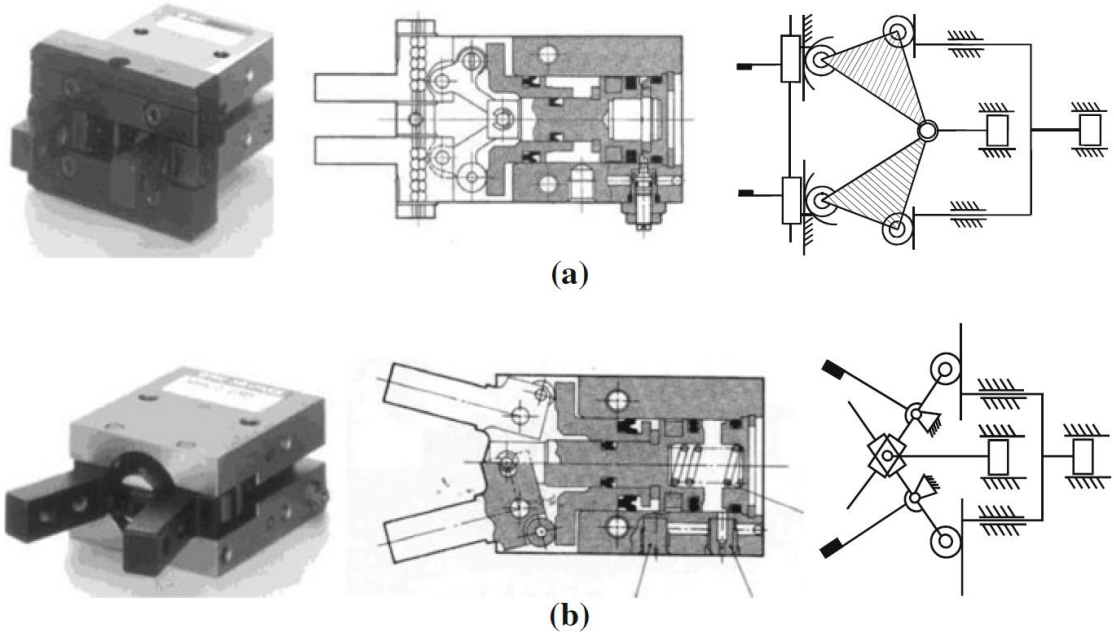
Tutma işlemleri üzerine yapılmış araştırmalar neticesinde bir taksonomi ortaya çıkarılmıştır (Cutkosky, 1989; Liu ve ark., 2014). Bu taksonomiye bağlı çeşitli tasarımlar ortaya konulmuştur. Bu tasarımların sınıflandırılması; parmak sayısına göre, tahrik türüne göre, tutma moduna göre, mekanizma türüne göre, tutma metoduna göre beş ana başlık altında incelenmiştir (Şekil 2.1).

Tutucu tasarımı konusunda tasarım gereksinimleri ve tasarım yaklaşımları henüz tam olarak tanımlanamadığından çeşitli zorluklar yaşanmaktadır. Bu zorlukların başında, tutucunun belirli bir tutma taksonomisine göre ya da taksonomiden bağımsız çok serbestlik dereceli parmaklı olmasına göre tasarımının yapılması gelmektedir. Bunu takip eden sorun tutucu tasarımının cisimle olan temasıdır. Tutucunun nesne ile teması noktasal, çizgisel ya da yüzeysel olabilir (Monkman ve ark., 2007). Bu temas türlerinin yanı sıra temas kısmının malzemesinin de bir etkisi bulunmaktadır (Cutkosky ve Kao, 1989). Tutucunun performans incelemesi için yapılacak tutma işleminin her türlü tutma işleminde geçerli olma durumu diğer bir sorundur. Bir tutucu belirli bir takım geometrik şekli tutmada son derece başarılı olabilirken, diğer bazı geometrideki cisimlerin tutulmasında başarının sınırlarına dahi yaklaşamayabilir (Babin ve Gosselin, 2020). Bu duruma örnek olarak düzlemsel ince yapıdaki bir cismi düz bir zemin üzerinde tutabilmek için bu cismin bir kenarının kaldırılmasını kolayca gerçekleştirebilen tutucuda özel bir mekanizma tasarlanmıştır (Babin ve Gosselin, 2018).



Şekil 2.1. Robotik tutucu sınıflandırması

Robotik tutucuların gelişimi 19.yy'da tahrik gücünün iletimi açısından daha yüksek verim elde etmek için çok uzuvlu mekanizma tasarımlarına dayalı çözümler ile başlamıştır. Modern endüstrideki tutuculardan birçoğu halen Şekil 2.2'de gösterilen çok uzuvlu kapalı çevrim mekanizmalar kullanılarak tasarlanmaktadır. İki parmaklı tutucu hareket mekanizmaları (Dudita ve ark., 1981) tarafından sistematik bir çalışmayla literatüre kazandırılmıştır.



Şekil 2.2 Moderin tutucularda kullanılan çok uzuvlu mekanizmalar: **a)** MHC2-10 model tutucu; **b)** MHQG2-10 model tutucu (Penisi ve ark., 2003).

2.1. Tutucu İmalatçıları

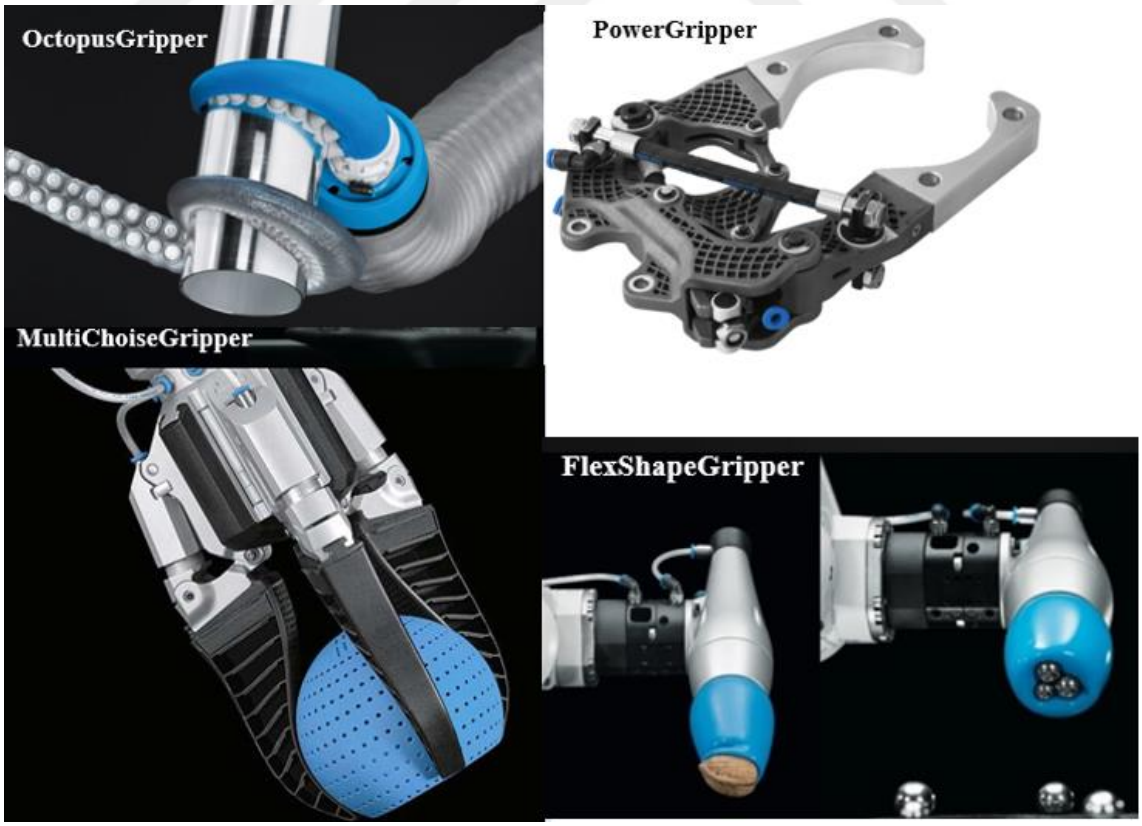
Bu bölümde endüstride kullanılmakta olan standart robotik tutucuların durumu hakkında genel bilgi verilecektir. Robot imalatı yapan firmalar genellikle robotik tutucu imalatı yapmazlar. Bu iki üretim sektörü birbirinden farklı alanlardır. Robotik tutucu geliştirme ve araştırmalarında temel motivasyon otomasyon seviyesini yükselterek tutma işlemi ve diğer etkileşimleri gerektiren işlemleri başarıyla yerine getirmektir. Ancak, nesne boyutu ve geometrisi, robotik tutucuların başarıyla kavrayabileceği cisim sayısını kısıtlamaktadır. Bu nedenle tutucu imalatçıları çok farklı özelliklere sahip tutucu ürünleri için standartlar oluşturmuşlardır. Bu kısımda ürünleri yaygın olarak kullanılan SCHUNK, Festo, ROBOTIQ, IAI, Parker Hannifin, Yamaha Motor, Zimmer, SMC ismindeki firmaların ürün özelliklerinde kısaca bahsedilecektir.

SCHUNK, en küçük paralel tutucudan en büyük tutuculara iki parmaklı, antropomorfik ve üç parmaklı özelliklere sahip 2550 adet ile en geniş standart tutucu çeşidini sağlayabilmektedir. SCHUNK firmasının ürünleri hassasiyeti, uzun ömürlülüğü ve sağlamlığı ile bilinen tutuculardır. Stoklarındaki 4 binden fazla standart parça ile hidrolik, pnömatik ve elektrik tutucuları üzerine dünyanın en kapsamlı robotik tutucu üreticisidir. Ürünlerinden birçoğu tak-kullan kolaylığı ve bazıları da insan iş birliğine uygunluğu sağlamaktadır. SDH2 model üç parmaklı robotik tutucu yaygın kullanılan düşük tahrikli bir üründür (Şekil 2.3). Bu ürün 3 parmağı ve 6 ekseni sayesinde geniş boyut aralığında nesnelerin tutulmasında kullanılmaktadır. Ayrıca her bir parmağı oluşturan uzuvlar üzerinde bulunan kauçuk malzemeler altına yerleştirilen sensörler sayesinde empedans kontrolü sağlamakta ve hassas tutma işlemine imkân vermektedir.



Şekil 2.3 SCHUNK firması ürünlerinin kronolojik sıralaması(SCHUNK, 2021).

Festo, Albert Fezer ve Gottlieb Stoll tarafından 1925 yılında Almanya'da kurulmuş otomasyon ve kontrol üzerine bir firmadır. Mühendislik üzerine bir yönetim sistemi olan Festo, son 15 yıldır biyonik robotlar üzerine de çalışmalar yürütmektedir. Festo'nun geliştirdiği FlexShapeGripper, MultiChoiceGripper, PowerGripper, OctopusGripper isimli modeller biyonik tutuculardır (Şekil 2.4). PowerGripper isimli model kuş gagası yapısından esinlenerek geliştirilmiş bir tasarımdır. 1784 yılında James Watt'ın buharlı motorlar için geliştirdiği düzlemsel mekanizmanın kinematik yapısına dayalı sistem Festo DMSP-5 model akışkan kas sistemi ile tahriklidir. MultiChoiseGripper isimli model esnek mekanizmalar kullanılarak geliştirilmiştir. Bu tutucunun parmakları tek tahrikli olup elastik şekil değişimi gerçekleştirerek tutma sağlamaktadır. FlexShapeGripper isimli model kauçuk bir cidar içerisinde akışkan kullanılarak tutulacak nesnelerin etrafını sarıp temas yüzeyine hidrostatik kuvvet uygulayarak tutma sağlamaktadır. Bu tutucunun en ayrıcalıklı özelliği ise birden fazla nesneyi aynı anda tutabilmesidir. Ancak nesnenin tutulma esnasındaki oryantasyonu ile alakalı hassasiyet sağlamamaktadır. Ayrıca sanayi ortamında kullanılması tutucu aparatının kesici, delici ve yüksek sıcaklı temaslardan korunmayı gerektirmektedir.



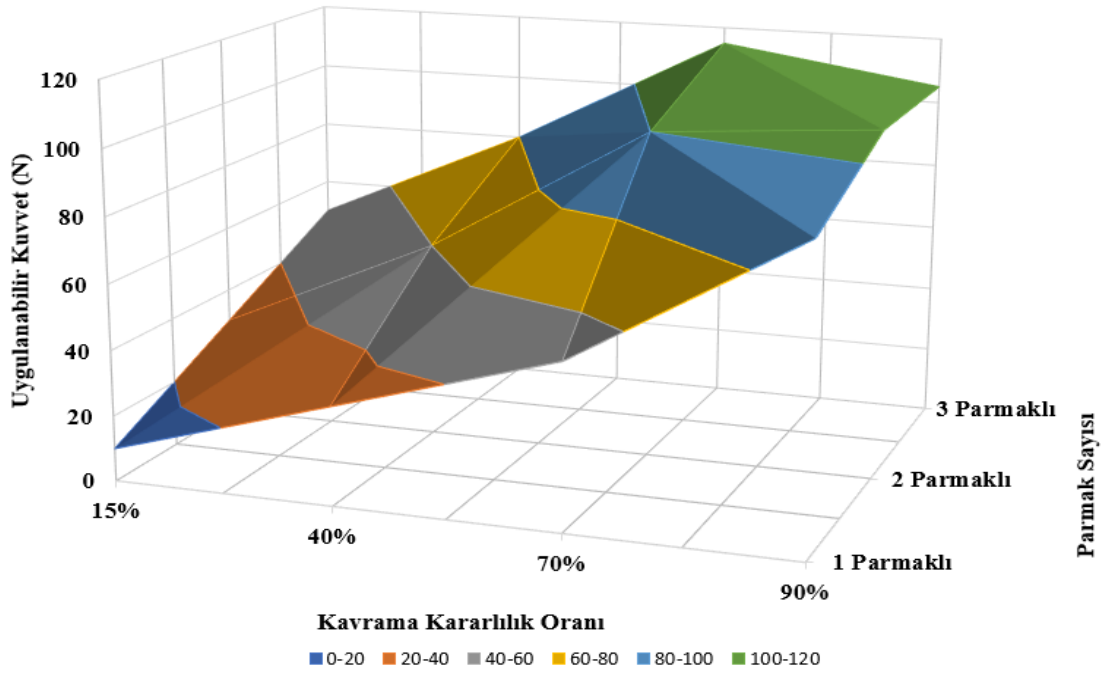
Şekil 2.4 Festo robotik tutucuları (Festo, 2021).

ROBOTIQ, Kanada'da Laval Üniversitesinde Prof. Dr. Clement Gosselin'in 1998 yılında patentini aldığı çalışmada düşük tahrikli 3 eklemli bir parmak özelliğini sağlayan düzlemsel bir mekanizmanın (Laliberté ve Gosselin, 1998) üniversite öğrencilerinden Samuel Bouchard, Vincent Duchaîne ve Jean-Philippe Jobin'in ortak girişimleri ile 2008 yılında piyasaya çıkmış ürünlerdir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 ROBOTIQ firmasının tutucu ürünleri (ROBOTIQ, 2021).

Endüstriyel tutucular için literatür verileri ışığında, eş boyut ve kapasiteli tutucular için kavrama kabiliyet değişimi bir grafikte gösterilebilir (Şekil 2.6). Buna göre parmak sayısındaki artış kavrama kararlılığını artırırken uygulanabilir kuvvet şiddetinde azalmaya neden olmaktadır. Bu sebeple robotik tutucunun 3 parmaklı olması öngörülmüştür.

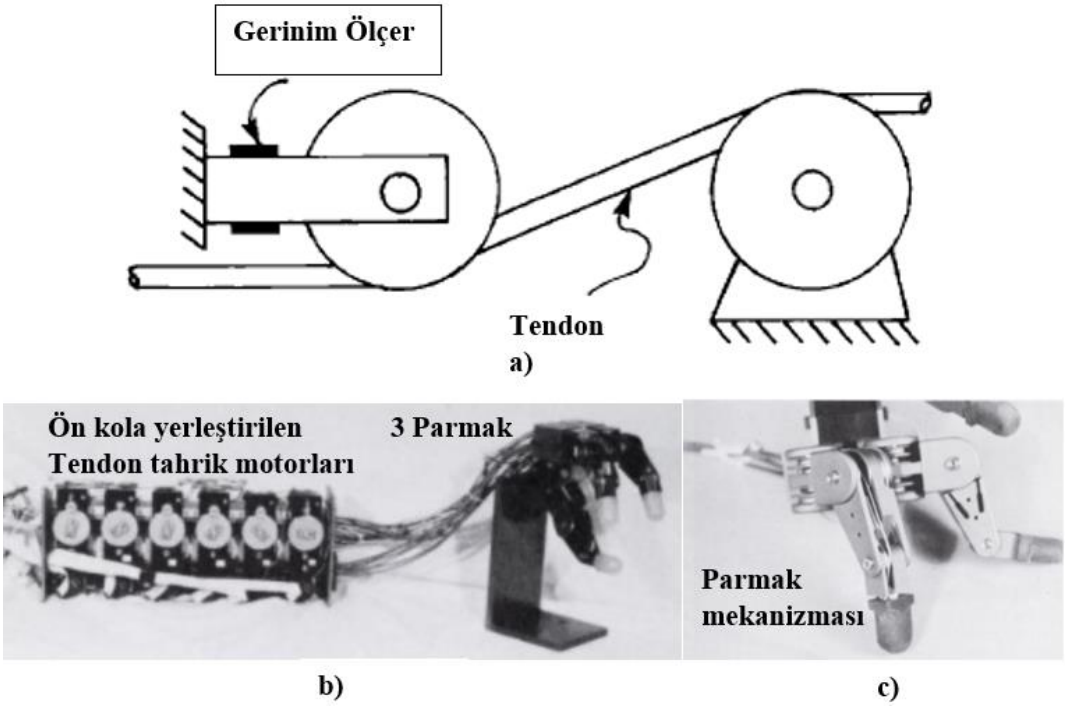


Şekil 2.6 Robotik tutucuların parmak sayısına göre kavrama kararlılığı (Monkman ve ark., 2007).

2.2. Tendon tahrikli tutucular

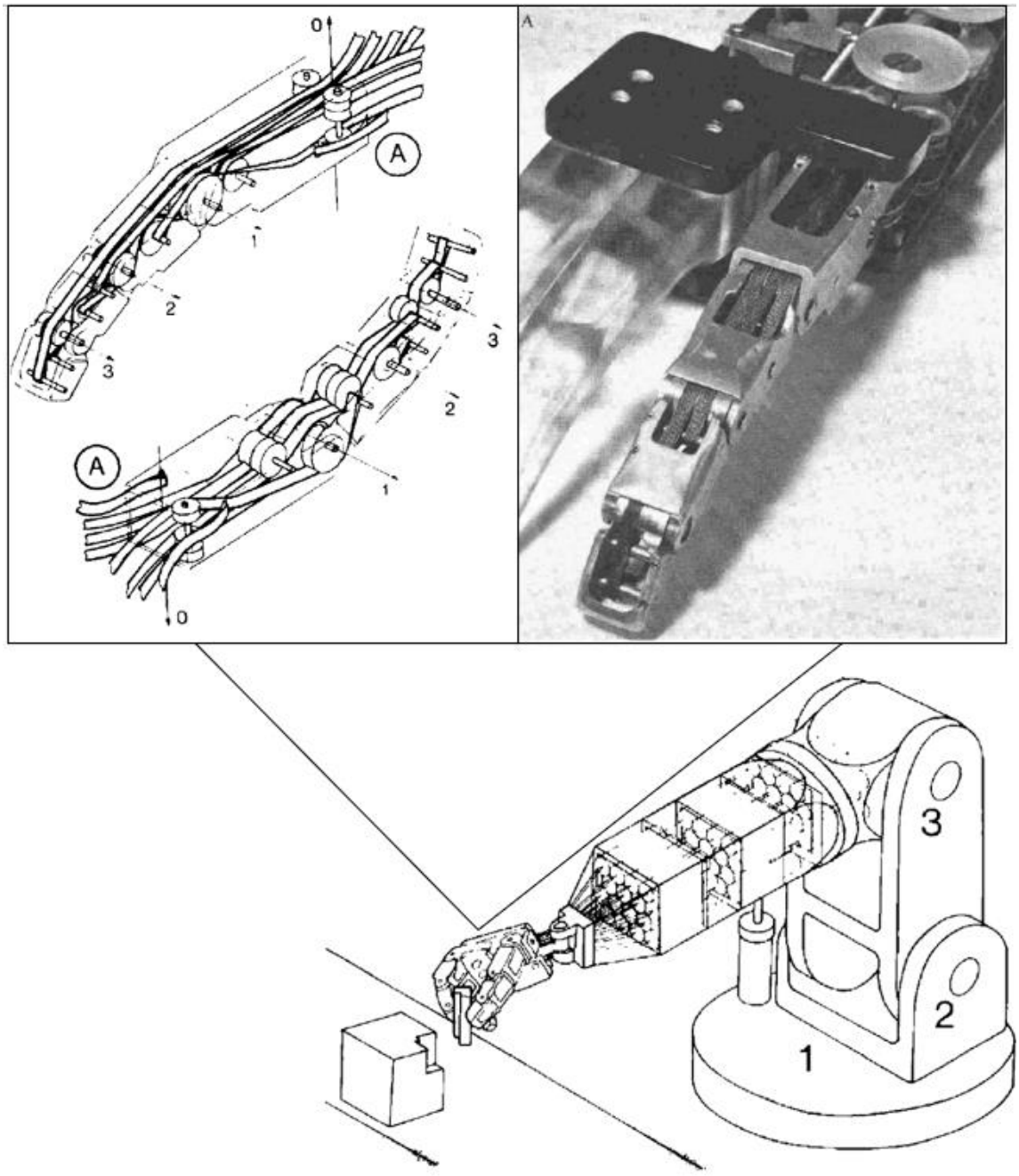
Tendon, teflon kaplamalı kablolardan meydana gelen ve insan biyolojik yapısındaki tendonlara benzer şekilde çalışan makara sistemleri sayesinde kuvvet iletimi için kullanılan tahrik elemanıdır. Tendonlar, ilk olarak Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'de üç parmaklı bir robotik el için (Crossley ve Umholtz, 1977) ve Tokyo Üniversitesi'nde (Hirose ve Umetani, 1978) kullanılmış olsa da günümüzdeki tendon tahrikli tutucuların bir çoğu Stanford Üniversitesi'nde çok eklemli parmak tasarımından esinlenmektedir (Salisbury ve Craig, 1982). Bu kısımda tendon tahrikli açık çevrim mekanizmaların hareketi ile tutma işlemi yapan robotik tutucu literatürüne yer verilmiştir.

Salisbury ve Craig (1982) çalışmalarında Stanford Üniversitesi ve Jet Propulsion Laboratuvarı iş birliği ile geliştirilen Stanford-JPL adındaki robotik elin fiziksel boyutlarının optimizasyon problemini tanımladılar. Bu mekanizmanın iç kuvvetler dahil, konum ve kuvvet kontrolü için sensörler kullandılar (Şekil 2.7-a). Stanford-JPL'yi tendon tahrikli parmak mekanizmasından oluşturdular. Bu prototipte tendonlara bağlı tahrik motorları önkola yerleştirilerek parmak ve avuçtan oluşan el kısmının ağırlığını, boyutunu ve ataletini düşürdüler (Şekil 2.7-b). Bunun yanında parmakların yüksek serbestlik dereceli hareketini, tendon ve pasif tahrikli makaralı sistem sayesinde düşük tahrik ile sağladılar.



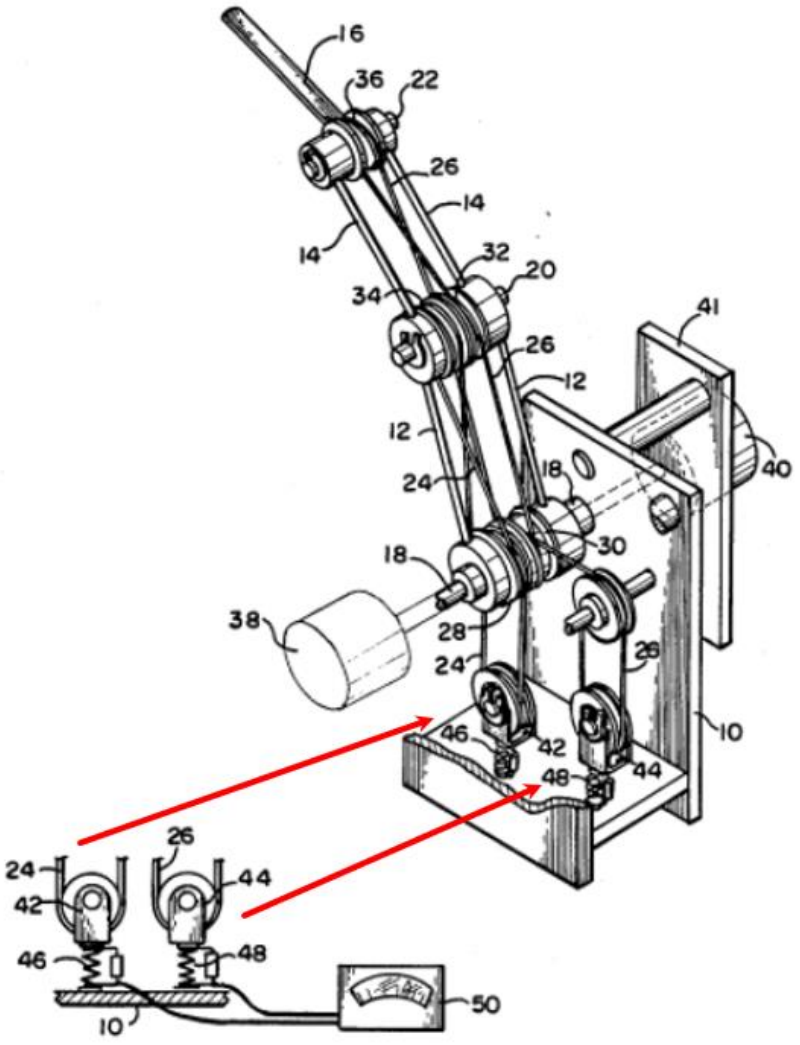
Şekil 2.7 a) Tendon gerinim ölçer, **b)** Stanford-JPL robotik el, **c)** Parmak mekanizması (Salisbury ve Craig, 1982; Mason ve ark., 1989)

Jacobsen ve ark. (1984), Dextrous Hand isimli robotik el çalışmasını, Utah Üniversitesi ve Massachusetts Teknoloji Enstitüsü birlikteliğinde çalışarak tendon tahrikli çok serbestlik dereceli tasarımla literatüre katkıda bulundular (Şekil 2.8). Stanford-JPL isimli robotik elden farklı olarak parmak sayısı ve her bir parmak için serbestlik derecesini bir artırdılar. Diğer farklılık ise tendon rotalama çalışması ve tendon tahrik için pnömatik sistem kullanmalarıdır. Pnömatik sistemi, Stanford-JPL isimli robotik elde servo motorların yerleştirildiği gibi ön kola yerleştirdiler.



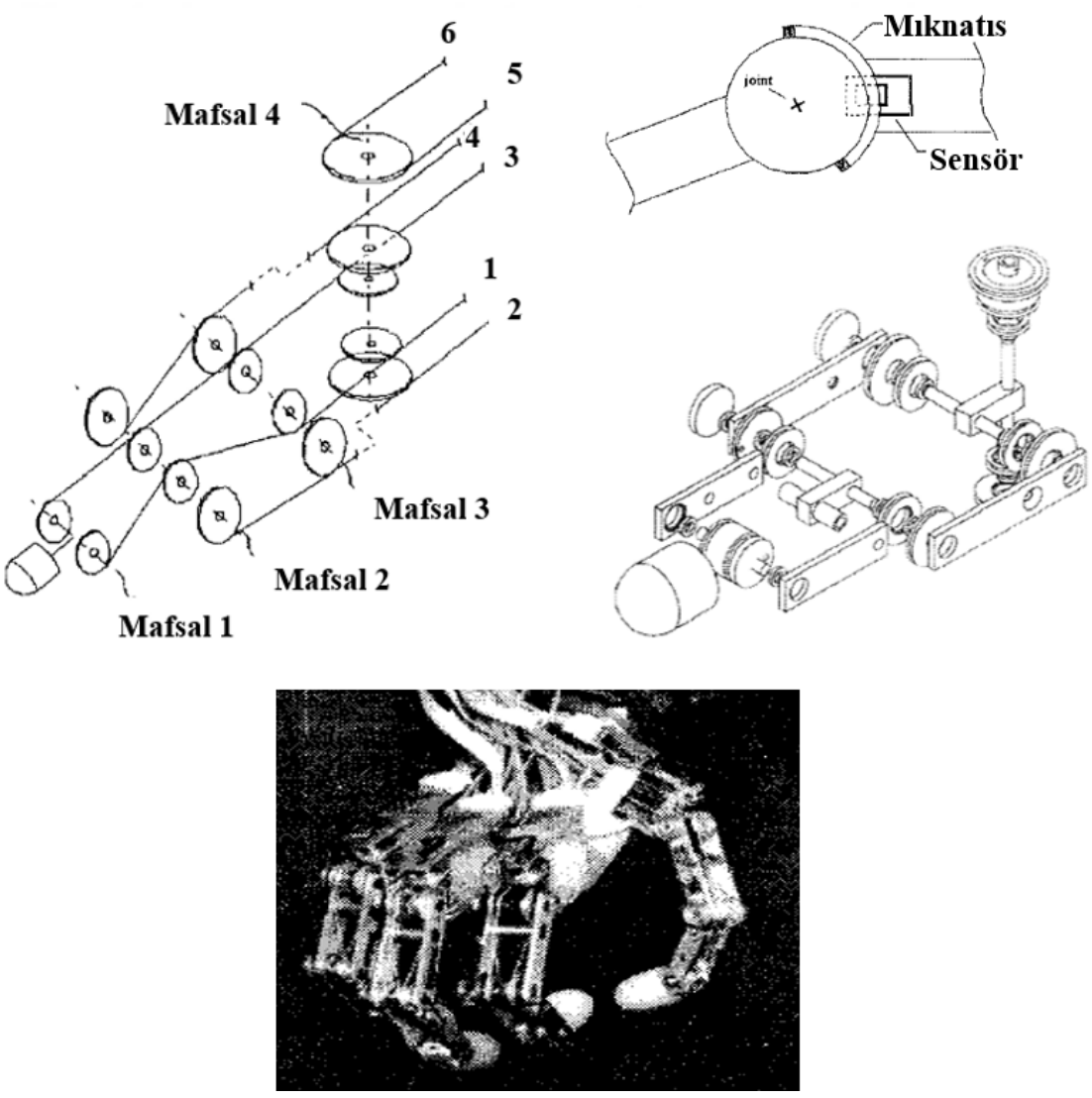
Şekil 2.8 Dextrous Hand ve robotik kola şematik montajı (Jacobsen ve ark., 1984).

Abel ve ark. (1985), tendon tahrikli 3 serbestlik dereceli 2 tahrik elemanlı parmak mekanizmasının tutma kabiliyeti analiz ederek literatüre kazandırdılar (Şekil 2.9). Bu mekanizmada 12, 14, 16 numaralı elemanlar mekanizma uzuvlarını, 18, 20, 22 numaralı elemanlar makaraları, 38 ve 40 numaralı elemanlar motorları, 46 ve 48 numaralı elemanlar tendon gerinim ölçüm sensörlerini ifade etmektedir. Bu çalışmanın yapıldığı yıllarda yapay el ağırlığının düşürülmesi ve ataletin azaltılması maksatları ile tahrik motorlarının parmaklardan uzak yerleştirilmesine rağmen, bu çalışmada motorlar parmaklara yakın yerleştirilmiştir. Bu tasarımla diğerlerinden farklı olarak tendon mesafesinin azaltılması sayesinde daha hassas konum ve kuvvet kontrolü yapılması hedeflenmiştir.



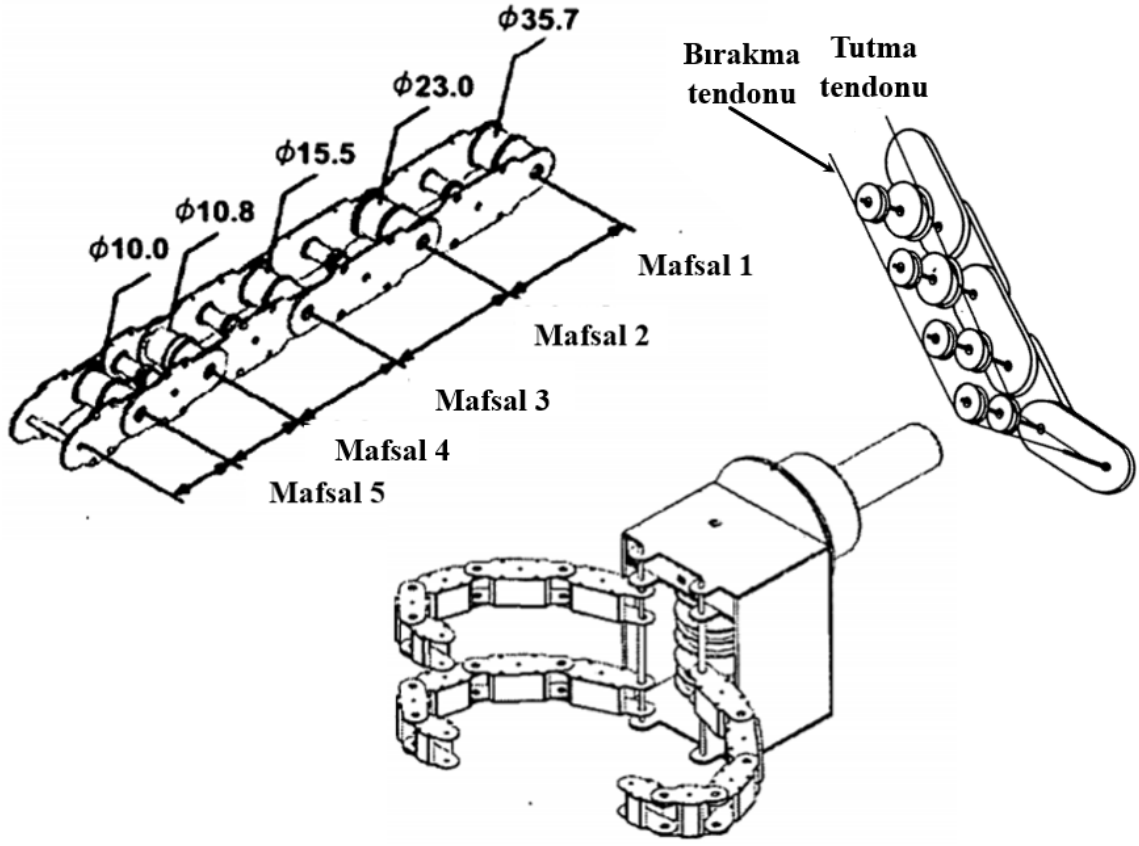
Şekil 2.9 3 serbestlik dereceli 2 tahrikli tendonlu parmak mekanizması (Leaver ve Mccarthy, 1989)

Caffaz ve Cannata (1998), DIST-Hand isimli 4 parmaklı robotik el çalışmasını literatüre kattılar (Şekil 2.10). Parmaklardan biri baş parmak olarak tasarlandığı için devrinin insan eline en yakın kabiliyette robot eli olduğu görülmektedir. Bu çalışmada 6 tendonlu ve 5 tahrikli bir parmak mekanizması geliştirdiler. Mafsal 1'de bir adet ön gerilmeli pasif tendon kullandılar. Bu prototipin tasarımında kullanılacak tendon ve motor seçimi ve tendon gerinimleri haritası oluşturmaya odaklanıldı. Bu haritanın oluşturulabilmesi için her mafsalda Hall etkisine dayalı bir sensör kullandılar. Bu sensörün temassız ölçümü ve tendon makaralarının optimal boyutları sayesinde mafsallarda minimum sürtünme elde ederek hassas ölçüm ve konum-kuvvet kontrolü yaptılar.



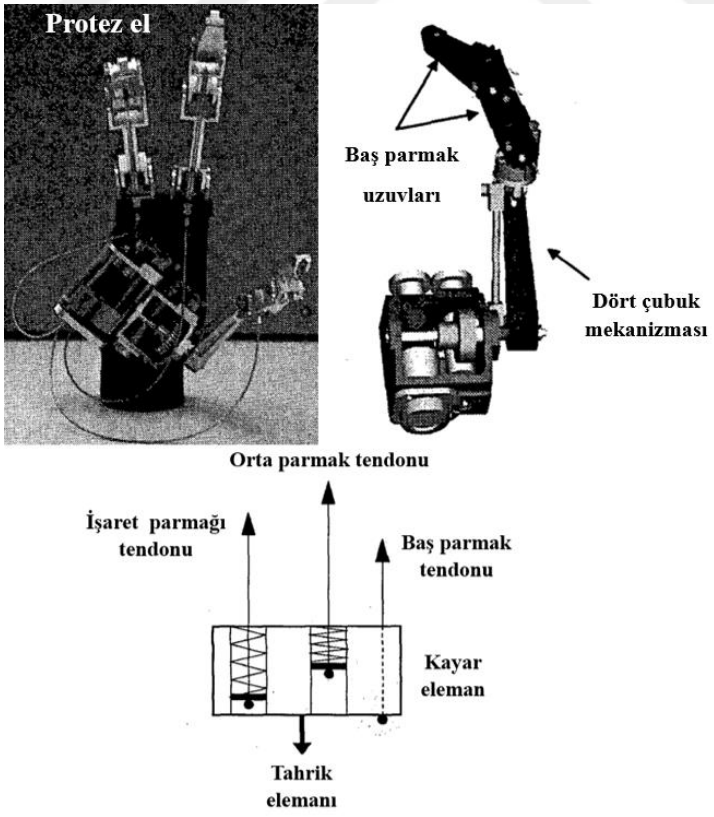
Şekil 2.10 DIST-Hand tendon rotalama, mekanizma yapısı ve sensör yapısı (Caffaz ve Cannata, 1998).

Yoshida ve ark. (2002), TAKO ismini verdikleri çok serbestlik dereceli 3 parmaktan oluşan bir robotik tutucuyu geliştirdiler (Şekil 2.11). Tendon tahrikli bu tutucu parmaklarını bir ahtapotun kollarından esinlenerek tasarladılar. Cisimlerin etrafını tamamen sarmak suretiyle tutma gerçekleştirebilmesi için tek parmakta 5 mafsal oluşturdular. Bu robotik tutucunun en önemli özelliği 3 parmağındaki toplam 15 mafsalı tek bir tendon ve motor ile tahrik etmesidir. Bu sayede tutucunun hacmi ve ağırlığı önemli miktarda azaltılmıştır. Tek bir tendonun tahriki ile parmakların açılması ve kapanması hareketleri sağlanmaktadır. Tutma tendonu makara yarıçapları değişken boyutta ve serbest bırakma tendonu makara yarıçapları sabit yarıçapta ayarlanarak tutma esnasında parmak ucu kuvvet iletimi artırılmıştır. Kavrama kabiliyeti açısından su altı çalışmalarına uygun kararlılık sağladığı bildirilmiştir. TAKO, Santa Clara Üniversitesi'nde geliştirilen Triton adlı uzaktan kontrollü deniz altı inceleme aracına montajlanarak deniz altı çalışmalarında test edilmiş, performansı olumlu değerlendirilmiştir.



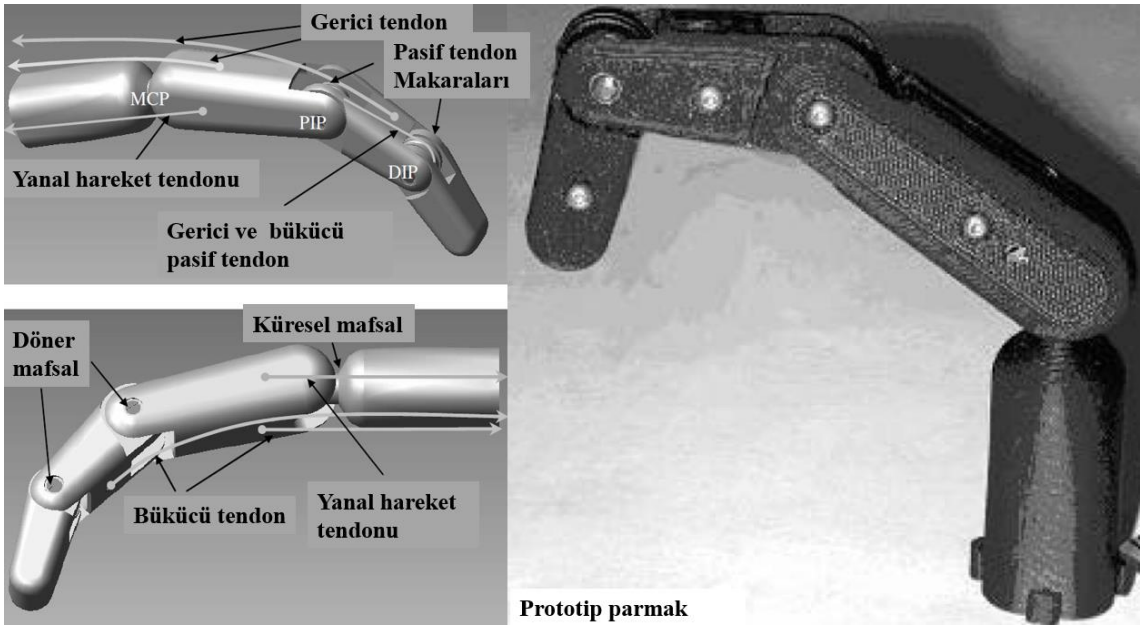
Şekil 2.11 TAKO su altı robotik el (Yoshida ve ark., 2002).

Massa ve ark. (2002), baş parmağı ve işaret parmağının birlikte sağladığı tutma kabiliyetinden daha fazlasını sağlamak için daha kontrol edilebilir ve kozmetik açıdan düzgün özelliklere sahip, 3 parmaklı, tutulacak cismin şekline uyum sağlayabilen ve tendon tahrikli RTR II isminde bir protez geliştirdiler. Bu protezde bir parmak baş parmak olmak üzere diğer iki parmak işaret parmağı ve orta parmak görevini yerine getirmek için tasarlanmıştır (Şekil 2.12). Bu kapsamda işaret ve orta parmaklar 3 mafsallı ve tendon tahrikli olarak tasarlanmıştır. Bunun yanında şekil uyumlu tutma gerçekleştirebilmesi için işaret ve orta parmakların temasını kesinleştiren yaylı bir yapı kullanılmıştır. Bu yapı sayesinde orta ya da işaret parmaklarından biri tutulacak cisme daha önce temas ederse, diğeri temas edinceye kadar erken temas eden orta parmak yayı sıkışarak tendon hareketi durdurulmuştur ve temas etmeyen işaret parmağının hareketi temas edene kadar devam etmiştir (Şekil 2.12). Böylece düşük tahrik olmasına rağmen kavrama kararlılığı sağlanmıştır. Baş parmağının yapısı iki eklemli olarak tasarlanmıştır. Bu iki eklem diğer iki parmak ile aynı tahrik elemanına bağlı tendon ile hareket ettirilmektedir. Baş parmağının bu iki eklem haricinde insan baş parmağındaki avuç içine yaklaşma-uzaklaşma hareketini sağlamak için dört çubuk mekanizması kullanılmıştır. Bu fonksiyonun kavrama kararlılığına büyük katkısı olduğu bildirilmiştir.



Şekil 2.12 RTR II protez el (Massa ve ark., 2002).

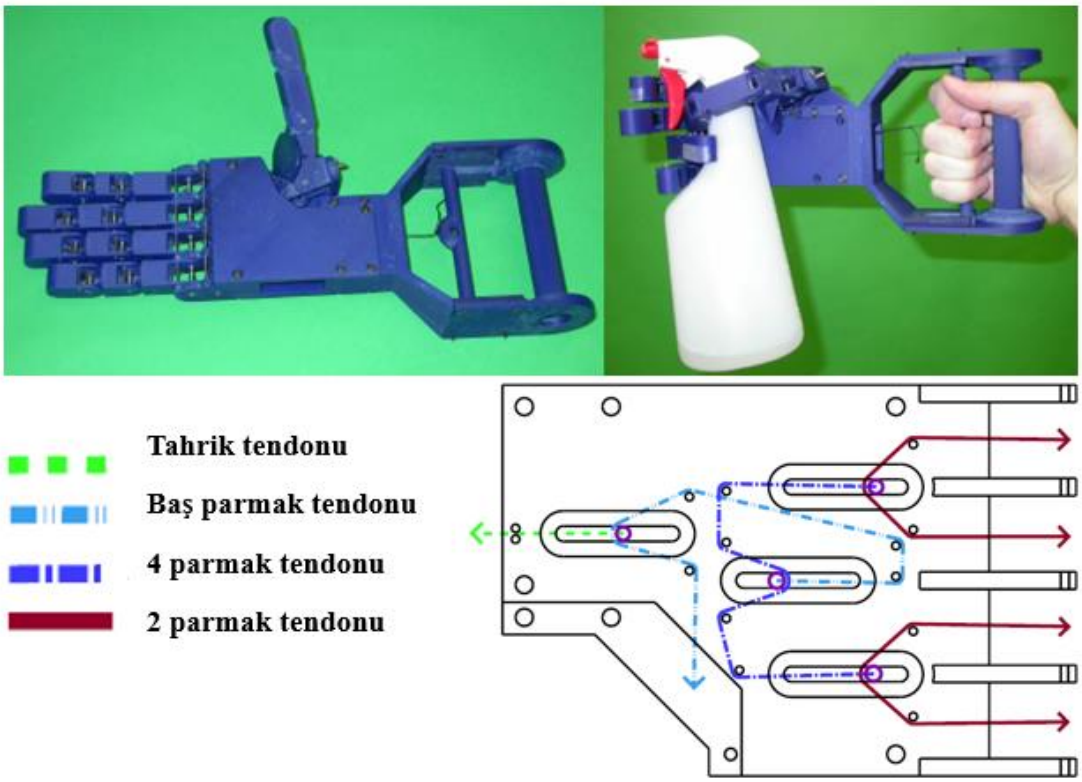
Bundhoo ve Park (2005), şekil hafızalı alaşım teknolojisini insan parmak kaslarına benzer bir şekilde protez el parmakları için kullanarak yeni bir tasarım ortaya koymuşlardır. Bu sayede esasen güncel protezlerin boyutlarını küçülterek çocuklar için protez geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Şekil hafızalı alaşım malzemelerin elektrikle ısınınca östenit yapısına geçip boyunun kısalması ve sertleşmesi, soğuyunca ise martenzit yapıya sahip olup yumuşamasına bağlı dış kuvvet etkisinde boyunun uzaması özelliği kullanılarak tendon hareketleri ve dolayısıyla parmak hareketi sağlanmıştır. Bu özellikteki malzemeler protezin boyutlarında ve ağırlığında çok ciddi avantajlar sağlamıştır. Ayrıca protez parmağının hareket kabiliyeti de artırılarak bir insan parmağının esnekliğine yakınsanmıştır (Şekil 2.13). Parmağın bükülmesi ve gerilmesi için 4, iki yana hareketi için 2 olmak üzere toplam 6 adet aktif ve bir adet pasif tendon bulunmaktadır. Aktif tendonlar şekil hafızalı alaşım malzemeye bağlanarak tahrik edilmektedir. MCP ismi ile gösterilen mafsal küresel mafsaldır ve bu çalışmada 2 serbestlik derecesine sahiptir. Bu mafsal toplam 20^0'lik sağ ve sol yanlarına ve 90^0'lik bükülme ve gerilme hareket kabiliyetine sahiptir. PIP ve DIP ismi ile gösterilen mafsallar ise döner mafsallardır ve birer serbestlik derecesine sahiptir. PIP mafsalında 100^0'lik bükülme ve gerilme hareket kabiliyeti varken, DIP mafsalında 80^0'lik bükülme ve gerilme hareket kabiliyeti bulunmaktadır. Sonuç olarak bu çalışma kendi zamanının en iyi protez el çalışması olmuştur.



Şekil 2.13 Şekil hafızalı alaşım tendonlu protez el parmak prototipi (Bundhoo ve Park, 2005).

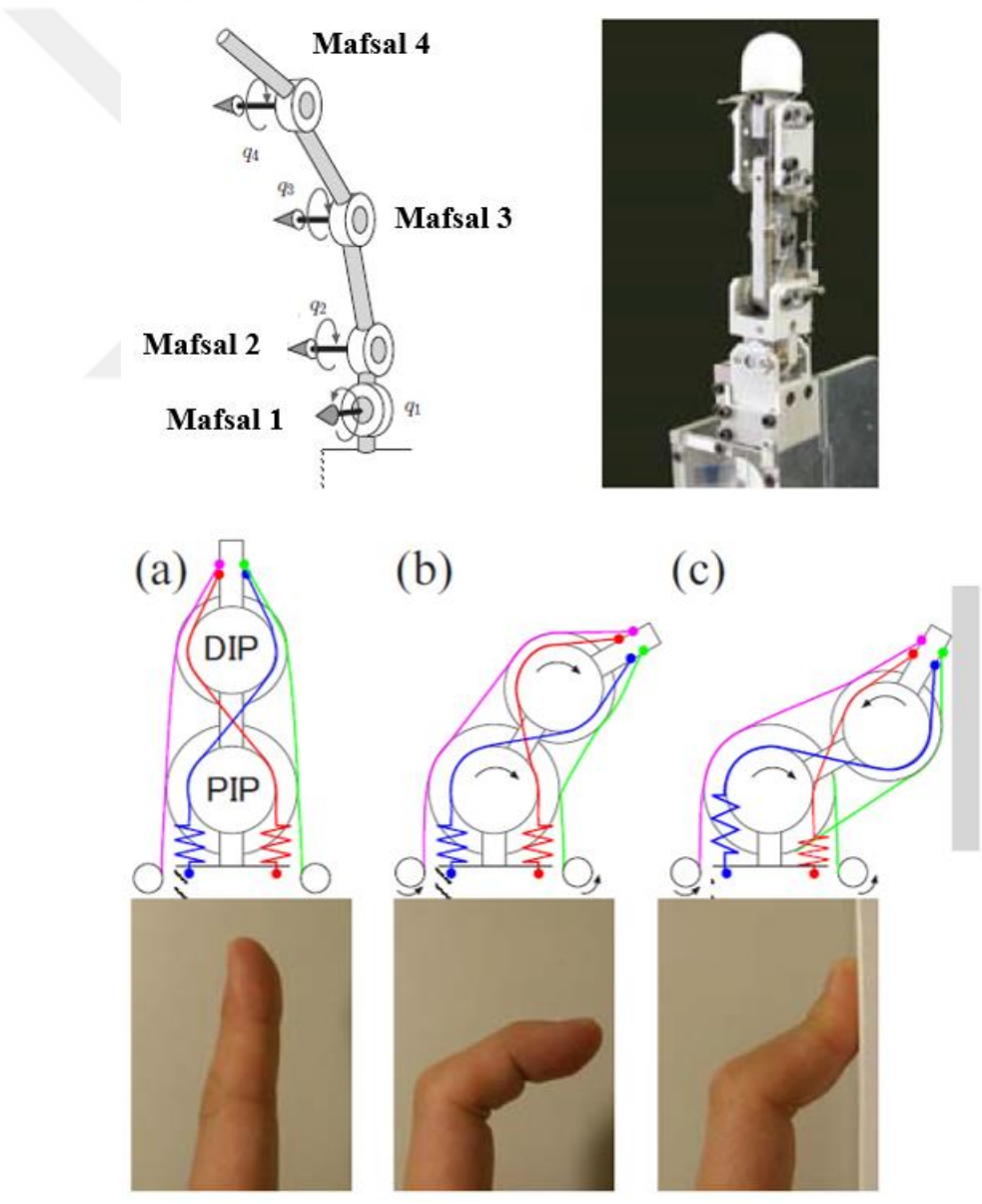
Birglen ve Gosselin (2006), tendon tahrikli parmak mekanizmalarının kararlılığı üzerine matematiksel ispat sunmuştur. Bu kapsamda kararlı tutma terimini tekrar tanımlayarak tüm parmak uzuvlarındaki temas kuvvetinin sıfır ya da pozitif olması gerektiğini bildirmiştir. Eğer temas kuvveti negatif olursa cismin serbest kalacağı ispatlanmıştır.

Gosselin ve ark. (2008), tek tahrikli ve tendon kullanılan 15 serbestlik derecesine sahip antropomorfik el tasarlayıp prototipi ile deneyler yapmıştır. Öncelikle kuvvet aktarım tasarımını inceleyip daha sonra geometrik optimizasyonunu gerçekleştirdiler. Bir tendon rotalama çalışması yaparak prototip imalatını ve deneysel tutma çalışmaları yaptılar (Şekil 2.14). Tendon rotalama çalışmasında en önemli literatür katkısı tek tahrik ile 5 parmağın birden hareket etmesi ve baş parmak ile diğer dört parmağın birbirine zıt yönde kuvvetler uygulayarak kuvvet dengesini sağlamasıdır. Bu stratejik avantajın oluşturulmasında 4 parmak ve baş parmağın zıt yönde kuvvet uygulayacak olmasından dolayı kayar makaralı sistem kullanılarak tahrik esnasında uygulanan kuvvetin %50'si baş parmağa iletilirken geri kalan %50'si 4 parmağa eşit olarak paylaştırılmıştır.



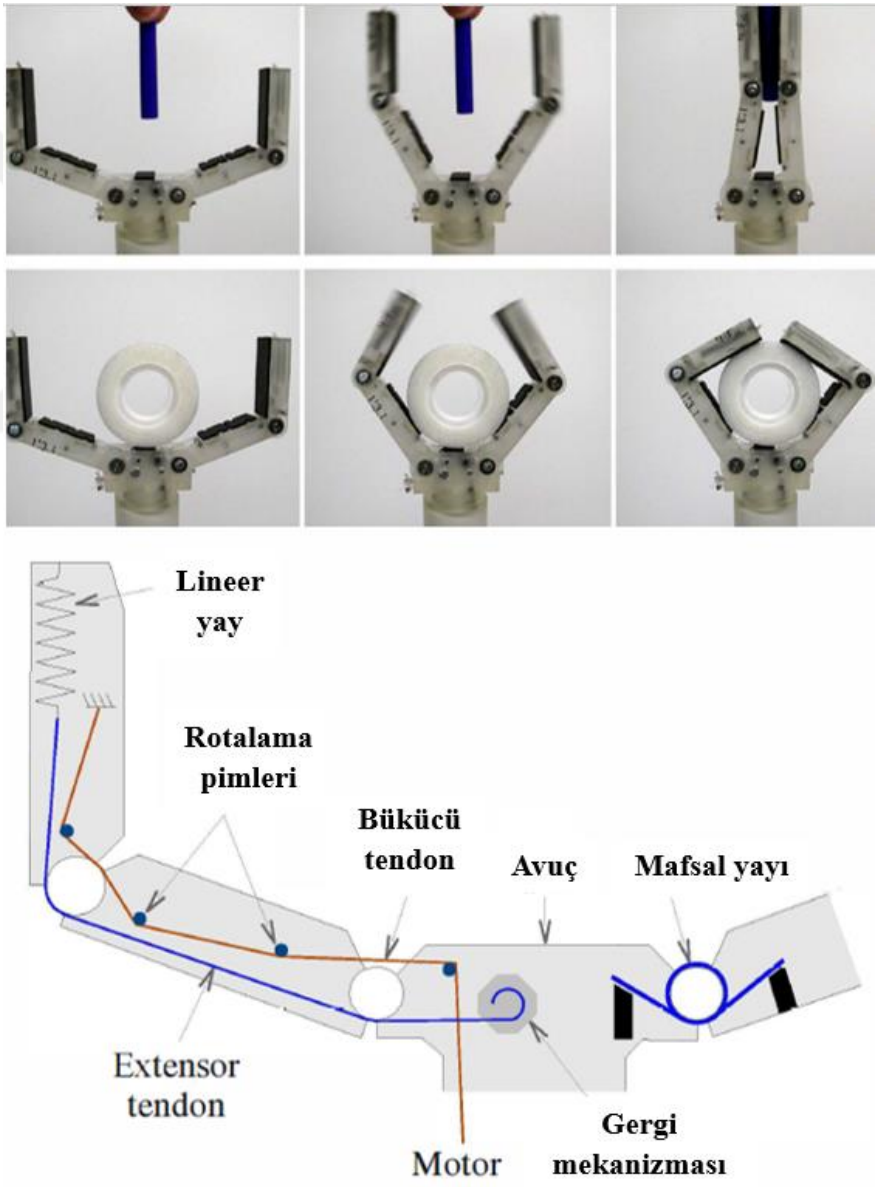
Şekil 2.14 Tek tahrikli 15 serbestlik dereceli antropomorfik el ve rotalama düzeni (Gosselin ve ark., 2008).

Ozawa ve ark. (2009), tendon tahrikli gösterilen parmak mekanizmalarının mafsal kontrol ve kinematik özelliklerini tanımlamışlardır (Şekil 2.15). Bu analiz sayesinde 4 serbestlik derecesine sahip 3 tahrikli bir parmak mekanizmasını literatüre katmışlardır. Mekanizma tasarımı yapılırken tendon rotalama yapısına göre 3 temel sınıfta inceleme yaptılar. Birinci sınıf tüm mafsalların kontrol edilebilmesine dayalı, ikinci sınıf pasif ve aktif tendonların hibrid oluşturduğu düşük tahrikli yapıya dayalı ve üçüncüsü ise pasif tendon bulunmayan düşük tahrikli sisteme dayalıdır. Jacobiyen matrisi rankı alınarak sıfırdan büyüklük eşitlik ve küçüklük durumuna göre mekanizmanın 3 sınıftan hangisine girdiği tespit edilmiştir. Son olarak tendon üzerinde oluşan gerilmelerin kontrolü için PD kontrolü yapılmıştır.



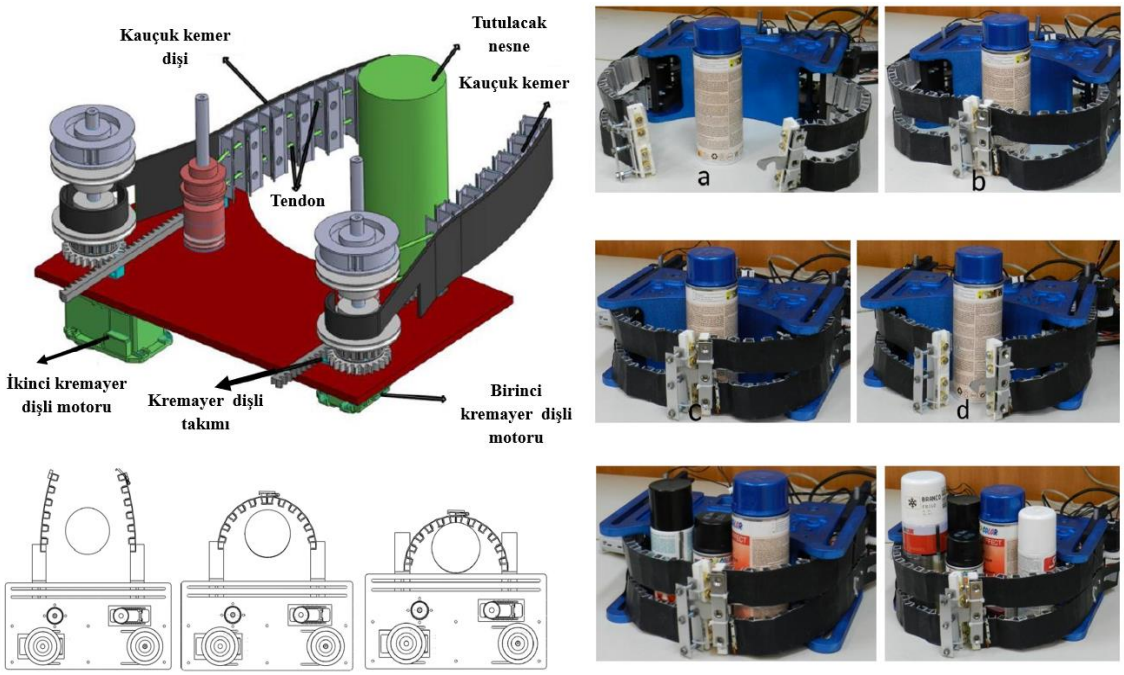
Şekil 2.15. Tendon tahrikli prototip parmak ve mekanizması (Ozawa ve ark., 2009).

Ciocarlie ve ark. (2013), iki parmaklı 4 serbestlik dereceli tek bir tendon ile tahrik edilen tutucu tasarımında tendon rotası ve parmak uzvu boyutları için geometrik optimizasyon ve pasif tendon kullanımı üzerine bir çalışma yapmıştır. Tutucu bir nesneyi tutması esnasında iki parmağın parmak uçları birbirine paralel vaziyette bir nesneye temas edinceye kadar hareket etmektedir (Şekil 2.16). Nesneye temas ettikten sonra ise parmak ucu kısımları ya cismi tutar ya da cismin etrafını sarmaya başlar. Böylece kavrama kararlılığı artırılmıştır. Parmak uçlarının bir nesneye temas edinceye kadar birbirine paralel olması, tutucunun parmak ucu tutma ve etrafını saran tutma olmak üzere iki çeşit tutma kabiliyetine sahip olmasını sağlamıştır.



Şekil 2.16 İki parmaklı 4 serbestlik dereceli tek tahrikli tutucu (Ciocarlie ve ark., 2013).

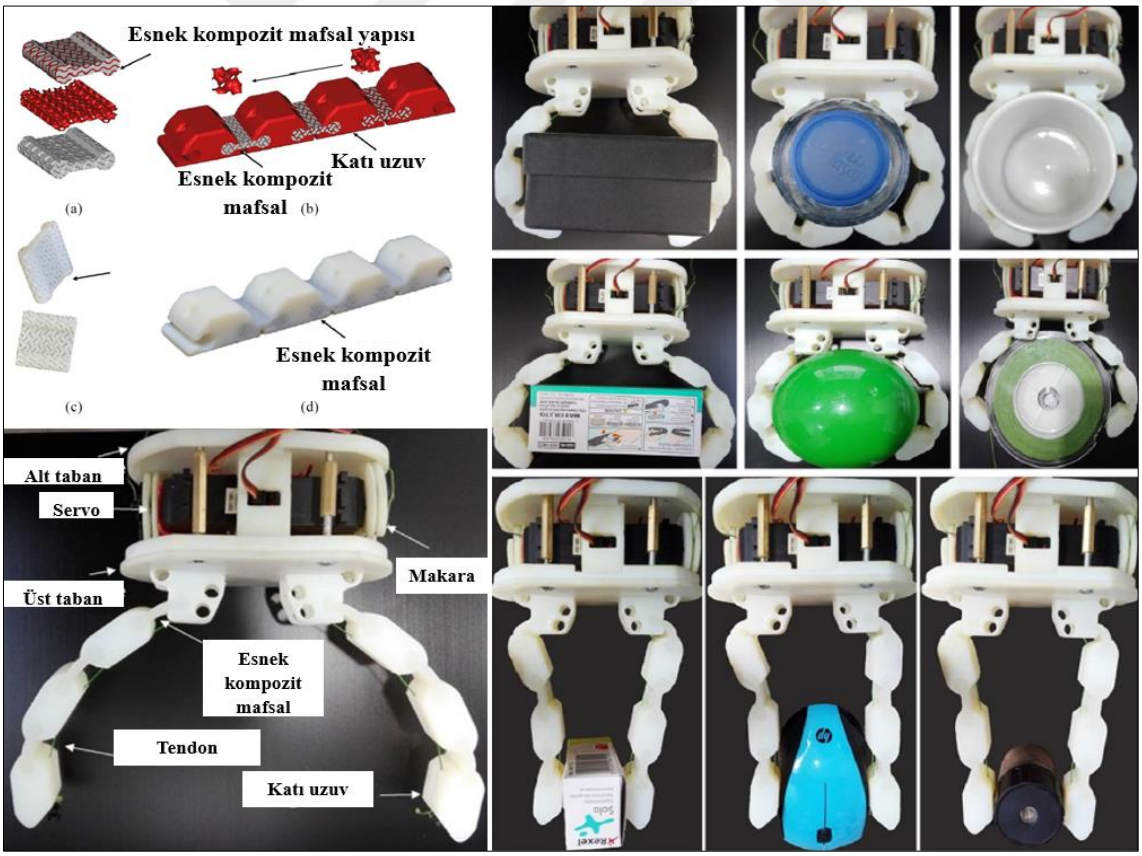
Tavakoli ve ark. (2013), şekil ve kuvvet kapalı tutma kabiliyeti sağlayan iki tahrikli tutucu çalışmasını literatüre kazandırdılar. Sürekli ortamlar mekaniği temeli üzerine oturtulan tutucu parmak mekanizması kullanıldı. Bu çalışmanın temel avantajı parmakların tutulacak cismin şekline uyum sağlayabilmesi ve esnek yapısı sayesinde nazik tutma ve tendonlar sayesinden sert tutma sağlayabilmesidir (Şekil 2.17). Diğer bir avantajı ise birçok nesneyi aynı anda tutabilmesidir. Ancak bir pimin deliğe yerleştirilmesi gibi hassas tutma işlemlerinde gerekli tutma kabiliyeti açısından zayıf özelliktedir.



Şekil 2.17 Flexisolid tutucu mekanizması ve çalışması (Tavakoli ve ark., 2013).

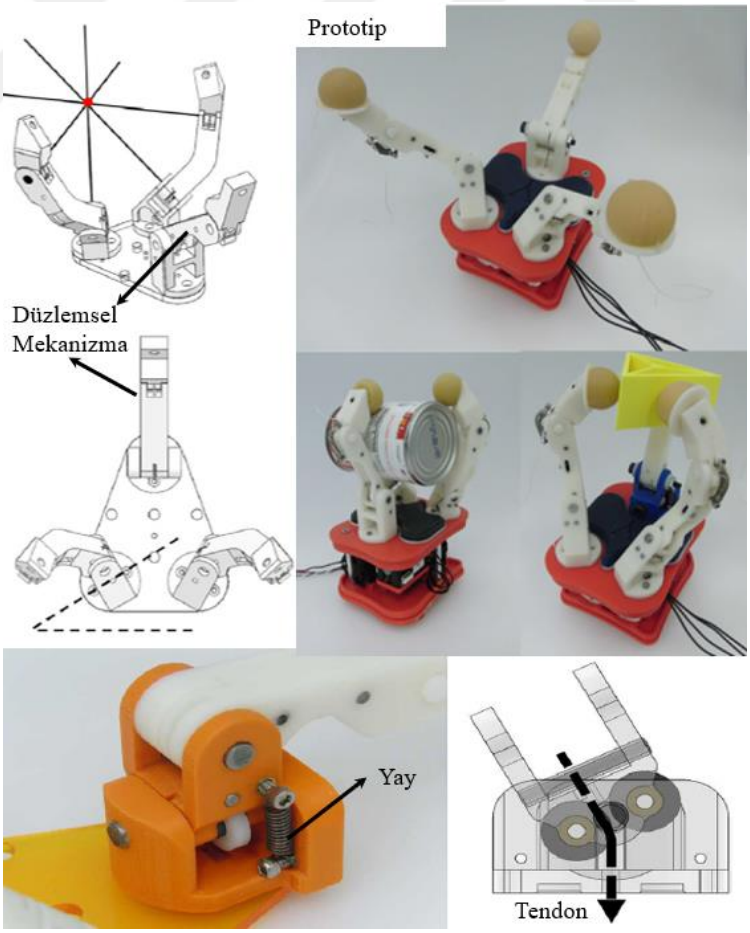
Rossi ve ark. (2015), çalışmalarında mekanizması verilen tek tahrikli tendon rotalamasını geliştirerek 4 parmağa eşit büyüklükte dağıtılan kuvvetin oranında değişiklik yaparak performansını artırmıştır (Şekil 2. 14). Bu kapsamda işaret parmağı, orta parmak ve baş parmak eşit miktarda gerilen tendon ile tahrik edilirken, diğer iki parmak bu 3 parmağın tahrik edildiği kuvvetin yarı değerinde bir kuvvetle tahrik edilmiştir. Böylece tutma işleminde daha kabiliyetli olduğu ispatlanan parmakların kuvvet oranı artırılmıştır. Bir parmak mekanizmasının mafsallarında muhtelif yay sabiti özelliğine sahip gergi yayları kullanılmıştır. Tendon rotalaması çalışması yapılarak parmak hareketleri hassas tutmaya uygun hale getirilmiştir. Bu çalışmanın Gosselin ve ark. (2008)'nın çalışmasına hareketli makara sistemi açısından benzerliği olduğu söylenebilir. Bu çalışmada farklı olarak baş parmak, işaret parmağı ve orta parmağın kuvvet kapasitesi artırılarak şekil uyumluluğuna ek olarak kavrama kabiliyeti de artırılmıştır.

Hussain ve ark. (2018); Hussain ve ark. (2020a); (Hussain ve ark., 2020b), çalışmalarında tendon tahrikli ve esnek mafsallı iki parmaklı toplam 6 serbestlik dereceli bir tutucu geliştirdiler. Bu çalışmada vida teorisine dayalı etkili bir matematik model geliştirerek mafsalların sahip olması gereken sertliği tanımladılar. Muhtelif topoloji denklemleri kullanılarak çoklu malzemeden oluşan özel yapılar elde ettiler. Bu malzemelerin hacimsel oranlarını en uygun ölçülerde ayarlayarak vida teorisi ile hesaplanan elastisite modülüne ulaştılar. Daha sonra 3 Boyutlu yazıcı teknolojisiyle dönel (Gyroid) topolojik yapısında iki katmanın üretimi arzu edilen hacimlerde iç içe geçebilen minimum yüzeyli çıktısı alınarak kompozit yapıya sahip esnek bir mafsal oluşturuldu (Şekil 2.18-a). Bu mafsal katı uzuvların içerisine takılır formda tasarlandı (Şekil 2.18). Böylelikle mafsallarda kuvvet uygulanmayan durumlarda parmağın açık pozisyona dönmesini sağlayan eskiden kullanılan gergi yayı ya da fazladan tendon yerine esnek kompozit mafsallar kullanıldı. Deneylerde parmak ucu tutma işlemlerinde ve etrafını sararak tutma işlemlerinde başarılı olduğu tespit edildi. Tendon tahrikli robotik tutucular ile alakalı çok daha detaylı bir çalışmaya şuradan ulaşılabilir (Piazza ve ark., 2019).



Şekil 2.18 Esnek kompozit mafsallı tendon tahrikli tutucu (Hussain ve ark., 2020a).

Ma ve ark. (2016), tendon tahrikli tutuculara küresel mekanizma kullanan özgün çalışmayı yapmıştır (Şekil 2.19). Bu çalışmada iki parmak küresel mekanizma ile tasarlanmış ve bir parmak düzlemsel mekanizma ile tasarlanmıştır. Mekanizmaların tutma işlemi haricinde açık vaziyette konumlanması için mafsallara yay bağlanmıştır. Tutma işlemi esnasında mekanizma mafsallarının dönmesini ve parmak uçlarının birbirine yaklaşmasını sağlayan tendonlar kullanılmıştır. Bu tutucunun bir diğer özelliği parmakların bir bütün olarak birbirine yakınlaşıp uzaklaşabilmesidir. Bu açıdan insan elinin kabiliyetine yakınsamıştır. Çalışmanın teorik anlamda kazandırdığı avantaj, küresel mekanizma ile tasarlanan iki parmağın hareket uzayındaki tüm ani hareketlerin tutulacak nesnenin geometrisinden ve temas türünden bağımsız olarak tekbir nokta etrafında gerçekleşmesidir. Tutucu, ikisi küresel ve biri düzlemsel mekanizma olup her bir parmak iki dönel ve bir küresel mafsaldan oluşan toplam 15 serbestlik derecesine sahiptir. Bu üç parmak üç ayrı tahrik elemanı ile hareket ettirilmektedir. Parmak uçlarında bulunan kauçuk pabuçlar küresel bir mafsal ile mekanizmalara bağlıdır. Tutma esnasında temas yüzeyine uygun pozisyonu alma özelliğine sahiptir.

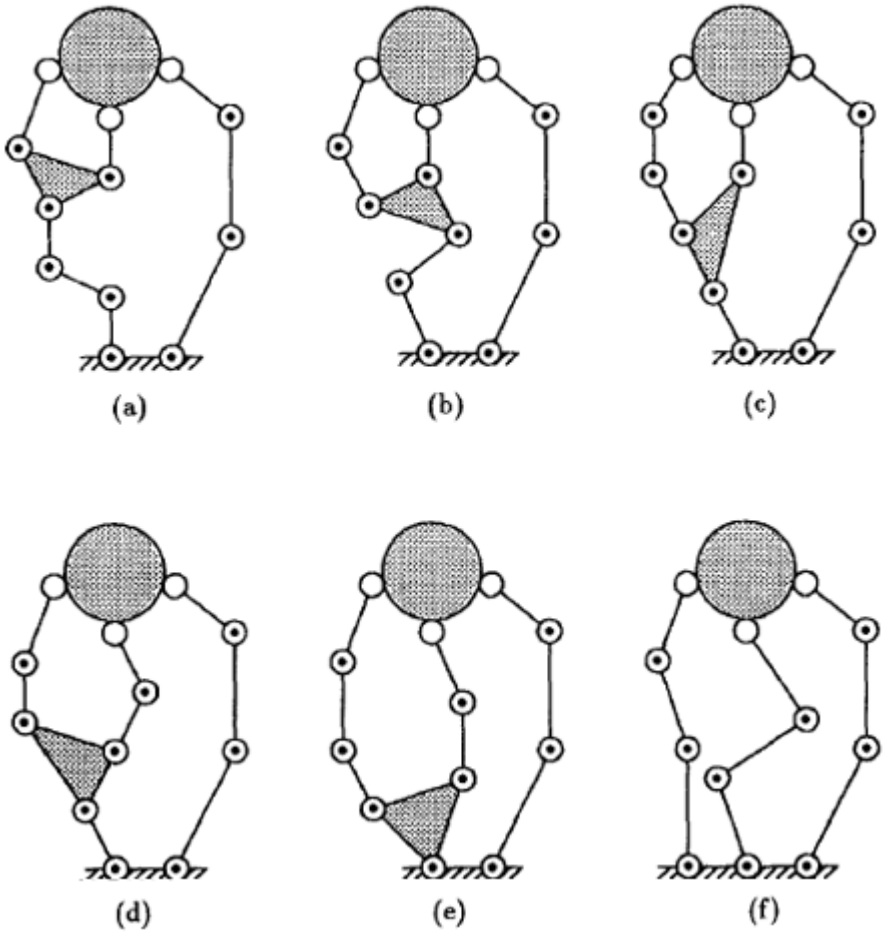


Şekil 2.19 Tendon tahrikli küresel ve düzlemsel mekanizma ile tutucu tasarımı (Ma ve ark., 2016).

2.3. Mekanizmalı tutucular

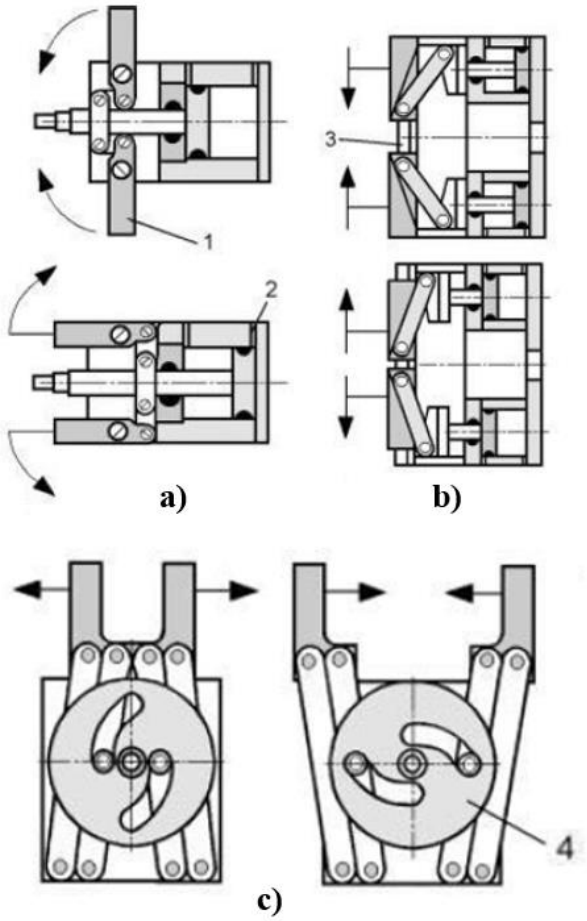
Bu kısımda, tendon tahrikli açık çevrim mekanizmalar yerine, birbirine çeşitli mafsallar ile bağlı kapalı çevrim mekanizmalarının sağladığı hareket ile tutma işlemini gerçekleştiren tutucular hakkında çalışmalara yer verilmiştir. Kapalı çevrim mekanizmalar genellikle tutma işleminde yüksek kuvvet arzu edilen, dayanım ve hız gerektiren birçok parametresi belirli endüstriyel işlemlerde tercih edilmektedir. Genellikle düzlemsel mekanizmalar ile tasarım yapılmıştır.

Tischler ve ark. (1995), robotik tutucuların parmak mekanizması tasarımının ilk aşaması olarak kinematik zincirler üzerine çalışmıştır. Tutucu parmak ucunun tutulacak cisimle temasının kısıtları nedeniyle mekanizma tayin etme aşamasında kinematik zincir belirleme konusunda birçok olasılıkları literatüre kazandırmıştır (Şekil 2.20). Bu kinematik zincirlerin çıkartılmasının mekanizmasının tahrik elemanının seçiminde büyük öneme sahip olduğu bildirilmiştir. Stanford/JPL robotik el kinematik zinciri verilmiştir (Şekil 2.20-f).



Şekil 2.20 robotik tutucu için alternatif kinematik zincirler (Tischler ve ark., 1995).

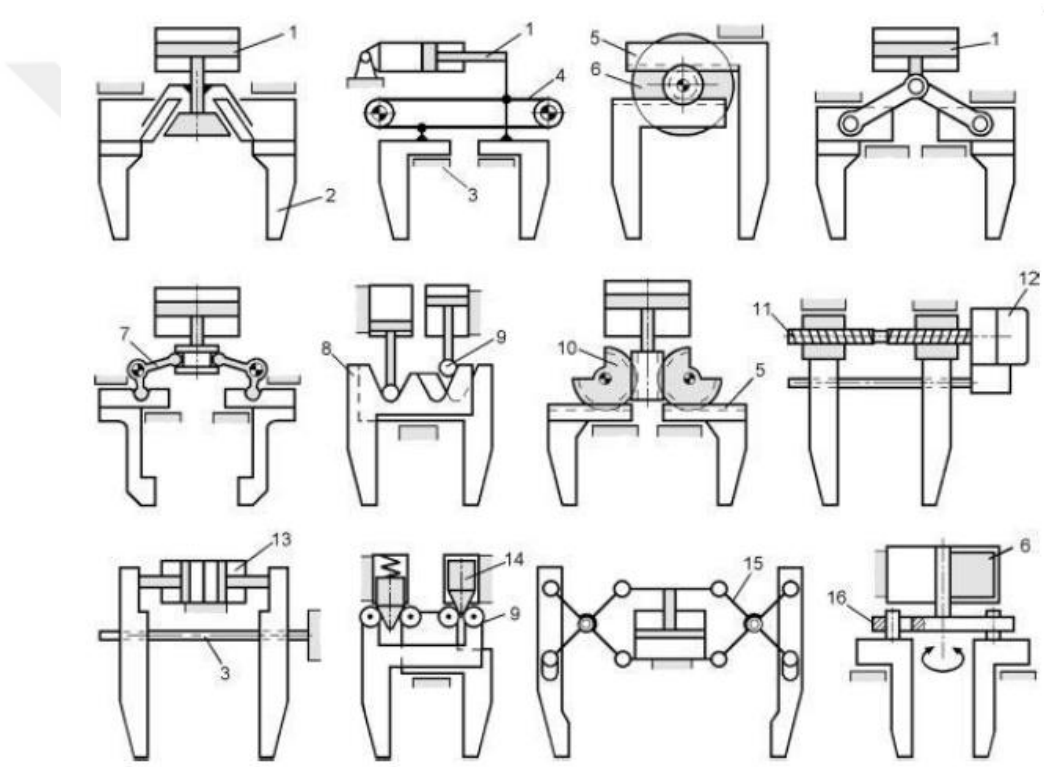
Monkman ve ark. (2007), çalışmalarında tutma işlemini yönteme göre sınıflandırdılar. Endüstriyel tutucuların mekanizmaları ve parmak hareketleri ile ilgili standart yapıları derlediler. Açılı hareket yapabilen paralel parmaklar pnömatik tek tahrikli simetrik krank biyel mekanizması kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 2.21-a). Tutucuda pnömatik tahrik edilen iki krank biyel mekanizması dönüşümü kullanılmıştır (Şekil 2.21'b). Kam diski kullanılarak iki adet paralel dört çubuk mekanizması tahrik edilmiştir (Şekil 2.21'c).



Şekil 2.21 Endüstriyel tutucu parmak mekanizmaları (Monkman ve ark., 2007).

Monkman ve ark. (2007), tutucu mekanizmaları ile alakalı çalışmalarında parmak ucunun doğrusal hareket yörüngesine göre sınıflandırma yaptılar (Şekil 2.22). Bu şekilde 1 numaralı eleman pnömatik silindir olup tahrik elemanı olarak kullanılmıştır. 2 numaralı elemanlar tutucu parmağı olup cismin iki tarafından sıkarak kavrama sağlamaktadır. 3 numaralı eleman lineer kızak olup parmakların doğrusal hareket yapmasını sağlamaktadır. 4 numaralı eleman dişli kayış olup pnömatik silindirin sağladığı hareketi parmaklara iletmektedir. 5 numaralı eleman dişli kremayer olup 6 numaralı dönel pnömatik silindirden gelen tahriki parmaklara iletmektedir. 7 numaralı eleman açılı kol

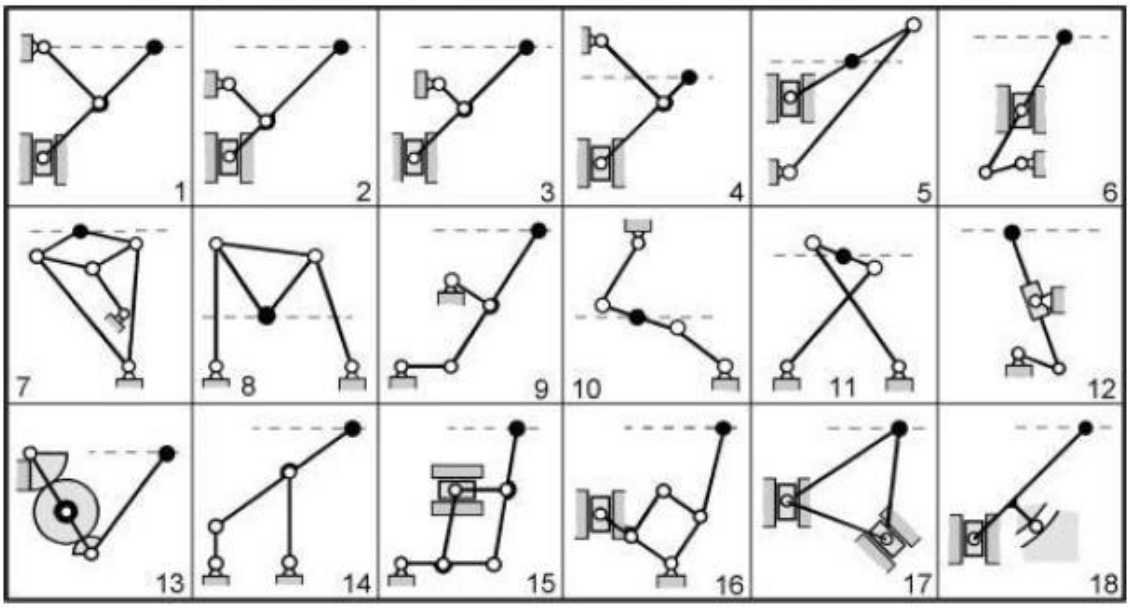
olup 1 numaralı pnömatik silindirden gelen hareketin doğrultusunu değiştirerek parmaklara iletmektedir. 9 numaralı eleman takipçi olmak üzere pnömatik silindirden aldığı hareket ile 8 numaralı kam elemanının profil yüzeyinde hareket ederek tutucu parmaklarının doğrusal hareketini sağlamaktadır. 10 numaralı eleman sektör dişlisi olup pnömatik silindirden aldığı hareketi 5 numaralı kremayer dişlisine ileterek parmakların doğrusal hareketini sağlamaktadır. 12 numaralı eleman elektrik motor olup 11 numaralı sağ ve sol vidalı dişliyi döndürerek tutucu parmaklarının doğrusal hareketini sağlamaktadır. 13 numaralı eleman iki silindirli pnömatik tahrik elemanı olup tutucu parmaklarını 3 numaralı kızak üzerinde kaydırarak doğrusal hareket gerçekleştirmektedir.



Şekil 2.22 Doğrusal hareket ile tutma gerçekleştiren paralel parmaklı tutucular (Monkman ve ark., 2007)

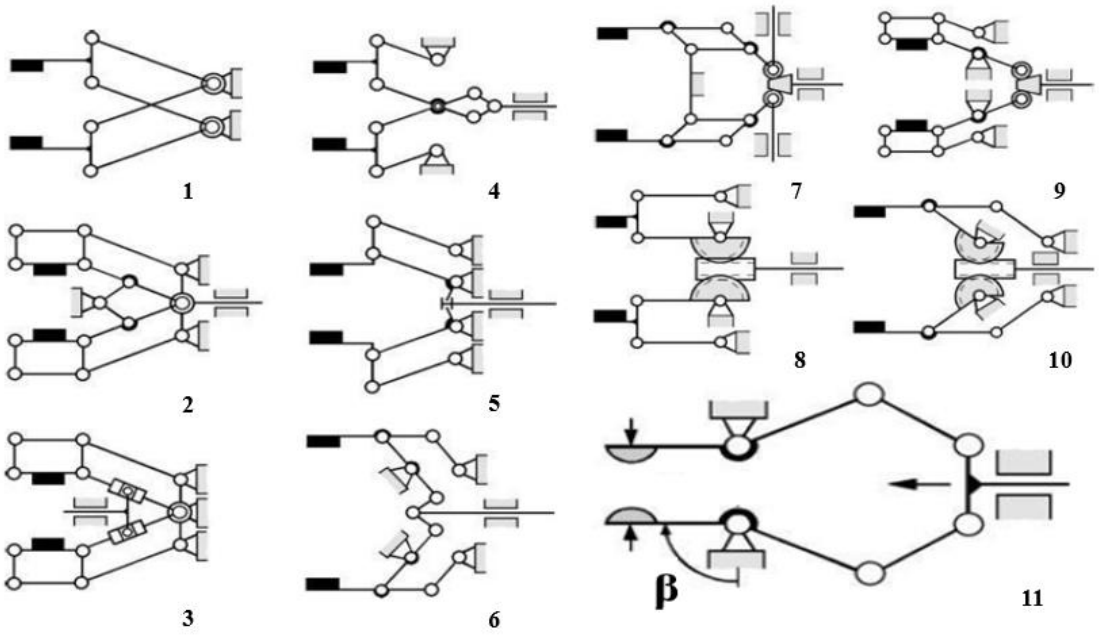
14 numaralı eleman kam başlıklı pnömatik piston olup 9 numaralı takipçiye bağlı tutucu parmağını lineer kızak üzerinde kaydırarak doğrusal hareket sağlamaktadır. 15 numaralı eleman paralellogram mekanizması olup pnömatik pistondan aldığı hareketin doğrultusunu değiştirerek tutucu parmaklarının doğrusal hareket etmesini sağlar. 16 numaralı eleman kam diski olup 6 numaralı dönel pnömatik silindirden aldığı hareket ile tutucu parmaklarını doğrusal olarak birbirine yaklaştırmaktadır. Doğrusal yörüngeye yakın hareket sağlayan 18 mekanizma gösterilmiştir (Şekil 2.23). Burada 1 numaralı mekanizma mafsallar arası uzuv boyutları ikiz kenar sağlayan santrik krank biyel, 2 numaralı mekanizma ise genel santrik krank biyel mekanizmasıdır. 3 numaralı

mekanizma genel bir krank biyel mekanizmadır. 4 ve 6 arası kayar krank biyel mekanizmadır. 7 numaralı mekanizma Peaucellier–Lipkin, 8 numaralı mekanizma Roberts, 9 numaralı mekanizma Evans, 10 numaralı mekanizma Watt, 11 numaralı mekanizma Chebishev mekanizmasıdır. 12 numaralı mekanizma midye eğrisi, 14 numaralı mekanizma kelebek eğrisi mekanizmalarıdır. 13 numaralı mekanizma eklemli kol mekanizmasıdır. 15 ve 16 numaralı mekanizma pantograf mekanizmalarının çeşitli tasarımıdır. 17 çift kayar uzuvlu bir krank biyel mekanizmasıdır. 18 çift kayar uzvunun biri eğri yörüngede hareket eden krank biyel mekanizmasıdır. Bu mekanizmalar uygun bir tasarım ile tutma işlemi sağlayabilecek potansiyele sahip olarak görülmektedir.

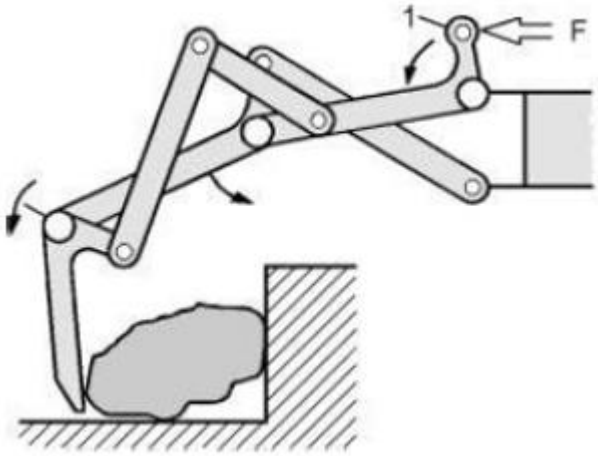


Şekil 2.23 Doğrusal yörüngede hareket sağlayan mekanizmalar (Monkman ve ark., 2007).

Monkman ve ark. (2007), parmak ucu eğri yörüngede hareket eden tutucu mekanizmaları Şekil 2.24'te gösterildiği gibi literatüre katmıştır. Bu mekanizmalar genellikle dört çubuk mekanizması (1), kayar uzuv (2,4,5,6,11), kremayer dişlisi (8,10), kam (7,9) ve pnömatik silindir (3) tahrikleri ile parmakların birbirine yakınlaşma ya da uzaklaşma hareketi neticesinde tutma sağlamaktadır. Bu mekanizmaların mafsal türüne göre de birçok çeşidi bulunmaktadır. Döner mafsallardan oluşan parmak ucu eğri yörünge takip eden çok serbestlik dereceli düşük tahrikli parmak mekanizmalarına örnek olarak Belgrad robotik elin bir parmağının mekanizması verilmiştir (Şekil 2.25).

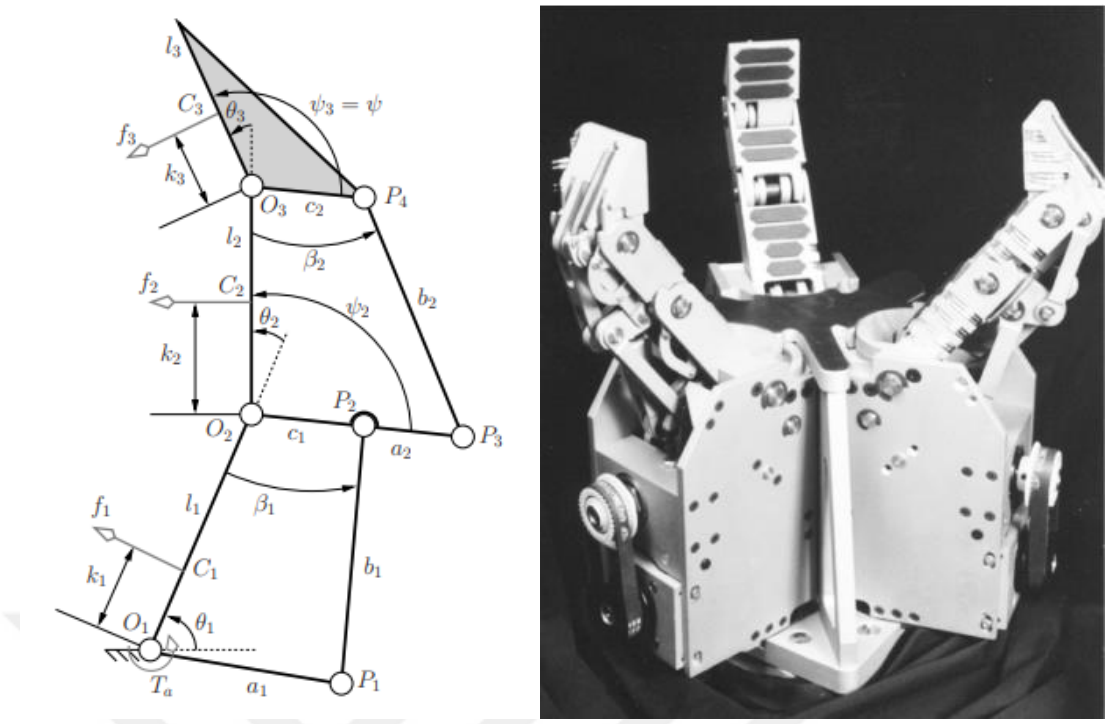


Şekil 2.24 Parmak ucu eğri yörüngede hareket eden tutucu parmak mekanizmaları (Monkman ve ark., 2007).



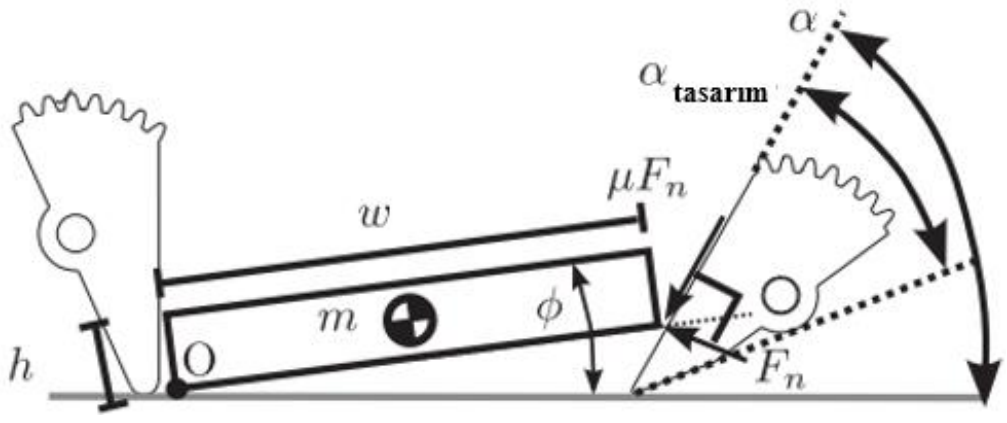
Şekil 2.25 Çok serbestlik dereceli düşük tahrikli parmak mekanizması (Monkman ve ark., 2007).

Birglen ve ark. (2007), düşük tahrikli yüksek serbestlik dereceli bir parmak mekanizması geliştirip robotik tutucu prototipini ürettiler (Şekil 2.26). Bu tutucunun en önemli özelliği üç eklemli bir parmağı tek bir motor ile tahrik edebilmesidir. Bu parmak mekanizması düzlemsel hareket gerçekleştirmektedir. Ancak bu tutucuda düzlemin de kendi ekseni etrafında döndürülme özelliği mevcuttur. Böylelikle her bir parmak için 2 olmak üzere toplamda 6 tahrik elemanı mevcuttur.

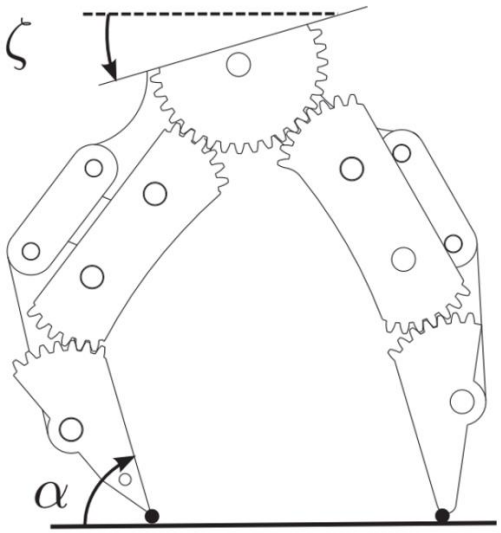


Şekil 2.26 On iki serbestlik dereceli ve 6 tahrikli robotik tutucu ve parmak mekanizması (Birglen ve ark., 2007).

Babin ve Gosselin (2018), çalışmalarında episiklik dişli takımı kullanarak düşük tahrikli bir tutucu ile düz zeminde bulunan ince ve düz cisimlerin tutulmasına yönelik bir yöntem ortaya koydular (Şekil 2.27-28). Bu yöntemde parmak ucu için pasif tahrik elemanı kullanarak düz zemin üzerindeki ince bir nesneyi başka hiçbir destek kullanmadan sadece tutucu parmak ucu ile insan eline benzer şekilde kavramayı başardılar (Şekil 2.27).

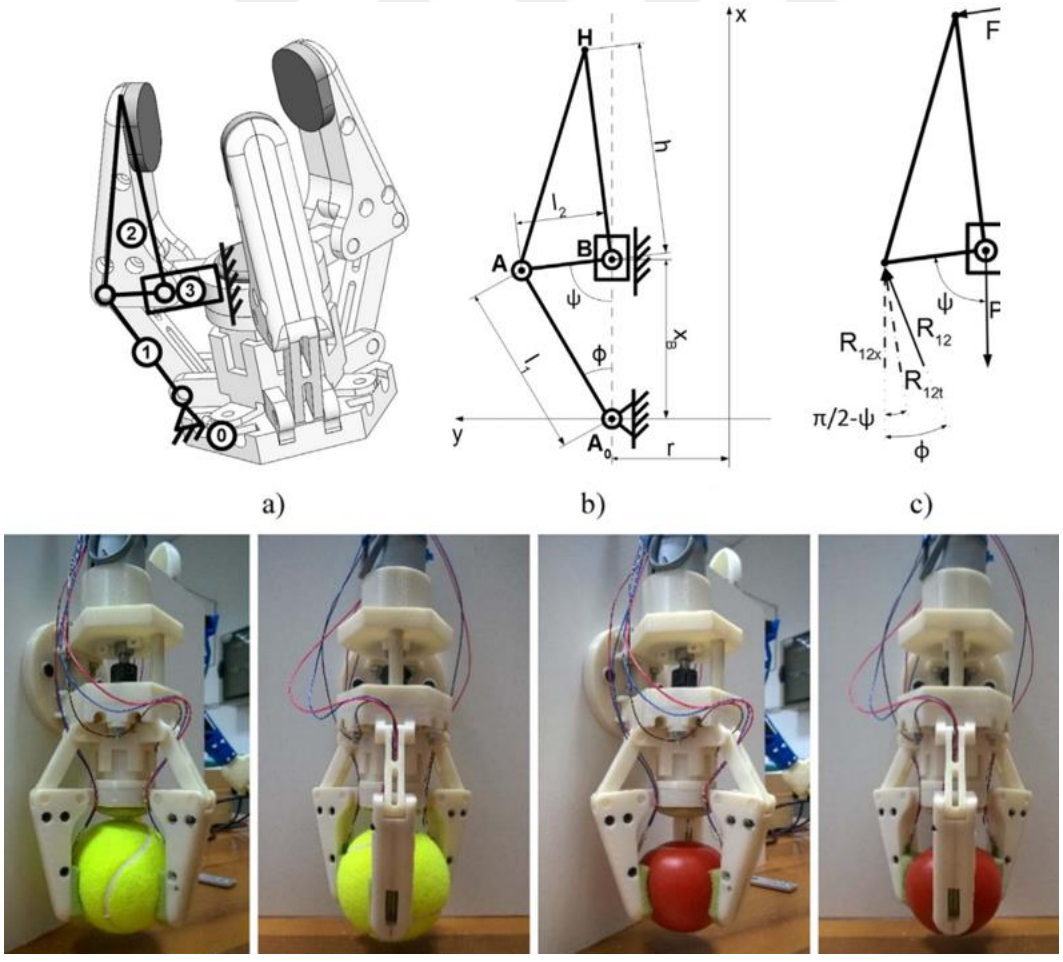


Şekil 2.27 Düz zeminden ince düz nesnenin tutulması (Babin ve Gosselin, 2018).



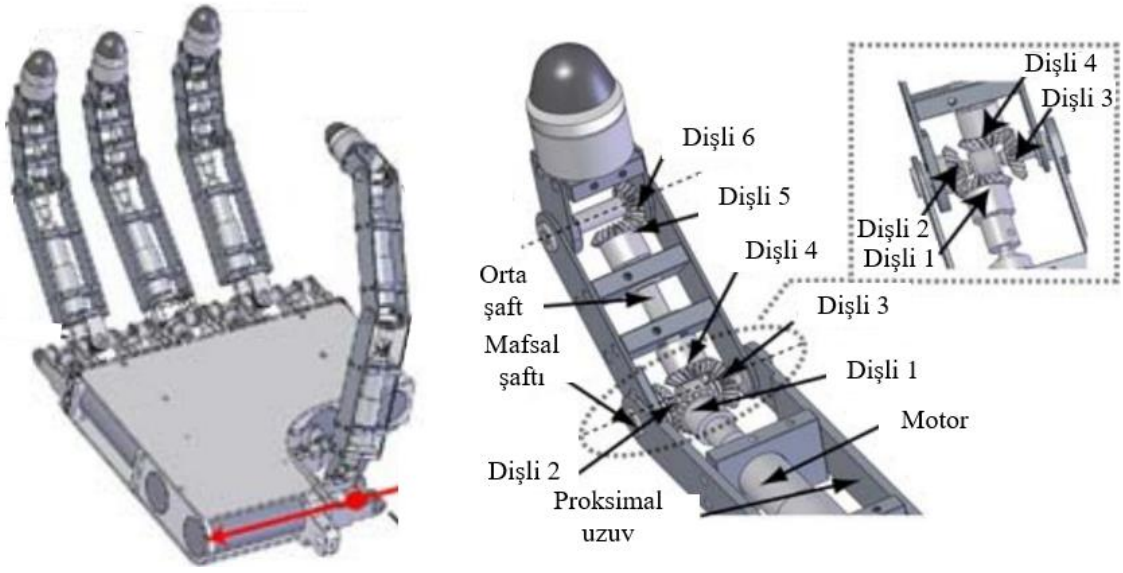
Şekil 2.28 Episiklik dişli takımı kullanılan düşük tahrikli tutucu parmak mekanizması (Babin ve Gosselin, 2018)

Russo ve ark. (2017), krank biyel mekanizması kullanarak 3 parmaklı ve tek tahrikli robotik tutucuyu tasarladılar (Şekil 2.29). Bu tutucunun parmak uçlarında cisme temas anındaki kuvveti modellediler ve deneysel uygulama ile ölçtüler.



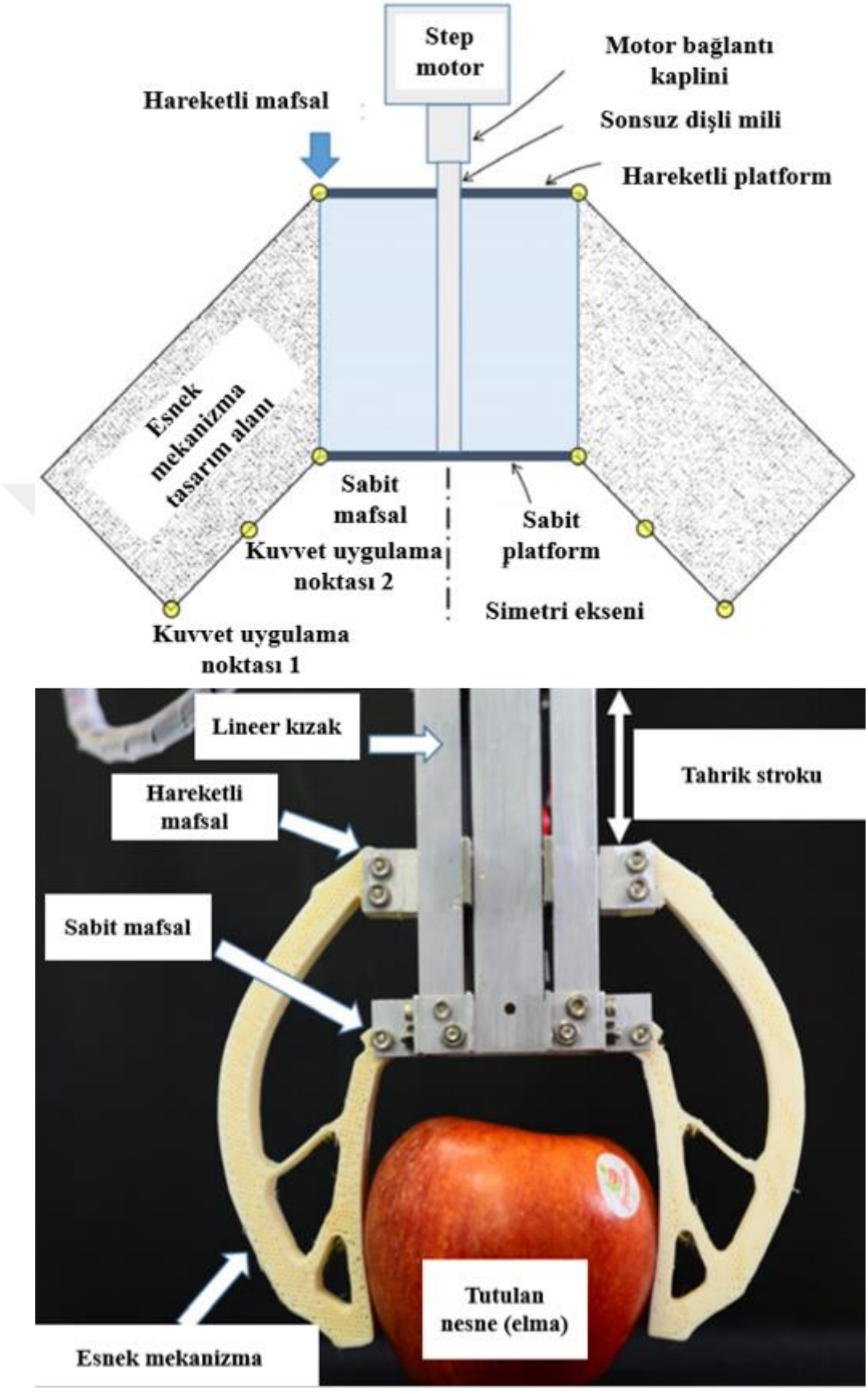
Şekil 2.29 Parmağı krank biyel mekanizmalı tutucu prototipinin deneyi (Russo ve ark., 2017).

Takeuchi ve Watanabe (2010), antropomorfik robotik el parmakları için dişli mekanizmaları kullanmıştır (Şekil 2.30). Bunun yanı sıra parmak ucunda özel bir yapı geliştirerek parmak ucu sertliği değiştiren bir uygulama yapmıştır. Bu sertliğin değişimine bağlı nesneleri kavrama kararlılığı ve tutma esnasında hareket ettirme kabiliyetini değerlendirmiştir. Tüm parmaklarda 3'er adet mafsal bulunmaktadır. Ancak baş parmak serbestlik derecesi 4, işaret parmağının serbestlik derecesi 3, orta parmağın serbestlik derecesi 2 ve yüzük parmağının serbestlik derecesi 3 olmak üzere toplam 12 serbestlik dereceli bir tutucudur. Her bir parmak düzlemsel hareket gerçekleştirmektedir. Ancak hareketin gerçekleştiği düzlemin açısı değişebilmektedir.



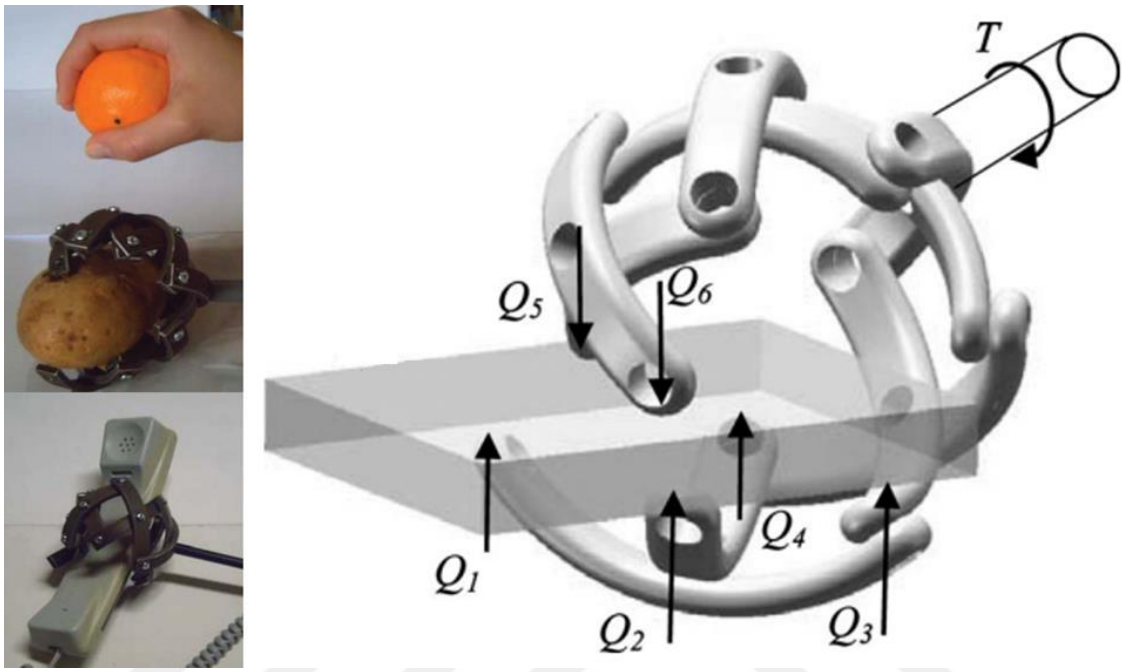
Şekil 2.30 Kazanawa robotik eli ve mekanizması (Takeuchi ve Watanabe, 2010).

Liu ve ark. (2018), esnek mekanizma kullanarak iki parmaklı tek tahrikli bir tutucu tasarladılar (Şekil 2.31). Tasarım esnasında topolojik optimizasyon yaptılar. Esnek mekanizma için geometrik kısıtlar tasarım alanı oluşturularak belirlediler (Şekil 2.31). Gerilme enerji fonksiyonu elde edilerek sonlu elemanlar analizi yöntemi ile minimum hacimde maksimum gerilme enerjisi elde etmeye yönelik belirlenen kısıtlar içinde optimum topolojik tasarım elde ettiler. Prototipi 3B yazıcılardan %50 doluluk oranında imalatı yaptılar. Çekme deneyi yapılarak %50 dolulukta malzemenin eş değer elastikiyet modülü elde ettiler. Deneysel olarak hareketli mafsal ve kuvvet uygulama noktalarında ölçümler yaptılar. Bu tutucu çalışması tek bir tahrikle 6 serbestlik derecelikte bir işlemin kuvvet kontrollü olarak yapılabileceğini göstermiştir.



Şekil 2.31 Esnek mekanizmalı robotik tutucu (Liu ve ark., 2018).

Kocabas (2009), küresel paralellogram mekanizması ile tek tahrikli iki parmaklı bir tutucu tasarladı (Şekil 2.32). Bu çalışmada tasarım kısıtları, çalışma alanı ve kuvvetleri formüle etti. Muhtelif boyutlarda ve dairesel ya da spiral şekildeki mekanizma uzuvlarının tutma kabiliyetini inceledi.



Şekil 2.32 Küresel paralellogram ile robotik tutucu tasarımı (Kocabas, 2009).

Robotik tutucu ile alakalı 1970'li yıllardan günümüze tutma işlemi ile ilgili kavrama kararlılık analizleri, muhtelif mekanizmalar, çeşitli tutma yöntemleri çalışılmıştır. Genel olarak bir insan elinin tutma kabiliyetine yakınsama eğilimi mevcuttur. Bu kapsamda yüksek serbestlik dereceli mekanizmaların düşük sayıda tahrik elemanı ile hareket ettirilebilmesi ve tutulacak cismin çok sayıda parmak temasına sahip olması kavrama kabiliyetinde önemli rol oynamaktadır. Literatürden bazı robotik tutucuların parmak sayısı, serbestlik derecesi ve tahrik türü ile alakalı kriterlere göre Tablo 2.1'de listelenmiştir. Küresel paralellogram mekanizması (Kocabas, 2009) tek tahrik ile esasen toplam 6 serbestlik derecesine sahip bir tutucunun yapabileceği parmak kavrama kabiliyetini sağlamaktadır. Ancak bu mekanizma sadece küresel bir düzlemde iki parmak yapısının simetrik hareketini sağlayabildiğinden düzensiz geometriye sahip cisimlerin kavranmasında yeterli kabiliyeti sağlayamaz. Küresel mekanizma ile tasarlanmış bir tutucunun bağımsız 3 parmaklı olması uygun olarak ön görülmüştür.

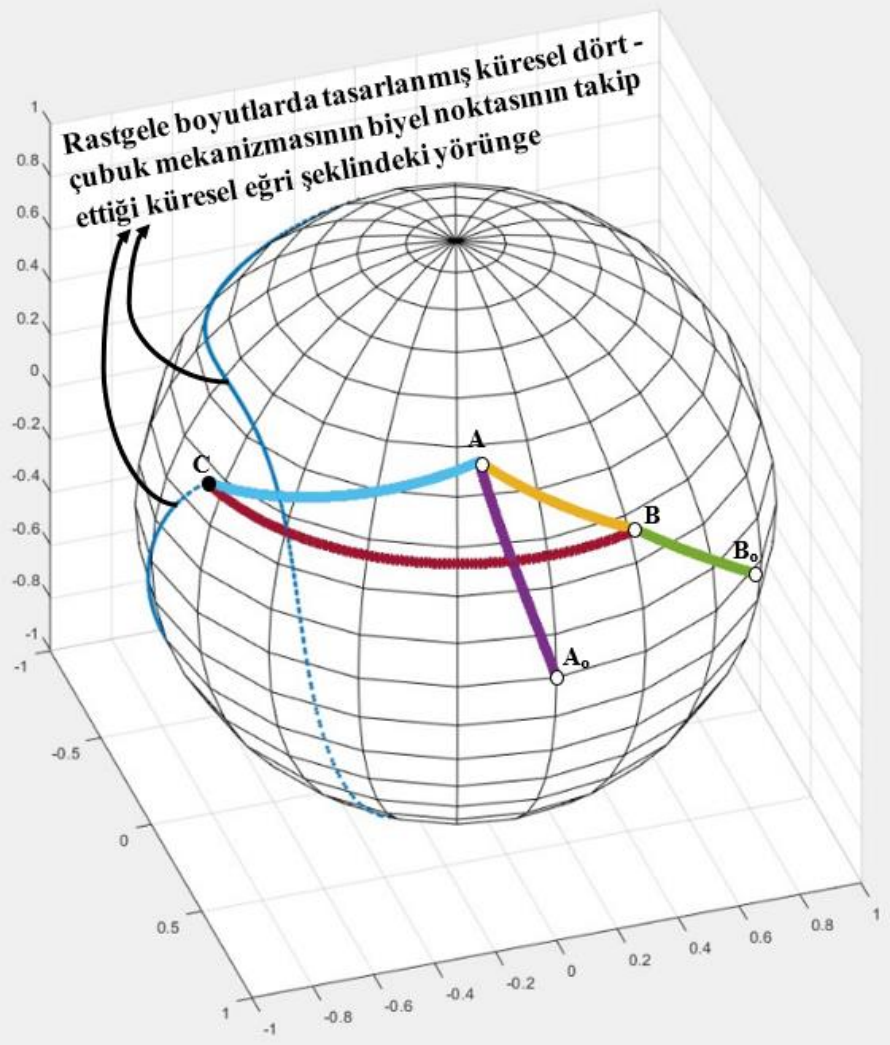
Mekanizma örnekleri tutucu tasarımına göre sınıflandırılırken eğri ve doğru yörüngeler takip etmelerine dayalı ayrılmışlardı (Şekil 2.23-24). Bu ayrıma bağlı olarak küresel mekanizmada da düzlemsel mekanizmanın eşdeğer özelliklerini veren mekanizmalar mevcuttur.

Tablo 2.1 Tahrik türü, parmak sayısı ve serbestlik derecesine göre robotik tutucular

Tasarım ismi	**Parmak sayısı**	**Serbestlik derecesi**	**Tahrik**	**Tahrik türü**
AMADEUS	3		Hidrolik	Düşük tahrik
ASI Gripper	3	3	Mekanik	Tam tahrik
BarrettHand	3	7	Mekanik	Düşük tahrik
DLR Hand 1	4	12	Mekanik	Tam tahrik
DLR Hand 2	4	13	Mekanik	Tam tahrik
Bologna/USC	3	10	Tendon	Tam tahrik
Belgrade/USC	5	6	Mekanik	Düşük tahrik
MARS	3	12	Mekanik	Düşük tahrik
LMS	4	16	Tendon	Tam tahrik
Karlsruhe RC	5		Hidrolik	Düşük tahrik
Karlsruhe Hand 2	4	12	Mekanik	Tam tahrik
HIT/DLR Hand	4	13	Mekanik	Tam tahrik
Goldfinger	4	12	Mekanik	Tam tahrik
NASA Robonaut	4	12	Tendon	Tam tahrik
Okada	3	11	Tendon	Tam tahrik
SARAH	3	10	Mekanik	Düşük tahrik
Salisbury	3	9	Tendon	Tam tahrik
RTR Hand 1	3	6	Mekanik	Tam tahrik
RTR Hand 2	3	9	Tendon	Düşük tahrik
Omni-Hand	3		Mekanik	Tam tahrik
Utah/MIT	4	16	Tendon	Tam tahrik
Soft Gripper 1	2	10	Tendon	Düşük tahrik
Soft Gripper 3	3	10	Tendon	Düşük tahrik
SPRING Hand	3	8	Tendon	Düşük tahrik
Shadow C3 Hand	5	24	Pnömatik	Tam tahrik

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Mekanizmalar kullanım amacına göre belirli özelliklerde tasarlanan birbiri ile bağlantılı hareket edebilen parçaların oluşturduğu yapılardır. Küresel mekanizmalarda, düzlemsel ve üç boyutlu mekanizmalardan farklı olarak, bütün uzuvların mafsal eksenleri küresel bir düzlemin merkezinde kesişir (Chiang, 1988; Bottema ve Roth, 1990). Şematik olarak birim küre üzerinde gösterilen küresel dört-çubuk mekanizmasında C noktası biyel noktasını, A noktası krank uzvu ile biyel uzvunun bağlantı mafsalını, B noktası tahrik edilen çıkış uzvu ile biyel uzvu bağlantı mafsalını, A_o ve B_o noktaları ise sırasıyla krank uzvu ve çıkış uzvunun sabit uzuv ile bağlantı mafsalını ifade etmektedir (Şekil 3.1). Bu küresel dört çubuk mekanizması hususi bir amaç olmaksızın rastgele boyutlarda tasarlanmış bir mekanizma olmasından dolayı yörüngesi bir küresel eğridir.



Şekil 3.1. Küresel bir dört-çubuk mekanizması (Acar ve ark., 2021).

Tutucu parmağı için tasarlanan küresel mekanizmanın biyel noktasının BDY şeklinde bir yörüngeyi takip etmesi gerekir. Düzlemdeki bir doğrunun küresel düzlemdeki karşılığı olan BDY, jeodezik eğriliği sıfır olan bir eğridir (Chiang, 1988). Bu tür eğrilerin eğrilik merkezi küresel düzlemin merkezindedir. Böyle bir yörüngeyi en iyi şekilde elde etmek için büküm eğrisi, daireleme noktalar eğrisi ve çift daireleme noktalar eğrisinin kesim noktası olarak bilinen Ball-Burmester noktalarının, yörüngeyi çizen biyel noktası olarak alınması gerekir. Küresel kinematikte Ball noktalarını formülize eden polinom Denklem (1)'de verilmiştir (Özçelik, 2008).

$$p_1: \quad Et^4 + D_1t^3 + D_2t^2 + D_3t + D_4 = 0 \tag{1}$$

Burada,

$E = a(a\omega_{x1} - 1)$

$D_1 = b(2a\omega_{x1} - 1)$

$D_2 = \omega_{x1}(a^2 + b^2 + 1) - a$

$D_3 = b(2a\omega_{x1} - 1)$

$D_4 = \omega_{x1}b^2$

$a = \dfrac{2\omega_{x1} - \omega_{y2}}{3{\omega_{x1}}^2}, \quad b = \dfrac{\omega_{x2}}{3{\omega_{x1}}^2}$

Burada E, D_1, D_2, D_3, D_4, polinom katsayıları olmak üzere $\omega_{x1}, \omega_{x2}, \omega_{y2}$ ani invaryantlar ve t yapay parametredir. Bu ani invaryantlar açısal hız türevlerinin normalize edilmiş değerleridir. Bu polinomun Denklem (2)'de verilen Burmester noktalarını formülize eden polinom ile ortak kökleri yardımıyla elde edilen mekanizma, BDY şeklinde bir yörünge sağlayabilir (Özçelik, 2008).

Burmester noktalarını formülize eden polinom Denklem (3)'te verilmiştir.

$$p_2: \quad k_6t^6 + k_5t^5 + k_4t^4 + k_3t^3 + k_2t^2 + k_1t^1 + \omega_{x1}b^2 = 0 \tag{2}$$

Burada,

$k_6 = a\omega_{x1} - 1$

$k_5 = 2ba\omega_{x1} - b - d$

$k_4 = 2a\omega_{x1}(k + a) + \omega_{x1}(b^2 - 1) - 2a - f$

$k_3 = 2b(2a\omega_{x1} + \omega_{x1}k - 1) - d$

$k_2 = 2\omega_{x1}(b^2 + ka) + a(a\omega_{x1} - 1) - f$

$k_1 = b(2\omega_{x1}(k + a) - 1)$

$d = \dfrac{3\omega_{x2} - \omega_{y3}}{3{\omega_{x1}}^2}$

$f = \dfrac{3\omega_{y2} - 2\omega_{x1} + \omega_{x3} + {\omega_{x1}}^3}{3{\omega_{x1}}^2}$

$k = \dfrac{1 - 2a\omega_{x1}}{\omega_{x1}}$

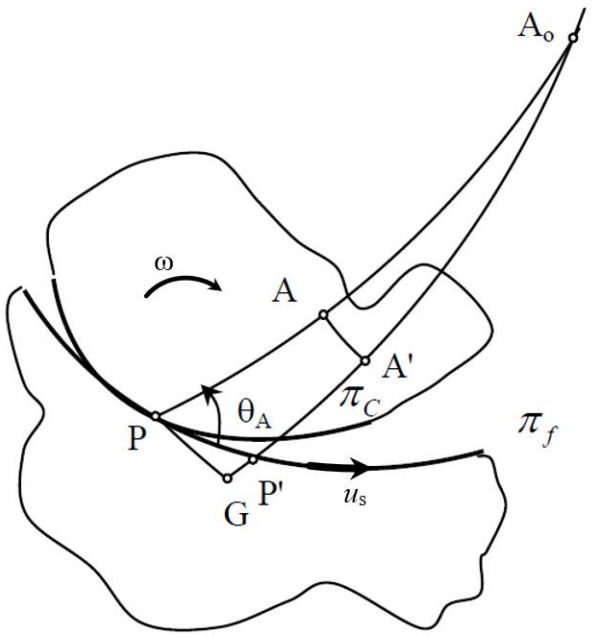
Burada $k_6, k_5, k_4, k_3, k_2, k_1$ polinom katsayıları olmak üzere ω_{x3}, ω_{y3} ani invaryantlardır. Ortak kökler için Denklem (1) ve Denklem (2)'de verilen polinomların katsayıları ile Sylvester matrisi oluşturulur. Eğer Sylvester matrisinin determinantı sıfır ise Ball-Burmester noktaları için gerekli şartlardan biri sağlanmıştır. Ball-Burmester noktalarından söz edilebilmesinin yeterli şartı, Denklem (1) ve Denklem (2)'deki polinomların en az 4 adet ortak gerçel köklerinin olmasıdır. Bu köklerden 3 tanesi küresel mekanizmanın biyel uzvuna ait biyel noktası ve mafsallarının koordinatlarını hesaplamak için Denklem (3-5)'de verildiği gibi kullanılır (Özçelik, 2008). Böylece aynı zamanda biyel uzvunun boyutları da hesaplanabilir.

$$X_A = Y_A t \tag{3}$$

$$\mathrm{Y_A} = \frac{t}{\sqrt{(t^2+1)[a^2t^4+2abt^3+t^2(1+b^2+a^2)+2abt+b^2]}} \tag{4}$$

$$\mathrm{Z_A} = \frac{(at+b)\left(t^2+1\right)}{\sqrt{(t^2+1)[a^2t^4+2abt^3+t^2(1+b^2+a^2)+2abt+b^2]}} \tag{5}$$

Bu dört adet kök ile, kendi aralarında kombinasyon grupları oluşturularak farklı boyutlarda mekanizmalar elde edilebilir. Denklem (3-5) krank ve biyel uzvu bağlantı mafsalı noktası A için verilmiştir ve farklı kökler kullanılarak biyel noktası C, biyel uzvu ve çıkış uzvu bağlantı mafsalı noktası B'nin koordinatlarının hesaplanması için de kullanılır (Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3). Bu denklemde a ve b katsayıları Denklem (1)'de ani invaryantlara bağlı olarak verilmiştir. Ancak A, B, C noktalarının koordinatlarının hesaplanması küresel dört-çubuk mekanizması tasarımı için yeterli değildir. A_o ve B_o mafsallarının koordinatlarının da hesaplanması gerekmektedir. A_o ve B_o mafsal noktaları, A ve B mafsal noktalarının hareket esnasında takip ettiği küresel daire şeklindeki yörüngenin merkezini oluşturmaktadır. Bu nedenle eğrilik merkezi ve eğrilik yarı çapının belirlenmesinde kullanılan Euler-Savary denklemi kullanılmalıdır. Bu denklem düzlemsel kinematikte eğrilik merkezi koordinatlarını, biyel noktalarının koordinatlarına bağlı belirleyebilen parametrik bir denklem formatında geliştirilmiştir (Veldkamp, 1976). Düzlem kinematikteki parametrik Euler-Savary denkleminin emsali bir parametrik Euler-Savary denklemi küresel kinematik için de geliştirilmelidir. Küresel kinematik için klasik Euler-Savary denklemi küresel eğrinin eğrilik yarıçapının hesaplanması için kullanılır.



Şekil 3.2. π_f sabit pol eğrisi ve π_c hareketli pol eğrisi (Chiang, 1988).

Küresel eğrinin eğrilik yarıçapı $\rho = PA_o - PA$ eşitliği ile ifade edilir (Şekil 3.2). Bu eşitliğin sağ tarafı esasen A_oA krank uzvunun boyutunu ifade etmektedir. Küresel kinematik için klasik Euler-Savary denklemi (Chiang, 1988):

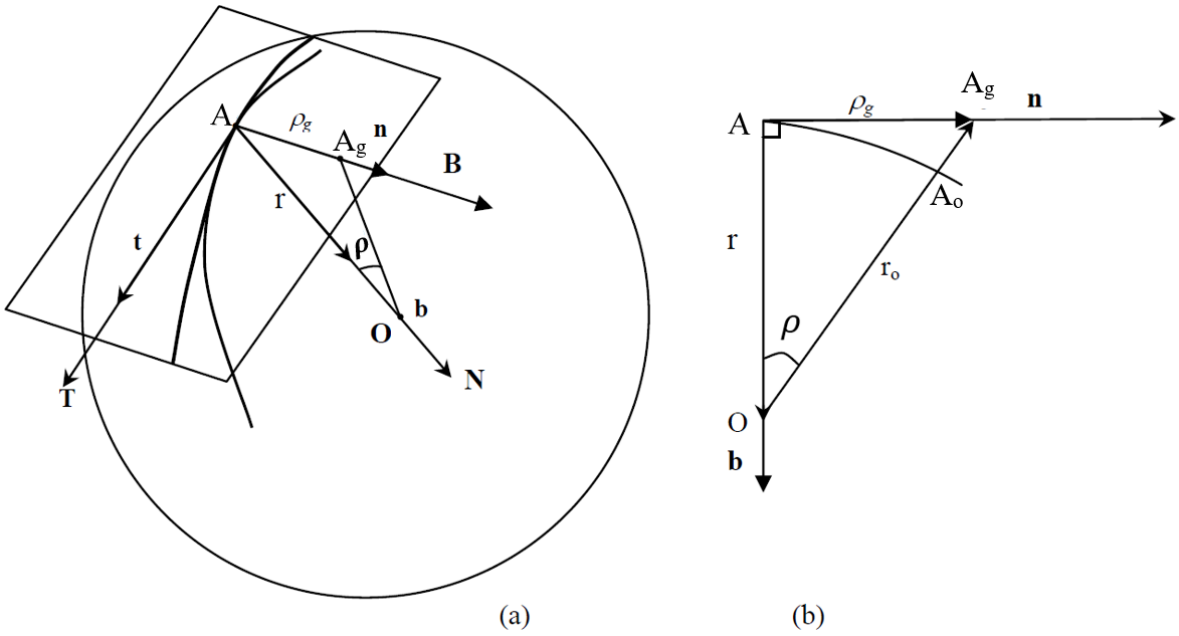
$$\frac{1}{\tan PA} - \frac{1}{\tan PA_o} = \left(\frac{\omega}{u}\right)\frac{1}{sin\theta_A} \tag{6}$$

Burada u ve ω, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi sırasıyla pol yer değiştirme hızı ve A noktasının açısal hızıdır. Bu denklemi parametrik formda elde etmek için eğrilik jeodezik formda incelenmiştir. Bu inceleme için Frenet-Serret eksen takımları kullanılır. Bir uzay eğrisi üzerindeki bir noktada birim teğet vektör **T** ve birim normal **N** birbirine diktir. **T** ve **N** vektörlerinin oluşturduğu ve bu noktadan geçen düzlem, eğrinin oskülatör düzlemi olarak adlandırılır (Beer ve Johnston, 1979; Meriam ve Kraige, 2012). Uzay eğrileri için oskülatör düzlem her noktada farklı doğrultudadır. Bu düzlem eğriye bu noktada değer (temas eder). Eğrilik dairesi oskülatör düzlem içerisindedir ve oskülatör daire olarak da isimlendirilir. Buna göre ρ eğrilik yarıçapı bu dairenin yarıçapıdır. Dairenin merkezine eğrilik merkezi denir. Bu daire eğrinin daima içbükey tarafında olacağı için eğrilik merkezi de daima içbükey taraftadır. Oskülatör düzleme dik binormal birim vektörü sağ el kuralı ile **B** = **T** x **N** bağıntısı ile elde edilir. **T** birim vektörü daima küresel eğriye teğet ve eğrinin ilerleme yönündedir. **B** vektörü ve **T** vektörünün oluşturduğu düzlem A hareket noktasında küresel düzleme teğet bir düzlemdir (Şekil 3.3-a). Küresel eğrinin bu teğet

düzlem üzerine iz düşümüne jeodezik eğri denir. Bu teğet düzleme izdüşümü yapılan eğrinin teğet eksen **t** Frenet-Serret eksen takımındaki **T** ekseni ile ve **n** normal ekseni binormal eksen **B** ile çakışıktır (Şekil 3.3-a).

Jeodezik eğrinin AOA_g üçgeninde ρ_g ve ρ, sırasıyla jeodezik eğrilik yarıçapı ve küresel eğrilik yarıçapıdır (Şekil 3.3-b). Jeodezik eğrinin eğriliği:

$$\kappa_g = \frac{1}{\rho_g} = \frac{1}{tan\rho} \tag{7}$$



Şekil 3.3. a) Teğet düzlem üzerinde jeodezik eğri, b) Jeodezik eğrinin yarıçapı (Özçelik, 2008).

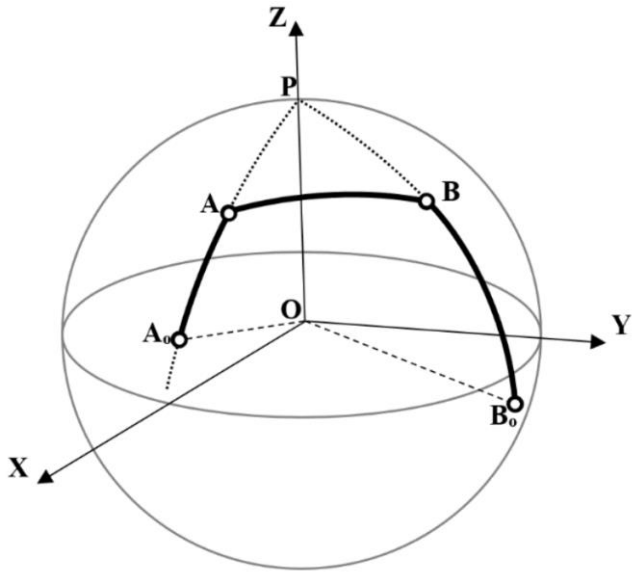
Küresel eğrinin eğrilik yarıçapı $\rho = 90^0$ olduğunda düzlemde doğru parçasına tekabül eden eğriliği sıfır olan büyük daire yayı oluşur. Jeodezik eğrilik, konum vektörü **r**'nin hız ve ivmesinin vektörel çarpımı ve skaler çarpımı ile parametrik formda elde edilebilir (Özçelik, 2008).

$$\kappa_g = \frac{\mathbf{r}\cdot(\dot{\mathbf{r}} \times \ddot{\mathbf{r}})}{(\dot{\mathbf{r}} \cdot \dot{\mathbf{r}})^{\mathbf{3/2}}} \tag{8}$$

Bu denklemin sadeleştirilmesi ile küresel eğrilik;

$$\rho = arctan2\left(\frac{(\dot{\mathbf{r}})^{\mathbf{3}}}{\mathbf{r}\cdot(\dot{\mathbf{r}} \times \ddot{\mathbf{r}})}\right) \tag{9}$$

Şematik görünüşü verilen küresel dört-çubuk mekanizmasında her bir mafsal ve pol noktası $\mathbf{r_{Ao}}$, $\mathbf{r_A}$, $\mathbf{r_P}$ konum vektörleri ile ifade edilebilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Pol noktasının küresel dört-çubuk mekanizmasının şematik görünümündeki yeri.

Bu şematik küresel dört-çubuk mekanizmasında Şekil 3.2'de izah edilen hareketli ve sabit pol eğrilerinin temas ettiği nokta P pol noktasıdır. POA_o merkez açısı, sabit mafsal ekseni ile ani dönme polü arasındaki büyük daire yayını görmektedir. AOA_o merkez açısı, A hareketli mafsal ekseni ve A_o sabit mafsal ekseni arasındaki büyük daire yayını görmektedir. AA_o büyük daire yayı, A mafsalının küresel eğri olan yörüngenin yarı çapı ρ büyüklüğündedir. Hareketin başlangıç anı için pol noktası P kürenin kutbunda (0, 0, 1) alınır ve A_o noktası konum vektörü ile skaler çarpımı yapılarak Denklem (10) elde edilir.

$$cos\ POA_o = \boldsymbol{P_x A_{ox}} + \boldsymbol{P_y A_{oy}} + \boldsymbol{P_z A_{oz}} \tag{10}$$

Burada $POA_o = POA + AOA_o = POA + \rho$ bağıntısı kullanılarak $cos\ POA_o$ değeri hesaplanabilmektedir. Denklem (3-5)'den elde edilen A hareketli mafsal noktasının koordinatları kullanılarak A ve A_o mafsal noktaları konum vektörlerinin skaler çarpımı ile Denklem (11) elde edilir.

$$cos\ AOA_o = \cos\rho = \boldsymbol{A_x A_{ox}} + \boldsymbol{A_y A_{oy}} + \boldsymbol{A_z A_{oz}} \tag{11}$$

Denklem (10) ve Denklem (11)'de A_o mafsal noktasının 3 adet bilinmeyen koordinat değerleri bulunmaktadır. Bu sebeple çözüm için bir denkleme daha ihtiyaç vardır. Bunun için P, A ve A_o noktalarının üzerinde bulunduğu XYZ eksen takımındaki genel düzlem denklemi kullanılabilir. Bu denklem A noktası için yazılır.

$$A_z + \tan\alpha\left(A_x \sin\beta - A_y \cos\beta\right) = 0 \tag{12}$$

Bu denklemde α ve β açıları, düzlemin sırasıyla X ve Z eksenleri etrafında dönme açılarıdır. Denklem (12), aynı düzlem üzerinde bulunan A noktası için ve P noktası için yazılarak β açısı için düzenlendiğinde Denklem (13) elde edilir.

$$\beta = arctan2\left(\frac{-A_z P_y + A_y P_z}{-A_z P_x + A_x P_z}\right) \tag{13}$$

Bu denklemde A noktasının koordinatları Denklem (3-5) ile hesaplanır. Hareketin ilk anında açısal hız Z ekseninde pozitif doğrultuda bir birim alınırsa P noktasının koordinatları (0, 0, 1) olarak belirlenebilir. Böylece β değeri hesaplanarak Denklem (12)'de yerine yazılır ve α değeri hesaplanır. A ve A_o mafsalları aynı düzlem üzerinde olduğundan Denklem (14) yazılarak, Denklem (10) ve Denklem (11)'de bulunan A_o mafsal noktasının 3 adet bilinmeyen koordinat değerleri için 3 denklem takımı elde edilir.

$$A_{oz} + \tan\alpha\left(A_{ox}\sin\beta - A_{oy}\cos\beta\right) = 0 \tag{14}$$

Denklem (10,11,14) kullanılarak A_{ox}, A_{oy}, A_{oz} koordinatları Denklem (15) deki gibi elde edilir. Bu denklem düzlem kinematikte parametrik Euler-Savary denklemlerine karşılık gelen ve dört çubuk mekanizmasının tasarımında kullanılan denklemin küresel kinematikteki karşılığıdır. Bu denklem bu çalışmada optimizasyon algoritması içerisinde küresel mekanizma uzuv boyutlarının hesaplanması için kullanılmıştır.

$$A_{x0} = -\frac{tan\alpha cos\beta[A_z\cos(\rho+\gamma) - cos\rho] + A_y\cos(\rho+\gamma)}{tan\alpha\left[A_x cos\beta + A_y sin\beta\right]}$$

$$A_{y0} = \frac{tan\alpha\ sin\beta\ [-A_z\cos(\rho+\gamma) + cos\rho] + A_x\cos(\rho+\gamma)}{tan\alpha[A_x cos\beta + A_y sin\beta]} \tag{15}$$

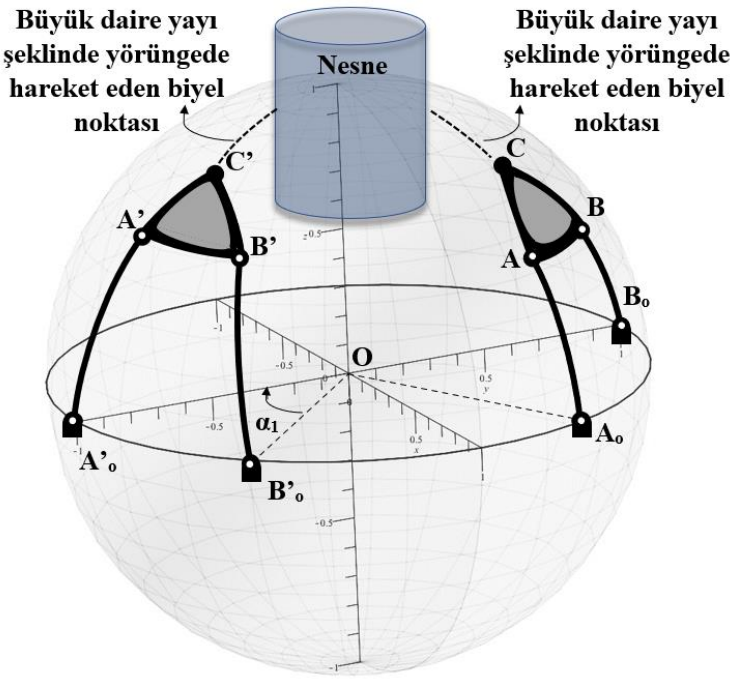
$$A_{z0} = \cos(\rho+\gamma)$$

Burada γ = POA açısıdır.

3.1.Optimizasyon probleminin belirlenmesi

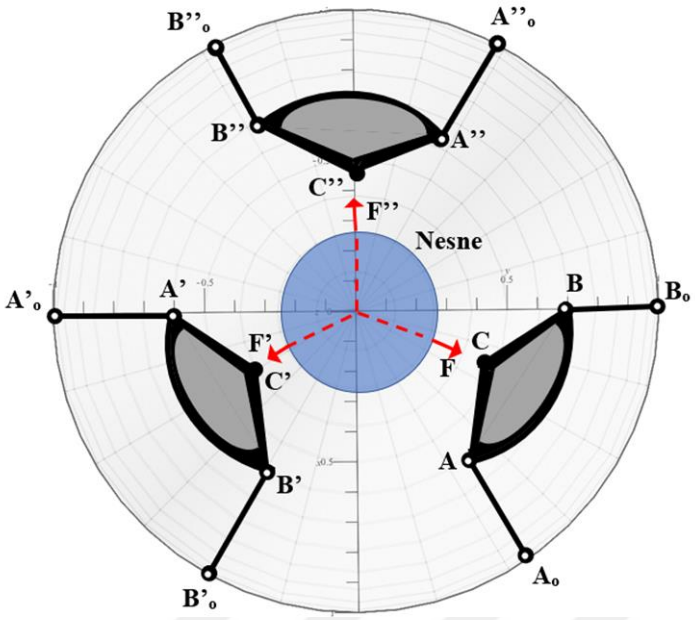
Bu çalışmada küresel mekanizmanın kullanım amacı, bir nesnenin tutulması için gerekli parmak hareketini gerçekleştirmektir. Bu hareket için küresel mekanizmanın biyel noktası Şekil 3.5'te şematik olarak gösterildiği gibi boylamsal ve BDY şeklinde bir yörünge takip ederek Şekil 3.6'da şematik olarak gösterildiği gibi nesneye kuvvet

uygulamalıdır. BDY, merkezi kürenin merkezinde olan bir eğridir. Bu nedenle jeodezik eğriliği sıfırdır. Şekil 3.5'te bu biyel eğrisini çizecek olan sadece iki adet küresel mekanizma şematik olarak gösterilmiştir. Üçüncü mekanizma konumu arka planda olması nedeniyle ve şekilde karmaşıklığa sebep olmaması için çizilmemiştir.



Şekil 3.5. Küresel bir dört-çubuk mekanizması ile tasarlanan tutucunun şematik izometrik görünümü.

Şekil 3.5'te gösterilen A_o ve B_o sabit mafsal noktaları anlaşılırlığı kolaylaştırmak için küresel hareket düzleminin ekvatoral düzlemi olarak seçilmiştir. Bu mafsallar A ve B hareketli mafsal noktalarına ait sabit mafsal noktalarıdır. Tutulacak silindirik geometride bir cisim küresel düzlemin düşey ekseniyle eş eksenli yerleştirilmiştir. Burada silindirik nesne, şematik tutucunun yukarısında görünse de bu durum sadece ifade netliği için bu şekilde gösterilmiştir. Şekil 3.6'da gösterildiği gibi silindirik cisim, simetrik olarak bir küre etrafına yerleştirilen 3 adet küresel dört çubuk mekanizmasına ait biyel noktalarının BDY'na benzer bir yörüngede hareket etmesiyle sıkıştırılarak üç kuvvet etkisi altında tutulabilir. Bu nedenle her bir mekanizma ekvatoral düzlemde maksimum 120^o'lik açıda iz düşüme sahip çalışma uzayında hareket gerçekleştirmelidir. Daha büyük çalışma uzayı simetrik yerleştirilen 3 adet mekanizmanın tutma işlemi esnasında birbiri ile çarpışmasına neden olacak ve tutma operasyonu başarısız olacaktır.



Şekil 3.6. Küresel bir dört-çubuk mekanizması ile tasarlanan tutucunun şematik üst görünümü.

Şekil 3.5'te küresel dört-çubuk mekanizmasının küresel üçgen şeklindeki biyel uzvu eğriliği sıfır olan BDY çizmektedir. Bu nedenle Şekil 3.5'te gösterilen küresel dört-çubuk mekanizması uzuvları, küre yüzeyi üzerindeki daire yayları şeklinde olmalarına rağmen Şekil 3.6'da aynı yaylar üst görünümde bir doğru parçası şeklinde görünmektedir. Dolayısıyla küresel dört-çubuk mekanizmasının uzuvlarının boyutları, Şekil 3.5'te gösterilen A_o ve B_o mafsalları arasındaki daire yayını küre merkezinden belli bir açı altında gören bir daire yayından meydana gelmektedir. Şekil 3.5'te A_o ve B_o mafsalları arasındaki sabit uzuv boyutunu ifade eden merkez açı α_1 temsilen gösterilmiştir. Şekil 3.5'te karmaşıklığa neden olmaması için A_o ve A, A ve B, B ve B_o mafsalları arasındaki sırasıyla krank, biyel ve çıkış uzuvlarının boyutlarını ifade eden α_2, α_3, α_4 merkez açıları ileriki bölümde Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Tutucunun tasarlanması aşamasında tutma kabiliyetinin incelenmesi işleminde kütle ve sürtünme olmaksızın sadece cismin geometrik yapısına ve tutucu parmak ucuna karşı tepki kuvveti Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Buna göre bir cisim, tutucu parmak mekanizmasının hareket ettiği küresel düzlemin çapından büyük olmamak kaydıyla, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi parmak ucundan dolayı 3 kuvvet etkisi altında statik dengede tutulabilir. Bu işlemin sağlanabilmesi için mekanizmanın biyel noktası kürenin ekvatoral düzleminden başlayan ve kutuplarına kadar devam eden BDY'na benzer bir yörüngede hareket etmelidir.

3.1.1. Amaç fonksiyonunun belirlenmesi

Tutma işleminde küresel mekanizmanın biyel noktasının takip etmesi gereken yörüngenin ekvatoral düzlemden kutuplara kadar olması yeterlidir. Ancak biyel noktası BDY şeklinde bir yörüngede hareket edebilen her küresel mekanizma tutma işlemine uygun boyutta yörünge sağlayamaz. Bu nedenle küresel mekanizmanın biyel noktasının yörünge boyutunun en uzun olması istenir. Bu nedenle Denklem (16) optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu olarak kullanılır (Acar ve ark., 2021).

$$\max f(L) = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{\left[\left(X_{C(i+1)} - X_{C(i)}\right)^2 + \left(Y_{C(i+1)} - Y_{C(i)}\right)^2 + \left(Z_{C(i+1)} - Z_{C(i)}\right)^2\right]} \quad (16)$$

3.1.2. Optimizasyon kısıtları

Bu optimizasyon işleminin ilk kısıtı ani invaryantların $(\omega_{x1}, \omega_{x2}, \omega_{y2}, \omega_{x3}, \omega_{y3})$ aranacağı değer aralıklarıdır. Hesaplardaki tecrübelerden Aşağıdaki aralıkların uygun olduğu görülmüştür:

$$\begin{aligned} g_1(x)&: -25 < \omega_{x1} < 25 \\ &-25 < \omega_{x2} < 25 \\ &-25 < \omega_{x3} < 25 \\ &-25 < \omega_{y2} < 25 \\ &-25 < \omega_{y3} < 25 \end{aligned} \quad (17)$$

Bu aralıklarından seçilen ani invaryantlar değerleri ile Sylvester matrisi oluşturulur. Bu matris A ile ifade edilirse optimizasyon probleminin ikinci ve üçüncü kısıtları Denklem (18) ve Denklem (19)'da olduğu gibi verilir.

$$g_2(x): \det(A) = |A| = 0 \quad (18)$$

$$g_3(x): t_1,\ t_2,\ t_3,\ t_4 \ldots . t_n \in \mathbb{R}, \quad n \geq 4 \quad (19)$$

$t_1,\ t_2,\ t_3,\ t_4 \ldots . t_n$ Ball ve Burmester polinomlarının ortak gerçel kökleridir. Bu kökler Denklem (3-5) kullanılarak biyel noktası ve biyel uzvuna ait mafsal noktalarının koordinatları hesaplanabilir. Böylece her bir mekanizma uzvunun boyutu da hesaplanır.

$$\alpha_2 = 2\sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{(X_A - X_{A_o})^2 + (Y_A - Y_{A_o})^2 + (Z_A - Z_{A_o})^2}}{2}\right) \quad (20)$$

Denklem (20), krank uzvu boyutu α_2'nin hesaplanması için Ao ve A mafsal noktalarının koordinatlarının bir doğru parçasıyla birleştirilip A_oOA merkez açısının açı ortayı çizilerek oluşan dik üçgen sayesinde elde edilmiştir. Bu denklemdeki A noktası koordinatları Denklem (3-5) kullanılarak ve A_o koordinatları parametrik Euler-Savary Denklemi (15) kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem (20), diğer uzuvların boyutlarının

hesabında da kullanılmıştır. Bu boyutlara, tutucu tasarımına uygun çalışma uzayı sağlamak için 90^o'lik kısıtlama uygulanmıştır.

$g_4(x)$: $\alpha_1 < 90^o$

$\alpha_2 < 90^o$ (21)

$\alpha_3 < 90^o$

$\alpha_4 < 90^o$

Aranan mekanizmalardan kol-sarkaç ve çift kol için Grashof, çift sarkaç için çakışık sarkaç açılı non-Grashof teoremine uyan küresel dört-çubuk mekanizmaları seçilmiştir. Çünkü bu teoremlere uymayan küresel dört-çubuk mekanizmaları tutucu parmağı olarak kullanılabilecek bir mekanizmanın çalışma uzayının sınırlarını aşmaktadır.

$g_5(x)$: $\alpha_2 + \alpha_4 \leq \alpha_3 + \alpha_1, \quad \alpha_3 + \alpha_2 \leq \alpha_4 + \alpha_1, \quad \alpha_2 + \alpha_1 \leq \alpha_3 + \alpha_4$ (22)

$g_6(x)$: $\alpha_2 + \alpha_4 \leq \alpha_3 + \alpha_1, \quad \alpha_3 + \alpha_2 \leq \alpha_4 + \alpha_1, \quad \alpha_4 + \alpha_3 \leq \alpha_1 + \alpha_2$ (23)

$g_7(x)$: $\alpha_3 + \alpha_2 \leq \alpha_1 + \alpha_4, \quad \alpha_2 + \alpha_1 \leq \alpha_4 + \alpha_3, \quad \alpha_1 + \alpha_4 \leq \alpha_2 + \alpha_3$ (24)

Mekanizmalar hareket iletimi için kullanılan yapılardır. Ancak hareket iletiminin iyiliği(kalitesi) bağlama açısına bağlıdır. Bu nedenle bağlama açısı ile ilgili bir kısıtlama da yapılması gerekir. Literatüre göre hareket iletiminin iyi olduğu bir mekanizmada bağlama açısının minimum değerinin 40^o' den büyük olması gerekir. Küresel mekanizmalarda bağlama açısı Denklem (25) ile hesaplanır. Bağlama açısı için kısıt Denklemi (26) yazılabilir.

$$\mu_{min} = cos^{-1}\left[\frac{\{\cos(\alpha_4-\alpha_1)-cos\alpha_2 cos\alpha_3\}}{\{sin\alpha_2 sin\alpha_3\}}\right] \quad (25)$$

$g_8(x)$: $\quad \mu_{min} > 40^o$ (26)

Tutucu parmaklarının statik tutma sağlayabilmesi için biyel noktasının jeodezik eğriliğinin sıfıra yakın olması gerekçesi anlatılmıştı. Bu sebeple jeodezik eğrilik için bir sınır belirlenmelidir. Bu sınır, $\rho_g < 0.005$ olarak öngörülmüştür. Jeodezik eğrilik için parametrik form olan Denklem (27) kullanılmıştır.

$g_9(x)$: $\kappa_g = 1/r_g = \boldsymbol{r}.(\dot{\boldsymbol{r}}x\ddot{\boldsymbol{r}})/(\dot{\boldsymbol{r}}.\dot{\boldsymbol{r}})^{3/2} \leq 0{,}005$ (27)

Böylece optimizasyon problemi kısaca:

9 eşitsizlik kısıtını $g_k(x)$ $k = 1 \ldots, 9$ sağlayan $x^* = (\alpha_1{}^*, \alpha_2{}^*, \alpha_3{}^*, \alpha_4{}^*)$ tasarım değişkenlerini $f(x^*) = \max f(L)$, yörünge boyunun en iyi olduğu durum için bulunması olarak belirlenir.

3.1.3. Optimizasyon algoritması

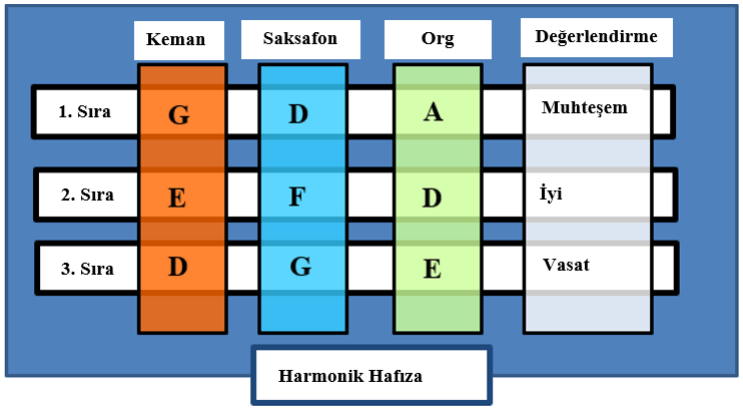
Arı algoritması sürü tabanlı bir optimizasyon aracıdır. Bir grup arının çiçeklerden nektar toplama esnasındaki nektar arama yöntemleri bu algoritmada taklit edilmiştir. Algoritmayla ilgili ayarlama yapılması gereken parametreler: izci arı sayısı (n), izci arıların ziyaret ettiği nektar kaynağı arasından seçilmiş (m) adet nektar kaynağı, seçilmiş (m) adet nektar kaynağının arasından seçilen en iyi (e) adet nektar kaynağı, en iyi (e) adet nektar kaynağı için görevlendirilen arı sayısı (nep), en iyi (e) adet nektar kaynağından geri kalan (m-e) adet kaynak için görevlendirilen arı sayısı (nsp), nektar kaynaklarını, komşularını ve arama durdurma kriterini içeren arama alanının başlangıç boyutu (ngh) (Pham ve Kalyoncu, 2009).

Arı algoritmasında öncelikle (n) adet izci arının belirlenmesi gerekir. Bu sayı amaç fonksiyonunu optimize etme esnasında belirlenen aralıkta araması yapılacak olan bağımsız parametre sayısını ifade etmektedir. Bu çalışmada bağımsız parametre olarak araması yapılacak olan değişkenler $\omega_{x1}, \omega_{x2}, \omega_{y2}, \omega_{x3}, \omega_{y3}$ ani invaryantlarıdır. Bu ani invaryantlar belirlenen aralıktan rastgele seçilerek öncelikle kısıtlar uygulanır. Kısıtları sağlamayan ani invaryantlar harmonize edilerek tekrar kısıtlar uygulanır. Böylece optimizasyonda arama işleminin hassasiyeti artırılmıştır. (n) adet izci arının ziyaret ettiği nektar kaynaklarından (e) adedi komşu arama işlemi için seçilir. (nep) adedince arı (e) adet seçilmiş nektar kaynağında (ngh) kriteri ile arama yapar. Bu çalışmada ani invaryantlar için belirlenen aralık, nektar kaynaklarının bulunduğu bir alan olarak düşünülebilir. Bu alandan rastgele seçilen (n x 5) ani invaryant amaç fonksiyonunun değerine göre sıralanır ve ilk (m x 5) adet değer seçilir. Seçilenler arasından ilk (e x 5) tanesi kendine yakın komşu değerlerin (ngh) kriterinde aranmasında kullanılır. Komşu aramasında elde edilen değerler kısıtları sağlamaması durumunda harmonize edilerek tekrar denenir. Böylece komşu arama işleminde de bir hassasiyet artırımı gerçekleşir (Acar ve ark., 2019).

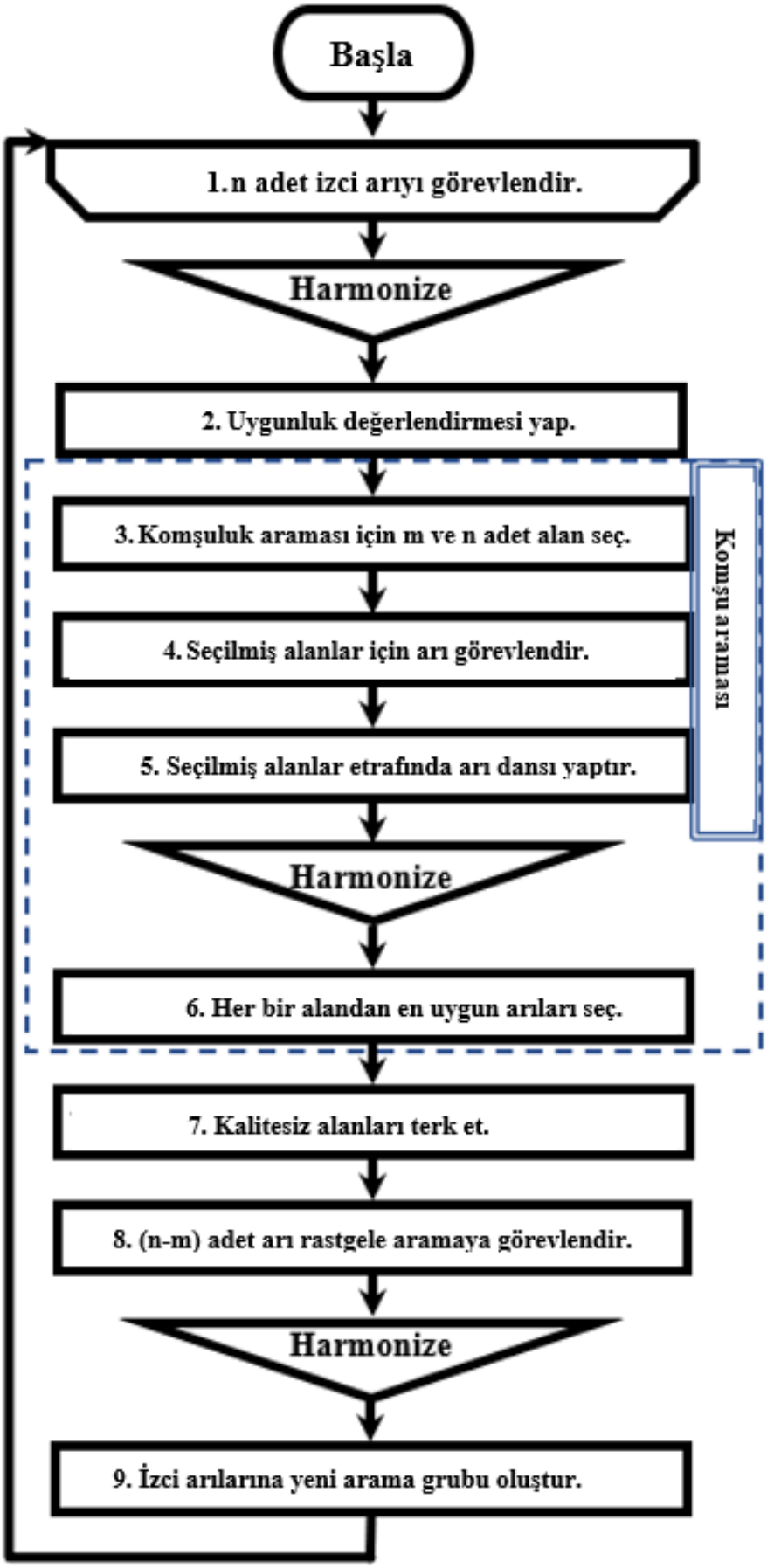
Komşu araması için seçilen (m-e x 5) adet değerin (nsp) tane komşusuna bakılır. Bu komşu değerleri de harmonize edilerek istisna bir global optimum noktan varsa telafisi yapılır. Böylece başlangıçta üretilen (n x 5) adet bağımsız parametre değerinden geriye (n-m) adet kısım kalır. Bu kısım kendi arasında harmonize edilerek arama yapılır. Harmonize işlemleri esasen harmonik arama algoritmasının çok kritik bir işlem aşamasıdır. Harmonik hafıza da denilebilen harmonize etme işlemi; ani invaryantların belirlenen aralıklarda rastgele aranması sırasında bir defada üretilen değerlerin bir matris

formatında kaydedilerek, her bir değer matris hücreleri arasında yer değiştirilerek yeni dizilimlerden elde edilen amaç fonksiyonunun ve kısıtların hızlı kontrolünü sağlar.

Bu çalışmada Şekil 3.8'de aşamaları verilen Harmonik Arı Algoritmasının harmonize aşaması Harmonik Arama Algoritmasındaki Harmonik Hafıza adımının Şekil 3.8'de verildiği gibi yerleştirilmesiyle elde edilir. Harmonik hafıza, keman, saksafon ve org üçlüsünden oluşturulan bir jaz grubundan ilham ile oluşturulmuştur. Bu grupta üç enstrüman optimal değeri aranan bir amaç fonksiyonunun 3 adet bağımsız değişken parametrelerini temsil eder. Bu enstrüman grubu Şekil 3.7'de örnek olarak gösterildiği gibi sırasıyla (C, D, A), (E, F, D) ve (D, G, E) şeklinde sesler üretirler. Üretilen bu seslerin oluşturduğu harmoni muhteşem, iyi ve vasat şeklinde değerlendirilir. Buna benzer şekilde optimizasyon problemlerinin çözümünde ise her bir bağımsız değişken parametre için belirlenen aralıkta rastgele değerler üretilir. Üretilen bu değerlerden elde edilen amaç fonksiyonunun büyüklük ya da küçüklük değerine göre sıralanır. Yapılan bu işlem her bir hücredeki değerlerin birbiri ile yerleri değiştirilerek amaç fonksiyonu tekrar büyüklük ya da küçüklük değerine göre sıralanır. Böylece bir defada rastgele üretilen parametre değerlerinin tüm kombinasyonları değerlendirildikten sonra en iyi değerler elde edilir.



Şekil 3.7. Harmonik hafıza çalışma prensibi (Acar ve ark., 2019).



Şekil 3.8. Harmonik Arı Algoritması prosedürü (Acar ve ark., 2019).

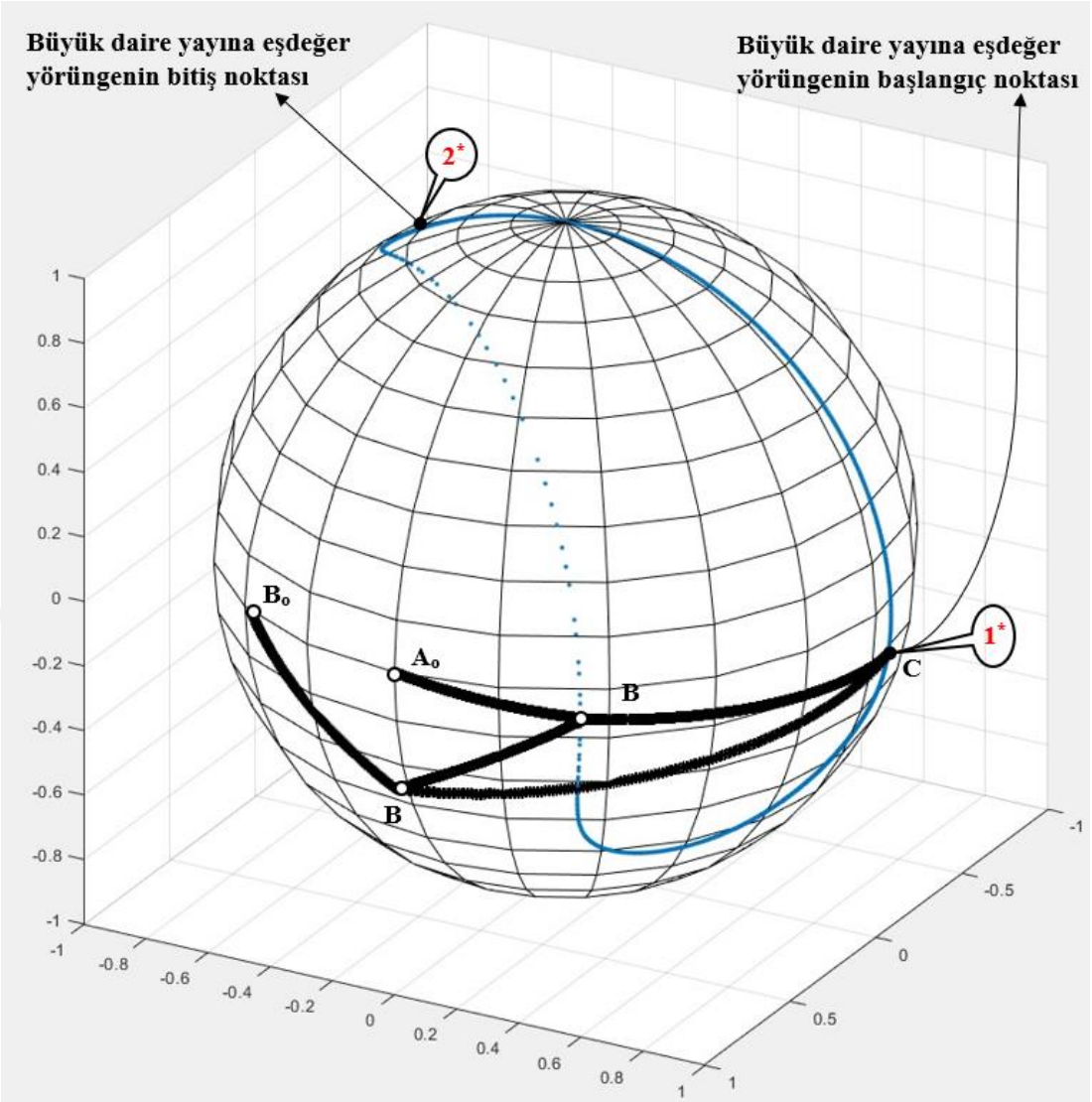
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Optimizasyon problemi çözümünde Harmonik arı algoritması kullanılmıştır. Bunun sebebi Arı algoritmasının komşu arama özelliği ve 10^{-3} hassasiyet sağlamasıdır. Bu hassasiyet ani invaryantların seçiminde çok kritik bir öneme sahiptir. HAA arama parametreleri literatürden arı algoritmasına bağlı olarak belirlenmiştir. Intel® Core™ i7-4720HQ CPU@2.6 GHz ve 16,0GB RAM, 64-bit Windows10 teknik özelliklerine sahip bir bilgisayar kullanılarak 6 saniyelik bir sürede çözüm gerçekleştirilmiştir. HAA çözümleri mekanizma türüne göre sınıflandırmıştır. Her bir sınıfın en iyi çözümleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Optimal çözümler.

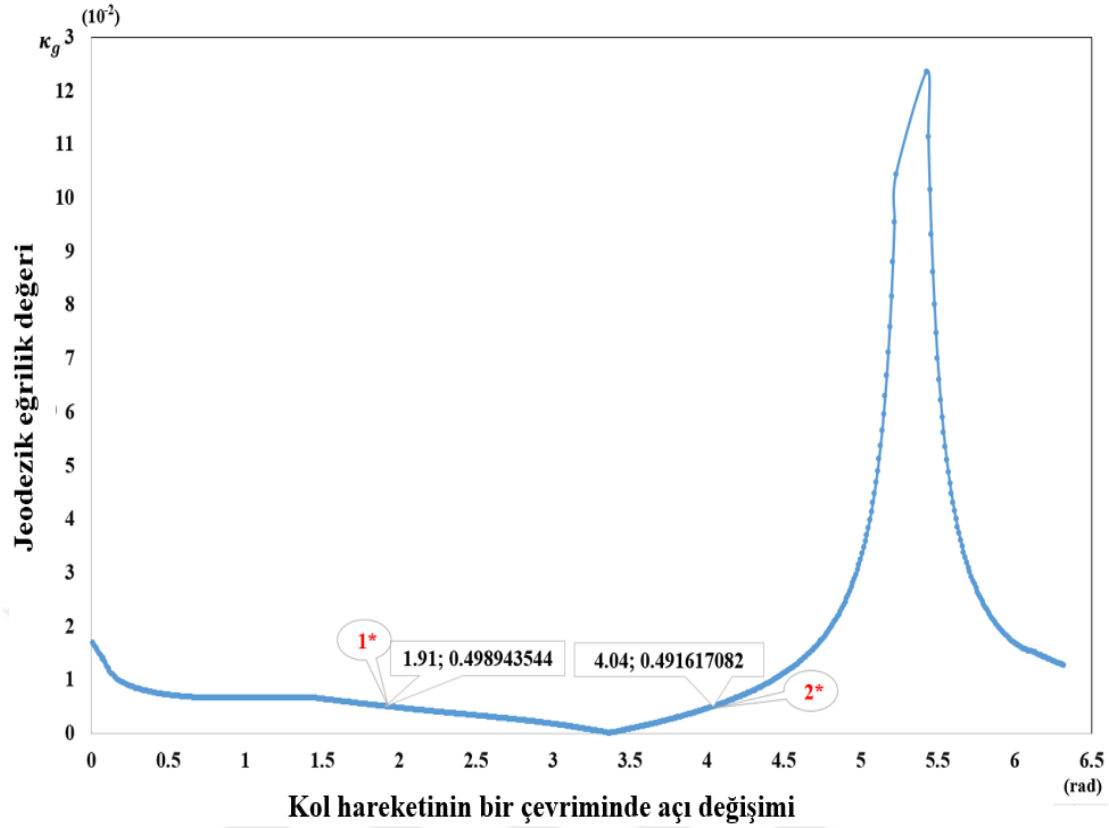
Çözümler	α_1	α_2	α_3	α_4	$Büyük\ daire\ yay\ uzunluğu(L)$
1. çözüm	$33{,}8^o$	$32{,}44^o$	$38{,}45^o$	$38{,}43^o$	$123{,}82^o$
2. çözüm	$9{,}09^o$	$18{,}43^o$	$48{,}94^o$	$27{,}26^o$	$119{,}8^o$
3. çözüm	$47{,}95^o$	$30{,}66^o$	$29{,}43^o$	$46{,}04^o$	$114{,}56^o$

Küresel mekanizmaların en önemli avantajlarından biri mekanizma uzuv boyutları değişmeksizin küresel hareket düzleminin yarı çapının değiştirilmesi ile çeşitli boyutlarda tasarlanabilmesidir. Tablo 1'de küresel mekanizmanın biyel uzvunun yörünge uzunluğuna göre çözümler sıralanmış olmasına rağmen bu sıralama uygun mekanizma tasarımının seçimine yeterli değildir. Çünkü küresel hareket düzleminin etrafında simetrik yerleştirilmiş üç adet aynı tasarım çözümleri bulunacaktır. Simetrik yerleştirilmiş üç adet tasarım çözümleri hareket esnasında birbiri ile çarpışmamalıdır. Bu nedenle bir tutucu parmağını oluşturan küresel dört çubuk mekanizması küresel düzlemin 3'te biri kadarlık bir kısmında hareket sağlamalıdır. Bununla beraber Tablo 1'de verilen çözümler içerisinde yörünge eğrilik değerleri en küçük olan çözüm diğerlerinden daha uygundur. Tablo 1'de verilen çözümlerin şematik gösterimlerinde küresel düzlem 20 boylama ayrılarak gösterilirse her bir parmak mekanizmasının hareketi 6,7 boylam ile kısıtlıdır. Bu ölçüyü aşan çözümler tutucu tasarımına uygun değildir. Tablo 1'de verilen 1. çözüm değerlerinin şematik gösterimi ve yörünge eğriliği sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



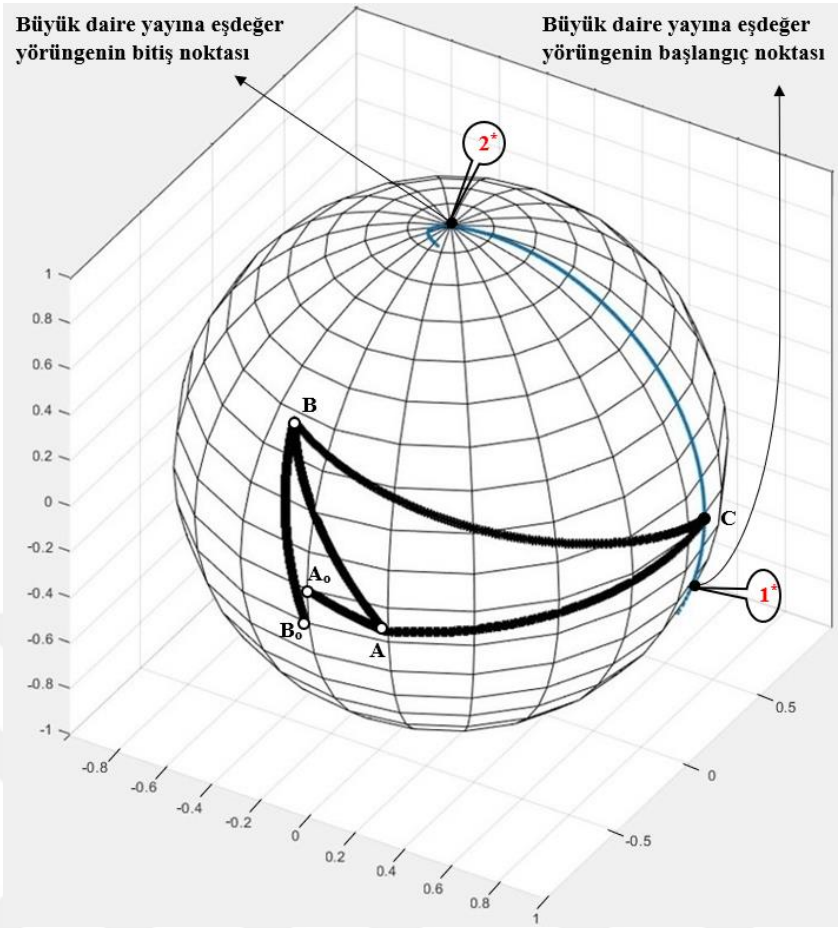
Şekil 4.1 Tablo 1'de 1. tasarım çözümlerinin oluşturduğu küresel kol-sarkaç mekanizması ve yörüngesi.

Tablo 1'de ilk çözüm Şekil 4.1'de şematik olarak gösterildiği gibi bir kol-sarkaç mekanizmasıdır. Bu mekanizmanın hareket uzayı tutucu parmağı oluşturma kısıtı (6,7)'nı aşarak 7 boylamsal parçadan daha çok yer kaplamaktadır. Bu mekanizmanın yörüngesi eğrilik kısıtlarını sağlamasına ve en uzun yörünge olmasına rağmen üç parmaklı tutucu tasarımı için kullanılamaz. Bu mekanizmanın ideal yörüngesi 1 ile gösterilen konumdan başlayıp 2 ile gösterilen konuma kadar devam etmektedir. Böyle bir yörüngenin kutup noktalarını aşan kısmı kullanıma elverişli değildir. Çünkü üç parmaklı bir tutucunun her parmağı için bu mekanizma kullanıldığında parmaklar kutuplarda çakışacak ve kutupları aşmaya engel olacaktır. Şekil 4.2'de jeodezik eğrilik grafiğine bakıldığında 0,005'ten küçük değer aralığı görülebilir.

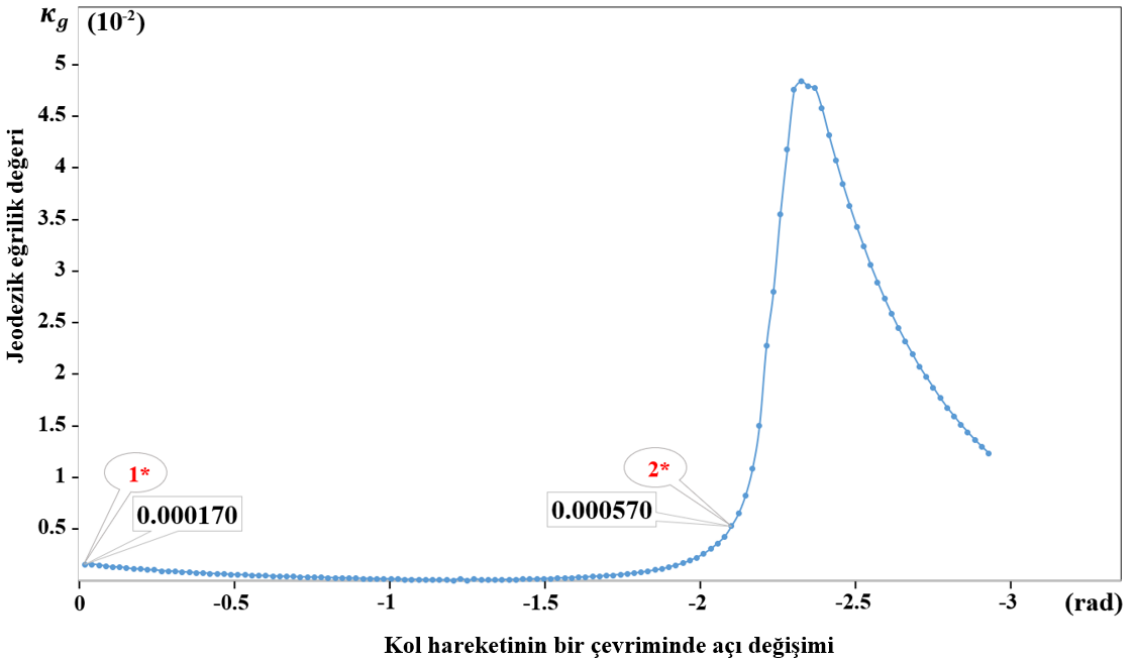


Şekil 4.2 Tablo 1'de 1. çözüm mekanizmanın bir çevriminde biyel noktası yörünge eğriliği.

Tablo 1'de ikinci çözüm, şematik olarak Şekil 4.3'te verilen küresel çift kol mekanizması oluşturmaktadır. Bu çözümün yörünge uzunluğu robotik tutucu parmağı için yeterli ölçüdedir. Bu çözümün diğerlerine göre avantajı, Şekil 4.4'te verilen eğriliğinin en küçük olmasıdır. Şekil 4.3'te görüleceği gibi 2. çözüm olan çift kol mekanizması küresel düzlemin boylamsal 5,5 parçasının içerisinde hareketini gerçekleştirebilmektedir. Hareket, başlangıç noktası 1 ekvatoral düzlemin biraz altından küresel kutup noktası 2'ye kadar büyük daire yayına benzer bir yörüngede gerçekleşmektedir. Şekil 4.4'te eğrilik değeri yüksek olan kısımlar yörüngenin küresel kutuplardaki dönme hareketinden kaynaklanmaktadır. Bu kısımlar tutucu parmağının işlevinde hiçbir öneme sahip olmayan küresel düzlemin kutup noktası sonrası kısımlardır. Bu çözüm tutucu parmakları arası çarpışmalara neden olmayan ve yörünge eğriliği nedeniyle büyük daire yayına en yakın yörünge olan optimal çözümdür. Bu tasarımın Tablo 1'de verilen boyutların haricindeki önemli boyutları BC ve AC sırasıyla 100,27º ve 74,3º'dir.

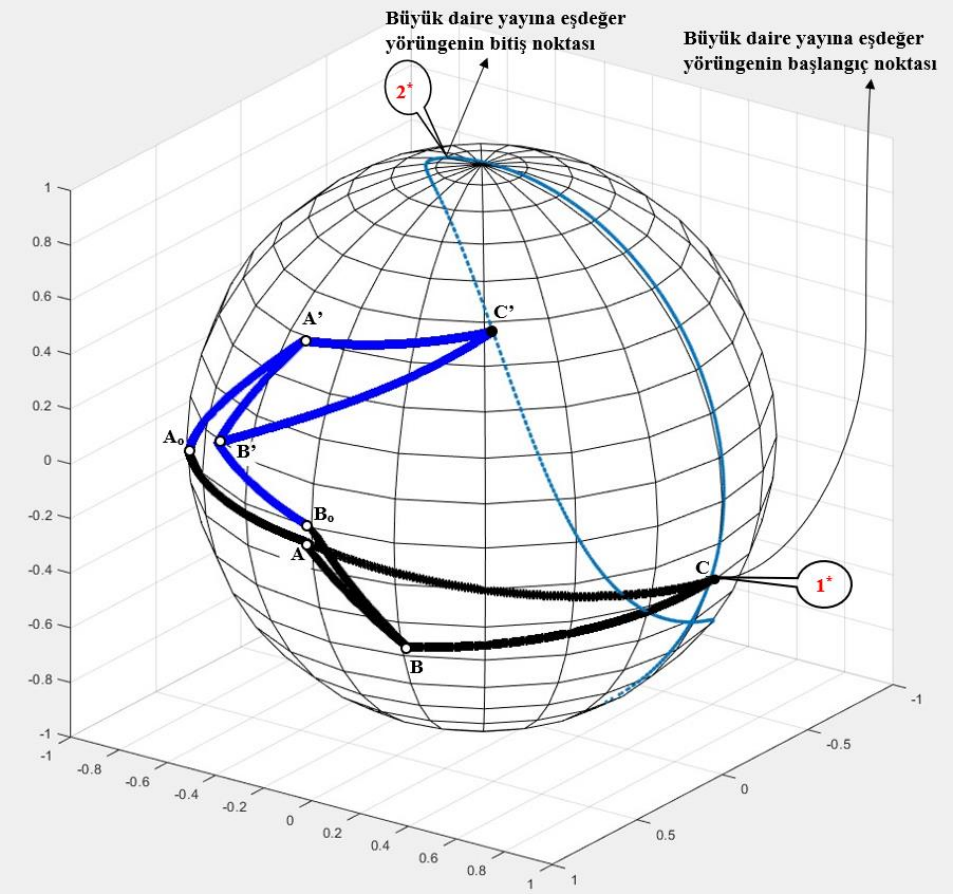


Şekil 4.3 Tablo 1'de ikinci çözüm olarak verilen küresel çift kol mekanizması.

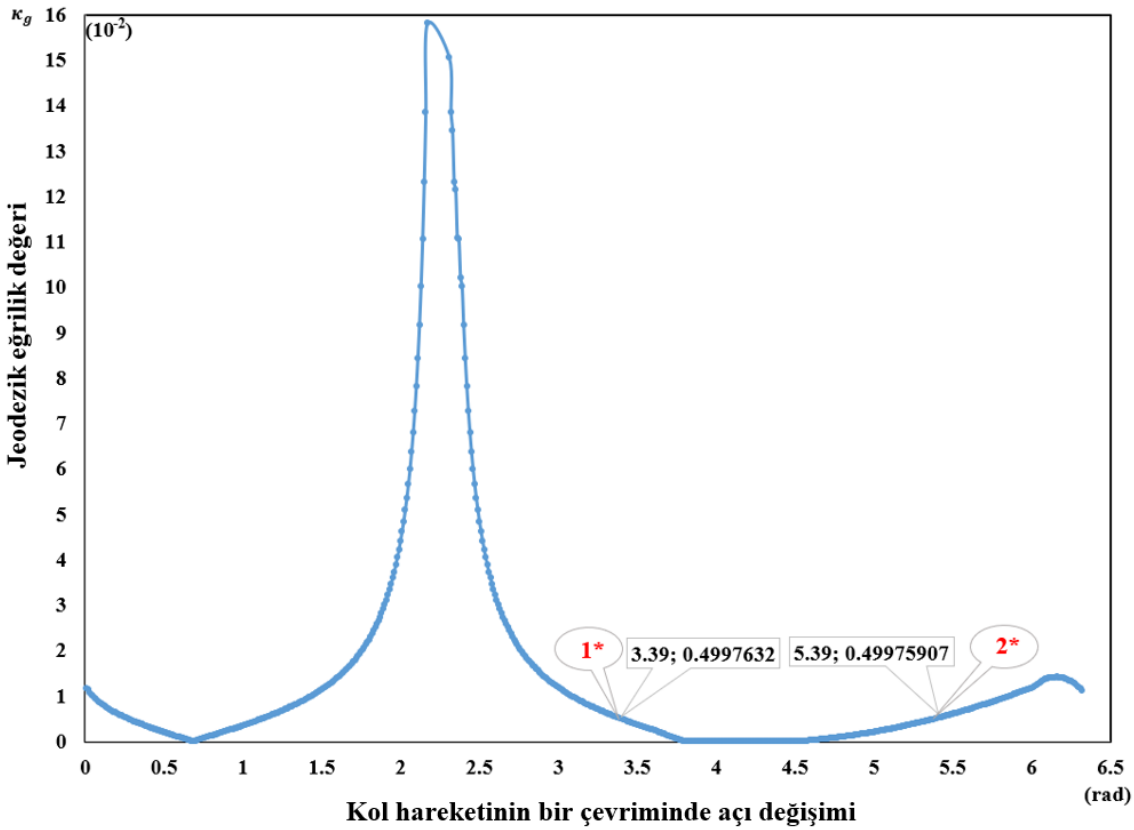


Şekil 4.4 Tablo 1'de 2. çözüm mekanizmanın bir çevriminde biyel noktası yörünge.

Tablo 1'de üçüncü çözümde elde edilen sonuçlar ile küresel çift kol mekanizması tasarlanmaktadır. Mekanizmanın büyük daire yayına yakın özellikteki yörüngesi 1 noktasında başlayıp 2 noktasında son bulmaktadır. Bu çözüm kullanılarak tasarlanan mekanizmanın biyel noktası ile izlenen yörüngenin büyük daire yayına eşdeğer kısmının uzunluğu Tablo 1'de sunulan üç çözüm arasında en düşük olanıdır. Dahası, mekanizmanın çalışma alanı, Şekil 4.5'te gösterildiği gibi çalışma alanı sınırlaması (6,7 boylamsal küre parçası)'nın üzerinde olup 8 boylamsal küre parçasıdır. Bu nedenle bu çözüm ile tasarlanan bir tutucuda küresel düzlem etrafına simetrik olarak yerleştirilen küresel mekanizmalar çalışma esnasında birbiri ile çarpışarak hatalara neden olurlar. Sonuç olarak, üçüncü çözüm, Şekil 4.6'da verilen eğrilik değerleri ile eğrilik sınırlamasını ve Tablo 1'de verilen yörünge uzunluğu ile yörünge sınırlamasına uygun özelliklere sahip olmasına rağmen çalışma uzayı şartlarını sağlamadığından robotik tutucu parmağı için küresel bir mekanizmanın tüm gereksinimlerini karşılayamaz.



Şekil 4.5 Tablo 1'de 3. Çözüm tasarımının oluşturduğu şematik mekanizma ve yörüngesi.



Şekil 4.6 Tablo 1'de 3. çözümden elde edilen mekanizmanın yörünge eğrilik değerleri.

Optimizasyon sonucu elde edilen çözümler, imalat toleransı belirlenmesi için hassasiyet analizi yapılması gerekir. Dolayısıyla biyel noktası C'nin yörünge üzerindeki koordinatı uzuv boyutlarına ve Şekil 4.7'de gösterilen parametrelere bağlı olarak (Pavlović, 2007)'deki çalışmaya benzer şekilde elde edilmiştir. Şekil 4.7'de mekanizma uzuvları büyük daire yayı şeklinde sabit uzuv $A_o - B_o$ noktaları arasında ekvatoral düzlemde, krank uzvu $A - A_o$ noktaları arasında, biyel uzvu $A - B$ noktaları arasında ve tahrik edilen uzuv $B - B_o$ noktaları arasında gösterilmiştir. Bu şekilde mekanizma parametrik olarak açıklanmak istendiğinden C biyel noktasının küresel eğri şeklinde bir yörüngeyi takip etmektedir. Biyel noktasından sabit mafsala $C - A_o$ ve biyel uzvu ile tahrik uzvu bağlantı mafsalından sabit mafsala $B - A_o$ çizilen kesikli kırmızı büyük daire yayı küresel üçgen oluşturmak için oluşturulan yardımcı birer eğridir. Şekil 4.7'de A, B, C, A_o, B_o noktalarının özelliklerinden bahsedilmiştir. a_1, a_2, a_3, a_4 açısal parametreleri A_oB_o, AA_o, AB, BB_o büyük daire yaylarını görmektedir ve sırasıyla sabit uzuv, krank uzvu, biyel uzvu ve tahrik edilen uzuvun boyutlarını ifade eder. θ_2 krank açısı ve θ_4 çıkış uzvu açısı birer düzlemsel açıdır ve ekvatoral düzlemden saat yönü tersine doğru ölçülür.

ζ, η, μ, γ açıları ise küresel açılardır. Bu açılar Denklem (28-32)'de verildiği gibi küresel üçgen trigonometrisi kullanılarak hesaplanır.

$$\widehat{BA}_o = cos^{-1}[\cos\alpha_1\cos\alpha_4 + \sin\alpha_1\sin\alpha_4\cos(\pi - \theta_4)] \quad (28)$$

$$\gamma = cos^{-1}\left[\frac{\cos\widehat{BA}_o - \cos\alpha_3\cos\alpha_2}{\sin\alpha_3\sin\alpha_2}\right] \quad (29)$$

$$\widehat{CA}_o = cos^{-1}[\cos\widehat{AC}\cos\alpha_2 + \sin\widehat{AC}\sin\alpha_2\cos(\gamma + \mu)] \quad (30)$$

$$\zeta = cos^{-1}\left[\frac{\cos\widehat{AC} - \cos\alpha_2\cos\widehat{CA_o}}{\sin\alpha_2\sin\widehat{CA_o}}\right] \quad (31)$$

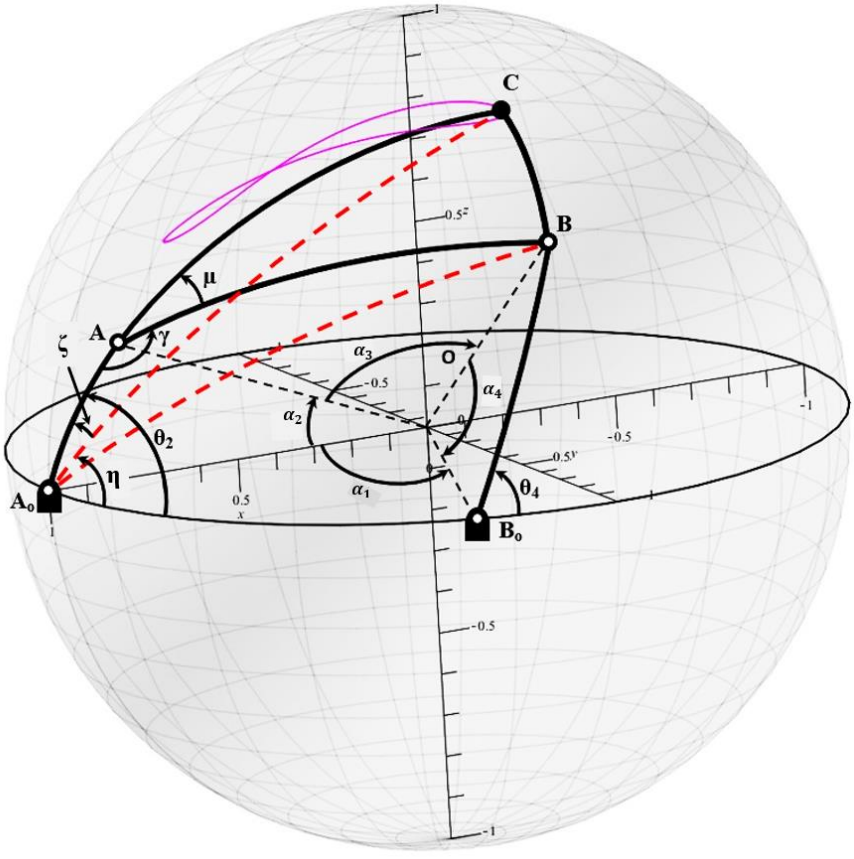
$$\eta = (\theta_2 - \zeta) \quad (32)$$

Bu denklemlerde μ parametresi küresel geometri kosinüs teoremi kullanılarak hesaplandı. Bu hesaplamada Tablo 4.1'de ikinci çözüm için verilen α_3, CA ve CB boyutları kullanıldı. Buradan elde edilen değerler C biyel noktasının koordinatları hesaplanması için Denklem (33-35)'te kullanıldı.

$$X_C = cos\widehat{CA}_o \quad (33)$$

$$Y_C = \sin\widehat{CA}_o\, cos\,\eta \quad (34)$$

$$Z_C = \sin\widehat{CA}_o\, sin\,\eta \quad (35)$$



Şekil 4.7 Küresel dört-çubuk mekanizmasının parametrik gösterimi.

Uzuv boyutlarındaki tolerans nominal değerden sapma miktarıdır : $\alpha_{i\,gerç} = \alpha_{i\ nom} + \Delta\alpha_i$ ve biyel noktasının koordinatını etkiler (Pavlović, 2007):

$$X_{C\ act} = X_{C\ nom} + \Delta X_C = X_C{}^*\ (\alpha_i\ + \Delta a_i) \quad (36)$$

$$Y_{C\ act} = Y_{C\ nom} + \Delta Y_C = Y_C{}^*\ (\alpha_i\ + \Delta a_i) \quad (37)$$

$$Z_{C\ act} = Z_{C\ nom} + \Delta Z_C = Z_C{}^*\ (\alpha_i\ + \Delta a_i) \quad (38)$$

Tolerans nominal değerden çok küçükse $t_i \ll \alpha_i$, küresel mekanizmanın konum değişim denkleminin türevi (Pavlović, 2007)'deki işleme benzer şekilde;

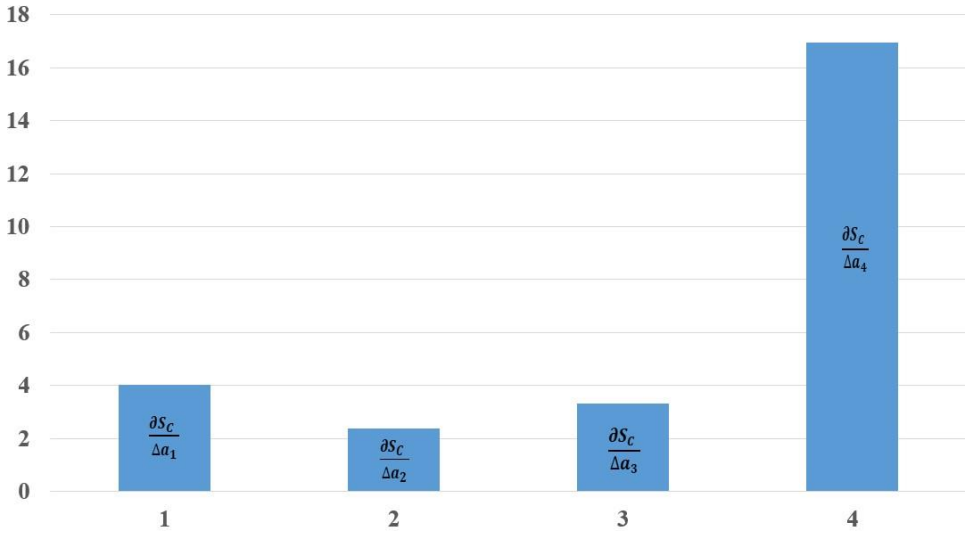
$$\Delta X_{C\,act} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial X_{C\ nom}}{\Delta\alpha_i} sm\Delta\alpha_{i\ act} \quad (39)$$

$$\Delta Y_{C\,act} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial Y_{C\ nom}}{\Delta\alpha_i} \Delta\alpha_{i\ act} \quad (40)$$

$$\Delta Z_{C\,act} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial Z_{C\ nom}}{\Delta\alpha_i} \Delta\alpha_{i\ act} \quad (41)$$

Yazılır. $\frac{\partial X_{C\ nom}}{\Delta a_i}, \frac{\partial Y_{C\ nom}}{\Delta a_i}, \frac{\partial Z_{C\ nom}}{\Delta a_i}$ hassasiyet katsayıları ve çıkışın i'inci parametreye göre kısmi türevidir.

Bu kısmi türev X_C, Y_C, Z_C koordinatlarındaki değişime bağlı ve Denklem (39-41)'de α_i 'de meydana gelen değişimden kaynaklanır. Bu sebeple kısmi türev çıkış uzvundaki küçük sapmaları ifade eder ve ilgili parametreye olan hassasiyetin bir ölçüsüdür. Küresel mekanizmanın hassasiyeti için de optimizasyon sonucu seçilen parametreler bu yöntemde kullanılarak hesaplama yapılmış ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Hassasiyet analizinde elde edilen etki faktörüne bağlı Genel ISO geometrik Tolerans 2768'den imalat toleransları seçilmiştir Tablo 2'de verilmiştir.



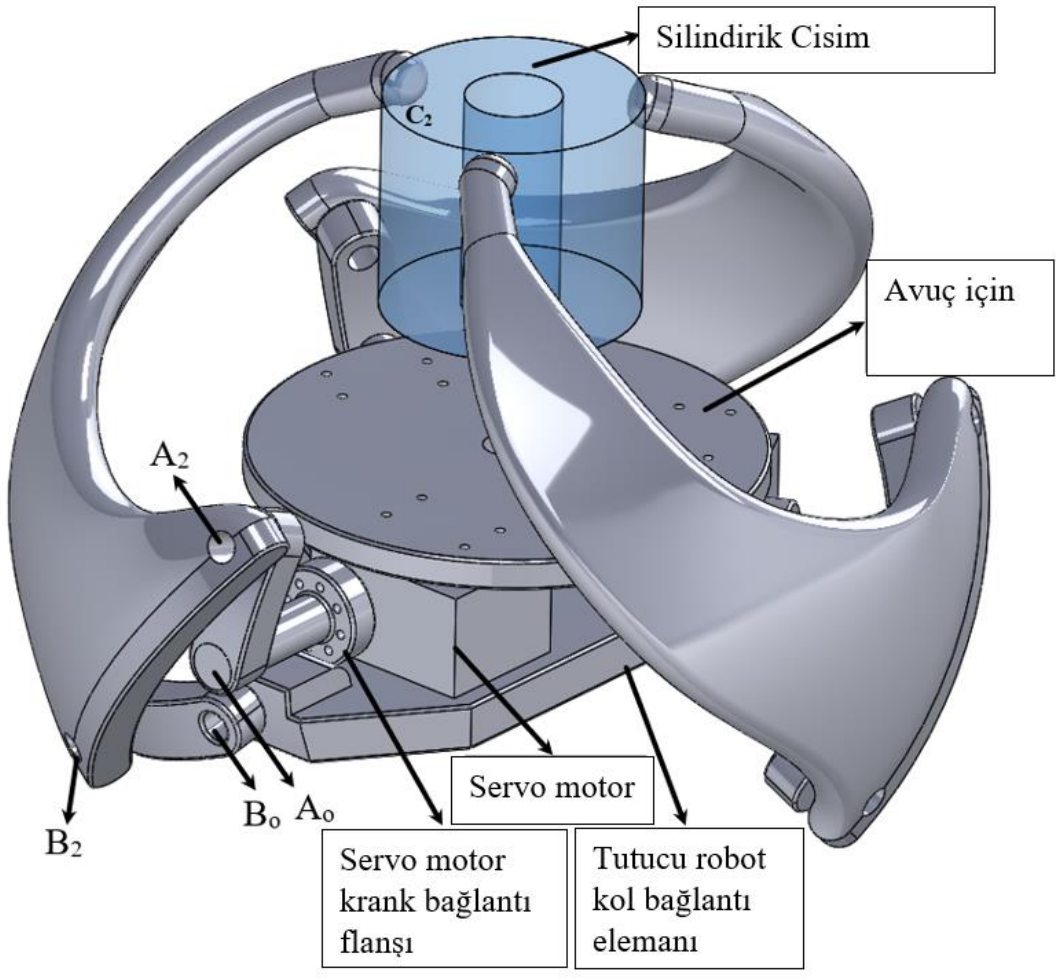
Şekil 4.8 Küresel dört-çubuk mekanizması tasarımının parametrelerinin hassasiyeti.

Tablo 4.2

Tutucu mekanizması tasarım değişkenleri için imalat toleransları.

Uzuv Boyutları	$\boldsymbol{\alpha_1}$	$\boldsymbol{\alpha_2}$	$\boldsymbol{\alpha_3}$	$\boldsymbol{\alpha_4}$
Tolerans	$\pm 1^o$	$\pm 0^o 30'$	$\pm 0^o 30'$	$\pm 0^o 30'$

Optimal küresel mekanizmaya sahip tutucunun CAD modeli Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Tasarımın imalatı Tablo 2'de verilen toleranslar altında yapılmıştır. Mekanizmanın biyel noktasının bir parmak ucu formunda olmasına özen gösterilmiştir. Aksi halde şematik şekillerde olduğu gibi küresel üçgene benzer bir biyel uzvu imalatı, cisimlerin tutulması esnasında çeşitli problemler oluşturmaktadır. Bu problemler CAD programlarında tasarım esnasında gözlemlenmiştir. Örnek olarak köşeli bir cismin tutulması esnasında, küresel üçgenin kenarları, köşeler dokunmadan yüzeylere biyel noktasının temasına engel olmaktadır.



Şekil 4.9 Küresel mekanizma kullanılarak tasarlanan tutucunun katı modeli ve tutma işlemi incelemesi.

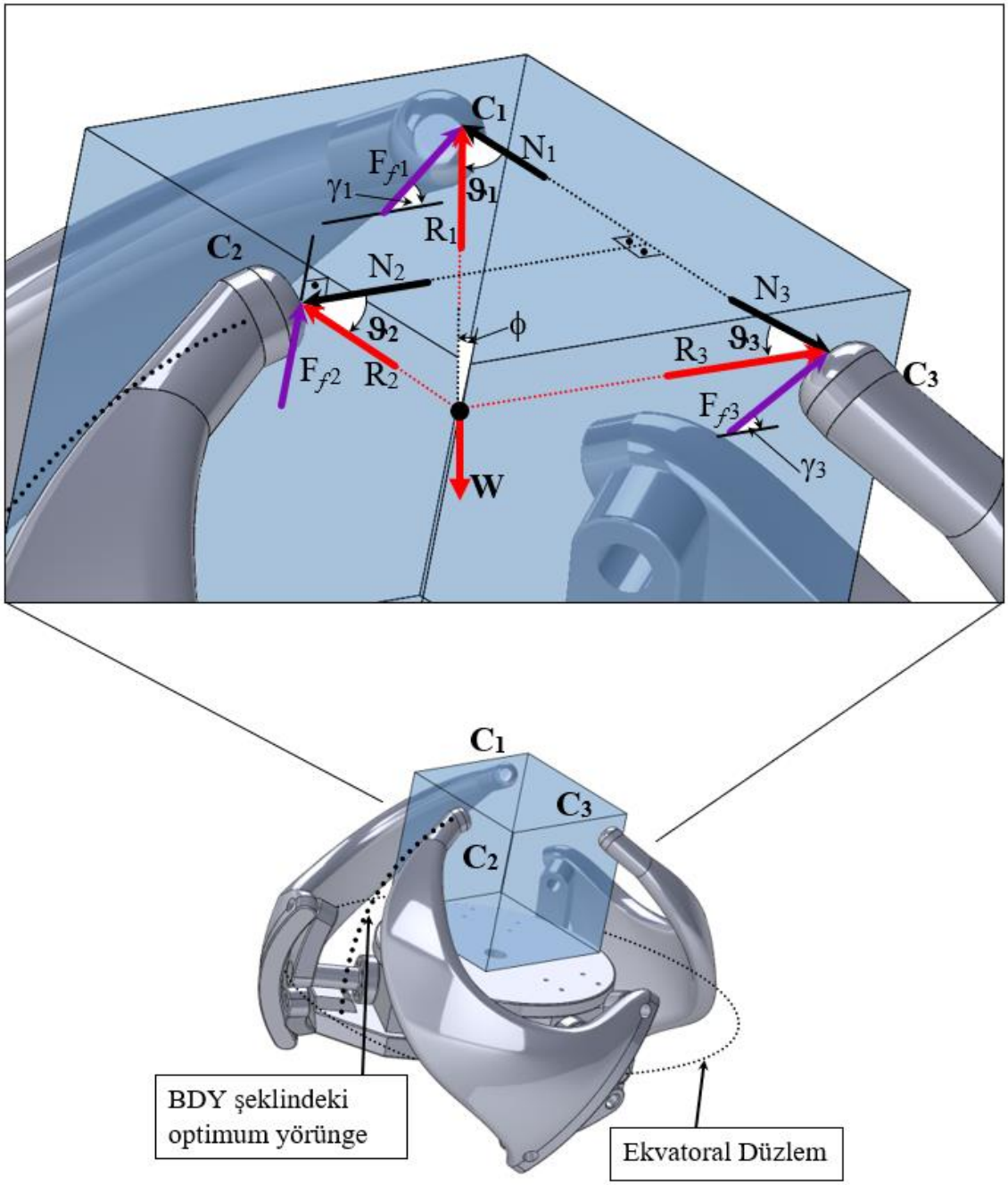
Şekil 4.9'da katı modeli gösterilen tutucu 50 mikron hassasiyette 3 boyutlu yazıcı teknolojisi ile ABS malzeme kullanılarak imal edilmiştir. Montajı yapılmış tutucu Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Şekil 4.10(a,b)'de gösterilen tutucuda avuç içi olarak adlandırılan eleman bulunmamaktadır. Burada siyah renkteki elemanlar 10Nm torka sahip Dynamixel XM540-W270-R model servo motorlardır. 120 mm iç ve 134.5 mm dış yarıçapta krank ve tahrik edilen uzuv tasarımlarından üçer adet imalat yapılmıştır. Biyel uzvu ise 134.5 mm iç ve 140 mm dış yarıçapta 3 adet imal edilmiştir. İmalatta esas alınan uzuv boyutları Tablo 1'de ve toleranslar Tablo 2'de verilmiştir. İmalatı yapılan prototip ile Şekil 4.9(c,d)'de görüldüğü gibi bir ön tutma işlemi yapılmıştır.



Şekil 4.10 İmalatı yapılan tutucu; a) izometrik görünümü, b) üst görünümü, c) Küresel bir nesne tutan tutucunun üst görünümü, d) Küresel bir nesne tutan tutucunun izometrik görünümü.

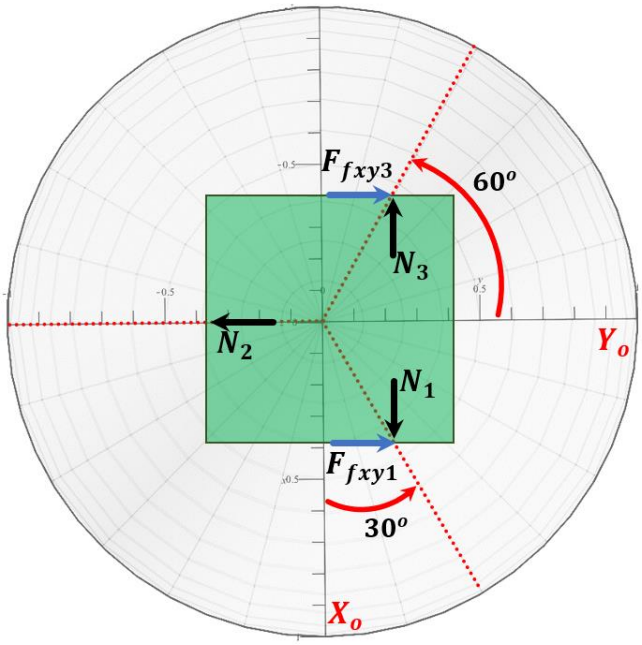
4.1. Tutma Kabiliyetinin İncelenmesi

Optimal çözüm olarak elde edilen mekanizma boyutlarında tasarlanan Şekil 4.9'deki tutucu katı modeli çizim programlarında oluşturulan çeşitli geometrik şekillerin tutulmasını analiz etmek için kullanıldı. Bu sayede serbest cisim diyagramları ve denge denklemleri çıkarıldı.



Şekil 4.11 Dikdörtgen prizması şekline sahip cisimlerin tutulma esnasındaki serbest cisim diyagramı.

Şekil 4.11'da kübik bir cismin tutulması esnasında oluşan kuvvetler gösterilmiştir. Bu serbest cisim diyagramının koordinat sistemi üç boyutludur. Orijini küresel mekanizmanın hareket düzlemi olan küresel düzlemin merkezindedir. Şekil 4.12'de kübik cismin tutulması esnasında ortaya çıkan kuvvetlerin üst görünümü küresel düzleme yerleştirilen bir dik koordinat sisteminde verilmiştir. Kübik cismin üzerinde oluşan kuvvetler XY eksenlerinde denge denklemleri kurularak incelenebilir. Bu denge denklemleri sayesinde cismin XY düzleminde öteleme ya da Z ekseni etrafında dönme hareketinin durumu incelenir. Denge denklemlerinin sıfıra eşit olması cismin statik tutulabildiğini gösterir.



Şekil 4.12 Dikdörtgen prizması şekline sahip cisimlerin tutulma esnasındaki statik analizin üst görünüm.

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'e göre kuvvet denge denklemleri:

$$\sum F_{X_o} = 0, \quad N_1 - N_3 = 0 \tag{42}$$

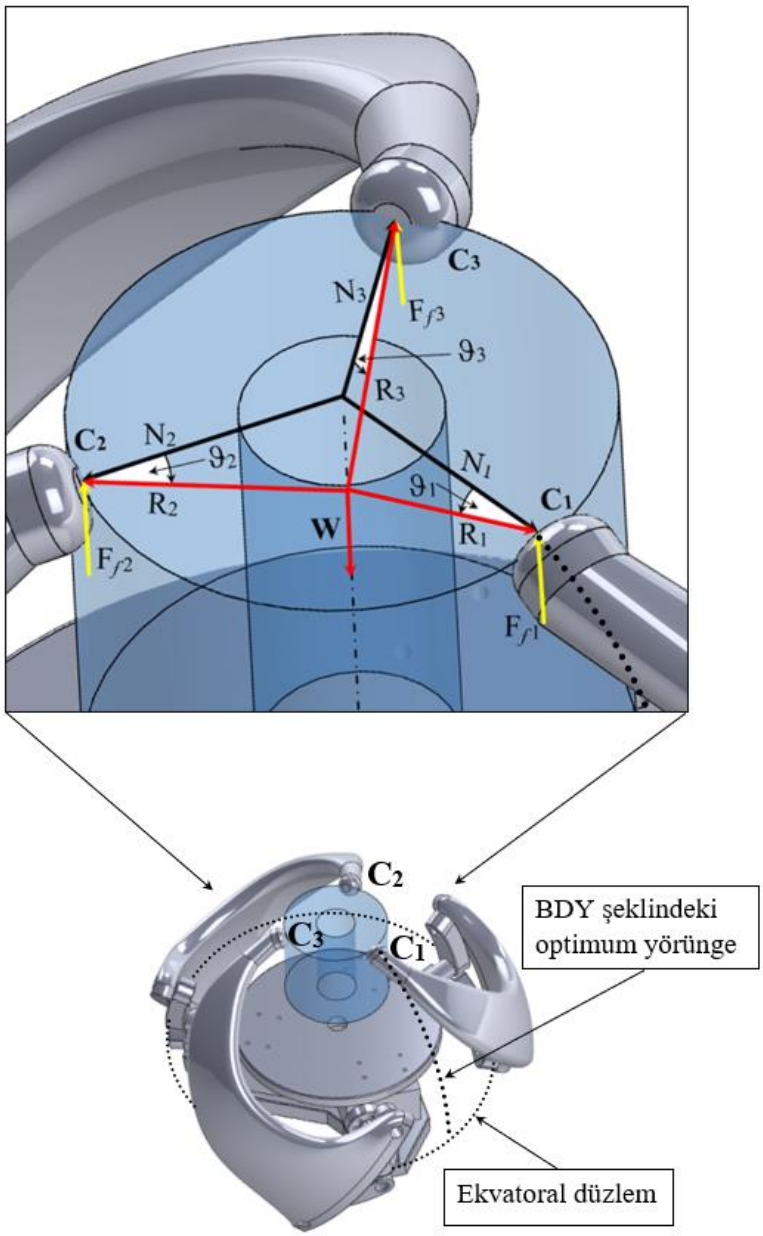
$$\sum F_{Y_o} = 0, \quad F_{fxy1} + F_{fxy3} - N_2 = 0 \tag{43}$$

$$\sum F_{Z_o} = 0, F_{f1z}\cos\phi + F_{f2z}\cos\phi + F_{f3z}\cos\phi - W = 0 \tag{44}$$

Burada, $F_{f1z} = F_{f1}\sin\gamma_1$, $F_{f3z} = F_{f3}\sin\gamma_3$, $F_{fxy1} = F_{f1}\cos\gamma_1$, $F_{fxy3} = F_{f3}\cos\gamma_3$
Eğer tutulan cisim avuç içine temas ediyorsa Denklem (44):

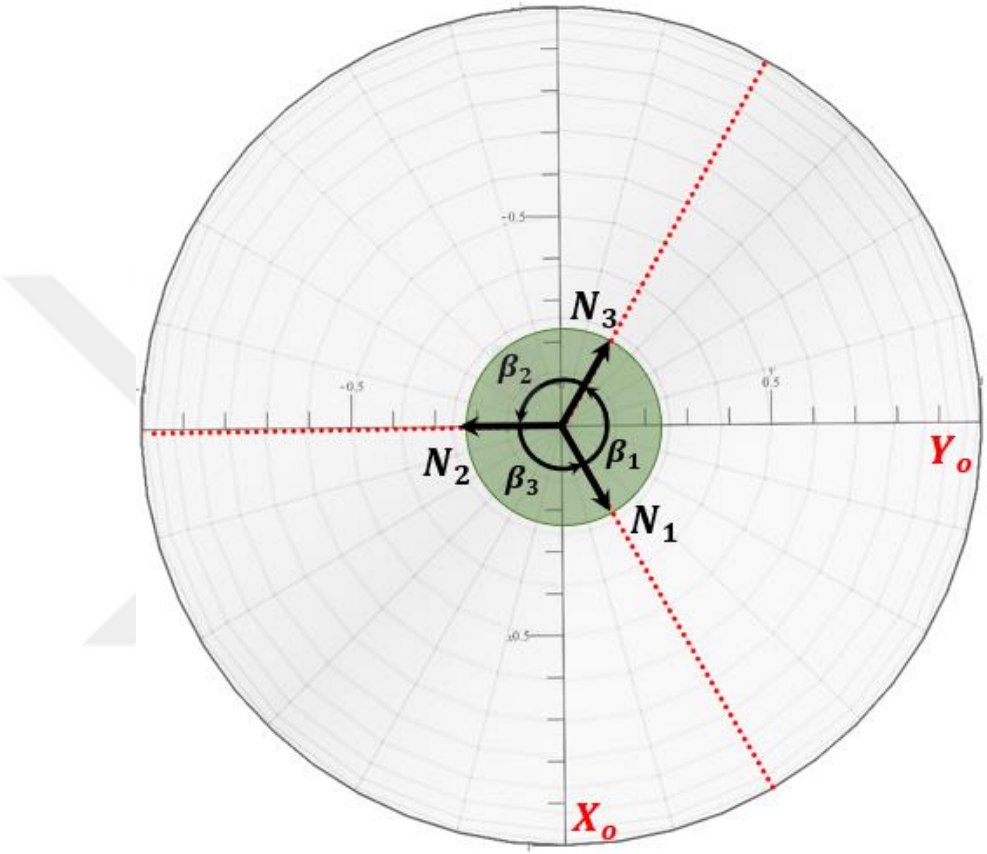
$$\sum F_{Z_o} = 0, F_{f1z}\cos\phi + F_{f2z}\cos\phi + F_{f3z}\cos\phi + N_{Palm} - W = 0 \tag{45}$$

olarak düzenlenir. Buradaki denklemler sadece kare prizması ya da dikdörtgen prizması şekline sahip cisimler için uygundur. N_1, N_2, N_3 cismin tepki kuvvetleri olmak üzere F_{f1z}, F_{f2z}, F_{f3z} cisim ile parmak ucu arasında düşey doğrultuda oluşan sürtünme kuvvetidir. F_{fxy1}, F_{fxy3} parmak ucu temas yüzeylerindeki sürtünme kuvvetlerinin XY düzlemine izdüşümü bileşenleridir. Dikkat edilirse bu bileşenler sadece F_{f1}, F_{f3} sürtünme kuvvetlerinde bulunmaktadır. Parmaklardan bir tanesi Şekil 4.12'de gösterildiği gibi prizmatik yüzeylerden birine dik olacağından burada sadece düşey doğrultuda sürtünme kuvveti $F_{f2} = F_{f2z}$ oluşacaktır.



Şekil 4.13 Silindirik şekle sahip cismin tutulması esnasında statik analizi.

Silindirik şekle sahip cisimler için tutma işlemi serbest cisim diyagramı Şekil 4.13'te verilmiştir. Burada koordinat sisteminin orijini küresel mekanizmanın hareket düzlemi olan küresel düzlemin merkezindedir. Şekil 4.14'te bu tutma işlemi küresel düzlemin XY eksenleri ile üst görünümü verilmiştir. Tutucu parmak ucu yörüngesi noktalı çizgiler ile belirtilmiştir. β_1, β_2, β_3 açıları tutucu parmaklarının simetri olmasından dolayı 120^o'dir.



Şekil 4.14 Silindirik şekle sahip cismin tutulması esnasında statik analizi üst görünümü.

$$\sum F_{X_o} = 0, N_1 \cos 30 - N_3 \cos 30 = 0 \quad (46)$$

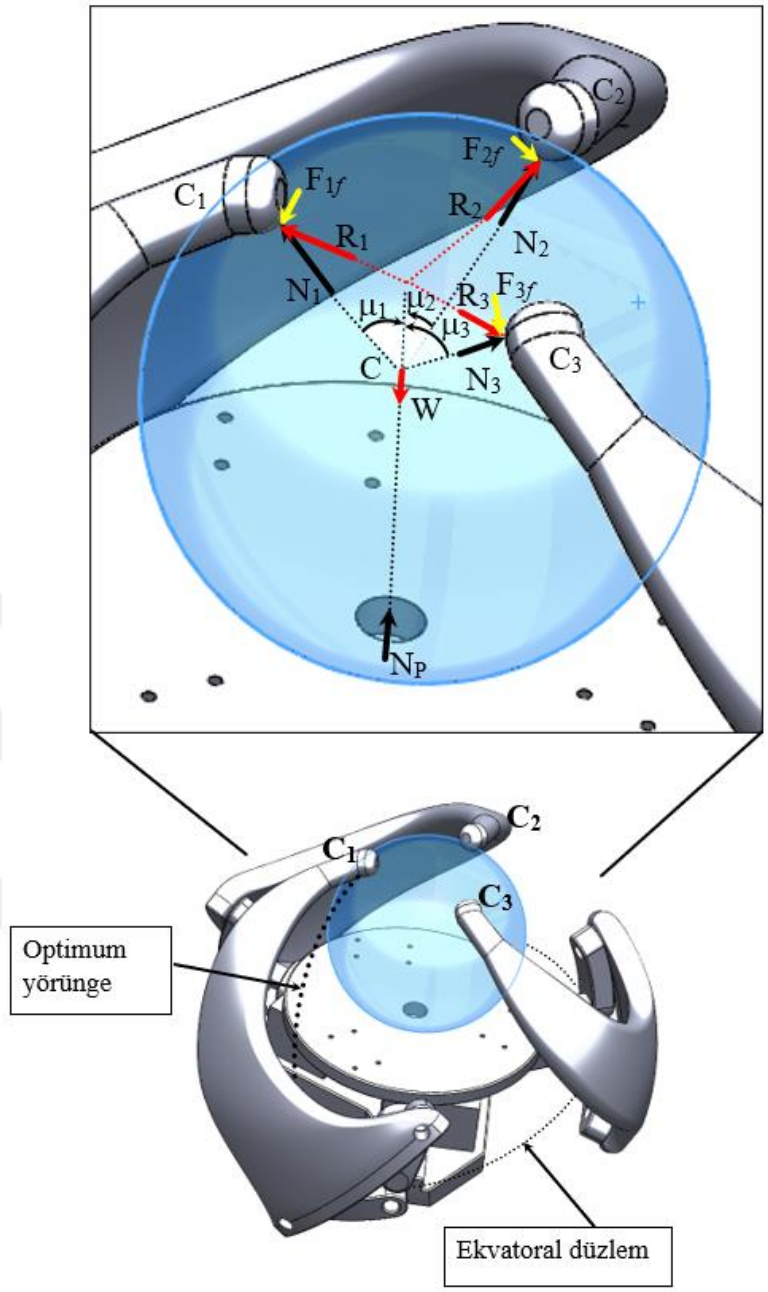
$$\sum F_{Y_o} = 0, \quad N_1 \cos 60 + N_3 \cos 60 - N_2 = 0 \quad (47)$$

$$\sum F_{Z_o} = 0, F_{f1} \cos \phi + F_{f2} \cos \phi + F_{f3} \cos \phi - W = 0 \quad (48)$$

Eğer tutulan cisim avuç içine temas ediyorsa Denklem (48):

$$\sum F_{Z_o} = 0, F_{f1} \cos \phi + F_{f2} \cos \phi + F_{f3} \cos \phi + N_{Avuçiçi} - W = 0 \quad (49)$$

şeklinde düzenlenir.



Şekil 4.15 Küresel geometriye sahip bir cismin tutulması esnasında statik analiz.

Küresel geometriye sahip cisimlerin tutulması esnasında Şekil 4.15'te gösterilen serbest cisim diyagramı oluşturulabilir. Burada cismin tepki kuvvetleri tutulacak cismin küresel yüzeyine dik doğrultuda yani küresel cismin merkezinden geçecek şekilde gerçekleşir. Sürtünme kuvvetleri cismin küresel yüzeyine teğet durumda parmak hareketine zıt yönde oluşur. Küresel cisimlerin tasarımı yapılan tutucu ile tutulabilmesi için küresel mekanizmanın hareket düzleminin yarı çapından küçük çapa sahip olmalı yani bu çalışmaya göre 120 mm'den küçük yarıçapta bir cisim olmalıdır.

Burada dik koordinat sisteminin orijini küresel mekanizmanın hareket düzlemi olan küresel düzlemin merkezindedir. Şekil 4.15'te verilen $\mathbf{N}_{\text{Avuçiçi}}$ kuvvet vektörünün doğrultusu Z ekseninde olmak üzere X ve Y eksenleri Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te verildiği gibi parmak ucu yörüngeleri simetrik konumludur. Bu bilgiler doğrultusunda Şekil 4.15'te verildiği gibi küresel geometride bir cismin tutulması işleminde kuvvet denge denklemleri:

$$\sum F_{X_o} = 0, \quad N_1 \sin\mu_1 \cos 30 - N_3 \sin\mu_3 \cos 30 = 0 \tag{50}$$

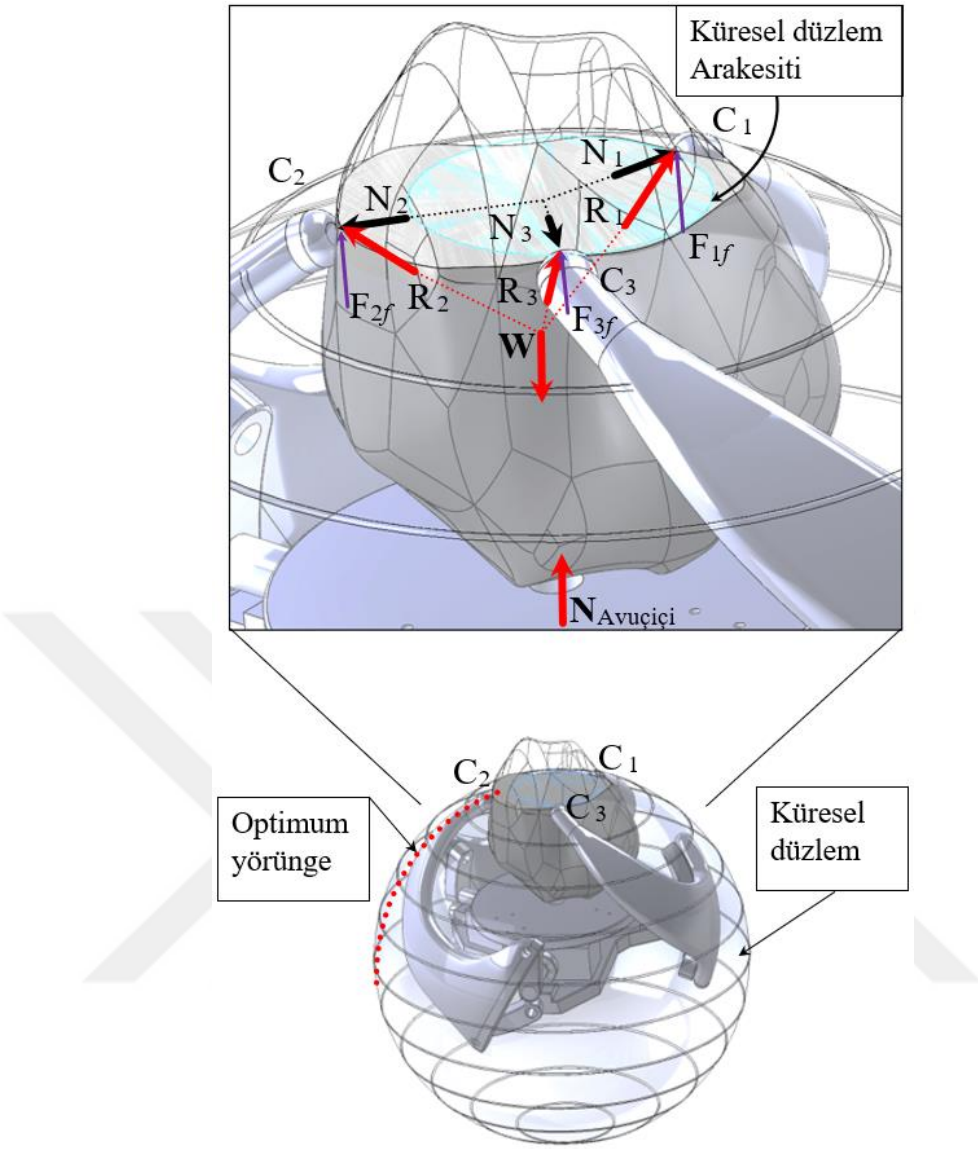
$$\sum F_{Y_o} = 0, \quad (N_1 \sin\mu_1 + N_3 \sin\mu_3 + F_{f1} \cos\mu_1 + F_{f3} \cos\mu_3) \cos 60 - N_2 \sin\mu_2 - F_{f2} \cos\mu_2 = 0 \tag{51}$$

$$\sum F_{Z_o} = 0, \quad N_1 \cos\mu_1 + N_2 \cos\mu_2 + N_3 \cos\mu_2 - F_{f1} \sin\mu_1 - F_{f2} \sin\mu_2 - F_{f3} \sin\mu_3 - W = 0 \tag{52}$$

Eğer tutulan cisim avuç içine temas ediyorsa Denklem (52):

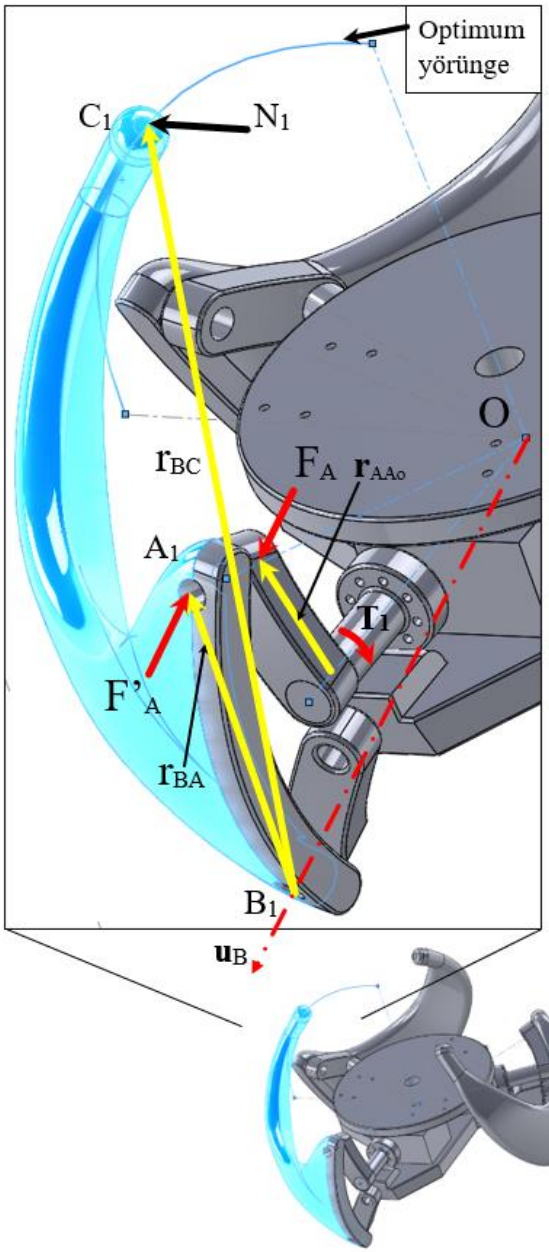
$$\sum F_{Z_o} = 0, \quad N_1 \cos\mu_1 + N_2 \cos\mu_2 + N_3 \cos\mu_2 + N_{Avuçiçi} - F_{f1} \sin\mu_1 - F_{f2} \sin\mu_2 - F_{f3} \sin\mu_3 - W = 0 \tag{53}$$

şeklinde düzenlenir. Denklem (42-44,46-48,50-52), tasarımı yapılan mekanizma sayesinde robotik tutucunun kuvvet kapalı tutma işlemi yapabileceğini göstermektedir. Öte yandan Denklem (44, 48, 52) yerine Denklem (45, 49, 53) kullanılırsa şekil kapalı tutma işlemi yapabileceğini göstermektedir. Bu robotik tutucu, cismin etrafını sararak tutma işlemini düzlemsel mekanizmalara göre daha düşük serbestlik derecesi ile sağlamaktadır. Kuvvet kapalı ve şekil kapalı tutma özelliklerini bir arada bulundurması nedeniyle tutucu çok fonksiyonlu özelliğe sahiptir. Bu tutucunun diğer bir özelliği Şekil 4.16'da gösterildiği gibi düzensiz geometriye sahip cisimlerin tutulmasını sağlamasıdır. Bu şekilde parmak ucu ile cisim arasındaki kuvvet tepkileri gösterilmiştir. Ancak parmak ucunun temas ettiği alanda muhtelif doğrultularda normale sahip yüzeyler mevcuttur. Bu yüzeyler her ne kadar farklı doğrultularda tepki kuvveti oluştursalar da Şekil 4.16'da gösterildiği gibi küresel düzlem ve tutulan cismin arakesit düzleminde her parmak için tek bir bileşke tepki kuvveti olarak kabul edilebilir. Parmak ucunun bu bileşke tepki kuvvetleri ve sürtünme kuvvetinin etkisi sayesinde oluşan bileşke kuvvetler Şekil 4.16'da olduğu gibidir. Burada avuç içinin tepki kuvveti oluşması tutulan cismin boyutuna bağlıdır. Bu çalışmada cisim 12 cm çaptaki bir kürenin içine sığacak boyuttaysa cismin tutulması esnasında avuç içi tepki kuvveti oluşmaz. Aksi halde avuç içi tepkisi oluşur.



Şekil 4.16 Düzensiz geometriye sahip cismin tutulması esnasında statik analizi.

Düzensiz geometrideki cisimlerin tutulmasında tasarımı yapılan tutucunun parmak mekanizmaları ayrı ayrı tahrik elemanları ile hareket ettirileceğinden Şekil 4.16'da gösterildiği gibi parmak uçlarının konumları simetrik olmaksızın tutma sağlayabilmektedir. Bu özelliğin düzensiz geometriye sahip cisimlerin tutulmasında büyük önemi vardır. Çünkü böylece tasarlanan robotik tutucu, düzensiz geometriye sahip bir cismin tutulması esnasında cismin oryantasyonundan bağımsız bir şekilde tutma sağlayabilir. Yani cismin tutulması esnasında bir düzlem üzerindeki duruşu ne olursa olsun boyutsal gereksinimleri sağladığı sürece tutucunun cismi kavraması başarılı olacaktır. Buradaki statik denge hesaplamaları içi Denklem (46-49) kullanılabilir.



Şekil 4.17 Tutucu parmağını oluşturan bir küresel mekanizmanın uzuvlarına etkiyen statik kuvvetler

Tutucu parmak mekanizmasının kuvvet aktarımının tespit edilmesi için Şekil 4.17'de gösterilen N_1 kuvvetinin mekanizmanın çeşitli konumları için hesaplanması gerekir. Bu değerin belirlenmesi için cisim özelliğine bağlı sürtünme kuvveti ihmal edilerek sadece geometrik şekle bağlı cisim yüzey normalindeki tepki kuvveti kullanılabilir. Bu sayede minimum tahrik torku ve kuvvet aktarım oranı elde edilmiş olur. Tutucu parmak ucunda Şekil 4.17'de gösterildiği gibi oluşacak yüzey normalindeki tepki kuvveti N_1, çeşitli geometriye sahip cisimler için Şekil 4.11, 4.13, 4.15, 4.16'da gösterildiği gibi çeşitli doğrultularda oluşmaktadır.

Tutucu parmak mekanizmasının krank uzvundaki tahrik torku T_1 ve bu torku dengeleyen A_1 mafsalındaki kuvvet F_A Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Burada A_o, A_1 ve B_o, B_1 sırasıyla krank uzvu sabit mafsalı, krank-biyel uzvu bağlantı mafsalı ve çıkış uzvu sabit mafsalı, çıkış uzvu ile biyel uzvu bağlantı mafsalıdır. O noktası bütün mafsalların kesiştiği küresel hareket düzleminin merkezi olup bu mafsal noktalarına R yarı çapı mesafesindedir. F_A kuvveti, A_o, A_1 ve O noktalarının üzerinde bulunduğu düzleme dik olup A_o ve O noktaları arasındaki dönme ekseninde tahrik elemanının oluşturacağı T_1 torkunu dengelemektedir. Bu uzuv için statik denge denklemi:

$$\sum M_{A_o} = 0, \qquad F_A \, \mathrm{R} \sin \alpha_2 - T_1 = 0 \tag{54}$$

yazılır. Bu denklem ile sadece A_o mafsalının ekseni etrafındaki mekanizmanın hareketini sağlayacak olan moment dikkate alınmıştır. A_o mafsalının ekseni etrafında dönme sağlamayan momentler bu çalışmada incelenmemiştir. Denklem (54) tutulacak cismin geometrisinden bağımsız olduğundan her türlü cismin tutma işleminde kullanılabilir.

Tutucu parmak ucundaki Şekil 4.17'de gösterilen cisim tepki kuvveti etkisi altındaki biyel uzvunun statik dengesi B mafsal ekseni etrafında oluşacak moment denklemi ile:

$$\sum \boldsymbol{M_B} = 0, \qquad \boldsymbol{u_B}.(\mathbf{r_{BA}} \mathbf{x}\, \mathbf{F_A}') - \boldsymbol{u_B}.(\mathbf{r_{BC}} \mathbf{x}\, \mathbf{N_1}) = 0 \tag{55}$$

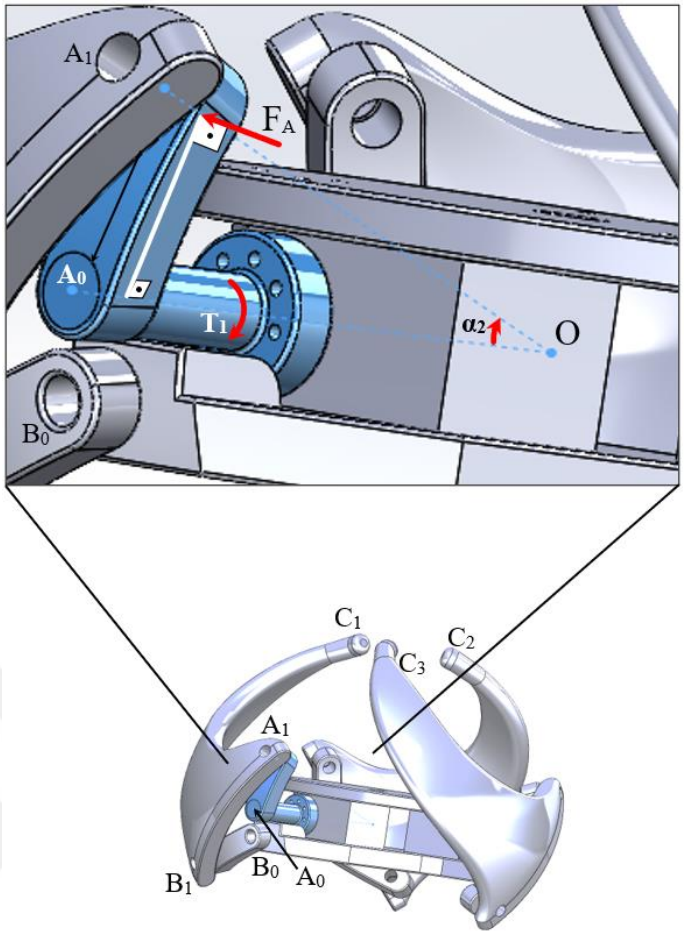
yazılır. Bu denklemde $\mathbf{N_1}$, tutulan cismin yüzeyinin normali doğrultusundaki tepki kuvveti vektörünü ifade eder. $\mathbf{F_A}$' biyel uzvu ile krank uzvunun bağlantı mafsalı A_1'de oluşan kuvvetin biyel uzvu üzerindeki etki kuvvetinin vektörüdür. $\mathbf{r_{BC}}$ ve $\mathbf{r_{BA}}$ sırasıyla B-C noktaları ve B-A noktaları arası konum vektörleridir**.** Denklem (55) her türlü geometrideki cismin tutulmasında geçerlidir. Ancak $\mathbf{N_1}$, $\mathbf{N_2}$, $\mathbf{N_3}$ doğrultusu tutulan cismin geometrik özelliğine bağlı değişir. Kare ya da dikdörtgen prizması şeklindeki bir cismin tutulması esnasında cisim yüzeyi normalindeki tepki kuvveti vektörünün düşey eksen bileşeni oluşmadığından Şekil 4.12'den faydalanarak:

$$\begin{aligned} \mathbf{N_1} &= \mathrm{N}_1 \hat{\mathrm{I}} \\ \mathbf{N_2} &= -\mathrm{N}_2 \hat{\boldsymbol{J}} \\ \mathbf{N_3} &= -\mathrm{N}_3 \hat{\mathrm{I}} \end{aligned} \tag{56}$$

yazılır. Silindirik geometriye sahip cisimlerin yüzey normalindeki tepki kuvvetinin vektörü de düşey eksende bileşeni oluşmayacağından Şekil 4.14'ten faydalanarak:

$$\begin{aligned} \mathbf{N_1} &= \mathrm{N}_1 sin60\hat{\mathrm{I}} + \mathrm{N}_1 cos60\hat{\boldsymbol{J}} \\ \mathbf{N_2} &= -\mathrm{N}_2 \hat{\boldsymbol{J}} \\ \mathbf{N_3} &= -\mathrm{N}_3 sin60\hat{\mathrm{I}} + \mathrm{N}_3 cos60\hat{\boldsymbol{J}} \end{aligned} \tag{57}$$

yazılır. Denklem (57) silindirik geometriye sahip tüm cisimler için geçerlidir.



Şekil 4.18 Tutucu parmak mekanizması krank uzvu üzerindeki tahrik torku ve kuvvet

Küresel geometriye sahip bir cismin tutulması işleminde yüzey normali doğrultusunda oluşan tepki kuvvetleri vektörü üst görünümü Şekil 4.14'te görüldüğü gibi olacağından **N1**, **N2**, **N3** vektörleri:

$$\mathbf{N_1} = \mathrm{N}_1 sin\mu_1 sin60\hat{\mathrm{I}} + \mathrm{N}_1 sin\mu_1 cos60\hat{\boldsymbol{J}} + \mathrm{N}_1 cos\mu_1 \hat{\mathbf{k}}$$

$$\mathbf{N_2} = -\mathrm{N}_2 sin\mu_2 \hat{\boldsymbol{J}} + \mathrm{N}_2 cos\mu_2 \hat{\mathbf{k}} \quad (58)$$

$$\mathbf{N_3} = -\mathrm{N}_3 sin\mu_3 sin60\hat{\mathrm{I}} + \mathrm{N}_3 sin\mu_3 cos60\hat{\boldsymbol{J}} + \mathrm{N}_3 cos\mu_3 \hat{\mathbf{k}}$$

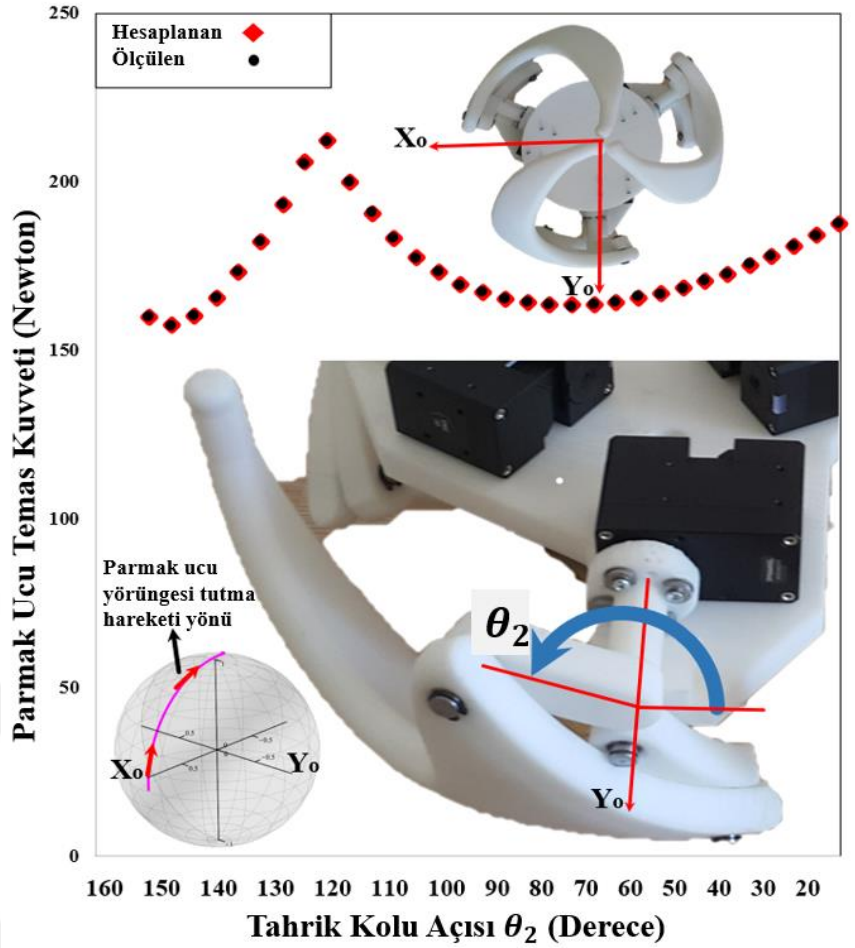
yazılır. Denklem (55)'te verilen **F_A'** kuvveti Şekil 4.17'da gösterilen $\boldsymbol{F_A}$ kuvvet vektörü ile aynı doğrultuda zıt yönde olacağından krank kolunun Şekil 4.8'de gösterilen ekvatoral düzlem ile yaptığı açıya bağlı ifade edilmelidir. Bu nedenle **F_A'** için:

$\theta_2 < \pi/4$ için

$$\mathbf{F_A}' = -\mathrm{F_A}' sin\theta_2 \hat{\boldsymbol{J}} - \mathrm{F_A}' cos\theta_2 \hat{\boldsymbol{k}} \quad (59)$$

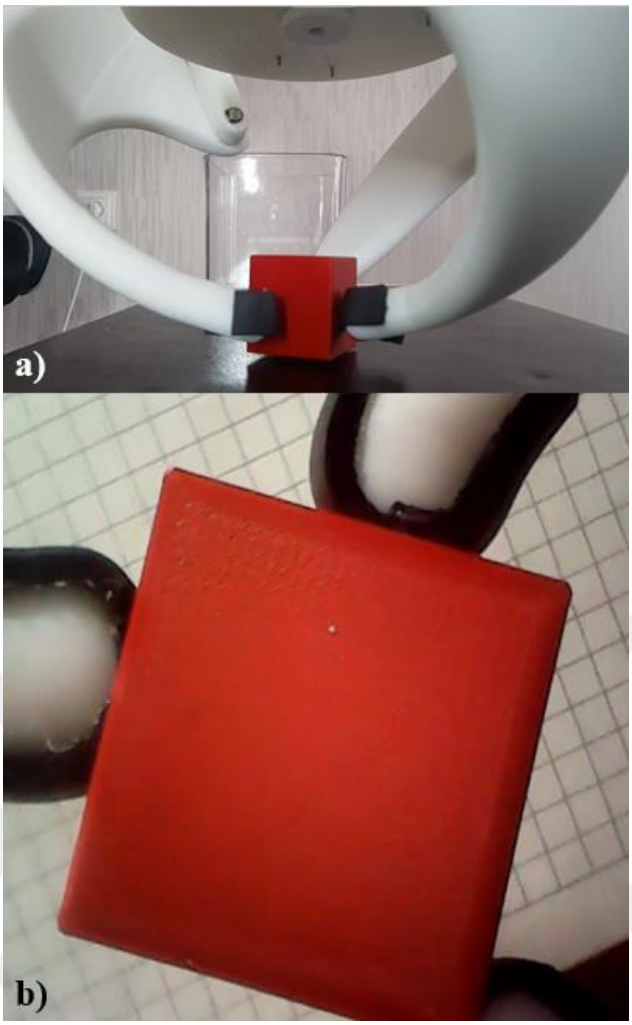
$\theta_2 > \pi/4$ için

$$\mathbf{F_A}' = \mathrm{F_A}' \cos\left(\theta_2 - \frac{\pi}{4}\right)\hat{\boldsymbol{J}} + \mathrm{F_A}' sin\left(\theta_2 - \frac{\pi}{4}\right)\hat{\boldsymbol{k}} \quad (60)$$



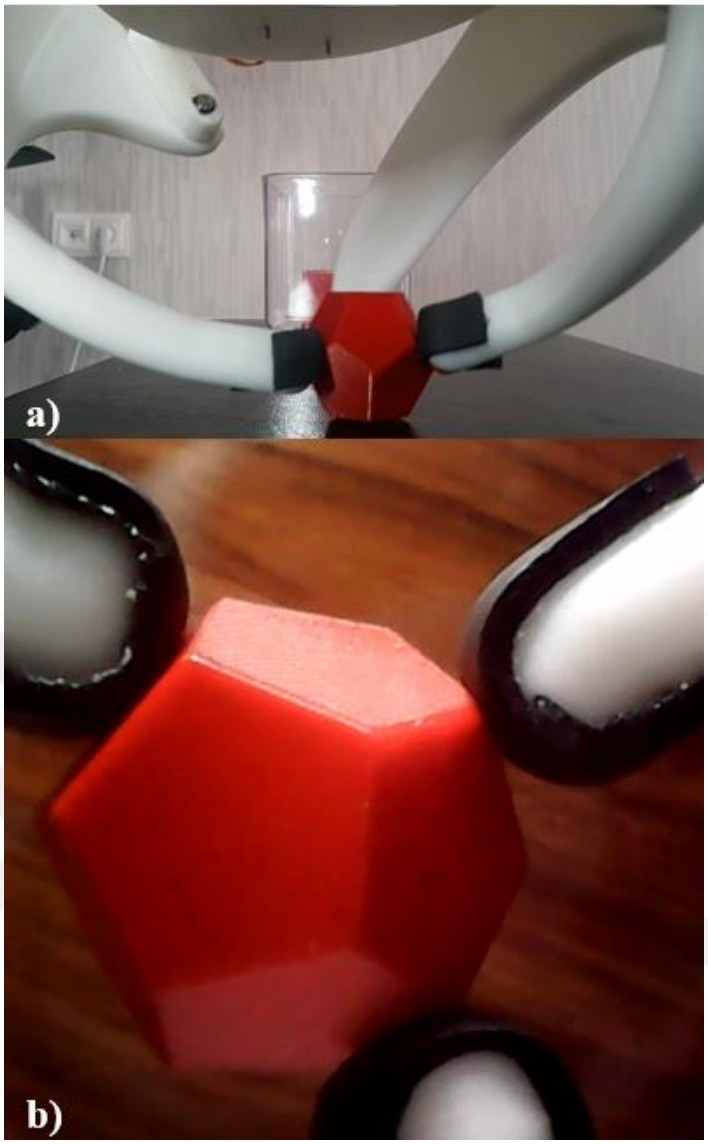
Şekil 4.19 10 Nm sabit tork uygulanan krankın parmak ucundaki kuvvet değişimi

Mekanizmanın krank kolu tutma işleminde saat yönünde hareket ettiği için Şekil 4.19'da açı değişimi 160º' den başlatıldı. Statik analizi yapılan tutucunun parmak ucundaki kuvvetin hesabında krank koluna sabit 10 Nm. tork uygulandı. Bu torkun mekanizma hareketi boyunca 32 adet biyel noktası konumu için parmak ucunun silindirik bir nesne ile temasında oluşacak tepki kuvveti hesaplandı. Bu hesaplamada biyel noktasının konumlarını sağlayabilecek çapta silindirik cisimler tutularak hesaplanan değerler ölçülen değerler ile Şekil 4.19'da karşılaştırıldı. Bu karşılaştırmanın regresyon analizi ile değerlendirilmesi sonucu verilerin %99 uyumlu olduğu tespit edildi. Tutma kabiliyeti denenmek üzere çeşitli nesneler ile deneme yapıldı. 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiş kübik bir nesne Şekil 4.20'da gösterildiği gibi tutuldu. Şekil 4.20-b'de endoskopik bir kamera ile tutucunun avuç içinden görüntü alınarak parmakların tutulan nesneye teması incelendi. Bu tutma işleminde kübik cismin oryantasyonu ne olursa olsun tutucu parmaklarının nesneyi uygun bir oryantasyona döndürerek tuttuğu tespit edildi.



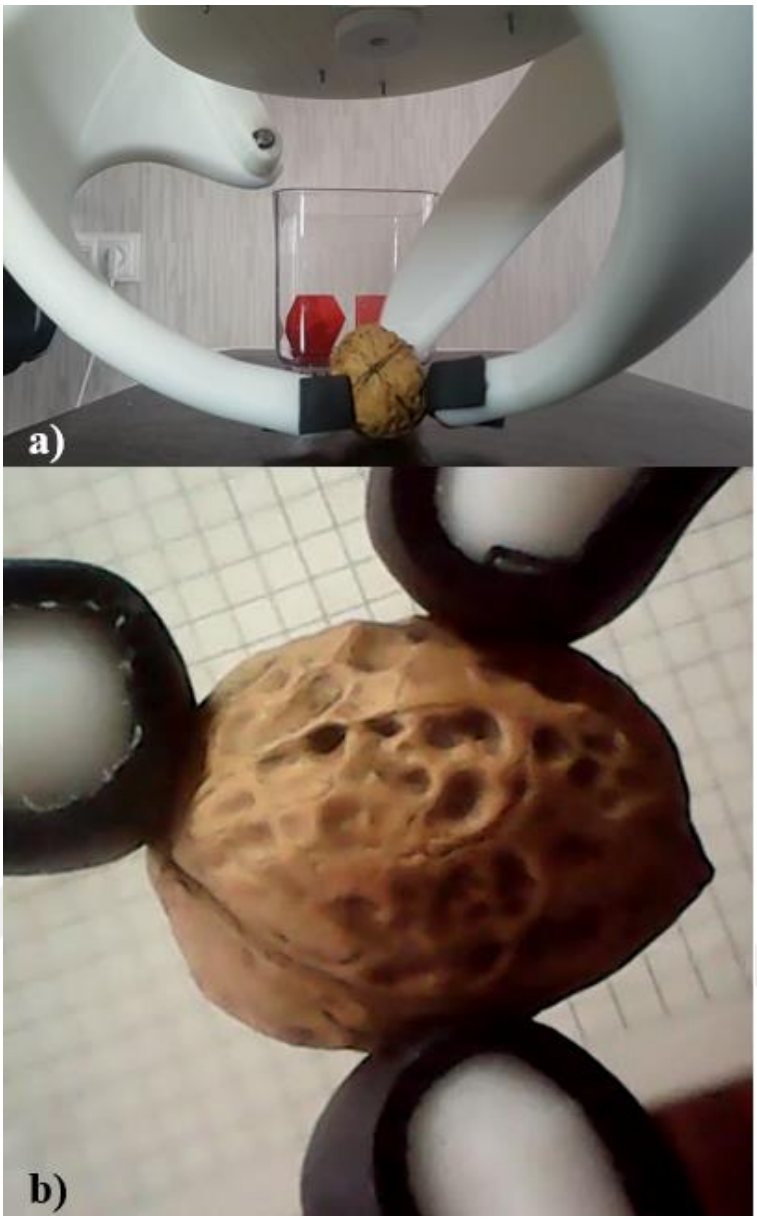
Şekil 4.20 Tutma işlemi görüntüsü, a) Kübik cismin tutulması, b) Avuç içi kamera görüntüsü.

Prototipin diğer bir özelliği, muhtelif doğrultularda düzlem normaline sahip yüzeylerden oluşan nesneleri de tutma kabiliyetinin olmasıdır. 3B yazıcılarda imal edilen Şekil 4.21'daki nesne çeşitli doğrultularda düzlem normaline sahip yüzeylerden oluşmaktadır. Bu yüzeyleri tutma esnasında kübik nesnenin tutulmasında olduğu gibi uygun oryantasyona hareket ettirmiştir. Uygun oryantasyon Şekil 4.21-b'de gösterildiği gibi parmak uçlarının en az iki tanesinin farklı yüzey düzlemine temas ile ve en çok bir parmak ucunun köşeye temas ederek çizgisel temas ile tutma gerçekleştirmesidir. Benzer temas kısıtları kübik nesnenin tutulmasında da geçerlidir. Prototipin üç parmağı farklı motorlar ile tahrik edildiğinden parmak ucu konumlarının simetrik olmadığı yani eksenel tutma yapılmadığı belirlendi. Bu durum tutucunun esnek tutma kabiliyetinin mevcut olduğunu göstermektedir.



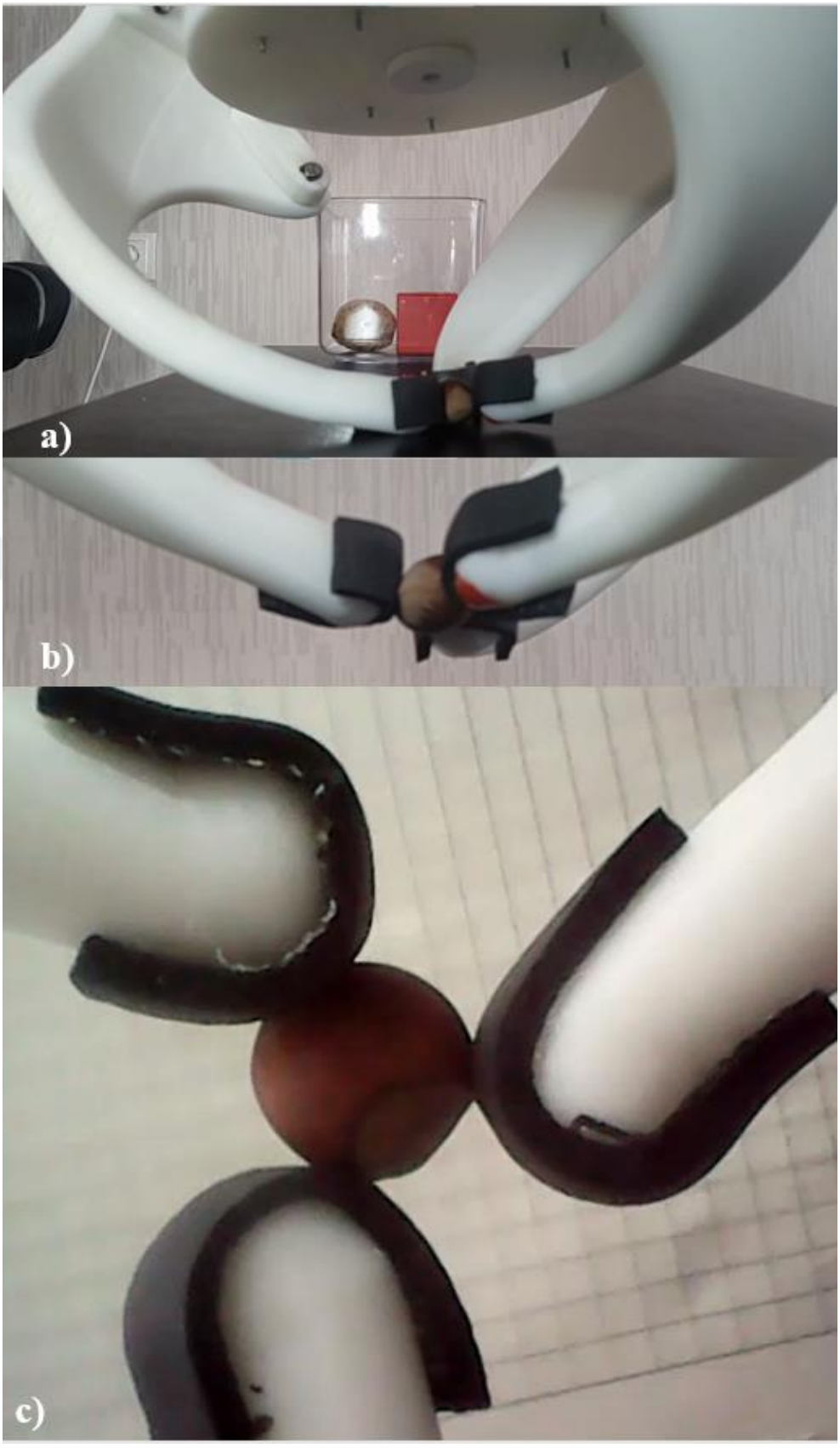
Şekil 4.21 Muhtelif doğrultularda düzlem normaline sahip yüzeylerden oluşan nesnenin tutulması; a) nesnenin tutulma görüntüsü, b) Tutma işleminin tutucu avuç içinden kamera görüntüsü.

İlk iki tutma işlemi düzgün geometriye sahip nesneler olduğundan Şekil 4.22'de düzensiz geometriye sahip bir cevizi tutma işlemi denendi. Böyle bir nesnenin tutulmasında parmak uçlarında kullanılan kauçuk bant sayesinde oluşan sürtünmenin etkisiyle cevizin ekvatoral düzleminin alt enleminden ya da üst enleminden tutma işlemi yapılabildiği tespit edilmiştir. Bu denemede ceviz büyüklüğünün tutma işleminde etkili olacağı düşünüldüğünden ve cevizin yüzeyinin pürüzlülüğünün yüksek olmasından dolayı bu denemeyi bir de fındık ile yapmak tutucunun kabiliyetini test etmek için uygun görüldü. Bu sebeple tutuma işlemi Şekil 4.22'de gösterildiği gibi gerçekleştirildi.



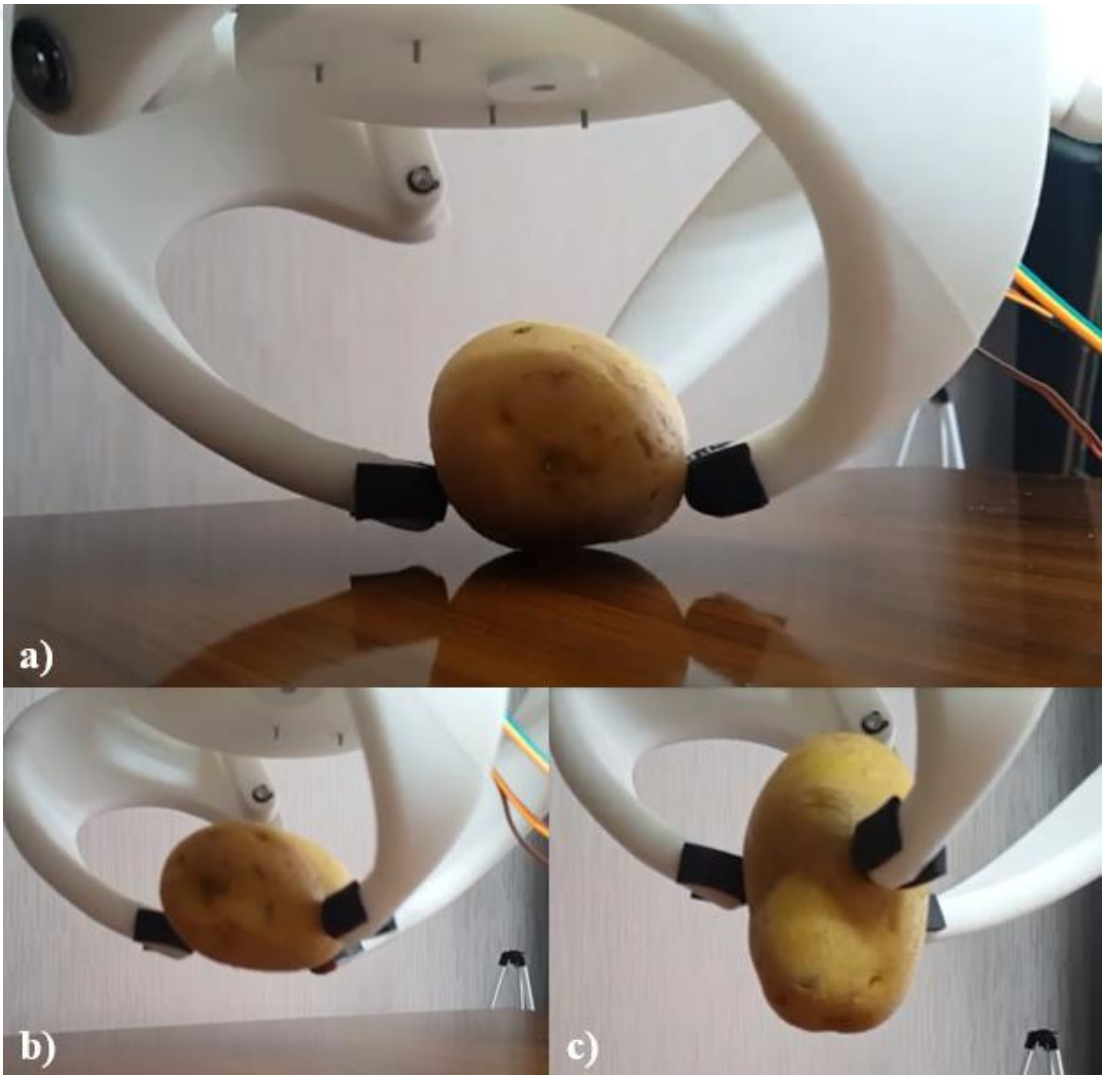
Şekil 4.22 Prototip ile ceviz tutma işlemi; a) Cevizin tutulması, b) Tutucu avuç içi kamera görüntüsü.

Cevizin büyüklüğü nedeniyle daha küçük boyutta ve pürüzsüz bir nesnenin tutulması kabiliyetinin testi yapılmıştır. Bu test için bir fındık kullanılmıştır. Fındık çapı 1 cm civarındadır. Bu nesnenin tutulması esnasında parmak uçları Şekil 4.23'te gösterildiği gibi küresel hareket düzleminin kutup noktalarına yakınlaşmıştır. Bu nedenle nesne tutulurken bir miktar dönmüştür. Bu dönme hareketinde parmak uçlarının yörünge eğriliğinin kutuplarda artması etkilidir.



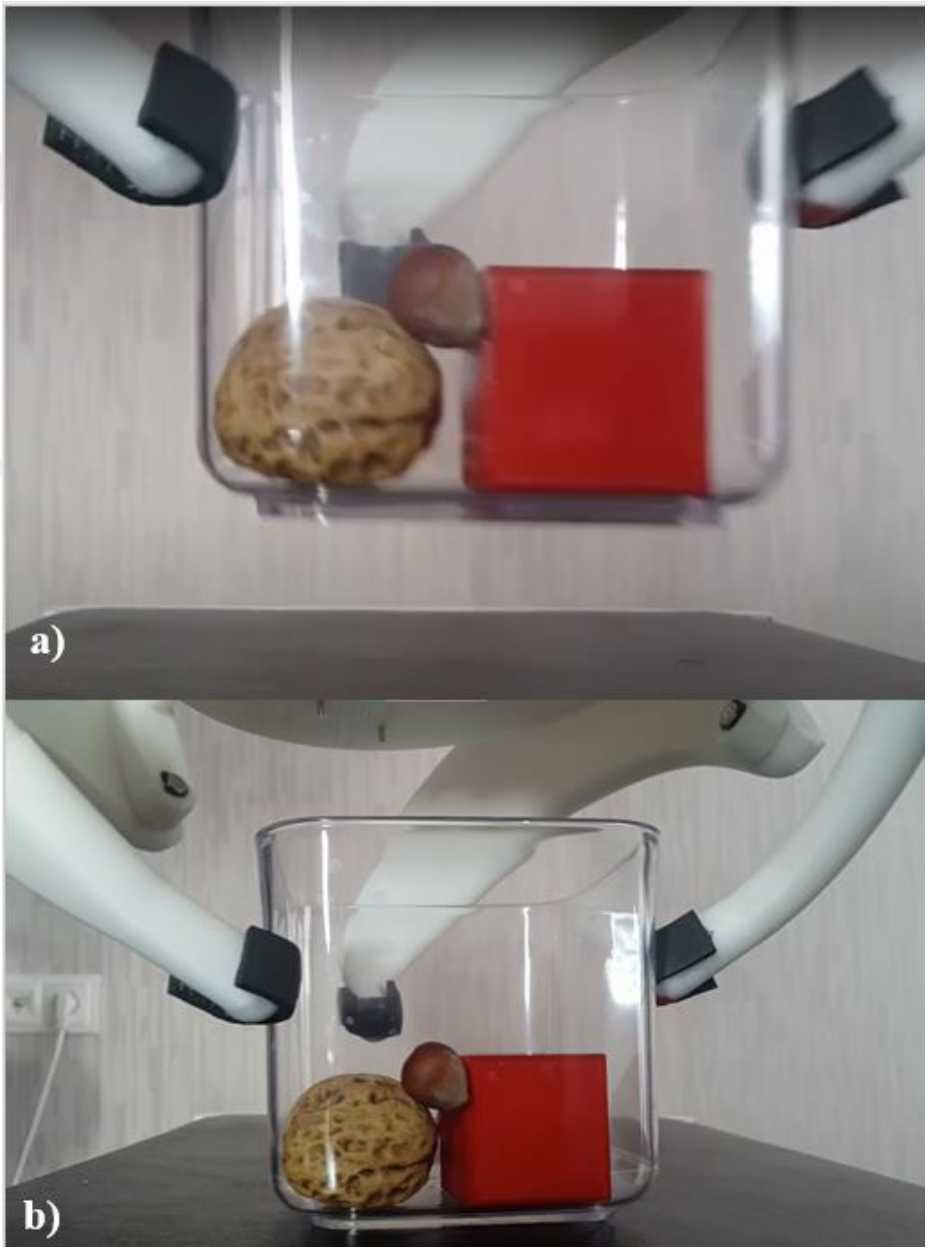
Şekil 4.23 Fındık tutma denemesi; a) İzometrik görünümü, b) Alt izometrik görünümü, c) Tutucu avuç içi kamera görüntüsü.

Buraya kadar yapılan denemelerde kullanılan nesnelerin boyutları ve ağırlıkları düşünülerek farklı bir nesne ile deneme yapılması uygun bulundu. Bu kapsamda düzensiz geometrik yapıdaki bir patatesin çeşitli oryantasyonlarda tutulması Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Patatesin enine ve boyuna tutma işlemleri sırasıyla Şekil 4.24-b ve Şekil 4.24-c'de gösterilmiştir. Bu deneme tutucu parmaklarının birbirinden bağımsız çalışabildiğini bir kez daha göstermektedir. Patates, Şekil 4.24-a'da tutulması esnasında ekvatoral düzleminin altından tutulduğu zaman Şekil 4.24-b'de verildiği gibi taşınabilmektedir. Eğer Şekil 4.24-a'da patates ekvatoral düzlem üstünden bir konumdan tutulacak olursa Şekil 4.24-c'de gösterildiği gibi bir duruma hareket edip karar kılmaktadır.



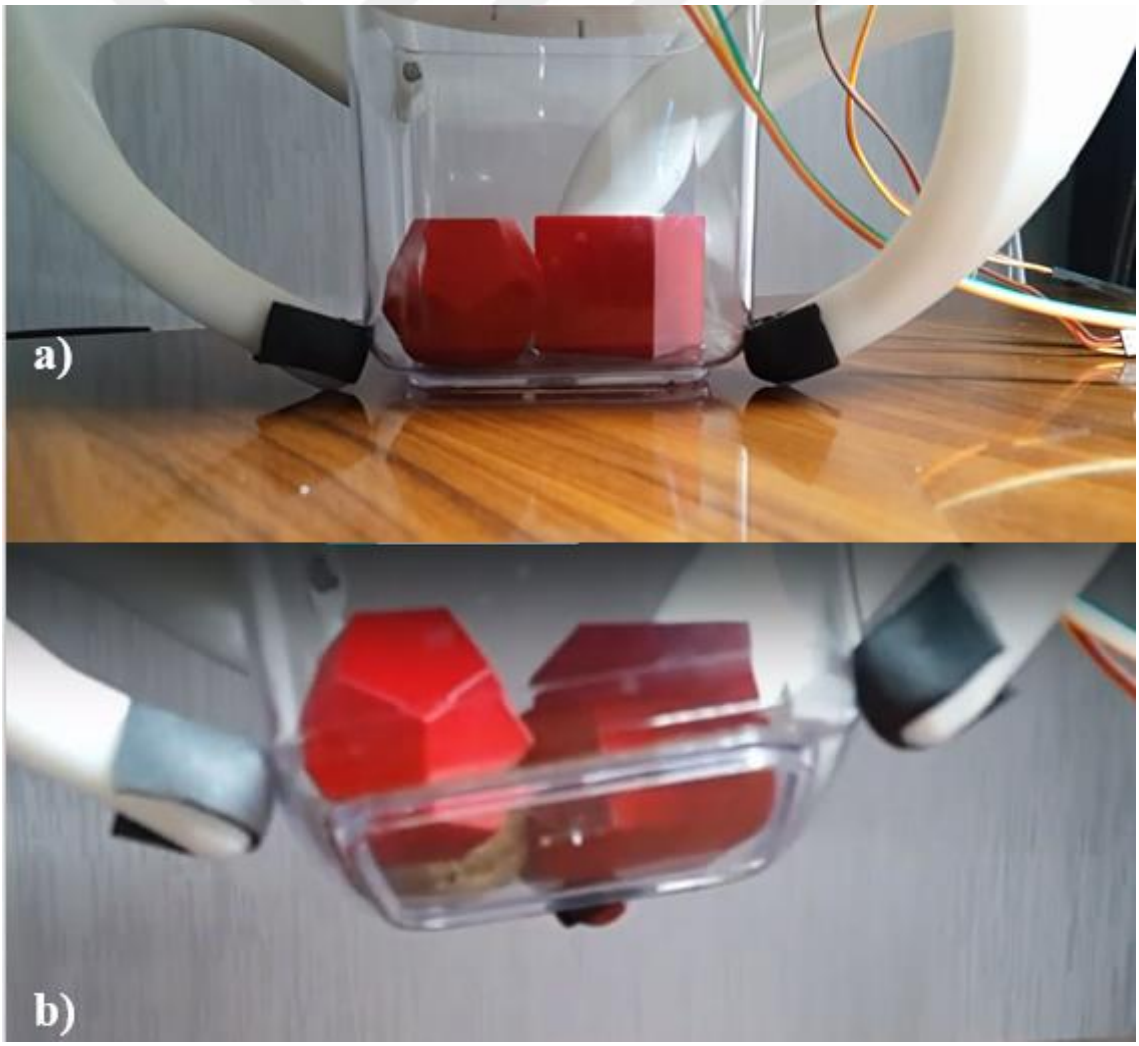
Şekil 4.24 Düzensiz geometrik yapıdaki patatesin tutulması; a) tutma anı, b) patatesi enine tutma, c) patatesi boyuna tutma.

Buraya kadar tutulan cisimler boyutları ve yüzey pürüzlülüğü açısından düşük özelliklere sahiptiler. Bu nedenle yüzey pürüzlülüğü düşük ve boyutları büyük bir kübik kabın içine birkaç parça nesne yerleştirilerek Şekil 4.25'te gösterildiği gibi tutma denemesi yapılmıştır. Bu denemenin kavrama kararlılığını test etmek için tutulan kübik kabın dinamik şartlar altında hiçbir kayma davranışı göstermediği gözlemlendi. Bu deneme işleminde kullanılan nesnenin diğer bir özelliği tutucu parmak mekanizmasının hareket düzleminin yarı çapından büyük bir boyuta sahip olmasıdır. Şekil 4.25'te gösterilen tutma işleminde sadece 3 parmak teması bulunmaktadır ve dinamik şartlar altında kaymadan tutulabilmiştir. Böylece tutucu parmak mekanizmasının hareket düzleminden daha büyük boyutta cisimleri kuvvet kapalı yöntemle tutabildiği ispatlandı.



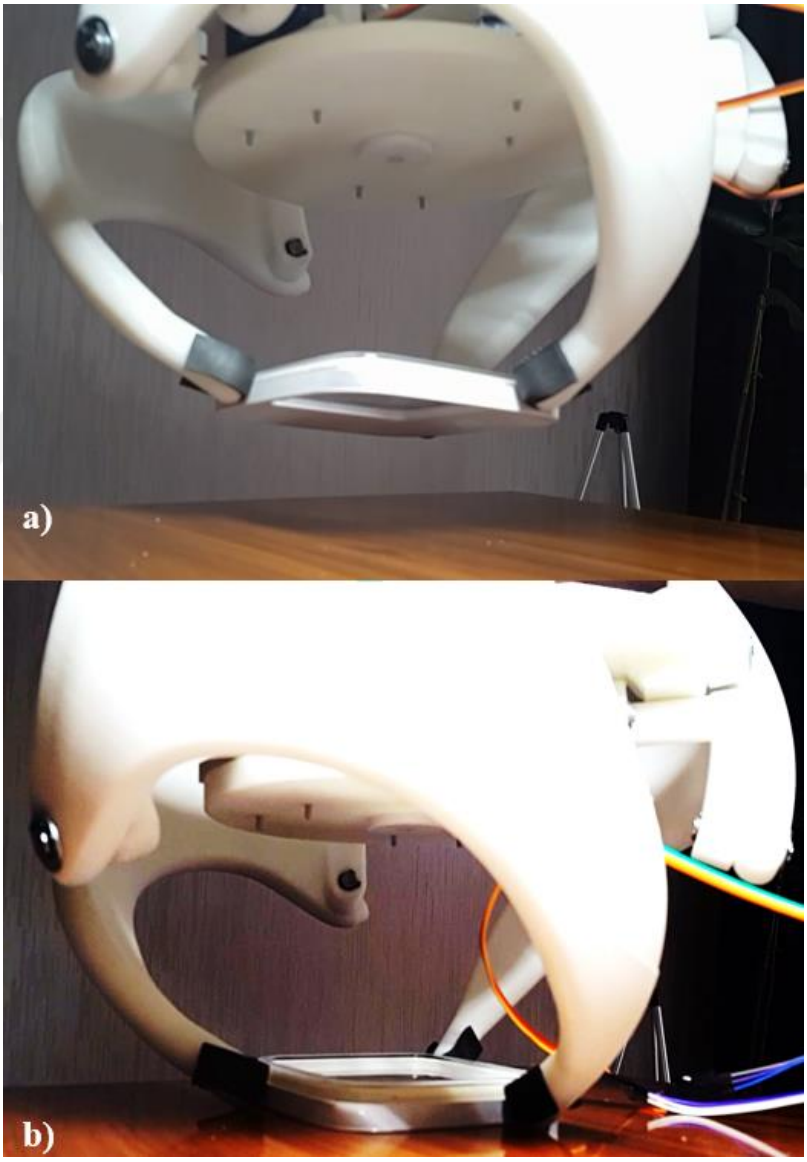
Şekil 4.25 Yüksek boyutlardaki ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip cisimlerin tutulması.

Prototip tutucunun diğer bir özelliği ise Şekil 4.25'te gösterilen tutma işleminde kullanılan kübik nesnenin tutulması için Şekil 4.26'te 3 parmak ucunun uyguladığı kuvvetin yanı sıra bir de tutucu avuç içinin tepki kuvveti cismin tutulmasına yardımcı olmuştur. Bu tutma ile prototip, şekil kapalı tutma işlemini sağlamıştır. Bu denemede de nesnenin tutulduktan sonra tutucu ile çeşitli hareketler yapılarak dinamik teste tabi tutuldu. Nesnesin 4 kuvvet altında prototiple tutulması, 3 kuvvet altında tutulmasından çok daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir. Ancak her türlü nesne şekil kapalı tutma yöntemi ile tutulamaz. Çünkü şekil kapalı tutma için nesnenin boyutlarından bir kısmı parmak mekanizmasının hareket düzleminin yarıçapından büyük olması gerekmektedir. Bu prototipin şekil kapalı tutma kabiliyeti sayesinde çapı parmak mekanizmasının hareket düzlemi yarı çapına eşit olan bir silindirin etrafı sarılarak tutulması mümkündür. Bunun yanı sıra aynı silindir eksenel olarak da tutulabilir.



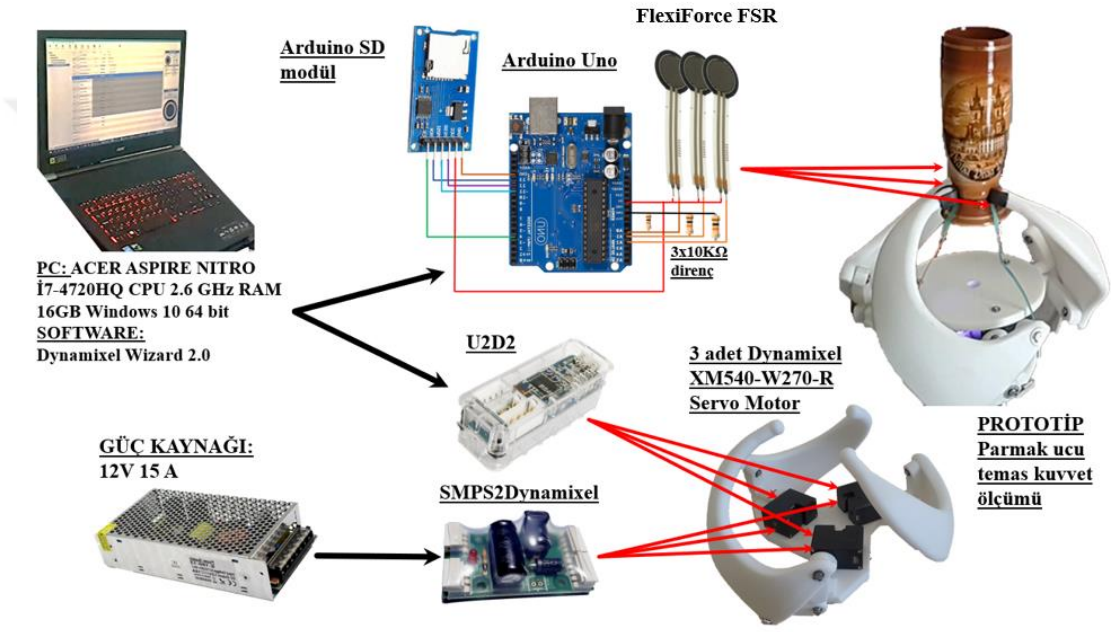
Şekil 4.26 Dört kuvvet etkisi altında şekil kapalı tutma işlemi; a) tutma, b) kaldırılma.

Geliştirilen prototip, literatürde düz bir zeminden ince ve dikdörtgen prizması geometrisine sahip nesnenin tutulması için geliştirilen düşük tahrikli tutucunun (Babin ve Gosselin, 2018) yaptığı işlemi de gerçekleştirmiştir. Şekil 4.27-b'de düz bir zemin üzerinde yatay vaziyette duran ince prizmatik bir kapağın parmak uçları ile teması gösterilmiştir. Prototipin bu kapağı masadan yukarı kaldırdığı aşama Şekil 4.27-a'da gösterilmiştir. Kavrama kabiliyeti test edilmesi için kapak tutulduktan sonra aşağı yukarı ya da sağa sola hızlı hareketlerle denenmiştir. Bu deneme sonucunda hiçbir kayma gözlenmemiştir.



Şekil 4.27 Düz zemin üzerinden ince prizmatik bir nesnenin tutulması; a) tutma anı, b) tutup kaldırma anı.

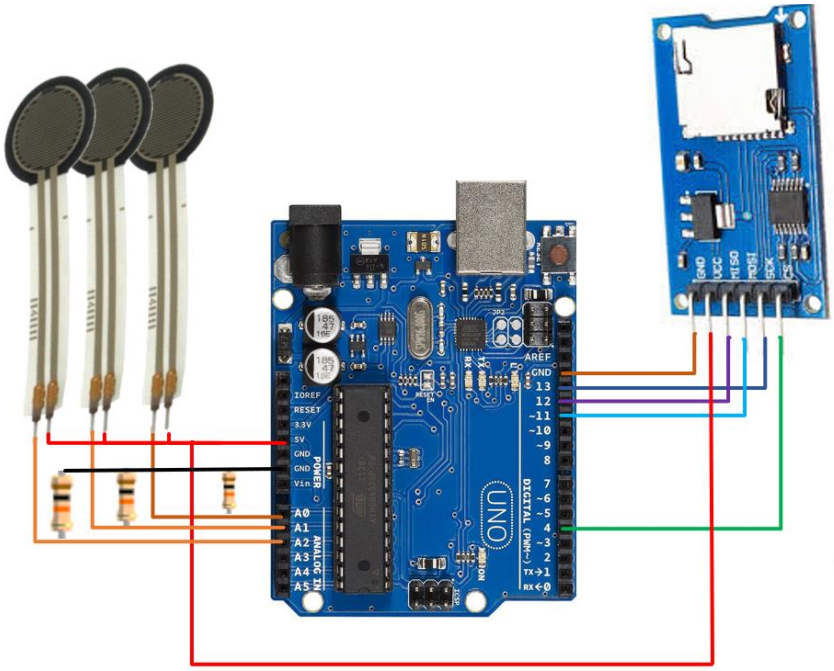
Bu çalışmada geliştirilen parmak mekanizmasının tutma esnasında temas kuvveti ölçümü Şekil 4.28'da gösterildiği gibi bir düzenekte gerçekleştirilmiştir. Bu düzenekte silindirik yapıya sahip bir vazo tutulmuştur. Parmak uçlarına elastomerik kauçuk bant kullanılmıştır. Bu bant üzerine şekil değişimine bağlı ölçüm yapabilen kuvvet sensörleri yerleştirilerek tutma esnasında temas kuvveti ölçülmüştür. Kuvvet sensörleri 10Kohm'luk dirençler ile bağlantıları Şekil 4. 29'de gösterildiği gibi kurularak 200 Newton'a kadar ölçüm yapılması sağlanmıştır. Ölçülen değerler Arduino SD modülü kullanılarak toplanmıştır. Veri toplamak için düzenlenen kodlar ekte verilmiştir.



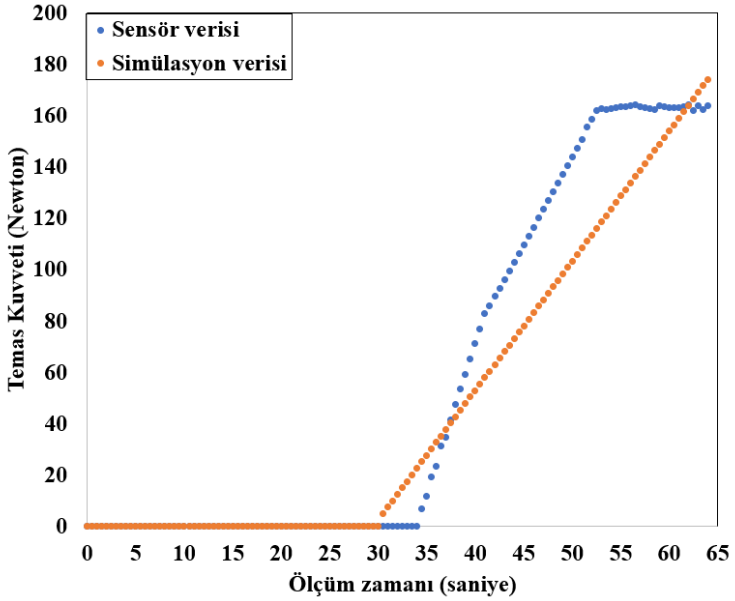
Şekil 4.28 Tutucu parmak ucu temas kuvveti ölçüm düzeneği.

Tutucu prototipin toplam ağırlığı 1.4 kg'dır. Prototip, boyutu 1 cm ile 25 cm arasında ortalama çapa sahip her türlü geometrik şekildeki nesneyi tutabilecek kabiliyettedir. Parmak ucu topolojisine bağlı olarak daha küçük ve büyük boyuttaki nesneleri ve iç cidara sahip nesneleri de içten tutabilir. Prototipte 3 adet servo motor Şekil 4.28'de gösterildiği gibi kullanılmıştır. Bu motorların kontrolü için Dynamixel Wizard 2.0 yazılımı ve U2D2 mikro işlemcisi kullanılmıştır. Motorlar 12 V 15 A güç kaynağı ve SMPS2Dynamixel ve PWM kontrolü ile 10 Nm sabit torkta sürülmüştür. Temas kuvvet verileri devresi Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Ölçülen kuvvet değerleri Solid Works programı simülasyon sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.30'de gösterilmiştir. Solid Works programında tüm ayarlamalar kullanılan gerçek materyaller ile aynı özellikte 7 cm çapta seramik malzeme seçilmiştir. Deney aşamasında servo motor hareketi simülasyon hareket süresiyle mümkün olan en uyumlu şekilde düzenlenmiştir.

Prototip Şekil 4.31'de gösterildiği gibi çekme yük testine tabi tutulmuştur. Bu test için temas kuvveti ölçümünde kullanılan vazonun çapının arttığı doğrultuda kayması gözlemleninceye kadar WeiHang marka elektronik el kantarı ile vazoya eksenel çekme kuvveti uygulandı. El kantarı 9,5 kgf değer gösterdikten sonra vazonuz kaymaya başladığı tespit edildi. Bu değerin elde edilmesinde parmak ucundaki elastomerik kauçuk bant büyük öneme sahiptir. Parmak ucunun topolojisine, malzemesine ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak kaldırılabilecek yük miktarı değişecektir. Bu çalışmanın amacı kapsamında olmadığı için parmak ucu topolojisi, malzemesi ve yüzey pürüzlülüğü araştırılmamıştır.



Şekil 4.29 Temas kuvveti ölçüm ve veri toplama devresi.



Şekil 4.30 Solid Works simülasyonu ve FSR sensörü verileri.

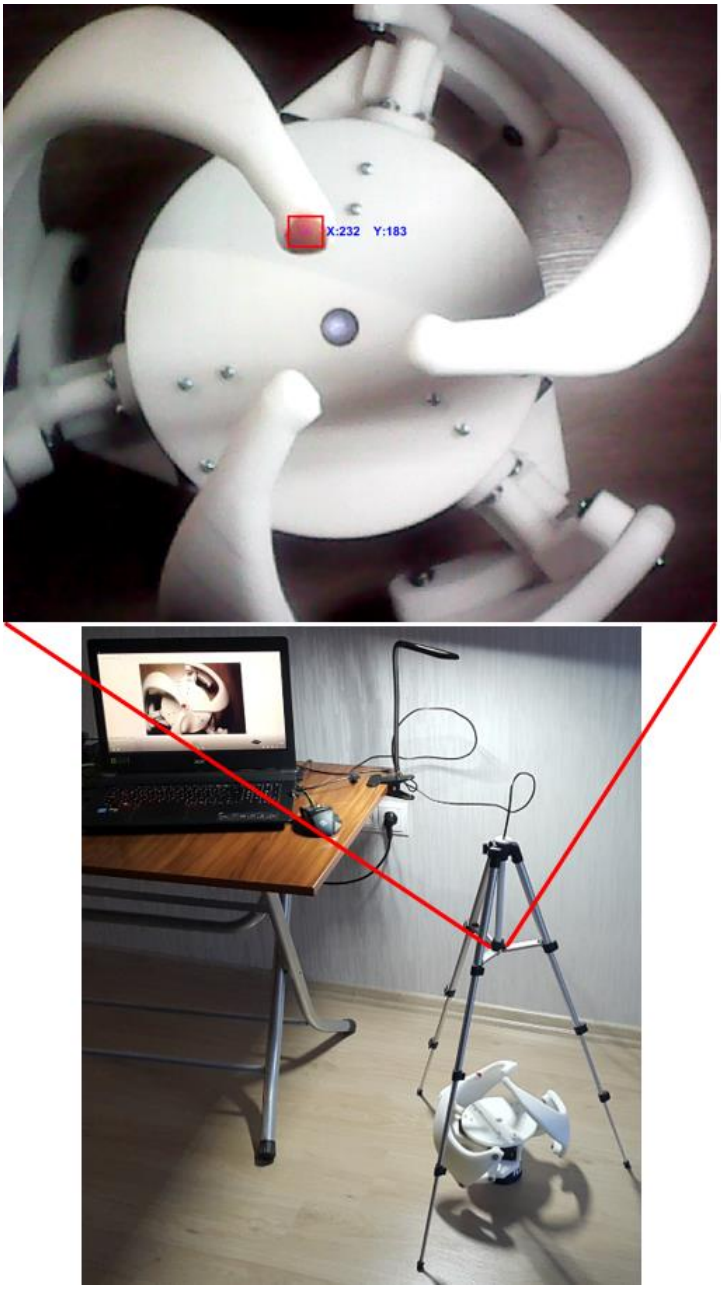
Parmaklar simetrik tutma operasyonu gerçekleştirdiğinden tüm parmaklarda eşit veri elde edilmiştir ve Şekil 4.30'da tek parmak için alınan veriler gösterilmiştir. FSR sensöründen toplanan veriler 100 milisaniye aralıkla kaydedilmiştir. Ancak simülasyon veri sayısıyla uyumlu olması için 0,5 saniye aralıkta bir değer seçilerek Şekil 4.30'da karşılaştırmalı grafik elde edilmiştir. Solid Works öğrenci sürümü olduğundan simülasyon verisi Şekil 4.30'da gösterildiği gibi lineer bir değişim göstermiştir. Halbuki FSR sensöründen alınan veriler, parmak ucundaki elastomerik kauçuk bant basınca maruz kaldıkça şekil değişimi davranışına bağlı bir değişim göstermiştir. Başlangıçta lineer olmayan temas kuvveti verisi kauçuk bant sıkıştıkça lineer bir değişim göstermiştir.



Şekil 4.31 Prototip taşıma yükü testi.

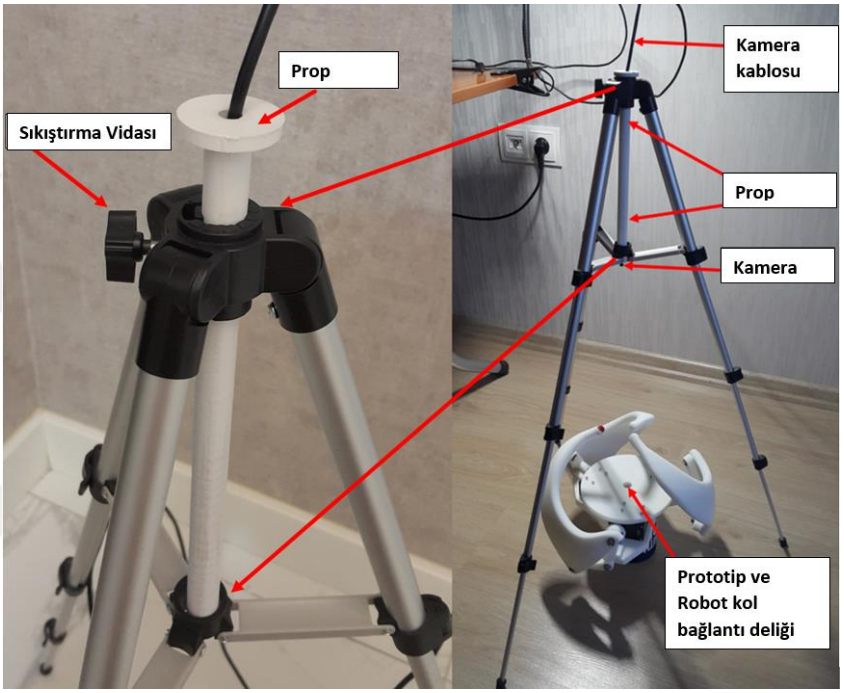
4.2. Yörünge Eğriliğinin Deneysel İncelenmesi

Protopin parmak ucu yani mekanizmanın biyel noktasının yörünge eğriliği hesaplaması için Şekil 4.32'da gösterilen deneysel düzenek oluşturulmuştur. Bu düzenekte standart bir kamera tripotuna 3 boyutlu yazıcıda imal edilen bir prob Şekil 4.33'de gösterildiği gibi montajlanıp sabitlenmiştir. Bu probun içine de bir endoskop kamera yerleştirilmiştir. Böylece zemine tam dik duruma getirilmiştir. Tutucu prototipi ise Şekil 4.33'de gösterildiği gibi robot kol bağlantı deliği altına yansıtıcı yüzeye sahip küçük bir platform gelecek şekilde yerleştirilmiştir (Osman Acar, 2021).

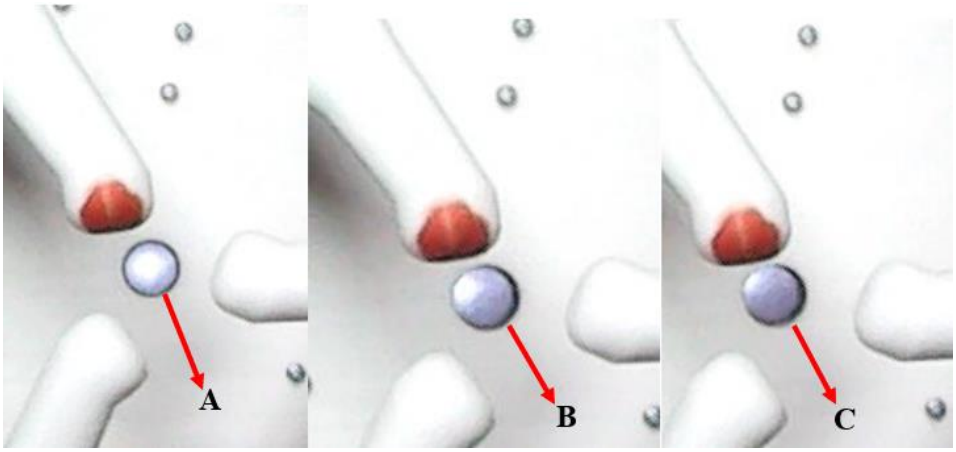


Şekil 4.32 Deney düzeneği (Osman Acar, 2021).

Prototipin altına yerleştirilen yansıtıcı yüzey sayesinde Şekil 4.34'de gösterilen kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Bu kalibrasyon sayesinde endoskop kameranın mekanizmanın kutbuyla aynı hizada olması ve zemine dik olması sağlanmış oldu. Bu diklik ve paralelliklerin kontrolü için akıllı telefon eğim ölçme programı ve su terazisi kullanılmıştır. Şekil 4.32'da gösterildiği gibi görüntü işleme ile endoskop kameradan gelen görüntülerdeki kırmızıya boyalı biyel noktası koordinatları tespit edilerek kayıt edildi. Bu esnada tutucu mekanizması PWM yöntemi kullanılarak servo motorların tahriki ile hareket ettirildi. Kontrolcü olarak Arduino uno kullanıldı.



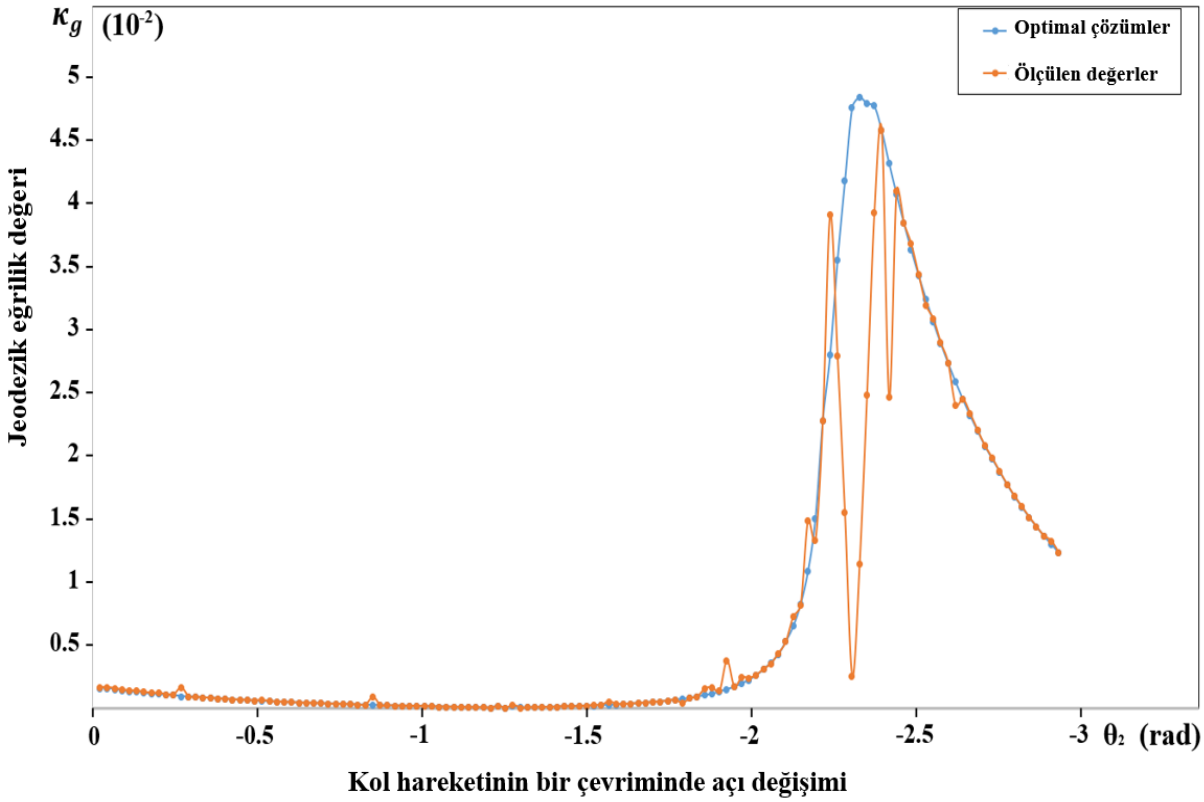
Şekil 4.33 Deney düzeneği elemanları (Osman Acar, 2021).



Şekil 4.34 Kalibrasyon: A: kamera tam dik yansıma, B: kamera ekseni kayık yansıma, C: kamera hizası bozuk durum (Osman Acar, 2021).

Kaydedilen XY yörünge koordinatları Denklem (61)'de kullanılarak eğrilik hesaplandı. Bu eğrilik değerleri optimizasyon işlemi sonucu bulunan Şekil 4.3'teki yörünge için Şekil 4.4'te gösterilmişti. Şekil 4.4'te verilen değerler deney sonucu elde edilen eğrilikler ile Şekil 4.35'te gösterildiği gibi çizdirildi. Bu şekle göre biyel noktasının küresel düzlemin kutuplarında yörüngesi bozulmaktadır. Bu bozulmanın tutucu fonksiyonlarına hiçbir etkisi olmaz. Çünkü bu bozulma tutma işlemi için Şekil 4.4'te gösterilen uygun yörünge aralığının dışında kalmaktadır. Bu nedenle bir önemi yoktur. Elde edilen veriler regresyon analizi ile kontrol edilmiştir. Bu analize göre deneysel yöntemle ölçülen değerler %97 güvenilirliktedir.

$$\kappa = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \tag{61}$$



Şekil 4.35 Prototip küresel mekanizmanın biyel noktasının ölçülen eğrilik değerlerinin teorik hesaplamalar ile karşılaştırılması (Osman Acar, 2021).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu kısımda araştırmanın başında ortaya koyulan hipotezin doğruluğuna yönelik araştırma sonuçlarında elde edilen veriler ve testler ışığında kanıtlar sunulmuştur.

5.1 Sonuçlar

Araştırmanın temelini oluşturan hipotez; büyük daire yayına yakın özellikteki bir yörüngede hareket sağlayan aynı küresel düzlemde hareket eden 3 tane küresel dört çubuk mekanizması simetrik olarak bir ekvatoral düzlem etrafına yerleştirildiğinde üç kuvvet etkisi altında bir nesneyi statik dengede tutabilir. Bu kapsamda;

- Ball-Burmester noktalarının araştırılması Harmonik Arı Algoritması ile yapıldı. Böylelikle yörünge eğriliği 0.005'ten küçük olan mekanizma boyutları elde edildi.
- Bu mekanizmalar içerisinden küresel hareket düzleminin ekvatoru etrafında simetrik 3 adet yerleştirilebilecek ve bu şartlar altında sorunsuz çalışabilecek boyutlara sahip mekanizma seçildi.
- Optimum mekanizmanın boyutları α_1, α_2, α_3, α_4 sırasıyla 9.09^o, 18.43^o, 48.94^o, 27.26^o ölçülerinde elde edildi. Bu boyutlara sahip bir mekanizmanın biyel noktası 119.8^o boyunca 0.005'ten küçük eğriliğe sahip bir yörüngede hareket etmiştir. Bu yörünge boyu bir tutucu parmağı için küresel hareket düzleminde ekvatoral bölgenin alt kısmından başlayıp kutuplara kadar ulaşan en ideal boyutta hareket sağlamıştır.
- Mekanizma uzuvları büyük daire yayı açısal boyutu olarak elde edilmiştir. Ancak biyel uzvu küresel bir üçgen formundadır. Bu küresel üçgen formunun bir katı modelde tutucu montajının simülasyonlarında incelenmesi sonucu bazı tutma işleminde başarısız olacağı kanaatine varılmıştır. Bu sebeple sonsuz elemanlar analizi yapılmaksızın uygun bir topolojik yapı ortaya koyulmuştur. Ayrıca araştırılması gereken bir konudur.
- Mekanizma uzuvları 120 mm iç ve 140 mm dış yarıçap ölçülerinde tasarlanmıştır. 1 cm ve 25 cm aralığında ortalama çapa sahip her türlü nesneyi tutabildiği gözlemlenmiştir.
- Tutma kabiliyetleri incelendiğinde 12 cm'ye yakın yarıçapta cisimlerin şekil kapalı tutulmasını sağlayabilirken daha küçük boyutlardaki nesneleri kuvvet kapalı tutabilmektedir.
- Deneyler sonucunda parmak ucunda kauçuk malzeme kullanıldığında 9 kg'lık yükü kaymadan tutabildiği gözlemlenmiştir.

5.2 Öneriler

Bu çalışmada robotik tutucular için ideal bir yörüngeyi sağlayabilecek küresel dört çubuk mekanizması araştırılmıştır. Bu araştırmada elde edilen tecrübeler ışığında şunlar önerilmektedir:

- Tutucunun parmak topolojisi üzerine bir araştırma yapılabilir.
- Bu tutucu için bir empedans kontrol çalışması yapılabilir.
- Aynı tutucu yapısı ile daha düşük tahrikli tutma araştırmaları yapılabilir.
- Bu tutucuda kullanılan küresel mekanizmaya benzer bir kinematik yapıyı sağlayabilen esnek mekanizma araştırması yapılabilir. Bu esnek mekanizmanın imalatı üzerine ve malzeme yapısı üzerine araştırmalar yapılabilir.
- Küresel dört-çubuk mekanizmalarının farklı formları kullanılarak bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile karşılaştırma yapılabilir.
- Bu araştırmada sadece mekanizma yörüngesi ve boyutlarına odaklanılmıştır. Ancak parmak ucunun da tutma kabiliyetinde önemli ölçüde etkisi bulunmaktadır (Honarpardaz ve ark., 2017). Bu nedenle parmak ucu topolojik optimizasyonu ayrı bir çalışma olarak yapılacak ve etkileri incelenmelidir.
- Küresel mekanizmalar yapısı gereği tutulacak nesnelerin etrafını sarmaktadır. Bu nedenle mekanizmanın tasarlandığı boyutlardan düşük boyutlara sahip nesnelerin tutulmasında sadece kuvvet kapalı tutma yani parmak ucu ile sıkıştırarak tutma yapılabilmektedir. Küresel hareket düzleminin merkezinde sabitlenmiş membran benzeri elastik bir malzemenin parmak uçlarına bağlanması sayesinde nesneler etobur çiçeklerin avlarını tutmasına benzer bir yöntemle de tutulabilir. Bu yöntemin avantajları araştırılabilir.
- Prototipi üretilen tutucunun parmak uçları elastisite modülü bilinen kauçuk bir malzeme ile tasarlanarak tutma işlemi esnasında avuç içine yerleştirilen bir kamera ile parmak ucundaki kauçuk malzemenin deformasyonu esnasında oluşan eğrilik görüntü işleme teknolojisi sayesinde hesaplanarak uygulanan kuvvetin tahmin edilmesi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

Abel, J., Holzmann, W. ve McCarthy, J., 1985, On grasping planar objects with two articulated fingers, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1 (4), 211-214.

Acar, O., Kalyoncu, M. ve Hassan, A., 2019, Proposal of a Harmonic Bees Algorithm for Design Optimization of a Gripper Mechanism, *IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science*, 2829-2839.

Acar, O., Sağlam, H. ve Şaka, Z., 2021, Measuring Curvature of Trajectory Traced by Coupler of An Optimal Four-Link Spherical Mechanism, *Measurement*, 109189.

Babin, V. ve Gosselin, C., 2018, Picking, grasping, or scooping small objects lying on flat surfaces: A design approach, *The International Journal of Robotics Research*, 37 (12), 1484-1499.

Babin, V. ve Gosselin, C., 2020, Mechanisms for Robotic Grasping and Manipulation, *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 4.

Beer, F. ve Johnston, E., 1979, Dinamik, *Üç Er Matbaacılık, İstanbul*.

Bicchi, A. ve Kumar, V., 2000, Robotic grasping and contact: A review, *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065)*, 348-353.

Birglen, L. ve Gosselin, C. m. M., 2006, Optimally unstable underactuated gripper: synthesis and applications, *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 3-11.

Birglen, L., Laliberté, T. ve Gosselin, C., 2007, Design and control of the laval underactuated hands, In: Underactuated robotic hands, Eds: Springer, p. 171-207.

Bottema, O. ve Roth, B., 1990, Theoretical kinematics, Courier Corporation, p.

Bundhoo, V. ve Park, E. J., 2005, Design of an artificial muscle actuated finger towards biomimetic prosthetic hands, *ICAR'05. Proceedings., 12th International Conference on Advanced Robotics, 2005.*, 368-375.

Caffaz, A. ve Cannata, G., 1998, The design and development of the DIST-Hand dextrous gripper, *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146)*, 2075-2080.

Ceccarelli, M., 2008, Renaissance of machines in Italy: from Brunelleschi to Galilei through Francesco di Giorgio and Leonardo, *Mechanism and Machine Theory*, 43 (12), 1530-1542.

Cerulo, I., Ficuciello, F., Lippiello, V. ve Siciliano, B., 2017, Teleoperation of the SCHUNK S5FH under-actuated anthropomorphic hand using human hand motion tracking, *Robotics and Autonomous Systems*, 89, 75-84.

Chiang, C.-H., 1988, Kinematics of spherical mechanisms, Cambridge University Press Cambridge, p.

Ciocarlie, M., Hicks, F. M. ve Stanford, S., 2013, Kinetic and dimensional optimization for a tendon-driven gripper, *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2751-2758.

Crossley, F. E. ve Umholtz, F., 1977, Design for a three-fingered hand, *Mechanism and machine theory*, 12 (1), 85-93.

Cutkosky, M. R., 1989, On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks, *IEEE Transactions on robotics and automation*, 5 (3), 269-279.

Cutkosky, M. R. ve Kao, I., 1989, Computing and controlling compliance of a robotic hand, *IEEE transactions on robotics and automation*, 5 (2), 151-165.

D'Aliesio, E. ve Ceccarelli, M., 2011, A History of Artificial hands, *Proceedings of MUSME*.

Dudita, F., Diaconescu, D. ve Gogu, G., 1981, Curs mecanisme, *Universitatea din Brasov*.

F, M., 1897, Teoria dei Meccanismi,Bologna

Festo, 2021, Grippers, *https://www.festo.com/*.

Galli, M. ve Sartorio, G. P., 2009, Machina: tecnologia dell'antica Roma, Palombi, p.

Gosselin, C., Pelletier, F. ve Laliberte, T., 2008, An anthropomorphic underactuated robotic hand with 15 dofs and a single actuator, *2008 ieee international conference on robotics and automation*, 749-754.

Hirose, S. ve Umetani, Y., 1978, The development of soft gripper for the versatile robot hand, *Mechanism and machine theory*, 13 (3), 351-359.

Honarpardaz, M., Tarkian, M., Ölvander, J. ve Feng, X., 2017, Finger design automation for industrial robot grippers: A review, *Robotics and Autonomous Systems*, 87, 104-119.

Howard, W. S. ve Kumar, V., 1996, On the stability of grasped objects, *IEEE transactions on robotics and automation*, 12 (6), 904-917.

Hussain, I., Renda, F., Iqbal, Z., Malvezzi, M., Salvietti, G., Seneviratne, L., Gan, D. ve Prattichizzo, D., 2018, Modeling and prototyping of an underactuated gripper exploiting joint compliance and modularity, *IEEE Robotics and automation letters*, 3 (4), 2854-2861.

Hussain, I., Al-Ketan, O., Renda, F., Malvezzi, M., Prattichizzo, D., Seneviratne, L., Abu Al-Rub, R. K. ve Gan, D., 2020a, Design and prototyping soft–rigid tendon-driven modular grippers using interpenetrating phase composites materials, *The International Journal of Robotics Research*, 39 (14), 1635-1646.

Hussain, I., Malvezzi, M., Gan, D., Iqbal, Z., Seneviratne, L., Prattichizzo, D. ve Renda, F., 2020b, Compliant gripper design, prototyping, and modeling using screw theory formulation, *The International Journal of Robotics Research*, 0278364920947818.

Jacobsen, S. C., Wood, J. E., Knutti, D. ve Biggers, K. B., 1984, The UTAH/MIT dextrous hand: Work in progress, *The International Journal of Robotics Research*, 3 (4), 21-50.

Kaboli, M., Walker, R. ve Cheng, G., 2015, In-hand object recognition via texture properties with robotic hands, artificial skin, and novel tactile descriptors, *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 1155-1160.

Kobayashi, F., Ikai, G., Fukui, W. ve Kojima, F., 2011, Two-fingered haptic device for robot hand teleoperation, *Journal of Robotics*, 2011.

Kocabas, H., 2009, Gripper design with spherical parallelogram mechanism, *Journal of Mechanical Design*, 131 (7).

Laliberté, T. ve Gosselin, C. M., 1998, Simulation and design of underactuated mechanical hands, *Mechanism and machine theory*, 33 (1-2), 39-57.

Leaver, S. O. ve Mccarthy, J. M., 1989, Mechanical fingers for dexterity and grasping, Google Patents.

Lemaire, P. A., 1829, Bibliotheca classica Latina: sive, Collectio auctorum classicorum Latinorum, cum notis et indicibus, NE Lemaire, p.

Liu, C.-H., Chiu, C.-H., Chen, T.-L., Pai, T.-Y., Chen, Y. ve Hsu, M.-C., 2018, A soft robotic gripper module with 3D printed compliant fingers for grasping fruits, *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 736-741.

Liu, J., Feng, F., Nakamura, Y. C. ve Pollard, N. S., 2014, A taxonomy of everyday grasps in action, *2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 573-580.

Ma, R. R., Rojas, N. ve Dollar, A. M., 2016, Spherical hands: Toward underactuated, in-hand manipulation invariant to object size and grasp location, *Journal of Mechanisms and Robotics*, 8 (6).

Mason, M. T., Salisbury, J. K. ve Parker, J. K., 1989, Robot hands and the mechanics of manipulation.

Massa, B., Roccella, S., Carrozza, M. C. ve Dario, P., 2002, Design and development of an underactuated prosthetic hand, *Proceedings 2002 IEEE international conference on robotics and automation (Cat. No. 02CH37292)*, 3374-3379.

Meriam, J. L. ve Kraige, L. G., 2012, Engineering mechanics: dynamics, John Wiley & Sons, p.

Monkman, G. J., Hesse, S., Steinmann, R. ve Schunk, H., 2007, Robot grippers, John Wiley & Sons, p.

Osman Acar, H. S., Ziya Şaka,, 2021, Measuring Curvature of Trajectory Traced by Coupler of An Optimal Four-Link Spherical Mechanism,, *Measurement*.

Ozawa, R., Hashirii, K. ve Kobayashi, H., 2009, Design and control of underactuated tendon-driven mechanisms, *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1522-1527.

Özçelik, Z., 2008, Ani invaryantlar yardımıyla küresel mekanizmaların tasarımı, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Pavlović, N. D., 2007, Analysis of mechanical error in quick-return shaper mechanism, *Proceedings of 12thIFToMM World Congress*.

Penisi, O. H., Ceccarelli, M. ve Carbone, G., 2003, Clasificación de mecanismos en pinzas industriales de dos dedos, *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 7 (1), 59-75.

Pham, D. ve Kalyoncu, M., 2009, Optimisation of a fuzzy logic controller for a flexible single-link robot arm using the Bees Algorithm, *2009 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 475-480.

Piazza, C., Grioli, G., Catalano, M. ve Bicchi, A., 2019, A century of robotic hands, *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2, 1-32.

ROBOTIQ, 2021, Grippers, *https://robotiq.com/*.

Rossi, C., Savino, S., Niola, V. ve Troncone, S., 2015, A study of a robotic hand with tendon driven fingers, *Robotica*, 33 (5), 1034.

Russo, M., Ceccarelli, M., Corves, B., Hüsing, M., Lorenz, M., Cafolla, D. ve Carbone, G., 2017, Design and test of a gripper prototype for horticulture products, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 44, 266-275.

Salisbury, J. K. ve Craig, J. J., 1982, Articulated hands: Force control and kinematic issues, *The International journal of Robotics research*, 1 (1), 4-17.

SCHUNK, 2021, chronology of grippers, *https://schunk.com/de_en/homepage/*.

Takeuchi, H. ve Watanabe, T., 2010, Development of a multi-fingered robot hand with softness-changeable skin mechanism, *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, 1-7.

Tavakoli, M., Marques, L. ve de Almeida, A. T., 2013, Flexirigid, a novel two phase flexible gripper, *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 5046-5051.

Tischler, C., Samuel, A. ve Hunt, K., 1995, Kinematic chains for robot hands—II. Kinematic constraints, classification, connectivity, and actuation, *Mechanism and machine theory*, 30 (8), 1217-1239.

Togliani, C., 2019, Vitruvius Pollio… M. Vitruvius per Iocundum solito castigator factus cum figuris et tabula vitam legi et intelligi possit… 1511 [scheda 126].

Veldkamp, G., 1976, On the use of dual numbers, vectors and matrices in instantaneous, spatial kinematics, *Mechanism and Machine Theory*, 11 (2), 141-156.

Yoshida, K., Abiko, S. ve Ota, J. M., 2002, Development of an articulated gripper for an underwater ROV, *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, 68 (11), 3373-3380.