

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE DİNAMİĞİ BİLİM DALI**

TENDON TAHRİKLİ SÜREKLİ ROBOT TASARIMI VE ANALİZİ

Erdem BİLGİN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Serkan ÇAŞKA

İkinci Danışman

Prof. Dr. Kadir GÖK



MANİSA-2024

TAAHHÜTNAME

Bu tezin, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Erdem BİLGİN



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	II
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	III
TABLO DİZİNİ	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
ABSTRACT.....	VII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Literatür Araştırması	4
2.2. Sürekli Robotların Sınıflandırılması	15
2.2.1. İçsel Aktüatörlü Sürekli Robotlar	15
2.2.1.1. Akışkan Kas Sürekli Robotları	15
2.2.1.2. Soft Büyüyen Sürekli Robotlar.....	16
2.2.2. Dışsal Aktüatörlü Sürekli Robotlar	18
2.2.2.1. Eş Merkezli Tüp Sürekli Robotları	18
2.2.2.2. Rot Tahrikli Sürekli Robotlar	19
2.3. Tendon Tahrikli Sürekli Robotlar (TTSR).....	19
2.4. TTSR'lerin Kinematiki.....	23
2.4.1. İleri Kinematik.....	23
2.4.2. Ters Kinematik	23
2.4.3. Konum, Yönelim ve Koordinat Sistemleri	24
2.4.3.1. Noktanın Konumu.....	24
2.4.3.2. Bir Cismin Yönelimi.....	25
2.4.3.3. Transformasyon Matrisleri.....	31
2.5. Çok Gövdeli Sistem Dinamiği	32
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER	36
3.1. TTSR'nin Modellenmesi	36
3.2. TTSR'nin Kinematik Analizi	39
3.3. TTSR'nin Tendon Uzunluklarının Hesaplanması	47
3.4. TTSR'nin Statik Analizi.....	49
3.5. TTSR'nin Dinamik Analizi	51
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	57
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	77

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
3D	Üç Boyutlu
mm	Milimetre
N.m	Newton metre
^AP	A Noktasının Koordinatı
R	Dönme (Rotasyon) Matrisi
T	Transformasyon Matrisi
TTSR	Tendon Tahrikli Sürekli Robot



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1.1. Tensör Kolu Manipülatörü.....	4
Şekil 2.1.2. Fil Hortumu Manipülatörü.....	5
Şekil 2.1.3. Yılan Benzeri Manipülatör	5
Şekil 2.1.4. Ahtapot Kolu Manipülatörü.....	6
Şekil 2.1.5. Minimal İnvaziv Cerrahi.....	7
Şekil 2.1.6. Cerrahi Endoskopi	8
Şekil 2.1.7. Kolonoskopi.....	9
Şekil 2.1.8. Amadeus	10
Şekil 2.1.9. Çift Kollu Sürekli Robot ve İnsansız Su Altı Aracı.....	11
Şekil 2.1.10. Moira-1 ve Moira-2	12
Şekil 2.1.11. Stabilizasyon Sistemine Sahip Arama Kurtarma Robotu	12
Şekil 2.1.12. Tesla İnsansız Araç Şarj Robotu.....	14
Şekil 2.2.1.1.1. Akışkan Kas Sürekli Robotu.....	15
Şekil 2.2.1.2.1. Soft Büyüyen Sürekli Robot	16
Şekil 2.2.1.2.2. Basıncı Düşürülmüş/Basınçlandırılmış Membran	17
Şekil 2.2.1.2.3. Termal Aktivasyon	17
Şekil 2.2.2.1.1. Eş Merkezli Tüp Sürekli Robotu	18
Şekil 2.2.2.2.1. Rot Tahrikli Sürekli Robot	19
Şekil 2.3.1. Tendon Tahrikli Sürekli Robot (TTSR).....	20
Şekil 2.3.2. Linklerin ve Eklemlerin Seri Olarak Bağlanması ve Tendonların Linklere Bağlantı Şeması	21
Şekil 2.3.3. Link-Tendon Bağlantısı	21
Şekil 2.3.4. Kontrol Ünitesi Tendon Tahrik Mekanizması	22
Şekil 2.4.3.1.1. Kartezyen Koordinat Sisteminde Noktanın Konumu	25
Şekil 2.4.3.2.1. Uç İşlevcisinin A Koordinat Sistemine Göre Yönelimi	26
Şekil 2.4.3.2.2. Bir Cismin Referans Koordinat Sistemine Göre Döndürülmesi	28
Şekil 2.4.3.2.3. Bir cismin X Eksenine Etrafında Döndürülmesi	29
Şekil 2.4.3.2.4. Açısal Yer Değiştirme Gösterimi.....	30
Şekil 2.4.3.3.1. Transformasyon Matrisi Gösterimi	31
Şekil 3.1.1. Tasarımı Yapılan TTSR.....	36
Şekil 3.1.2. TTSR’de Tendonların Bağlı Oldukları Link ve Segmentler.....	37
Şekil 3.1.3. Kontrol Segmentine Konumlandırılan Aktüatörler	38
Şekil 3.1.4. Segmentlerdeki Aktüatör Yerleşimleri	38
Şekil 3.1.5. Tahrik Ünitesi Aktüatör Genel Yerleşimi.....	39
Şekil 3.2.1. TTSR’ye Eksen Takımlarının Yerleştirilmesi	39
Şekil 3.2.2. Y Ekseninde α Açısıyla Dönme	41
Şekil 3.2.3. Z Ekseninde β Açısıyla Dönme	41
Şekil 3.2.4. Y ve Z Eksenlerine Birlikte Dönme	42
Şekil 3.2.5. TTSR’nin Ölçülendirilmesi	47
Şekil 3.3.1. Linkler Arasında Bulunan Tendonlar	47
Şekil 3.4.2. Tendon Bağlantı Noktaları.....	48
Şekil 3.4.1.1. Mesh Yapı.....	50
Şekil 3.4.1.2. Yükleme ve Sınır Koşulları	51
Şekil 3.5.1. Matlab/SİMULINK Ortamda Blok Diyagramlarla Oluşturulan Model.....	52
Şekil 3.5.2. Tahrik Ünitesi ve 1. Linke Ait Oluşturulan Alt Sistem Blokları.....	53
Şekil 3.5.3. Tendonların ve Linklerin Kontrol Segmentlerine Bağlanması.....	53

Şekil 3.5.4. Tendon Tahrikli Sürekli Robotun Simscape Multibody Ortamında Blok diyagramları ile Oluşturulan 3D Modeli	54
Şekil 3.5.5. Hareket ve Tork Değerleri İçin Oluşturulan Alt Sistem Blokları ...	55
Şekil 3.5.6. Oluşturulan Alt Sistem Bloklarının Açılımı	55
Şekil 3.5.7. Alt Sistemlerde Çalıştırılan MATLAB Fonksiyonları.....	55
Şekil 3.5.8. Simscape Multibody Ortamında Çalıştırılan TTSR.....	56
Şekil 4.1 Tüm Ünikersal Mafsallarda Y ve Z Eksenlerinde 30° Dönme Sonucu Uç İşlevcisi Konum Koordinatları	59
Şekil 4.2. Tüm Ünikersal Mafsallarda Y ve Z Eksenlerinde -15° Dönme Sonucu Uç İşlevcisi Konum koordinatları	61
Şekil 4.3. Tendon Uzunlukları	63
Şekil 4.4. ABS Malzeme Kullanımında Bileşenler İçin Gerilim Dağılımı.....	64
Şekil 4.5. PLA Malzeme Kullanımında Bileşenler İçin Gerilim Dağılımı	65
Şekil 4.6. PATH-CF15 Malzeme Kullanımında Bileşenler İçin Gerilim Dağılımı.....	65
Şekil 4.7. Tendonda Oluşan Maksimum Gerilim Dağılımı	66
Şekil 4.8 Tendonun Maksimum Gerilimi ve Emniyet Faktörü.....	67
Şekil 4.9. Belirlenen Açık Değerine Hareket Eden TTSR	68
Şekil 4.10. Maksimum Tork Grafiğı	69
Şekil 4.11. Konum-Zaman Grafiğı.....	70
Şekil 4.12. Açık Yerdeğıştirme Grafiğı.....	70

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1. Seçilen Malzemelerin Teknik Özellikleri	50
Tablo 2. Seçilen Malzemeler İçin Bileşenlerdeki Gerilim Dağılımı	66



TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aőamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Serkan ÇAŞKA'ya, tecrübeleri ile beni aydınlatan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Kadir GÖK'e ve geçen yıl aramızdan ayrılan babam Faruk BİLGİN'e yürekten teşekkür ederim.

Erdem BİLGİN
Manisa, 2024



ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

TENDON TAHRİKLİ SÜREKLİ ROBOT TASARIMI VE ANALİZİ

Erdem BİLGİN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serkan ÇAŞKA
İkinci Danışman: Prof. Dr. Kadir GÖK

Belirli ve tekrarlayan görevleri yerine getirebilen geleneksel tip endüstriyel robotlar, yapıları, mekanik tasarımları ve sınırlı hareket kabiliyetleri gibi kısıtları nedeniyle ihtiyaç duyulan birçok kullanım alanında yetersiz kalmaktadır. Geleneksel tip endüstriyel robotların erişemeyeceği yerlere kolaylıkla erişebilen, çalışma uzayındaki engellere çarpmadan rahatlıkla hareket edebilen ve uç işlevcisinin çalışma uzayında eğrisel bir yörünge takip edebildiği “Sürekli Robot” olarak adlandırılan robotlar tasarlanmaktadır.

Bu kapsamda, gelişen ve değişen endüstriyel ve teknolojik ihtiyaçlar göz önüne alınarak, uzay araştırmaları, askeri operasyonlar, nükleer teknoloji, mikrocerrahi, denizaltı ve denizcilik sektörü, altyapı ve endüstriyel tesislerde muayene ve kontrol, bakım/onarım, arama ve kurtarma çalışmaları gibi alanlarda faaliyet gösterebilmek amacıyla geçmişten günümüze farklı mekanik tasarımlar ve kinematik çözümler üzerine sürekli robot alanında birçok çalışma yapılmaktadır.

Bu çalışmada, altı serbestlik dereceli, uç işlevcisi konumlandırma hassasiyetine ve faydalı yük taşıma kapasitesine sahip, esnek bağlantıları sayesinde kendi şeklini ayarlayarak sarma/açma, çevreleme, gezinme yapabilen, karşılaştığı engelleri aşabilen, dolambaçlı yollardan geçebilen ve yörünge takibi yapabilen kompakt ve modüler yeni tip bir tendon tahrikli sürekli robot tasarımı ve analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürekli robot, tendon tahrikli, manipülatör, serbestlik derecesi

2024, 77 sayfa

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

Erdem BİLGİN

TENDON DRIVEN CONTINUUM ROBOT DESIGN AND ANALYSIS

Manisa Celal Bayar University
Graduate Education Institute
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Serkan ÇAŞKA
Co-Supervisor: Prof. Dr. Kadir GÖK

Traditional industrial robots, which can perform specific and repetitive tasks, are inadequate in many areas of use due to their limitations such as their structures, mechanical designs and limited mobility. Robots called "Continuum Robots" are being designed that can easily reach places that traditional type industrial robots cannot reach, can move easily without hitting obstacles in the work space, and whose end function can follow a curvilinear trajectory in the work space.

In this context, taking into account the developing and changing industrial and technological needs, to be able to operate in areas such as space research, military operations, nuclear technology, microsurgery, submarine and maritime sector, inspection and control, maintenance/repair, search and rescue studies in infrastructure and industrial facilities; many studies have been carried out in the field of continuous robots on different mechanical designs and kinematic solutions from to this day.

In this study, a new type of compact and modular tendon-driven continuum robot which has six degrees of freedom, end-effector positioning precision and payload carrying capacity, capable of wrapping/unwinding, can surround and navigate by adjusting its own shape thanks to its flexible connections, overcome obstacles, pass through winding paths and capable of trajectory tracking was designed and analyzed.

Keywords: Continuum robot, tendon driven, manipulator, degree of freedom

2024, 77 pages

1. GİRİŞ

“Çünkü her aracımız, Daidalos'un yaptığı heykeller ya da kendiliklerinden Tanrıların toplantısına giren Hephaistos'un tekerlekli sehpaları gibi, biz söyleyince ya da gerektiğini kendisi görerek işlerini yerine getirebilseydi, dokuma tezgahının mekiği kendiliğinden gidip gelse, lirin mızrabı kendiliğinden çalsaydı, o zaman ne yapımcıların işçiye gereksinmesi olurdu ne de efendilerin köleye” (Aristoteles, M.Ö-4. yy./2022, s.15)

Antik çağda Aristoteles'in bu sözleri yazdığı günden bugüne binlerce yıl boyunca insanoğlu, söylenince ya da kendiliğinden hareket eden, gerektiğinde işlerini kendileri gören eşyalar, araçlar, kendiliğinden çalışan dokuma tezgahları ve enstrümanlar düşünmüş ve hayal etmiştir.

İnsanoğlu, tarihi gelişim süreci içerisinde geliştirmiş olduğu teknikler neticesinde, son birkaç yüzyılda ve özellikle sanayi devrimi ile birlikte Grekçede kendi kendine anlamına gelen “Auto” kavramı sonrasında Leh dilinde köle işçi anlamına gelen “Robot” kavramı ve günümüzde de artık yapay zeka ile birlikte, gerektiğinde kendiliğinden iş gören tezgah, makine, cihaz ve sistemleri hayata geçirebilmektedir.

Bir bilincin, gerçek dünyada efektif ve adaptif davranışlar sergileyebilmesi için çevreyle etkileşime geçme yeteneği olan bir bedene sahip olması gerekir. Bedenlenmiş zekanın uyarlanabilir davranışlar sergileyebilmesi ise vücut morfolojisi, duyu-motor kontrolü ve çevre ile arasındaki karmaşık ve dinamik etkileşimden ortaya çıkmaktadır.

Mantıksal karar verebilme, yargıda bulunabilme ve sonrasında gerçek zamanlı olarak eyleme dökebilme bağlamında akıl ve bir bilince sahip olma ayrıcalığında olan insan, sahip olduğu bu yeteneklerini tasarlamış olduğu robotlara kazandırmakla belki de kendisini aşması anlamındaki geldiği son nokta olan yapay zeka çalışmaları ile kendiliğinden ve kendi gerek gördüğünde eylemde bulunabilme yetisine sahip akıllı robotlar geliştirmeye devam etmektedir.

Bu kapsamda, insan-robot etkileşimi, dil, dil üzerinden mantık, dilin matematiksel ifadesi olarak çok değerli mantık çalışmalarıyla birlikte robotların bir zeka veya bilince sahip olması veya öyle davranabilmesi ile ilgili çalışmalar artık multidisipliner ve interdisipliner alanlar olarak çalışılmaktadır.

Gelişen teknoloji ile birlikte robotlar sadece sanayi ve endüstride değil günlük hayatımızın her alanında çeşitli şekillerde hızla yerini almakta ve almaya devam etmektedir. Belirli ve tekrarlayan görevleri yerine getiren geleneksel tip endüstriyel robotlar, yapıları ve mekanik tasarımları gereği, yörünge izlemesi bakımından sahip oldukları kısıtlar, sınırlı hareket kabiliyetleri ve esneklikleri, karmaşık, dar ve düzensiz ortamlarda çalışamama, uzaktaki bir hedefe ulaşamama ve güvenlik gibi nedenlerle kullanım alanlarında yetersiz kalabilmektedir.

Günümüzde, gelişen ve değişen endüstriyel ve teknolojik ihtiyaçlar göz önüne alınarak sürekli robotlar tasarlanmıştır. Burada süreklilik kavramı; uç işlevcisinin çalışma uzayında eğrisel bir yörünge takip edebilmesi olarak ifade edilmektedir. Bu robotlar, çalışma uzayındaki engellere çarpmadan rahatlıkla hareket edebilirler. Eğrisel yörünge takibini gerçek zamanlı olarak yapabilecekleri gibi robotun etraftaki engellere çarpmayacağı bir görev yolunun planlanmasıyla da gerçekleştirebilirler.

Bu çerçeve doğrultusunda sürekli robotlar genel olarak, eklem sayısı olarak sonsuz ve iki bağlantı noktası arası mesafe (link) sınıra yaklaşacak şekilde tanımlanabilirler.

Sürekli robotlara serbestlik derecesi kazandıran doğrusal, döner ya da bunların bileşiminden oluşan kısımlarına eklem denir. Eklemler, link adı verilen ve iki eklemi birbirine bağlayan doğrusal ya da doğrusal olmayan uzuvlarla birbirlerine bağlanırlar. Eklemler vasıtasıyla birbiri ardına uç işlevcisine kadar bağlanan linklerin her biri bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir.

Linklerin ve nihayetinde uç işlevcisinin dışsal aktüatörler ile tahrik edilen tendonlar, çubuklar veya itilen/çekilen araçlar vasıtası ile kontrol edilebilen sürekli robot tasarımları olduğu gibi, biyo-esinli sürekli robotlar da yapılmakta olup aralarında fil hortumu, yılan benzeri, ahtapot kolu gibi bir omurga sistemi formunda olan, konumlandırılması ve yönlendirilmesi bu omurga üzerinde yerleşik bulunan içsel aktüatörler (pnömatik veya hidrolik) ile hareket ettirilebilen sürekli robotlar üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır. (Russo ve ark., 2023)

Bir sürekli robotun tipik olarak genel şekli, robotun bir ucunda veya tabanında bulunan çalıştırma ve kontrol donanımını içeren kısmı ile sürekli robotun ana yapısal bileşeni olan ve temel unsuru olarak bükülmeyi ve hareket etmesini sağlayan omurgası olarak ifade edebileceğimiz kısımdır. Söz konusu omurga kısmı, esnek bir yapıya sahip tek bir gövde elemanından oluşabileceği gibi rijit ve ardışık olarak birbirine eklemlenmiş birçok parçadan da oluşabilmektedir.

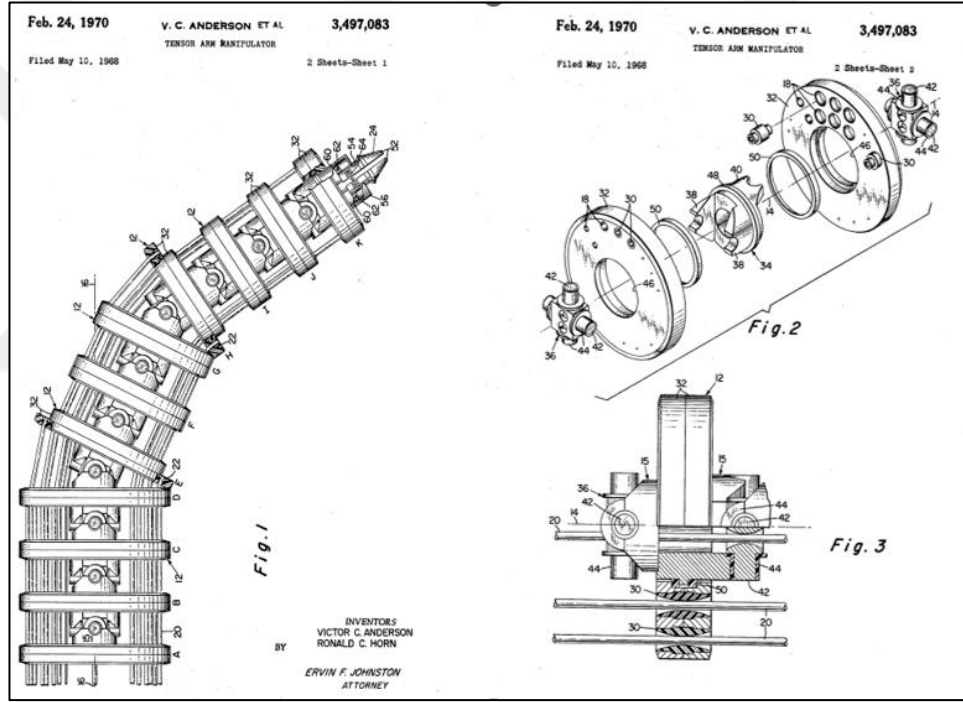
Bu tez çalışmasında, üniversal mafsallar aracılığı ile birbirine bağlanan üç linke sahip manipülatör ve aktüatörlerin konumlandırıldığı tahrik ünitesinden oluşan altı serbestlik dereceli Tendon Tahrikli Sürekli Robot tasarımı yapılmıştır. Kompakt ve modüler bir yapıya sahip olması amaçlanan tasarımın, uç işlevcisi konumlandırma hassasiyetine, faydalı yük taşıma kapasitesine sahip olması, yörünge takibi yaparak çalışma alanlarında dolambaçlı yollardan geçebilmesi ve karşılaştığı engelleri aşabilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışma; literatür araştırması ve sürekli robotlarının sınıflandırılmasının yapıldığı genel bilgiler bölümünden, literatür araştırması doğrultusunda kinematik analiz, konum, yönelim, koordinat sistemleri, transformasyon matrisleri ve çok gövdeli sistem dinamiğinin açıklanarak yapılan tasarımın modellenmesi, tendon uzunluklarının hesaplanması, statik ve dinamik analizinin yapılması ile ilgili materyal ve metot bölümünden, elde edilen denklemler ve yapılan analizler neticesinde ulaşılan sonuçların tablo ve grafikler ile açıklandığı araştırma bulguları ve tartışma ile sonuç ve öneriler bölümlerinden oluşmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Literatür Araştırması

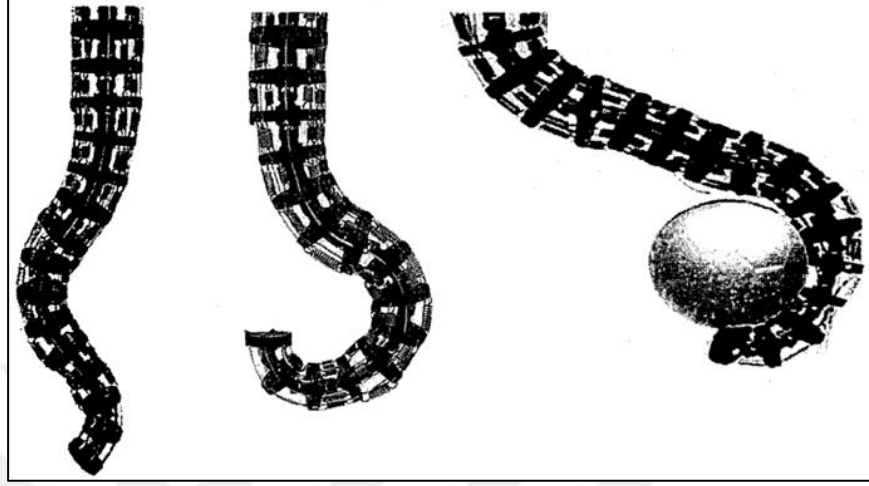
1960'ların sonlarında (Anderson ve Horn, 1970) Sealab-I ve Sealab-II projelerinde okyanus tabanından veri toplanması amacıyla geliştirdikleri ancak bilgi işlem ortamının kısıtlı olması nedeniyle su altı uygulamaları için hayata geçirilemeyen tensör kolu manipülatörü ile başlayan sürekli robot çalışmaları ilerleyen yıllarda esnek kavrama ve hareket kabiliyetlerinden esinlenilerek fil hortumu, ahtapot bacağı, yılan benzeri olmak üzere farklı yapılara sahip birçok biyo-esinli manipülatör geliştirildi.



Şekil 2.1.1. Tensör Kolu Manipülatörü (Anderson ve Horn, 1970)

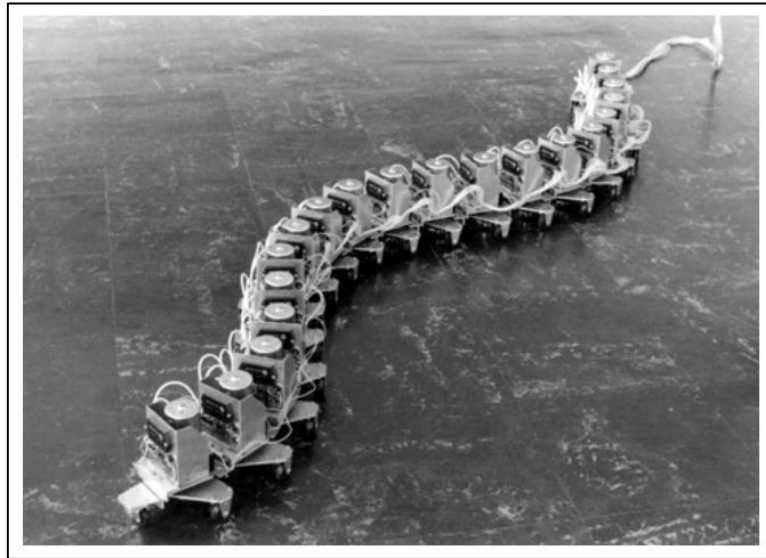
Walker ve ark. (1999) tarafından, bölümlü bir omurgaya sahip, hareketi ve yönlendirilmesi bir dizi tendon aracılığıyla sağlanan ve işlevsel olarak fil hortumuna benzer yetenekleri olan, çok sayıda şekle girebilen, çevreye kolayca uyum sağlayabilen manipülatörün, tasarımı, kinematiği, yetenekleri, kavrama ve manipülasyon potansiyeli üzerinde çalışmalar yapıldı.

İlerleyen yıllarda yine Walker ve ark. (2005) tarafından Air-Octor adını verdikleri sürekli omurga yapısında ve hortum içi hortum konseptinde yenilikçi tasarımlar üzerinde de çalışmalar gerçekleştirildi.



Şekil 2.1.2. Fil Hortumu Manipülatörü (Walker ve ark., 1999)

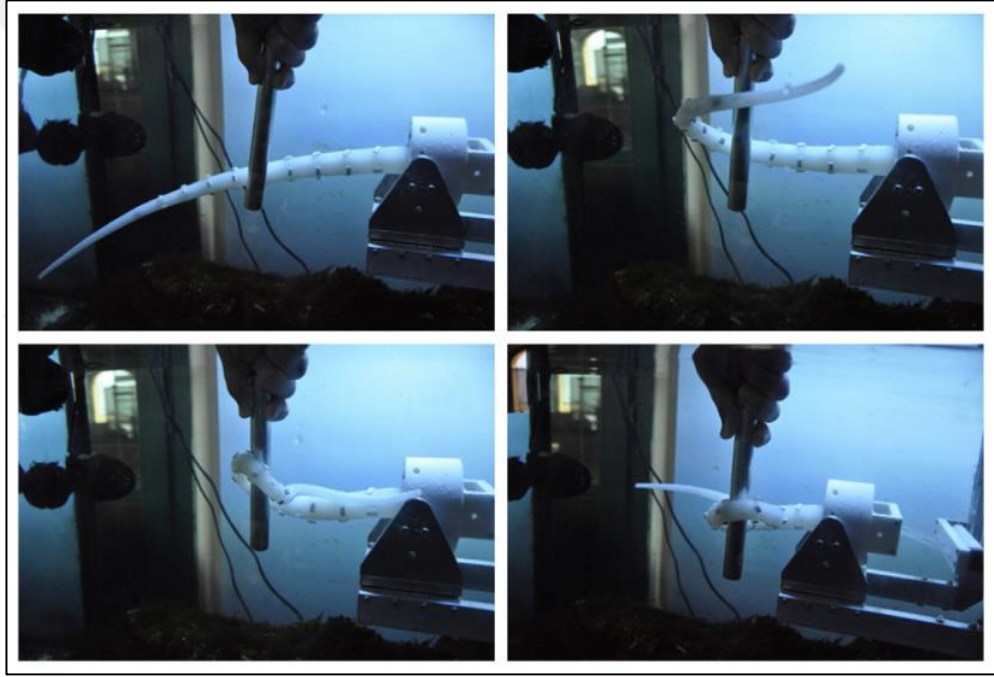
1970'li yıllardan itibaren üzerinde çalışılan biyo-esinli manipülatörlerle ilgili olarak Hirose ve Mori (2004) kendi kendine kıvrılarak bir şeyi tutabilen ve aynı zamanda sürünerek hareket edebilen yılan benzeri robot tasarladılar.



Şekil 2.1.3. Yılan Benzeri Manipülatör (Hirose ve Mori, 2004)

Gerçek dünyadaki davranışların vücudun morfolojisi ile ne kadar ilgili olduğu konusunda güzel bir örnek olan ahtapot, özel morfolojisi nedeniyle sahip olduğu yüksek el becerisi, kollarının yapısı, etkili sinirsel kontrol mekanizmaları ve hareket kabiliyetleri ile mevcut herhangi bir robotun çok ötesindedir. El becerileri ve sertliklerinin değişkenliği nedeniyle ahtapot kolu robotik kollar için ilham kaynağı olmuştur.

Ahtapotun en önemli özelliklerinden biri de kollarının özel bir kas yapısına sahip olmasıdır. Kas hidrostatlara adı verilen bu yapıların temel özelliği, kas kasılmaları sırasında hacimlerinin sabit olmasıdır. Ahtapot kolunun kas hidrostati artarsa kolun uzunluğu azalır veya bunun tam tersi de gerçekleşebilir.



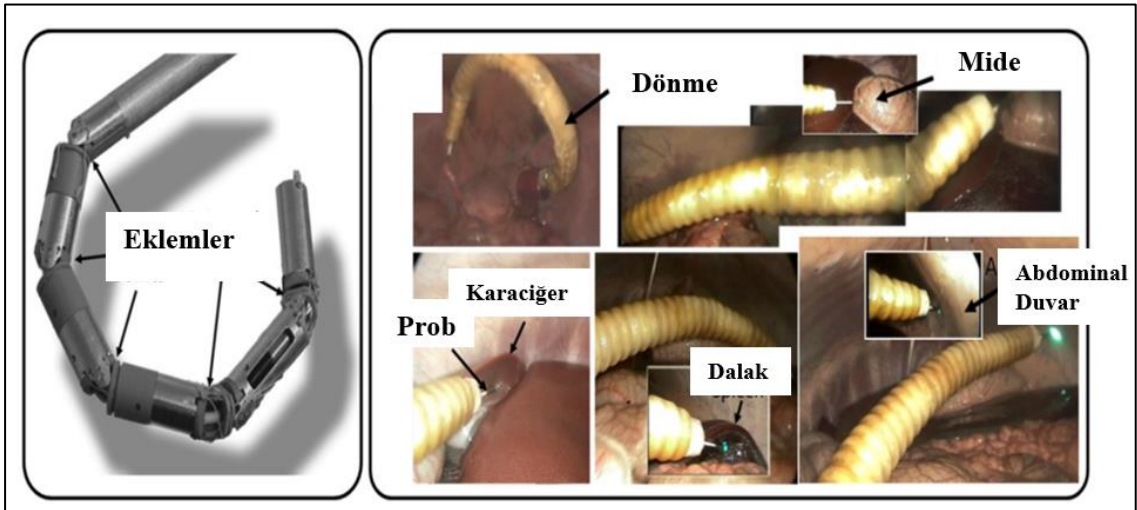
Şekil 2.1.4. Ahtapot Kolu Manipülatörü (Cianchetti ve ark., 2011)

Cianchetti ve ark. (2011) biyomekanik üzerine biyolojik teorilerden ilham alınarak ahtapot kolu üzerinde yapılan çalışmada, yeni bir robotik ahtapot kolunun geliştirilmesi ve tasarımı, kolun uzama/kısalma mekanizması ve bükülme hareketi için ihtiyaç duyulan malzemelerin tespiti ve basma/çekme testleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar neticesinde, %60 oranında uzama, (enine kabloları çekerek ve çaplarını azaltarak) %20 ve %30 oranında kısılma (uzunlamasına kabloları çekerek) sağlanmıştır.

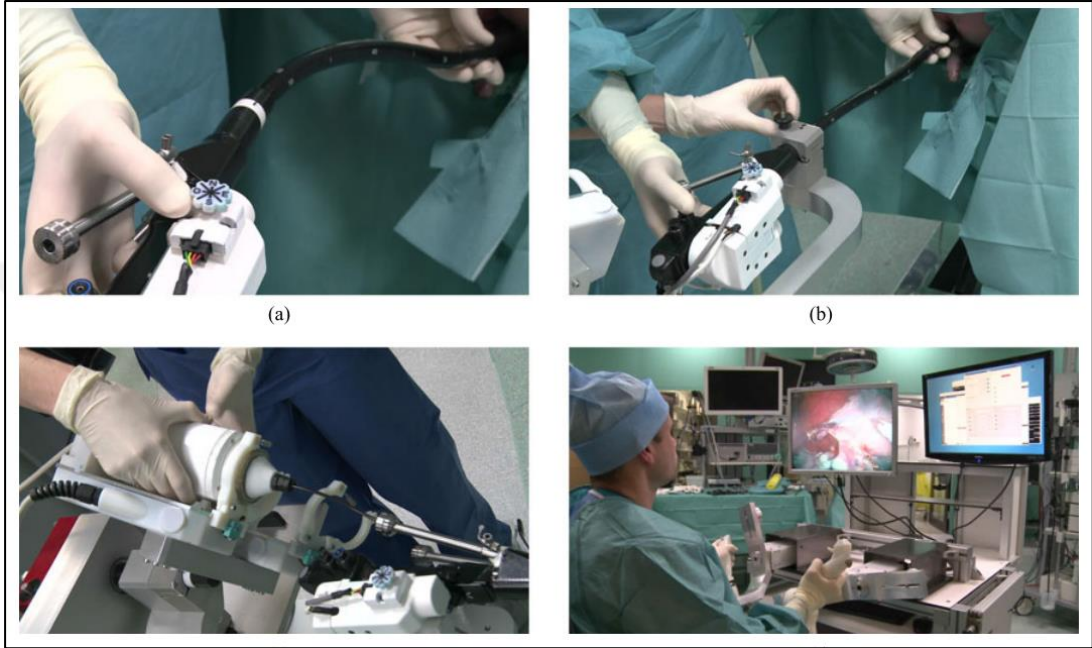
Chirikjian ve ark. (1990) tarafından sürekli robotların modellenmesi ve kinematik analizleri üzerine önemli çalışmalar yapılmıştır. Yüksek serbestlik derecesine sahip sistemlerin kinematik analizi için yeni geliştirilen yöntemler ve çeşitli alanlara uygulanabilirliği, morfolojileri, verimli yol planlamaları, hareket ve kavrama şemaları, geometrik tasarımları gözden geçirilmiştir.

Tıbbi uygulamalar kapsamında minyatürleştirilmesine odaklanılan sürekli robotların minimal invaziv cerrahi alanında kullanılması ile ilgili olarak, Noonan ve ark. (2011) tarafından yapılan mikro-motora sahip olan yedi serbestlik dereceli sürekli robotun konum doğruluğu ve kuvvet/tork iletimi özellikleri ile ilgili çalışmalar ile birlikte, manipülatörün etkin çalışma alanını artırmak, ve harekete geçirmede doğrusal olmayan durumlarını düzeltmek, geliştirmek ve manipülatör performansı artırmak amacıyla Conrad ve ark. (2017) tarafından çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 2.1.5. Minimal İnvaziv Cerrahi (Noonan ve ark., 2011)

Tıbbi uygulamalarda cerrahlar için kullanımı oldukça zor olan standart endoskoplara yönelik Zorn ve ark. (2018) endoskop manipülasyonunu geliştirmek için çözüm yöntemi olarak sürekli robotları belirledi ve STRAS adı verilen uzaktan kumandalı robotik cihazı, cerrahi endoskopi sırasında cerrahlara yardımcı olmak amacıyla geliştirdi.



Şekil 2.1.6. Cerrahi Endoskopi (Zorn ve ark., 2018)

Chen ve ark. (2008) mevcut kolonoskopik prosedürün karmaşıklığını azaltmak için Colobot adını verdikleri tıbbi uygulamalara çok uygun olan küçük alanda yüksek el becerisi ve ameliyat uygulaması sağlayan yeni bir robotik uç tasarladılar. Bu yeni robotik uç yeni bir tür sürekli robot prensibine dayanmaktaydı. Önemli bir cerrahi araç olan ve çeşitli kolon hastalıklarını teşhis eden geleneksel kolonoskoplardan hastaya daha az rahatsızlık vermesi amacıyla Hu ve ark. (2009) tarafından her bölümünde 2 serbestlik derecesi bulunan toplam 10 serbestlik derecesine sahip yılan benzeri yeni bir kolonoskop geliştirildi.



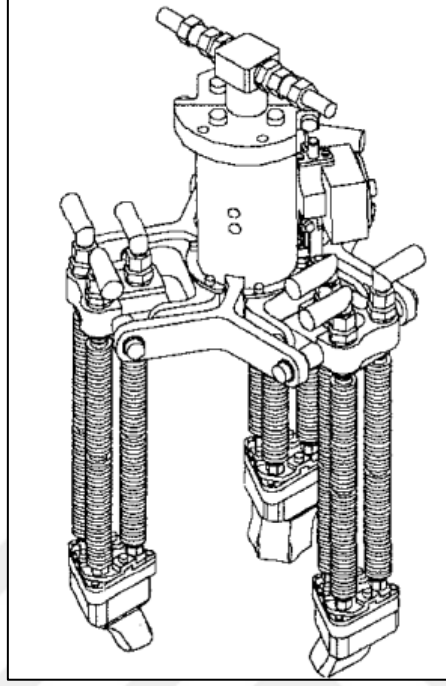
Şekil 2.1.7. Kolonoskopi (Hu ve ark., 2009)

Degani ve ark. (2006) epikardiyal müdahaleleri içeren prosedürler için cerrahi uygulamadaki sınırlamaların üstesinden gelmek için HARP adını verdikleri, yılan benzeri yapısından dolayı dar alanlarda hareket edebilen minimal düzeyde etkileşim halindeyken anatomik ortam yolu boyunca perikardiyal boşlukta ilerleyebilen robotik prob geliştirdiler.

Sadece birkaç on yılda cerrahi robotik alanı dünya çapında hızla büyüyen bir araştırma alanına dönüştü ve cerrahi robotlar artık giderek artan sayıda prosedürde yer alarak pratik klinik potansiyellerini ortaya koyuyorlar. Yalnızca tek bir giriş kesisiyle karmaşık müdahaleleri gerçekleştirebiliyor ve doğal anatomik yollarda gezinebiliyorlar. El becerisini kolaylaştırıyor ve cerrahi adımların gerçekleştirilmesine olanak sağlıyorlar. Hücresel düzeyde mikro görüntüleme teknikleri, cerrahların yeteneklerini önemli ölçüde genişletiyorlar.

Cerrahi robotikteki önemli başarılar, robotların gelecekte daha güvenli, daha küçük ve daha akıllı olmaları yönündeki araştırma ve yönelimleri olumlu yönde etkilemektedir. (Bergeles ve Yang, 2014)

Sürekli robotların su altı uygulamalarına yönelik Lane ve ark. (1997) tarafından AMADEUS adını verdikleri su altı robotu geliştirildi.



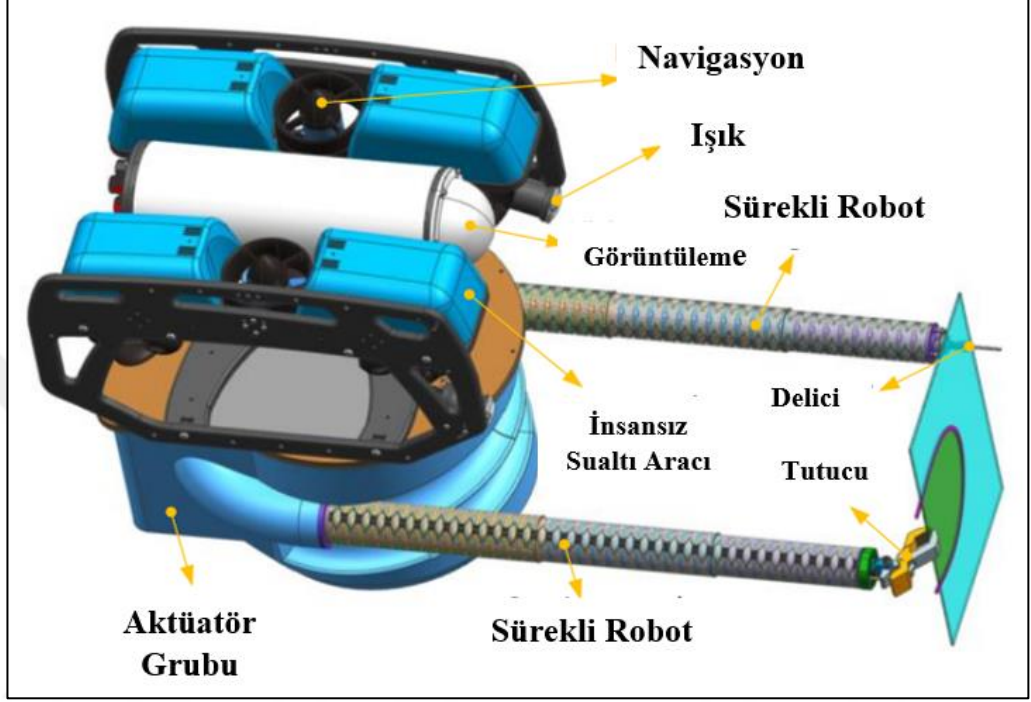
Şekil 2.1.8. Amadeus (Lane ve ark., 1997)

Hidrolik basınç değişimleri sayesinde üç esnek borunun (körüük) her birinde oluşan bükülme momenti ile hareket eden AMADEUS'un ilk uygulama odağı deniz bilimi görevleri içindi ancak açık deniz petrol ve gaz aramaları, denizaltı kurtarma ve askeri olarak kullanımı da öngörülmekteydi.

Wang ve ark. (2020) tipik olarak katı robotlar tarafından gerçekleştirilemeyen bükülebilir, yutabilen, boşaltma yapabilen su altı uyumlu, çok bölümlü okyanus keşif teknolojisi ve su altı görüntüleme kabiliyetlerine sahip bir süreklilik manipülatörü geliştirilmiştir.

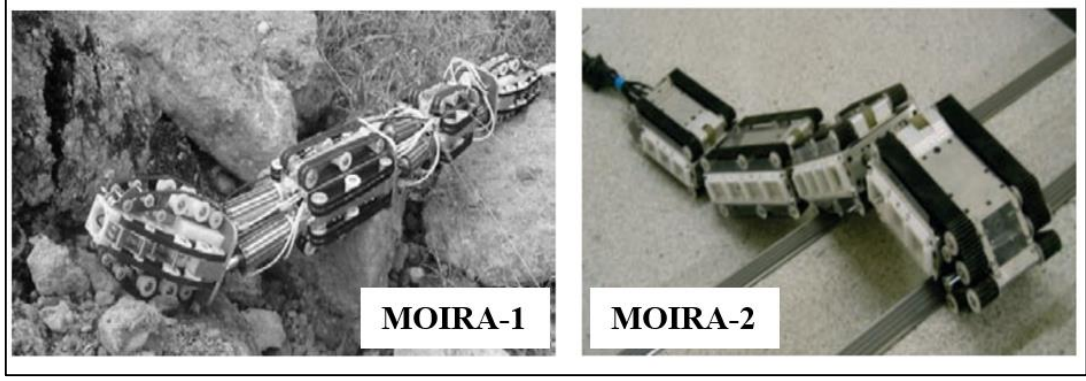
Li ve ark. (2023) konum tespiti ve sınıflandırma maksadıyla yakın kızılötesi spektral veriler kullanılarak deniz altında mevcut moleküllerin niceliksel analizi için kompakt yapısı sebebiyle deniz mineral tespiti yapabilecek sürekli robot geliştirdiler.

Ma ve ark. (2022) tarafından eş zamanlı olarak kullanılabilen 6 serbestlik dereceli iki adet koldan oluşan sürekli robot sistemi geliştirildi. Çift kollu sürekli robot ile ticari insansız su altı aracının birleştirilmesinden oluşan sistem, birçok su altı mühendisliği senaryosunda ve karmaşık görevlerde konuşlandırılabilir.



Şekil 2.1.9. Çift Kollu Sürekli Robot ve İnsansız Su Altı Aracı (Ma ve ark., 2022)

Sürekli robotların arama kurtarma faaliyetlerinde kullanılması maksadıyla Aoki ve ark. (2002) aktif kordon mekanizmasına sahip dar alanlarda hareket edebilen, çöken evlerin altı ve fabrikalardaki boru hatlarının denetimi gibi çeşitli görevlerin gerçekleştirilmesinde kullanılabilecek yeni bir yılan benzeri robot konseptini tanıttılar. Haraguchi ve ark. (2005) daha önce tasarladıkları ve MOIRA adını verdikleri arama kurtarma robotunun deneyimine dayanarak onun gelişmiş versiyonu olan molozlara dalma yeteneğine sahip olan MOIRA-2'yi geliştirdiler.



Şekil 2.1.10. Moira-1 ve Moira-2 (Haraguchi ve ark., 2005)

Suzuki ve ark. (2012) aktif elastik gövdeli, çok tekerlekli, yılan benzeri kurtarma robotu geliştirdiler. İto ve Murai (2008) kurtarma operasyonları için kullanım kolaylığı sağlayan, uyarlanabilir yılan benzeri robot tasarladılar. Kawai ve ark. (2014) daha önceki yılan benzeri modellerine stabilizasyon sistemi geliştirip uygulayarak yeni bir kurtarma robotu tasarladılar.



Şekil 2.1.11. Stabilizasyon Sistemine Sahip Arama Kurtarma Robotu (Kawai ve ark., 2014)

Robotik muayene ve bakımlarda, altyapılarda ve endüstriyel tesislerde farklı kontrollerin sayısı nedeniyle robotların çalışabileceği senaryolar önem kazanmaktadır. Bu tür görevleri gerçekleştirmek için robotik sistemlerin kullanılması çalışanların güvenliği açısından oldukça önemlidir.

Bu bağlamda, uzun erişimli tendon tahriki ile kontrol edilen ve tanklar ve gemiler gibi ulaşılması zor alanları ve tehlikeli ortamları denetlemek için Canali ve ark. (2012) tarafından, SLIM adını verdikleri muayene ve bakım için yılan benzeri manipülatör geliştirildi.

Wang ve ark. (2021) uçak motoru bakım çalışmalarında kullanılmak üzere, mevcut bakımların kapsamlı demontajını gerektirmeyeceğinden maliyetleri önemli ölçüde azaltabilecek, uç işlevcisinin gezinmesinin oldukça zor olduğu kısıtlı ortamlarda (örn. yanma odası) çok eksenli hareketlerin gerçekleştirilmesiyle kapalı ortamların içinde/dışında gezinmek için 16 serbestlik derecesi sahip ekstra ince sürekli robot bakımı önermişlerdir.

Havacılık ve uzay endüstrisinde genel bakım ve onarımların süresini ve maliyetlerini azaltmak, uçak motorları uçak gövdelerine bağlıyken bakım/onarım ve muayene faaliyetlerini gerçekleştirmek amacıyla Dong ve ark. (2017) tarafından gaz türbinli motorlar gibi uç efektörün yönlendirilmesinin oldukça zor ve çok kısıtlı olduğu ortamlarda çalışabilecek esnek, ince, düşük çap/uzunluk oranlarına sahip sürekli robot geliştirildi.

Yerinde bakım görevlerini gerçekleştirebilmek için navigasyon ve uç işlevcisinin etkinleştirilmesine yönelik bir dizi yenilikçi kontrol algoritması geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Uçak motoru üreticilerine çözüm sağlamada ileri bir adım olarak değerlendirilebilecek robot, karmaşık görevleri invaziv bir şekilde gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır.

Elektrikli araçların şarj edilmesinde sürekli robotların kullanımı ve geliştirilmesi ile ilgili olarak son yıllarda Tesla Motor (CBC, 2015) herhangi bir insan yardımı olmaksızın aracın şarj portuna bağlanan yılan benzeri insansız elektrikli araç şarj robotunun prototip çalışmalarına devam etmektedir.

Volkswagen Grup (Volkswagen Group News, 2020), önümüzdeki birkaç yıl içinde şarj altyapısını genişletmeyi umduğu ileri görüşlü şarj konseptlerinden biri olan mobil şarj robotunun prototipleri üzerinde çalışmalarına devam etmektedir.

Yer altı otoparkları gibi kısıtlı park alanlarında araçları tamamen otonom olarak şarj edebilecek olan mobil şarj robotu, şarj edilecek araca bağımsız olarak ulaşarak, şarj soketi kapağının açılmasından fişi takmaya ve ayırmaya kadar onunla iletişim kurarak, şarj işleminin tamamını hiçbir insan müdahalesi olmadan gerçekleştirebilecek ve şarj hizmeti sona erdiğinde bağımsız olarak mobil enerji depolama ünitesini toplayarak merkezi şarj istasyonuna geri götürebilecek.



Şekil 2.1.12. Tesla İnsansız Araç Şarj Robotu (CBC, 2015)

Sürekli robotlar üzerine yapılan araştırmalardaki son yıllarda yaşanan artış, tasarım, modelleme ve kontrol yöntemleri, imalat, malzeme ve teknolojik gelişmeler kapsamlı olarak incelendiğinde, bu robotların karakterize edildikleri birtakım özellikleri ile sınıflandırılması yapılabilmektedir.

Bu bakış açısı ile sürekli robotlar, konumlandırılması ve yönlendirilmesi omurgası üzerinde yerleşik bulunan içsel aktüatörler ile hareket ettirilebilen biyo-esinli sürekli robotlar ve tahrik sistemleri genellikle omurganın tabanında bulunan dışsal aktüatörlü sürekli robotlar olarak tahrik sistemlerinin konumlandırılmalarına göre iki ana başlık altında sınıflanlandırılabilirler.

2.2. Sürekli Robotların Sınıflandırılması

2.2.1. İçsel Aktüatörlü Sürekli Robotlar

İçsel aktüatörlü sürekli robotlar, omurga şekli üzerinde doğrudan yerel kontrol edilebilme özellikleri ile karakterize edilir. İçsel aktüatörlü sürekli robotların ortak çalışma teknolojileri, genellikle pnömatik olarak tercih edilen basınçlı bir çalışma sıvısı prensibine dayanır, ancak şekil hafızalı alaşımlar, dielektrik aktüatörler ve diğer akıllı materyaller de kullanılabilir.

Yerleşik yani sürekli robotun omurgası üzerinde bulunan aktüatörler genellikle robot boyutunu büyütürken onu küçük ölçekli uygulamalar için uygunsuz hale getirir. Bununla birlikte dışsal tahrikli tasarımlarla karşılaştırıldığında, daha iyi bir kuvvet aktarım verimliliği ve dolayısıyla potansiyel olarak daha yüksek taşıma kabiliyeti elde edilebilir.

2.2.1.1. Akışkan Kas Sürekli Robotları

Akışkan kas robotları, kendinden tahrikli antagonist davranış gösteren soft bölmelere basınçlı akışkan gönderilmesi yoluyla hareket ettirilirler. Basınçlı akışkan gönderilen körük benzeri bu soft odacıklar, canlılardaki antagonist kasların davranışlarını taklit ederek şişme ve sönme yaparak sürekli robotun omurgasını bükürler.



Şekil 2.2.1.1.1. Akışkan Kas Sürekli Robotu

2.2.1.2. Soft Büyüyen Sürekli Robotlar

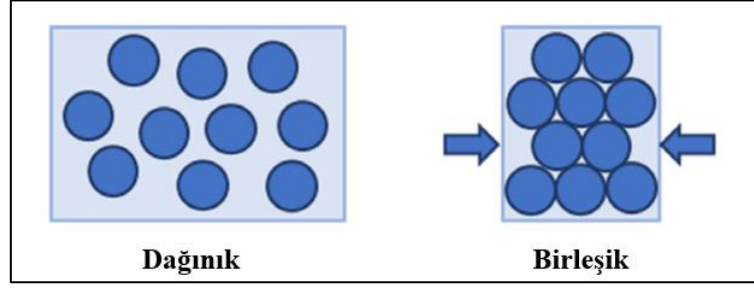
Soft büyüyen robotlar, kendinden tahrikli inovatif ve yenilikçi bir tasarımdır. Eversiyon yetenekleri sayesinde omurgalarının uzunluğunu önemli ölçüde uzatma yeteneğine sahiptirler.

Soft büyüyen robotlarda büyüme, iç içe geçmiş iki boru tipi yapı kullanılarak sağlanır. Dış yüzeyi sabit ve iç yüzeyi hareket edebilir olan bu yapıların yüzeyleri arasında oluşturulan basınç farkından dolayı uçta bir ters dönme hareketi meydana gelir ve böylece robotun toplam uzunluğu artar.



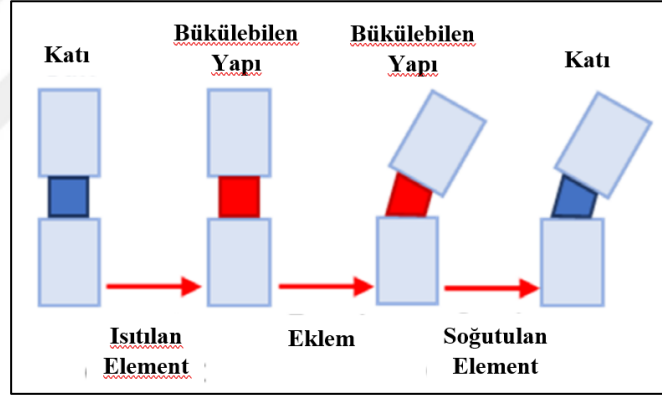
Şekil 2.2.1.2.1. Soft Büyüyen Sürekli Robot

İçsel aktüatörlü sürekli robotların omurgalarının sertleştirilmesi üzerinde çeşitli teknolojiler geliştirilmiştir. Malzeme sıkıştırma bunlardan biridir. Granüler bir ortam veya ince tabakalarla doldurulmuş bir membrana vakum uygulandığında membran dolgu maddesinin üzerine çöker ve malzemenin yoğunluk ve sertliği artar. Basıncı düşürülmüş membranda serbestçe hareket edebilen taneli bir yapı oluşurken basınçlandırılmış membranda hareketi kısıtlanan taneli yapı oluşmaktadır.



Şekil 2.2.1.2.2. Basıncı Düşürülmüş/Basınçlandırılmış Membran

Ayrıca düşük erime noktasına sahip malzemelerin bir faz değişimine kadar ısıtılması ile termal aktivasyon neticesinde sürekli robotların omurgalarında boyut ölçeklendirme yapılabilmektedir. Ancak gerekli aktivasyon ve soğutma süresi gerçek zamanlı uygulamaları engelleyebilmekte ve bunun sonucunda ortaya çıkan termal alan robotun performansını etkileyebilmektedir.



Şekil 2.2.1.2.3 Termal Aktivasyon

Fiziksel olarak bağlı bir aktüatör tahriki olmadan manyetik aktüatörler ile çalıştırılabilen sürekli robot çalışmalarına devam edilmekte olup yakın gelecekte muhtemel gelişmelerin olması beklenmektedir.

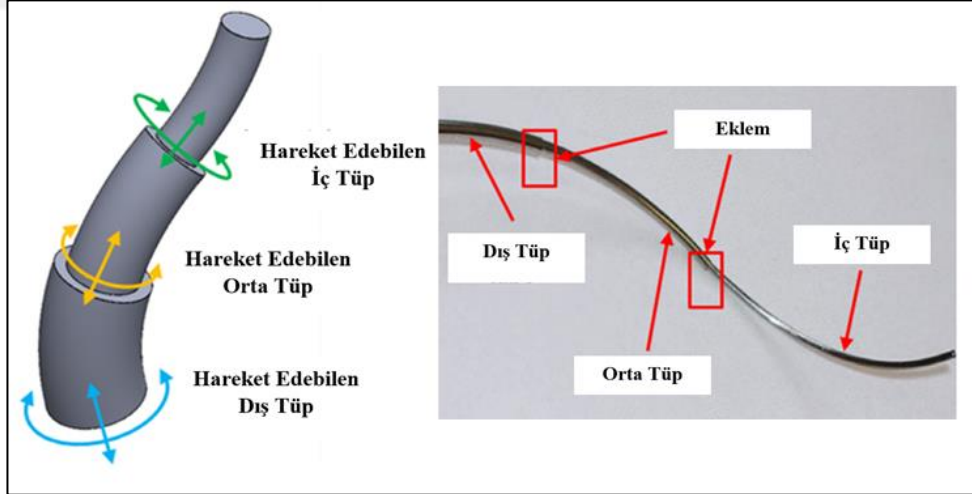
2.2.2. Dışsal Aktüatörlü Sürekli Robotlar

Dışsal kontrol ve aktüatör ünitesine sahip sürekli robotlarda hareket, omurganın tabanından başlar ve mekanik elemanlarla omurga boyunca iletilir. Dışsal aktüatörlü sürekli robotlar, belirli iletim elemanlarıyla karakterize edilir.

2.2.2.1. Eş Merkezli Tüp Sürekli Robotları

Eş merkezli tüp sürekli robotları, iç içe geçmiş çapı azalan ve uzunluğu artan kavisli tüplerden yapılmıştır. Birbirleriyle elastik olarak etkileşime giren bu tüpler tabanda bulunan aktüatörler tarafından her tüpün döndürülmesi ve ötelenmesi ile kontrol edilirler.

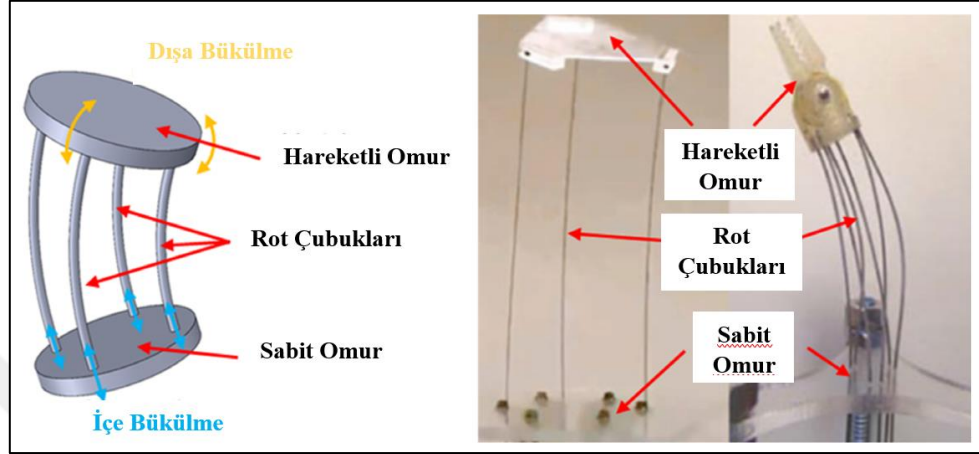
Dış çaplarının küçük olması nedeniyle cerrahi uygulamalara uygundur ancak elastik yapıları nedeniyle omurga uzunluğu arttıkça uç işlevcisi konumlandırma hataları artmaktadır.



Şekil 2.2.2.1.1. Eş Merkezli Tüp Sürekli Robotu

2.2.2.2. Rot Tahrikli Sürekli Robotlar

İstenilen uç efektör pozunu, omurga görevi gören çubukların çekilmesi ve itilmesiyle sağlar.

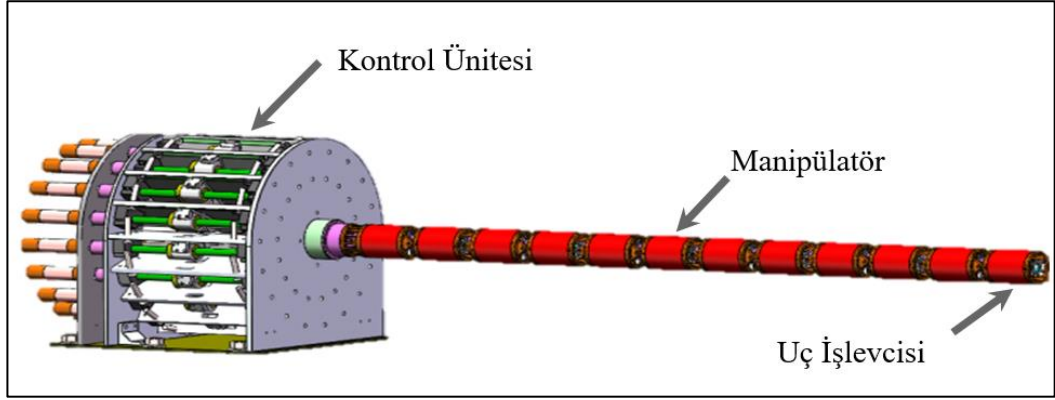


Şekil 2.2.2.2.1. Rot Tahrikli Sürekli Robot

Eş merkezli tüp ve rot tahrikli sürekli robotların dışında bu tez çalışmasının da konusu olan, hareket iletilebilen bağ anlamında tendonların kullanıldığı tendon tahrikli sürekli robotlar bulunmaktadır.

2.3. Tendon Tahrikli Sürekli Robotlar

Tendon tahrikli sürekli robotlar, birbiri ardına seri olarak bağlanmış linklerden oluşan omurga yani manipülatör kısmı ile aktüatörlerin bulunduğu tahrik ünitesinden oluşmaktadır. (Xu ve ark., 2020; Tang ve ark., 2019)

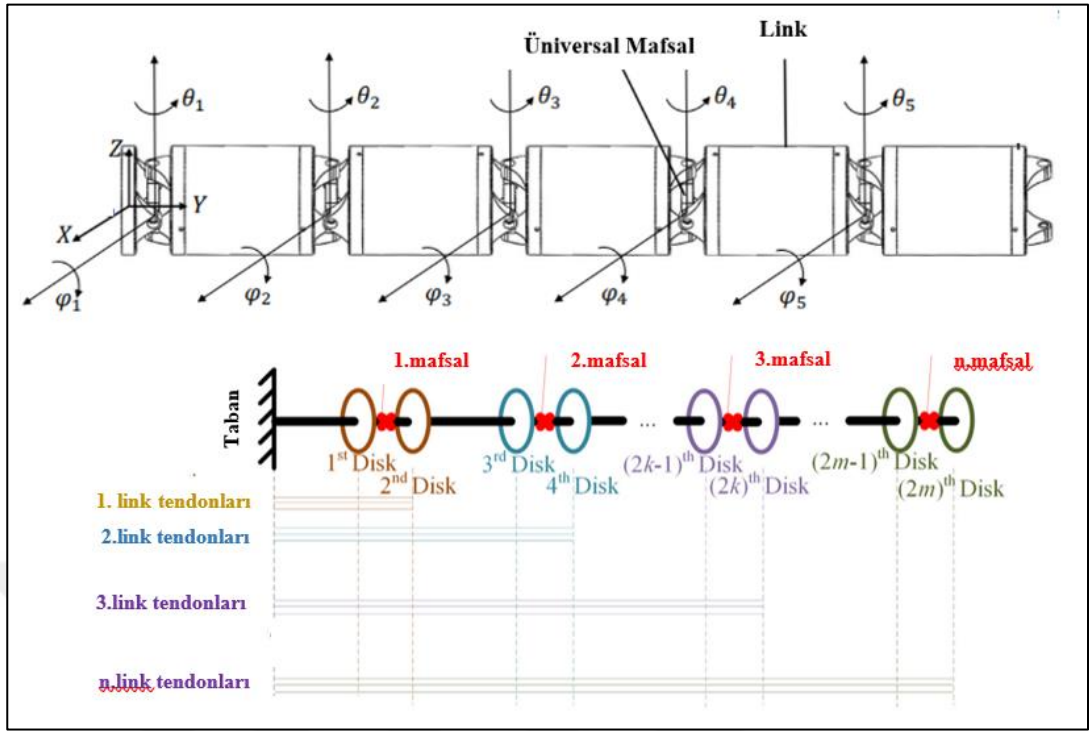


Şekil 2.3.1. Tendon Tahrikli Sürekli Robot (Tang ve ark., 2019)

Burada manipülasyon terimi, nesnelerin bir amaç doğrultusunda yerinden alınması, taşınması, montajı ve yerleştirilmesini ifade etmekte olup bu işlemleri gerçekleştirebilen mekanizmalar ise manipülatorler olarak adlandırılmaktadır.

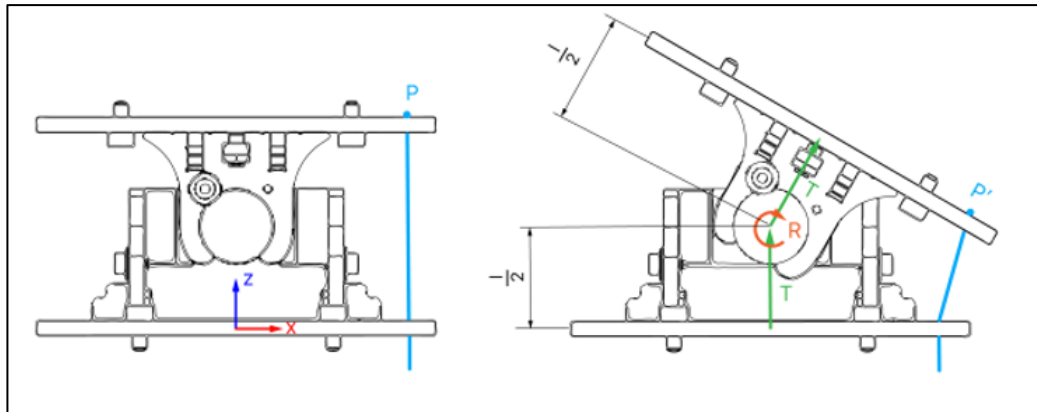
Manipülator yani “robotik yönlendirme” ile anlatılmak istenen aslında uç işlevçisinin yönlendirilmesidir. Uç işlevçisinin hareketini tamamen kontrol edip istenilen bir yörüngeyi takip ettirmek ise hareket planlaması için temel araştırma konusudur.

Manipülatorlere serbestlik derecesi ekleyen doğrusal, dönel ya da bunların bileşiminden oluşan kısımlarına eklem denir. Seri manipülatorler, linklerin, eklemlerle birbiri ardına uç işlevcisine kadar bağlandığı ve her bir linkin bağımsız olarak kontrol edilebildiği mekanizmalardır.



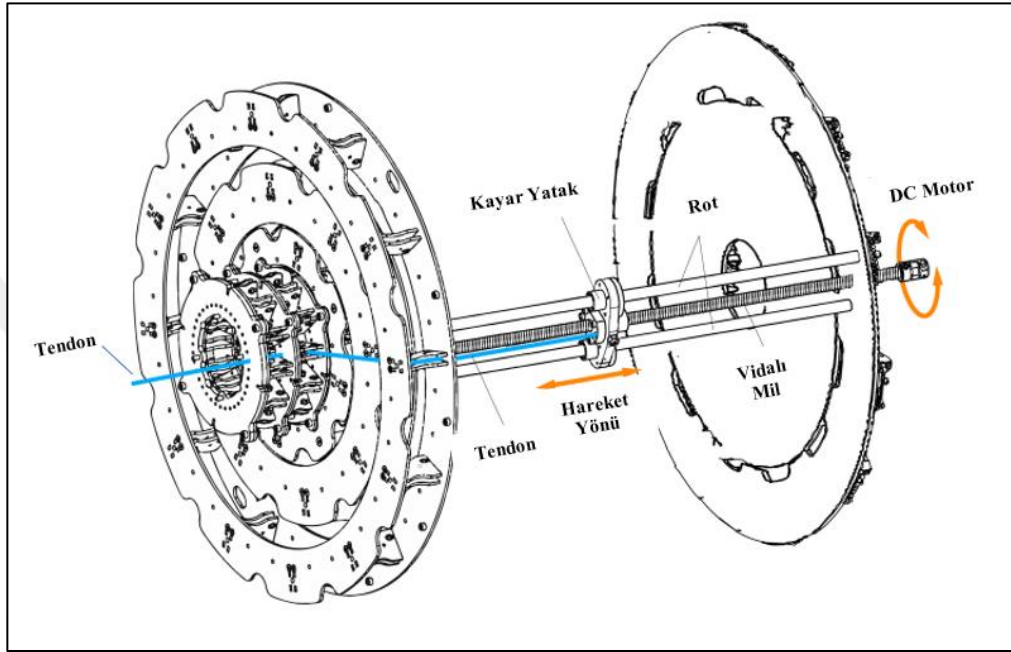
Şekil 2.3.2. Linklerin ve Eklemlerin Seri Olarak Bağlanması ve Tendonların Linklere Bağlantı Şeması (Qin ve ark., 2020)

Tendonlarla kontrol edilen ve her biri 2 serbestlik derecesine sahip üniversal mafsallar ile birbirine rijit olarak bağlı linkler, tendonların bağlı oldukları kontrol ünitesinde bulunan aktüatörler yardımıyla hareket ettirilirler. Qin ve ark. (2020)



Şekil 2.3.3. Link Tendon Bağlantısı (Martin-Barrio ve ark., 2020)

Tendon yapısı olarak, kablo, çelik tel, elastikiyet kabiliyetine sahip kauçuk ve silikonlar, şekil hafızalı metal alaşımlar gibi birçok materyalin kullanıldığı ve genellikle her bir linkin yönlendirilmesi ve kontrolünde üç veya dört tendonun kullanıldığı tendon tahrikli manipülatör uygulamaları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. (Tang ve ark. 2017; Huang ve ark. 2021)



Şekil 2.3.4. Kontrol Ünitesi Tendon Tahrik Mekanizması (Martin-Barrio ve ark., 2020)

Her tendonun, sürekli robotun tahrik sisteminde bulunan DC motorun çevirdiği vidalı mil üzerinde yataklanan ve ileri geri hareket edebilen yatağa bağlanması sayesinde, DC motorun dönmesi neticesinde yatağın ve dolayısıyla tendonun çekilmesi veya bırakılması sonucunda kontrol sağlanır. Martin-Barrio ve ark. (2020)

Manipülatörün her bir linkinin açısal olarak kontrol edilmesi ve sonuç olarak uç işlevcinin konum ve yöneliminin bulunması amacıyla kinematik denklemler kullanılmaktadır.

2.4.Tendon Tahrikli Sürekli Robotların Kinematığı

Yapısal olarak birbirinden bağımsız olarak hareket edebilen, öteleme ve dönme hareketi gerçekleştirebilen eklemlerle, bu eklemleri birbirine birleştiren linklerden oluşan manipülatörlerin konum, hız ve ivme analizleri, nesnelerin devinimiyle ilgilenen hareket bilimi olan kinematik ile yapılır. Kinematik ile uç işlevcisi ve eklemler arasında bir ilişki tanımlanır.

2.4.1. İleri Kinematik

Manipülatöre yerleştirilen sabit (referans) eksen takımına göre uç işlevcisinin konum ve yöneliminin bulunması ileri yön kinematığıdır. Sabit eksen takımından, uç işlevcisine yerleştirilen eksen takımına doğru, birbirine dönel veya prizmatik eklemlerle birleştirilmiş seri bağlar arasındaki ilişki, bir homojen dönüşüm matrisiyle ifade edilir. Homojen dönüşüm matrislerinin art arda çarpılmasıyla, sabit eksen takımı ile uç işlevcisi eksen takımı arasında bir ilişki tanımlanır. Genel olarak ileri kinematik, eklem değişkenlerinin verilmesiyle uç işlevcisinin konumunun ve yöneliminin sabit eksen takımına göre bulunmasıdır.

Her bir eklemin konumu ve yönelimi bir önceki veya bir sonraki ekleme göre ifade edilebilir. Arka arkaya oluşturulan bu kinematik zincir, manipülatörün konum ve yönelim bilgisini içeren 4x4 boyutlu homojen dönüşüm matrislerinden oluşmaktadır. Her eklemin bir önceki ve bir sonraki eklem ile olan ilişkisi homojen dönüşüm matrisleri ile tanımlanır.

2.4.2. Ters Kinematik

Uç işlevcisinde bulunan eksen takımının, sabit eksen takımına göre konum ve yönelimi bilindiğinde, manipülatörün bu konum ve yönelime ulaşması için gerekli olan açı setlerinin hesaplanması ters kinematik olarak tanımlanır.

Ters kinematikte elde edilen denklemlerin doğrusal denklemler olmamasından dolayı bu denklemlerin çözümleri oldukça karmaşıktır. Doğrusal olmayan denklemlerin çözümü tekil olmayıp birden fazla çözümleri bulunabilmektedir.

2.4.3. Konum, Yönelim ve Koordinat Sistemleri

Robotlar da kendileri ve çevrelerindeki nesnelere gibi içinde buldukları üç boyutlu uzayda hareket ederler. Bu durumun ifade edilebilmesi için robotların ve çevrelerindeki nesnelere göre konum ve yönelim tanımlamalarının yapılması gerekir. Üç boyutlu uzayda, konum ve yönelimlerin belirlenebilmesi amacıyla robotlara ve çevrelerindeki tüm nesnelere koordinat sistemleri yerleştirilir. Nesnelere ve bu nesnelere yerleştirilen tüm koordinat sistemleri evrensel koordinat sistemi içerisinde bulunur. Tanımlanan bütün konum ve yönelimler evrensel koordinat sistemi içerisindeki kartezyen koordinat sistemlerine göre gerçekleşir.

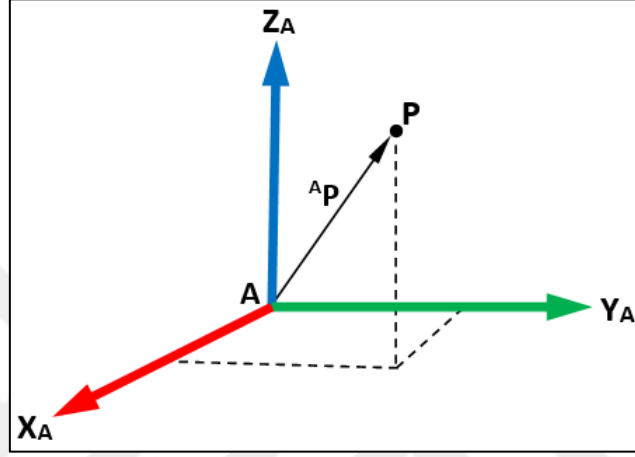
2.4.3.1. Noktanın Konumu

Öklides'in içinde yaşadığımız evreni anlama ve açıklama çabası içerisinde aksiyom ve postulat setleri ile kurduğu geometride, bir cebirsel ifade ile bu ifadenin geometrik gösterimi arasındaki ilişkiyi Descartes analitik olarak kartezyen koordinat sistemi ile açıklamıştır.

Descartes'in kartezyen koordinat sisteminde, cebirsel olarak ifade edilen bir noktanın geometrik gösterimi yapılabilirken aynı yöntemle bir geometrik şekil de cebirsel olarak ifade edilebilmektedir.

$${}^A P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Kartezyen koordinat sistemi içerisinde bir nokta, üzerine tanımlanan bir koordinat sistemi ile üç boyutlu uzayda herhangi bir yere konumlandırılabilir. Bu nokta, tanımlandığı koordinat sisteminin merkezine göre 3×1 boyutlu bir vektör ile cebirsel olarak denklem 2.1'de görüldüğü gibi ifade edilir. Noktanın, tanımlandığı koordinat sisteminin merkezine olan sayısal ifadesi, x , y ve z eksenlerine olan uzaklığı ile tanımlanır.

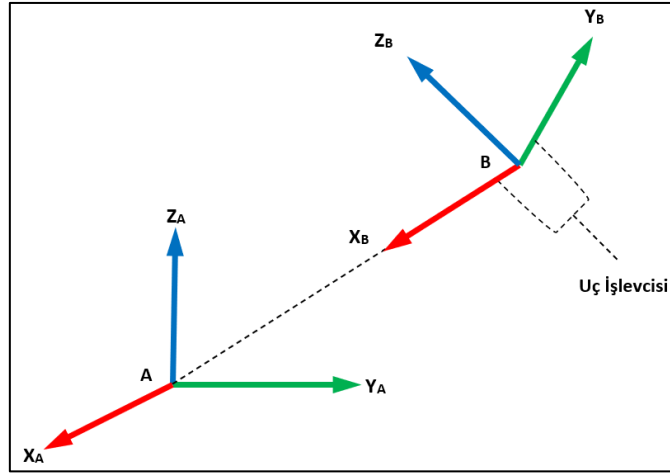


Şekil 2.4.3.1.1. Kartezyen Koordinat Sisteminde Noktanın Konumu

2.4.3.2. Bir Cismin Yönelimi

Kartezyen koordinat sistemine göre konumu tanımlanan noktanın aynı şekilde yöneliminin de tanımlanması gerekir. Tanımlı bir koordinat sisteminin referans alınan koordinat sistemine göre dönme miktarı yönelim olarak tanımlanır ve matematiksel olarak 3×3 boyutlu dönme (rotasyon) matrisi denilen bir matris ile ifade edilir.

Bir cismin referans koordinat sistemine göre yöneliminin tanımlanabilmesi için o cisme bir koordinat sistemi yerleştirilir. Örneğin aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi bir robotun uç işlevcisine B koordinat sistemi yerleştirilerek, A referans koordinat sistemine göre yönelimi tanımlanabilir.



Şekil 2.4.3.2.1. Uç İşlevcisinin A Koordinat Sistemine Göre Yönelimi

B koordinat sistemini, uç işlevcisine üzerine yerleştirilen birim vektörler kullanarak aşağıdaki denklemde görüldüğü gibi ifade edebiliriz.

$$B = \hat{X}_B, \hat{Y}_B, \hat{Z}_B, \quad (2.2)$$

B koordinat sistemine ait birim vektörleri de A koordinat sistemi cinsinden denklem 2.3'te görüldüğü gibi ifade edebiliriz.

$$B = {}^A \hat{X}_B, {}^A \hat{Y}_B, {}^A \hat{Z}_B \quad (2.3)$$

Bu ifadeyi ise 3x3 boyutlu bir matrisle aşağıdaki denklemle gösterilebilir.

$${}^A_B R = [{}^A \hat{X}_B, {}^A \hat{Y}_B, {}^A \hat{Z}_B] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'te ifade edilen 3x3 boyutlu bu matris, dönme (rotasyon) matrisidir. Bu rotasyon matrisi, B koordinat sisteminin yönelimini A koordinat sistemine göre ifade eder ve ${}^A_B R$ (B rotasyon A) notasyonu ile gösterilir. ${}^A_B R$ matrisi, B koordinat sisteminin A koordinat sistemine göre x, y, z eksenlerindeki dönme miktarını gösterir.

${}^A_B R$ matrisinin her sütunu bir birim vektördür ve bu birim vektörler B koordinat sisteminin eksenlerinin doğrultusunu A koordinat sistemine göre tanımlar.

B koordinat sistemi ve A koordinat sistemlerinin orijinlerinin çakışık ve yönelimlerinin de aynı olması durumunda; B koordinat sisteminde yer alan \hat{X}_B birim vektörünün yöneliminde, ${}^A_B R$ matrisinin a_{11} elemanı, \hat{X}_B ile \hat{X}_A arasındaki açının kosinüsü alınarak bulunur. Koordinat sistemlerinin merkezlerinin çakışık olması nedeniyle \hat{X}_B ile \hat{X}_A üst üste olduğundan aralarındaki açı '0' derecedir. Bu durumda, B koordinat sisteminde yer alan X_B birim vektörünün yönelimi A koordinat sistemine göre denklem 2.6'da görüldüğü gibi ifade edilir.

$${}^A \hat{X}_B = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |X_B| \cdot |X_A| \cdot \cos \alpha_{AB} \\ |X_B| \cdot |X_A| \cdot \cos \beta_{AB} \\ |X_B| \cdot |X_A| \cdot \cos \gamma_{AB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |X_B| \cdot |X_A| \\ |X_B| \cdot |X_A| \\ |X_B| \cdot |X_A| \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Ortogonal koordinat sistemlerinde, koordinat sisteminde bulunan tüm birim vektörler birbirlerine dik olmaları nedeniyle birim vektörler arasındaki açılar 90° 'dir. Bu durumda;

$$R = [\hat{X}, \hat{Y}, Z] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

denklem 2.7'de tanımlanan ortogonal bir dönme matrisinin dikgenlik ve birim özellikleri aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\begin{aligned} \hat{X} \cdot \hat{X} &= 1 & \hat{Y} \cdot \hat{Y} &= 1 & \hat{Z} \cdot \hat{Z} &= 1 \\ \hat{X} \cdot \hat{Y} &= 0 & \hat{X} \cdot \hat{Z} &= 0 & \hat{Y} \cdot \hat{Z} &= 0 \\ |\hat{X}| &= 1 & |\hat{Y}| &= 1 & |Z| &= 1 \end{aligned}$$

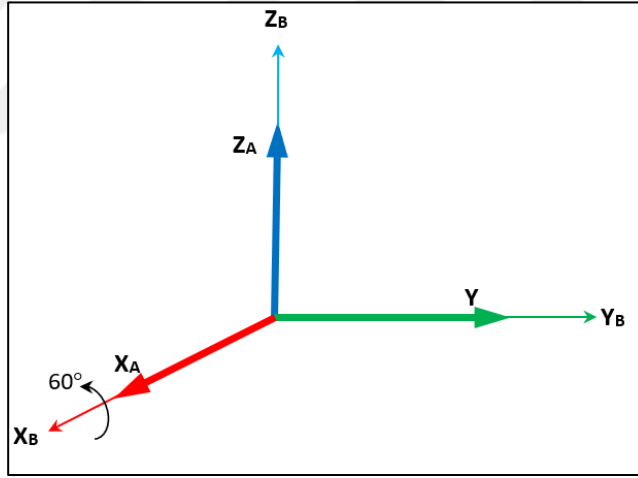
Bu durumda ;

$$\begin{aligned} a_{11} &= |X_B| \cdot |X_A| \cdot \text{Cos}\alpha_{AB} \\ &= 1.1 \cdot \text{Cos}0 \\ &= 1 \text{ olarak bulunur.} \end{aligned} \quad (2.8)$$

${}^A_B R$ dönme matrisi aşağıdaki gibi yazılır.

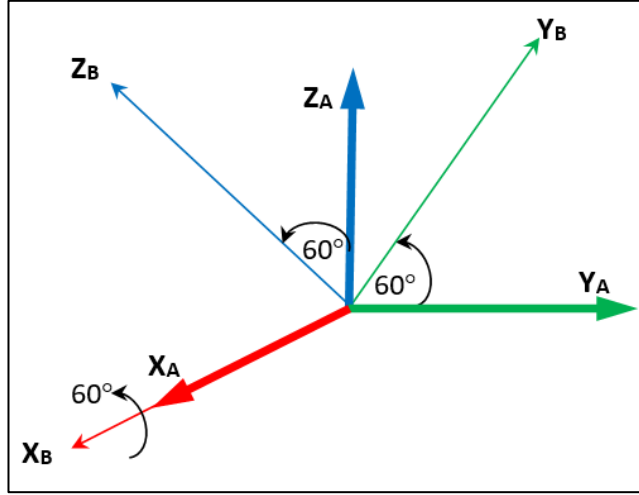
$${}^A_B R = \begin{bmatrix} |X_B| \cdot |X_A| \cdot \text{Cos}\alpha_{AB} & |Y_B| \cdot |X_A| \cdot \text{Cos}\alpha_{AB} & |Z_B| \cdot |X_A| \cdot \text{Cos}\alpha_{AB} \\ |X_B| \cdot |Y_A| \cdot \text{Cos}\beta_{AB} & |Y_B| \cdot |X_A| \cdot \text{Cos}\beta_{AB} & |Z_B| \cdot |X_A| \cdot \text{Cos}\beta_{AB} \\ |X_B| \cdot |X_A| \cdot \text{Cos}\gamma_{AB} & |Y| \cdot |X_A| \cdot \text{Cos}\gamma_{AB} & |Z_B| \cdot |X_A| \cdot \text{Cos}\gamma_{AB} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

${}^A_B R$ dönme matrisinin diğer elemanları da aynı şekilde bulunur. Örneğin, merkezleri çakışık ve üst üste olan B koordinat sisteminin A koordinat sistemine göre X ekseninde 60° döndürülmesi neticesinde;



Şekil 2.4.3.2.2. Bir Cismin Referans Koordinat Sistemine Göre Döndürülmesi

$${}^A_B R = \begin{bmatrix} 1.1 \cdot \text{cos}0 & 1.1 \cdot \text{cos}90 & 1.1 \cdot \text{cos}90 \\ 1.1 \cdot \text{cos}90 & 1.1 \cdot \text{Cos}\beta_{AB} & 1.1 \cdot \text{Cos}\beta_{AB} \\ 1.1 \cdot \text{cos}90 & 1.1 \cdot \text{Cos}\gamma_{AB} & 1.1 \cdot \text{Cos}\gamma_{AB} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$



Şekil 2.4.3.2.3. Bir Cismin X - Ekseni Etrafında Döndürülmesi

$${}^A_B R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 60 & \cos 150 \\ 0 & \cos 30 & \cos 60 \end{bmatrix} \text{ denklemini elde edilir.} \quad (2.10)$$

Yukarıda x ekseninde dönmenin belirtildiği ve gösterildiği şekilde genel olarak x, y ve z eksenlerindeki dönme rotasyon matrisleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir.

X ekseninde α açısı kadar dönme rotasyon matrisi:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

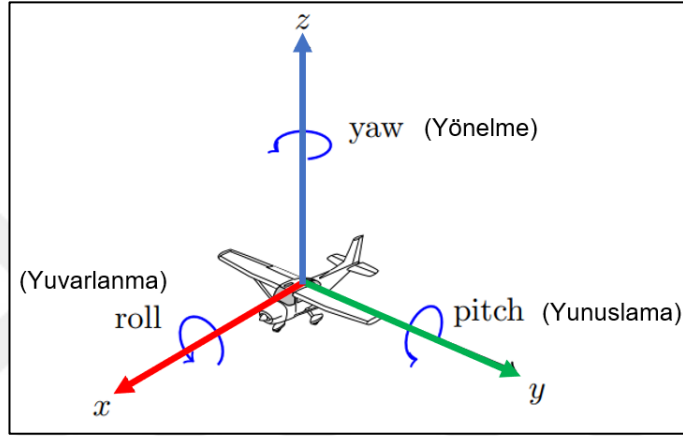
Y ekseninde β açısı kadar dönme rotasyon matrisi:

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Z ekseninde γ açısı kadar dönme rotasyon matrisi:

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Üç koordinat eksenini etrafında üç rotasyon dizisi geleneksel olarak yuvarlanma, yunuslama ve yönelme olarak adlandırılır.



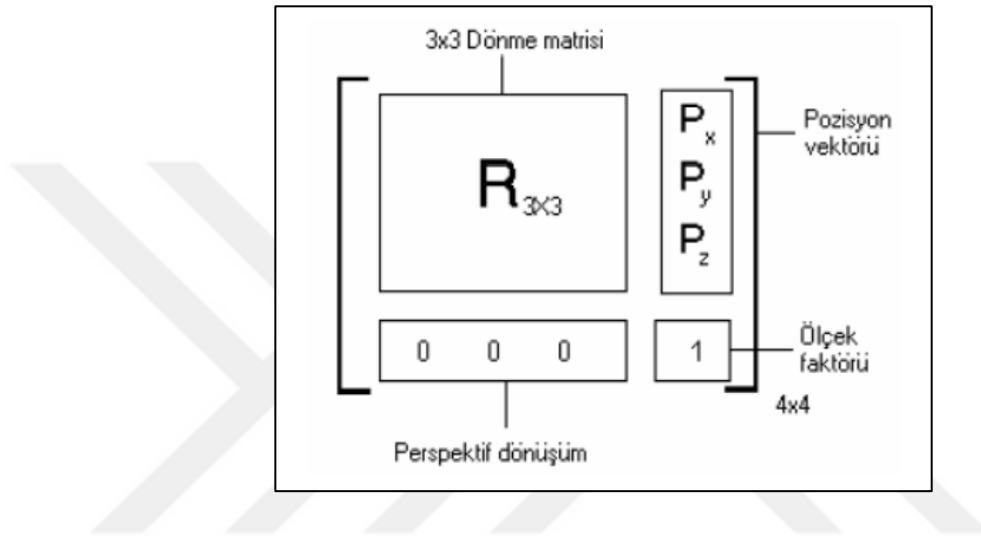
Şekil 2.4.3.2.4. Açısal Yer Değiştirme Gösterimi

Elde edilen bu dönme (rotasyon) matrisleri sadece bir eksen etrafında dönmeyi ifade etmek için kullanılır. Aynı zamanda ötelenmenin de incelenebilmesi için transformasyon (dönüşüm) matrisleri olarak ifade edilen homojen dönüşüm matrislerini kullanılır.

2.4.3.3. Transformasyon Matrisleri

Transformasyon matrisleri aşağıda görüldüğü gibi dönme matrisleri ve yer değiştirme vektöründen oluşmaktadır.

$$\text{Transformasyon Matrisi} = \begin{bmatrix} R & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Şekil 2.4.3.3.1. Transformasyon Matrisi Gösterimi

Burada, iki eksen takımı arasındaki dönmeyi gösteren dönme $R(3 \times 3)$ 'lük matris (rotasyon) matrisidir. $P(3 \times 1)$ 'lik matris referans eksen takımına göre dönen eksen takımının orijininin konum vektörünü, $F(3 \times 1)$ 'lik matris perspektif dönüşümünü, $W(1 \times 1)$ 'lik matris ise ölçek faktörünü gösterir.

İleri yön kinematiğinde eklem dönüşüm matrislerinin art arda çarpılmasıyla, referans koordinat sistemi ile uç işlevcisi koordinat sistemi arasındaki ilişki aşağıdaki denklemlerle tanımlanır. (Bingöl ve Küçük, 2017, s. 23-53)

$${}^0T_N = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \dots {}^{N-1}T_N$$

$${}^0T_N = \prod_{i=1}^n T_i^{i-1} \quad (2.14)$$

2.5. Çok Gövdeli Sistem Dinamiği

Çok gövdeli sistem, rijit veya deforme olabilen birden fazla gövdenin belirli bir tasarım altında birbirine bağlanarak bir araya getirilmesinden oluşan sistemdir. Endüstriyel makineler, silah sistemleri, robotik, havacılık, uzay sanayi, ulaşım, biyoloji ve diğer birçok mühendislik alanlarında çok gövdeli sistem bulunmaktadır.

Bu tür karmaşık sistemlerin dinamik özelliklerinin ve performansının doğru ve hızlı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Mevcut mühendislik altyapısı altında, karmaşık çok gövdeli sistemler için temel olarak teorik modelleme, sayısal analiz, tasarım optimizasyonu, kontrol vb. konuları inceleyen, çok gövdeli sistem dinamiği olarak adlandırılan yeni mekanik dalı ortaya çıkmıştır.

1960'lı yıllardan itibaren modern mekaniğin önemli bir gelişme yönü haline gelen çok gövdeli sistem dinamiği ile ilgili olarak geçtiğimiz yarım yüzyılda karmaşık sistemlerinin dinamik modellemesi ve sayısal çözümü üzerine yapılan araştırmalar ve gelişmelerle olgunlaşmıştır.

Çok gövdeli sistem dinamiği, gerçek bir mühendislik sistemini, çoklu rijit-esnek gövdeli mekanik modele soyutlamak, mühendislik problemlerinin ihtiyaçlarını belirlemek ve ardından ilgili kinematiği tanımlamak ve son olarak dinamik denklemleri oluşturmak için uygun bir yöntemdir. Sürekli ortam mekaniği, hesaplamalı mekanik ve doğrusal olmayan dinamikler gibi birçok teori ve yöntemi içerir.

Çok gövdeli sistemlerde esnek ve rijit parçaların bağlantı türleri birleşik sistemin genel dinamik davranışını önemli ölçüde etkileyebilir. Bu bağlamda, son yıllarda özellikle kirişlerden ve rijit cisimlerden oluşan çok gövdeli sistemleri ele almak için birçok teori öne sürülmüştür. (Liu ve ark., 2021)

Çok gövdeli sistemlerin dinamik modellemesinin esası, gövde kinematiğinin açıklanması ve dinamik denklemlerin çıkarılmasıdır. Varsayım modu yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi, sonlu segment yöntemi ve ağırsız yöntem gibi yöntemlerden uygun bir yöntem seçildikten sonra gövdeler, farklı referans çerçeveleriyle tanımlanabilir.

Hareketli referans çerçeve ve sonlu elemanlar yöntemi, esnek gövdenin kinematik tanımını oluşturmak için yaygın şekilde kullanılır ve birçok ticari yazılımına uygulanmıştır. Zamanla değişen doğrusal olmayan esnek çok gövdeli sistemler için gövdenin hareketi, hareketli çerçevenin eylemsiz çerçeveye göre öteleme hareketi ve dönüşü ile tanımlanır.

Yukarıdaki belirtilen referans çerçeveleri ve kinematiklere dayanarak farklı mekanik prensipler sayesinde sistemin dinamik denklemleri farklı formlarda elde edilebilmektedir. Genel olarak dinamik denklemler, Newton–Euler vektör mekaniği yöntemi, analitik mekanik yöntemi (d’Alembert ilkesi, Jourdain ilkesi, Lagrange yöntemi, Hamilton ilkesi, vb.) transfer matris yöntemi vb. ile elde edilebilir.

Yukarıdaki yöntemlerle oluşturulan birçok gövdeli sistem için dinamik denklemler genellikle, adi diferansiyel denklemler veya diferansiyel cebirsel denklemlerdir. Yaygın olarak uygulanan transfer matrisi yöntemi yapısal mekanik ve dinamik alanında basit modelleme ve yüksek hesaplama verimliliği avantajlarına sahiptir.

Pratik mühendislik problemlerinde, imalat/ölçüm hatası, yapım düzeyi ve durum limitleri, sistemin geometrik parametreleri, malzeme özellikleri, sınır koşulları, başlangıç koşulları ve sistem yükleri gibi faktörler belirsizliklere neden olacaktır. Bu parametre belirsizliklerinin sistemin dinamik özellikleri üzerinde büyük etkisi vardır ve hatta bazı durumlarda sistemin işlev hatası vermesine neden olmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda dinamik modelleme üzerine yapılan araştırmalar ve belirsizliklere sahip çok gövdeli sistemlerin hızlı hesaplanması daha fazla ilgi gördü ve araştırma konusu haline geldi. (Rong ve ark., 2021)

Birçok endüstriyel uygulama, maliyetleri azaltmak için bilgisayar simülasyonundan yararlanır ve bu durum zaman kaybını önlediği gibi ürün geliştirme döngüsünü de kısaltır. Hesaplamalı çok gövdeli sistem dinamiğinin ve yazılım araçlarının, makine ve mekanik sistemlerin simülasyonunda özellikle yararlı olduğu kanıtlanmıştır.

Mekanik sistemlerin bilgisayar simülasyonu, son on yılda endüstriye önemli faydalar sağladı, ürün geliştirme döngülerini kısalttı ve yeni ürünlerin test edilmesi, doğrulanması ve yeniden tasarlanmasıyla ilgili maliyetleri düşürdü.

Günümüzde, çok gövdeli sistemlerdeki karmaşık uygulamalar incelenmekte, genellikle mekanik sistemlerin farklı doğadaki, fiziksel davranıştaki ve zaman ölçeğindeki diğer bileşenlerle etkileşimini dikkate alan sistem simülasyonları giderek önem kazanan bir yaklaşım olmaktadır.

Çok gövdeli sistem dinamiği araştırmalarındaki ilerlemeler, özellikle zorlu simülasyon ortamlarında, örneğin gerçek zamanlı yürütme gerektiren büyük ölçekli mekanik sistemlerde, karmaşık dinamiklerin gerçekçi modellerinin kullanılmasına olanak sağlamıştır. Günümüzde çok gövdeli sistemlerin etkin simülasyonu ve analizi için çok çeşitli yazılımlar mevcuttur. (Pieret ve ark., 2018)

Söz konusu yazılımlardan biri olan MATLAB, MATrix LABoratory kelimelerinden türetilen matris tabanlı yüksek seviye ve performanslı sayısal bir programlama dilidir. Matematik işlemlerin bilgisayar ortamında hızlı bir şekilde yapılması amacıyla geliştirilen bir programlama dili olan Matlab, tüm hesaplamalarında matris altyapısını kullanmaktadır.

Nümerik ve sembolik matematiksel hesaplamalar, programlama, algoritma geliştirme, lineer cebir, istatistik, Fourier analizi, filtreleme, optimizasyon, sayısal integrasyon, 2D ve 3D grafik çizimi, modelleme ve simülasyon (benzetim), grafiksel arayüz oluşturma, veri analizi ve kontrolü, kontrol sistemleri ve robotik gibi birçok alanda Matlab kullanılmaktadır.

Matlab/SIMULINK, blok diyagramlar halinde sistemi modellemeye, sistem davranışlarını simüle etmeye, sistem performansını değerlendirme ve tasarımı iyileştirme ve geliştirmeye imkan tanıyan ve simülasyonunu (benzetimini) gerçekleştirmeye yarayan görsel bir yazılım ortamıdır.

Simulink içerisinde bir eklenti olarak çalışan Simulink/SIMSCAPE MULTIBODY ortamı ise mekanik ve elektronik ortamları birleştiren görsel bir arka plana sahiptir.

Simulink/SIMSCAPE MULTIBODY, 3D mekanik sistemler için çok gövdeli bir simülasyon ortamı sağlar. Çok gövdeli sistemler; eklemler, kısıtlamalar, kuvvet elemanları ve sensörleri temsil eden bloklar kullanılarak modellenir. Simscape Multibody tüm mekanik sistem için hareket denklemlerini formüle eder ve çözer. Kütleler, ataletler, eklemler, kısıtlamalar ve 3D geometri dahil olmak üzere CAD montajlarını modele aktarır.

Blok diyagramlarla fiziksel bağlantılara dayalı fiziksel bileşen modelleri oluşturulur, oluşturulan fiziksel model, gövdeleri, bağlantıları ve kısıtlamaları, kuvvetleri ve torkları içerir. Gövdeleri temsil eden alt sistemleri oluşturur. Kinematik ilişkileri tanımlamak için alt sistemleri, eklemler ve kısıtlamalarla birbirine bağlar. Örneğin, mafsallı bir sistemde gövdeleri birleştirmek için eklem ve kısıtlama blokları kullanılır. Bağlantı blokları, bağlı gövdeler arasında izin verilen maksimum serbestlik derecelerini (dönme ve öteleme) belirler.

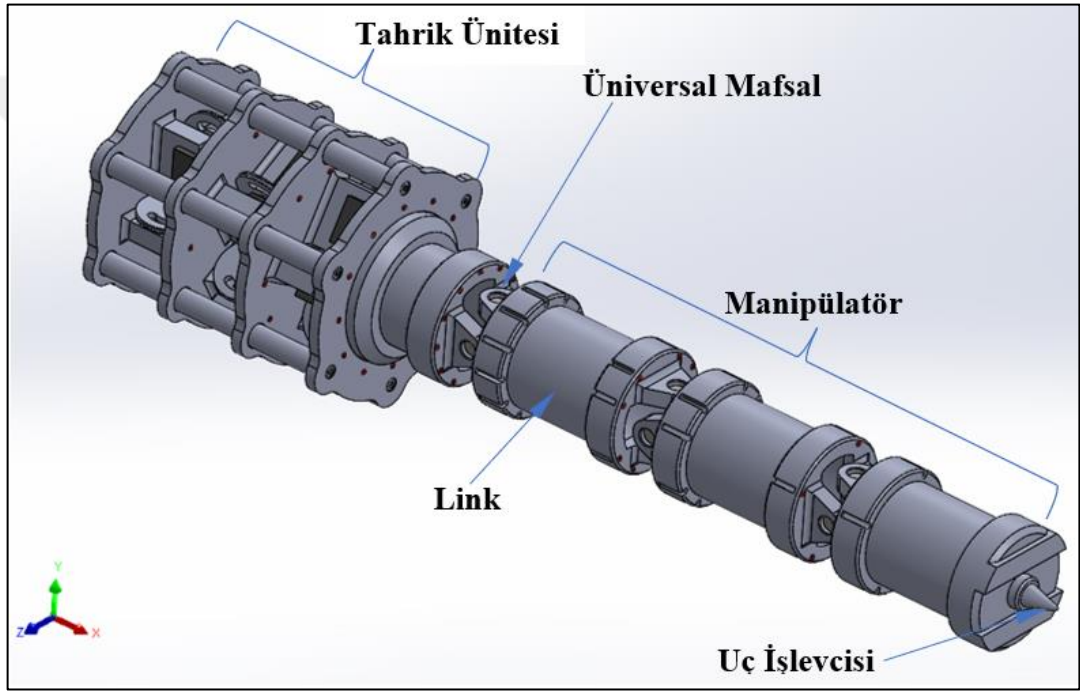
Gövdeler, uygulanan kuvvetler, torklar ve kısıtlamaların neden olduğu öteleme ve dönme hareketlerine maruz kalır, sistem bileşenlerinin dinamik tepkisini ölçmek için torklar, kuvvetler veya hareket girdileri eklenebilir. Simscape Multibody, karmaşık sistemler için çok gövdeli dinamik simülasyonları gerçekleştirir.

Bu çalışmada, tasarımı yapılan Tendon Tahrikli Sürekli robotun çok gövdeli sistem dinamiği kapsamında CAD ortamında modellenmesinde, dinamik ve statik analizlerinin yapılmasında söz konusu yazılımlardan yararlanılmıştır. Manipülatörün referans eksen takımını ile uç işlevcisi eksen takımını arasında 4x4 matris formatında oluşturulan transformasyon denklemleri ve matris çarpım sonuçları Matlab programında hesaplanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Tendon Tahrikli Sürekli Robotun Modellenmesi

Bu tez çalışmasında, altı serbestlik dereceli, üniversal mafsallar aracılığı ile birbirine bağlanan üç linke sahip manipülatörden ve bağlı oldukları tendonlar vasıtası ile linklerin konum ve yönelimlerini kontrol eden aktüatörlerin konumlandırıldığı üç segmentin bulunduğu tahrik ünitesinden oluşan Tendon Tahrikli Sürekli Robot, CAD ortamında 3D çizim programı (Solidworks) ile modellendi.

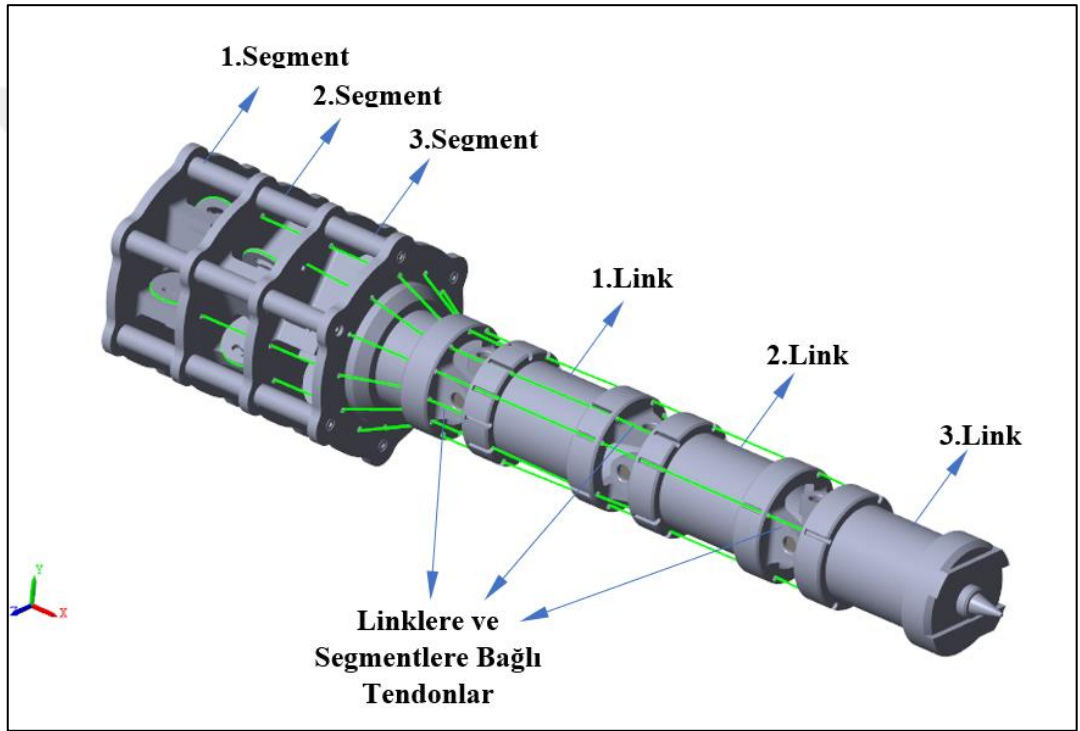


Şekil 3.1.1. Tasarımı Yapılan Tendon Tahrikli Sürekli Robot (TTSR)

Tasarlanan modelin, uç işlevçisi konumlandırma hassasiyetine, yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olmasının yanı sıra manipülâtörün kullanım alanlarında sıklıkla karşılaşılabileceği dar ve karmaşık ortamlarda kolaylıkla görev yapabilmesinin amaçlanması maksadıyla sağlamlığının ve rijiditesinin oldukça önem kazanması nedeniyle manipülâtörün boyutları, ağırlığı ve en-boy oranları tasarımda özellikle dikkate alındı.

Tendon tahrikli sürekli robotun manipölatörünün kolayca yönlendirilmesini sağlayabilmek ve tendonlarla sürülen uç işlevcisi ve linklerin düzenini ve kontrolünü rahatlıkla sağlamak maksadıyla ve bağlantı çapından tam olarak yararlanmak için tendonların sabit noktaları, linklerin en dış tarafına çap çevresinde eşit aralıklı olacak şekilde dağıtıldı.

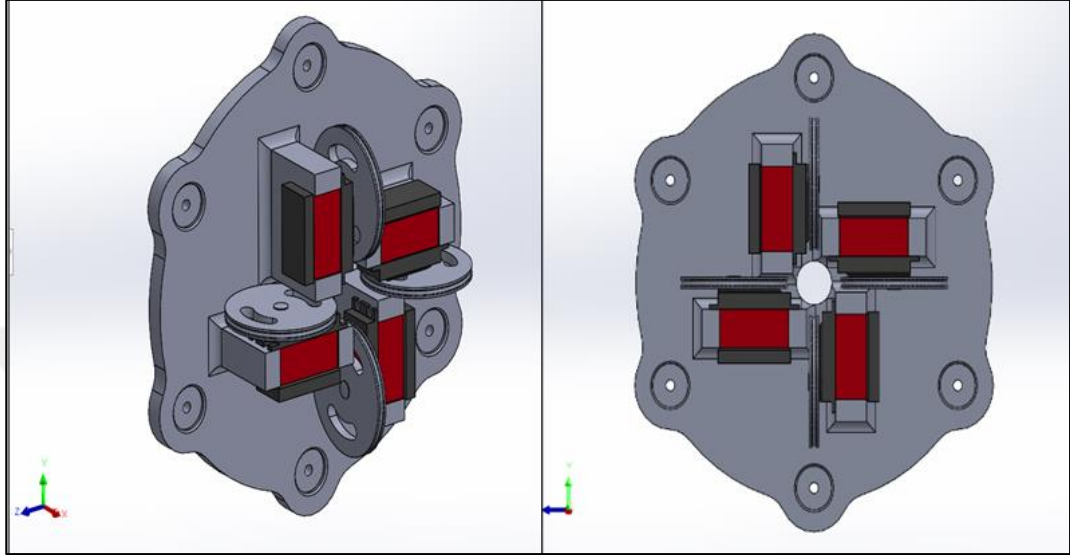
Tahrik ünitesinin tasarımı tendonlara yeterli çekme kuvvetini sağlayabilecek ve maksimum tendon uzaması ve kısalması gibi gereksinimleri karşılayacak şekilde tasarlandı.



Şekil 3.1.2. TTSR’de Tendonların Bağlı Oldukları Link ve Segmentler

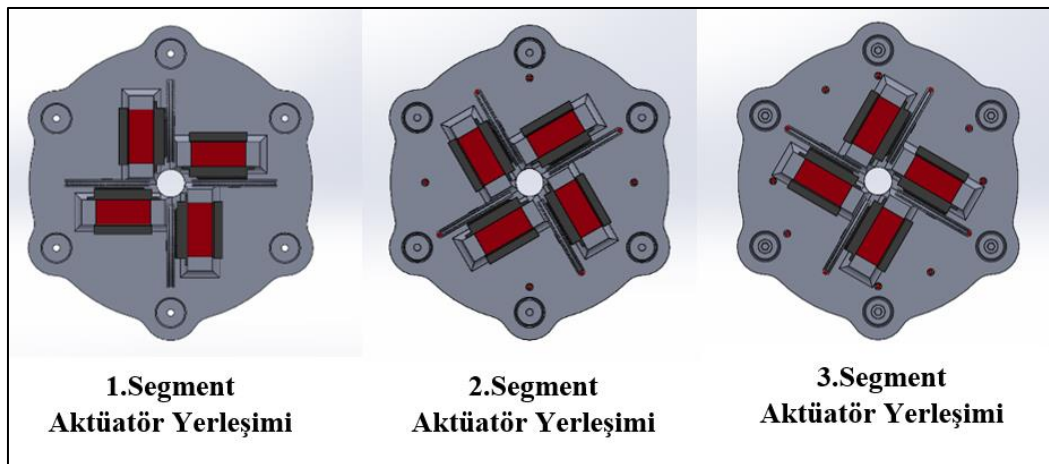
TTSR’nin kontrol ünitesi, link sayısı kadar modüler tahrik segmentinden oluşmaktadır. Yapılan tasarımın tahrik ünitesinde üç kontrol segmenti ve manipölatöründe üç link bulunmakta olup üçünce linkin ucuna linke akuple olarak uç işlevcisi konumlandırılmıştır.

Her bir linkin kontrolü dört tendon ile sağlanmakta olup tendonlar linklere 90° açı farkı olacak şekilde bağlanmaktadır. Tahrik segmentlerinde ise tendonlar, aktüatörlere montajlı kasnaklara bağlı bulunmakta ve aktüatörler de tendonların bağlı oldukları linklere uyumlu olarak 90° derece açı ile konumlandırılmaktadır.



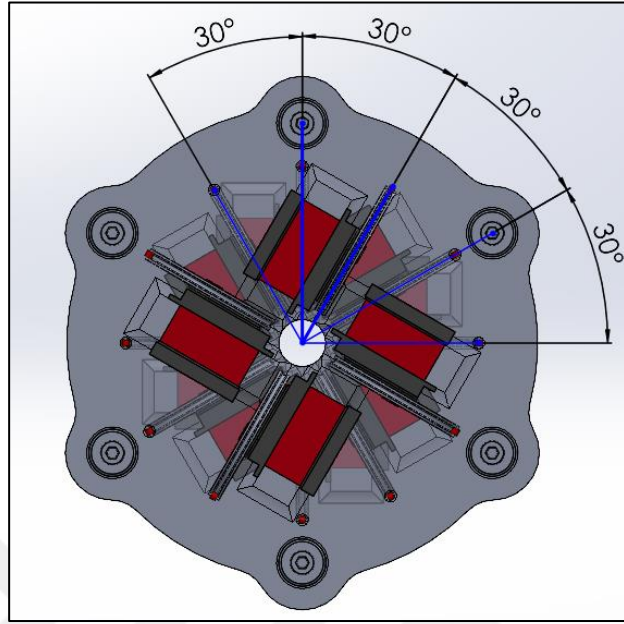
Şekil 3.1.3. Kontrol Segmentine Konumlandırılan Aktüatörler

Birinci segmente 90° derece açı farkıyla yerleştirilen aktüatörler ikinci ve üçüncü tahrik segmentinde, bir önceki segmente bağlı olan tendonların çakışmaması için 30° şaşırtmalı olarak yine 90° derece açısal farkla konumlandırılmıştır.



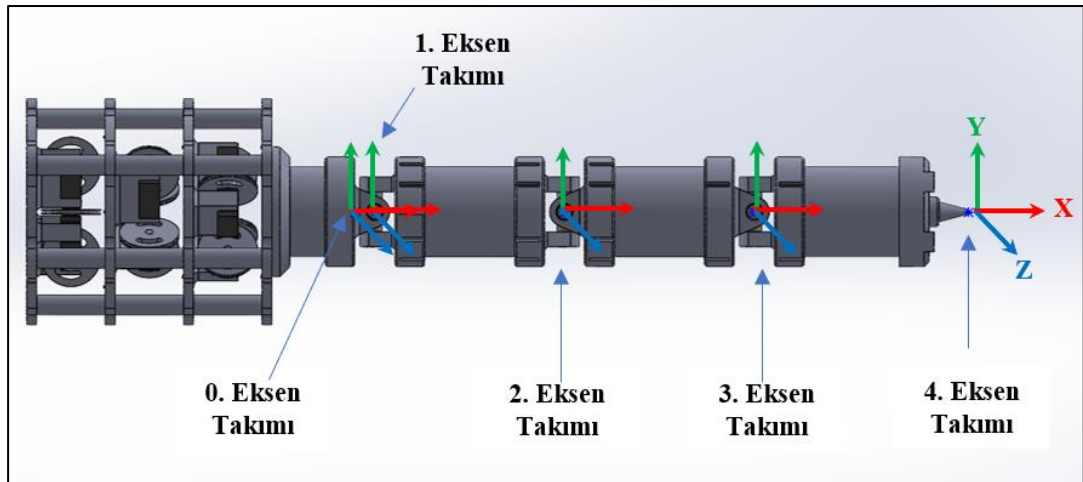
Şekil 3.1.4. Segmentlerdeki Aktüatör Yerleşimleri

Böylece toplamda 12 tendon ile kontrol edilecek olan TTSR'nin tendonları simetrik olarak dağıtılmış ve çakışmaları önlenmiştir.



Şekil 3.1.5. Tahrik Ünitesi Aktüatör Genel Yerleşimi

3.2. Tendon Tahrikli Sürekli Robotun Kinematik Analizi



Şekil 3.2.1. TTSR'ye Eksen Takımlarının Yerleştirilmesi

Eksen takımları, Tendon Tahrikli Sürekli Robotun ilk linkinin bağlı olduğu sabit olan zeminden başlamak üzere sıfıncı eksen takımından dördüncü eksen takımı uç işlevcisinde olacak şekilde sırasıyla yerleştirilmiştir.

Eksen takımları yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi yerleştirildikten sonra homojen transformasyon matrislerinin oluşturulmasına geçilmiştir. Aşağıda denklem 3.1’de de görüldüğü üzere 4x4 forma sahip transformasyon matrislerinde $R_{3 \times 3}$ matrisi eksenlerdeki dönmeyi (Rotasyon), $P_{3 \times 1}$ matrisi konumunu ve ötelenmesini, $f_{1 \times 1}$ matrisi perspektif transformasyonu ve $s_{1 \times 1}$ matrisi ölçek faktörünü ifade etmektedir. Burada f perspektif transformasyonu 0 ve s ölçek matrisi 1 olarak alınmıştır.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & s_{1 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

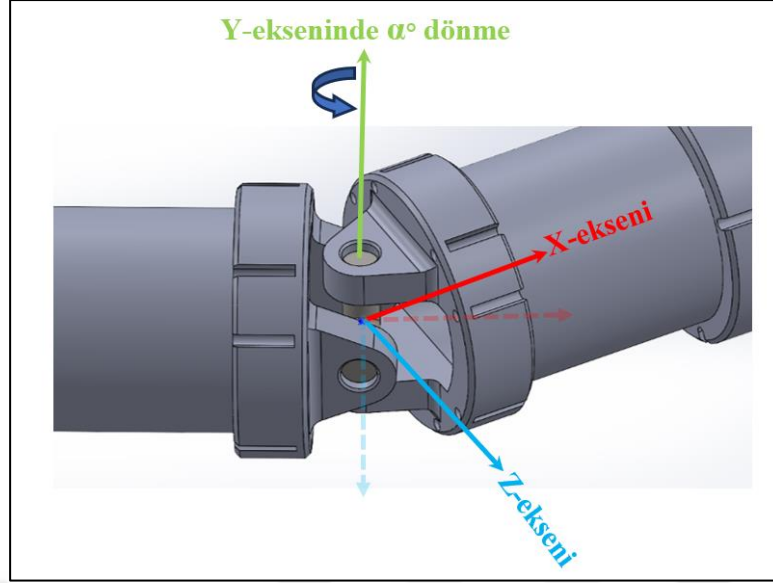
Yukarıdaki homojen transformasyon matrisinin temel formu dikkate alınarak her bir ekseninde dönme ve öteleme matrisleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir.

$$Translt_{x,dx} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$Translt_{x,dx}$ ifadesi, X ekseninde dx mesafesi kadar öteleme Transformasyon matrisini,

$$Rot_{y,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

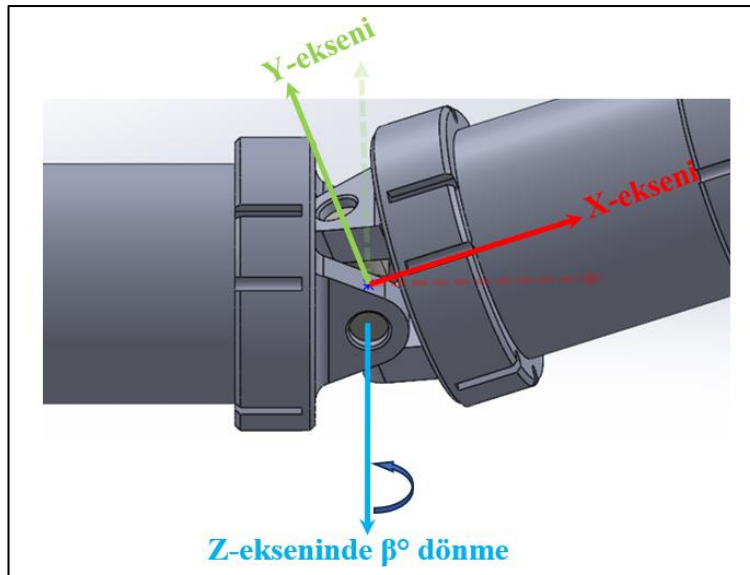
$Rot_{y,\alpha}$ ifadesi, Y ekseninde α açısı kadar dönme Transformasyon matrisini,



Şekil 3.2.2. Y - Ekseninde α Açısıyla Dönme

$$Rot_{z,\beta} = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$Rot_{z,\beta}$ ifadesi Z eksenini etrafında β açısı kadar dönme Transformasyon matrisini temsil eder.



Şekil 3.2.3. Z - Ekseninde β Açısıyla Dönme

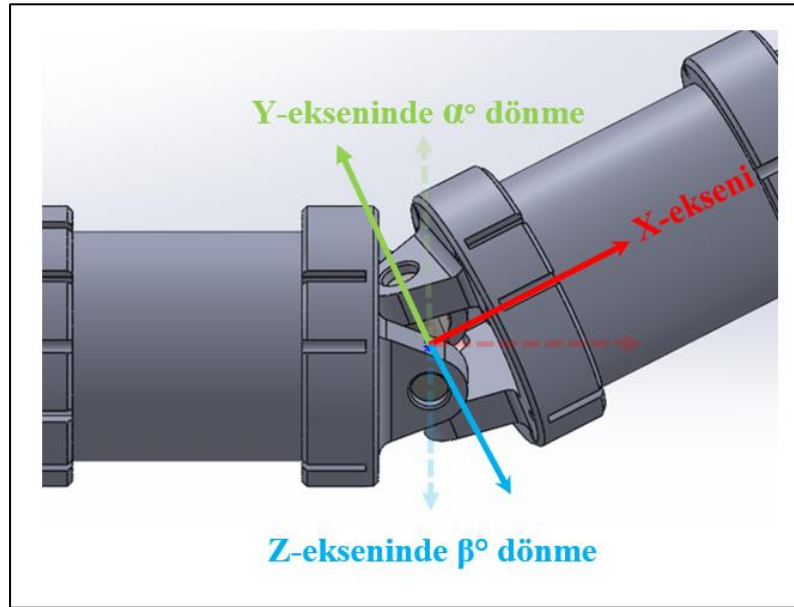
İki serbestlik derecesine sahip üniversal mafsallar kullanılarak tasarımı yapılan Tendon Tahrikli Sürekli Robotun manipülatörüne yerleştirilen eksen takımlarından sabit olan 0. referans eksen takımını dx uzunluğunca ötelenerek 1. Eksene takımını meydana getirir.

$${}^0_1T = Translt_{x,dx} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Oluşan 1. eksen takımının, Y eksenini etrafında α açısı, Z eksenini etrafında β açısı kadar döndürülmesi ve link uzunluğu boyunca ötelenmesi sonucunda 2. Eksen takımını oluşur.

$${}^1_2T = Rot_{y,\alpha} Rot_{z,\beta} Translt_{x,dx} \quad (3.7)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Şekil 3.2.4. Y ve Z Eksenlerine Birlikte Dönme

Aynı şekilde Tendon Tahrikli Sürekli Robotun tüm eksen takımlarında dönme ve öteleme matrislerinin oluşturulması ve art arda çarpılması neticesinde manipülâtörün 0. eksen takımı ile uç işlevcisine ait 4. eksen takımı arasındaki yönelim ve konum bilgilerinin elde edildiği Homojen Transformasyon Matrisi elde edilir.

$${}^0_4T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \quad (3.8)$$

$${}^0_4T = \text{Translt}_{x,dx_1} * \text{Rot}_{z,\beta_1} \text{Rot}_{y,\alpha_1} \text{Translt}_{x,dx_2} * \text{Rot}_{y,\alpha_2} \text{Rot}_{z,\beta_2} \\ \text{Translt}_{x,dx_3} * \text{Rot}_{z,\beta_3} \text{Rot}_{y,\alpha_3} \text{Translt}_{x,dx_4}$$

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & dx_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} *$$

$$\begin{bmatrix} \cos\beta_1 & -\sin\beta_1 & 0 & 0 \\ \sin\beta_1 & \cos\beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & 0 & \sin\alpha_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\alpha_1 & 0 & \cos\alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & dx_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} *$$

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha_2 & 0 & \sin\alpha_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\alpha_2 & 0 & \cos\alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta_2 & -\sin\beta_2 & 0 & 0 \\ \sin\beta_2 & \cos\beta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & dx_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} *$$

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha_3 & 0 & \sin\alpha_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\alpha_3 & 0 & \cos\alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta_3 & -\sin\beta_3 & 0 & 0 \\ \sin\beta_3 & \cos\beta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & dx_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} *$$

Elde edilen genel homojen transformasyon matrisinde, tasarımı yapılan tendon tahrikli sürekli robotun manipülâtörüne ait α , β ve d_x parametrelerinin girilerek oluşturulan sıfırıncı eksen takımından birinci eksen takımına yapılan dönüşümün ifade edildiği transformasyon matrisi;

$${}^0_1T = [1 \ 0 \ 0 \ dx_1; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & dx_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Birinci eksen takımından ikinci eksen takımına yapılan öteleme ve dönmenin elde edildiği çarpım matrisi;

$$\begin{aligned} {}^1_2T &= [1 \ 0 \ 0 \ dx_2; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1] * \\ &[\cos(\beta_1) \ -\sin(\beta_1) \ 0 \ 0; \sin(\beta_1) \ \cos(\beta_1) \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1] * \\ &[\cos(\alpha_1) \ 0 \ \sin(\alpha_1) \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; -\sin(\alpha_1) \ 0 \ \cos(\alpha_1) \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1] \end{aligned}$$

Öteleme ve dönme matrislerinin çarpılması ile elde edilen transformasyon matrisi;

$${}^2_1T = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) * \cos(\beta_1), & -\sin(\beta_1), & \cos(\beta_1) * \sin(\alpha_1), & dx_2 \\ \cos(\alpha_1) * \sin(\beta_1), & \cos(\beta_1), & \sin(\alpha_1) * \sin(\beta_1), & 0 \\ -\sin(\alpha_1), & 0 & \cos(\alpha_1), & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

İkinci eksen takımından üçüncü eksen takımına yapılan öteleme ve dönmenin elde edildiği çarpım matrisi;

$$\begin{aligned} {}^2_3T &= [1 \ 0 \ 0 \ dx_3; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1] * \\ &[\cos(\alpha_2) \ 0 \ \sin(\alpha_2) \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; -\sin(\alpha_2) \ 0 \ \cos(\alpha_2) \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1] * \\ &[\cos(\beta_2) \ -\sin(\beta_2) \ 0 \ 0; \sin(\beta_2) \ \cos(\beta_2) \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1] \end{aligned}$$

Öteleme ve dönme matrislerinin çarpılması ile elde edilen transformasyon matrisi;

$${}^3_2T = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2), & -\cos(\alpha_2) * \sin(\beta_2) & \sin(\alpha_2), & dx_3 \\ \sin(\beta_2), & \cos(\beta_2), & 0, & 0 \\ -\cos(\beta_2) * \sin(\alpha_2), & \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_2), & \cos(\alpha_2), & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Üçüncü eksen takımından dördüncü eksen takımına yapılan öteleme ve dönmenin elde edildiği çarpım matrisi;

$${}^3_4T = [1 \ 0 \ 0 \ dx_4; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1]^*$$

$$[\cos(\alpha_3) \ 0 \ \sin(\alpha_3) \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; -\sin(\alpha_3) \ 0 \ \cos(\alpha_3) \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1]^*$$

$$[\cos(\beta_3) \ -\sin(\beta_3) \ 0 \ 0; \sin(\beta_3) \ \cos(\beta_3) \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

Öteleme ve dönme matrislerinin çarpılması ile elde edilen transformasyon matrisi;

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_3) * \cos(\beta_3), & -\cos(\alpha_3) * \sin(\beta_3), & \sin(\alpha_3), & dx_4 \\ \sin(\beta_3), & \cos(\beta_3), & 0, & 0 \\ -\cos(\beta_3) * \sin(\alpha_3), & \sin(\alpha_3) * \sin(\beta_3), & \cos(\alpha_3), & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

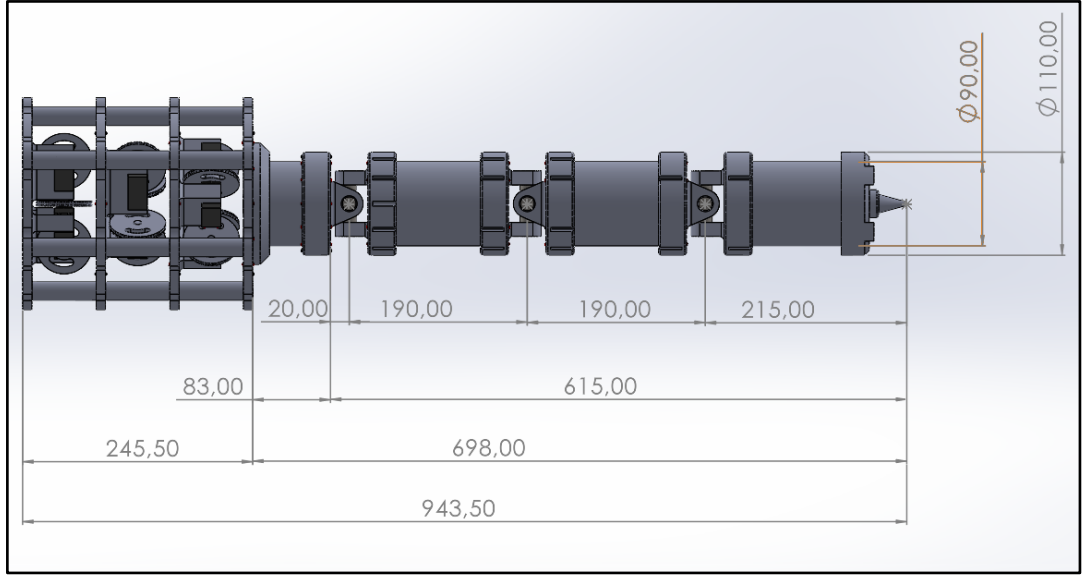
Manipülâtörün eksen takımlarına transformasyon matrislerinin çarpılması neticesinde ait elde edilen homojen transformasyon denklemi,

$${}^0_4T = T_{01} * T_{12} * T_{23} * T_{34}$$

$${}^0_4T = [-\sin(\beta_3) * (\cos(\beta_2) * \sin(\beta_1) + \cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_1) * \sin(\beta_2) - \cos(\beta_1) * \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_2)) - \cos(\beta_3) * \sin(\alpha_3) * (\cos(\alpha_1) * \cos(\beta_1) * \sin(\alpha_2) + \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_1) * \sin(\alpha_1)) - \cos(\alpha_3) * \cos(\beta_3) * (\sin(\beta_1) * \sin(\beta_2) + \cos(\beta_1) * \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) - \cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_1) * \cos(\beta_2)), \sin(\alpha_3) * \sin(\beta_3) * (\cos(\alpha_1) * \cos(\beta_1) * \sin(\alpha_2) + \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_1) * \sin(\alpha_1)) - \cos(\beta_3) * (\cos(\beta_2) * \sin(\beta_1) + \cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_1) * \sin(\beta_2) - \cos(\beta_1) * \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_2)) + \cos(\alpha_3) * \sin(\beta_3) * (\sin(\beta_1) * \sin(\beta_2) + \cos(\beta_1) * \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) - \cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_1) * \cos(\beta_2)), \cos(\alpha_3) * (\cos(\alpha_1) * \cos(\beta_1) * \sin(\alpha_2) + \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_1) * \sin(\alpha_1)) - \sin(\alpha_3) * (\sin(\beta_1) * \sin(\beta_2) + \cos(\beta_1) * \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) - \cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_1) * \cos(\beta_2)), dx_1 + dx_2 - dx_4 * (\sin(\beta_1) * \sin(\beta_2) + \cos(\beta_1) * \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) - \cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_1) * \cos(\beta_2)) + dx_3 * \cos(\alpha_1) * \cos(\beta_1)]$$

$$\begin{aligned}
& [\sin(\beta) * (\cos(\beta_1) * \cos(\beta_2)) & - & \cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2) * \sin(\beta_1) * \sin(\beta_2) & + \\
& \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_1) * \sin(\beta_2)) & + & \cos(\alpha_3) * \cos(\beta_3) * (\cos(\beta_1) * \sin(\beta_2)) & + \\
& \cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \sin(\beta_1) & - & \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_1)) & - \\
& \cos(\beta_3) * \sin(\alpha_3) * (\cos(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_1)) & + & \cos(\alpha_2) * \sin(\alpha_1) * \sin(\beta_1)), \\
& \cos(\beta_3) * (\cos(\beta_1) * \cos(\beta_2)) & - & \cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2) * \sin(\beta_1) * \sin(\beta_2) & + \\
& \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_1) * \sin(\beta_2)) & + & \sin(\alpha_3) * \sin(\beta_3) * (\cos(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_1)) & + \\
& \cos(\alpha_2) * \sin(\alpha_1) * \sin(\beta_1)) & - & \cos(\alpha_3) * \sin(\beta_3) * (\cos(\beta_1) * \sin(\beta_2)) & + \\
& \cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \sin(\beta_1) & - & \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_1)), \\
& \cos(\alpha_3) * (\cos(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_1)) & + & \cos(\alpha_2) * \sin(\alpha_1) * \sin(\beta_1)) & + \\
& \sin(\alpha_3) * (\cos(\beta_1) * \sin(\beta_2)) & + & \cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \sin(\beta_1) & - \\
& \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_1)), & & dx_4 * (\cos(\beta_1) * \sin(\beta_2)) & + \\
& \cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \sin(\beta_1) & - & \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_1)) & + \\
& dx_3 * \cos(\alpha_1) * \sin(\beta_1)] \\
& [\sin(\beta_3) * (\cos(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_2)) & + & \cos(\alpha_2) * \sin(\alpha_1) * \sin(\beta_2)) & - \\
& \cos(\beta_3) * \sin(\alpha_3) * (\cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2)) & - & \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2)) & - \\
& \cos(\alpha_3) * \cos(\beta_3) * (\cos(\alpha_1) * \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_2)) & + & \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_1)), \\
& \cos(\beta_3) * (\cos(\alpha_1) * \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_2)) & + & \cos(\alpha_2) * \sin(\alpha_1) * \sin(\beta_2)) & + \\
& \sin(\alpha_3) * \sin(\beta_3) * (\cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2)) & - & \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2)) & + \\
& \cos(\alpha_3) * \sin(\beta_3) * (\cos(\alpha_1) * \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_2)) & + & \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_1)), \\
& \cos(\alpha_3) * (\cos(\alpha_1) * \cos(\alpha_2) - \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2)) - \sin(\alpha_3) * (\cos(\alpha_1) * \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_2) + \\
& \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_1)), & & - dx_3 * \sin(\alpha_1) - \\
& dx_4 * (\cos(\alpha_1) * \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_2) + \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \sin(\alpha_1))] \\
& [& & 0 & & 0 & & 0 & & 1]
\end{aligned}$$

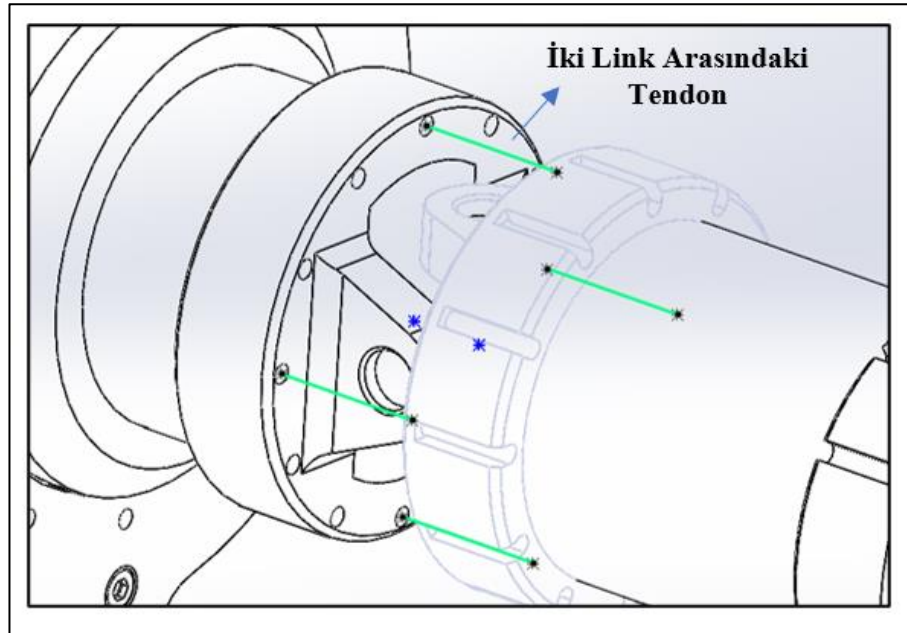
Homojen transformasyon matrisinde dx_1 , dx_2 , dx_3 ve dx_4 olan X ekseninde ötelemenin yapıldığı değerler ile Y ve Z eksenlerinde yapılan dönme açı değerleri α_1 , α_2 , α_3 ve β_1 , β_2 , β_3 olarak denklemde yerine yazıldığında uç işlevcisinin referans eksen takımına göre konumu bulunmaktadır.



Şekil 3.2.5. TTSR'nin Ölçülendirilmesi

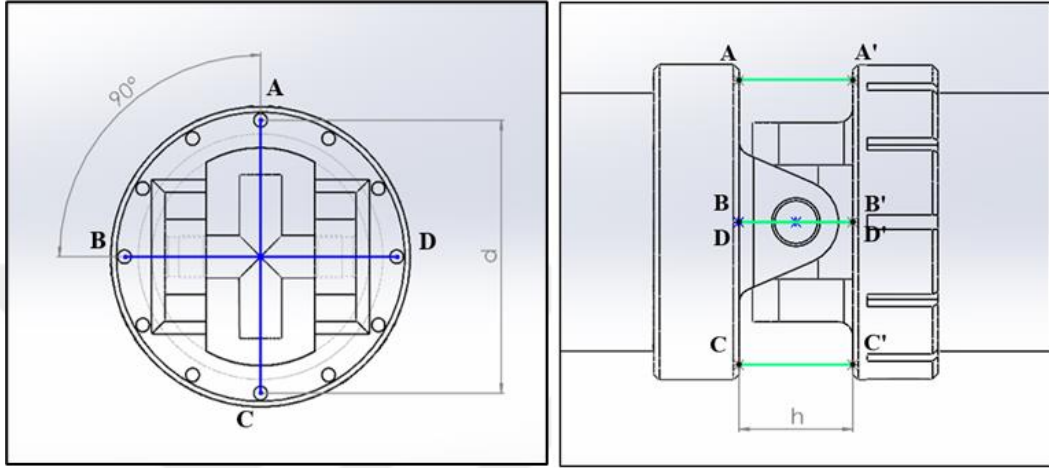
3.3. TTSR'nin Tendon Uzunluklarının Hesaplanması

Tendon Tahrikli Sürekli Robotun her bir eklemi dört tendon tarafından kontrol edilir. Tendon uzunluklarının artıp azalması ile iki serbestlik derecesine sahip üniversal mafsalsal Y ve Z eksenlerinde dönme hareketi gerçekleştirir.



Şekil 3.3.1. Linkler Arasında Bulunan Tendonlar

Bir ucu aktüatör üzerinde bulunan kasnaklara diğer ucu kontrol edilecek olan linke bağlı olan tendonlar, iki link arasında bulunan mesafe içerisinde uzayıp kısalabilmektedir. Kontrol edildiği linklerin içinden geçen tendon uzunluğu link boyunca sabit kalacağından aktüatörlerden uç efektörün pozisyonlanması linkler arasındaki tendon uzunlukları ile ilgilidir.



Şekil 3.3.2. Tendon Bağlantı Noktaları

Tendonlar linklere A, B, C ve D noktalarından aralarında 90° açı olacak şekilde bağlanmaktadır. Tendon Tahrikli Sürekli Robot home pozisyonunda yani üniversal mafsalsın açıları $\alpha = 0$ ve $\beta = 0$ durumunda iken A noktası ile A' noktası arasındaki tendon uzunluğu, iki link arasındaki h mesafesi kadardır.

Tendonun bağlı olduğu A noktasının konumunu;

$$A = Rot_{x,\theta} [0 \ r \ 0 \ 1]^T \quad (3.9)$$

olarak ifade edebiliriz. Burada r uzunluğu, tendonun geçtiği delik merkezinin manipülatörün eksenine olan yarıçap (d/2) mesafesidir.

$$\frac{Link^{i-1}}{Link^i} T = Transl_{x,h/2} Rot_{z,\beta} Rot_{y,\alpha} Transl_{x,h/2} \quad (3.10)$$

Üniversal mafsalsın, iki link arasında Y ekseninde α ve Z ekseninde β açıları kadar dönmesi ve toplamda h kadar ötelenmesi neticesinde yukarıdaki Transformasyon denklemi elde edilir.

$Link_{i-1}$ üzerinde bulunan A noktasının pozisyonundan $Link_i$ üzerinde bulunan A' noktasının pozisyonunu elde etmek için denklem 3.11'i kullanırız.

$$A' = \frac{Link_{i-1}}{Link_i} T \cdot A \quad (3.11)$$

Bu durumda A ve A' noktasının koordinatları tespit edilmiş olur.

$$l_a = A' - A \quad (3.12)$$

İki ardışık link arasında bulunan A' noktası ile A noktası arasında bulunan tendonun uzunluğu, A ve A' noktasının x, y ve z koordinatları ile aşağıdaki denklemlerle bulunabilir.

$$l_a = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (3.13)$$

B-B', C-C' ve D-D' noktaları arasında bulunan tendon uzunlukları hesaplanırken $Link_{i-1}$ üzerinde bulunan B, C ve D noktalarının konumları arasında 90° açı farkı olması nedeniyle;

$$A = Rot_{x,\theta} [0 \ r \ 0 \ 1]^T$$

yukarıda verilen denklem 3.9'da bulunan θ değeri B noktası için $\pi/2$, C noktası için π ve D noktası için $3\pi/2$ kadar artırılarak iki link arasında bulunan ve universal mafsalmın α ve β değişkenlerine bağlı olarak değişen dört tendonun uzunlukları hesaplanmıştır.

3.4. Tendon Tahrikli Sürekli Robotun Statik Analizi

Tendon tahrikli sürekli robotun bilgisayar destekli statik analizi, üç farklı malzeme ile Ansys Workbench sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

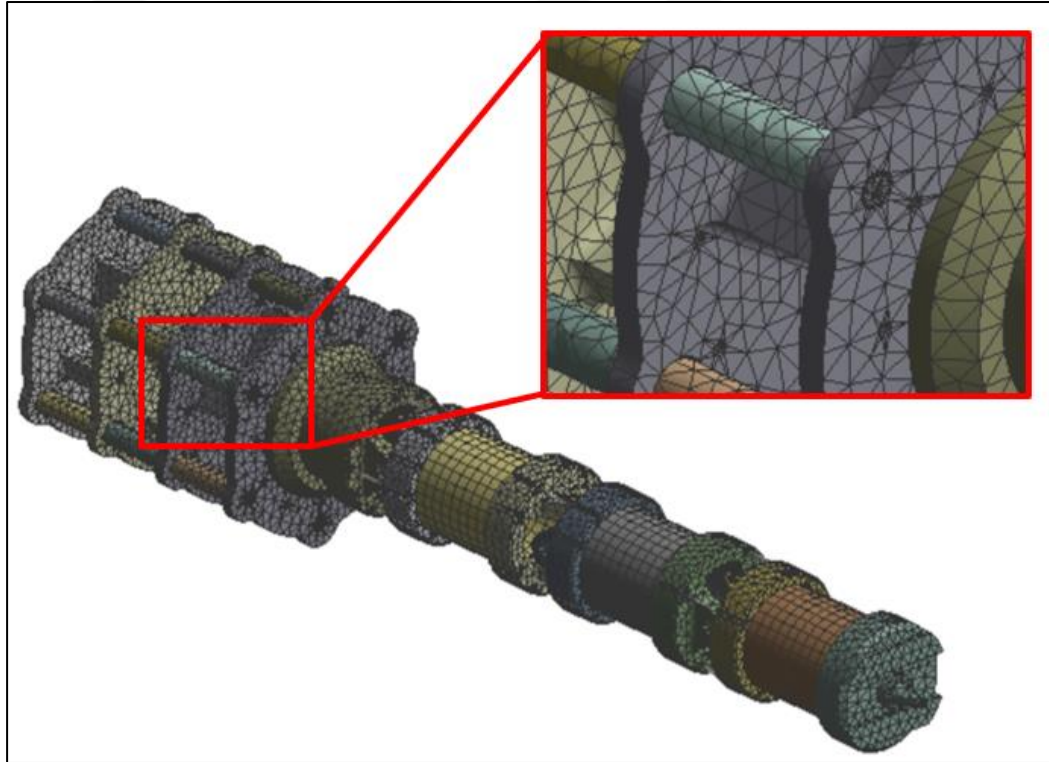
Yükleme, sınır koşulları ve malzeme özellikleri tanımlanmış, sistem bileşenleri üzerindeki gerilmeleri hesaplamak için sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri çözülmüştür. Malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Seçilen Malzemelerin Teknik Özellikleri (Rodriguez ve ark., 2003; Farah ve ark., 2016)

Parametre	ABS	PLA	PATH-CF15
Yoğunluk (kg.m^{-3})	1020	1252	1232
Elastikiyet Modülü (MPa)	2230	3500	8386
Akma Dayanımı (MPa)	33	70	103,2
Poisson oranı	0,34	0,36	0,3

3.4.1. Yükleme ve Sınır Koşulları

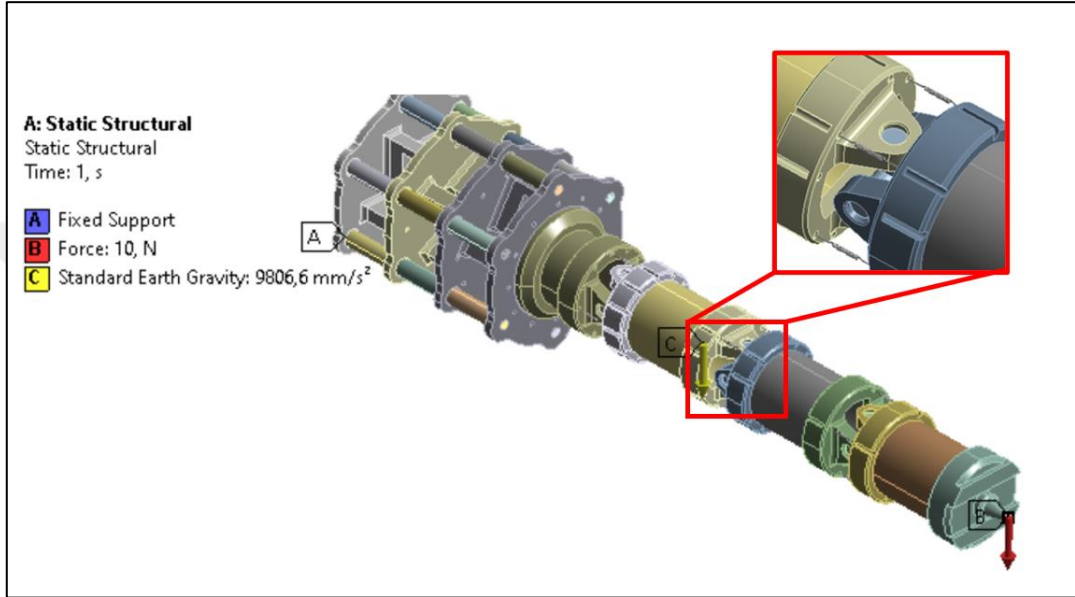
3D modele ait üç farklı malzeme (Camara-Molina ve ark., 2023; Lancea ve ark., 2022) Ansys Workbench yazılımına aktarıldıktan sonra modellenmesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen mesh işlemi Şekil 3.4.1.1.'de görülmektedir.



Şekil 3.4.1.1. Mesh Yapı

Mesh işlemi sonucunda modelde 125772 düğüm ve 63003 eleman bulunmaktadır. Model geometrisine uyumlu olarak program tarafından uygun yöntem (tetrahedron, hexahedron vb.) ile oluşturulan eleman kalitesi minimum $3,6435e-2$ ve maksimum 0,99941 mm. ölçülerindedir.

Uç işlevcisine -Y yönünde 10 N'luk bir yük uygulanmış ve Şekil 3.4.1.2.'de görüldüğü gibi link bileşenlerini tahrik etmek için kullanılan tendonlar yerine yaylar tanımlanarak A yüzeyinden sabitlenmiştir. C noktasında görüldüğü gibi analize standart yer çekimi de dahil edilmiştir. Üniversal mafsalların temas ve kontakt yüzeylerinde, normali yönündeki hareketi kısıtlayan ancak teğeti yönündeki harekete izin veren no-separation temas tipi olarak kullanılmıştır.



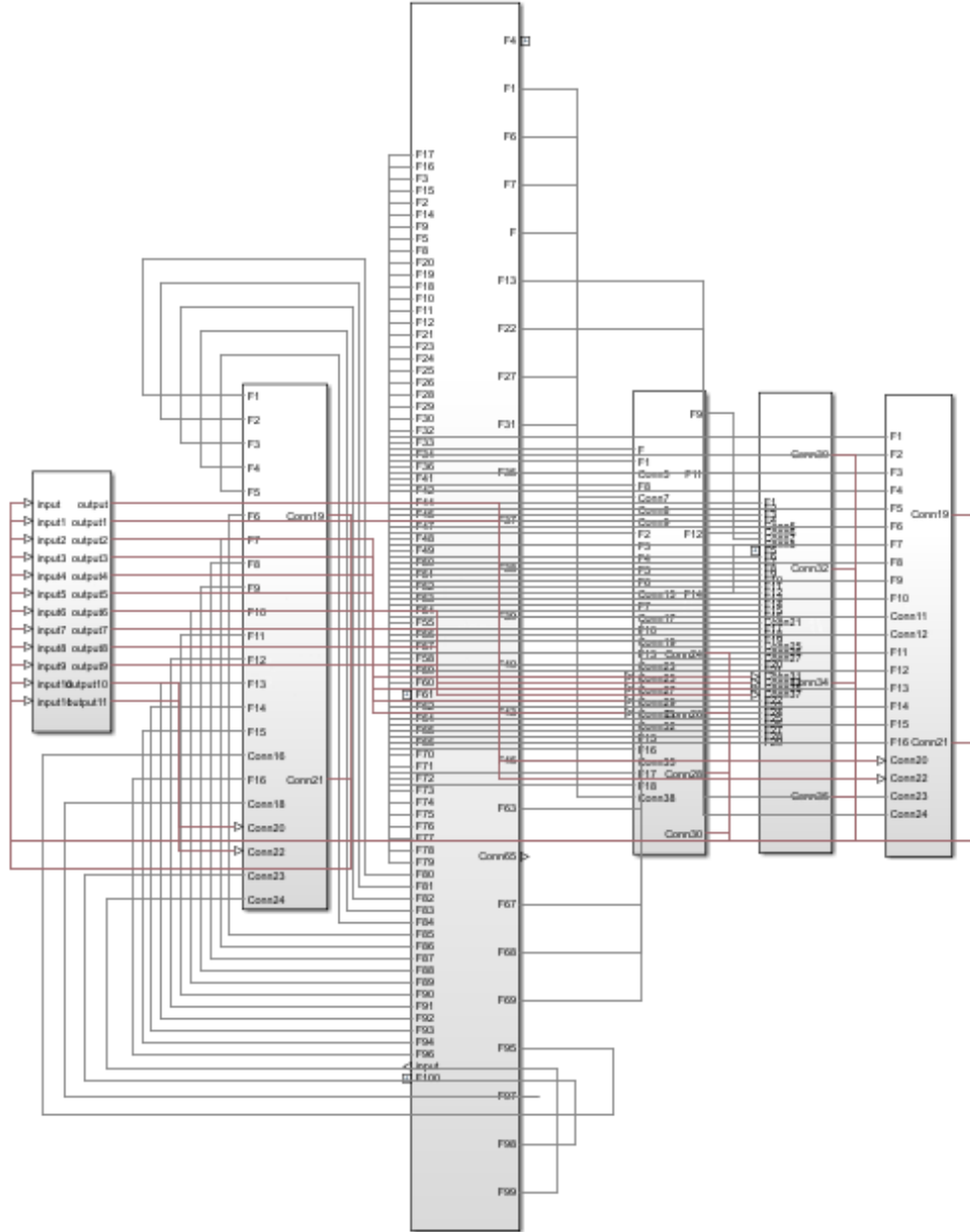
Şekil 3.4.1.2. Yükleme ve Sınır Koşulları

3.5. Tendon Tahrikli Sürekli Robotun Dinamik Analizi

Tendon Tahrikli Sürekli Robotun fiziksel sistem modeli, dinamik tepkileri belirlemek, kuvvet, tork ve hareketlerini simüle etmek için Matlab/SİMULINK ortamında oluşturuldu.

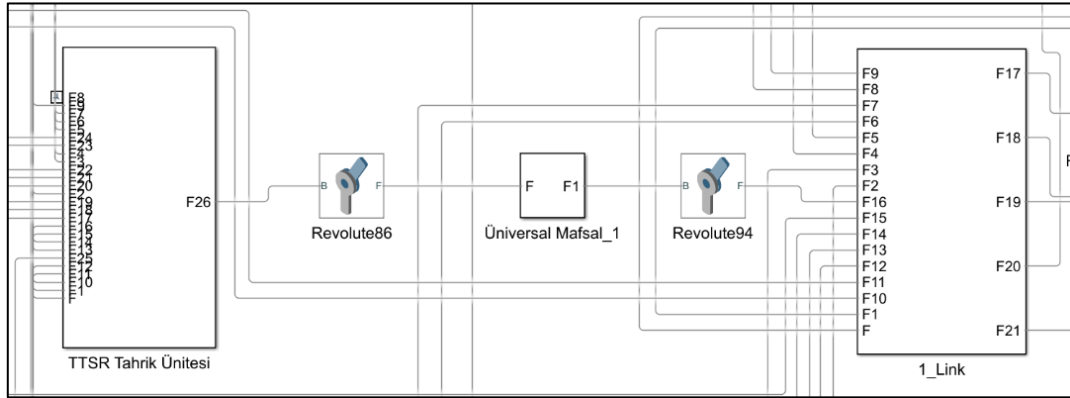
Modellenen Tendon Tahrikli Sürekli Robotun tahrik ünitesi ve manipülatör kısmını meydana getiren gövde parçaları, linkleri, bağlantı elemanları, eklemleri gibi tüm bileşenleri, bu bileşenlere ait kütle, atalet ve malzeme özellikleri ile bu bileşenler arasındaki montaj ilişkilerini içerecek şekilde çok gövdeli bir sistem modeli olarak Simscape Multibody ortamının içine aktarıldı.

Gövde sistemlerini ve eklemleri temsil eden blok diyagramlarla ve diğer modelleme paradigmalarıyla doğrudan bütünleşen fiziksel bağlantılara dayalı fiziksel model CAD montajı ve 3D geometrisi dahil olmak üzere eksiksiz olarak oluşturuldu.



Şekil 3.5.1. Matlab/SIMULINK Ortamında Blok Diyagramlarla Oluşturulan Model

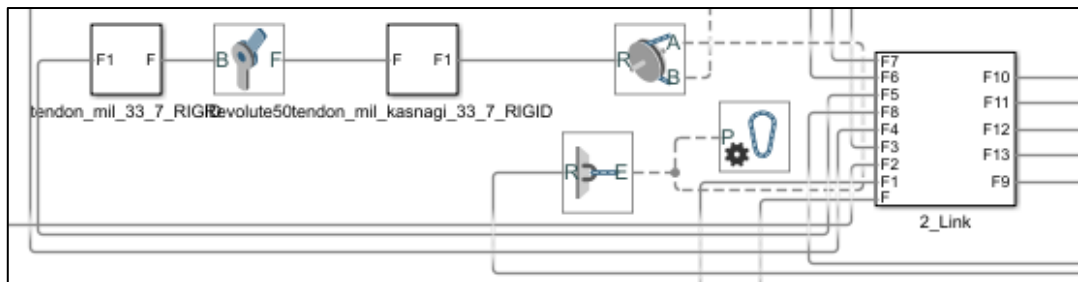
Oluşturulan modelde gövde yapıları, tahrik ünitesi ve linkleri temsil eden alt sistemler oluşturuldu.



Şekil 3.5.2. Tahrik Ünitesi ve 1. Linke Ait Oluşturulan Alt Sistem Blokları

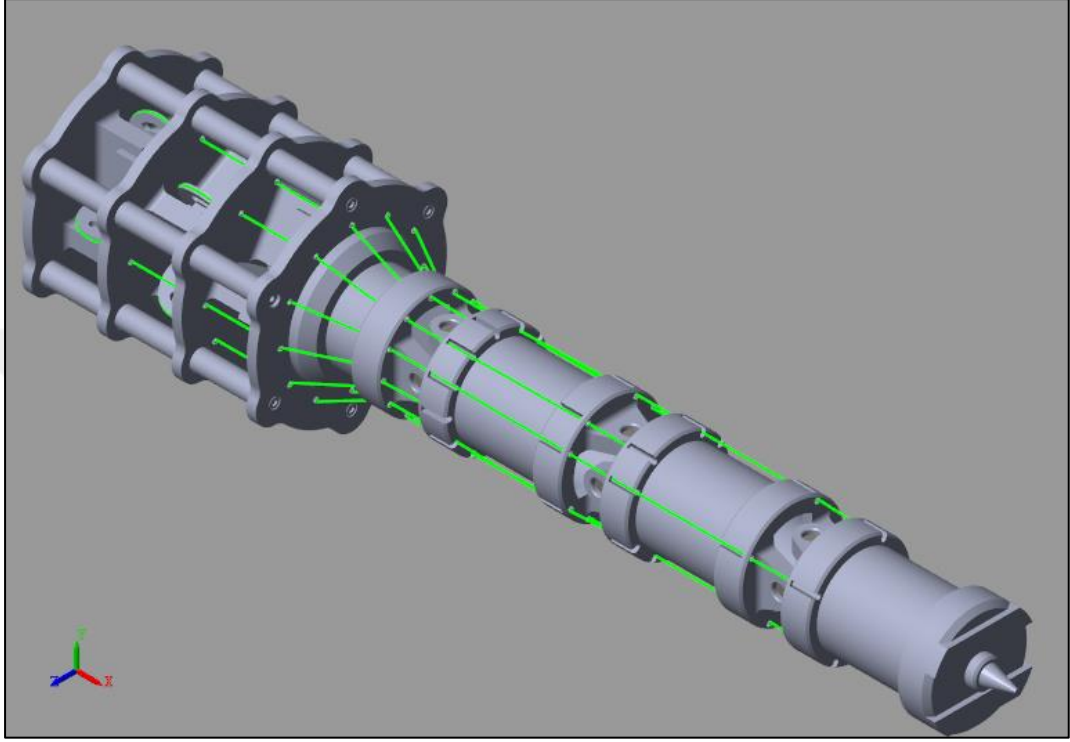
Manipülörde bulunan linkleri ve üniversal mafsalları birleştirmek ve birbirine bağlamak için eklem blokları kullanılan modelde, bağlantı blokları ile bağlı gövdeler arasında izin verilen maksimum serbestlik dereceleri (dönme ve öteleme) ve kinematik ilişkileri belirlendi.

Tendon Tahrikli Sürekli Robotun linklerinin tahrik ünitesindeki ilgili kontrol segmentinde bulunan aktüatör üzerinde mevcut kasnak bağlantıları, Simscape Multibody blok diyagramı kütüphanesine son yıllarda eklenen ve çok gövdeli sistem dinamiği modellemesinde kuvvet, tork ve hareketin tendonlar (kablo, halat, çelik tel vb.) vasıtasıyla aktarıldığı blokların bulunduğu Belts and Cable segmenti altında bulunan Belt-Cable End, Belt-Cable Spool, Pulley ve Belt-Cable Properties blokları ile yapıldı.



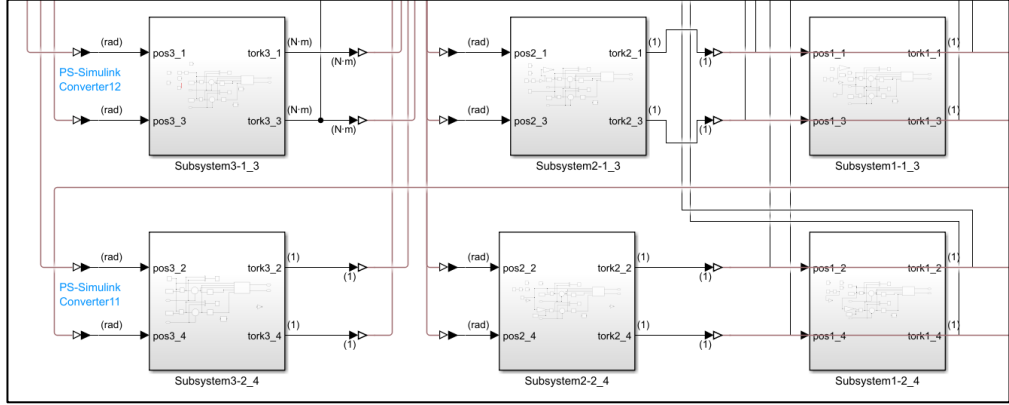
Şekil 3.5.3. Tendonların Linklere ve Kontrol Segmentlerine Bağlanması

Her bir linkin tendonlarının kontrol segmentlerinde bulunan aktüatörlere bağlantılarının yapılması ile Tendon Tahrikli Sürekli Robotun Simscape Multibody blok diyagramları modeli oluşturuldu. Oluşturulan model Simscape Multibody ortamında sonrasında görselleştirildi.

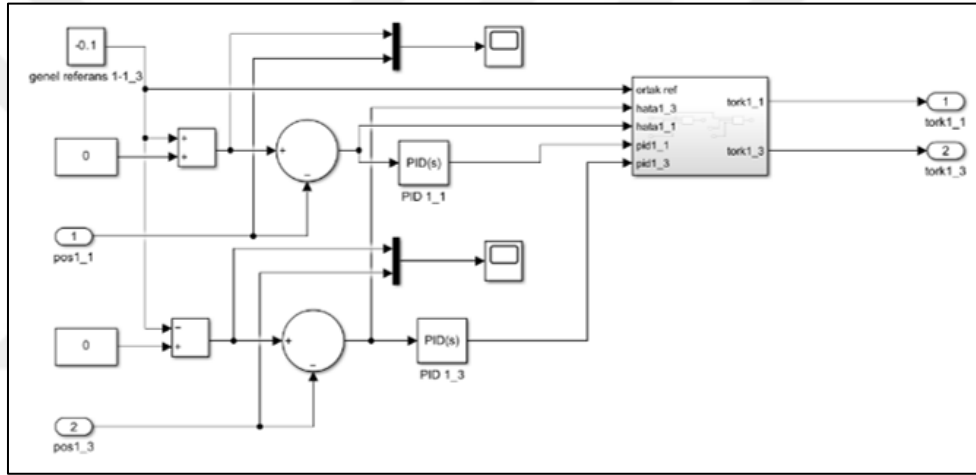


Şekil 3.5.4. Tendon Tahrikli Sürekli Robotun Simscape Multibody Ortamında Oluşturulan 3D Modeli

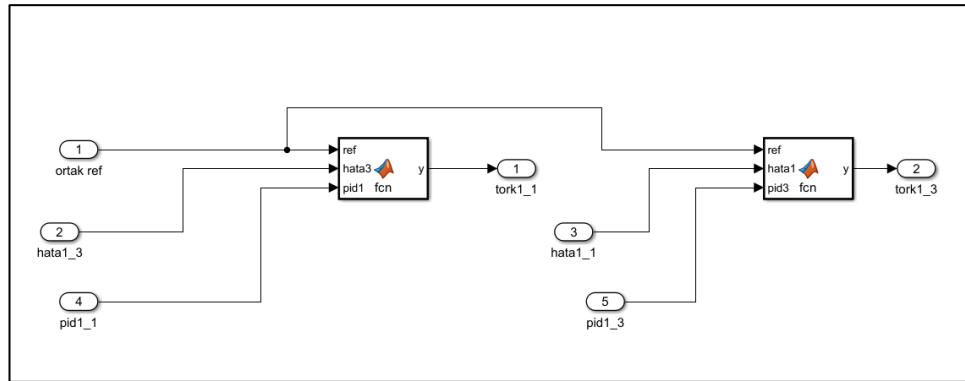
Blok diyagramları ile modeli oluşturulan ve tendon bağlantıları yapılan Tendon Tahrikli Sürekli Robotun Simscape Multibody ortamında dinamik analizinin yapılması amacıyla oluşturulan blok diyagram modeli üzerinde tendonların hareketini analiz etmek, gerçekleştirilen hareket için ihtiyaç duyulan tork değerlerini, linklerin açısız pozisyonu ve uç işlevcisinin konumunu belirlemek için blok diyagram modelinde bulunan mafsız bağlantılarına alt sistem olarak kontrol blokları eklendi.



Şekil 3.5.5. Hareket ve Tork Değerleri için Oluşturulan Alt Sistem Blokları

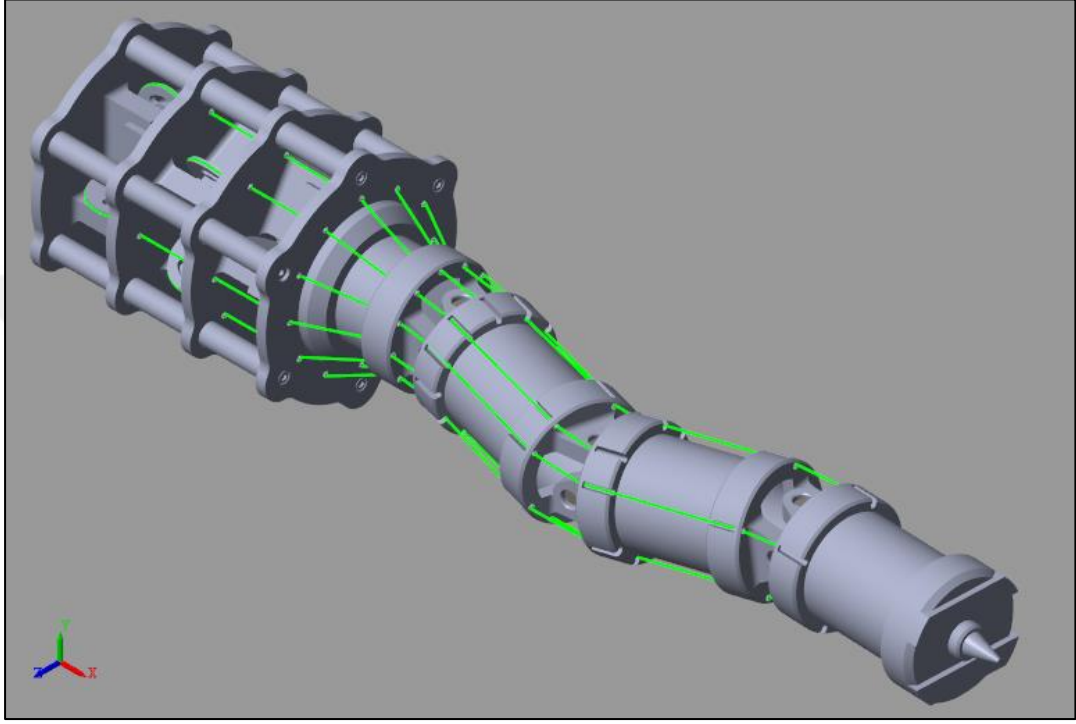


Şekil 3.5.6. Oluşturulan Alt Sistem Bloklarının Açılımı



Şekil 3.5.7. Alt Sistemlerde Çalıştırılan MATLAB Fonksiyonları

Oluşturulan alt sistem blokları ve yazılan Matlab fonksiyonlarının blok diyagramlarla link mafsallarına bağlantıları yapıldı. Yapılan bağlantılar neticesinde her bir linkin ve linklerin birbirleri ile koordineli olarak açısal hareketi sağlanarak Tendon Tahrikli Sürekli Robotun blok diyagramları ile modellenmesi tamamlandı. Tamamlanan model Simscape Multibody ortamında çalıştırıldı.



Şekil 3.5.8. Simscape Multibody Ortamında alıştırılan TTSR

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Manipülâtör üzerine referans eksen takımı sıfırncı, uç işlevcisindeki dördüncü olmak üzere sırasıyla Şekil 3.2.1.'de görüldüğü gibi yerleştirilen eksen takımlarının, öteleme ve dönme matrislerinin çarpılması ile elde edilen transformasyon matrislerinin oluşturulması ve oluşturulan transformasyon matrislerinin çarpılması sonucunda denklem 3.8'de görüldüğü gibi manipülâtöre ait homojen transformasyon matrisi elde edildi.

Elde edilen homojen transformasyon matrisinde, manipülâtörün link boyutları ile gerçekleşen dx_1 , dx_2 , dx_3 ve dx_4 olan X ekseninde ötelemenin yapıldığı değerler ile istenen açı seti değerleri olarak Y ve Z eksenlerinde yapılan dönme açı değerleri α_1 , β_1 , α_2 , β_2 , α_3 ve β_3 , $\pi/6$ (30°) girilerek MATLAB ortamında yapılan matematiksel çözümü aşağıda verilmiştir.

Birinci eksen takımında öteleme;

$$Translt_{X,dx1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 20 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

İkinci eksen takımında dönme ve öteleme;

$$Rot_{Y,\alpha1} = \begin{bmatrix} \cos30 & 0 & \sin30 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin30 & 0 & \cos30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot_{Z,\beta1} = \begin{bmatrix} \cos30 & -\sin30 & 0 & 0 \\ \sin30 & \cos30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Translt_{X,dx2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 190 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Üçüncü eksen takımında dönme ve öteleme;

$$Rot_{Y,\alpha 2} = \begin{bmatrix} \cos 30 & 0 & \sin 30 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin 30 & 0 & \cos 30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot_{Z,\beta 2} = \begin{bmatrix} \cos 30 & -\sin 30 & 0 & 0 \\ \sin 30 & \cos 30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Translt_{X,dx 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 190 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dördüncü Eksen Takımında dönme ve öteleme;

$$Rot_{Y,\alpha 3} = \begin{bmatrix} \cos 30 & 0 & \sin 30 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin 30 & 0 & \cos 30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

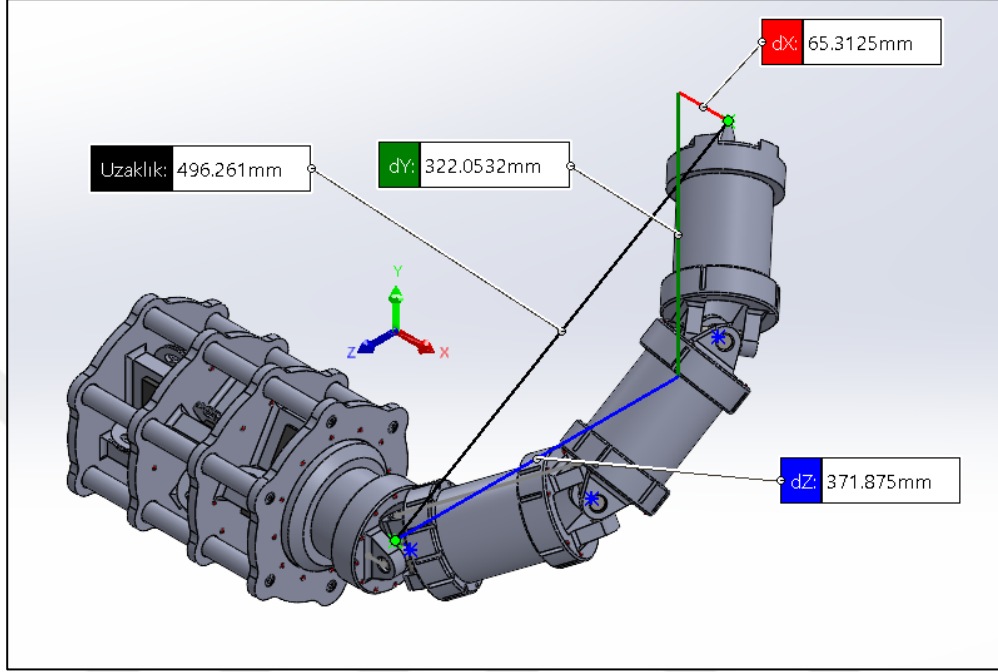
$$Rot_{Z,\beta 3} = \begin{bmatrix} \cos 30 & -\sin 30 & 0 & 0 \\ \sin 30 & \cos 30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Translt_{X,dx 4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 215 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_4 = Translt_{X,dx 1} Rot_{Z,\beta 1} Rot_{Y,\alpha 1} Translt_{X,dx 2} Rot_{Y,\alpha 2} Rot_{Z,\beta 2} Translt_{X,dx 3} \\ Rot_{Z,\beta 3}$$

$$Rot_{Y,\alpha 3} Translt_{X,dx 4}$$

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} -0.5625 & -0.6250 & 0.5413 & 65.3125 \\ 0.5413 & 0.2165 & 0.8125 & 322.0532 \\ -0.6250 & 0.7500 & 0.2165 & -371.8750 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Şekil 4.1 Tüm Üniversal Mafsallarda Y ve Z Eksenlerinde 30° Dönme Sonucu Uç İşlevcisi Konum Koordinatları

Aynı açı seti değerleri verilerek 3D çizim ortamında konumlandırılan modelin uç işlevcisinin x, y, z eksenlerinde ölçülen koordinatlar değerleri ile matematiksel çözüm sonucu elde edilen koordinat değerlerinin Şekil 4.1. görüldüğü gibi 10^{-4} mm. ölçüm toleransı hassasiyetinde aynı sonucu verdikleri tespit edildi.

Aynı şekilde Y ve Z eksenlerinde α_1 , β_1 , α_2 , β_2 , α_3 ve β_3 açı değerleri $-\pi/12$ (-15°) girilerek MATLAB ortamında matematiksel çözümü aşağıda verilmiştir.

Birinci eksen takımında öteleme;

$$Translt_{x,dx1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 20 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

İkinci eksen takımında dönme ve öteleme;

$$Rot_{Y,\alpha_1} = \begin{bmatrix} \cos(-15) & 0 & \sin(-15) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-15) & 0 & \cos(-15) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot_{Z,\beta_1} = \begin{bmatrix} \cos(-15) & -\sin(-15) & 0 & 0 \\ \sin(-15) & \cos(-15) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Translt_{X,dx_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 190 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Üçüncü eksen takımında dönme ve öteleme;

$$Rot_{Y,\alpha_2} = \begin{bmatrix} \cos(-15) & 0 & \sin(-15) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-15) & 0 & \cos(-15) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot_{Z,\beta_2} = \begin{bmatrix} \cos(-15) & -\sin(-15) & 0 & 0 \\ \sin(-15) & \cos(-15) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Translt_{X,dx_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 190 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dördüncü Eksen Takımında dönme ve öteleme;

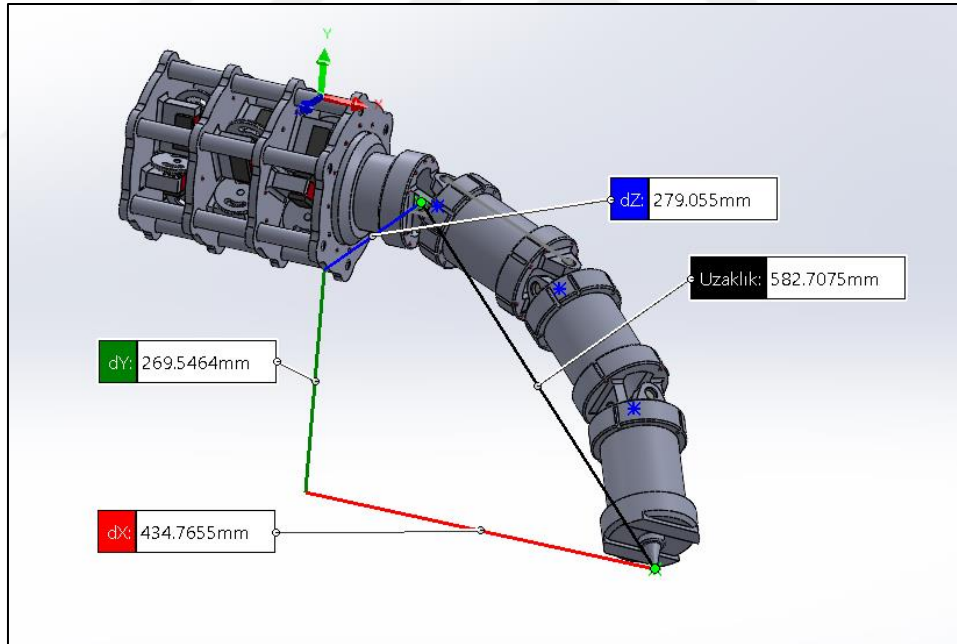
$$Rot_{Y,\alpha_3} = \begin{bmatrix} \cos(-15) & 0 & \sin(-15) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin 30 & 0 & \cos 30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot_{Z,\beta3} = \begin{bmatrix} \cos(-15) & -\sin(-15) & 0 & 0 \\ \sin30 & \cos30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Transl_{X,dx4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 215 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_4T = Transl_{X,dx1} Rot_{Z,\beta1} Rot_{Y,\alpha1} Transl_{X,dx2} Rot_{Y,\alpha2} Rot_{Z,\beta2} Transl_{X,dx3} Rot_{Z,\beta3} \\ Rot_{Y,\alpha3} Transl_{X,dx4}$$

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} 0.4498 & 0.6424 & -0.6205 & 434.7655 \\ -0.6205 & 0.7244 & 0.3002 & -269.5464 \\ 0.6424 & 0.2500 & 0.7244 & 279.0550 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Şekil 4.2. Tüm Üniversal Mafsallarda Y ve Z Eksenlerinde -15° Dönme Sonucu Uç İşlevçisi Konum Koordinatları

Aynı açı seti değerleri verilerek 3D çizim ortamında konumlandırılan modelin uç işlevcisinin x, y, z eksenlerinde ölçülen koordinatlar değerleri ile matematiksel çözüm sonucu elde edilen koordinat değerlerinin Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi 10^{-4} mm. ölçüm toleransı hassasiyetinde aynı sonucu verdikleri tespit edilmiştir.

Tendonların verilen açı seti değerleri doğrultusunda gerekli uzama ve kısaltmalarının hesaplanabilmesi için elde edilen denklemler kullanılarak A-A', B-B', C-C', ve D-D' noktaları arasında bulunan dört tendona ait uzunlukların matematiksel çözüm sonuçları aşağıda verilmiştir.

Öncelikle, denklem 3.9'da $\theta = 0^\circ$ girilerek A noktasının konumu ve A noktasının A' noktasına transformasyonunu ifade eden denklem 3.10'da $\alpha = -15^\circ$ ve $\beta = 20^\circ$ değerleri girilerek A' noktasının konumu tespit edilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(0) & -\sin(0) & 0 \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 50 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Translt}_{x,h/2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 20 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Rot}_{z,\beta} = \begin{bmatrix} \cos(-15) & 0 & -\sin(-15) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-15) & 0 & \cos(-15) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Rot}_{y,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos(20) & -\sin(20) & 0 & 0 \\ \sin(20) & \cos(20) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Translt}_{x,h/2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 20 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

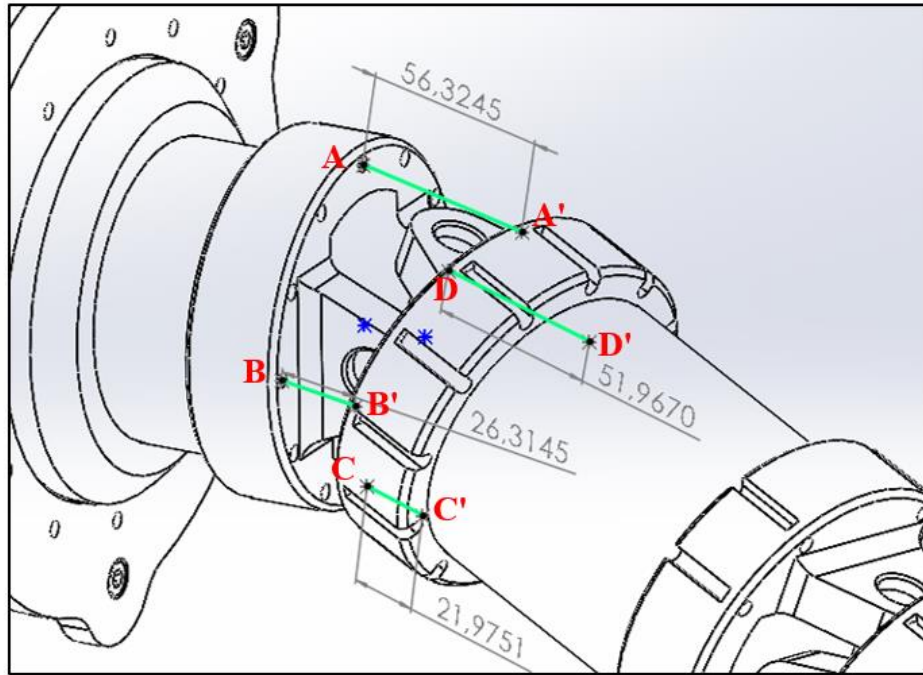
Aynı şekilde B noktası için $\theta = -\pi/2$, C noktası için $\theta = \pi$ ve D noktası için $\theta = -3\pi/2$ olarak girilerek ve elde edilen sonuçlar denklem 3.11 ve 3.12’de yerine konularak MATLAB ortamında yapılan matris çarpımları sonucunda elde edilen A-A', B-B', C-C' ve D-D' noktaları arasındaki tendon uzunlukları hesaplanmıştır.

$$l_{AA'} = 56.3245 \text{ mm}$$

$$l_{BB'} = 26.3145 \text{ mm}$$

$$l_{CC'} = 21.9751 \text{ mm}$$

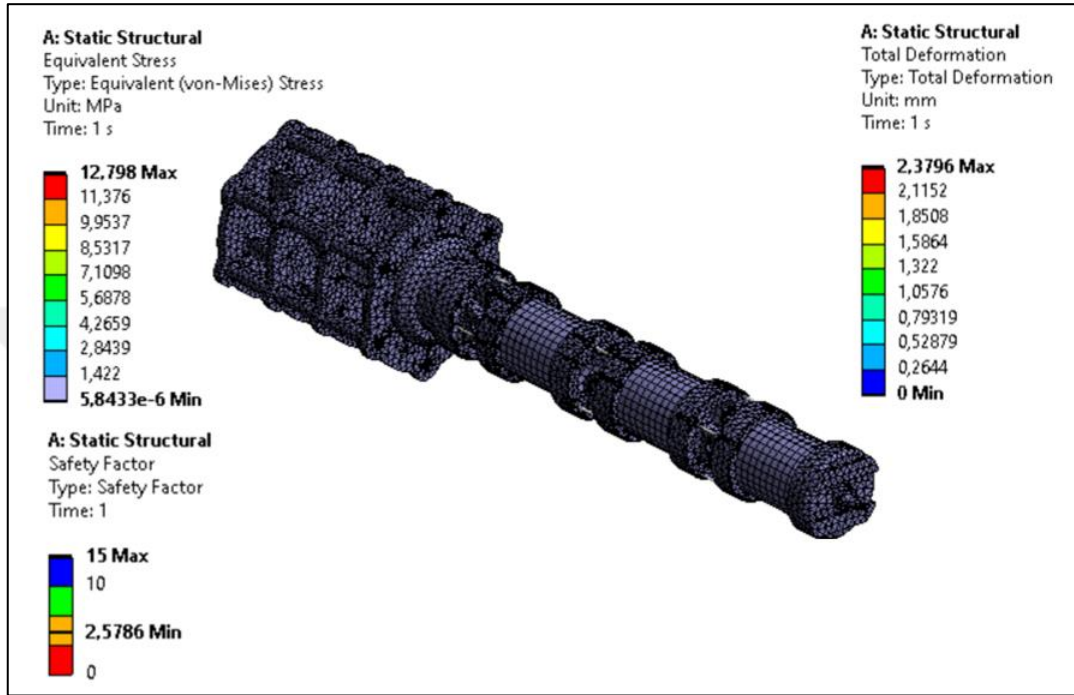
$$l_{DD'} = 51.9670 \text{ mm}$$



Şekil 4.3. Tendon Uzunlukları

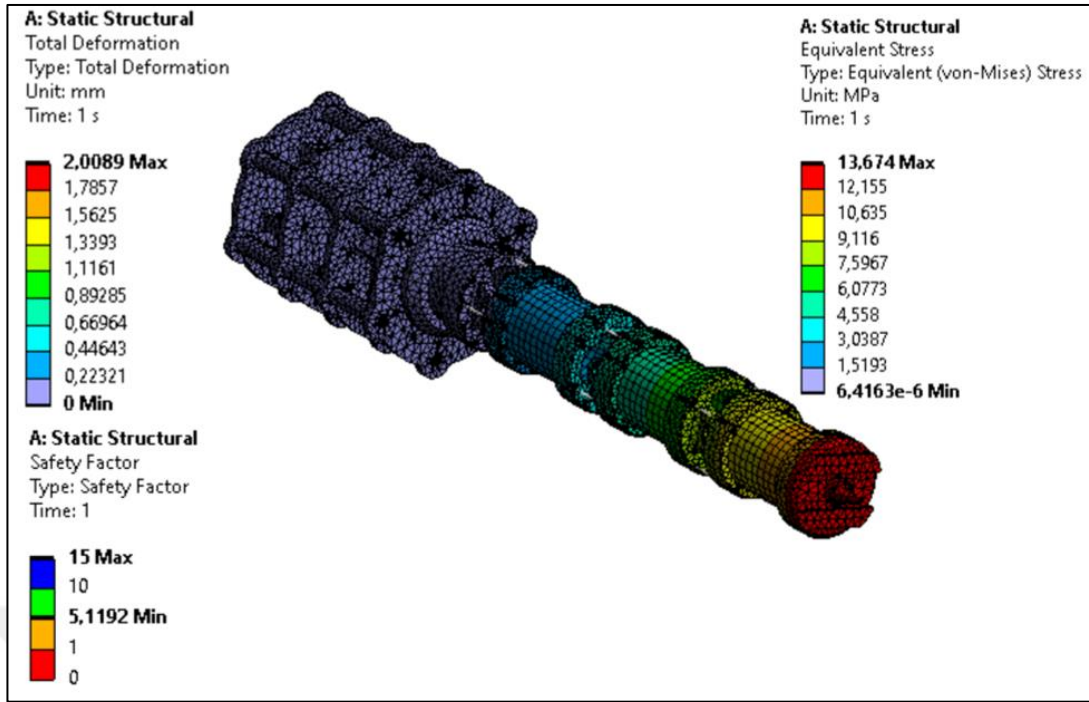
3D çizim ortamında aynı açı seti değerlerine konumlandırılan model üzerinde yapılan ölçüm değerleri ile matematiksel çözüm sonucu elde edilen uzunluk değerlerinin Şekil 4.3'te görüldüğü gibi 10^{-4} mm. ölçüm toleransı hassasiyetinde aynı sonucu verdikleri tespit edilmiştir.

Tablo 1’de mekanik özellikleri verilen ABS, PLA ve 3D printer filamenti olarak geliştirilen PATH-CF15 materyalleri atanarak ANSYS Workbench ortamında yerçekimi ivmesi, gerekli yükleme ve sınır koşulları altında statik analizleri gerçekleştirilmiştir.

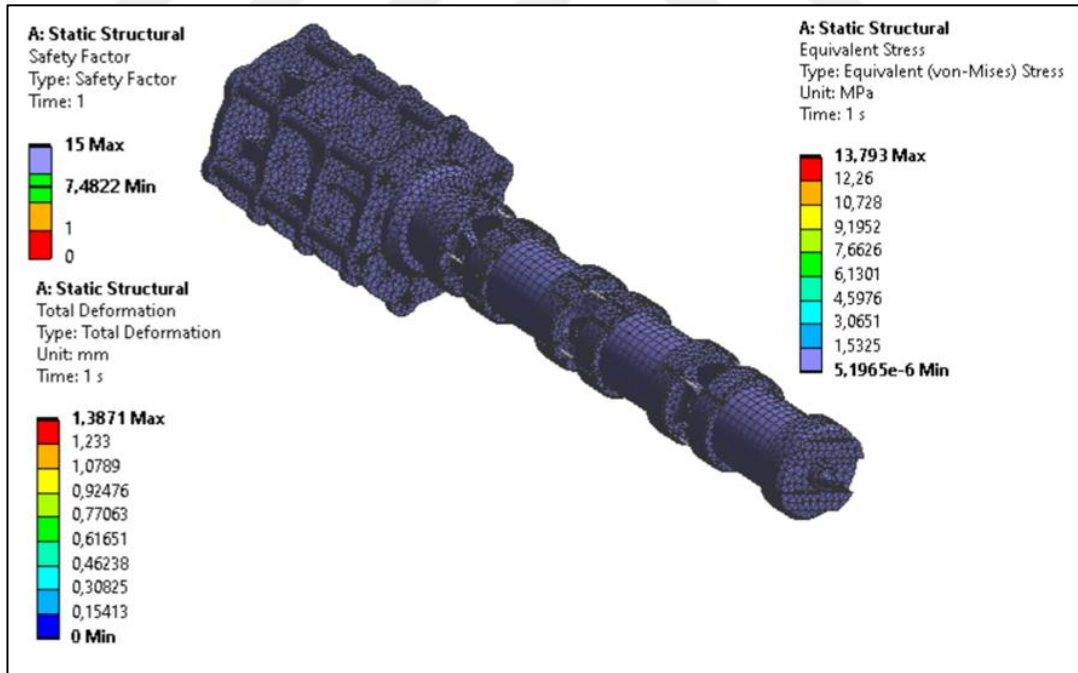


Şekil 4.4. ABS Malzeme Kullanımında Bileşenler İçin Gerilim Dağılımı

Yapılan analizler neticesinde ABS malzeme kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar Şekil 4.4’de, PLA malzeme atanarak yapılan statik analiz sonuçları Şekil 4.5’de ve PATH-CF15 kullanımı durumunda maksimum gerilim, toplam deformasyon ve emniyet faktörü analiz sonuçları Şekil 4.6’da verilmiştir. Ayrıca seçilen malzemelere ait gerilim dağılımı ve analiz sonuçları Tablo 2’de sunulmuştur.



Şekil 4.5. PLA Malzeme Kullanımında Bileşenler İçin Gerilim Dağılımı

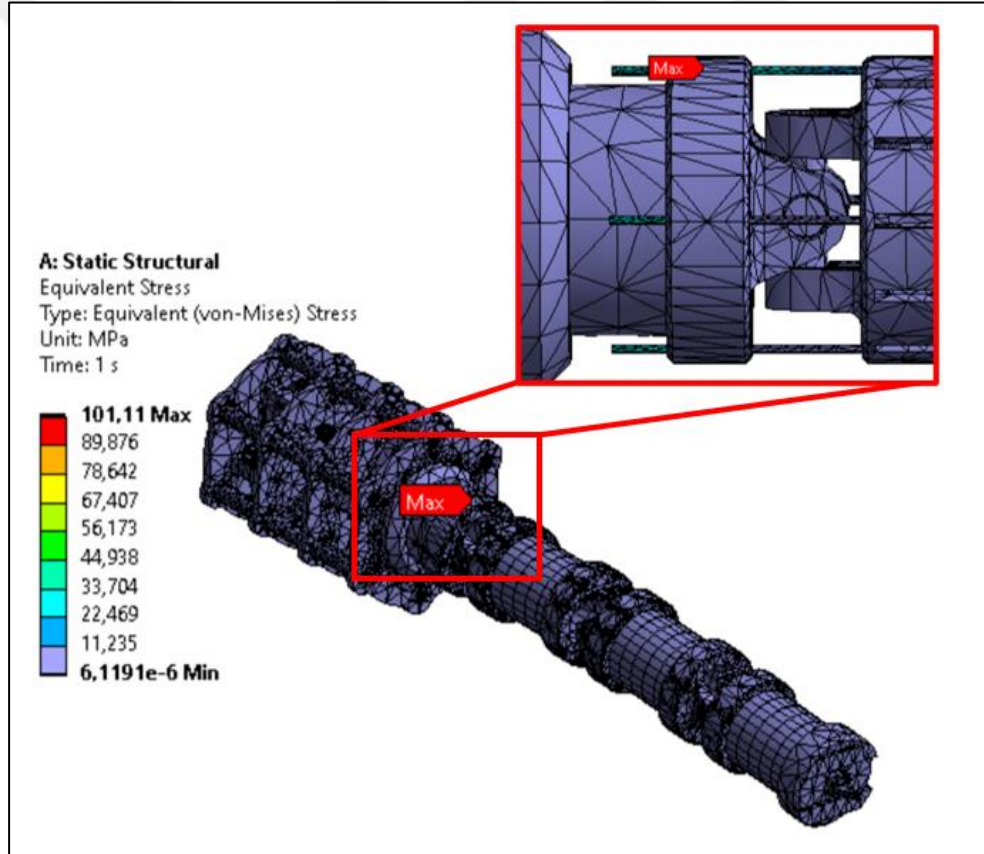


Şekil 4.6. PATH-CF15 Malzeme Kullanımında Bileşenler İçin Gerilim Dağılımı

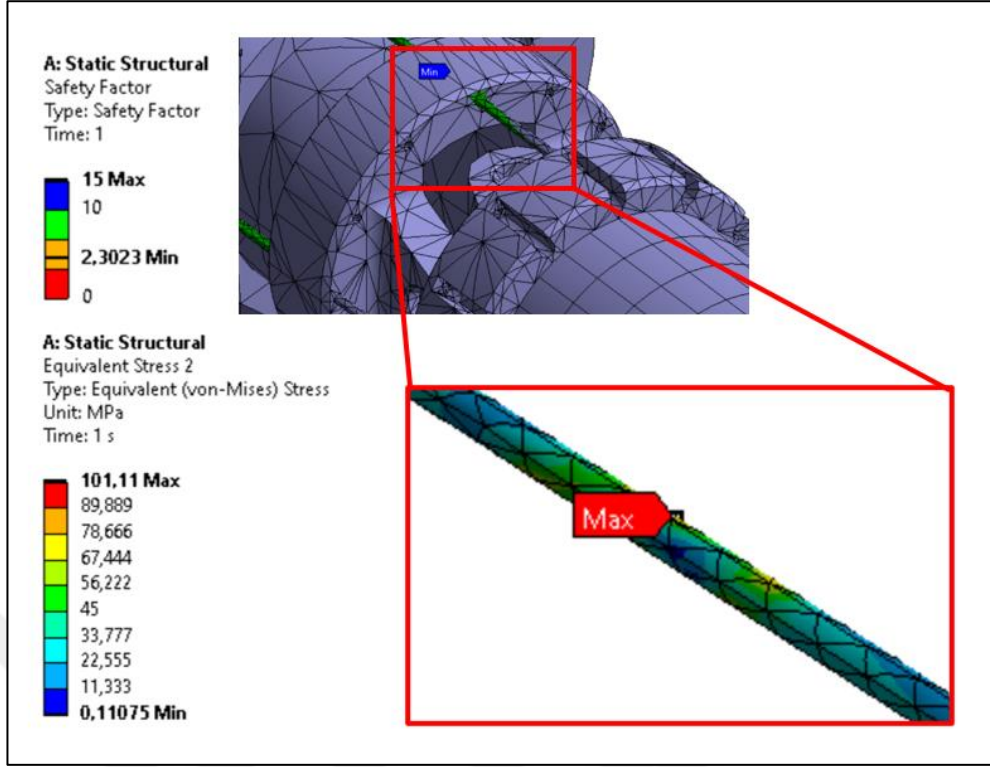
Tablo 2. Seçilen Malzemeler İçin Bileşenlerdeki Gerilim Dağılımı

Materyal	Akma Dayanımı (Mpa)	Maksimum Gerilim (MPa)	Emniyet Faktörü	Toplam Deformasyon (mm)
ABS	33	12,798	2,5786	2,3796
PLA	70	13,674	5,1192	2,0089
PATH-CF15	103,2	13.793	7,4822	1.3871

Model bileşenlerine CF15 atanması ve tendon malzemesi olarak 3 mm. çapında çelik halat kullanılması durumunda Ansys Workbench ortamında gerçekleştirilen statik analiz sonuçları Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.7. Tendonda Oluşan Maksimum Gerilim Dağılımı



Şekil 4.8. Tendonun Maksimum Gerilimi ve Emniyet Faktörü

Yapılan statik analizler neticesinde elde edilen veriler doğrultusunda, güvenlik faktörü ve yüksek çekme akma dayanımı dikkate alındığında PATH-CF15'in en yüksek güvenlik faktörüne sahip olduğu bu nedenle diğer malzemelere göre daha güvenilir olduğu tespit edilmiştir.

En düşük çekme akma dayanımı değerine sahip olan ABS, diğer malzemelere göre daha az dayanıklıdır. Orta düzeyde bir güvenlik faktörü ile yük altında deformasyon riski daha yüksek olabilir. CF15'in en pahalı malzeme olduğu göz önüne alındığında, uygulama gereksinimlerine göre uygun malzeme seçilirken maliyet faktörünün de dikkate alınması gerekmektedir.

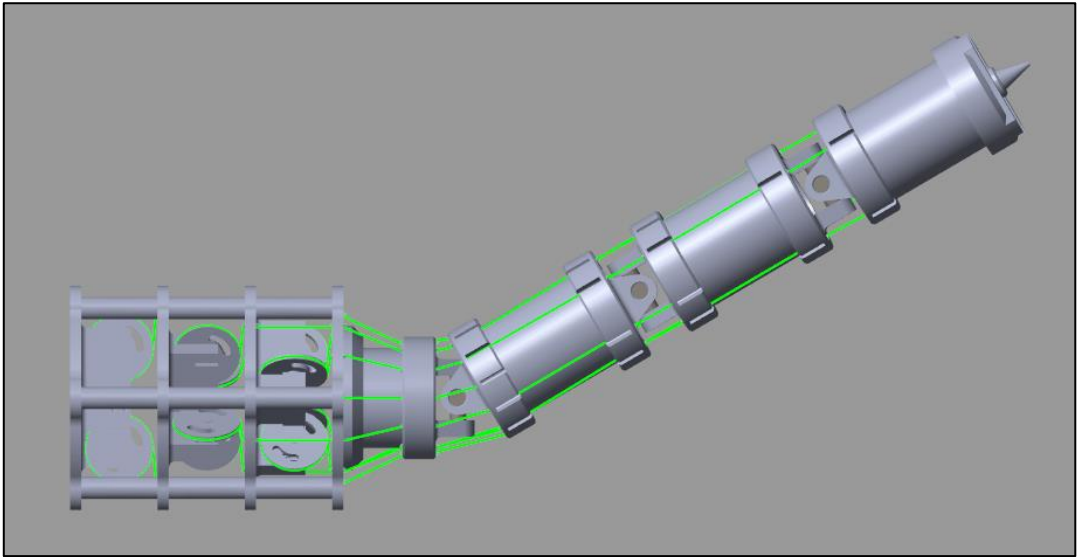
İncelenen malzemelerin yorulma davranışı göz önüne alındığında, uzun vadeli dayanıklılıklarını ve döngüsel yüklemeye karşı dirençlerini değerlendirmek için yorulma testlerini dahil edip analizi genişleterek, malzemelerin tekrarlanan veya dalgalanan gerilimler altında nasıl performans gösterdiği, uzun süreli çalışma koşulları için güvenilirlikleri ve uygunluklarını detaylı olarak incelenebilir.

Ayrıca dayanıklılık limitlerini ve yorulma mukavemetlerini belirlemek için bileşenler üzerinde kapsamlı yorulma ömrü tahmin testleri ile özellikle dinamik yükleme koşulları altında, malzemelerin uzun sürelerdeki performansına ilişkin çalışmalar yapılabilir. Gerilim-ömrü ve gerinim-ömrü yöntemleri gibi gelişmiş yorulma analizi tekniklerini entegre ederek, her bir malzemenin yorulma ömrü doğru bir şekilde tahmin edilebilir.

Uzun vadede, yorulma direncini artırmak, yorulmanın neden olduğu bozulmayı azaltmak için malzeme bileşiminin değiştirilmesi gibi yenilikçi malzeme geliştirme stratejileri geliştirilerek, yapısal bütünlükten ödün vermeden tekrarlayan yükleme döngülerine dayanabilen yeni nesil malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunarak yapılacak uygulamalara artırılmış güvenlik ve uzun ömür sağlanabilir.

Dinamik tepkileri belirlemek, kuvvet, tork ve hareketlerini simüle etmek için Simscape Multibody ortamına aktarılan ve blok diyagramları ile tendon bağlantıları yapılan ve kontrol alt sistemleri oluşturulan fiziksel sistem modele üzerinde dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

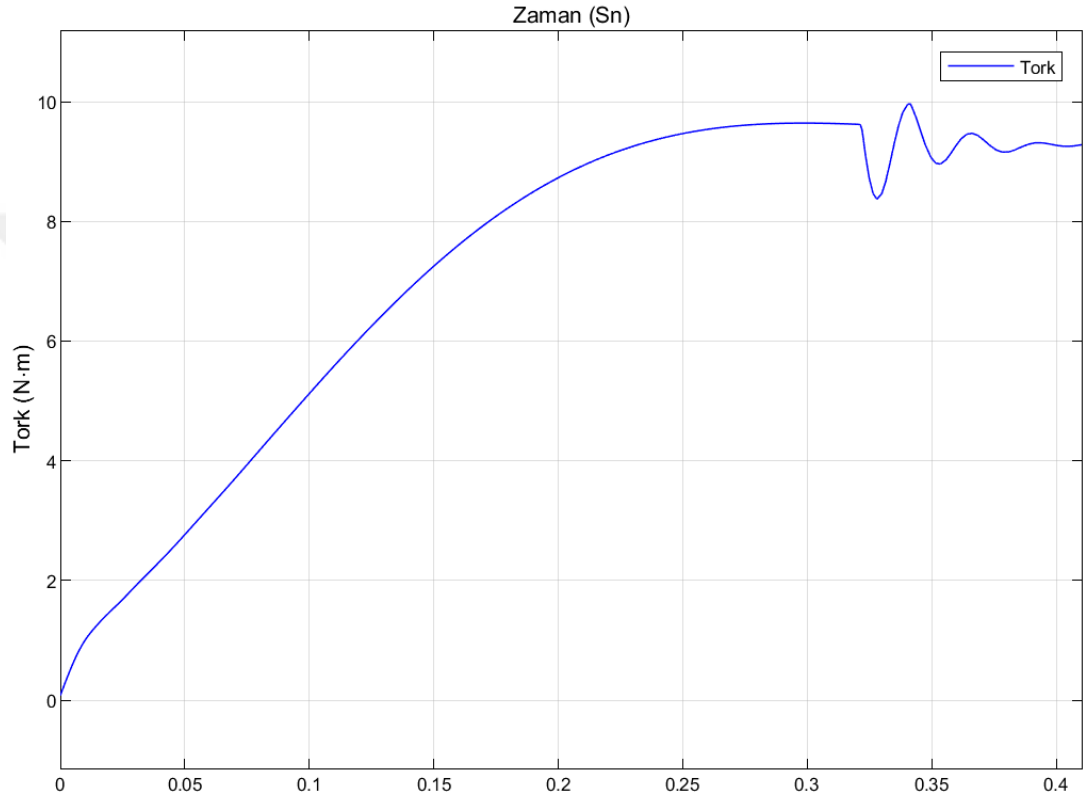
İhtiyaç olan maksimum kuvvet ve torkların tespit edilmesi maksadıyla manipülatöre Şekil 4.9'da görüldüğü gibi düz pozisyondan pozitif Y ekseninde 30° hareket komutu verilerek simülasyonu gerçekleştirilmiştir.



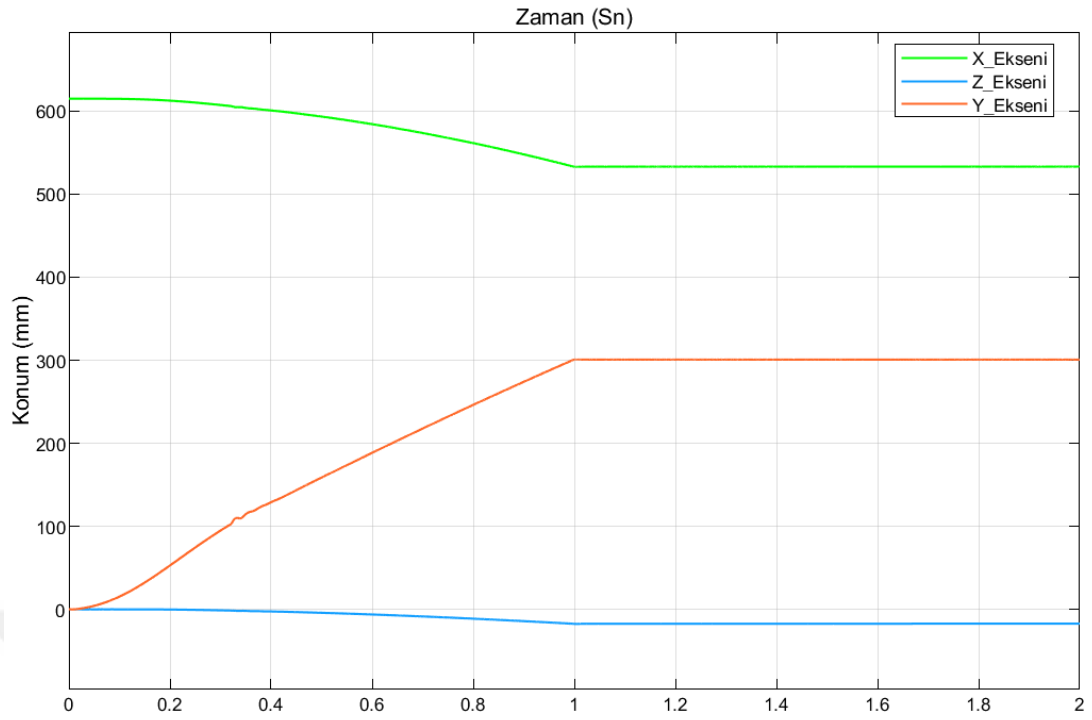
Şekil 4.9. Belirlenen Açı Değerine Hareket Eden TTSR

Simülasyonu gerçekleştirilen modelin tahrik ünitesinde mevcut servo motorların ihtiyaç duyacağı maksimum tork değeri Şekil 4.10'da görüldüğü gibi yaklaşık 10 Nm. olarak tespit edilmiştir.

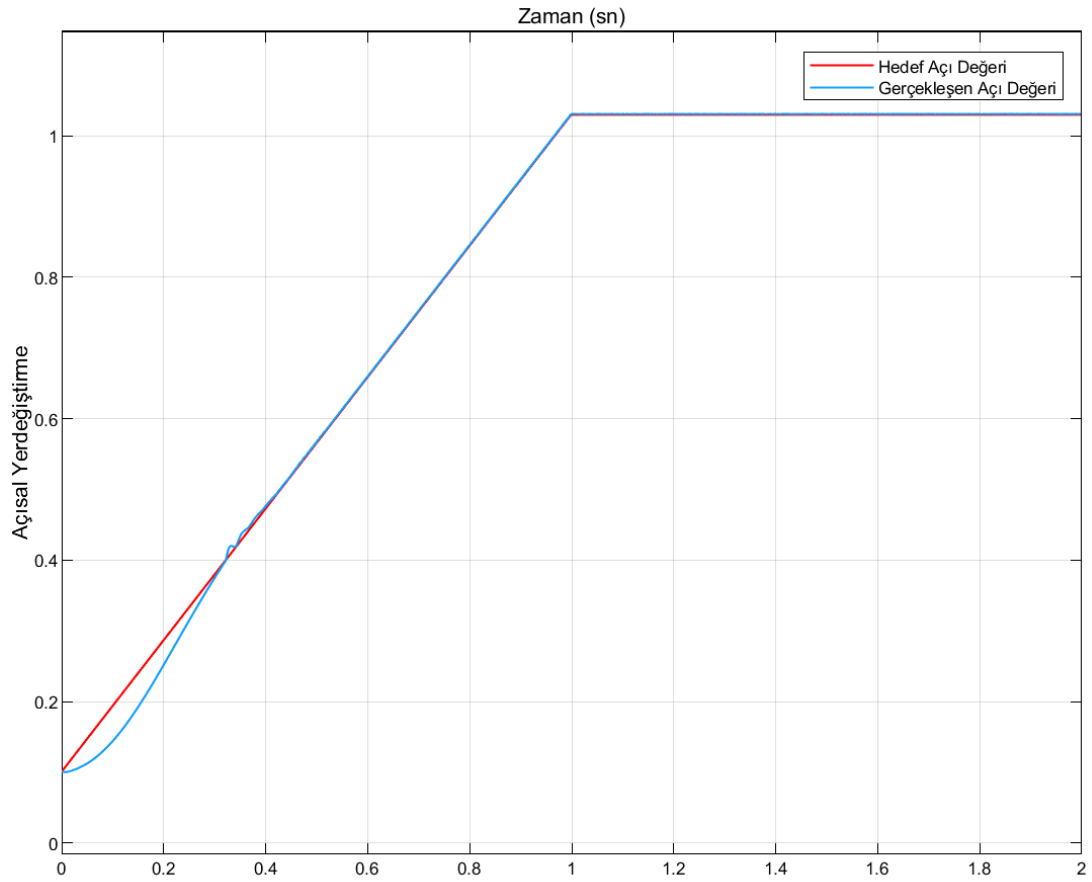
Uç işlevcisine ait konum-zaman grafiği Şekil 4.11'de açılmal yer değıştirme grafiği Şekil 4.12'de sunulmuştur.



Şekil 4.10. Maksimum Tork Grafiği



Şekil 4.11. Konum-Zaman Grafiği



Şekil 4.12. Açısal Yer Değiştirme Grafiği

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, altı serbestlik dereceli Tendon Tahrikli Sürekli Robotun tasarımı yapılmış, yapılan tasarımın kinematik, statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Manipülâtörün linklerine ve üniversal mafsallara sistematik olarak koordinat sistemleri yerleştirilmiş, literatürde verildiği üzere öteleme ve dönme matrisleri kullanılarak manipülâtöre ait homojen transformasyon matrisi elde edilmiştir. İstenilen açı seti değerleri girilerek uç işlevcisinin referans koordinat sistemine göre konum ve yönelimi tespit edilmiş ihtiyaç duyulan tendon uzunlukları belirlenmiştir.

Tasarımı yapılan modelin üç farklı materyal için statik analizi Ansys WORKBENCH programında gerekli yükleme ve sınır koşulları altında gerçekleştirilerek analiz sonucunda elde edilen veriler grafiksel olarak ifade edilmiştir.

Dinamik analiz için Simulink/SIMSCAPE MULTIBODY ortamına aktarılan ve blok diyagramlarla tendon bağlantıları yapılan modelin, dinamik tepkilerinin ve istenilen mafsal açılara hareket edebilmesi için gerekli kuvvet/tork değerlerinin belirlenmesi amacıyla simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak, tasarlanan modelde ve model üzerinde yapılan analizlerde elde edilen veriler, manipülâtörün kontrolü, yörünge planlaması, kontrol algoritmaları uygulamalarında kullanılabilir, stabilitenin ve kontrolün artırılması maksadıyla aktüatörler, tendon gerginlik sensörleri, kontrolörler ve seçilen materyaller üzerinde geliştirmeye yönelik çalışmalar yapılabilir.

Yapılan tasarım, ileriki dönemlerde yapılacak olan çalışmalarda mobil uygulamalara adapte edilebilir, lineer kızak montajı ile X-ekseni yönünde hareket kabiliyeti kazandırılabilir, manipülâtörün boyutları maksimize/minimize edilerek, link sayısı ve serbestlik derecesi artırılarak mevcut endüstriyel sistem ve cihazlara entegre edilebilir.

KAYNAKLAR

Aristoteles. (2022). *Politika* (24. Baskı). (M.Tunçay, Çev.). Remzi Kitabevi.

Russo, M., Sadati, S. M. H., Dong, X., Mohammad, A., Walker, I. D., Bergeles, C., Xu, K. ve Axinte, D. A. (2023). Continuum Robots: An Overview. *Advanced Intelligent Systems*, 5(5). <https://doi.org/10.1002/aisy.202200367>

Anderson, V. ve Horn, R. (1970). Tensor arm manipulator, U.S. Patent 3,497,083.

Walker, I. D. ve Hannan M. W. (1999). A novel elephant's trunk robot. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* (Cat. No.99TH8399), pp. 410-415. [DOI: 10.1109/AIM.1999.803204](https://doi.org/10.1109/AIM.1999.803204)

McMahan, W., Jones B. A. ve Walker, I. D. (2005). Design and implementation of a multi-section continuum robot: Air-Octor. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2578-2585. Edmonton, AB, Canada. [DOI: 10.1109/IROS.2005.1545487](https://doi.org/10.1109/IROS.2005.1545487)

Hirose, S. ve Mori M. (2004). Biologically Inspired Snake-like Robots. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1-7. Shenyang, China. [DOI: 10.1109/ROBIO.2004.1521742](https://doi.org/10.1109/ROBIO.2004.1521742)

Cianchetti, M., Arienti, A., Follador M., Mazzolai, B., Dario, P. ve Laschi, C. (2011) Design concept and validation of a robotic arm inspired by the octopus, *Materials Science and Engineering: C*, Volume 31, Issue 6, , Pages 1230-1239. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2010.12.004>

Chirikjian, G. S. ve Burdick, J. W. (1990). An obstacle avoidance algorithm for hyper-redundant manipulators. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, , pp. 625-631 vol.1. Cincinnati, OH, USA. [DOI: 10.1109/ROBOT.1990.126052](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1990.126052)

Noonan, D. P., Vitiello, V., Shang, J., Payne C. J. ve Yang, G. Z. (2011). A modular, mechatronic joint design for a flexible access platform for MIS. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 949-954, San Francisco, CA, USA [doi: 10.1109/IROS.2011.6094907](https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094907).

Conrad, B. L. ve Zinn, M. R. (2017). Interleaved Continuum-Rigid Manipulation: An Approach to Increase the Capability of Minimally Invasive Surgical Systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 29-40. [DOI: 10.1109/TMECH.2016.2608742](https://doi.org/10.1109/TMECH.2016.2608742)

- Zorn, L. ve ark. (2018). A Novel Telemanipulated Robotic Assistant for Surgical Endoscopy: Preclinical Application to ESD. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol.65,no.4,pp. 797-808
[DOI: 10.1109/TBME.2017.2720739](https://doi.org/10.1109/TBME.2017.2720739)
- Chen, G., Pham M. T., ve Redarce, T. (2008). A semi-autonomous micro-robotic system for Colonoscopy. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 703-708, Bangkok, Thailand.
[DOI: 10.1109/ROBIO.2009.4913087](https://doi.org/10.1109/ROBIO.2009.4913087)
- Hu, H., Wang, P., Zhao, B., Li M. ve Sun, L. (2009). Design of a novel snake-like robotic colonoscope. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 1957-1961 Guilin, China.
[DOI: 10.1109/ROBIO.2009.5420543](https://doi.org/10.1109/ROBIO.2009.5420543)
- Degani, A., Choset, H., Wolf, A., Ota T. ve Zenati, M. A. (2006). Percutaneous Intrapericardial Interventions Using a Highly Articulated Robotic Probe. *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob*, pp. 7-12. Pisa, Italy
[DOI: 10.1109/BIOROB.2006.1639051](https://doi.org/10.1109/BIOROB.2006.1639051)
- Bergeles, C. ve Yang, G. Z. (2014). From Passive Tool Holders to Microsurgeons: Safer, Smaller, Smarter Surgical Robots. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 61, no. 5, pp. 1565-1576.
[DOI: 10.1109/TBME.2013.2293815](https://doi.org/10.1109/TBME.2013.2293815)
- Lane, D. M. ve ark. (1997). AMADEUS: advanced manipulator for deep underwater sampling. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2145-2151 vol.3, Albuquerque, NM, USA.
[DOI: 10.1109/ROBOT.1997.619280](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1997.619280)
- Wang, H., He, X., Fengshu Y., Xin L., Chen Y., Siqing C., Junlong C., Yonghui Z. ve Xueshan Z. (2020). Modeling and Experiments on the Swallowing and Disgorging Characteristics of an Underwater Continuum Manipulator. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2946-2952, Paris, France. [DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9196780](https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196780)
- Li, Y., Shen, F., Lang, Z., Cai, M., Zeng Q., Liu, Q. ve Cai, F. (2023). An underwater near-infrared spectral continuum robot as a tool for in situ detection and classification, *Measurement*, Volume 216, 112913, ISSN 0263-2241. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112913>
- Ma, N., Monk, S. ve Cheneler, D. (2022). Design, Prototyping and Test of a Dual-Arm Continuum Robot for Underwater Environments. *2022 7th International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)*, pp. 158-164, Singapore. [DOI: 10.1109/ICRAE56463.2022.10054612](https://doi.org/10.1109/ICRAE56463.2022.10054612)

- Aoki, T., Ohno H. ve Hirose, S. (2002). Design of Slim Slime Robot II (SSR-II) with Bridle Bellows, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 835-840 vol.1 Lausanne, Switzerland. DOI: [10.1109/IRDS.2002.1041494](https://doi.org/10.1109/IRDS.2002.1041494)
- Haraguchi, R., Osuka, K., Makita S. ve Tadokoro, S. (2005). The development of the mobile inspection robot for rescue activity, MOIRA2," *ICAR. 12th International Conference on Advanced Robotics*, pp. 498-505, Seattle, WA, USA. DOI: [10.1109/ICAR.2005.1507455](https://doi.org/10.1109/ICAR.2005.1507455)
- Suzuki, K., Nakano, A., Endo G. ve Hirose. S. (2012). Development of multi-wheeled snake-like rescue robots with active elastic trunk. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4602-4607, Vilamoura-Algarve, Portugal. DOI: [10.1109/IROS.2012.6385757](https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385757)
- Ito, K. ve Murai, R. (2008). Snake-like robot for rescue operations - Proposal of a simple adaptive mechanism designed for ease of use. *Advanced Robotics*, 22 (6) pp. 771-785. DOI: [10.1163/156855308X305326](https://doi.org/10.1163/156855308X305326)
- Kawai, Y., Ito, K. ve Aoki, H. (2014). Passive stabilizing mechanism for snake-like rescue robot. *13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, pp. 1740-1745, Singapore. DOI: [10.1109/ICARCV.2014.7064579](https://doi.org/10.1109/ICARCV.2014.7064579)
- Canali, C., Pistone, A., Ludovico, D., Guardiani, P., Gagliardi, R., De Mari Casareto Dal Verme, L., Sofia, G. ve Caldwell, D.G. (2012). Design of a Novel Long-Reach Cable-Driven Hyper-Redundant Snake-like Manipulator for Inspection and Maintenance. *Appl. Sci.* 12, 3348. <https://doi.org/10.3390/app12073348>
- Wang, M., Dong, X., Ba, W., Mohammad, A., Axinte D. ve Norton, A. (2021). Design, modelling and validation of a novel extra slender continuum robot for in-situ inspection and repair in aeroengine. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 67, 102054, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102054>
- Dong, X., Axinte, D., Palmer, D., Cobos, S., Raffles, M., Rabani, A. ve Kell, J. (2017). Development of a slender continuum robotic system for on-wing inspection/repair of gas turbine engines. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, volume 44, paper 218-229, ISSN 0736-5845. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.09.004>.

O'Neil L. (2015, August 08). Tesla terrifies everybody with a snake-like robot that can automatically plug itself into cars. CBC. <https://www.cbc.ca/news/trending/tesla-s-car-charging-robot-snake-can-plug-itself-in-no-humans-necessary-1.3183284> adresinden 02 Ocak 2024 tarihinde alınmıştır.

Volkswagen Group News. (2020, December 12). Initial contact: The mobile charging robot – Presenting a vision. <https://www.automotiveworld.com/news-releases/volkswagen-initial-contact-the-mobile-charging-robot-presenting-a-vision/> adresinden 02 Ocak 2024 tarihinde alınmıştır.

Xu, D., Li, E., Liang, Z. ve ark. (2020). Design and Tension Modeling of a Novel Cable-Driven Rigid Snake-Like Manipulator. *J Intell Robot Syst* 99, 211–228 <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01115-w>

Tang, J., Zhang, Y., Huang, F., Li, J., Chen, Z., Song, W., Zhu, S. ve Gu, J. (2019). Design and Kinematic Control of the Cable-Driven Hyper-Redundant Manipulator for Potential Underwater Applications. *Applied Sciences*, 9, 1142. <https://doi.org/10.3390/app9061142>

Qin, L., Huang, F., Chen, Z., Song, W1. ve Shiqiang Z. S. (2020). Teleoperation Control Design with Virtual Force Feedback for the Cable-Driven Hyper-Redundant Continuum Manipulator. *Appl. Sci.* 10, 8031. <https://doi.org/10.3390/app10228031>

Martín-Barrio, A., Roldán-Gómez, J.J., Rodríguez, I., Del Cerro, J. ve Barrientos, A. (2020). Design of a Hyper-Redundant Robot and Teleoperation Using Mixed Reality for Inspection Tasks. *Sensors*, Switzerland. <https://doi.org/10.3390/s20082181>

Tang, L., Wang, J., Zheng, Y., Gu, G., Zhu, L. ve Zhu, X. (2017). Design of a cable-driven hyper-redundant robot with experimental validation. *International Journal of Advanced Robotic System.* <https://doi.org/10.1177/1729881417734458>

Huang, L., Liu B., Yin L., Zeng, P. ve Yang, Y. (2021). Design and Validation of a Novel Cable-Driven Hyper-Redundant Robot Based on Decoupled Joints. *Journal of Robotics*, Volume 2021, Article ID 5124816, 16 pages <https://doi.org/10.1155/2021/5124816>

Bingöl, Z. ve Küçük, S. (2017, s. 23-53) *Robot Kinematiği* (4. Baskı). Umuttepe Yayınları

- Liu X., Sun, C., Banerjee, J. R., Dan, H. ve Chang, L. (2021). An exact dynamic stiffness method for multibody systems consisting of beams and rigid-bodies. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 150, 107264, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107264>
- Rong, B., Rui, X., Tao, L. ve ark. (2019). Theoretical modeling and numerical solution methods for flexible multibody system dynamics. *Nonlinear Dyn* 98, 1519–1553. [DOI:10.1007/s11071-019-05191-3](https://doi.org/10.1007/s11071-019-05191-3)
- Peiret, A., Gonzalez F., Kövecses, J. ve Teichmann, M. (2018). Multibody system dynamics interface modelling for stable multirate co-simulation of multiphysics systems. *Mechanism and Machine Theory*, Volume 127, Pages 52-72, ISSN 0094-114X. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.04.016>
- Rodríguez, JF., Thomas, JP. ve Renaud JE. (2003). Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 9 (4) 219-230. <https://doi.org/10.1108/13552540310489604>
- Farah, S., Anderson, DG. ve Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107:367-392. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>
- Camara-Molina, JC., Moliner, E., Martínez-Rodrigo M.D., Connolly, D.P., Yurchenko, D., Galvín, P. ve Romero, A. (2023). 3D printed energy harvesters for railway bridges-Design optimisation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 190:110133. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110133>
- Lancea, C., Chicos, L.A., Zaharia S.M., Pop, M.A., Pascariu, I.S., Buican G.R. ve Stamate, V.M. (2022). Simulation, Fabrication and Testing of UAV Composite Landing Gear. *Applied Sciences* 12 (17):8598. <https://doi.org/10.3390/app12178598>