

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PNÖMATİK YAPAY KASLI 3 SERBESTLİK DERECELİ ROBOT KOLUN YAPAY
SİNİR AĞLARI İLE KONUM KONTROLÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KÜBRA TÜRE

TEMMUZ 2023

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PNÖMATİK YAPAY KASLI 3 SERBESTLİK DERECELİ ROBOT KOLUN YAPAY
SİNİR AĞLARI İLE KONUM KONTROLÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kübra TÜRE

DANIŞMAN: Prof. Dr. H. Alper ÖZYİĞİT

ZONGULDAK
Temmuz 2023

KABUL:

Kübra TÜRE tarafından hazırlanan “Pnömatik Yapay Kaslı 3 Serbest Dereceli Robot Kolun Yapay Sinir Ağları İle Konum Kontrolü” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir.
31/07/2023

Danışman: Prof. Dr. H. Alper ÖZYİĞİT
İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mekatronik
Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği Bölümü

Üye: Doç. Dr. Menderes KAM
Düzce Üniversitesi, Dr. Engin Pak Cumayeri Meslek Yüksekokulu, Makine ve
Metal Teknolojileri Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylıyorum. / / 20....

Prof. Dr. Fikret GÖLGELEYEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Kübra TÜRE

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PNÖMATİK YAPAY KASLI 3 SERBESTLİK DERECELİ ROBOT KOLUN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE KONUM KONTROLÜ

Kübra TÜRE

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. H. Alper ÖZYİĞİT

Temmuz 2023, 57 sayfa

Bu çalışmada, 3 serbestlik derecesine sahip olan bir robot kolun pnömatik yapay kaslar kullanılarak hareket ettirilmesi hedeflenmiştir. Robot kol, döner bir tabana sahip ve uzayıp kısalan yapay kaslarla desteklenen iki koldan oluşmaktadır. Bu tasarımın amacı, robot kolunun uç noktasının konumunu kontrol etmektir. Tasarımın ilk aşamasında, Solidworks programı kullanılarak robot kolunun tasarımı ve kinematik analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, Matlab Simulink kullanılarak robot kolunun konum kontrolü simülasyon yoluyla gerçekleştirilmiştir. Bu adımda, pnömatik yapay kasların dönme açısı ve uzunlukları değiştirilerek, kolun uç noktasının x, y ve z kartezyen koordinatlardaki konumu hesaplanmıştır.

Son aşamada, elde edilen simülasyon verileri kullanılarak bir yapay sinir ağı programı eğitilmiştir. Yapay sinir ağı, tabanın dönme açısı ve yapay kas uzunluklarını giriş olarak alırken, kolun uç noktasının x, y ve z koordinatlarını çıkış olarak vermektedir. Eğitim verileri, çeşitli dönme açıları ve yapay kas uzunlukları kullanılarak oluşturulmuş ve toplamda 139 satırdan oluşmuştur.

ÖZET (devam ediyor)

Yapay sinir ağının eğitimi 36 iterasyon sonunda tamamlanmış ve %0.9998 gibi yüksek bir doğruluk elde edilmiştir. Bu, yapay sinir ağının, farklı giriş değerleri için makul fiziksel sınırlar içinde kalarak, robot kolunun konum kontrolünü başarıyla gerçekleştirebildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma pnömatik yapay kaslarla kontrol edilen bir robot kolunun tasarımından başlayarak, kinematik analizini yapma, Matlab Simulink ile simülasyonunu gerçekleştirme ve yapay sinir ağları kullanarak konum kontrolünü eğitme aşamalarını içermektedir. Elde edilen sonuçlar, robot kolunun başarılı bir şekilde kontrol edilebildiğini ve potansiyel uygulama alanlarının olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Pnömatik yapay kas, robot kol, yapay sinir ağı, konum kontrolü.

Bilim Kodu: 625.01.00.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

POSITION CONTROL OF PNEUMATIC ARTIFICIAL MUSCLE 3 DEGREES OF FREEDOM ROBOT ARM WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Kübra TÜRE

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor: Prof. Dr. H. Alper ÖZYİĞİT

July 2023, 57 pages

In this study, the aim is to control a robot arm with 3 degrees of freedom using pneumatic artificial muscles. The robot arm consists of two arms supported by a rotating base and actuated with extending and contracting artificial muscles. The purpose of this design is to control the position of the robot arm's end effector. In the initial stage, the design and kinematic analysis of the robot arm were performed using the Solidworks program. Subsequently, the position control of the robot arm was achieved through simulation using Matlab Simulink. In this step, by changing the rotation angle and lengths of the pneumatic artificial muscles, the position of the arm's end effector in x, y and z cartesian coordinates was calculated.

In the final stage, an artificial neural network was trained using the simulation data obtained. The artificial neural network takes the rotation angle of the base and the lengths of the artificial muscles as inputs and provides the x, y and z coordinates of the arm's end effector as outputs. Training data were created using various rotation angles and artificial muscle lengths, totaling 139 rows.

ABSTRACT (continued)

The training of the artificial neural network was completed after 36 iterations, achieving a high accuracy of about %99.98. This indicates that the artificial neural network successfully performs the position control of the robot arm within reasonable physical limits for different input values.

In conclusion, this study includes the design of a robot arm controlled by pneumatic artificial muscles, kinematic analysis, simulation using Matlab Simulink and training of the position control using artificial neural networks. The results demonstrate the successful control of the robot arm and its potential applications.

Keywords: Pneumatic artificial muscle, robot arm, artificial neural network, position control.

Science Code: 625.01.00.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasında, araőtırmanın yürütölmesi ve sonuçlanmasına kadar değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danıőmanım saygıdeğer hocam Prof. Dr. H. Alper ÖZYİĞİT'e teőekkürlerimi sunarım.

Her zaman ve tüm tez çalıőmam boyunca maddi manevi emek ve destekleriyle yanımda olan arkadaşlarıma ve çok değerli aileme saygı ve en içten teőekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL:	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
1.1 LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR	2
BÖLÜM 2 PNÖMATİK YAPAY KASLI ROBOT KOL.....	5
2.1 PNÖMATİK YAPAY KASIN GENEL YAPISI.....	5
2.1.1 Pnömatik Yapay Kasların Avantajları.....	6
2.1.2 Pnömatik Yapay Kasların Dezavantajları	7
2.2 PNÖMATİK YAPAY KAS ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	9
2.3 PNÖMATİK YAPAY KAS ÇEŞİTLERİ	11
2.3.1 Pileli PYK.....	11
2.3.2 Baldwin Tip Pnömatik Kas	12
2.3.3 Örgülü Pnömatik Kas	13
2.3.4 Diyafram Kasları	14
2.3.5 Körük Kasları	14
2.3.6 Bükülmüş ve Sarılmış Kaslar	14

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.3.7 McKibben Kasları	14
2.3.8 Fiberle Güçlendirilmiş Kaslar	15
2.3.9 Şekil Hafızalı Alaşımli Kaslar.....	15
2.3.10 Silindirik Kaslar	15
2.3.11 Yuvarlak Kaslar	15
2.3.12 Konik Kaslar	16
2.3.13 Çoklu Katmanlı Kaslar	16
2.3.14 Yarlott Kasları.....	16
2.3.15 Festo Pnömatik Yapay Kas	17
2.4 PNÖMATİK YAPAY KAS UYGULAMA ALANLARI.....	19
2.5 PNÖMATİK YAPAY KASLARIN MODELLENMESİ.....	21
2.5.1 Pnömatik Yapay Kasların Geometrik/Statik Modeli.....	22
2.5.2 Pnömatik Yapay Kasların Fenomenolojik /Dinamik Modeli.....	23
2.6 KONTROL SİSTEMLERİ	24
2.6.1 PID Kontrolü	24
2.6.2 İleri Besleme Kontrolü	25
2.6.3 Uyarlanabilir Kontrol	25
2.6.4 Bulanık Mantık Kontrolü	25
2.7 YAPAY SİNİR AĞLARI.....	25
2.7.1 Yapay Sinir Ağ Modelleri	27
2.7.2 Yapay Sinir Ağlarının Özellikleri	27
BÖLÜM 3 MEKNAİK TASARIM VE KONTROL	29
3.1 ÇALIŞMANIN AMACI.....	29
3.2 YÖNTEM	30
3.2.1 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kol Tasarımı	30
3.2.2 3 Serbestlik Dereceli Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Kinematik Analizi	31
3.2.3 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Matlab Simulink ile Konum Kontrolü.....	35
3.2.4 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Matlab ve Solidworks Programı	
Karşılaştırılması.....	37

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4 YAPAY SİNİR AĞI UYGULAMASI	41
BÖLÜM 5 SONUÇ VE ÖNERİLER.....	45
5.1 ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR	49
EK AÇIKLAMALAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ	57



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Pnömatik Kasların Görünüşü ve Çalışma Prensibi	2
Şekil 2.1 Pnömatik Yapay Kasın Genişlemesi ve Büzülmesi	5
Şekil 2.2 Pnömatik Yapay Kasın Çalışması.....	10
Şekil 2.3 Pileli Tip Pnömatik Kas	11
Şekil 2.4 Baldwin Tipi Pnömatik Kaslar.....	12
Şekil 2.5 Örgülü Pnömatik Yapay Kas	13
Şekil 2.6 McKibben Kası	15
Şekil 2.7 Yarlott Kasları.....	16
Şekil 2.8 Festo Pnömatik Yapay Kas	18
Şekil 2.9 Festo Pnömatik Yapay Kas Dinamik Karakteristiği	18
Şekil 2.10 Pnömatik Yapay Kasın Fenomenolojik Modeli	24
Şekil 3.1 3 Serbestlik Dereceli Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kol Tasarımı	31
Şekil 3.2 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Çizimi.....	31
Şekil 3.3 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun θ_1 Açısının Gösterimi.....	32
Şekil 3.4 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kol'da L_1 Gösterimi.....	32
Şekil 3.5 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kol'da L_2 Gösterimi.....	33
Şekil 3.6 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun θ_2 ve θ_3 Açılarının Gösterimi	33
Şekil 3.7 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Başlangıç Konumu	34
Şekil 3.8 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Maksimum Eğilme Konumu	34
Şekil 3.9 Matlab Simulink Programı Üzerinden Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Konum Kontrolü için Oluşturulan Blok Diyagramı	35
Şekil 3.10 Matlab Simulink Üzerinden Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kol için Oluşturulan Modelin Blok Diyagramı	36
Şekil 3.11 PYK'lı Robot Kolun Simulink Üzerinden Oluşturulan Blok Diyagramı	38

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.12 PYK'lı Robot Kolun X,Y,Z Değerlerine Göre Solidworks Programındaki Konumu	39
Şekil 3.13 (a) PYK'lı Robot Kolun Matlab Simulink Programındaki Konumu (b) PYK'lı Robot Kolu Solidworks Programındaki Konumu.....	39
Şekil 4.1 Eğitim Fazı Sonunda Elde Edilen Regresyon Değerleri	43
Şekil 4.2 Eğitim, Test ve Doğrulama Performans Eğrileri.....	44
Şekil A.1 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Teknik Resmi	53
Şekil A.2 PYK'lı Robot Kolun Teknik Resim Görünüşleri	53



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun θ_1 , θ_2 ve θ_3 Değer Aralıkları.....	34
Çizelge 3.2 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Giriş Değerlerinin Minimum ve Maksimum Değerleri	36
Çizelge 3.3 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Matlab ve Solidworks Programı Üzerinden Alınan x, y, z Konum Değerleri	37
Çizelge 3.4 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Matlab ve Solidworks Programı Üzerinden Alınan θ_2 ve θ_3 Açılı Değerleri	38
Çizelge 4.1 YSA Giriş ve Çıkış Değerleri	42
Çizelge 4.2 Yapay Sinir Ağları Test Sonuçları	43
Çizelge B.1 YSA Eğitimi ve Testi İçin Oluşturulan Veriler (139 veri).....	54



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

ΔR	: Çaptaki Değişim
L_a	: Nominal Boy
ΔL	: Strok Mesafesi
$F[N]$: PYK Tarafından Üretilen Kuvvet (N)
h	: PYK için farklı uygulanan basınç eğrilerine karşı kasılma veya uzama olarak yüzde kas uzunluğu değişimini
F	: Kasılma elemanı
K	: Yay elemanı
B	: Sönümleyici eleman
L_1	: 1. Pistonun basınç altında uzama ve kısalma değeri
L_2	: 2. Pistonun basınç altında uzama ve kısalma değeri
Θ_1	: Robot kolun kendi eksenini etrafında dönmesini sağlayan açı
Θ_2	: L_1 'e bağlı olan açı değeri
Θ_3	: L_2 'e bağlı olan açı değeri
X	: Konum koordinatı
Y	: Konum koordinatı
Z	: Konum koordinatı
R	: Eğitim Fazı Sonunda Elde Edilen Regresyon Değeri

KISALTMALAR

FEA	: Finite Element Analysis
MLP	: Multi-Layer Perceptrons
PID	: Proportional-Integral-Derivative
PYK	: Pnömatik Yapay Kas
RNN	: Recurrent Neural Networks

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

SLP : Single-Layer Perceptrons

YSA : Yapay Sinir Ağı



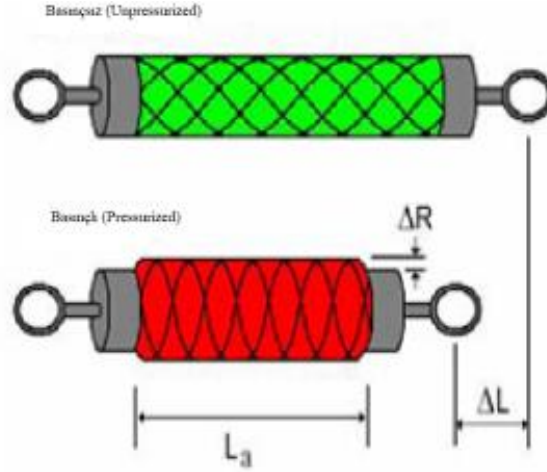
BÖLÜM 1

GİRİŞ

Pnömatik yapay kaslar (PYK'lar), basınçlı hava kullanarak hareket oluşturan bir aktüatör türüdür. Bu kaslar, esnek malzemelerden yapılmış ve hava verildiğinde veya çıkarıldığında genişleyen veya büzülen yapılardır. Bu hareket sırasında yapay kas aksel yönde kısalır ve yükün üzerine tek yönlü çekme kuvveti uygulanır. Pnömatik yapay kas sistemleri, piston yapısıyla donatılmış ve esnek hareket edebilen bir eleman olarak tanımlanabilir. Her iki ucu da bir bağlantı elemanına sahip olan pnömatik yapay kaslar, hafif ve tek yönlü çalışma özelliğine sahiptir. Pnömatik kasların kısalmasının büyüklüğü, havanın basıncına ve pnömatik yapay kasın içerisine doğru akan havanın zamanına bağlıdır. Bu sistemlerin çalışma prensipleri insan kaslarıyla benzerlik gösterir. Pnömatik yapay kaslar, yüksek güç/ağırlık oranı, ayarlanabilir katılık ve yapısal esneklik gibi avantajlar sunarlar. Bu nedenle, robot kollarında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Robot kollarında, yüksek güç/ağırlık oranı ve hafiflik özellikleri önemli olduğundan, atalet momentinin düşük olması da büyük bir önem taşır. Atalet momenti, bir cismin dönme hareketine karşı koyması ve toplam dönme hareket gücüne karşı direnç oluşturması olarak tanımlanır. Bu nedenle, cisim tam verimde dönmemekte ve bu durum robotlarda istenmeyen bir durumdur. Robotlarda atalet momentinin düşük olması önemlidir. Atalet momenti, kütle ve cismin uzaklığına bağlıdır. Kütle artması ile atalet momenti de artmaktadır. Bu nedenle, robotların düşük kütleli olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Pnömatik yapay kasların yüksek güç/ağırlık oranı ve hafiflik gibi özellikleri sayesinde atalet momentinin düşük olması sağlanabilmektedir.

Pnömatik kasların çalışma prensibi, basınç farkından kaynaklanır. Pnömatik kaslarla pnömatik silindireler arasındaki fark, pnömatik kasların kuvvet-uzunluk ilişkisinde değişiklik göstermesidir. Şekil 1.1'de pnömatik kasların görünümü ve çalışma prensibi gösterilmektedir. Kas yükünün artmasıyla, kasın boyu kısalırken çekme kuvveti artar (Mizakova, Jana, Pitel and Tothova 2014). Pnömatik yapay kasın ürettiği kuvvetin değişimi, basıncın değişimine ve kas

uzunluğundaki değişime bağlıdır. Pnömatik kaslarla pnömatik silindirler arasındaki fark pnömatik kasların değişen kuvvet uzunluk ilişkisi durumudur.



Şekil 1.1 Pnömatik Kasların Görünüşü ve Çalışma Prensibi (Ulaş 2018)

Pnömatik robotların kontrolü genellikle daha basit ve hızlıdır. Basit valf ve sensör sistemleriyle yönetilebilirler. Bu, programlama ve işletme açısından daha az karmaşıklık demektir. Dolayısıyla, pnömatik robotları kullanmak, operatörlerin işlerini daha kolay ve verimli bir şekilde yapmalarına olanak tanır. Pnömatik kaslar, hızlı ve dinamik hareket yetenekleri ile bilinir. Hava basıncının hızlıca değiştirilmesi sayesinde, robotlar anında tepki verebilir ve hızlı dönüşümler yapabilirler. Bu özellikleri, zaman kritik uygulamalarda ve hızlı işlemlerin gerektiği görevlerde pnömatik robotların tercih edilmesini sağlar.

Sonuç olarak, pnömatik yapay kaslı robotlar, hafiflik, esneklik, güvenlik, düşük maliyet, basit kontrol ve yüksek hız gibi avantajları sayesinde birçok endüstriyel ve ticari uygulamada tercih edilmektedirler. Bu özellikler, robot teknolojisinin daha geniş bir alanda yaygınlaşmasına ve daha çeşitli görevlerin etkin bir şekilde yerine getirilmesine yardımcı olmaktadır.

1.1 LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Pnömatik yapay kaslar, ilk olarak 1950'lerde Edward V. Hill tarafından geliştirilmiştir (Hill 1953). İlk PYK 1950'lerde araştırmacıların doğrusal hareket oluşturmak için lastik boru ve basınçlı hava kullanmasıyla geliştirildi. Bu ilk PYK'lar nispeten basitti ve performansları o sırada mevcut olan malzemelerle sınırlıydı. Daha sonra 1960'larda ve 1970'lerde, bu

teknolojinin geliştirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Lieberman 1968). 1960'larda, pnömatrik kaslar elektronik kaslar ile rekabet etmeye başladı. Bu dönemde, elektronik kasların kullanımını yaygınlaşmaya başlamıştı ve pnömatrik kaslarının dezavantajları, yavaş tepki süreleri ve sınırlı güç kapasiteleri olarak görülmeye başlandı. 1968'de Joseph McKibben adlı bir araştırmacı, doğrusal hareket oluşturmak için sentetik malzemelerden yapılmış örgülü bir manşon kullanan ilk pratik PYK'ı geliştirdi. 1980'lerde Stanford Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmada, örgülü Kevlar elyaf tabakasıyla sarılmış bir silikon kauçuk tüpten oluşan pnömatrik bir kas çalıştırıcı geliştirildi (Çakmancı 2004). Berkeley'deki California Üniversitesi'ndeki araştırmacılar, 1990'larda, çok eklemlili bir konfigürasyonda düzenlenmiş bir dizi PYK'dan oluşan bir robotik kol geliştirdiler ve kolun konumunu ve yönünü kontrol etmek için model tabanlı bir kontrol stratejisi kullandılar (Festin, Lundmark, Wetterholm, Norberg, 1998). 1980'lerde ve 1990'larda hafif ve yüksek mukavemetli malzemelerin geliştirilmesi, PYK'lar için yeni olanaklar yarattı. Hannaford ve diğerleri (1989) tarafından yapılan bir araştırmada, pnömatrik yapay kaslı robot kollarının geri beslemeli kontrol sistemleri ile nasıl kontrol edilebileceği incelenmiştir (Hannaford, Wood and Inouye 1989). Pnömatrik yapay kasların daha karmaşık hareketler yapabilmesi için aktüatörlerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar yoğunlaştı. Bu dönemde, pnömatrik yapay kasların birçok uygulaması da ortaya çıkmıştır (Tadesse, Mooney, Polygerinos and Walsh 1997).

2000'lerin başından itibaren, pnömatrik yapay kaslar biyomekanik uygulamalarında daha fazla kullanılmaya başlandı. Tokyo Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmada, 2000'lerde, PYK'ları aktüatör olarak kullanan bir yumuşak robotik el geliştirildi ve elin konumunu kontrol etmek için geri bildirim kontrol stratejisi kullanıldı (Ding, Zhang, Deng, Kang and Wang 2016). Harvard Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmada, 2016 yılında, yürümeye yardımcı olmak için PYK'ları kullanan bir yumuşak robotik dış giysi geliştirildi. Exosuit, bacakların ve kalçaların etrafına yerleştirilmiş bir dizi PYK'dan oluşuyordu ve yürümenin metabolik maliyetini %9,3'e kadar azaltabiliyordu (Rossiter, Heather and Ayling 2018).

Bristol Üniversitesi'ndeki araştırmacılar, son zamanlarda, PYK tabanlı bir yumuşak robotik balık geliştiriyorlar. Balık, vücudunun dalgalı hareketini üretmek için PYK'ları kullanır ve tasarımı gerçek balıktan esinlenmiştir. Örneğin, Pratt ve diğerleri (2004) tarafından yapılan bir araştırmada, pnömatrik kasların bir dizi yüzey elemanı kullanılarak nasıl oluşturulabileceği ve bu elemanların nasıl kontrol edilebileceği incelenmiştir (Pratt, Williamson and Torres 2004). Ballantyne ve diğerleri (2002) tarafından yapılan bir araştırmada, pnömatrik yapay kaslı robot

kollarının laparoskopik cerrahi işlemlerde nasıl kullanılabilceği ve bu işlemlerin avantajları incelenmiştir (Ballantyne, Moll and Dehn 2002).

Son zamanlarda, pnömatik yapay kaslar daha küçük boyutlarda ve daha hafif malzemelerle üretilebilmekte ve bu sayede daha farklı uygulama alanlarına da sahip olabilmektedir (Hannaford, Marlow, Trujillo and Sanchez 2017). PYK'lar son yıllarda robotik alanında çeşitli çalışmaların konusu olmuştur. Robotik kollar, yumuşak robotik eller, giyilebilir robotlar ve yumuşak robotik balıklar gibi çeşitli robotlar geliştirmek için kullanılmışlardır. Çalışmalar, farklı kontrol stratejileri, model tabanlı kontrol, geri bildirim kontrolü ve ileri besleme kontrolü gibi yöntemleri araştırmıştır.

Wirekoh, Valle, Pol, ve Park'ın çalışmasında yapay kaslı bir robot prototipi geliştirilmiştir. Bu prototip, yapay kasların yüksek güç/ağırlık oranı, yapısal esneklik ve ayarlanabilir katılık gibi çekici özelliklerinin olduğu belirtilmiştir. Araştırma-geliştirme projesi kapsamında, robotun mekanik ve pnömatik hesapları yapılarak dinamik modeli elde edilmiştir. Kontrol yöntemleri olarak Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM), Basınç ve Konum Geri Beslemeli Ölü Bölge İkili Kontrol yöntemleri simule edilerek deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Özellikle, bu çalışmanın özgün katkılarında biri, robotun hareketinin endüstride yaygın olarak kullanılan basit aç-kapa valflerle kontrol edilmesidir.

BÖLÜM 2

PNÖMATİK YAPAY KASLI ROBOT KOL

2.1 PNÖMATİK YAPAY KASIN GENEL YAPISI

Pnömatik yapay kaslar (PYK'lar), hareket oluşturmak için basınçlı hava veya gaz kullanan bir aktüatör türüdür. Esneklikleri, güvenlikleri ve enerji verimlilikleri ile tanınırlar ve robotik, protez ve endüstriyel otomasyon dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılırlar. PYK'ların yapısı nispeten basit olup, doğrusal veya dönme hareketi oluşturmak için birlikte çalışan birkaç temel bileşenden ibarettir. Pnömatik yapay kaslar istenen hareketleri üretmek için kullanabilecekleri doğrusal yer değişimleri ve kuvvetler üretirler (Wirekoh, Valle, Pol and Park 2019). Bir PYK'nın ana bileşenleri arasında esnek bir dış katman, bir iç lastik ve uç kapakları veya bağlantı parçaları bulunur. Esnek dış katman genellikle kauçuk veya elastomer gibi dayanıklı ve gerilebilir bir malzemeden yapılır. Bu katman, uygulama için gerekli hareketi yaratarak hava basıncındaki değişikliklere yanıt olarak genişleyip büzülecek şekilde tasarlanmıştır ve Şekil 2.1'de görülmektedir. Esnek dış tabakanın içinde, sıkıştırılmış havayı veya gazı içeren bir iç kese bulunur. İç kese genellikle poliüretan gibi kolayca genişleyip büzülmesini sağlayan ince ve esnek bir malzemeden yapılır. İç kese tipik olarak silindirik bir şekle sahiptir ve PYK'nın merkezinde konumlanmıştır.



Şekil 2.1 Pnömatik Yapay Kasın Genişlemesi ve Büzülmesi (Sun, Liang, Wu, Chen, Qin and Fang 2019).

PYK, bir kontrol valfi veya regülatör aracılığıyla bir basınçlı hava veya gaz kaynağına bağlanır. Bu, iç mesane içindeki basıncın dikkatli bir şekilde kontrol edilmesini ve ayarlanmasını sağlayarak hassas ve kontrollü hareketler sağlar.

PYK'ların genel yapısı, özel uygulama ve tasarım gereksinimlerine bağlı olarak değişebilir. Bazı PYK'lar, güçlerini ve dayanıklılıklarını artırmak için çok sayıda esnek malzeme katmanına sahip olabilirken, diğerleri dönme veya çok eksenli hareket oluşturmak üzere tasarlanabilir.

2.1.1 Pnömatik Yapay Kasların Avantajları

Pnömatik yapay kasların avantajları aşağıda sıralanmıştır:

Hızlı Tepki Süresi: Pnömatik yapay kaslar, hızlı tepki süreleriyle bilinir. Basınçlı hava veya gazın hızlı bir şekilde kas içerisine pompalanması veya boşaltılmasıyla kasın hareket etmesi sağlanır. Bu özellik, hızlı ve dinamik hareketler gerektiren uygulamalarda avantaj sağlar.

Yüksek Güç-Oranı: Pnömatik yapay kaslar, kompakt yapılarına rağmen yüksek güç üretebilme yeteneğine sahiptir. Basınçlı hava veya gazın kas içerisindeki hacim değişiklikleriyle çalışırken, kasın üretebileceği kuvvet ve tork yüksektir. Bu nedenle, pnömatik yapay kaslar yüksek güç gerektiren uygulamalarda tercih edilebilir.

Çok Yönlülük: PYK'lar, robot kollara güç sağlamaktan protez uzuvların hareketini kontrol etmeye kadar çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Çok çeşitli hareket seçenekleri sunarlar ve hassas ve koordineli hareketler oluşturmak için karmaşık sistemlerde kullanılabilirler.

Enerji Verimliliği: Pnömatik kaslar oldukça enerji verimlidir. Hareket oluşturmak için basınçlı hava veya gaz kullandıklarından, çalışmak için çok az enerjiye ihtiyaç duyarlar. Bu, onları birçok uygulama için uygun maliyetli ve çevre dostu bir seçenek haline getirir.

Esneklik: Pnömatik kasların ana özelliklerinden biri esneklikleridir. Farklı yönlerde ve oryantasyonlarda büzülecek ve genişleyecek şekilde tasarlanabilirler, bu da onları hassas ve karmaşık hareketler gerektiren uygulamalar için ideal kılar. Ek olarak, pnömatik kasların esnekliği, farklı sistem ve yapılara kolayca entegre olmalarını sağlayarak, onları son derece uyumlu hale getirir.

Yüksek Dayanıklılık: Pnömatik yapay kaslar, sağlam ve dayanıklı yapılarıyla bilinir. Kasların yapısında kullanılan esnek malzemeler genellikle aşınma ve yıpranmaya karşı dirençlidir. Bu özellik, pnömatik yapay kasların uzun ömürlü olmasını sağlar.

Yüksek Kontrol Hassasiyeti: Pnömatik yapay kasların kontrolü, basınçlı hava veya gazın akışının hassas bir şekilde kontrol edilmesiyle sağlanır. Bu sayede, kasların hareket hızı, konumu ve kuvveti gibi parametrelerin hassas bir şekilde kontrol edilmesi mümkündür. Bu özellik, hassas kontrol gerektiren uygulamalarda avantaj sağlar.

Güvenli ve Temiz Çalışma Ortamı: Pnömatik yapay kaslar, basınçlı hava veya gaz kullanırken yanıcı veya patlayıcı olmayan bir ortamda çalışır. Ayrıca, pnömatik sistemlerde sızıntı riski daha düşüktür ve sıvı veya yağ kullanımı gerektirmez. Bu durum, güvenli ve temiz çalışma ortamı sağlar.

Maliyet Etkinliği: Pnömatik yapay kaslar, genellikle maliyet açısından avantajlıdır. Basit yapısı ve kolay üretilebilirliği, pnömatik aktüatörleri diğer aktüatör türlerine göre daha ekonomik hale getirir.

Yukarıda açıklanan avantajlara ek olarak pnömatik yapay kaslar, aynı boyuttaki pnömatik silindirlere göre on kat daha fazla kuvvet üretebilirler. Çamurlu, tozlu ve sualtı gibi zorlu ortamlarda bile çalışabilirler. Sessiz bir şekilde çalışabilirler. Değişik montaj seçenekleri sunarlar. Düşük hava tüketimi ile çalışırlar. Kuvvet kontrolü kolaydır. Basınç ayarlarıyla kolay pozisyonlama sağlanabilmektedir. PYK'lar doğal uygunluk ve şoklara dayanıklı olma özelliklerine sahiptirler.

2.1.2 Pnömatik Yapay Kasların Dezavantajları

Pnömatik yapay kaslar (PYK'lar), geleneksel mekanik ve elektrikli aktüatörlere göre birçok avantaj sunarken, belirli bir uygulama için onları seçmeden önce dikkate alınması gereken bazı sınırlamalar ve dezavantajlara da sahiptir.

Sınırlı Ömür: PYK'ların, tekrarlanan genişleme ve daralmadan kaynaklanan aşınma ve yıpranma nedeniyle sınırlı bir ömrü vardır. Zamanla, kası oluşturan esnek malzemeler bozulabilir ve elastikiyetini kaybedebilir, bu da kasın performansını azaltabilir ve sonunda başarısızlığa yol açabilir.

Basınçlı Hava Kaynağı Gerektirir: PYK'ların çalışması için basınçlı hava veya gaz kaynağı gerekir. Bu, sisteme karmaşıklık ve maliyet ekleyebilecek bir basınçlı hava veya gaz kaynağının sağlanması gerektiği anlamına gelir. Ek olarak, PYK'lar, basınçlı hava veya gaz kaynağının bulunmadığı veya uygulanabilir olmadığı uygulamalar için uygun olmayabilir.

Tutarsız Performans: PYK'ların performansı, sıcaklık, nem ve basınçlı hava veya gaz kaynağının kalitesi gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Bu, tutarsız performansa yol açabilir ve bazı uygulamalar için gereken hassas hareketlerin ve kontrolün elde edilmesini zorlaştırabilir.

Sınırlı Hareket Aralığı: PYK'lar, diğer aktüatör türlerine kıyasla sınırlı bir hareket aralığına sahiptir. Doğrusal veya dönme hareketleri gerektiren uygulamalar için çok uygundur ve daha karmaşık hareketler veya çok eksenli kontrol gerektiren uygulamalar için uygun olmayabilirler.

Karmaşık Tasarım: PYK'ların tasarımı ve bir sisteme entegre edilmesi, diğer aktüatör türlerine göre daha karmaşık olabilir. Kasın boyutu ve şekli, basınçlı hava veya gaz kaynağının türü ve kalitesi ve kası çalıştırmak için kullanılan kontrol sistemi gibi faktörlerin dikkatle değerlendirilmesini gerektirirler.

Genel olarak, PYK'lar birçok avantaj sunarken, belirli bir uygulama için onları seçmeden önce dikkatlice değerlendirilmesi gereken sınırlamaları ve dezavantajları da vardır. Belirli bir sistem veya uygulama için hangisinin en iyi seçenek olduğunu belirlemek için PYK'ların faydalarını ve dezavantajlarını diğer aktüatör türlerine göre tartmak önemlidir. Bununla birlikte, dikkatli tasarım ve entegrasyon ile PYK'lar, birçok hareket kontrolü ve çalıştırma uygulaması türü için oldukça etkili ve verimli bir çözüm sunabilir.

2.2 PNÖMATİK YAPAY KAS ÇALIŞMA PRENSİBİ

Pnömatik yapay kasların çalışma prensibi, basınçlı hava veya gazın kontrol edilmesiyle gerçekleşir. Bir pnömatik sistemde, genellikle bir hava kaynağı, bir kompresör, valfler ve borular bulunur. Hava kaynağından alınan basınçlı hava, valfler aracılığıyla pnömatik yapay kaslara yönlendirilir.

Bir pnömatik yapay kasın genişlemesi veya kasılması, basınçlı hava veya gazın içine verilmesi veya tahliye edilmesiyle kontrol edilir. Hava basıncı artırıldığında, elastik malzeme genişler ve kas uzar. Bu genişleme hareketi, pnömatik yapay kasanın bir uzunluğa veya açığa ulaşmasına neden olur. Basınç azaldığında veya gaz tahliye edildiğinde, elastik malzeme orijinal formuna geri döner ve kasın gevşemesi sağlanır. Bu gevşeme hareketi, kasın eski uzunluğuna veya açısına dönmesini sağlar.

Pnömatik yapay kasların kontrolü, hava veya gaz basıncının dikkatlice ayarlanmasıyla gerçekleştirilir. Bu genellikle valfler aracılığıyla yapılır. Valfler, basınçlı hava veya gazın kaslara akışını kontrol eder ve istenen hareketleri sağlar. Basınç ve valf kontrolü, kasların hızı, gücü ve pozisyonu gibi faktörleri kontrol etmek için kullanılır.

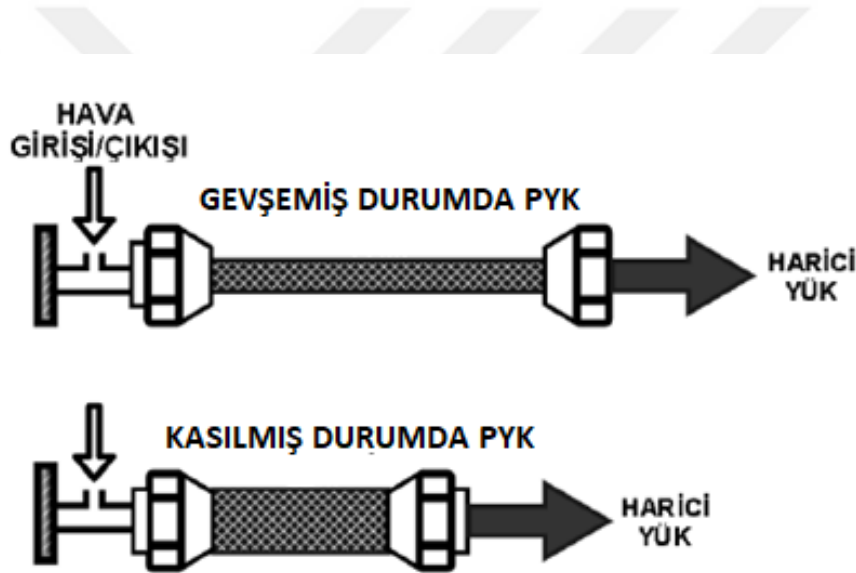
Bir PYK'ın temel yapısı, tipik olarak silikon veya lateks gibi elastomerik malzemelerden yapılmış esnek bir zar veya mesaneden oluşur. Membran sert bir çerçeve içine alınır ve pnömatik silindir veya hava kompresörü gibi bir basınçlı hava veya gaz kaynağına bağlanır. Sıkıştırılmış sıvı zara verildiğinde, zarın genişlemesine neden olarak bir kuvvet veya hareket üretir. Bir PYK'ın çalışma prensibi, mevcut olan farklı kas türleri dikkate alınarak daha ayrıntılı olarak açıklanabilir. Doğrusal ve bükülme olmak üzere iki ana pnömatik yapay kas türü vardır.

Doğrusal PYK'lar, tipik olarak uzunlamasına eksenleri boyunca doğrusal bir yönde genişleyerek çalışır. Bu genişleme, robotik bir uzvun uzaması veya büzülmesi gibi doğrusal bir hareket üretmek için kullanılabilir. Doğrusal PYK'lar, yüksek kuvvet ve hassas kontrolün gerekli olduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Doğrusal PYK, genellikle silindirik bir gövdeye ve içinde hareket eden bir piston veya kama mekanizmasına sahiptirler. Hava basıncı kasın içine pompalandığında, piston veya kama, kasın uzunluğunu değiştirmek için gövdede ileri veya geri hareket eder. Doğrusal PYK, genellikle endüstriyel otomasyon ve robotik uygulamalarda kullanılırlar. Örneğin, bir otomasyon sistemi, bir pnömatik doğrusal kası

kullanarak ürünleri bir banttan diğerine taşıyabilir veya robotik bir kol, doğrusal pnömatik kasları kullanarak belirli bir mesafede hareket edebilir.

Bükülen PYK'lar ise kavisli veya bükülmüş bir şekilde genişleyerek çalışır. Bu genişleme, robotik bir kısıkaç veya aktüatörün hareketi gibi bir dönme hareketi üretmek için kullanılabilir. Bükme PYK'ları robotik manipülatörler veya diğer endüstriyel otomasyon türleri gibi dönme hareketinin gerekli olduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

Hem doğrusal hem de bükülen PYK'larda kas tarafından üretilen kuvvet ve hareket, sıkıştırılmış sıvının basıncı ve zarın yüzey alanı ile orantılıdır. Üretilen kuvvet miktarı, basıncı veya zarın yüzey alanını artırarak artırılabilir.



Şekil 2.2 Pnömatik Yapay Kasın Çalışması (Hall 2011).

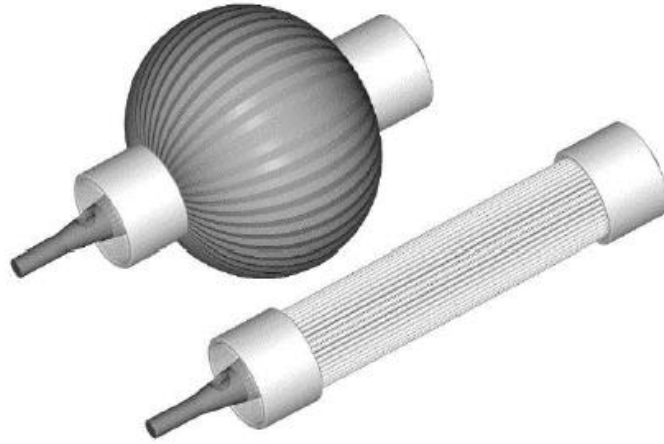
Sonuç olarak, pnömatik yapay kasların çalışma prensibi, bir sıvı sıkıştırıldığında esnek bir zarın genişlemesine dayanır. Bu genişleme, kas tipine ve uygulamaya bağlı olarak hareket, kuvvet veya güç üretmek için kullanılabilir. Şekil 2.2’de pnömatik yapay kasın çalışması gösterilmiştir. PYK'ların ilkelerini anlayan mühendisler ve tasarımcılar, uygulamaları için en uygun kasları seçerek optimum performans ve verimlilik sağlayabilirler.

2.3 PNÖMATİK YAPAY KAS ÇEŞİTLERİ

2.3.1 Pileli PYK

Pileli PYK, adından da anlaşılacağı gibi, bir dizi pile (katman) kullanılarak yapılan bir pnömatik yapay kastır. Pileler arasında yer alan kauçuk veya elastomerik malzeme, basınç altında kasılabilir ve böylece kastaki kasılma hareketini üretir.

Pileli PYK'ların avantajlarından biri, birçok diğer yapay kas çeşidine göre daha yüksek bir kasılma kuvveti üretebilmesidir. Ayrıca, her bir pile bağımsız olarak kontrol edilebildiği için, daha fazla kontrol seçeneği sunarlar. Dezavantajları arasında ise, bir dizi pile kullanımı nedeniyle yapının daha karmaşık olması ve daha fazla bileşen içermesi yer alır. Pileli PYK'lar, robotik uygulamalar ve biyomedikal cihazlar gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır.



Şekil 2.3 Pileli Tip Pnömatik Kas (Ulaş 2018).

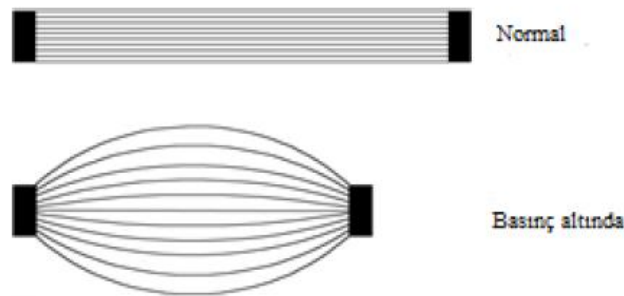
Pileli pnömatik kaslar, özellikle Daerden tarafından geliştirilen bir tasarım ile yeniden düzenlenmiştir ve bir membran kullanılarak oluşturulmuştur. Bu yeni tip membranın özelliği, pnömatik kasın şişirilmesi durumunda herhangi bir malzeme gerilmesinin olmamasıdır. Şekil 2.3'te, pileli tip pnömatik yapay kasın tamamen gerildiği hali ve tamamen şişirildiği hali gösterilmektedir. Pileli tip pnömatik yapay kas pnömatik kaslarda membran, araç filtrelerinde olduğu gibi, aksel yönde bir dizi pileye sahiptir ve kas genişledikçe bu pileler açılmaktadır. Bu süreçte sürtünme oluşmamaktadır. Ayrıca, paralel yöndeki membran gerilmeleri önemsizmeyecek kadar azdır ve artan pile sayısı ile azalır.

Sonuç olarak, membranın genişlemesi için enerji gereksinimi bulunmamaktadır. Bu şekilde, pileli pnömatik kaslar, basınçlı havanın etkisiyle kısalabilen bir yapıya sahiptir. Tasarımındaki membran yapısı ve pileli düzenlemesi, enerji verimliliği sağlar ve sürtünme ve histerezis gibi etkileri minimize eder. Bu nedenle, pileli pnömatik kaslar, birçok uygulama alanında tercih edilen bir seçenektir.

2.3.2 Baldwin Tip Pnömatik Kas

Baldwin tipi pnömatik kaslar, pnömatik kasların bir türüdür ve özgün bir tasarıma sahiptir. Baldwin tipi pnömatik kas, adını mucidi olan James Baldwin'den almıştır. Bu kas tipi, basınçlı hava kullanarak hareket eden bir kas çeşididir. Baldwin tipi pnömatik kasların özelliği, kasılma ve genişleme hareketini gerçekleştirmek için iki farklı bölüme sahip olmalarıdır. Bu bölümler, kasın bir tarafına basınçlı hava verilerek genişlemesini sağlar ve diğer tarafına basınçlı havanın çekilmesiyle kasılmasını sağlar. Bu şekilde, kas her iki yönde de çalışabilir ve çekme ve itme kuvveti üretebilir. Kas, bir kauçuk tüpün içine yerleştirilmiş naylon veya polyester tel örgüden yapılmış bir kafes tarafından desteklenir.

Baldwin tipi pnömatik kaslar, yüksek kuvvet-tok verimliliği ve hızlı tepki süresi gibi avantajlar sunarlar. Baldwin tipi pnömatik kaslar, genellikle kolay kullanım ve kontrol imkanı sunarlar. Basit bir tasarıma sahip olmaları nedeniyle montajı ve entegrasyonu kolaydır. Ayrıca, hızlı tepki süresi ve yüksek güç yoğunluğu gibi avantajları vardır.



Şekil 2.4 Baldwin Tipi Pnömatik Kaslar (Ulaş 2018).

Ancak Baldwin tipi pnömatik kasların bazı dezavantajları da vardır. Bunlar arasında enerji verimliliğinin düşük olması, hassas hareketlerde sınırlamaların olması ve sınırlı hareket aralığı sayılabilir.

Basınçlı hava kaynağı gerektirmeleri ve gürültülü çalışmaları da dezavantajlar arasında yer alır. Bunun yanı sıra, kasın uzunluğunu değiştirmek için eşit bir basınç uygulaması gerektiğinden, uzun kaslarda basınç düşüklüğü problemleri yaşanabilir.

Sonuç olarak, Baldwin tipi pnömatik kaslar, basınçlı hava ile çalışan ve kasılma-genişleme hareketiyle kuvvet üreten özgün bir tasarıma sahip pnömatik kaslardır. Kullanım amaçlarına bağlı olarak avantajları ve dezavantajları göz önünde bulundurularak tercih edilebilirler.

2.3.3 Örgülü Pnömatik Kas

Örgülü kaslar, gaz sızdırmaz elastik bir tüpten veya torbadan oluşan özel bir türdür ve bir örgü kılıfı (dokuma, örgü, kılıf) ile çevrilidir. Şekil 2.5'de gösterilen özel bir türü bulunmaktadır. Örgü lifleri, kasın uzun ekseninde helisel bir şekilde çalışır ve $+q$ ve $-q$ açıları (pitch açısı, örgü açısı, dokuma açısı) ile eğimlidir. Basınç uygulandığında, tüp kılıfın yan tarafına baskı yapar. Bu nedenle, lif eğriliği nedeniyle tüp etrafındaki gaz basıncı, örgü elyafındaki lif gerilimi tarafından dengelenir. Lif gerilimi, harici bir yükü dengelemek için örgünün uç noktalarında toplanır.

Örgülü kaslar, yük aktarımı için tüp ve kılıf arasındaki temasın kesinlikle gerekli olduğu için düşük basınçta çalışamazlar. Örgünün örgü deliklerinden geçerek, çevreleyen gaz sadece tüpü sıkıştırır ve kelepçelere fark edilebilir bir miktarda iş aktarmaz.



Şekil 2.5 Örgülü Pnömatik Yapay Kas (Daerden and Lefeber 2002).

2.3.4 Diyafram Kasları

Diyafram kasları, en popüler PYK türlerinden biridir. Tipik olarak kauçuk veya polimerden yapılırlar ve güçlerini artırmak için liflerle takviye edilirler. Kas içine hava pompalandığında genişler ve hava salındığında kasılır. Diyafram kasları, yüksek kuvvet-ağırlık oranlarıyla bilinir, bu da onları yüksek kuvvet ve düşük ağırlık gerektiren uygulamalar için ideal kılar.

2.3.5 Körük Kasları

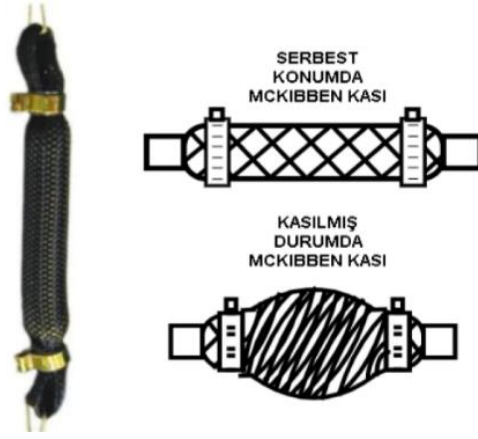
Körük kasları diyafram kaslarına benzer, ancak daha doğrusal hareket üretmek için tasarlanmıştır. Tipik olarak kauçuk veya polimer gibi esnek bir malzemeden yapılırlar ve bir akordeon gibi genişleyip büzülebilen bir dizi kıvrıma sahiptirler. Körük kasları, yüksek strok uzunluğu ve düşük kuvvet gerektiren uygulamalar için idealdir.

2.3.6 Bükülmüş ve Sarılmış Kaslar

Bükülmüş ve kıvrılmış kaslar, merkezi bir eksen etrafında bükülen veya kıvrılan kauçuk veya polimer gibi esnek bir malzemeden yapılmıştır. Hava kasın içine pompalandığında, doğrusal veya döner bir hareket oluşturarak bükülür veya açılır. Bükülmüş ve kıvrılmış kaslar, yüksek kuvvet ve hızlı tepki süreleri gerektiren uygulamalar için idealdir.

2.3.7 McKibben Kasları

Pnömatik yapay kasların tasarımı ve kullanımına yönelik modern araştırmalar, ilk olarak 1950'lerin sonunda atom fizikçisi Joseph Laws McKibben tarafından önerilen McKibben tipi bir aktüatör ile başlamıştır (Chou and Hannaford 1996). McKibben kasları, basınçlı hava veya gazla şişirilen ve söndürülen birbirine bağlı bir dizi tüpten yapılırlar. Şişirildiğinde, tüpler genişler ve daralarak doğrusal veya döner bir hareket oluşturur. McKibben kasları, yüksek güç-ağırlık oranlarıyla bilinir ve robotik uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Basınçlı hava ile uyarıldığında doğrusal kuvvet ve kasılma sağlamak için örgülü bir ağ ve silindirik mesane kullanan McKibben aktüatörü, başlangıçta çocuk felci hastalarına yardımcı olmak için ortotik bir cihazda kullanılmak üzere tasarlanmıştır (Daerden and Lefeber 2001). McKibben Kası Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6 McKibben Kası (Chou and Hannaford 1994).

2.3.8 Fiberle Güçlendirilmiş Kaslar

Fiberle güçlendirilmiş kaslar, diyafram kaslarına benzer, ancak güçlerini ve dayanıklılıklarını artırmak için liflerle güçlendirilirler. Genellikle yüksek kuvvetler ve hızlı tepki süreleri gerektiren uygulamalarda kullanılırlar.

2.3.9 Şekil Hafızalı Alaşım Kaslar

Şekil hafızalı alaşım kaslar, ısıtıldığında veya soğutulduğunda şekil değiştirebilen şekil hafızalı alaşım bir malzemeden yapılmıştır. Kasa bir elektrik akımı uygulandığında, ısınır ve şekil değiştirerek doğrusal veya dönme hareketi üretir. Şekil hafızalı alaşım kaslar, yüksek kuvvetleri ve hızlı tepki süreleri ile bilinir.

2.3.10 Silindirik Kaslar

Silindirik kaslar, silindirik bir gövdeden ve bir piston veya kolunun bağlı olduğu bir diyafragmadan oluşur. Basınçlı hava veya gaz diyaframın içindeki boşlukları şişirerek, pistonu veya kolu hareket ettirir.

2.3.11 Yuvarlak Kaslar

Yuvarlak kaslar, silindirik kaslara benzer şekilde çalışır, ancak silindir yerine yuvarlak bir gövdeye sahiptir. Bu kaslar genellikle, silindirik kaslardan daha büyük bir hareket aralığına sahip olduğu için, robotik uygulamalarda sıklıkla tercih edilirler.

2.3.12 Konik Kaslar

Konik kaslar, üst kısımda daha geniş bir şekle sahip, alt kısımda daha dar bir şekle sahip bir gövdeden ve diyafragmadan oluşur. Basınçlı hava veya gaz diyaframın içindeki boşlukları şişirerek, kasın uzunluğunu değiştirir.

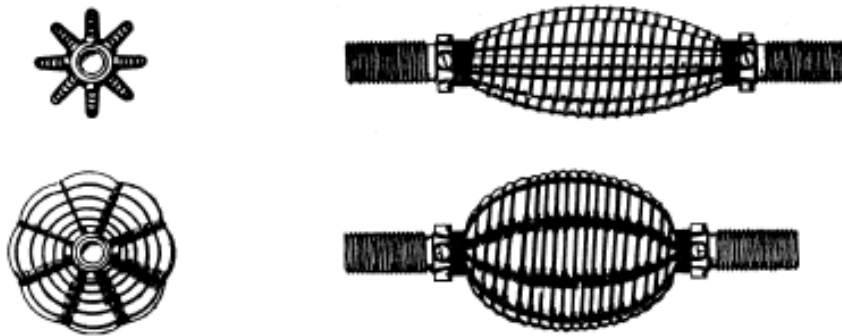
2.3.13 Çoklu Katmanlı Kaslar

Çoklu katmanlı kaslar, birden fazla diyafragmadan oluşur ve her diyafram birbirine eklenerek, daha büyük bir hareket aralığı sağlar.

2.3.14 Yarlott Kasları

Yarlott kasları, elastomerik bir kese şeklinde tasarlanmış pnömatik yapay kaslardır. Bu kaslar, Yarlott tarafından geliştirilmiştir ve daha yüksek performans ve daha uzun ömür sağlamak için diğer pnömatik yapay kaslardan farklı olarak aksiyel kordlar ile donatılmıştır. Yarlott kasları, prolata sferoidal bir şekle sahiptir ve end-to-end çalışan bir dizi kord veya tel tarafından ağı ile kaplıdır. Bu kasların elastik genişlemeye karşı dirençli olması için, kordlarla birlikte radyal olarak güçlendirilmiştir. Kasın tamamen şişirildiği durumda, sferoidal bir keseye sahip olur.

Yarlott kaslarının yüzey alanı daha az gerildiği için, daha fazla pnömatik enerji mekanik güce dönüştürülebilir. Ancak, kord malzemesinin eğilmesi nedeniyle tamamen uzatıldığında sonsuz bir gerilim seviyesi elde edilemez. Bu nedenle, Yarlott kasları düşük basınçlı hava veya gazla çalıştırılır, örneğin yaklaşık 1,7 kPa gibi düşük bir değerde çalışabilirler. Yarlott kasları, robotik uygulamalar, endüstriyel otomasyon, tıbbi cihazlar ve diğer birçok uygulama için kullanılabilir.



Şekil 2.7 Yarlott Kasları (Yarlott 1972).

2.3.15 Festo Pnömatik Yapay Kas

Festo pnömatik yapay kası doğal kası taklit eden bir gerilme aktüatörüdür. Kas kasılma sistemi ve konnektörden oluşur. Kas kasılma sistemi, silindirik, izotropik, esnek kauçuk tüp ve iki bağlantı flanşlı içerir. Yüksek mukavemetli liflerden oluşan kas sistemi, aynı zamanda basınç geçirmez bir uzunlukta kauçuk hortumdan oluşmaktadır. Festo PYK'nın lifi, kauçuk tüpün içine örülür ve geleneksel tasarıma kıyasla kolay montaj ve geliştirilmiş histerik davranış ve doğrusal olmama sunar (Festo 2007). Festo, akışkan kaslar da dahil olmak üzere dünyaca ünlü bir otomasyon ve kontrol ekipmanı üreticisidir.

Festo Akışkan Kas, esnek bir manşonun büzülmesi ve genişmesi prensibiyle çalışan bir tür pnömatik yapay kastır. Manşon, hava basıncı uygulandığında esneyebilen ve büzülebilen özel olarak tasarlanmış bir elastomer malzemeden yapılmıştır. Kol, daha fazla güç ve dayanıklılık için dokuma elyaflarla güçlendirilmiştir. Festo Akışkan Kas, doğal bir kasın hareketini taklit edecek şekilde tasarlanmıştır ve pürüzsüz ve hassas hareket sağlar. Robotik, otomasyon ve tıbbi cihazlar dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalar için idealdir. Festo Akışkan Kas'ın temel özelliklerinden bazıları şunlardır:

Yüksek kuvvet çıkışı: Festo Akışkan Kas, diğer pnömatik aktüatör tiplerine kıyasla yüksek miktarda kuvvet üretebilir. Bu, onu yüksek kuvvet çıkışının gerekli olduğu uygulamalar için ideal hale getirir.

Hassas kontrol: Festo Akışkan Kas, doğru ve tekrarlanabilir hareketlere izin verecek şekilde büyük bir hassasiyetle kontrol edilebilir. Bu, cerrahi robotlar gibi hassaslığın kritik olduğu uygulamalar için önemlidir.

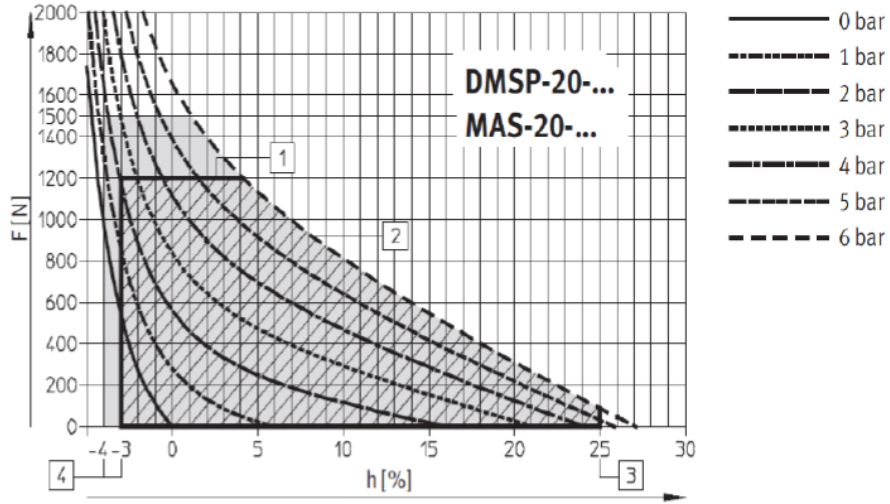
Hafif ve kompakt: Festo Akışkan Kas, hafif ve kompakttır, bu da onu alanın sınırlı olduğu veya ağırlığın önemli olduğu uygulamalar için ideal kılar. Bu da mevcut sistemlere entegrasyonu kolaylaştırır.

Esnek ve uyarlanabilir: Festo Akışkan Kas, çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir ve özel gereksinimleri karşılayacak şekilde kolayca uyarlanabilir. Bağımsız bir aktüatör olarak kullanılabilir veya daha büyük bir sisteme entegre edilebilir.



Şekil 2.8 Festo Pnömatik Yapay Kas (Festo 2007).

PYK, Festo Şirketi tarafından ticari olarak üretilmektedir. Festo pnömatik yapay kas, Festo sıvı kası olarak da adlandırılmaktadır. Şekil 2.8’de Festo pnömatik yapay kas görülmektedir. Festo kası, McKibben kaslarından yapısal olarak farklıdır. Sıvı kasın elyafı, kauçuk tüpe örülür ve geleneksel tasarıma göre kolay montaj ve geliştirilmiş histeretik davranış ve doğrusallık sağlar (Festo 2018). Festo PYK, diğer mevcut PYK modellerinden farklı özelliklere sahip olduğundan yapısal farklılıkları vardır.



Şekil 2.9 Festo Pnömatik Yapay Kas Dinamik Karakteristiği (Festo 2018).

DMPS20 serisi Festo sıvı kasının dinamik özellikleri Şekil 2.9’da gösterilmektedir. Şekil 2. 9’da F, PYK tarafından üretilen kuvvet (N) ve h, farklı uygulanan basınç eğrilerine karşı kasılma veya uzama olarak yüzde kas uzunluğu değişimini göstermektedir.

Sonuç olarak, Festo Akışkan Kas, yüksek performanslı ve çok yönlü bir pnömatik yapay kas olup, çok çeşitli uygulamalar için idealdir. Yüksek güç çıkışı, hassas kontrolü, hafif ve kompakt tasarımı ve esnekliği, mühendisler ve robotik uzmanları arasında popüler bir seçim haline getirir.

2.4 PNÖMATİK YAPAY KAS UYGULAMA ALANLARI

Pnömatik yapay kaslar (PYK'lar), çeşitli endüstrilerde ve alanlarda geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Hareket, kuvvet ve güç sağlamak da dahil olmak üzere çeşitli amaçlar için kullanılırlar. Bu kısımda, pnömatik yapay kasların en yaygın uygulamalarından bazıları tartışılacaktır.

Robotik: Pnömatik yapay kaslar, endüstriyel robotların üretim hattında parça taşıma, kaynak yapma ve montaj gibi işlemleri gerçekleştirmek için kullanılabilir. PYK, güçlü, hızlı ve dayanıklıdır, bu nedenle endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilirler. PYK, geleneksel aktüatörlere hafif ve esnek bir alternatif sağladıkları için robotik uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Robotik uzuvlara, kısıplara ve yüksek kuvvetler ve hızlı yanıt süreleri gerektiren diğer bileşenlere güç sağlamak için kullanılırlar. PYK'lar, basınçlı hava veya gaz kullanılarak kolayca kontrol edilebildikleri ve doğrusal veya döner hareket üretecek şekilde yapılandırılabilirler için robotik uygulamalar için idealdir

Tıbbi Cihazlar: Pnömatik yapay kaslar, tıbbi cihazlarda kullanılabilir. Örneğin, pnömatik kaslar, yapay kalp pompa sistemlerinde kullanılır. Bu cihazlar, hastaların kalp yetmezliği yaşadığı durumlarda kullanılabilir. Pnömatik yapay kaslar, insanların kayb ettikleri uzuvları yerine koymak için kullanılan protezlerde kullanılabilir. Protezlerde kullanılan pnömatik kaslar, doğal bir şekilde hareket edebilir ve bu sayede protez kullanan kişinin hayat kalitesini artırabilir. Pnömatik yapay kaslar ayrıca ortezler ve rehabilitasyon cihazları gibi tıbbi cihazlarda da kullanılır. Geleneksel aktüatörlere hafif ve verimli bir alternatif sunarak hastalar için daha fazla esneklik ve hareket kolaylığı sağlarlar. PYK'lar, bireysel hastaların özel ihtiyaçlarını karşılamak üzere kolayca özelleştirilebildikleri için tıbbi cihazlar için de idealdir.

Ekso-skeletonlar: Pnömatik yapay kaslar, ekso-skeleton adı verilen dış iskelet sistemlerinde kullanılır. Bu sistemler, fiziksel gücü artırmak ve insan hareketini desteklemek için

tasarlanmıştır. Özellikle askeri ve endüstriyel alanlarda ağır yükleri taşımak veya uzun süreli fiziksel aktiviteleri gerçekleştirmek için kullanılır.

Havacılık ve Savunma: Pnömatik yapay kaslar, uçak ve füze sistemleri gibi havacılık ve savunma uygulamalarında kullanılmaktadır. Kontrol yüzeylerine, iniş takımlarına ve yüksek kuvvetler ve hızlı tepki süreleri gerektiren diğer bileşenlere güç sağlamak için kullanılırlar. PYK'lar, hafif, verimli ve güvenilir oldukları için havacılık ve savunma uygulamaları için idealdir.

Eğitim ve Araştırma: Pnömatik yapay kaslar, robotik ve yapay kas sistemleri üzerine yapılan eğitim ve araştırmalarda kullanılır. Öğrenciler ve araştırmacılar, pnömatik kasları kullanarak robotik sistemleri anlamak, kontrol etmek ve geliştirmek için pratik deneyimler yapabilirler.

Endüstriyel Otomasyon: Pnömatik yapay kaslar, konveyör sistemleri ve paketleme makineleri gibi endüstriyel otomasyon uygulamalarında da kullanılmaktadır. Kıskaçlar, al ve yerleştir sistemleri gibi çeşitli bileşenleri kontrol etmek ve değiştirmek için güvenilir ve verimli bir yol sağlarlar. PYK'lar, basınçlı hava veya gaz kullanılarak kolayca kontrol edilebildikleri ve minimum bakım gerektirdikleri için endüstriyel otomasyon uygulamaları için de idealdir.

Eğlence: Pnömatik yapay kaslar, animatronik ve özel efektler gibi eğlence uygulamalarında kullanılır. Geleneksel aktüatörlere esnek ve hafif bir alternatif sunarak eğlence sistemlerinin tasarımında daha fazla yaratıcılık ve yeniliğe olanak tanırırlar. PYK'lar, basınçlı hava veya gaz kullanılarak kolayca kontrol edilebildikleri ve çok çeşitli hareket ve efektler üretecek şekilde yapılandırılabilirler için eğlence uygulamaları için de idealdir.

Uzay Araştırmaları: Pnömatik yapay kaslar, uzay araştırmalarında kullanılmaktadır. Uzay aracı ve istasyonlarında, pnömatik kaslar, güçlü, hafif ve dayanıklı olduklarından dolayı tercih edilirler.

Sonuç olarak, pnömatik yapay kaslar, çeşitli endüstri ve alanlarda geniş bir uygulama alanına sahiptir. Daha fazla esneklik ve hareket kolaylığı sağlayan geleneksel aktüatörlere hafif, verimli ve güvenilir bir alternatif sunarlar. PYK'ların benzersiz özelliklerini ve yeteneklerini anlayan mühendisler ve tasarımcılar, uygulamaları için en uygun kasları seçerek optimum performans ve verimlilik sağlayabilirler. Pnömatik yapay kaslar, birçok farklı alanda kullanılan çok yönlü

bir teknolojidir. Sürekli olarak geliştirilen ve iyileştirilen bu kaslar, gelecekte daha geniş uygulama alanlarına sahip olabilecektir.

2.5 PNÖMATİK YAPAY KASLARIN MODELLENMESİ

Pnömatik yapay kasların modellenmesi 2 temele dayanmaktadır. Birincisi statik modeldir. Statik model veya geometrik model olarak adlandırılır. Statik model kasın silindirik biçiminden faydalanarak oluşturulur. İkincisi dinamik modeldir.

Dinamik modelin diğer adı fenomenolojik modeldir. Dinamik model kasın hareketi ile ortaya çıkmaktadır. Modellemede temel amaç, pnömatik yapay kasın basıncı, kuvveti ve eksenel uzaması arasında bir ilişki kurmaktır (Kelasidi, Andrikopoulos, Nikolakopoulos and Manesis 2011).

PYK modelleme, kasın çeşitli mekanik, termal ve akışkan dinamik özelliklerinin karakterizasyonunu içeren karmaşık bir süreçtir. PYK'ların modellemedeki en önemli zorluklardan biri, önemli histerezis, sürünme ve stres gevşemesi etkileri sergileyebilen kasın doğrusal olmayan davranışını yakalamaktır. PYK'ları modellemeye yönelik yaygın bir yaklaşım, kasın davranışını tanımlayan karmaşık kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için sayısal bir yöntem olan sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanmaktır. FEA modelleri, kasın farklı basınç girişlerine tepkisini simüle edebilir ve deformasyonunu, kuvvetini ve stres dağılımını tahmin edebilir. FEA modelleri, kasın şekil ve malzeme özelliklerini tasarlamak ve optimize etmek ve karmaşık sistemlerdeki davranışını tahmin etmek için kullanışlıdır.

PYK'ları modellemeye yönelik başka bir yaklaşım, kasın birbirine bağlı bir dizi yay ve amortisör olarak temsil edilebileceğini varsayarak karmaşık FEA modellerini basitleştiren toplu parametre modelleri kullanmaktır. Toplu parametre modelleri, kas davranışının daha sezgisel olarak anlaşılmasını sağlayabilir ve kontrol sistemlerini tasarlamak ve kasın enerji tüketimini tahmin etmek için kullanılabilir. Basıncılı hava veya gaz kas içinde önemli ısı ve basınç düşüşleri oluşturabileceğinden, mekanik özelliklere ek olarak, PYK modellerinin termal ve akışkan dinamiği etkilerini de hesaba katması gerekir. Bu etkileri yakalamak için araştırmacılar, akışkan dinamiği, termal ve mekanik denklemleri bütünleştiren birleşik modeller geliştirdiler.

Genel olarak, PYK'lar için doğru ve güvenilir modellerin geliştirilmesi, karmaşık sistemlere entegrasyonu ve performanslarının optimize edilmesi kritik öneme sahiptir. FEA ve toplu parametre modelleri gibi gelişmiş modelleme tekniklerinin kullanılması, mühendislerin ve tasarımcıların PYK'ların davranışını daha iyi anlamalarına yardımcı olabilir, böylece daha verimli ve etkili kontrol sistemleri geliştirmeleri mümkün olur.

2.5.1 Pnömatik Yapay Kasların Geometrik/Statik Modeli

PYK'ların geometrik veya statik modeli, bir kuvvet uygularken kasın sabit bir uzunlukta kaldığı izometrik kasılma ilkesine dayanır. Bu çalışma modunda PYK, sabit çap ve uzunluğa sahip silindirik bir yapı olarak modellenmiştir. Kasın, yalnızca aksenal yönü boyunca deformasyona uğrayabilen sıkıştırılamaz bir malzemeden yapıldığı varsayılmaktadır.

PYK'ların geometrik modeli, öncelikle kasın kuvvet çıkışını ve yer değiştirme özelliklerini tahmin etmek için kullanılır. Kasın kuvvet çıkışı, uzunluğu boyunca sabit olduğu varsayılan enine kesit alanının bir fonksiyonudur. Kasın yer değiştirme özellikleri, kasın uzunluğu ile orantılı olduğu varsayılan basınçlı hava veya gazın basıncına ve hacmine bağlıdır.

PYK'nın şekli ve iç veya dış kısıtlamaların varlığı gibi ek geometrik özellikleri içerecek şekilde genişletilebilir. Bu özellikler, kasın kuvvet ve yer değiştirme özelliklerini etkileyebilir ve özel performans gereksinimleri olan PYK'ları tasarlamak için kullanılabilir. PYK'ların statik modelleri, farklı uygulamalar için uygunluğunu belirleyen önemli mekanik özellikler olan kas sertliğini ve uyumunu tahmin etmek için de kullanılabilir.

Kasın sertliği, uygulanan bir kuvvet altında deformasyona karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür, uyum ise sertliğin tersidir ve uygulanan bir kuvvet altında kasın deforme olma yeteneğini temsil eder. PYK'ların geometrik veya statik modellerinin bir sınırlaması, kasın basınç değişim hızı ve sürtünme kuvvetlerinin varlığı gibi faktörlerden etkilenebilen dinamik davranışını hesaba katmamasıdır. Bu etkileri yakalamak ve kas davranışının daha doğru bir temsilini sağlamak için dinamik PYK modelleri gereklidir.

Sonuç olarak, PYK'ların geometrik veya statik modeli, fiziksel boyutlarına dayalı olarak kasın kuvvet çıkışını ve yer değiştirme özelliklerini tahmin etmek için yararlı bir araç sağlar. Bu model, çeşitli endüstriyel uygulamalar için PYK'ların tasarımında ve optimizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kasın dinamik davranışını yakalamak ve mekanik

özelliklerinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamak için dinamik modeller de gereklidir.

2.5.2 Pnömatik Yapay Kasların Fenomenolojik /Dinamik Modeli

PYK'ların fenomenolojik veya dinamik modeli, sürtünme, atalet ve basınç değişim oranı gibi faktörleri hesaba katarak kas davranışının daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlar. PYK'ların fenomenolojik veya dinamik modeli, kasın davranışını zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlar ve kasın hareketini, kuvvet çıkışını ve yer değiştirmesini yöneten denklemleri içerir. Model, kasa güç sağlamak için kullanılan havanın veya gazın sıkıştırılabilirliğini ve ayrıca histerezis ve sürünme gibi kasın doğrusal olmayan davranışlarını hesaba katar.

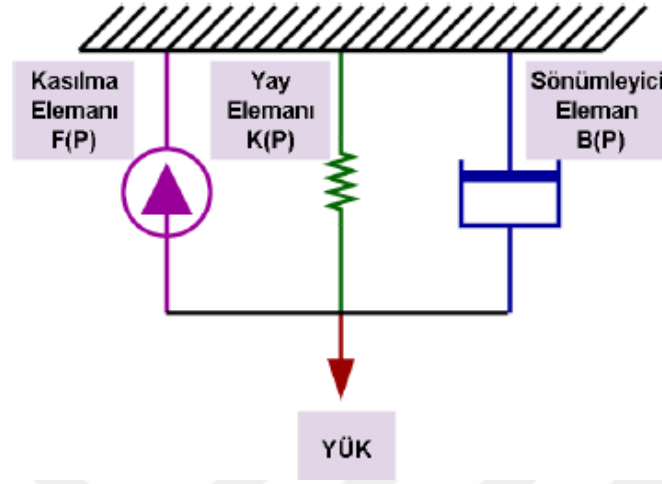
PYK'ların dinamik modeli, silindir, piston ve yük dahil olmak üzere birkaç bileşen içerir. Silindir, değişken rijitliğe sahip deforme olabilen bir yapı olarak modellenirken, piston, silindir içinde hareket eden rijit bir gövde olarak modellenmiştir. Yük, kasa uygulanan dış kuvveti temsil eder. PYK'ların dinamik modeli, kasın davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahip olma ağırlıklarını denetleyen katar. Sürtünme, pistonun kullanımının ve yer değiştirmesinin bir işlev olarak modellenir ve ampirik yünden veya teorik modeller kullanılarak tahmin edilebilir.

Atalet, PYK'ların dinamik modelinde dikkate alınarak başka bir faktördür. Atalet, bir vücudun hareket durumundaki değişikliklere karşı dayanıklıdır ve kasın kütlesi ve geometrisi tarafından belirlenir. PYK'ların dinamik modeli, basınç ve yükteki değişikliklere yanıt olarak kasın ivmesini, kullanıcı ve yer değiştirmesini ağırlık dengelemelerini içerir.

Basınç değişim oranı, PYK'ların dinamik modelinde önemli bir faktördür. Basıncadaki hızlı değişiklikler, kasın kararlı olmayan şekilde davranmasına neden olabilir ve dengesizliğe ve salınımlara yol açabilir. PYK'ların dinamik modeli, kasın zaman içindeki basınç etkilerini bire tepkisini kapsayan dengeleri içerir.

Genel olarak, PYK'ların fenomenolojik veya dinamik modeli, kas davranışının daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlar ve farklı uygulamalar için PYK'ların tasarlanması ve optimize edilmesi için önemlidir. Model, kasın performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilecek sürtünme, atalet ve basınç değişim oranı gibi faktörleri hesaba katar. Şekil 2.10'da pnömatik yapay kasın fenomenolojik modeli gösterilmiştir. Dinamik modeller, farklı koşullar altında

PYK'ların davranışını doğru bir şekilde tahmin ederek, endüstriyel uygulamalarda PYK'ların güvenilirliğini ve verimliliğini artırmaya yardımcı olabilir.



Şekil 2.10 Pnömatik Yapay Kasın Fenomenolojik Modeli (Reynolds, Repperger, Phillips and Bandry 2003).

2.6 KONTROL SİSTEMLERİ

Konum kontrolü, robot kolunun istenen konuma doğru bir şekilde hareket etmesini sağladığı için robotiğin önemli bir yönüdür. PYK yüksek kuvvet ve yer değiştirme kapasitelerinin yanı sıra hızlı tepki süreleri nedeniyle robotik kol aktüatörleri için popüler bir seçimdir. Bu yazıda, PYK tabanlı bir robot kolun konum kontrolünü ele alınacaktır. PYK tabanlı bir robot kolunun kontrol sistemi tipik olarak bir mikrodenetleyici, sensörler ve kaslara giden hava beslemesini kontrol etmek için bir valf içerir. Sensörler, kolun konumunu ölçer ve kas kasılmasını kontrol etmek için valfi ayarlayan mikrodenetleyiciye geri bildirim sağlar.

2.6.1 PID Kontrolü

PID (Proportional- Integral- Derivative) kontrolü, robot kollarının konum kontrolü için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. PID denetleyicisi, kolun istenen konumu ile gerçek konumu arasındaki farka dayalı olarak bir hata sinyali hesaplar. Hata sinyali daha sonra kas kasılmasını kontrol eden valfi ayarlamak için kullanılır. PID denetleyicinin oransal, integral ve türev terimleri, belirli uygulamalar için kontrol sistemini optimize etmek üzere ayarlanabilir.

2.6.2 İleri Besleme Kontrolü

İleri besleme kontrolü, robot kolların konum kontrolü için başka bir yöntemdir. Bu yöntem, belirli bir istenen pozisyon için gerekli kas kasılmasını tahmin etmek için kol dinamiğinin matematiksel bir modelini kullanır. Model, kolun ataletini, sürtünmesini ve hareketini etkileyen diğer faktörleri hesaba katar. Öngörülen kas kasılması daha sonra kapak kontrol sistemine girdi olarak kullanılır.

2.6.3 Uyarlanabilir Kontrol

Uyarlanabilir kontrol, değişen çevre koşullarına veya diğer dış etkenlere uyum sağlayabilen bir yöntemdir. Bu yöntemde kontrol sistemi, istenen konumu elde etmek için sensörlerden gelen geri bildirimlere dayalı olarak parametrelerini ayarlayabilmektedir.

2.6.4 Bulanık Mantık Kontrolü

Bulanık mantık kontrolü, kontrol sinyalleri üretmek için bulanık mantığı kullanan bir yöntemdir. Bulanık mantık, kontrol sisteminde kesin olmayan ve belirsizliğe izin veren matematiksel bir yaklaşımdır. Bulanık mantık kontrolü, iyi bir doğruluk sağlar ve değişen ortamlarda hassasiyet gerektiren uygulamalar için kullanılabilir.

2.7 YAPAY SİNİR AĞLARI

Yapay sinir ağları (YSA), yapay zekâ alanında son yıllarda büyük bir ilgi ve gelişme gören bir makine öğrenimi yöntemidir. YSA, insan beyninin öğrenme yolunu taklit ederek beynin öğrenme, hatırlama, genelleme yapma yolu ile topladığı verilerden yeni veri üretebilme gibi temel işlevlerin gerçekleştirildiği bilgisayar yazılımlarıdır (Öztürk ve Şahin 2018). Yapay sinir ağları, insan beyninin çalışma prensiplerinden ilham alarak oluşturulan bir makine öğrenme yöntemidir. İnsan beyninin sinir hücrelerinin çalışma prensiplerinden esinlenerek tasarlanan bu yapılar, karmaşık veri setlerini analiz etmek, örüntüleri keşfetmek ve karmaşık kararlar vermek için kullanılır. Yapay sinir ağları, ses ve görüntü işleme, doğal dil işleme, oyun stratejileri gibi çeşitli alanlarda çeşitli uygulamalara sahiptir.

Yapay sinir ağları, sinir hücrelerini veya nöronları taklit eden temel yapı birimlerine sahiptir. Her nöron, girdi verilerini işlemek, ağırlıklarını ve eşik değerini kullanarak bu verileri

öğrenmek ve bir sonraki nörona veya çıkışa iletmek için matematiksel işlemler gerçekleştirir. Bir yapay sinir ağı, genellikle katmanlar halinde düzenlenmiş nöronlar içerir: giriş katmanı, gizli katmanlar ve çıkış katmanı. Bu katmanlar, veri akışını ve işlemlerini sağlayarak ağın karmaşıklığını artırır. Yapay sinir ağları, bir öğrenme süreci ile geliştirilir. Eğitim aşamasında, ağa veri örnekleri verilir ve ağ bu verilere dayanarak belirli bir görevi öğrenmeye çalışır. Öğrenme, genellikle gerçek sonuçlarla karşılaştırarak ağın tahminlerini iyileştiren ağırlık ayarlamaları ile gerçekleşir. Bu süreç, ağın hata oranını azaltarak ve istenen görevi daha iyi gerçekleştirecek şekilde genelleştirmesini sağlar.

Yapay sinir ağı bir bilgi işlem paradigmasıdır. Problemleri çözmek için işlem elemanları arasında yüksek sayıda bağlantı oluşturur. Yapay sinir ağları; insan beyninden esinlenerek, öğrenme sürecinin matematiksel olarak modellenmesi uğraşı sonucu ortaya çıkmıştır (Kabalcı, 2014). Yapay sinir ağları farklı isimlerle de ifade edilmektedir. Bunlar, paralel dağıtılmış ağlar, bağlantılı ağlar, nöromorfik ağlardır.

Bir yapay sinir ağı, genellikle üç temel bileşenden oluşur:

Giriş Katmanı: Verilerin ağa girdi olarak sağlandığı katmandır. Her bir giriş, nöronlara iletilir ve ağın geri kalan kısmına yayılır.

Gizli Katmanlar: İşlem ve hesaplama sürecinin gerçekleştiği katmanlardır. Her bir gizli katman, daha önceki katmandaki nöronların çıktılarını alır, bu çıktıları işler ve bir sonraki katmana iletir.

Çıkış Katmanı: Son katmandır ve ağın nihai çıktıları sağlar. Genellikle, bir sorunun sınıflandırma, regresyon veya diğer özel bir tür çıktı olması gibi uygulamaya bağlı olarak değişir.

Yapay sinir ağları, öğrenme süreci yoluyla belirli bir görevi gerçekleştirmek için optimize edilir. Bu öğrenme süreci, ağı eğitmek ve istenilen sonuçları üretmek için ağırlıkların ve bağlantıların ayarlanmasıyla gerçekleştirilir. Bu genellikle geri yayılım (backpropagation) algoritması kullanılarak yapılır, bu da ağın tahminlerini gerçek sonuçlarla karşılaştırarak hataları geriye doğru ileterek ve ağırlıkları güncelleyerek gerçekleştirilir.

2.7.1 Yapay Sinir Ağ Modelleri

Yapay sinir ağı modelleri sırasıyla tek katmanlı algılayıcılar, çok katmanlı algılayıcılar, ileri beslemeli yapay sinir ağları ve geri beslemeli yapay sinir ağlarıdır.

2.7.1.1 Tek Katmanlı Algılayıcılar (Single-Layer Perceptrons-SLP)

Tek katmanlı algılayıcılar, en basit yapay sinir ağı modelidir. Sadece giriş ve çıkış katmanlarından oluşur. Girişler, ağırlıklarla çarpılır ve bir aktivasyon fonksiyonuna tabi tutulur. Sonuç, doğrudan çıkış katmanına iletilir. Bu model, sadece doğrusal olarak ayrılabilen problemleri çözmek için kullanılır.

2.7.1.2 Çok Katmanlı Algılayıcılar (Multi-Layer Perceptrons - MLP)

Çok katmanlı algılayıcılar, en yaygın kullanılan yapay sinir ağı modelidir. En az bir gizli katmana sahiptir ve bu katmanlar arasında bağlantılar bulunur. Her nöron, bir önceki katmandaki tüm nöronların çıktılarında etkilenir. MLP'ler, daha karmaşık problemleri çözmek için kullanılır ve genellikle geri yayılım algoritmasıyla eğitilir.

2.7.1.3 İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağları (Feedforward Neural Networks)

İleri beslemeli yapay sinir ağları, verinin sadece bir yönde (girişten çıkışa doğru) akışını sağlayan modellerdir. Tek katmanlı algılayıcılar ve çok katmanlı algılayıcılar, ileri beslemeli yapay sinir ağlarının örnekleridir. Bu modellerde geri dönüş bağlantıları yoktur ve çıktılar sadece girişe dayanır.

2.7.1.4 Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağları (Recurrent Neural Networks - RNN)

Geri beslemeli yapay sinir ağları, geri dönüş bağlantılarına sahip modellerdir. Bu bağlantılar, ağın geçmiş durumlarını ve geçmiş bilgileri hatırlamasını sağlar. Bu nedenle, zaman serileri, doğal dil işleme gibi sıralı verilerle çalışmak için kullanılırlar. RNN'ler, bir adımdan diğerine bilgi taşıırken içsel bir belleğe sahiptir.

2.7.2 Yapay Sinir Ağlarının Özellikleri

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin işleyişinden ilham alarak tasarlanmış matematiksel modellerdir. Yapay sinir ağları, birçok paralel çalışan yapay sinir hücresi (nöron) üzerine kurulmuştur ve karmaşık problemleri çözmek veya desenleri tanımak için kullanılırlar. Yapay Sinir Ağları uygulamaları en çok tahmin, sınıflandırma, veri ilişkilendirme, veri yorumlama ve

veri filtreleme işlemlerinde kullanılmaktadır (Ağyar, 2015). Yapay sinir ağlarının bazı özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

Paralel İşleme: Yapay sinir ağları, büyük ölçüde paralel işleme yeteneğine sahiptir. Bir yapay sinir ağı, içindeki nöronlar arasında aynı anda birçok hesaplama yapabilir. Bu paralel işleme yeteneği, yapay sinir ağlarının yüksek hesaplama gücüne ve hızına olanak sağlar.

Öğrenme ve Uyarlanabilirlik: Yapay sinir ağları, veriye dayalı öğrenme yetenekleriyle öne çıkar. Bir yapay sinir ağı, verileri analiz eder, içerisindeki ağırlıkları ve parametreleri uygun şekilde ayarlayarak öğrenme gerçekleştirir.

Paralel İşlem Yeteneği: Yapay Sinir Ağları, birçok düğümden ve katmandan oluşan yapıları nedeniyle paralel işlem yapma yeteneğine sahiptir. Bu, büyük miktardaki verileri aynı anda işleme yaparak hızlı sonuçlar almayı sağlar ve makine öğrenimi modellerinin daha verimli eğitilmesine yardımcı olmaktadır.

Esnek Yapı: Yapay Sinir Ağları, çeşitli mimariler ve yapılarla tasarlanabilir. Basit bir yapıdan başlayarak karmaşık ve derin ağlara kadar uzanan çeşitli yapılar kullanılabilir. Bu sayede, farklı veri ve görev tiplerine uygun modeller oluşturulabilir.

Hata Toleransı: Yapay Sinir Ağları, veri gürültüsü ve eksik verilerle başa çıkma yeteneğine sahiptir. Eğitim sürecinde, model gürültülü verileri anlamsız hale getirerek genel desenleri öğrenir. Bu sayede, model genelleme yaparak yeni ve görmediği verilere de uyum sağlayabilir.

Dağıtık Bilgi İşleme: Yapay Sinir Ağları, verileri paralel olarak işleyen birçok düğümden oluşur. Bu, modelin büyük veri kümesini daha etkili bir şekilde işlemesine olanak tanır ve büyük veri analizi ve işlemesi için uygun hale getirir.

BÖLÜM 3

MEKANİK TASARIM VE KONTROL

3.1 ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmada, 3 serbestlik derecesine sahip bir robot kolunun pnömatik yapay kaslar kullanılarak hareket ettirilmesi amaçlanmaktadır. Konum kontrolü, döner bir tabana sahip olan ve uzayıp kısalan yapay kaslarla desteklenen 2 kolun uç noktasının (x, y, z koordinatlarında) istenen hedef noktalara doğru hareket etmesini sağlamaktır. Robot kolun tasarımı ve kinematik analizi Solidworks programıyla yapılmıştır ve Matlab Simulink programı kullanılarak robot kolunun konum kontrolü simülasyon yoluyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon verileri kullanılarak bir yapay sinir ağı programı eğitilmiş, böylece sistemin konum kontrolü yapay sinir ağları kullanılarak optimize edilmiştir.

Konum kontrolü zorlu bir görevdir ve robot kolun pnömatik yapay kaslarla hareket ettirilmesi bu zorluğu artırabilir. Çünkü pnömatik sistemlerin doğrusal olmayan dinamikleri ve hızlı tepki gereksinimleri vardır. Literatürde incelenen bir çalışmada endüstride yaygın olarak kullanılan basit aç-kapa valflerle kontrol edilen bir robot prototipini vurgularken, bu çalışmada daha gelişmiş bir kontrol yöntemi olarak yapay sinir ağlarından bahsedilmektedir. Yapay sinir ağı kullanılarak konum kontrolünün başarıyla gerçekleştirilmesi, geleneksel kontrol yöntemlerine göre farklılık gösterir. Geleneksel yöntemlerde, pnömatik sistemlerin karmaşıklığı ve belirli senaryolarda iyi sonuçlar verememe gibi zorluklarla karşılaşılabilirken, yapay sinir ağları daha esnek ve adaptif bir kontrol sağlayabilmektedir. Bu sayede, farklı giriş değerlerine göre robot kolunun daha etkili ve hassas bir şekilde konum kontrolü sağlanabilmesi amaçlanmaktadır.

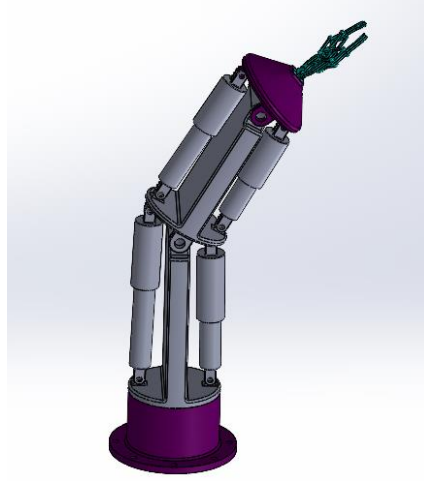
3.2 YÖNTEM

3 serbestlik dereceli robot kol Solidworks programı kullanılarak tasarımı ve kinematik analizi yapılmıştır. PYK'lı robot kolun robot kolun tasarımı ve kinematik analizi Solidworks programı ile yapılmıştır. Solidworks programı ile çıkış açısı değerleri ve konum değerleri bulunmuştur. Matlab Simulink programı kullanılarak konum kontrolü yapılmıştır ve PYK'lı robot kolun çıkış açısı değerleri bulunmuştur. Solidworks programı ve Matlab Simulink programı kullanılarak bulunan değerler karşılaştırılmıştır. Matlab Simulink programında bulunan değerler yapay sinir ağları ile eğitilmiştir. Çalışmanın ayrıntılı açıklamaları aşağıda açıklanmaktadır.

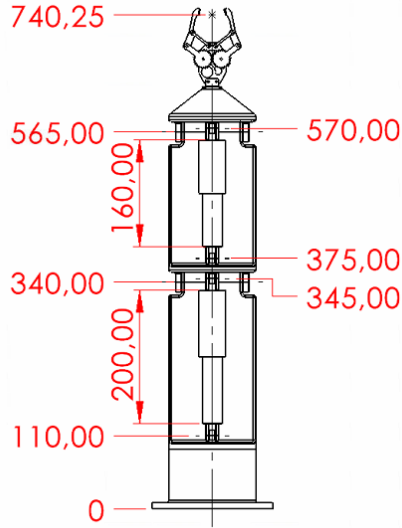
3.2.1 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kol Tasarımı

3 serbestlik dereceli pnömatik yapay kaslı robotun temel işlevi bir parçayı bir yerden alıp başka bir yere koymaktır. Pnömatik yapay kaslı robot kol 360 derece dönebilen bir dönme ekseninde kurulmuştur ve robotun kendi etrafında 360° dönmesini sağlamaktadır. PYK'lı robot kolda 2 adet uzuv kısmından ve bir adet tutucu kısmından oluşmaktadır. Pnömatik yapay kas sistemi oluşturmak için her uzuv kısmı için 2 adet piston kullanılmıştır ve toplam 4 adet piston kullanılmıştır. Her iki eklemden de bulunan yapay kas çiftleri karşılıklı çalışarak kolun hareketini sağlamaktadır. Robotun en ucunda ise iş parçasını tutmak için tutucu yer almaktadır ve tutucu kısmı uzuv kısmına sabittir.

Tasarım fazında belirlenen temel özellikler Solidworks programı ile bilgisayar ortamına aktarılmış ve tasarım detayları şekillendirilmiştir. 3 serbestlik dereceli pnömatik yapay kaslı robot kolun parçaları Solidworks programı ile çizilerek montajları yapılmıştır. Geliştirilen sistemin genel yapısı Şekil 3.1'de sunulmuştur. Şekil 3.2'de ise PYK'lı robot kolun çizimi ve ölçüleri görülmektedir.



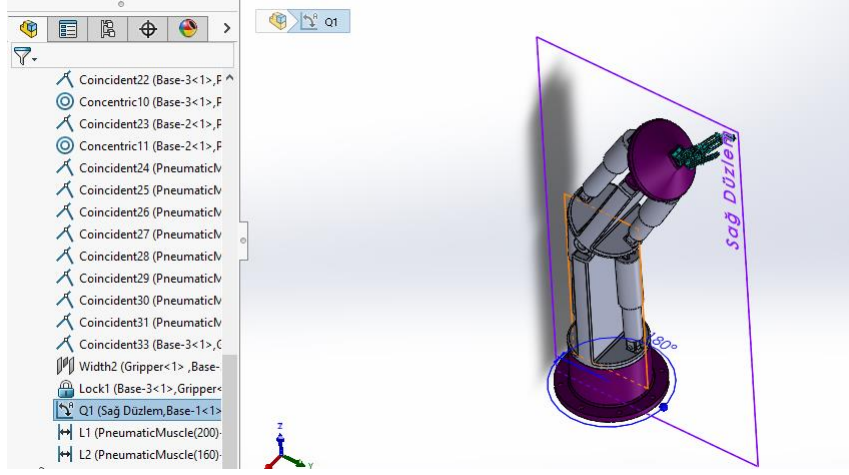
Şekil 3.1 3 Serbestlik Dereceli Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kol Tasarımı.



Şekil 3.2 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Çizimi.

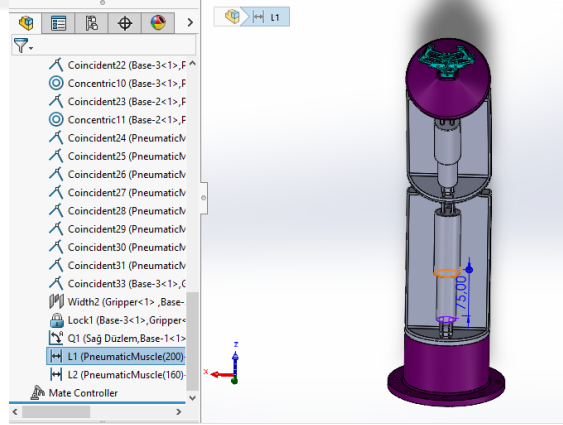
3.2.2 3 Serbestlik Dereceli Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Kinematik Analizi

Pnömatik yapay kaslı robot kol Solidworks programı ile kinematik analizi yapılmıştır. PYK'lı robot kol için θ_1 , L_1 ve L_2 değerleri konum kontrolünü sağlanması gereken giriş değerleridir. θ_1 robot kolun kendi eksenini etrafında dönmesini sağlayan açı değeri ve bu açı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



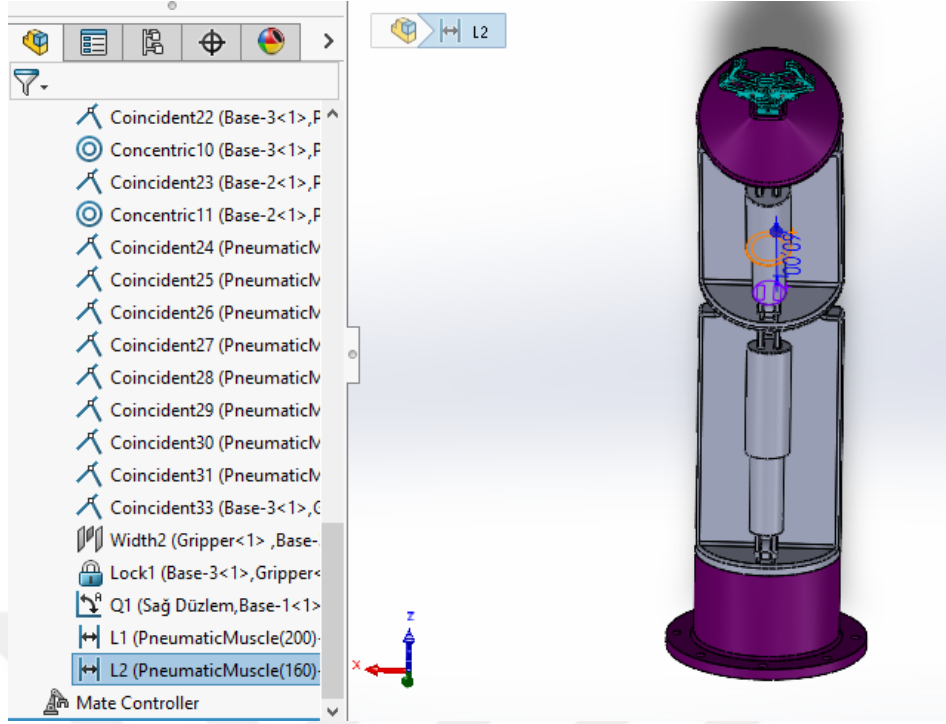
Şekil 3.3 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun θ_1 Açısının Gösterimi.

L_1 değeri 1. Pistonun basınç altındaki uzama ve kısalma değeri olarak ifade edilmektedir. 1. piston için serbest haldeki yapay kas 200 mm'dir. Yapay kasların strok değeri %25 olduğundan dolayı serbest boyu 200 mm olan yapay kas 50 mm stroka sahip olduğu görülmektedir. Yapay kas çalıştığında aksenal olarak kısalıp şişme işlemi yapar. Yapay kasın serbest boyu 200 mm olduğundan dolayı 150 ile 200 mm arasında çalışır. Şekil 3.4'te Solidworks programında L_1 'in ifade ettiği yer görülmektedir.

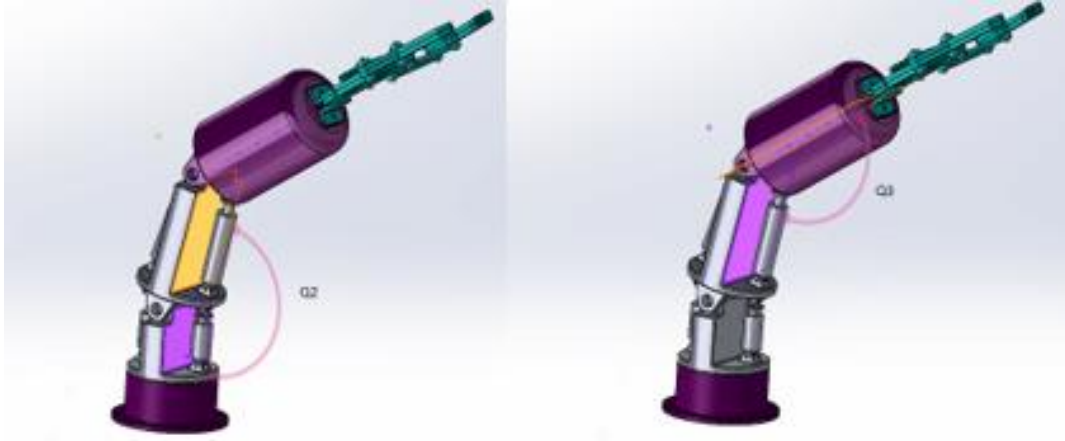


Şekil 3.4 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kol'da L_1 Gösterimi.

Pnömatik yapay kaslı robot kolda L_2 değeri ise 2. Pistonun basınç altında uzama ve kısalma değeridir. L_2 'nin ifade ettiği yer Şekil 3.5'te gösterilmektedir ve serbest halde 160 mm'dir. Pnömatik yapay kasın strok değeri %25 olduğundan dolayı serbest boyu 160 mm olan yapay kas 40 mm stroka sahiptir. Pnömatik yapay kas çalıştığında aksenal kısalıp şişme işlemi yapmaktadır ve serbest boyu 160 mm olan yapay kas 120 ile 160 mm arasında çalışır.



Şekil 3.5 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kol'da L₂ Gösterimi.



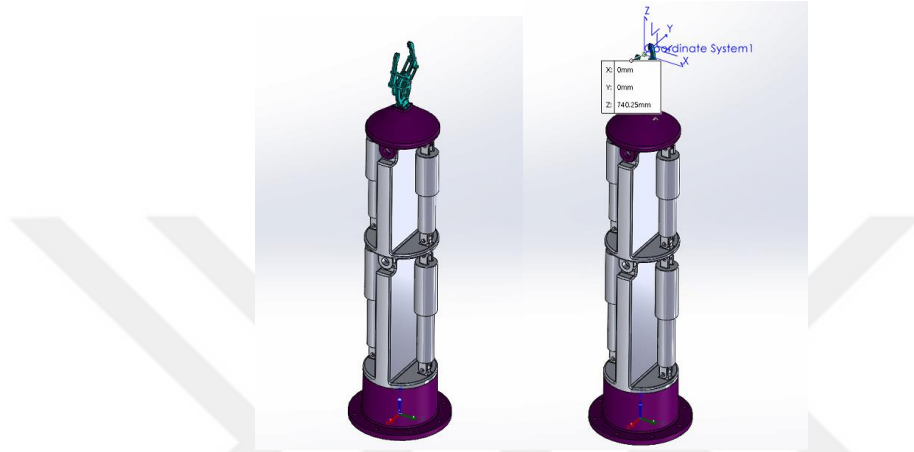
Şekil 3.6 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun θ_2 ve θ_3 Açılarının Gösterimi.

Pnömatik yapay kaslı robot kol için solidworks programında θ_1 , L₁ ve L₂ giriş değerleri yazılarak θ_2 , θ_3 çıkış açı değerleri ve x, y, z konum değerleri bulunmuştur. Pnömatik yapay kaslı robot kolun çıkış açıları Şekil 3.6 'da görülmektedir. PYK'lı robot kolun θ_1 , θ_2 ve θ_3 açı değer aralıkları Çizelge 3.1'de görülmektedir.

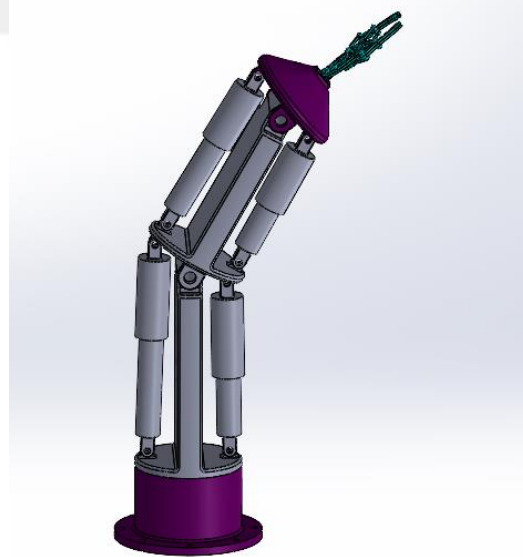
Çizelge 3.1 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolum θ_1 , θ_2 ve θ_3 Değer Aralıkları.

θ_1 (Min.) [°]	θ_1 (Maks.) [°]	θ_2 (Min.) [°]	θ_2 (Maks.) [°]	θ_3 (Min.) [°]	θ_3 (Maks.) [°]
-180	180	-30,75	29,03	-144	-71,64

Pnömatik yapay kaslı robot kolun uç noktasının x, y koordinatlarının 0,0 olduğu konum Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.7 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolum Başlangıç Konumu.

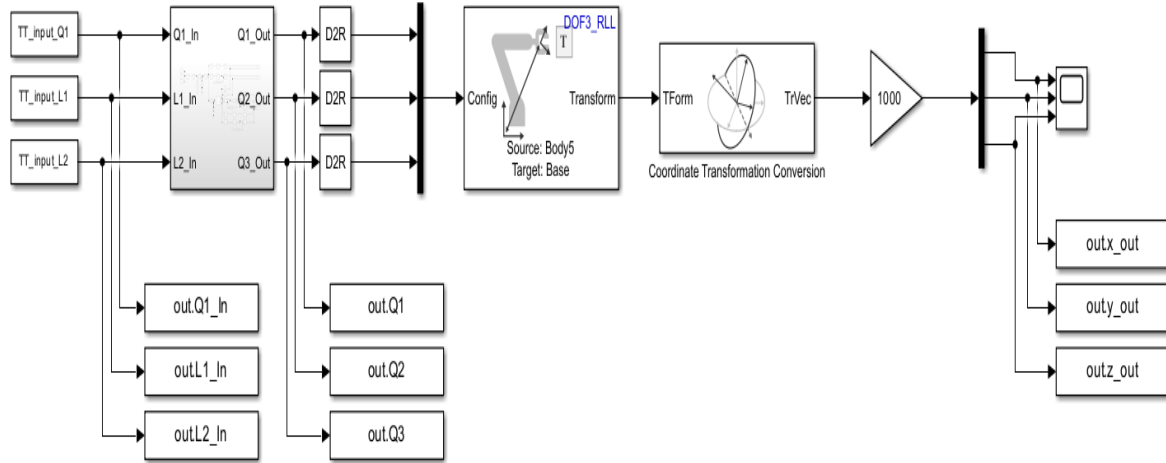


Şekil 3.8 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolum Maksimum Eğilme Konumu.

Pnömatik yapay kaslı robot kolun maksimum eğilme konumu Şekil 3.8’de görülmektedir.

3.2.3 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Matlab Simulink ile Konum Kontrolü

Pnömatik yapay kaslı robot kontrolün uç noktasının verilen giriş değerlerine göre Matlab Simulink Programı kullanılarak oluşturulan kontrol blok diyagramları ile konum kontrolü yapılmaktadır. PYK'lı robot kolun kontrol blok diyagramı Şekil 3.9'da görülmektedir.



Şekil 3.9 Matlab Simulink Programı Üzerinden Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Konum Kontrolü için Oluşturulan Blok Diyagramı.

PYK'lı robot kolun konum kontrolü için Matlab Simulink programında Simscape arayüzü kullanılarak kontrol blok diyagramları oluşturulmuştur ve oluşturulan blok diyagramında θ_1 , L_1 ve L_2 değerleri pnömatik yapay kaslı robot kolun konum kontrolünü sağlanması gereken giriş değerleridir.

PYK'lı robot kol için Matlab Simulink programına θ_1 , L_1 ve L_2 değerleri girilerek pnömatik yapay kaslı robot kolun uç noktasına göre x,y,z konumları ve θ_2 , θ_3 değerleri bulunabilmektedir. Kontrol blok diyagramın açık ve ayrıntılı hali ise Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

3.2.4 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Matlab ve Solidworks Programı Karşılaştırılması

Pnömatik yapay kaslı robot kolda girilen giriş değerlerine göre alınan çıkış açı değerleri ve konumlanan pnömatik yapay kaslı robot kolun konumu Matlab Simulink ve Solidworks programları ile bulunabilmektedir. Çizelge 3.3'te PYK'lı robot kolun giriş değerlerine karşılık gelen konum değerleri Matlab Simulink programından ve Solidworks programından alınan değerlerle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.3 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Matlab ve Solidworks Programı Üzerinden Alınan x, y, z Konum Değerleri.

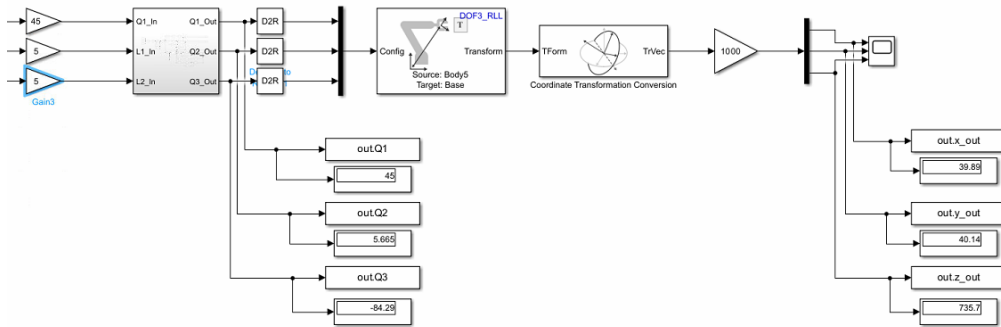
Giriş Değerleri			Solidworks Programı Çıkış Değerleri			Matlab Simulink Programı Çıkış Değerleri		
θ_1 (Derece)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
-180	-25	-20	0	248,47	643,55	0,1773	258,3	634,3
-135	-20	-15	142,52	142,52	680,67	147,7	147,4	676
-90	-10	-10	150,43	0	708,8	154,8	-0,1173	706,9
-45	-5	-5	40,37	-40,37	735,66	41	-41,25	735,5
0	0	0	0	0	740,25	-0,1773	-0,5134	740,3
45	5	5	40,76	40,76	735,57	39,89	40,14	735,7
90	10	10	114,73	0	721,33	112,1	0,1773	722,2
135	15	15	120,18	-120,18	697,19	116,8	-116,6	699,8
180	20	20	0	-221,88	662,73	0,1773	-214,3	668,6

PYK'lı robot kolun giriş değerlerine karşılık gelen açı değerleri Matlab Simulink programından alınan değerler ile ve Solidworks programından alınan değerler karşılaştırılmıştır ve Çizelge 3.4'te görülmektedir.

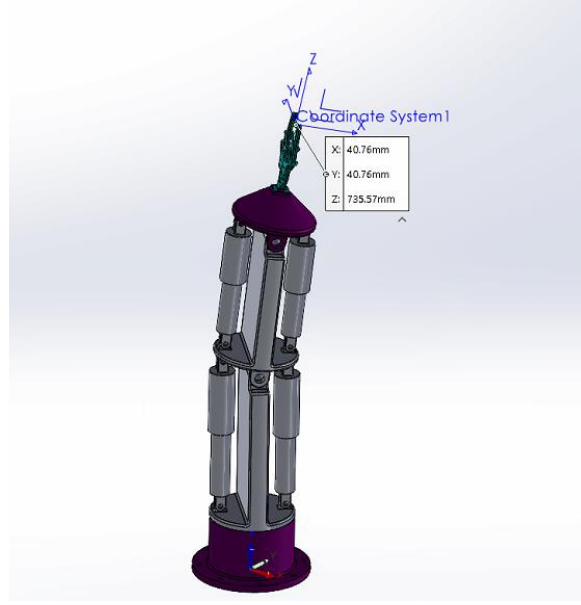
Çizelge 3.4 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Matlab ve Solidworks Programı Üzerinden Alınan θ_2 ve θ_3 Açılı Değerleri.

Giriş Değerleri			Solidworks Programı Çıkış Değerleri			Matlab Simulink Programı Çıkış Değerleri		
θ_1 (Derece)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	θ_1 (Derece)	θ_2 (Derece)	θ_3 (Derece)	θ_1 (Derece)	θ_2 (Derece)	θ_3 (Derece)
-180	-25	-20	-180	-29,21	-23,1	-180	-30,75	-24
-135	-20	-15	-135	-23,09	-17,19	-135	-24,07	-17,7
-90	-10	-10	-90	-17,19	-11,42	-90	-17,76	-11,6
-45	-5	-5	-45	-5,71	-5,71	-45	-5,814	-5,77
0	0	0	0	0	0	0	-0,046	0
45	5	5	45	5,77	5,77	45	5,665	5,71
90	10	10	90	11,65	11,65	90	11,37	11,42
135	15	15	135	17,71	17,7	135	17,14	17,19
180	20	20	180	24,02	24	180	23,04	23,09

PYK'lı robot kolun Solidworks programı üzerinden $\theta_1 = 45^\circ$ $L_1 = 5$ mm ve $L_2 = 5$ mm giriş değerlerine karşılık gelen çıkış açılı değerleri $\theta_2 = 5,77^\circ$ $\theta_3 = 5,77^\circ$ ve konum değerleri ise $x = 40,76$ mm $y = 40,76$ mm $z = 735,57$ mm olarak bulunmuştur. Matlab Simulink programı kullanılarak elde edilen açılı değerleri $\theta_2 = 5,665^\circ$, $\theta_3 = 5,71^\circ$ ve konum değerleri $x = 39,89$ mm $y = 40,14$ mm $z = 735,7$ mm olarak bulunmuştur. Bu değerleri oluşturan kontrol blok diyagramı Şekil 3.11'de verilmiştir.

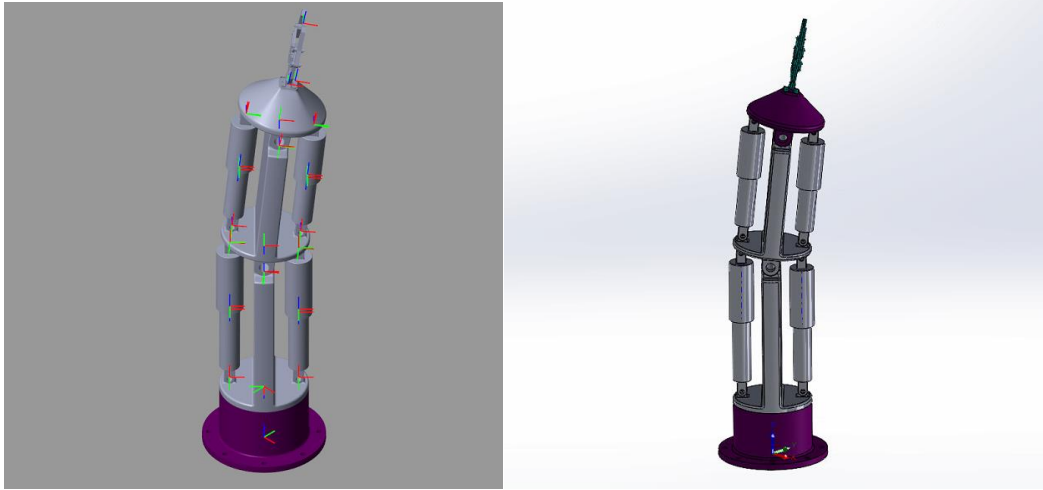


Şekil 3.11 PYK'lı Robot Kolun Simulink Üzerinden Oluşturulan Blok Diyagramı.



Şekil 3.12 PYK'lı Robot Kolun X,Y,Z Değerlerine Göre Solidworks Programındaki Konumu.

Pnömatik yapay kaslı robot kol için aynı giriş değerleri ile Matlab Simulink programı ve Solidworks programları kullanılarak robot kolun geldiği konumlar Şekil 3.13'te görülmektedir. Matlab Simulink ve Solidworks programında aynı giriş değerleri doğrultusunda gelen konumların birbirini doğruladığı anlaşılmaktadır.



(a)

(b)

Şekil 3.13 (a) PYK'lı Robot Kolun Matlab Simulink Programındaki Konumu (b) PYK'lı Robot Kolu Solidworks Programındaki Konumu.



BÖLÜM 4

YAPAY SİNİR AĞI UYGULAMASI

Bu bölümde, yukarıdaki analizlerle elde edilen giriş çıkış değerleri bir yapay sinir ağı programına uyarlanmıştır. Bu uygulama, Matlab Artificial Neural Network Toolbox (Matlab Yapay Sinir Ağları Araç Kutusu) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Matlab Artificial Neural Network Toolbox (Matlab Yapay Sinir Ağları Araç Kutusu) kullanılarak yapılan bu uygulamada, giriş değişkenleri olarak tabanın dönme açısı θ_1 ve sırasıyla pistonlu kol boyları L_1 ve L_2 , çıkış değişkenleri olarak da X, Y, Z değerleri alınmıştır. Matlab Artificial Neural Network Toolbox (Matlab Yapay Sinir Ağları Araç Kutusu) ile yapılan uygulamada 3 giriş ve 3 çıkışlı bir yapay sinir ağı uygulanmıştır. Giriş değerleri θ_1 , L_1 ve L_2 değerleridir. Çıkış değerleri ise X, Y ve Z değerleridir.

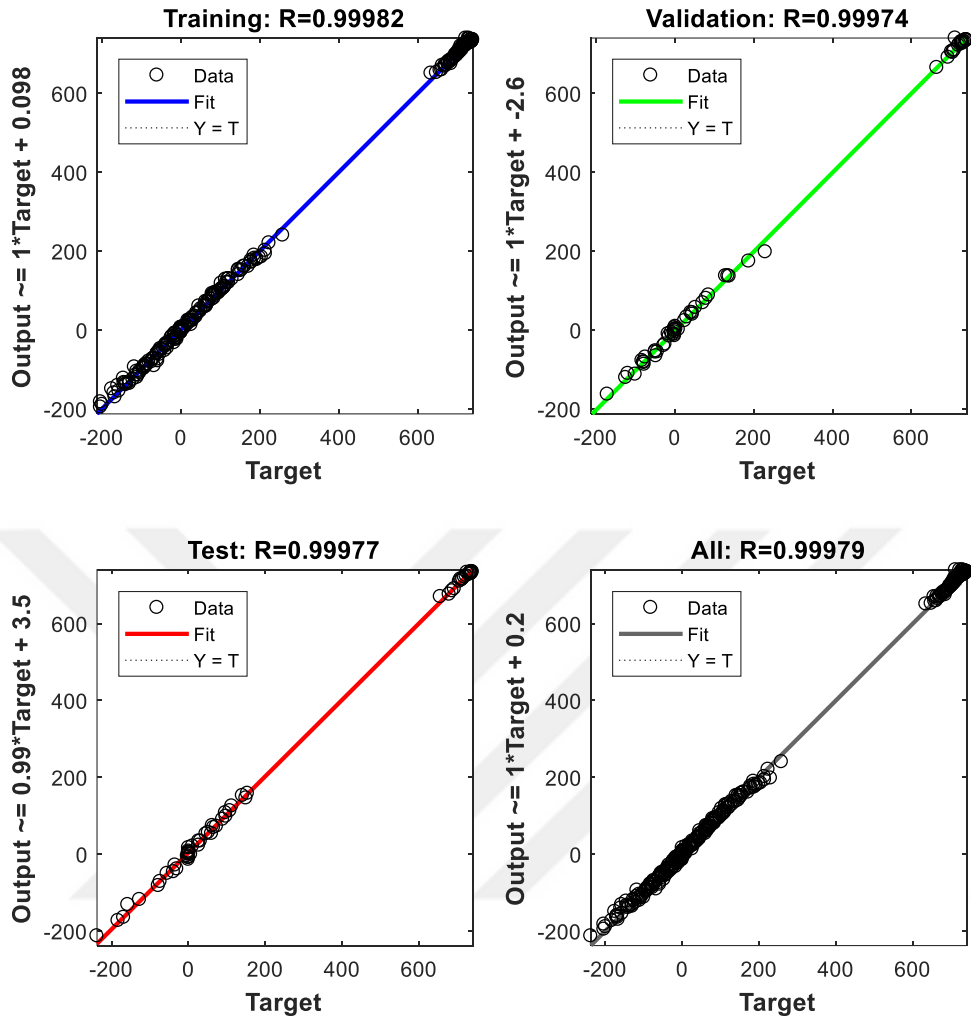
Çizelge 4.1’de θ_1 açısının -150 derece ve L_2 ’nin -17 mm olduğu konumda farklı L_1 mesafelerine göre x y z değerleri görülmektedir. Matlab Simulink programında bulunan giriş ve çıkış değerleri Matlab Artificial Neural Network Toolbox (Matlab Yapay Sinir Ağları Araç Kutusu) ile eğitilmiştir. Bu eğitim süreci, belirtilen sınırlar içindeki tüm değerleri bulabilmek için yapılmıştır. Eğitim sonucunda belirtilen sınırlar içerisindeki tüm değerleri bulabilmektedir. Çizelge 4.1’de verilen değerler, bu eğitim sonucunda elde edilen değerlerin bir kısmını temsil etmektedir. Bu uygulamada tek gizli katman kullanılmıştır. Gizli katmandaki nöron sayısı 10’dur. Aktivasyon fonksiyonu ise Sigmoid Aktivasyon fonksiyonudur.

Sonuç olarak, bu uygulama sayesinde karmaşık matematiksel hesaplamalar otomatik olarak gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları daha hızlı bir şekilde elde edilmiştir. Bu çalışma, mühendislerin ve tasarımcıların PYK'ların davranışını daha iyi anlamalarına ve daha verimli kontrol sistemleri geliştirmelerine yardımcı olabilecek önemli bir araç sunmaktadır.

Çizelge 4.1 YSA Giriş ve Çıkış Değerleri.

Giriş Değerleri			Çıkış Değerleri		
θ_1	L_1	L_2	X	Y	Z
(Derece)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
-150	-25	-17	121,2328	213,6381	648,1591
-150	-20	-17	108,202	187,0565	669,5919
-150	-15	-17	88,86275	153,5598	691,9253
-150	-10	-17	69,90285	120,7204	708,6039
-150	-5	-17	50,74945	87,54581	720,9053
-150	0	-17	30,68095	52,78597	729,3597
-150	5	-17	11,26209	19,15174	733,4908
-150	10	-17	-8,26503	-14,67	733,7577
-150	15	-17	-27,9075	-48,6915	730,1012
-150	20	-17	-47,6917	-82,9585	722,3245
-150	25	-17	-67,8113	-117,807	709,9348

Bunlara ilaveten θ_1 açısının [-150;-120;-90;-60;-30;0;30;60;90;120;150;180] derecelerde ve L_1 'in [-25;25] ve L_2 'nin [-20;20] mm aralıklarla alındığı 139 satırdan oluşan 3 girişli 3 çıkışlı bir yapay sinir ağı oluşturulmuştur. Bu değerler ile eğitim (training) fazı gerçekleştirilmiştir. 36 iterasyon ile yapılan eğitimin sonunda %0.9998 gibi bir yaklaşıklık elde edilmiştir (Şekil 4.1)

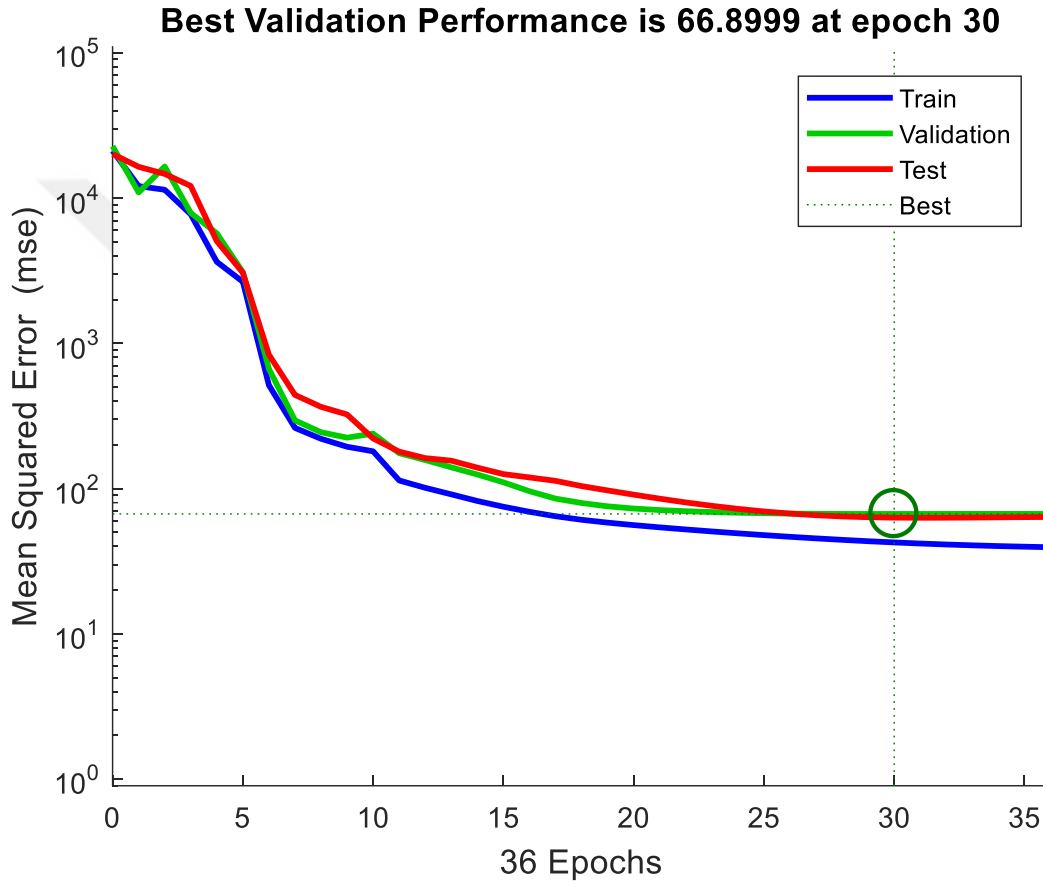


Şekil 4.1 Eğitim Fazı Sonunda Elde Edilen Regresyon Değerleri.

Çizelge 4.2 Yapay Sinir Ağları Test Sonuçları

Giriş Değerleri			Gerçek Çıkış Değerleri			Test Sonuç Değerleri		
θ_1 (Derece)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
30	-5	1	-19,1122	-32,7486	738,4344	-19,3277	-36,2551	735,2469
60	25	4	178,3113	103,1523	682,8155	171,9831	104,3705	679,8998
120	-10	10	-40,7503	23,732	735,5164	-52,4853	23,6623	735,0093
150	5	13	41,76131	-71,9785	728,1455	41,1335	-73,6294	728,4637
-120	-10	-14	113,0387	65,05811	714,0735	128,4753	63,0090	714,939

Bundan sonraki aşamada eğitimde kullanılan bazı giriş değerleri ile YSA programı test edilmiştir. Çizelge 4.2’de test için kullanılan giriş değerleri ve test sonuçları görülmektedir. Elde edilen sonuçlar 3 giriş 3 çıkışlı bir ağ için tatmin edici yaklaşıklıktadır. Programın gizli katman sayısı gibi değerlerinde yapılacak değişikliklerle hata oranları daha da aşağıya düşürülebileceği öngörülmektedir. Şekil 4.2’de eğitim ve test fazı sonucunda YSA programından elde edilen performans eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.2 Eğitim, Test ve Doğrulama Performans Eğrileri.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, pnömatik yapay kaslar sayesinde hareket edebilen 3 serbestlik dereceli bir robot kolun tasarımı yapılmıştır ve kolun uç noktasının konum kontrolü amaçlanmıştır. PYK'lı robot kol bir döner taban ve pnömatik yapay kaslardan oluşmaktadır. PYK'lı robot kol ucunun, taban dönme açısı ve pnömatik yapay kasın hareket mesafesinin değişimiyle X, Y, Z kartezyen koordinatlarında hangi noktaya gideceğinin bulunması hedeflenmiştir.

PYK'lı robot kolda ilk aşama olarak, Solidworks programı kullanılmıştır ve robot kolun tasarımı ve kinematik analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Matlab Simulink ile kontrol blok diyagramları oluşturulmuş ve konum kontrolü yapılmıştır. Pnömatik yapay kaslı robot kol, Matlab Simulink kullanılarak hareket sınırı doğrultusunda girilen tüm değerleri hesaplayabilmektedir. PYK'lı robot kolun konum kontrolü simülasyonlarla incelenmiştir ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Solidworks ve Matlab programı üzerinden alınan veriler incelendiğinde sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu değerler, kinematik analiz ile karşılaştırıldıktan sonra doğru oldukları PYK'lı robot kolun Matlab Simulink programı ve Solidworks programı kullanarak belirtilen hareket aralığında girilen tüm değerlerin sonucu bulunmaktadır. Bu hesaplanan sayısal veriler ile Matlab Artificial Neural Network Toolbox (Matlab Yapay Sinir Ağları Araç Kutusu) ile eğitilmiştir. Bu eğitimde giriş değerleri taban dönme açısı ve kol uzunlukları, çıkış değeri ise kol ucunun ulaştığı noktanın (x, y, z değerleri) olduğu sayısal veriler kullanılmıştır. Elde edilen sayısal veriler kullanılarak yapay sinir ağı programı eğitilmiş ve test verileriyle doğrulama yapılmıştır. Yapay sinir ağı, farklı giriş değerlerine cevap verebilen ve istenen sonuçları sağlayabilen bir konum kontrolü sağlamıştır.

Solidworks programı ve Simulink programı karşılaştırıldığında giriş değeri $\theta_1 = 45$ derece $L_1 = 5$ mm $L_2 = 5$ mm olan giriş değerleri için θ_1 değerine göre Solidworks programında 5,77 derece ve Matlab Simulink programında 5,665 derece çıkmıştır. Aralığındaki hata hesaplandığında %1,81 dir.

Giriş değerleri aynı tutularak X konumu için bu karşılaştırma yapıldığında Solidworks programında X konumu 40,76 mm ve Matlab Simulink programında 39,89 mm dir. İki program arasındaki hata ise yüzde 2,13 dür. İki program arasındaki hata farkından da anlaşılacağı üzere programların birbirini doğruladığı görülmektedir.

Matlab Simulink programında bulunan değerler ile yapay sinir ağlarında eğitim fazı (training) gerçekleşmiştir. Bu eğitimde 36 iterasyon yapılmıştır. 36 iterasyon ile yapılan eğitimin sonunda %0.9998 gibi bir yaklaşıklık elde edilmiştir.

Eğitimde kullanılan bazı giriş değerleri ile YSA programı test edilmiştir. Matlab Simulink programından alınan değerler ile test sonuç değerleri karşılaştırıldığında $\theta_1 = 30$ derece $L_1 = -5$ mm $L_2 = 1$ mm olan giriş değerleri için gerçek çıkış değerleri $X = -19,1122$ mm, $Y = -32,7486$ mm ve $Z = 738,4344$ mm olarak bulunmuştur. Test sonuç değerleri ise $X = -19,3277$ mm $Y = -36,2551$ mm $Z = 735,2469$ mm olarak bulunmuştur ve X için hata hesaplandığında % 1,88 bulunmuştur. Bu hata oranları değerlendirildiğinde YSA programı için yapılan testin başarılı olarak sonuçlandığı görülmektedir.

5.1 ÖNERİLER

3 serbestlik dereceli pnömatik yapay kaslı robot kolun hareket alanı sınırlı olduğu görülmektedir. Pnömatik yapay kaslı robot kolun hareket alanını genişletmek için serbestlik derecesinin artması gerektiği düşünülmektedir. Serbestlik derecesi arttığında hareket alanının genişleyeceği ve bu durum üzerinde çalışmaların yapılması gerektiği öngörülmektedir. Pnömatik yapay kaslı robot kolda serbestlik derecesi arttığında daha fazla hareket alanına sahip olacağı için daha çok konum ve açı verisine ulaşılabilecektir. Bu sayede yapay sinir ağı eğitimi için daha geniş ve çeşitli veri setleri oluşturulabilir. Farklı çalışma koşullarını ve hareket aralıklarını içeren veriler, yapay sinir ağının genellemesini ve daha iyi sonuçlar vermesini sağlayabilir.

Çalışmanın şu aşamasında, tasarım ve kontrol simülasyonları yapılmıştır. Bir sonraki adım, bu tasarımı fiziksel bir prototipe dönüştürmektir. Gerçek bir robot kolun yapılması, prototipin donanım bileşenlerinin üretilmesi ve mekanik montajının gerçekleştirilmesi gerekecektir. Bu şekilde, prototipin gerçek dünya koşullarında test edilmesi ve performansının değerlendirilmesi mümkün olacaktır. Gerçek zamanlı sensörler kullanarak robot kolun konumunu gerçek zamanlı olarak takip edebilir ve bu bilgileri kontrol sistemine entegre edilebilir. Bu, dış etkileri ve hataları daha iyi telafi edilmesini sağlayabilir.

Bu çalışmada, konum kontrolü Matlab Simulink kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak, gerçek bir robot kolun kontrolü genellikle gerçek zamanlı olarak yapılması gereken bir uygulamadır. Bu nedenle, kontrol algoritmalarının gerçek zamanlı ortama uyarlanması ve hızlı tepki verme yeteneklerinin geliştirilmesi önemlidir. Gerçek zamanlı kontrol için uygun bir donanım platformu seçilebilir veya mevcut sistemin buna uygun şekilde güncellenmesi düşünülebilir. Konum kontrolü, robot kolun uç noktasının hassas bir şekilde belirlenmesini gerektirir. Bu nedenle, pnömatik yapay kasların daha yüksek hassasiyet sağlaması için iyileştirmeler yapılabilir. Örneğin, daha hassas sensörler veya kontrol algoritmaları kullanılabilir. Ayrıca, pnömatik sistemlerin dinamik özelliklerini daha iyi anlamak için daha fazla analiz yapılabilir.

Bu öneriler, pnömatik yapay kaslı robot kolların konum kontrolü alanında daha da geliştirilmesine katkıda bulunabilir ve daha ileri araştırmalar için yol gösterebilir.



KAYNAKLAR

- Ağyar Z** (2015) Yapay Sinir Ağlarının Kullanım Alanları ve Bir Uygulama. *Mühendis ve Makine*, 56(662): 22-23.
- Ballantyne G H, Moll F and Dehn T C** (2002) Telerobotic-assisted Laparoscopic Cholecystectomy: Initial Clinical Experience. *Surgical Endoscopy*, 16 (12): 1705-1708.
- Chou C P and Hannaford B** (1994) Static and Dynamic Characteristics of McKibben Pneumatic Artificial Muscles. In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 08-13 Mayıs 1994, CA, USA, 281-286.
- Chou C P and Hannaford B** (1996) Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12 (1): 90-102.
- Daerden F and Lefeber D** (2001) The Concept and Design of Pleated Pneumatic Artificial Muscles. *International Journal of Fluid Power*, 2 (3): 41-50.
- Daerden F and Lefeber D** (2002) Pneumatic Artificial Muscles: Actuators for Robotics and Automation. *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, 47 (1): 11-22.
- Ding Y, Zhang W, Deng H, Kang M, Zhang W and Wang J** (2016) A Novel Identification and Signal Filtering Method for Magnetoencephalography Data. *Neurocomputing*, 174: 680-687.
- Çakmakçı E** (2004) Planning-based Control of Nonholonomic Robots using Multiple Competing Models. *The International Journal of Robotics Research*, 23 (6):613–636.
- Festin K, Lundmark R, Wetterholm A and Norberg A** (1998) Assessment of Activities of Daily Living in the Elderly: A Study of a Population of 76-year-olds in Northern Sweden. *Scandinavian Journal of Occupational Therapy*, 5 (4): 161-166.
- Festo** (2018) *Fluidic Muscle DMSP/MASInfo 501*, https://www.festo.com/rep/en_corp/assets/pdf/info_501_en.pdf.
- Festo** (2007) “Fluidic Muscle DMSP.” MAS, Operation instructions, FESTO, Esslingen, https://www.festo.com/rep/en_corp/assets/pdf/info_501_en.pdf.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Gezici H and Birhan** (2014) Pnömatik Sistemlerde Konum Geri Beslemeli Yapılarak Basınç Ayarlaması ile Hassas Konum Kontrolü. *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)*, 4 (4): 39-48.
- Hall K L** (2011) Dynamic Control for a Pneumatic Muscle Actuator to Achieve Isokinetic Muscle Strengthening. *Wright State University, School of Graduate Studies, Ohio*, 272.
- Hannaford B, Marlow K, Trujillo A and Sanchez M** (2017) Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation. *Springer*.
- Hannaford B, Wood L and Inouye J M** (1989) A mechanically adjustable impedance control actuator for passively damped execution of programmed motions. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 5(3): 300-308.
- Hill E V** (1953) The mechanics of active muscle. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 141(902):104-117.
- Yarlott J M** (1972) "Fluid Actuator" *US Patent No. 3 645 173*.
- Kabalıcı E** (2014) Yapay Sinir Ağları. Ders Notları <https://ekblc.files.wordpress.com/2013/09/ysa.pdf>.
- Kelasidi E, Andrikopoulos G, Nikolakopoulos G and Manesis S** (2011) A survey on Pneumatic Muscle Actuators Modeling. *In 1994 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, June 2011*, 1263-1269.
- Lieberman D E** (1968) Muscular action in the foot of humans and apes. *American Journal of Physical Anthropology*, 29(1):91-104.
- Mizakova, Jana, Pitel J and Tothova M** (2014) "Pneumatic artificial muscle as actuator in mechatronic system." *Applied Mechanics and Materials. Vol. 460. Trans Tech Publications*.
- Öztürk K ve Şahin M** (2018) Yapay Sinir Ağları ve Yapay Zekâ'ya Genel Bir Bakış. *Takvim-i Vekayi*, 6(2): 25–36.
- Pratt G A, Williamson M and Torres A I** (2004) Series Elastic Actuators for Legged Robots. *Robotics Research*, 6: 1-14.
- Reynolds D, Repperger D, Phillips C and Bandry G** (2003) Modeling the dynamic Characteristics of Pneumatic Muscle. *Annals of Biomedical Engineering*, 31(3): 310-317.
- Rossiter S, Heather J and Ayling R** (2018) Security Engineering: A Guide to Building Dependable Distributed Systems. *John Wiley & Sons*.

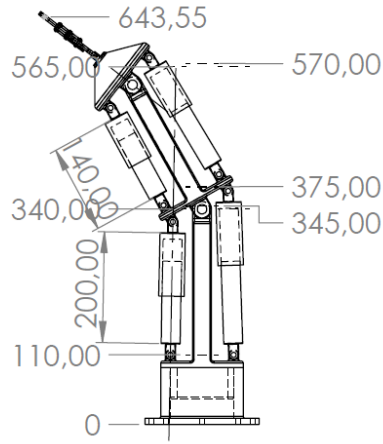
KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Sun N, Liang D, Wu Y, Chen Y, Qin Y and Fang Y** (2019) Adaptive Control for Pneumatic Artificial Muscle Systems with Parametric Uncertainties and Unidirectional Input Constraints. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(2): 969-979.
- Tadesse Y, Mooney L, Polygerinos P and Walsh C J** (1997) Development of a Biomimetic Quadraped Robot using Pneumatic Artificial Muscles. Proceedings.
- Ulaş H B** (2018) Pnömatik Kasların Tanımı, Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensibi, Statik Modellemesi, Çeşitleri, Özellikleri ve Uygulama Alanları. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(3): 230-240.
- Yılmaz M, Karakaş E, Çolak Z G, and Kuzucu A** Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolunun Konum Kontrolü.
- Wirekoh J, Valle L, Pol N, and Park Y L** (2019) Sensorized, Flat, Pneumatic Artificial Muscle Embedded with Biomimetic Microfluidic Sensors for Proprioceptive Feedback. *Soft robotics*, 6(6): 768-777.

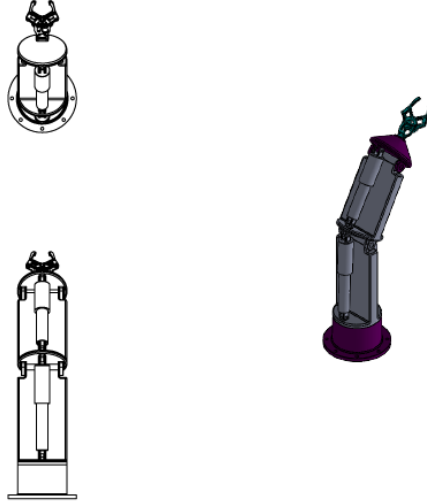


EK AÇIKLAMALAR

EK A: Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kol Teknik Resimler



Şekil A.1 Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolun Teknik Resmi



Şekil A.2 PYK'lı Robot Kolun Teknik Resim Görünüşleri

EK B: Yapay Sinir Ağları Verileri

Çizelge B.1 YSA Eğitimi ve Testi İçin Oluşturulan Veriler (139 veri)

Giriş Değerleri			Çıkış Değerleri		
θ_1	L_1	L_2	X	Y	Z
-150	-25	-17	121,2328	213,6381	648,1591
-150	-20	-17	108,202	187,0565	669,5919
-150	-15	-17	88,86275	153,5598	691,9253
-150	-10	-17	69,90285	120,7204	708,6039
-150	-5	-17	50,74945	87,54581	720,9053
-150	0	-17	30,68095	52,78597	729,3597
-150	5	-17	11,26209	19,15174	733,4908
-150	10	-17	-8,26503	-14,67	733,7577
-150	15	-17	-27,9075	-48,6915	730,1012
-150	20	-17	-47,6917	-82,9585	722,3245
-150	25	-17	-67,8113	-117,807	709,9348
-120	-25	-14	204,267	120,3436	657,3443
-120	-20	-14	179,3191	103,3249	677,8016
-120	-15	-14	146,0568	84,12035	698,5143
-120	-10	-14	113,0387	65,05811	714,0735
-120	0	-14	45,61183	26,12921	732,6552
-120	5	-14	10,51254	5,864656	735,9752
-120	10	-14	-24,8493	-14,5514	735,1102
-120	15	-14	-58,9457	-34,2368	730,2493
-120	20	-14	-93,1884	-54,0067	721,2355
-120	25	-14	-127,2	-73,6438	707,8831
-90	-25	-11	229,8017	1,800723	664,6236
-90	-20	-11	198,9229	-0,17783	684,4421
-90	-15	-11	159,123	-0,17742	704,5416
-90	-10	-11	119,8453	-0,17747	719,2727
-90	-5	-11	80,46494	-0,17749	729,5332
-90	0	-11	39,85637	-0,1774	735,7552
-90	5	-11	0,535635	-0,17732	737,7567
-90	10	-11	-39,0044	-0,17714	735,8401
-90	15	-11	-78,2472	-0,17712	729,9847
-90	20	-11	-118,635	-0,17724	719,6531
-90	25	-11	-157,831	-0,17722	705,1027
-60	-25	-8	192,076	-108,592	672,3495
-60	-15	-8	129,8837	-75,1933	709,6386
-60	-10	-8	95,54294	-55,3666	723,3571
-60	-5	-8	60,09283	-34,8994	732,8453
-60	0	-8	25,78193	-15,09	737,8242
-60	5	-8	-9,76726	5,434397	738,7877
-60	10	-8	-43,9031	25,14279	735,7233

-60	15	-8	-77,955	44,80275	728,6802
-60	20	-8	-111,955	64,43284	717,4533
-60	25	-8	-145,673	83,8995	701,7967
-30	-25	-5	107,8143	-183,171	678,541
-30	-20	-5	90,43842	-157	696,323
-30	-15	-5	69,93848	-121,492	714,356
-30	-10	-5	49,82963	-86,6623	727,041
-30	-5	-5	29,81572	-51,9971	735,2232
-30	0	-5	9,32482	-16,5057	739,2927
-30	5	-5	-10,4852	17,80636	739,208
-30	10	-5	-30,1885	51,93349	735,2033
-30	15	-5	-49,7893	85,8831	727,2198
-30	20	-5	-69,9887	120,8695	714,548
-30	25	-5	-89,255	154,2396	697,8236
0	-25	-2	1,645658	-203,93	684,2982
0	-20	-2	-0,17753	-170,9	701,8399
0	-15	-2	-0,17749	-130,344	718,3455
0	-10	-2	-0,17737	-88,7205	730,2097
0	-5	-2	-0,17735	-48,4947	737,2193
0	0	-2	-0,17733	-8,54525	740,0774
0	5	-2	-0,1773	31,09946	738,9583
0	10	-2	-0,17726	71,81869	733,6712
0	15	-2	-0,17722	110,8266	724,5158
0	20	-2	-0,17718	149,551	711,173
0	25	-2	-0,17731	187,8031	693,3623
30	-25	1	-96,2116	-169,672	689,4907
30	-20	1	-81,3438	-140,536	705,8149
30	-15	1	-60,3575	-104,187	721,6931
30	-10	1	-39,9106	-68,7723	732,2566
30	-5	1	-19,1122	-32,7486	738,4344
30	0	1	0,898426	1,910758	740,229
30	5	1	20,70278	36,21286	738,0549
30	10	1	40,98297	71,33907	731,6872
30	15	1	60,36267	104,9056	721,4955
30	20	1	79,54557	138,1313	707,1239
30	25	1	98,38849	170,7685	688,3468
60	-25	4	-159,999	-94,059	694,2839
60	-10	4	-59,5519	-34,1773	734,0092
60	-5	4	-24,4605	-13,9174	738,9558
60	0	4	11,45329	6,817238	739,725
60	5	4	45,65989	26,5662	736,4431
60	10	4	79,41553	46,0548	729,2684
60	15	4	112,7227	65,28446	718,1393
60	20	4	145,5944	84,26273	702,8496
60	25	4	178,3113	103,1523	682,8155

90	-25	7	-175,627	-1,45128	698,6254
90	-20	7	-141,359	0,177697	713,4506
90	-15	7	-100,082	0,177399	726,5635
90	-10	7	-58,5368	0,177618	734,995
90	-5	7	-17,0647	0,177331	738,9442
90	0	7	22,90566	0,177305	738,6514
90	5	7	62,25651	0,17728	734,4259
90	10	7	102,3367	0,177226	725,9726
90	15	7	140,423	0,177191	713,8035
90	20	7	177,899	0,177156	697,4907
90	25	7	214,5202	0,177312	676,7918
120	-25	10	-144,195	81,66727	702,2318
120	-20	10	-113,833	65,9267	715,9689
120	-15	10	-77,3587	44,86826	728,1487
120	-10	10	-40,7503	23,732	735,5164
120	-5	10	-5,32909	3,281538	738,2685
120	0	10	29,1711	-16,6374	736,8995
120	5	10	63,05183	-36,1986	731,6262
120	10	10	96,30836	-55,3995	722,5083
120	15	10	128,9403	-74,2398	709,4859
120	20	10	161,9808	-93,3158	691,7262
120	25	10	192,9282	-111,183	670,2637
150	-25	13	-79,1416	134,7812	704,9277
150	-20	13	-60,1577	104,551	718,1957
150	-15	13	-39,1525	68,16892	729,104
150	-10	13	-21,9779	38,42156	734,4903
150	-5	13	1,729744	-2,64137	736,9533
150	0	13	22,34832	-38,354	734,4761
150	5	13	41,76131	-71,9785	728,1455
150	10	13	60,76489	-104,894	718,0037
150	15	13	79,35807	-137,098	703,9893
150	20	13	97,54031	-168,591	685,897
150	25	13	115,4331	-199,582	663,1472
180	-25	16	-1,10203	145,6662	707,4511
180	-20	16	0,177465	110,096	719,5966
180	-15	16	0,177415	67,96951	729,3519
180	-10	16	0,177358	26,72422	734,3356
180	-5	16	0,177301	-13,6147	735,0055
180	0	16	0,177285	-54,1716	731,5101
180	5	16	0,17726	-92,6583	724,2254
180	10	16	0,177236	-130,229	713,169
180	15	16	0,177212	-166,881	698,2813
180	20	16	0,177132	-203,847	678,6164
180	25	16	0,177295	-238,059	655,5039

ÖZGEÇMİŞ

Kübra TÜRE, 2020 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2021 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ana bilim dalında tezli yüksek lisans eğitimine başladı ve hala eğitime devam etmektedir. 2022 yılında Ankara Hacı Bayram Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İşletme ana bilim dalında tezsiz yüksek lisans eğitimine başladı ve 2023 Haziran ayında mezun olmuştur. Araştırma ilgi alanları arasında, kontrol sistemleri, robot sistemleri ve yapay zekâ uygulamaları bulunmaktadır.

