

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elif Tuğba BAĞLAR**

**PNÖMATİK YAPAY KASLARIN REHABİLİTASYON  
AMAÇLI KULLANIMI İÇİN KONTROL SİSTEMİ TASARIMI**

**BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI**

**ADANA-2021**

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PNÖMATİK YAPAY KASLARIN REHABİLİTASYON AMAÇLI  
KULLANIMI İÇİN KONTROL SİSTEMİ TASARIMI

Elif Tuğba BAĞLAR

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Cabbar Veysel BAYSAL  
Yıl: 2021, Sayfa: 91  
Jüri : Dr. Öğr. Üyesi Cabbar Veysel BAYSAL  
: Prof. Dr. Mutlu AVCI  
: Dr. Öğr. Üyesi Necdet Sinan ÖZBEK

Pnömatik yapay kaslar (PYK), yüksek kuvvet/ağırlık oranı, bakım kolaylığı, düşük maliyet, esnek yapı gibi pek çok avantaja sahip aktüatörlerdir. Bunların yanı sıra insan kasına benzer çalışma yapısı sayesinde rehabilitasyon cihazları için özellikle uygun görülmektedir. Ancak pnömatik yapay kasların, sahip oldukları doğrusal olmayan özelliklerinden dolayı kontrol edilmesi oldukça zordur.

Bu tez çalışmasında, pnömatik yapay kasın kullanımını kısıtlayan nonlinear kontrol problemini çözmek için kontrol sistemi incelemesi ve tasarımı yapılmıştır. PID, bulanık PID ve kayan kip kontrolü yöntemleri esas alınarak pnömatik yapay kasın rehabilitasyon amaçlı performansına göre tasarımlar yapılmıştır. Bu çalışmanın literatürden temel farkı, yaygın olarak kullanılan oransal valfler ve basınç regülatörler yerine, daha ekonomik olan ve pnömatik yapay kasın uyumlu çalışmasına imkân veren aç/kapa valfler için kontrol sistemleri tasarlanmasıdır. Tasarımlar PYK kontrol test düzeneğinde yer alan ve aç/kapa valfleri ile çalıştırılan pnömatik yapay kaslar üzerinde deneysel olarak değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, modelden bağımsız Sugeno tipi kombine bulanık PID kontrolörü, pnömatik yapay kasların (PYK) rehabilitasyon amaçlı kullanımı için basit ve etkili bir çözüm olarak en başarılı performansı vermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Pnömatik Yapay Kas (PYK), PID Kontrol, Bulanık PID Kontrol, Kayan Kip Kontrolü

## ABSTRACT

### MSc THESIS

# DESIGN OF CONTROL SYSTEM FOR REHABILITATION USE OF PNEUMATIC ARTIFICIAL MUSCLES

Elif Tuğba BAĞLAR

ÇUKUROVA UNIVERSITY  
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES  
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Cabbar Veysel BAYSAL  
Year: 2021, Pages: 91  
Jury : Asst. Prof. Dr. Cabbar Veysel BAYSAL  
: Prof. Dr. Mutlu AVCI  
: Asst. Prof. Dr. Necdet Sinan ÖZBEK

Pneumatic artificial muscles (PAM) are actuators having many advantages such as high force to weight ratio, ease of maintenance, low cost, flexible structure. In addition, PAM is especially suitable for rehabilitation devices due to its operating character compliant to human muscle. On the other hand, pneumatic artificial muscles have major drawback that makes difficult to control due to their nonlinear properties.

In this thesis, control systems have been analyzed and designed to solve the nonlinear control problem that restricts the use of pneumatic artificial muscle. Based on PID, Fuzzy PID and Sliding Mode Control methods, designs have been made according to the rehabilitation-oriented performance of the pneumatic artificial muscle. The main difference of this study from the literature is that control systems are designed for on/off valves which are more economical and allow the pneumatic artificial muscle to work in compliance, instead of the common proportional valves and pressure regulators. The designs have been experimentally evaluated on the pneumatic artificial muscles, which are included in the PAM control experimental setup and operated with on/off valves. According to the experimental results, the model-free Sugeno type combined fuzzy PID controller has yielded most successful performance as a simple and effective solution for the rehabilitation use of pneumatic artificial muscles (PAM).

**Keywords:** Pneumatic Artificial Muscle (PAM), PID Control, Fuzzy PID Control, Sliding Mode Control (SMC)

## GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Hastalık veya travma sebebiyle oluşan ve bireyin yaşam kalitesini önemli ölçüde etkileyen insan hareket bozukluklarının iyileştirilmesine katkı sağlayan rehabilitasyon cihazlarında çeşitli aktüatörler kullanılmaktadır. Bunların başlıcaları hidrolik aktüatörler, elektrikli aktüatörler ve pnömatik aktüatörlerdir. Elektrikli aktüatörler yüksek güç sağlayabildikleri için avantajlı olsa da rehabilitasyon amaçlı kullanım için oldukça ağırdır ve mekanik empedansları yüksektir. Hidrolik aktüatörlerin, rehabilitasyon cihazlarında kullanılması için özel olarak tasarlanmış hidrolik aktüatörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu iki aktüatörün yanı sıra pnömatik aktüatörlerin rehabilitasyon cihazlarında kullanımı açısından yüksek kuvvet/ağırlık oranına sahip olma, bakım kolaylığı, temiz kullanım gibi pek çok avantajı vardır. Rehabilitasyon cihazlarının insan ile uyumlu olarak çalışma, az yer kaplama, maliyetinin düşük olması gibi beklentileri karşılayacak aktüatör araştırması yapıldığında, pnömatik aktüatörlerin özel bir çeşidi olan pnömatik yapay kasların rehabilitasyon cihazlarında kullanımı için oldukça elverişli olduğu görülmüştür.

Pnömatik aktüatörlerin özel bir tipi olan pnömatik yapay kaslar (PYK), yüksek kuvvet/ağırlık oranı; bakım kolaylığı; düşük maliyet; esnek, uyumlu, dayanıklı ve hafif yapıya sahip olma gibi pek çok avantaja sahip aktüatörlerdir. Ayrıca tasarım esnasında çok fazla mekanik parçaya ihtiyaç duymaması, üretiminin kolay olması, temiz kullanım sunması ve insan ile etkileşim halindeki cihazlarda ekstra güvenlik önlemine ihtiyaç duyulmadan kullanılması pnömatik yapay kasın kullanımını ilgi çekici hale getirmektedir. Bunların yanı sıra, basınçlandırıldığında doğrusal olmayan bir şekilde kasılması ve basınçlandırılmış kasa yük uygulandığında bir çekme kuvveti üretmesi ile insan kasına benzer çalışma yapısı sayesinde rehabilitasyon cihazları için özellikle uygun görülmektedir.

Bu avantajlara rağmen pnömatik yapay kasların, sahip oldukları yapı ve doğrusal olmayan özelliklerinden dolayı modellenmesi ve kontrol edilmesi oldukça zordur. Modelleme ile ilgili yapılmış çalışmalar temelde statik ve dinamik

modelleme olarak sınıflandırılmıştır. Statik modellemede pnömatik yapay kasın geometrisi kullanılırken dinamik modellemede kasın dinamik yapısına göre modelleme yapılmıştır ve en yaygın kullanılan dinamik modelleme çeşidi üç elemanlı fenomenolojik modeldir. Bu çalışmanın amacı, avantajları ve uygulama potansiyelleri bilinen pnömatik yapay kasların kontrol edilme zorluğundan yola çıkarak pnömatik yapay kasın rehabilitasyon cihazlarında kullanımı için basit, etkin ve uyumlu bir kontrol yöntemini bulmaktır.

Bu tez çalışmasında, pnömatik yapay kasın kullanımını kısıtlayan nonlineer özellikleri kontrol etmek için bir kontrol sistemi incelemesi ve tasarımı yapılmıştır. Bu amaçla kontrol sistemi incelemesi için önceki çalışmalara bakıldığında, çalışmaların model tabanlı ve modelden bağımsız kontrol teknikleri olarak ayrıldığı ancak hangisinin daha iyi sonuç verdiğine dair kıyaslamalı ve yeterli inceleme bulunmadığı görülmüştür. Literatürdeki bu eksik noktaya katkıda bulunmak amacıyla modelden bağımsız PID kontrol ve bulanık PID kontrol ve model tabanlı kayan kip kontrolü yöntemleri esas alınarak pnömatik yapay kasın rehabilitasyon amaçlı performansına göre tasarımlar yapılmıştır. Bu çalışmanın literatürden temel farkı, yaygın olarak kullanılan oransal valfler ve basınç regülatörler yerine, daha ekonomik olan ve pnömatik yapay kasın uyumlu çalışmasına imkân veren aç/kapa valfler için kontrol sistemleri tasarlanmasıdır. Tasarımlar PYK kontrol test düzeneği düzeneğinde yer alan ve aç/kapa valfleri ile çalıştırılan pnömatik yapay kaslar üzerinde deneysel olarak değerlendirilmiştir. Hangi kontrolörün daha basit, uyumlu ve etkin olduğu değerlendirmesi için pnömatik yapay kasın basınç ve pozisyon kontrolü için deneyler yapılmıştır. Hem basınç hem de pozisyon kontrol deneyleri için adım tepkisi ve insan kas iskelet sisteminde mafsallı eklemlerin dönme hızına uyum sağlayacak farklı frekanslarda sinüzoidal referans girişi takibi deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, kayan kip kontrolör ve PID kontrolör çok iyi bir performans gösteremezken modelden bağımsız Sugeno tipi kombine bulanık PID kontrolörü, pnömatik yapay kasların (PYK) rehabilitasyon amaçlı kullanımı için basit ve etkili bir çözüm olarak en başarılı performansı vermiştir.

## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamın planlanması, yürütölmesi ve oluşturulmasında, her zaman yol gösterici olan, çalışma sürem boyunca bana zamanımı ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle elinden gelenden fazlasını sunan değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Cabbar Veysel BAYSAL'a en içten dileklerle teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalıőmamın sunumunda yer alan ve katkılarını esirgemeyen jüri üyeleri Sayın Prof. Dr. Mutlu AVCI'ya ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Necdet Sinan ÖZBEK'e de ayrıca teşekkür ederim.

Hayatımın her evresinde benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, her koşulda arkamda durarak bana destek veren bu hayattaki en büyük şansım olan annem Rabia DEVECİ ve babam İsmail DEVECİ'ye ve tüm desteklerinden dolayı eşim Ahmet Sefa BAĞLAR'a sonsuz teşekkürler.

## İÇİNDEKİLER

## SAYFA

ÖZ .....	I
ABSTRACT.....	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET .....	III
ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR .....	V
İÇİNDEKİLER .....	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XIV
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	5
2.1. Giriş.....	5
2.2. Rehabilitasyonda Kullanılan Aktüatörler .....	6
2.2.1. Pnömatik Aktüatörler .....	7
2.3. Pnömatik Yapay Kaslar.....	9
2.3.1. Pnömatik Yapay Kasın Genel Yapısı.....	9
2.3.2. Pnömatik Yapay Kas Tipleri .....	13
2.3.3. Pnömatik Yapay Kasların Uygulama Alanları .....	16
2.3.4. Pnömatik Yapay Kasların Çalışma Prensibi.....	18
2.3.5. Pnömatik Yapay Kaslar İçin Valfler .....	21
2.4. Pnömatik Yapay Kasların Modellenmesi .....	23
2.4.1. Pnömatik Yapay Kasların Geometrik/Statik Modeli.....	23
2.4.2. Pnömatik Yapay Kasların Fenomenolojik/Dinamik Modeli .....	25
2.5. Pnömatik Yapay Kasların Kontrolü .....	26
2.6. Çalışmanın Amacı .....	29
3. MATERYAL VE METOT .....	31
3.1. Deney Düzeneği .....	31
3.1.1. Deney Düzeneğinin Parçaları.....	33

3.1.2. Deney Düzeneginin Kalibrasyon Kontrolü .....	36
3.2. Kayan Kip Kontrolör .....	38
3.3. PID Kontrolör .....	47
3.4. Bulanık PID Kontrolör .....	52
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	63
4.1. Basınç Kontrolü .....	64
4.2. Pozisyon Kontrolü .....	70
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	79
KAYNAKLAR .....	81
ÖZGEÇMİŞ .....	91



## ÇİZELGELER DİZİNİ

## SAYFA

Çizelge 2.1. Pnömatik Yapay Kas Çeşitleri .....	14
Çizelge 3.1. Güncellenen Sensör Karakteristikleri .....	37
Çizelge 3.2. Fenomenolojik Modelin Parametreleri .....	44
Çizelge 3.3. PID Kontrol İçin Parametrelerin Etkisi.....	48
Çizelge 3.4. Açık Çevrim Ziegler-Nichols PID Ayar Yöntemi .....	49
Çizelge 3.5. Kapalı Çevrim Ziegler-Nichols PID Ayar Yöntemi .....	50
Çizelge 3.6. Bulanık PI ve PD bloklar için bulanık kurallar.....	59
Çizelge 4.1. Basınç kontrolü için uygulanan Kayan Kip, PID ve Bulanık PID Kontrolü Sonuçları .....	65
Çizelge 4.2. Pozisyon kontrolü için uygulanan Kayan Kip, PID ve Bulanık PID Kontrolü Sonuçları .....	73



## ŞEKİLLER DİZİNİ

## SAYFA

Şekil 2.1.	McKibben Kası.....	11
Şekil 2.2.	Festo Pnömatik Yapay Kas .....	12
Şekil 2.3.	Pnömatik Yapay Kas Çeşitleri.....	15
Şekil 2.4.	Pnömatik yapay kasın çalışmasının gösterimi.....	19
Şekil 2.5.	Sabit bir yüke karşı PYK.....	20
Şekil 2.6.	PYK'nin yay gibi davranması .....	20
Şekil 2.7.	PYK'nin Çalışma Prensibi .....	21
Şekil 2.8.	Pnömatik sistemlerde kullanılan valfler .....	22
Şekil 2.9.	McKibben Aktüatörünün Geometrik Modeli .....	24
Şekil 2.10.	Pnömatik Yapay Kasın Fenomenolojik Modeli .....	26
Şekil 3.1.	Pnömatik Yapay Kas Kontrol Test Düzeneği Blok Diyagramı.....	32
Şekil 3.2.	Pnömatik yapay kas kontrol test düzeneği için kontrol sistem blok diyagramı.....	33
Şekil 3.3.	Pnömatik Yapay Kas Kontrol Test Düzeneğine Genel Bakış .....	34
Şekil 3.4.	Pnömatik Yapay Kas Kontrol Test Düzeneğinin Bileşenleri .....	34
Şekil 3.5.	PYK'nin çalışma aralığı .....	36
Şekil 3.6.	Kayan Kip Kontrolün (SMC) Genel Yapısı .....	41
Şekil 3.7.	SMC ile Pozisyon Kontrolü.....	46
Şekil 3.8.	PID Kontrolün Genel Yapısı .....	47
Şekil 3.9.	Sistemin açık çevrim basamak cevabı .....	49
Şekil 3.10.	PID Kaskat Kontrollör ile Pozisyon Kontrolü Blok Diyagramı.....	51
Şekil 3.11.	PID Kaskat Kontrollör ile Pozisyon Kontrolü.....	52
Şekil 3.12.	Bulanık bir sistemin temel konfigürasyonu.....	53
Şekil 3.13.	Sugeno Tip Bulanık Çıkarımının Gösterimi.....	57
Şekil 3.14.	Bulanık PID Kontrollör .....	58
Şekil 3.15.	Girdiler (hata, hatanın türevi, hatanın integrali) için üyelik fonksiyonları.....	59

Şekil 3.16.	Çıktı için üyelik fonksiyonu .....	60
Şekil 3.17.	Bulanık PID için Kontrol Yüzeyi .....	60
Şekil 3.18.	Bulanık PID Kontrolör ile Pozisyon Kontrolü .....	61
Şekil 4.1.	Kayan Kip Kontrolör (SMC) Kullanarak Basınç Kontrolü için Adım Tepkisi.....	64
Şekil 4.2.	PID Kontrolör Kullanarak Basınç Kontrolü için Adım Tepkisi.....	64
Şekil 4.3.	Bulanık PID Kontrolör Kullanarak Basınç Kontrolü için Adım Tepkisi.....	65
Şekil 4.4.	Kayan Kip Kontrol (SMC) ile 0.1 Hz Sinuzodial Basınç Sinyali Takibi.....	66
Şekil 4.5.	PID Kontrol ile 0.1 Hz Sinüzoidal Basınç Sinyali Takibi.....	66
Şekil 4.6.	Bulanık PID Kontrol ile 0.1 Hz Sinuzodial Basınç Sinyali Takibi.....	67
Şekil 4.7.	Kayan Kip Kontrol (SMC) ile 0.5 Hz Sinuzodial Basınç Sinyali Takibi.....	67
Şekil 4.8.	PID Kontrol ile 0.5 Hz Sinuzodia Basınç Sinyali Takibi.....	68
Şekil 4.9.	Bulanık PID Kontrol ile 0.5 Hz Sinuzodial Basınç Sinyali Takibi.....	68
Şekil 4.10.	Kayan Kip Kontrol (SMC) ile 1 Hz Sinuzodial Basınç Sinyali Takibi.....	69
Şekil 4.11.	PID Kontrol ile 1 Hz Sinuzodial Basınç Sinyali Takibi.....	69
Şekil 4.12.	Bulanık PID Kontrol ile 1 Hz Sinuzodial Basınç Sinyali Takibi .....	70
Şekil 4.13.	Kayan Kip Kontrolör (SMC) Kullanarak Pozisyon Kontrolü için Adım Tepkisi.....	71
Şekil 4.14.	Geleneksel PID Kontrolör Kullanarak Pozisyon Kontrolü için Adım Tepkisi.....	71
Şekil 4.15.	Kaskat PID Kontrolör Kullanarak Pozisyon Kontrolü için Adım Tepkisi.....	72

Şekil 4.16. Bulanık PID Kontrolör Kullanarak Pozisyon Kontrolü için Adım Tepkisi.....	72
Şekil 4.17. Kayan Kip Kontrol (SMC) ile 0.1 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi.....	73
Şekil 4.18. PID Kontrol ile 0.1 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi.....	74
Şekil 4.19. Bulanık PID Kontrol ile 0.1 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi.....	74
Şekil 4.20. Kayan Kip Kontrol (SMC) ile 0.5 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi.....	75
Şekil 4.21. PID Kontrol ile 0.5 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi.....	75
Şekil 4.22. BulanıkPID Kontrol ile 0.5 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi.....	76
Şekil 4.23. Kayan Kip Kontrol (SMC) ile1 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi.....	77
Şekil 4.24. PID Kontrol ile 1 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi.....	77
Şekil 4.25. Bulanık PID Kontrol ile 1 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi.....	78



## SİMGELER VE KISALTMALAR

PYK	: Pnömatik Yapay Kas
PAM	: Pneumatic Artificial Muscle
PKA	: Pnömatik Kas Aktüatörü
PMA	: Pnumatic Muscle Actuator
ADC	: Analog-Diital Dönüştürücü
PID	: Proportional-Integral-Derivative
SMC	: Sliding Mode Control
DOF	: Degree of Freedom
MIMO	: Multi Input Multi Output
F(P)	: Fenomenolojik Modelin Kuvvet Katsayısı
K(P)	: Fenomenolojik Modelin Yay Katsayısı
B(P)	: Fenomenolojik Modelin Sönümlenme Katsayısı
MPC	: Model Predictive Control
ENK	: Encoder
PS	: Pressure Sensor
LD	: Loadcell
VSC	: Değişken Yapı Kontrolü
$u_{sw}$	: Anahtarlama Kontrol Terimi
$u_{eq}$	: Eşdeğer Kontrol Terimi
MF	: Üyelik Fonksiyonu





## 1. GİRİŞ

Robotlar endüstriyel uygulamalarının yanı sıra tedavi amaçlı rehabilitasyon cihazlarında da çeşitli aktüatörlerle kullanılmaktadır. Aktüatörlerin birbirlerine göre değerlendirilmesinde, fiyat uygunluğu, bakım ve kontrolünün kolay olması gibi çeşitli üstünlükleri veya kapladığı alanın fazla olması, modellenmesinin ve/veya kontrolünün zor olması gibi kullanımda dezavantaj oluşturabilecek çeşitli özellikleri vardır. Kullanım yerlerine göre aktüatörlerin bu avantajları ve dezavantajları büyük önem arz eder. Yapılan uygulamalarda birçok aktüatör çeşidi kullanılmasına rağmen, robotik ve rehabilitasyon alanlarında en sık tercih edilen aktüatörlerin başlıcaları; hidrolik aktüatörler, elektrikli aktüatörler ve pnömatik aktüatörler olmuştur (Maciejasz ve ark., 2014).

Pnömatik aktüatörlerin özel bir çeşidi olan pnömatik yapay kaslar, bazı endüstriyel uygulamalar ve robotik alanında kullanılmasının yanı sıra rehabilitasyon alanında kullanımı için, insan iskelet kasına benzer özelliklere sahip olması, esnek ve uyumlu yapısı, az yer kaplaması, maliyetinin düşük olması, bakım ve temizliğinin kolay olması gibi sebeplerle diğer aktüatörlere kıyasla daha çok tercih edilen bir aktüatör çeşididir. Bu avantajlarına rağmen uygulamalarda pnömatik yapay kasın çok tercih edilmemesinin iki temel sebebi bulunmaktadır. Bu sebepler, kasın esnek olması gibi yapısal özellikleri ve hava akışının getirdiği doğrusal olmayan yapıları sonucu meydana gelen modelleme ve kontrol edilme zorluğudur. Rehabilitasyon alanında kullanımını kısıtlayan zorluğun temelinde yer alan neden ise, pnömatik yapay kasın nonlineer yapısının modellenmesi ve kontrol edilmesinin oldukça zor olmasıdır.

Literatürde bu iki zorluğa karşı olarak yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların içerikleri incelendiğinde modelleme zorluğunu ortadan kaldırmak için yapılan çalışmalarda oluşturulan modelin, araştırmacının kullandığı deney sistemi için geçerli olduğu, genel uygulanabilir bir model olmadığı görülmüştür. Yani oluşturulan model için parametreler sadece

araştırmacının kullandığı deney sistemi için geçerli olmaktadır. Bunun sebebi pnömatik yapay kasın hava ile çalışması ve hava akışının her çalışmada aynı olmamasıdır. Hava akışı için bazı araştırmacılar basınç regülatörlerini kullanırken, bazı araştırmacılar oransal yön valflerini kullanmaktadırlar. Pnömatik sistemlerin kontrolünde hava akışı için kullanılan bu yapılarda havanın geçiş hızı, debisi birbirinden oldukça farklıdır. Bu durum pnömatik yapay kastaki çıkan hava miktarını ve dolayısıyla modellemeyi doğrudan etkilediği için pnömatik yapay kasın her durumda geçerli olacak modelini elde etmek oldukça zordur. Hava akışı için kullanılan yapıların yanı sıra pnömatik yapay kasın yapısal olarak sahip olduğu doğrusal olmayan özellikleri de kası modellemeyi zorlaştırmaktadır.

Pnömatik yapay kasların modellemesini zorlaştıran bu yapılar ve kasın sahip olduğu doğrusal olmayan diğer özellikler aynı zamanda kasın kontrolünü de doğrudan etkilemektedir. Bu zorluğu çözmeye yönelik literatürde pnömatik yapay kasın kontrolü için de birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bir kısmı kasın kontrolü için modelleme tabanlı kontrolörleri kullanırken bir kısmı da modelden bağımsız kontrol yöntemini kullanmıştır. Hangisinin rehabilitasyon amaçlı kullanımda daha etkin, daha iyi olduğunu belirlemek amacıyla literatürde kıyaslama amaçlı yeterli çalışmanın bulunmadığı görülmüş ve bu tez çalışmasında literatürdeki bu eksiğe yönelik bir çalışma yapılması hedeflenmiştir.

Bu çalışmayı literatürden ayıran bir başka temel yaklaşım da, pnömatik yapay kasın kontrolünde hava akışı için, daha ekonomik ve uyumlu yapıda olan aç/kapa valflerinin kullanılmış olmasıdır. Çalışmamızda hem model tabanlı kontrol teknikleri hem de modelden bağımsız kontrol teknikleri PYK Kontrol Test Düzeneği'nde yer alan ve aç/kapa valfleri ile çalıştırılan pnömatik yapay kaslarda denenmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır (Baysal, 2013). Modelden bağımsız kontrolör olarak geleneksel PID ve bulanık PID kontrolörleri tercih edilirken model tabanlı kontrolör olarak, doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde yaygın olarak kullanılan kayan kip kontrolörü (SMC) tercih edilmiştir. Ayrıca model tabanlı kontrolörde modelleme için 3 elemanlı fenomenolojik model kullanılmıştır.

Sonuçlara göre, modelden bağımsız Sugeno tipi kombine bulanık PID kontrolörü, pnömatik yapay kasların (PYK) rehabilitasyon amaçlı kullanımı için basit ve etkili bir çözüm olarak en başarılı performansı vermiştir.

Tezin ikinci kısmında, rehabilitasyon uygulamalarda aktüatörlerin kullanımının, pnömatik yapay kas aktüatörlerinin tanımının, avantajlarının-dezavantajlarının, modellenmesi ve kontrolü konusunda yapılmış çalışmaların yer aldığı literatür çalışması kısmı yer almaktadır.

Üçüncü bölümde, PYK kontrol deney düzeneğinin ve kullanılan matematik model ile kontrolörlerin açıklaması yapılmış ve deneylerin nasıl yapıldığı, deney şartlarının neler olduğu detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, sistemin hem basınç hem de pozisyon kontrolü için deney bulguları sunulmuş ve sonuçlar tartışılmıştır.

Son bölümde ise tüm tez yapısının değerlendirmesine ve gelecekte yapılabilecek, yapılması planlanan çalışmalara yer verilmiştir.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

### 2.1. Giriş

Hastalık veya travma nedeniyle bireyin yaşam kalitesini önemli ölçüde azaltan hareket bozukluklarının hastanın isteği doğrultusunda düzenli egzersizlerle iyileştirilebileceği bilinen bir yöntemdir (Maciejasz ve ark., 2014). İyileştirme amacıyla yapılan bu egzersizler klinik ortamda bir fizyoterapist tarafından yapılabilir de hastayı taşıma, hastanın gelişimine uygun egzersiz yöntemlerini belirleme, hastanın gelişimi düzenli olarak takip edebilme gibi fizyoterapistin yetersiz kaldığı durumlar için rehabilitasyon cihazlarının tercih edildiği görülmektedir (Chen ve ark., 2016). Bu anlamda kullanılan rehabilitasyon cihazlarının hastayla uyumlu olması, kullanımının güvenli ve kullanım ömrünün uzun olması beklenir. Bu cihazların kapladığı alanın küçük ve ağırlığının az olması, cihazı portatif halde taşımaya elverişli hale getirerek ev ortamında da egzersizlerin yapılması ve hastanın gelişiminin takip edilmesi sağlanabilmektedir (Noritsugu ve Tanaka, 1997).

Tedavi amaçlı kullanılan rehabilitasyon cihazları temel olarak rehabilitasyon robotları, robotik dış iskeletler ve ortezler olarak sınıflandırılabilir (Low, 2011). Rehabilitasyon cihazları sürülürken çeşitli aktüatörler kullanılır. Bunlar elektrikli aktüatörler, pnömatik aktüatörler, hidrolik aktüatörler, motorlar veya pnömatik yapay kaslar (PYK, McKibben tipi aktüatör) olarak isimlendirilirler (Maciejasz ve ark., 2014). Bunlardan elektrikli aktüatörler, elektrik enerjisine ek olarak yüksek güç sağlama avantajlarından dolayı en çok tercih edilendir. Ancak Caldwell ve Tsagaris (2007) elektrikli aktüatörlerin, pnömatik aktüatörlere kıyasla çok ağır olduğunu ve empedanslarının, rehabilitasyon cihazlarında kullanmak için çok yüksek olduğunu iddia etmiştir. Hidrolik basınçla çalışan aktüatörler yüksek güçler üretebilir ancak ağır oldukları için rehabilitasyon cihazlarında kullanılabilmesi için özel olarak tasarlanmış hidrolik aktüatörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Pnömatik aktüatörler, basınçlı hava ile çalışırlar. Mekanik

empedansları düşüktür ve elektrikli aktüatörlere göre daha hafiftir. Pnömatik aktüatörlerin rehabilitasyon amaçlı cihazlarda, pnömatik yapay kas (PYK), pnömatik kas aktüatörü veya McKibben tipi aktüatör olarak adlandırılan özel bir tipi kullanılır (Maciejasz ve ark., 2014). Rehabilitasyon amaçlı cihazlarda pnömatik yapay kaslar oldukça ilgi çekicidir. Bunun temel sebebi, kasın oldukça esnek yapıya sahip olmasıdır.

Rehabilitasyon cihazları için pnömatik yapay kas aktüatörleri oldukça elverişli olmalarına rağmen bu aktüatörün doğrusal olmayan yapısı sebebiyle kontrol edilmesi zordur. Pnömatik yapay kaslarla çalıştırılan rehabilitasyon cihazlarındaki kontrol edilme zorluğunu aşmak için çeşitli kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrol sistemlerinin başlıcaları PID kontrol (Caldwell ve ark., 1993; Schröder ve ark., 2003; Ahn ve Thanh, 2005; Andrikopoulos ve ark., 2014; Tang ve ark., 2016), kayan kip kontrolü (SMC) (Wang ve ark., 2001; Jouppila ve ark., 2014a), bulanık kontroldür (Chillari ve ark., 2001; Chang ve ark., 2011a) ve bazen bunların birleştirilmesiyle hibrit kontrol sistemleri de (Hošovský, 2009; Meghanathan, 2005 sf:239-246; Tóthová ve Pitel, 2015; Yao ve ark., 2016; Qian ve ark., 2015; Chiang ve Chen, 2017; Son ve ark., 2017) tasarlanmıştır.

## 2.2. Rehabilitasyonda Kullanılan Aktüatörler

Aktüatör, bir mekanizmayı veya sistemi kontrol eden ve/veya hareket ettiren bir tür motordur. Bir enerji kaynağı tarafından çalıştırılır. Bu kaynak genellikle elektrik akımı, hidrolik akışkan basıncı veya pnömatik basınçtır ve bazı tür hareketlerle enerjiye dönüşür.

Rehabilitasyon cihazlarında kullanılan en yaygın 3 aktüatör tipi bulunmaktadır. Bunlar; hidrolik aktüatörler, elektrikli aktüatörler ve pnömatik aktüatörlerdir.

Hidrolik aktüatörler, hidrolik basınçla (genellikle yağ) çalıştırılan aktüatörlerdir. Bu aktüatörler diğer aktüatörlere göre yüksek kaldırma kapasitesine, daha yüksek bant genişliğine, çok büyük kuvvet/tork kapasitesine, çok iyi

güç/ağırlık oranına sahiptir. Hidrolik basınçla çalışan aktüatörler, yüksek güç üretebilmelerine rağmen yüksek ağırlığa sahip olmaları ve kullanım için özel tasarımlara ihtiyaç duymaları nedeniyle rehabilitasyon cihazlarında çok tercih edilmezler.

Elektrikli aktüatörler, elektrik akımı ile çalışan aktüatörlerdir. Elektrikli aktüatörler, diğer aktüatör çeşitlerine kıyasla yüksek güç kapasitesi ve elektrik enerjisini kullanarak kolay uygulama gibi avantajlara sahip oldukları için en çok tercih edilen ve kullanımı en yaygın olan aktüatör tipidir. Genellikle sessiz olan ve temiz bir çalışma yöntemi sağlayan mekanik yapıya sahip olması ve kurulumu, kontrolü ve entegrasyonunun kolay olması tercih edilmesini sağlayan diğer avantajlarıdır. Bu avantajlarına rağmen, bu aktüatörler düşük güç/ağırlık ve hacim oranına ve büyük kütleye sahiptir. Elektrikli aktüatörler, elektrik enerjisine ek olarak yüksek güç sağlayabilme avantajlarından ötürü birçok uygulamada en çok tercih edilen aktüatör olmasına rağmen Caldwell ve Tsagaris (2007) elektrikli aktüatörlerin bir diğer aktüatör çeşidi olan pnömatik aktüatörlere kıyasla çok ağır olduğunu ve empedanslarının özellikle rehabilitasyon alanında kullanım için çok yüksek olduğunu düşünmektedir.

### 2.2.1. Pnömatik Aktüatörler

Pnömatik aktüatörler, çeşitli görevleri gerçekleştirmek için basınçlı havayı mekanik enerjiye dönüştüren cihazlardır. Pnömatik aktüatörler genellikle elektrikli kompresörler tarafından çalıştırılır. Pnömatik sistemler hidrolik sistemlere benzer ancak pnömatik sistemler hareketi ve çalışmayı kontrol etmek için hava veya basınçlı gazı kullanırken hidrolik sistemler sıvıyı kullanır. Hidrolik sistemlere kıyasla, pnömatik sistemlerin yönetimi daha kolaydır.

Pnömatik sistemler, onları çeşitli ortamlarda kullanım için çekici kılan birçok özelliğe sahiptir. Hidrolik sistemlere göre sıcaklığa daha az duyarlıdır. Buna ek olarak, yüksek kuvvet-ağırlık oranları, temizlik, kompaktlık, bakım kolaylığı ve pnömatik aktüatörlerin güvenliği, birçok endüstriyel tasarım için arzu

edilen özellikleri sunar (Jouppila ve ark., 2014). Pnömatik aktüatörler ayrıca, düşük uygulama maliyeti sayesinde herhangi bir uygulamada diğer aktüatörlere kıyasla daha iyi bir alternatiftir. Ayrıca pnömatik aktüatörlerin kullanıldığı sistemler, pnömatik aktüatörlerin temiz ve daha güvenli oluşuyla çalışması daha kolay ortamlardır (Aziz ve Bone, 1998; Ahn ve Thanh, 2005; Lu ve ark., 2010; Noor ve ark., 2011; Carneiro ve De Almeida, 2012).

Bahsedilen birçok avantajına rağmen pnömatik aktüatörler ile ilgili yapılan araştırmalardan anlaşıldığı üzere, havanın yüksek sıkıştırılabilir yapısı, mevcut sürtünme kuvveti, valfin sahip olduğu ölü bölge ve kütle akış hızının parametreleri, nonlineerliklere sebep olarak pnömatik aktüatörlerin kullanımını zorlaştırmaktadır (Hamiti ve ark., 1996; Taheri ve ark., 2012; Hsu ve Lin, 2013; Bone ve Chen, 2012). Pnömatik aktüatörler, yüksek sürtünme kuvvetleri, havanın sıkıştırılabilirliği ve yönetilmesi zor olan ve daha iyi bir performans için uygun kontrolör gerektiren makara hareketinin ölü bölgesi sebebiyle yüksek doğrusal olmayan davranışlar sergiler (Jamian ve ark., 2020). Pnömatik aktüatörlerin sahip olduğu bu dezavantajlar kullanım alanlarını sınırlasa da özellikle insanla etkileşim halindeki robotik yapılarda ve rehabilitasyon cihazlarında pnömatik yapıların avantajları, kullanımını aktif ve çekici hale getirmektedir.

En yaygın pnömatik aktüatörler silindirlerdir. Bununla birlikte, silindirden daha iyi bir güç/ağırlık oranına sahip olan ve pnömatik yapay kas (PYK) olarak bilinen alternatif bir tür pnömatik aktüatör vardır (Daerden, 1999). Pnömatik aktüatörlerin özel bir tipi olan ve pnömatik yapay kas (PYK) veya McKibben Kası olarak da isimlendirilen pnömatik aktüatörler rehabilitasyon amaçlı cihazlarda kullanılır. Mekanik empedansları elektrikli aktüatörlere göre düşük, daha hafif ve tersine esneklikleri olduğundan dolayı rehabilitasyon amaçlı cihazlarda kullanım için uygundur (Maciejasz ve ark., 2014). PYK aktif edildiğinde kasılma ve kuvvet üretmesi özellikleri sebebiyle insan kasına benzer bir davranış sergiler ve bu da PYK'leri rehabilitasyon amaçlı kullanım için daha elverişli hale getirir (Repperger ve ark., 2005). Robotik Desekleyici Kola Yönelik Tekrarlanabilen



Terapi, RUPERT, Sugar ve arkadaşlarının geliştirdiği, giyilebilen, kolun günlük hayattaki birçok hareketini gerçekleştirmesi için gerekli olan kuvveti sağlayan, pnömatik kaslarla hareketin gerçekleştirildiği bir terapi cihazıdır. RUPERT, hastaya ve terapisteye evde veya klinikte daha sistematik bir terapi sağlamada yardımcı olmak için düşük maliyetli, güvenli ve kullanımı kolay bir robotik cihaz sağlamak üzere geliştirilmiştir. Bu cihaz, omuz, dirsek ve bilekte uyumlu ve güvenli pnömatik kaslar tarafından çalıştırılır ve dört serbestlik derecesine sahiptir. Kolu uzatmak ve kolu 3 boyutlu alanda hareket ettirmek amacı ile cihazı harekete geçirmek üzere programlanmıştır. Cihaz uygulaması esnasında hastaya belli görevler verilir, örneğin hastadan gösterilen bardağa uzanması istenir, hasta göreve başlayamaz veya bitiremezse pnömatik kaslar hastaya gereken yardımı sağlamaktadır (Sugar ve ark., 2007).

### 2.3. Pnömatik Yapay Kaslar

Bu bölümde pnömatik yapay kasın genel yapısı tanıtılmış, çeşitleri, uygulama alanları ve bizim tercih ettiğimiz pnömatik yapay kas çeşidinin çalışma prensibi açıklanmıştır.

#### 2.3.1. Pnömatik Yapay Kasın Genel Yapısı

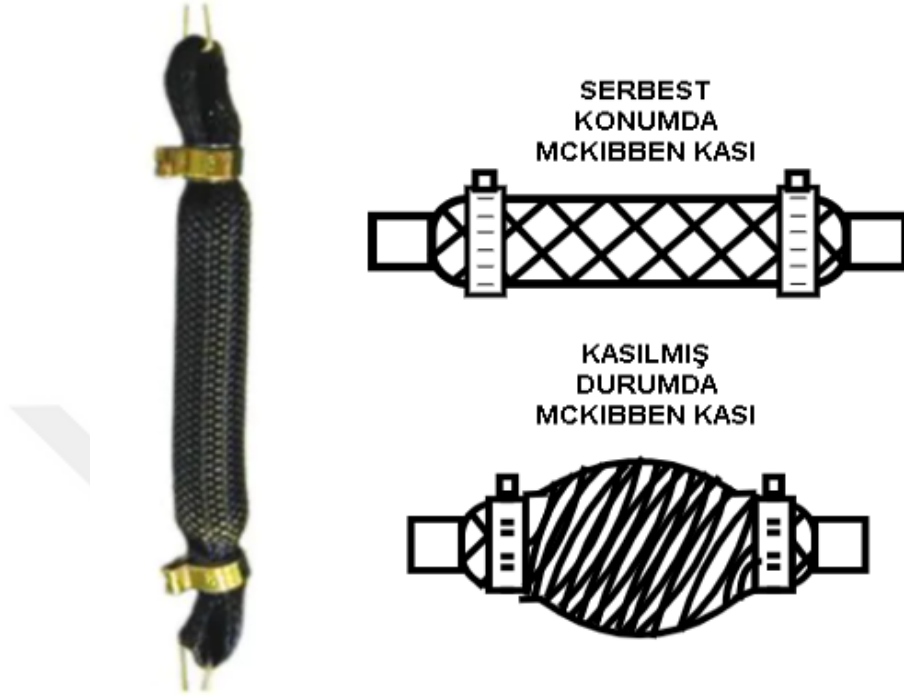
Pnömatik yapay kaslar (PYK), basınç uygulandığında doğrusal olmayan bir şekilde kasılıp kuvvet üreterek iskelet kasının davranışını taklit eden pnömatik aktüatörün özel bir tipidir (Bağlar ve Baysal, 2020; Hall, 2011; Repperger ve ark., 2005). Doğal dokudan ilham alan bu yeni aktüatör tipi insan kasına benzer uygulamalarda önemli roller oynayan bir tür hafif ve uyumlu aktüatör olarak kabul edilmektedir (Che ve ark., 2019; Qian ve ark., 2015).

Literatürde yapılan çalışmalarda pnömatik yapay kas (PYK) için farklı isimlendirmeler yapıldığı görülmektedir. Bunlardan bazıları şu şekildedir: McKibben pnömatik kas aktüatörü (PKA) (Caldwel ve ark., 1993; Chou ve

Hannaford, 1994; Schulte ve ark., 1961), Biyomimetrik (biyobenzeşimli) Aktüatör (Tsagarakis, 2014), Festo pnömatik yapay kas (PYK) (Festo, 2007).

Önceki çalışmalar incelendiğinde, yapılan çalışmalarda pnömatik yapay kas tipi olarak eski çalışmaların çoğunda McKibben tipi pnömatik yapay kasın kullanıldığı görülürken, yakın zamanda yapılmış çalışmalarda çoğunlukla Festo Company tarafından üretilen ve Festo pnömatik yapay kasın tercih edildiği gözlemlenmiştir. Bu iki tip kasın yapısal olarak bazı farklılıkları vardır.

McKibben kasları, her iki ucundan bağlantı parçalarına veya bazı tendon benzeri yapılara tutturulmuş, destek sağlama ve harekete geçirmeyi artırma özelliklerine sahip örgülü bir fiber ağ ile (esnek ancak genişletilemeyen iplerle) çevrili kauçuk bir iç membrandan oluşur. Kauçuk iç membran, havanın içeri girip çıkmasını sağlayan bir hava valfi dışında tamamen sızdırmazdır. Pnömatik bir keseceğin hava ile doldurulmasıyla çalışırlar ve bu havanın keseciğe giriş çıkışıyla uzayıp, kısalma özelliği gösterirler. İç membran basınçlandırıldığında, yüksek basınçlı gazı iç yüzeyine ve dış kabuğa doğru iterek hacmini artırma eğilimindedir (Şekil 2.1). Örgülü fiber ağdaki ipliklerin uzayamaması (veya çok yüksek uzunlamasına sertliği) nedeniyle, aktüatör, hacim artışına göre kısalır ve/veya mekanik bir yüke bağlandığında çekme (tension) üretir (Chou ve Hannaford, 1994; Schulte ve ark., 1961). McKibben tipi pnömatik yapay kasın gerçekte fiziksel modeli oldukça nonlineer bir yapıdadır. Ayrıca, manşonun genişlemesi ve büzülmesine neden olan sürtünmeden dolayı bu aktüatörün ısı ve mekanik kaybı büyüktür (Nakamura ve ark., 2003).



Şekil 2.1. McKibben Kası (Chou ve Hannaford, 1994)

Festo pnömatik yapay kas, doğal kası taklit eden bir gerilme aktüatörüdür. Silindirik, izotropik, esnek kauçuk tüp ve iki bağlantı flanşında (flange) oluşan kas kasılma sistemi ve uygun yapıdaki konnektörlerden oluşur. Kasılma sistemi, yüksek mukavemetli liflerle kaplanmış, basınç geçirmez uzunlukta bir kauçuk hortumdan oluşur. Lifler, üç boyutlu bir ızgara yapısına sahip eşkenar dörtgen bir desen oluşturur (Şekil 2.2). Festo kası yapısal olarak genel McKibben kaslarından farklıdır. Festo PYK'nin lifi, kauçuk tüpün içine örülür ve geleneksel tasarıma kıyasla kolay montaj ve geliştirilmiş histerik davranış ve doğrusal olmama sunar (Festo, 2007).



Şekil 2.2. Festo Pnömatik Yapay Kas (Festo, 2007)

Pnömatik yapay kasların rehabilitasyon cihazlarında kullanımını çekici kılan pek çok avantajı ve kullanımını zorlaştıracak pek çok dezavantajı da bulunmaktadır.

Pnömatik Kas Aktüatörleri, yüksek kuvvet/ağırlık oranına ve kası, insan etkileşimi için ideal kılan benzersiz özelliklere sahiptir (Hall, 2011). Tóthová ve Pitel'e göre (2015) pnömatik yapay kasın olağanüstü özelliği, hem pnömatik silindir hem de DC motordan daha iyi performans göstermesini sağlayan yüksek güç/ağırlık oranıdır. Mekanik parça olmaması, düşük maliyet ve güvenlik de pnömatik yapay kasın avantajlarından (Chen ve ark., 2019). Pnömatik yapay kas aktüatörlerinin üretimi kolaydır, düşük maliyetlidir ve büyük ölçekli güvenlik gereksinimleri olmadan insan ile ilgili uygulamalara entegre edilebilirler (Krishna ve ark., 2011). Ayrıca yumuşak ve esnek yapıya, minimal basınçlı hava tüketimine, yüksek bir çekme kuvvetine, çok uzun bir ömre ve uyumlu bir yapıya sahiptirler ve temizlikleri ve bakımları kolaydır (Hildebrandt ve ark., 2005; Nakamura ve ark., 2003; Wickramatunge ve Leephakpreeda, 2010). Pnömatik Kas Aktüatörü, boyut, ağırlık ve güç çıkışı bakımından insan iskelet kaslarına benzer (Caldwell ve ark., 1995; Chou ve Hannaford, 1994). Pnömatik yapay kasların, doğrusal olmayan kasılma ve aktive edildiğinde kuvvet üretmesi özellikleri sebebiyle biyolojik

kaslarla olan benzerliği ve diğer aktüatörlere göre oldukça hafif olması ile özellikle rehabilitasyon amaçlı kullanım için bu kası daha çekici hale getirmektedir (Repperger ve ark., 2005; Zidek ve Seminsky, 2011; Liska ve ark., 2013).

Pnömatik kas aktüatörleri (PKA) hava ile çalıştırıldıkları için ve yapısal özelliklerinden dolayı doğrusal olmayan bir yapıya sahiptirler (Repperger ve Johnson, 1999; Wickramatunge ve Leephakpreeda, 2009). Pnömatik Kas Aktüatörleri, havanın sıkıştırılabilirliği, PYK'nin geometrik davranışı, sürtünme, valflerden gelen doğrusal olmayan hava akışı ve viskoelastik malzemenin doğal özelliğinden dolayı oldukça nonlineerdir (Jouppila ve ark., 2014; Pitel' ve Tothova, 2013). Sebepleri verilen bu doğrusal olmayan dinamiklerinden dolayı, pnömatik yapay kasları modellemek ve kontrol etmek zordur (Hall, 2011). PYK'nin modelleme ve kontrolündeki zorluklar özellikle rehabilitasyon cihazlarında yaygın kullanımını kısıtlayan önemli bir faktördür (Wickramatunge ve Leephakpreeda, 2010). Zamanla değişen parametreler ve histerezis gibi karmaşık dinamikler, yüksek hassasiyetli yörünge izleme kontrolü elde etmeyi zorlaştırır (Chen ve ark., 2019). Pnömatik yapay kaslar, kullanımları için birçok avantaja sahip olmalarına rağmen verilen bu dezavantajları, yaygın olarak kullanımlarını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, doğrusal olmayan özelliklerini telafi etmek için bu pnömatik yapay kas ile yapılacak rehabilitasyon uygulamalarında kontrolör seçimi oldukça önemli bir yere sahiptir.

### 2.3.2. Pnömatik Yapay Kas Tipleri

Pnömatik yapay kaslar ile ilgili günümüze kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde çeşitli yapılarda pnömatik yapay kas tipleri olduğu görülmüştür. Pnömatik yapay kasların çeşitleri için literatüre bakıldığında temelde, örgülü (braided) kaslar, ağ gibi olan (netted) kaslar ve gömülü (embedded) kaslar olarak üç sınıfa ayrıldığı görülmüştür (Daerden,1999). Bunun yanı sıra bazı araştırmacıların çalışmaları için, laboratuvarlarında kendi kaslarını ürettikleri ve çalışmalarını bu kaslarla yürüttükleri görülmüştür.

Çizelge 2. 1. Pnömatik Yapay Kas Çeşitleri (Daerden, 1999; Hall, 2011)

ÖRGÜLÜ KASLAR	McKibben Kası
	Manşonlu İç Lastik Kası
AĞ YAPISINDA OLAN KASLAR	Yarlott Kası
	ROMAC (Robotik Kas Aktüatörü)
	Kukolj Kası
GÖMÜLÜ KASLAR	Morin Kası
	Baldwin Kası
	Paynter Hiperboloid Kası
	Kleinwacter Burulma Cihazı
	Pileli Pnömatik Kas
	Kavisli Pnömatik Kas

'McKibben Kası' terimi, 1950'lerin sonunda Protez ve Ortez alanında kas aktüatörünü kullanmayı öneren Amerikalı atom fizikçisi Joseph L. McKibben tarafından kullanılmıştır. Joseph L. McKibben'in tasarladığı, helisel olarak sarılmış liflere sahip pnömatik kasın kullanıldığı cihaz, üst eksteremiteler için kas sistemine destek olması amacıyla ortopedik cihaz olarak pazarlanmış ve bundan sonra popüler hale gelmiştir.(Baldwin, 1969).

1980'lerde Japonya'daki Bridgestone Co.'daki mühendisler tarafından pnömatik kaslar robot endüstrisinde yeniden kullanılmaya başlanmıştır. Bridgestone, pnömatik kasın Rubbertuator adı verilen ticari bir versiyonunu

geliştirmiş ve endüstriyel robot kollarında kullanmıştır (Daerden, 1999; Hall, 2011).

2000'li yıllara gelindiğinde Shadow Robot Şirketi ve Festo Şirketi'nin pnömatrik kasta öne çıktığı görülmektedir. Shadow Robot Şirketi'nin 'Shadow Hava Kası' (SAM-Shadow Air Muscle) olarak isimlendirdiği kasın yanı sıra 2002 yılında Festo Şirketi, Festo pnömatrik yapay kası geliştirmiş ve patentini almıştır (Festo, 2007). Hava Kasının araştırma enstitüleri arasında daha popüler olmasına rağmen endüstriyel kullanım için Festo PYK daha uygundur. Festo PYK, geleneksel McKibben kasıyla aynı operasyonel prensiplerin hepsine sahiptir, ancak tıpkı fiber veya metal takviyelerin bir lastik veya yüksek basınçlı hortumun içine gömülü olması gibi fiber ağın da genişletilebilir keseciğin içine gömülmesinin önemli bir özelliğine sahiptir. Şu anda, Festo ve Shadow Robot gibi şirketler, birçok boyut ve konfigürasyonda ticari olarak temin edilebilen pnömatrik kaslar üretmektedir (Sarosi ve ark., 2015).



Şekil 2.3. Pnömatrik Yapay Kas Çeşitleri (Şitum ve ark, 2015)

Bu kas çeşitlerine ek olarak bazı çalışmalarda araştırmacılar (Takanaka ve Nakmura, 2013) kendi laboratuvarlarında pnömatik yapay kas aktüatörü geliştirip, geliştirdikleri bu aktüatörleri çalışmalarında kullanmışlardır. Takanaka ve Nakmura'nın (2013) bacak ortezi çalışmasında kullandıkları pnömatik yapay kas aktüatörü, araştırmacıların laboratuvarında geliştirdikleri, uzun eksen yönünde yerleştirilen bir terminal ile her iki ucunda sabitlenmiş karbon fiber levha ve doğal lateks kauçuktan yapılmış tüpten oluşmaktadır.

### 2.3.3. Pnömatik Yapay Kasların Uygulama Alanları

Yeni bir aktüatör türü olarak pnömatik yapay kas (PYK), robotik alanında, özellikle rehabilitasyon mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmasını sağlayan birçok üstün özelliğe sahiptir. PYK'ler, özellikle güvenlik ve uyumluluğun genellikle büyük önem verildiği rehabilitasyon mühendisliğinde birçok robotik sistemde giderek daha fazla kullanılmaktadır (Chen ve ark., 2019).

Endüstriyel uygulamalarda da kullanılabilen bu kaslar kağıt endüstrisinde delme makinesi, taşıma ekipmanları, vibrasyon cihazı ve makinelerinde çalışma elemanı olarak uygulanır (Sarosi ve ark., 2015). Pnömatik yapay kaslar otomasyon, robotik ve malzeme taşıma cihazlarında geniş bir uygulama seçeneğine sahiptir (Krishna ve ark., 2011).

Pnömatik yapay kas kullanımı, robotik, insan gücü ve hareketlilik yardımı, terapi ve rehabilitasyon gibi birçok farklı alana yayılmıştır (Hall, 2011). Geleneksel robotlar, dış iskelet uygulamalarında genellikle elektrik motorları tarafından çalıştırılır ancak bu elektrikli motorlar, aktüatör ile hareket ettirilen uzuv arasında yeterli uyumu sağlayamamaktadır. Bu nedenle uyumlu aktüatör olarak pnömatik kas aktüatörü (PKA), yüksek güç/ağırlık oranına, yüksek gerilme kuvvetine ve uzun süren dayanıklılığa sahip oldukları için rehabilitasyon robotlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Hildebrandt ve ark., 2005; Qian ve ark., 2015). Hafif ve uyumlu yapıları nedeniyle, hastalarla temasın çok önemli olduğu biyomedikal uygulamalar için uygundur (Hosovsky ve ark., 2014).



Xing ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2008), robotik yardımcı tekrarlayan el terapisi için pnömatik yapay kas ile çalıştırılan yeni bir cihaz tasarlamışlardır. Tasarladıkları bu cihaz giyilebilir yapıdadır ve kavrama-bırakma hareketleri için gerekli yardımcı kuvvetleri sağlar. Ayrıca robotun biri başparmakta ve biri de diğer parmaklarda olmak üzere iki farklı serbestlik derecesi vardır. Geliştirilen bu cihaz, etkilenen elin iç motor işlevlerini iyileştirmek için tekrarlayan fizik tedaviye aktif yardım sağlamayı hedeflemektedir. Giyilebilir şekilde tasarlandığından, hastaya klinikte veya evde terapi seansları sırasında koordineli çok parmaklı aktiviteler uygulamasında yardımcı olacak şekilde programlanabilir ve tekrarlayan tedaviden tam olarak yararlanılabilir.

Liska ve arkadaşlarının (2013) aktüatör olarak pnömatik yapay kası tercih ederek tasarladığı robotta üst ekstremitte eklem ve kaslarının rehabilitasyonu hedeflenmiştir. Tasarlanan bu robot, 4 serbestlik derecesine (DOF) sahip dış iskelet formundadır. Bunun yanı sıra, aynı anda omuz ve dirsek eklemlerini çalışma kabiliyetine sahiptir.

Terapistin kapasitesinden tasarruf etmek, hastanın ilerlemesine göre rehabilitasyon egzersizleri sırasında artan ve azalan yük tahmininde iyileştirme sağlamak amacıyla Zidek ve Seminsky (2011) tarafından, kolda 2 ve dirsekte 1 olmak üzere 3 serbestlik derecesine sahip, hemen hemen tüm temel rehabilitasyon egzersizlerini sağlayabilen bir yapıda tasarlanan otomatik rehabilitasyon cihazında, hareketin başlangıç ve bitiş pozisyonunda sessiz çalışması ve esnekliği sebebiyle yapay kas, aktüatör olarak kullanılmıştır.

Hildebrandt ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2005), dört pnömatik kas ile antagonist olarak çalıştırılan, iki eksenli düzlemsel mafsala sahip ve servo valf ile sürülen bir robot tasarlanmıştır. Tasarlanan bu sistem çoklu giriş ve çoklu çıkıştan (MIMO) oluşan bir sistemdir.

Takanaka ve Nakmura (2013), yaptığı çalışmada, son yıllarda artan yaşla birlikte kas gücünün azalmasına karşı bacak kas gücüne yardımcı olmak için pnömatik yapay kas kullanan bir yürüme ortezi geliştirmiştir.

İki pnömatik yapay kas aktüatörünü kullanarak antagonist bağlantılı olarak tasarladıkları deney düzeneğinde çalışan Tothova ve Pitel (Tóthová ve Pitel, 2013) bu aktüatörün gelişmiş geometrik kas modeline dayanan dinamik simülasyon modelini Matlab/Simulink ortamında tasarlamıştır. Simülasyonla elde edilen dinamik yanıtlara göre antagonistik bağlantıda yapay kaslı pnömatik aktüatörün özelliklerinin, doğasına atfedebilecek oldukça nonlineer yapıda olduğu doğrulanmıştır.

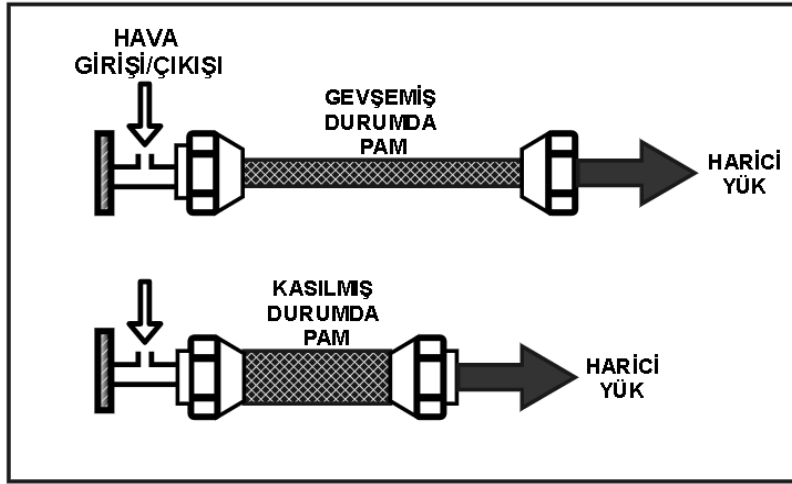
Tsagarakis ve Caldwell'in yaptığı çalışmada, yedi serbestlik derecesine sahip prototip üst kol rehabilitasyon (dış iskelet) sisteminin yapımı ve test edilmesi açıklanmıştır. Tasarlanan bu orteizde güç kaynağı olarak pnömatik kas aktüatörleri (PKA) kullanılmış ve çalışma sonuçlarına göre, cihazın bir üst ekstremite eğitimi, rehabilitasyon ve güç yardımı (dış iskelet) sistemi olarak potansiyelinin iyi olduğu görülmüştür (Tsagarakis ve Caldwell, 2003).

Giyilebilir bir cihaz ve bir insan kasına yardımcı olan bir rehabilitasyon robotu, insan kasına benzer özelliklere sahip olmalıdır. Ek olarak, giyilebilir cihaz ve rehabilitasyon robotunun hafif olması gerektiğinden, yüksek güç / ağırlık oranına sahip bir aktüatöre ihtiyaç vardır. Pnömatik yapay kasın temel avantajları, yüksek güç ağırlığı oranı, düşük fiyatı, düşük bakım maliyeti ve zorlu ortamlarda kullanılabilmesidir (Nakamura ve ark., 2003). Bu nedenle, rehabilitasyon cihazlarında kullanım için oldukça elverişli bir yapıdadır.

#### **2.3.4. Pnömatik Yapay Kasların Çalışma Prensibi**

Pnömatik yapay kaslar basınçlandırıldığında şişerler yani radyal yönde genişlerler ve boyları kısalır, bu sayede harici yüklere karşı uzunlamasına eksen boyunca yüksek miktarda çekme kuvveti üretirler. Bu kaslar, pnömatik gücü çekme kuvvetine dönüştürürler (Wickramatunge ve Leephakpreeda, 2009). Bu kuvvet ile çok yüksek miktardaki ağırlıkları taşıyabilirler. Bu tip aktüatör tarafından üretilen kuvvet (gerilim, yük) ve hareket doğrusal ve tek yönlüdür (Daerden, 1999). Şekil 2.4'te pnömatik yapay kasın serbest durumdaki ve basınçlandırılmış durumdaki

şekilleri verilmiştir. Kasılma ve kuvvet üretim seviyesi, pnömatik yapay kasa bağlı olan veya ona karşı çalışan her şeye bağlıdır. Pnömatik yapay kas (PYK) tarafından üretilen kuvvet tamamen kasa verilen ve kastan çıkarılan basıncın hızına bağlıdır ve kas, doğası gereği şişirmeye bağlı olarak kasılır (Krishna ve ark., 2011).

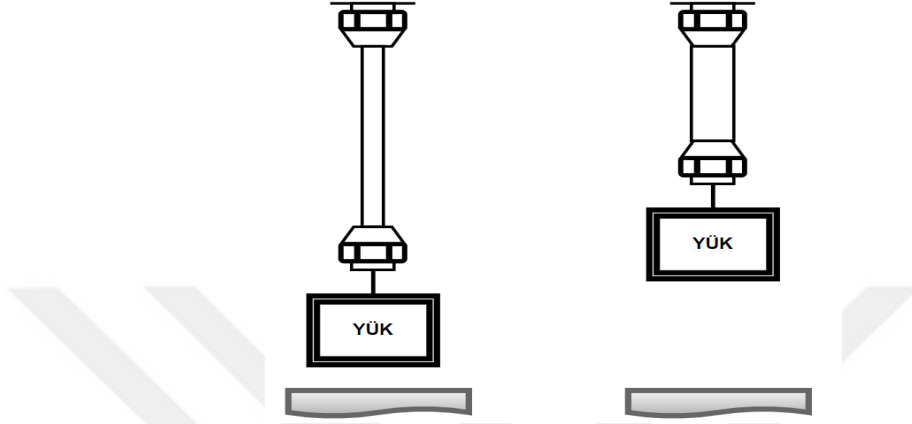


Şekil 2.4. Pnömatik yapay kasın çalışmasının gösterimi (Hall, 2011)

Pnömatik kasın nominal uzunluğu, basınçlandırılmamış, yüksüz durumda tanımlanır ve bağlantılar arasındaki görünür kas uzunluğuna karşılık gelir. Kasa bir dış kuvvet uygulandığında uzar, basınç uygulandığında ise kas kasılır yani uzunluğu azalır. Kullanılabilir gerilme kuvveti, kasılmanın başlangıcında maksimum seviyededir ve daha sonra strokun bir fonksiyonu olarak neredeyse doğrusal bir şekilde azalır. (Festo, 2007).

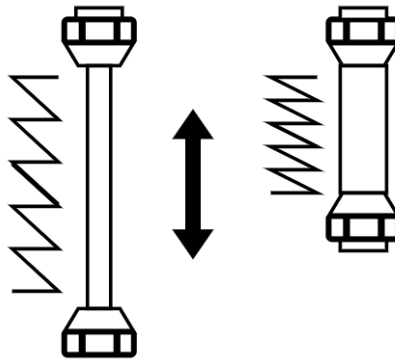
En basit durumda Festo PYK, sabit bir yüke karşı tek etkili bir aktüatör olarak çalışır (Şekil 2.12). Bu yükün kalıcı olarak kasa bağlı olduğunu varsayarsak, basınçlandırılmamış uzatılmış durumda iken başlangıç konumundan çıkacaktır. Bu çalışma durumu, Festo PYK'nin teknik özellikleri açısından idealdir: basınç uygulandığında, bu şekilde önceden gerilmiş bir Festo pnömatik yapay kası,

optimum dinamik karakteristikler ve minimum hava tüketimi ile maksimum kuvvet geliştirir. Bu durumda kullanılabilir kuvvet de maksimum seviyededir.



Şekil 2.5. Sabit bir yüke karşı PYK

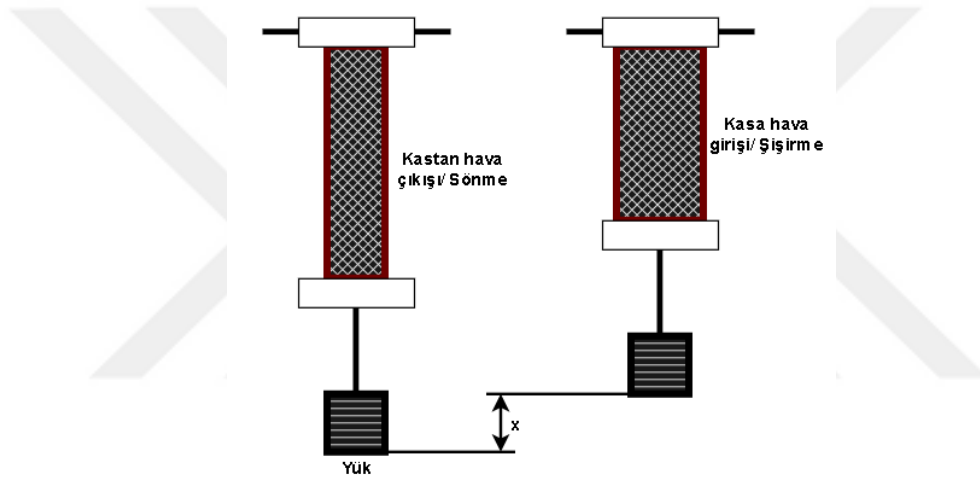
Festo pnömatik yapay kas, değişen bir dış kuvvete sahip bir yay gibi davranır: kuvvetin hareket yönünü takip eder. Festo PYK ile bu "pnömatik yayın" hem ön gerdirme kuvveti hem de yay sertliği değiştirilebilir. Festo PYK, sabit basınçlı veya sabit hacimli bir yay olarak çalıştırılabilir. Bunlar, yay etkisinin belirli bir uygulamaya mükemmel şekilde uymasını sağlayan farklı yay özellikleri sağlar.



Şekil 2.6. PYK'nin yay gibi davranması

Eğer kas basınçlı hava ile beslenir ve hacim bloke edilirse, dış kuvvet değiştiğinde kastaki basınç önemli ölçüde artabilir.

Bir PYK'nin çalışma prensibi Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Basınçlı hava girişinden dolayı PYK'nin hacmi arttığında, PYK'nin uzunluğu kısalmır ve böylece hedef yükü kaldırmak için çekme oluşturur. Pratik uygulamalarda, referans yörünge olarak hareket etmesi veya ihtiyacımız olan bir kuvveti üretmesi için PYK'deki giriş basıncı değiştirilebilir (Chen ve ark., 2019).

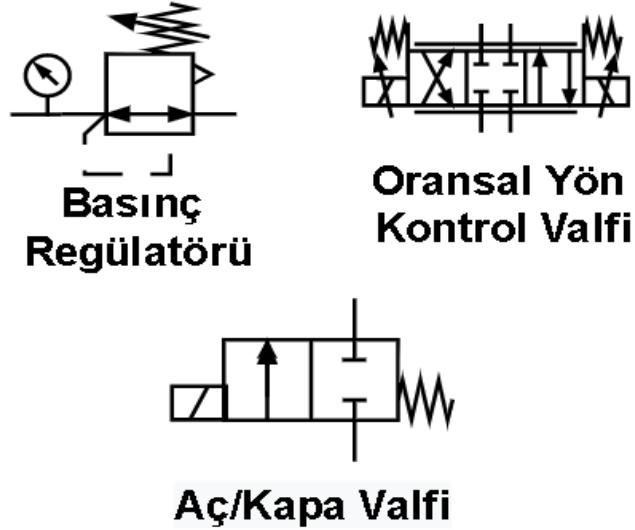


Şekil 2.7. PYK'nin Çalışma Prensibi(Chen ve ark., 2019)

### 2.3.5. Pnömatik Yapay Kaslar İçin Valfler

Pnömatik sistemlerde basınç aktarımı için valfler veya regülatörler gibi yapılara ihtiyaç duyulmaktadır. Valfler, bir hidrolik pompadan veya basınçlı tanktan gelen akışkanın basıncını, akış miktarını, yönünü ve başlama/bitiş şartlarını denetleyen elemandır ve işlevine göre, yön kontrol valfleri, akış kontrol valfleri ve basınç kontrol valfleri olarak gruplandırılabilirler. Bu amaçla kullanılan valf, temelde sıkıştırılmış hava olan basınçlı bir gazdan enerji akışını kontrol eder (Jamian ve ark., 2020). Çok sayıda valf çeşidi vardır ve bu valfler çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Pnömatik sistemlerden özellikle pnömatik yapay

kaslar ile ilgili yapılan kontrol çalışmalarında oransal valfler, basınç regülatörleri veya aç/kapa valfleri hava akışında kullanılan en yaygın elemanlardır (Şekil 2.8) (Liska ve ark., 2013; Jouppila, 2014).



Şekil 2.8. Pnömatik sistemlerde kullanılan valfler

Her pnömatik devre için belirli bir optimal çalışma basıncı vardır. Gereğinden yüksek bir basınç enerji kaybına ve çabuk aşınmalara, gereğinden düşük bir basınç ise fonksiyonun yerine getirilmemesine veya en azından verimin düşmesine neden olur. Kompresör deposundaki hava basıncı sürekli değiştiğinden bu dalgalanmayı sisteme aktarmamak için bir basınç düşürücüye (regülatör) ihtiyaç duyulur, regülatöre giren havanın basıncı değişse bile çıkan havanın basıncı regülatör üzerindeki manometreden okunabilen ayarlanan sabit değerde kalacaktır. Literatürdeki çalışmaların bir kısmında, oransal valfler gibi basınç regülatörleri de tercih edilmektedir. Ancak basınç regülatörleri bazı durumlarda pnömatik yapay kasların çalışabileceği hız aralıkları için istenen yeterliliğe ulaşamamaktadır.

Basıncın kontrol edilmesi, gaz akışının, gösterge basınç seviyesi ayarlanan değere ulaşacak şekilde kontrol edilmesini ifade eder. Bunun için kullanılan ve literatürdeki çalışmaların çoğunda, tercih edilen oransal valfler, pnömatik yapay

kasların kontrolünde oldukça iyi performans gösterse de maliyetleri oldukça yüksektir. Oransal çalıştırılan valfler, bir elektronik kontrol devresi aracılığıyla sürekli olarak ayarlanan bir orifis bölümüne sahiptir (Daerden, 1999).

Pnömatik yapay kasların hava giriş çıkışı için iki konumlu aç/kapa valfleri de kullanılır. Basınçlı hava, valfler aracılığıyla basınç impulsları şeklinde yapay kas içine verilir. Kaslardan basıncın dışarı atılması da bu şekilde yapılır (Pitel ve ark.,2007). Aç/kapa valfleri, diğer valflere göre oldukça hızlı ve daha ekonomik oldukları için pnömatik yapay kasların kontrolü konusunda kullanıma oldukça elverişlidir. Aç/kapa valfleri, sahip oldukları bu avantajlarından dolayı bu tez çalışmasında tercih edilen valfler olmuştur.

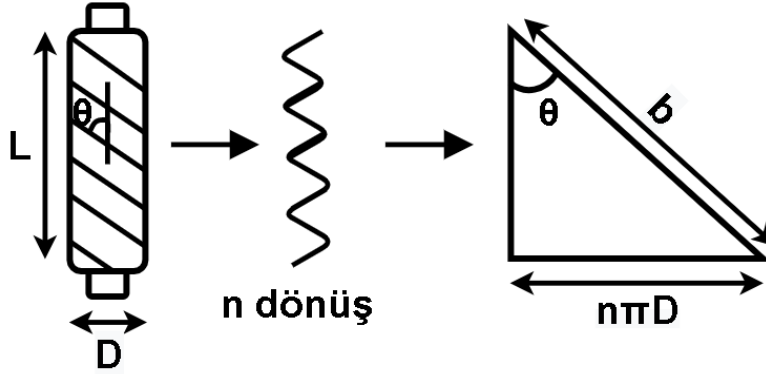
#### **2.4. Pnömatik Yapay Kasların Modellenmesi**

Model tabanlı kontrol yöntemlerini uygulamak için öncelikle PYK için geliştirilen modelleme yaklaşımları incelenmiştir. Pnömatik yapay kasların modellenmesi konusunda yapılan çalışmalar 2 temele dayandırılmaktadır. Bunlardan birincisi, kasın silindirik biçiminden faydalanarak oluşturulan, statik veya geometrik olarak adlandırılan model; ikincisi kasın hareketi ile ortaya çıkan, dinamik veya fenomenolojik olarak isimlendirilen modeldir. Modelleme çalışmasında temel amaç, PYK'nin basıncı, kuvveti ve eksenel uzaması (yer değiştirme) arasında bir ilişki kurmaktır (Kelasidi ve ark., 2011).

##### **2.4.1. Pnömatik Yapay Kasların Geometrik/Statik Modeli**

Pnömatik yapay kasların statik olarak modellenmesi için yapılan çalışmalara bakıldığında ana yaklaşımın enerji modellenmesine dayandığı görülmektedir. Bu modelleme yaklaşımında, aktüatör kuvveti, basıncı ve uzaması arasında ilişki kuran sanal işi ve enerjinin kayıpsız korunması dikkate alınır (Chou ve Hannaford, 1996; Tondu ve Lopez, 2000). Bu konuyla ilgili ilk çalışmalar incelendiğinde Chou ve Hannaford modelinin (1996), PYK'nin statik performansı için en basit geometrik

model olduğu görülmektedir. Bu yaklaşımda PYK aktüatörü bir silindir olarak modellenmiştir. Bu modelin görünümü, Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2. 9. McKibben Aktüatörünün Geometrik Modeli (Chou ve Hannaford, 1994)

$$L = b \cos \theta$$

$$D = \frac{b \sin \theta}{n\pi}$$

Şekil 2.9'da L, aktüatörün uzunluğunu, D aktüatörün çapını ifade etmektedir. b, örgü ipliğinin uzunluğu,  $\theta$  örgü açısı ve n ise bir ipliğın, kasın çevresini bir uçtan diğer uca kaç kez çevrelediğinin sayısıdır. Sanal iş prensibine göre modeldeki kuvvet basınç ve konum arasındaki ifadeyi gösteren denklem aşağıdaki gibidir:

$$F = P' \frac{b^2}{4\pi n^2} (3\cos^2\theta - 1) \quad (2.1)$$

Denklem 1'de  $P'$  göreceli basıncı ifade eder ve mutlak iç basınç ile çevre basıncının farkıdır. Burada  $b/n\pi = D_{max}$  ataması ile denklem aşağıdaki gibi olur:



$$F = p' \frac{\pi D_{max}^2}{4} (3 \cos^2 \theta - 1) \quad (2.2)$$

$D_{max}$ , örgü açısı  $\theta=90^\circ$  için teorik olarak elde edilebilen ancak fiziksel olarak ulaşılamayan kas çapını ifade eder.

Pratikte, örgü açısının ölçülmesi zor olduğu için Tondu ve Lopez (2000) tarafından daha kullanışlı olduğu düşünülen aşağıdaki denklemde yer alan model önerilmiştir.

$$F = \frac{\pi D_{max}^2}{4} p' [a(1 - \varepsilon)^2 - b]$$

$$a = \frac{3}{\tan^2 \theta_0}, \quad b = \frac{1}{\sin^2 \theta_0}, \quad \varepsilon = \frac{L_0 - L}{L_0}$$

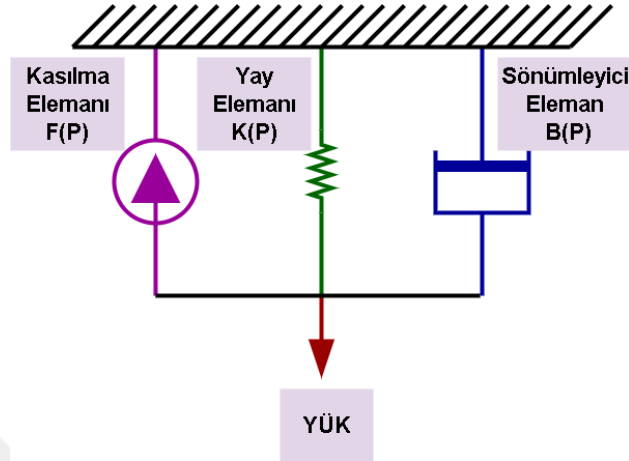
Denklemden,  $F$ , kas kuvvetini,  $p'$  göreceli kas basıncını,  $\theta_0$  başlangıç örgü açısını ve  $\varepsilon$  kasılma oranını ifade etmektedir.

Ancak bu modelin gerçekte üretilmekte olan kuvvetlerden daha yüksek kuvvet sonuçları verdiğini görmüşler ve kasın silindirik olduğu varsayımı ile yapılan bu modelde kasların ne kadar çok kasılırsa, silindirik yapısının o kadar bozulduğunu ifade etmişlerdir. Kas kasıldıkça konik şekle bürünen kasın uç kısmından kaynaklanan hata için denkleme bir düzeltme faktörü,  $k$  eklemiştir.

$$F = \frac{\pi D_{max}^2}{4} p' [a(1 - k\varepsilon)^2 - b]$$

#### 2.4.2. Pnömatik Yapay Kasların Fenomenolojik/Dinamik Modeli

Pnömatik yapay kasın fenomenolojik modeli olarak da adlandırılan dinamik modelinin amacı, pnömatik kasın dinamik davranışını en iyi şekilde değerlendirmektir. Dinamik modelleme Şekil 2.10'da görüldüğü gibi yay, damper ve kasılma elemanının paralel konfigürasyonundan oluşur. Bu üç elemana karşılık gelen katsayılar  $PYK$ 'nin giriş basıncına bağlıdır (Reynolds ve ark., 2003).



Şekil 2.10. Pnömatik Yapay Kasın Fenomenolojik Modeli (Reynolds ve ark., 2003)

Bu modele dair denklemler genel olarak şu şekilde ifade edilmektedir:

$$M\ddot{X} + B_{PAM}\dot{X} + K_{PAM}X = F_{CE} - L$$

Denklemden  $X$ , kasın yer değiştirmesini,  $M$  hareketli bileşenlerin kütlelerini ifade etmektedir.  $B_{PYK}$ , sönümlenme katsayısı,  $K_{PYK}$  yay sabiti  $F_{CE}$ , kasılma elemanının kuvvet katsayısı ve  $L$  yüküdür.

## 2.5. Pnömatik Yapay Kasların Kontrolü

Pnömatik yapay kasların kontrolü, kasın rehabilitasyon alanında kullanımını kısıtlayan bir problemdir. Bu problemi çözmek amacıyla literatürde yapılmış çok çeşitli çalışmalar vardır. Pnömatik yapay kasların kontrolünde, kontrolör geri beslemesi olarak açı/pozisyon, kuvvet ve/veya basınç bilgileri kullanılmaktadır (Meller ve ark., 2018).

Pnömatik yapay kasların kontrolü ile ilgili literatürdeki çalışmaların bazısında kasın modeli türetilerek model tabanlı bir kontrol yaklaşımı benimsenirken bazısında modellemenin karmaşıklığından ve zorluğundan kaçmak amacıyla modelden bağımsız kontrol yaklaşımının (Qian ve ark., 2015) kullanıldığı

görülmüştür. PYK'nin kullanımını kısıtlayan kontrol problemini çözmek için yapılmış çalışmalar genel olarak, PID kontrol, bulanık (fuzzy) kontrol, basınç geri beslemeli bulanık kontrol, kayan kip kontrolü (Sliding Mode Control-SMC) ve Neuro-fuzzy kontrol olarak sınıflandırılmaktadır (Chillari ve ark., 2001).

Model tabanlı yaklaşımlarda pnömatik yapay kaslar için model belirlenip bu model ile kontrolör çalışması yapılmıştır. Bu tip yaklaşımın temel problemi, belirlenen modelin sadece o çalışmadaki deney düzeneği için geçerli olması ve deneyi tekrar etmek isteyen başka araştırmacıların kendi sistemleri için uygun katsayılar ile modellemeyi yeniden yapma zorluğunu ortaya çıkarmasıdır. Model tabanlı kontrol yaklaşımını belirleyen çalışmalar temelde kayan kip kontrolü ve model tahmini kontrolü (MPC) olarak yer alsa da bazı araştırmacılar PID kontrol, bulanık kontrol veya bunların kombinasyonu olan bulanık PID kontrol için de model tabanlı yaklaşımı kullanmışlardır, bunlar şu şekilde verilebilir:

Tondu ve Lopez'in (2000) çalışmasında, 2-DOF SCARA tipi robot prototipi için antagonistik bir konfigürasyonda pnömatik kas aktüatörlerinin modellenmesi ve kontrolü çalışılmıştır. Sistem, basınç girişinden eklem açısına kadar tanımlanan 2. derece modele dayalı bir kayan kip kontrol stratejisi ile kontrol edilmiştir..

Chang ve arkadaşlarının (2011) yaptıkları çalışmada, tek boyutlu bir manipülatörü çalıştıran pnömatik yapay kasların kontrolü için Takagi-Sugeno (T-S) bulanık model tabanlı bir kontrol önerilmiştir. Önerilen bu yaklaşım ile doğrusal olmayan bir sistem modeli, bir dizi doğrusal alt sisteme ayrıştırılmış ve böylece T-S model tabanlı kontrolörün, kendi içinde basit ve doğrusal kontrolör tekniklerini kullanmasına izin verilmiştir. Bu çalışma ile pnömatik yapay kasın, referans giriş sinyali takibi için T-S bulanık model tabanlı algoritmanın oldukça başarılı bir sonuç verdiği görülmüştür.

Andrikopoluos ve arkadaşları (2013) 'Anahtarlama Model Tahmini Kontrol Yaklaşımı'nı incelemiştir. Bu yaklaşımın temel amacı, PYK'nin her

çalışma bölgesi için farklı optimal kontrolü oluşturmak ve bu komşu bölgeler arasında kontrol geçişlerinin sorunsuz olmasını sağlamaktır.

Jouppila ve arkadaşları, (2014) yaptıkları çalışmada pnömatik yapay kasın yeterli doğrulukta kontrolü için sağlam ve nonlinear bir kayan kip kontrolü yaklaşımı uygulamıştır. Çalışmada tek aç/kapa valfi, iki aç/kapa valfi ve servo valf ile 3 farklı sistem konfigürasyonunda kontrolör uygulaması yapılmıştır. Kontrol konfigürasyonlarının sağlamlığı, taşıma yükü kütlesi değiştirilerek ve bir dış kuvvet bozulması uygulanarak test edilmiştir. Bu çalışmanın sonunda PWM ile çalıştırılan aç/kapa valfleri ile kontrol edilen kas aktüatör sisteminin servo valf kontrollü sistemlerle genel olarak neredeyse benzer bir performans gösterdiği görülmüş ve aç/kapa valflerinin düşük maliyetli bir seçenek sunabileceği gösterilmiştir.

Chiang ve Chen (2018) yaptıkları çalışmada PYK kontrolü için ‘Kademeli Bulanık Kayma Modu (Incremental Fuzzy Sliding Mode) Kontrolü’nü kullanmıştır. Çalışmada, pnömatik yapaya kasın nonlinear dinamiklerinin sebep olduğu kontrol sorununun çözümü için bulanık mantık tabanlı bir kontrolör seçilmiş ve PID kontrolöre kıyasla bulanık mantık esaslı bir kontrolörün PYK kontrolünde daha başarılı olacağı iddia edilmiştir.

Modelden bağımsız kontrol yaklaşımında araştırmacılar, nonlinear yapıdaki pnömatik yapay kas için model oluşturmanın zorluğundan kaçınılmıştır. Bu yaklaşımlar temelde PID kontrolü, bulanık kontrolör olarak sınıflandırılabilir (Leephakpreeda, 2011).

Andrikopoulos ve arkadaşlarının (2014) yaptıkları çalışmada pnömatik yapay kasın antagonist çalışmasında kullanılmak üzere modelden bağımsız “gelişmiş nonlinner tabanlı PID kontrol” yaklaşımı geliştirilmiştir.

Liska ve arkadaşlarının (2013) tasarladıkları robotun kontrolünde, geleneksel algoraitmalarla çözülmesi zor olabilecek bazı görevler olduğu için yapay zeka teknikleri kullanılmıştır. Bu rehabilitasyon robotunun kontrolünde sinir ağı, kontrollü bir sistem modeli oluşturmada, rehabilitasyon esnasında egzersizin

optimal parametrelerinin belirlenmesinde ve egzersiz sırasında hastanın yaptığı hareketi anlamlandırmada kullanılabilmesi hedeflenmiştir.

Bu zamana kadar, PYK'lerin yüksek hassasiyetli performansını elde etmek için, PID kontrolörü, kayan kip kontrolörü (SMC), sinir ağı tabanlı kontrolör ve bulanık mantık kontrolörü gibi çeşitli klasik kontrolörler benimsenmiştir. PID kontrolörü ile sistem kararlılığı teorik olarak garanti edilemez ve PID parametrelerini ayarlama işlemi zaman alıcıdır. Kontrol süreci sırasında, kontrol yasası süresiz bir şekilde kayan yüzeyden geçer, bu nedenle kayan kip kontrolörü gevezelik (chattering) probleminden muzdariptir. Sinir ağı tabanlı denetleyici, sinir ağlarında ağırlıkları eğiterek kontrol performansını artırabilir, ancak optimum ağırlıkları elde etme süreci de zaman alıcıdır. Pratik uygulamalarda, modelleme hataları ve parametre belirsizlikleri kaçınılmaz olarak PYK'lerin kontrol performansını bozar (Chen ve ark., 2019).

Yukarıda bahsedilen çalışmaların hepsinde PYK'nin kontrol problemi çözülmeye çalışılmış olmasına rağmen, yöntemlerin kıyaslaması yapılarak PYK'nin kontrolü için basit ve etkili bir kontrolör tasarımının yapılmadığı incelenen çalışmalarda görülmüştür.

Bu çalışmada, kontrol hedefine ulaşmanın ilk adımı olarak literatürde yaygın kullanılan biri model tabanlı ve ikisi modelden bağımsız olmak üzere 3 nonlineer kontrolör, kıyaslamalı deneysel bir değerlendirme için seçilmiştir. Uygulanan kontrolörlerden modelden bağımsız olanlar, 'Klasik PID kontrolör' ve 'Bulanık PID Kontrolör' iken model bağımlı olan 'Kayan Kip Kontrolörü (SMC)' dır.

## 2.6. Çalışmanın Amacı

Pnömatik yapay kasın modellenmesi ve kontrolü, kasın daha efektif kullanılması açısından hala zorlu konulardır ve üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Yapılan çalışmalarda önemli sonuçlar elde edilmesine rağmen, Krishna ve arkadaşlarının (2011) da ifade ettiği gibi yapılan kontrolör çalışmalarının

çoğunda, sınırlı deneysel koşullarına sahip tek bir kontrol moduna odaklanılmış ve farklı kontrol modlarının performansı değerlendirilmemiştir. Birden çok, farklı kontrol modunu uygulayan çok az çalışma vardır. Bunların içinde model tabanlı ve modelden bağımsız ayrımını yaparak kontrolörlerin kıyaslanması konusunda literatürde eksiklik noktalar olduğu görülmüştür. Bu sebeple oldukça ekonomik olan aç/kapa valfleri ile etkili bir kontrolör tasarımına rehberlik etmesi için model tabanlı ve modelden bağımsız yaklaşımların karşılaştırılmasının hala gerekli olduğu görülmüştür. Bu karşılaştırmanın, efektif ve basit bir kontrolör tasarımı için bir yol haritasının belirlenmesine yardımcı olması beklenmektedir.

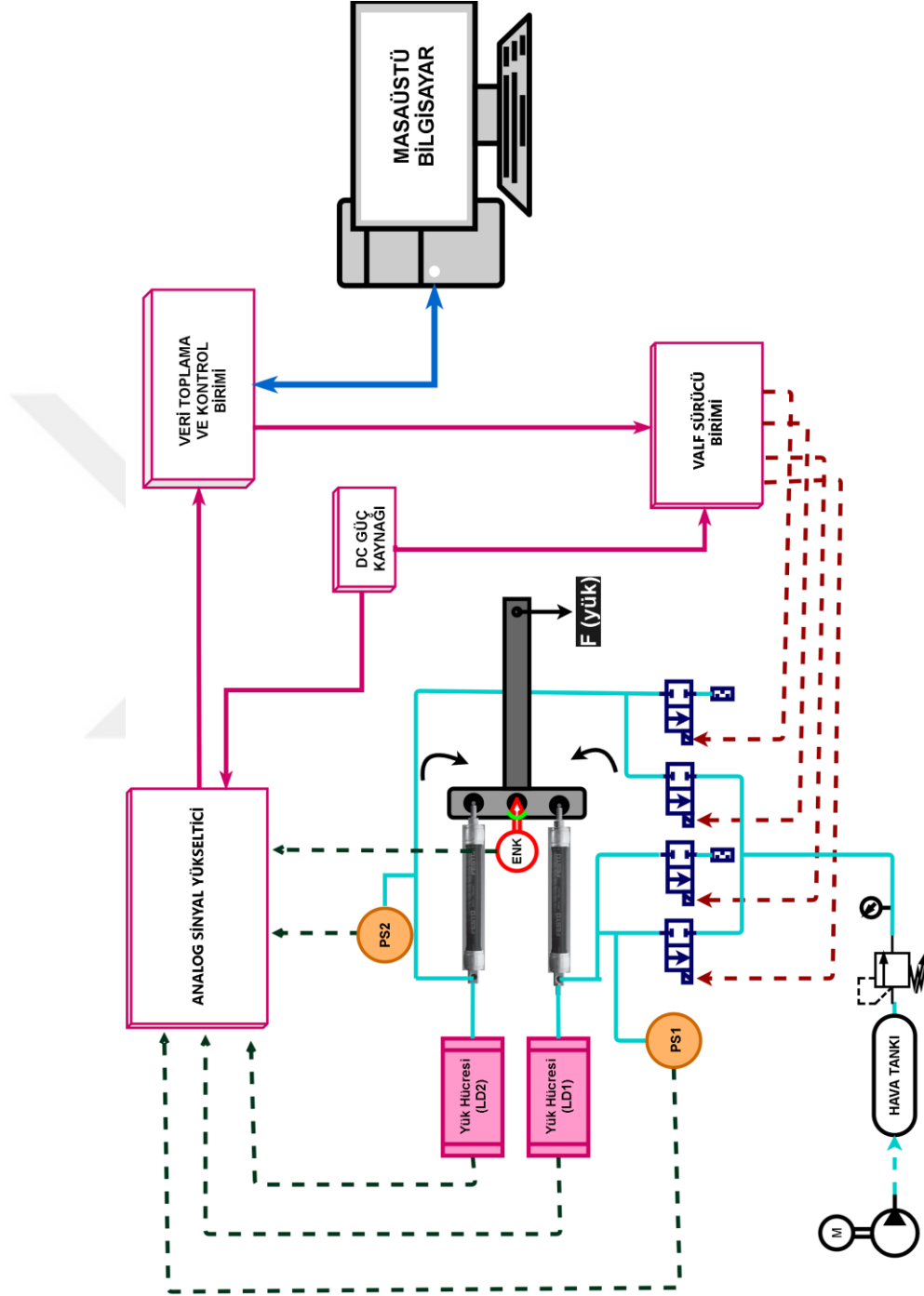
Belirlenen amaç doğrultusunda bu çalışmada, kontrol hedefine ulaşmanın ilk adımı olarak literatürde yaygın kullanılan biri model tabanlı ve ikisi modelden bağımsız olmak üzere 3 nonlineer kontrolör, deneysel bir değerlendirme için seçilmiştir. Uygulanan kontrolörlerden modelden bağımsız olanlar, ‘Klasik PID kontrolör’ ve ‘Bulanık PID Kontrolör’ iken model bağımlı olan ‘Kayan Kip Kontrolörü (SMC)’ dür. Uygulanan kontrolörlerin performans değerlendirmesi, hızlı aç/kapa valfleri ile çalıştırılan Festo PYK’ler tarafından sürülen, PYK kontrol test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Deney Düzeneği

Pnömatik yapay kasın kontrol performansını incelemek için yapılmış bu çalışmada kullanılan kontrol test deney düzeneği, MMF2013BAP12 referans numarasına sahip projede sistem tasarlanmıştır ve imalatı gerçekleştirilmiştir (Baysal, 2013). Şekil 3.1’de verilen tasarım, dirsek ve ön kol hareketlerinin rehabilitasyonunda kullanılacak deneysel robotik kol ortez prototipidir.

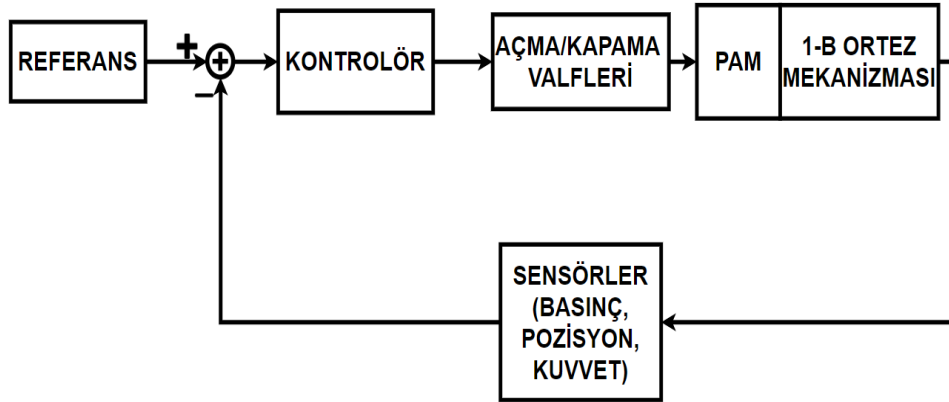
Deneylerin yapıldığı donanım sistemi temel olarak, pnömatik yapay kaslar (PYK), aç/kapa valfler, çeşitli elektronik yükselteç devreleri, basınç, kuvvet ve pozisyon sensörleri, bunların bir arada durmasını sağlayan mekanik çatı ve çeşitli yardımcı mekanik, pnömatik ve elektronik montaj malzemeleri, mini hava kompresörü ve yazılımın yapılması ve veri toplama işlemi için kullanılan masaüstü bilgisayarından oluşmaktadır. Bunların birbiriyle ilişkileri ve detaylı gösterimi Şekil 3.1’de pnömatik yapay kas (PYK) kontrol test düzeneğinde verilmektedir. Şekildeki oklar elemanlar arasındaki sinyal yollarını temsil etmektedir. Bilgisayar ve veri toplama kartı, arayüz olarak Matlab-Simulink kullanarak birbirleriyle ileri ve geri yönlü iletişim kurmaktadır. Veri toplama kartı, analog sinyal yükseltici ve valf sürücü birimi vasıtası ile pnömatik kas içindeki basıncı kontrol eden aç/kapa valfe komut sinyalleri gönderir. Sistemde kullanılan basınç sensörü, yük hücresi, enkoder sensörlerinden gelen sinyaller, yine analog sinyal yükseltici ve valf sürücü birimi kullanılarak veri toplama kartına gönderilir. Kontrolör tasarımı yapılırken sistemdeki sensörlerden alınan pozisyon, kuvvet ve basınç bilgileri geri bildirimde kullanılmaktadır.



Şekil 3. 1. Pnömatik Yapay Kas Kontrol Test Düzeneği Blok Diyagramı



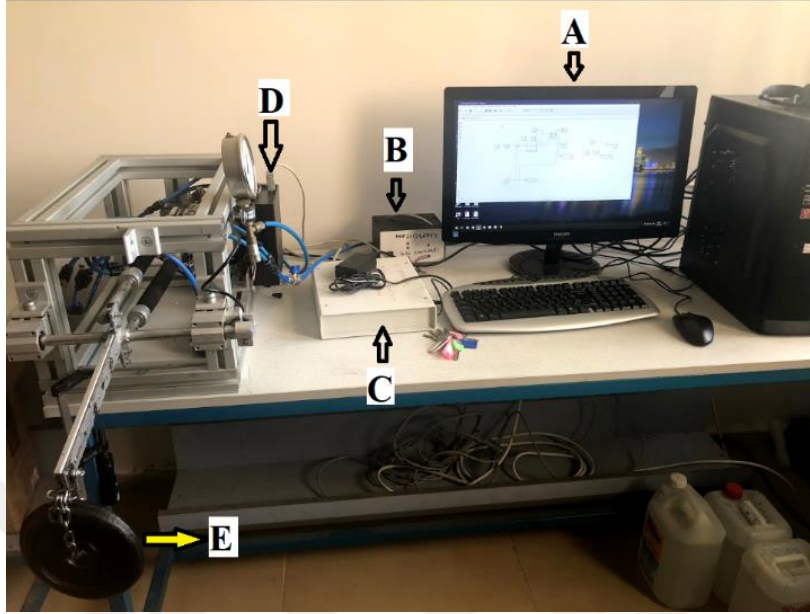
Bu çalışmanın yürütülmesi esnasında FYL-2019-12070 referans numarasına sahip BAP desteği ile de sistem için gereksinim duyulan ilave malzemeler alınmış ve kısmi ilaveler yapılmıştır. Çukurova Üniversitesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümü Medikal Robotik ve Rehabilitasyon Araştırma Laboratuvarında bulunan bu pnömatik yapay kas Kontrol Test Düzenegi, genel yapı etkilenmeden tasarımının değiştirilebileceği bir formdadır. Ayrıca deney sistemindeki pnömatik yapay kasın hava giriş çıkışı için kullanılmak istenilen valf, sistemde büyük değişikliklere gidilmeden sisteme kolay bir şekilde entegre edilebilmektedir. Tasarlanan deney düzenegindeki pnömatik yapay kas, antagonist olarak çalıştırılabileceği gibi bu çalışmada olduğu gibi tekil olarak da çalıştırılabilmekte ve istenen deneyler yapılabilmektedir. Deneyler esnasında yapılan kontrolör uygulamaları, tüm mekanik, pnömatik ve elektronik birimleri kontrol eden bir masa üstü bilgisayarda MATLAB/SIMULINK ortamında gerçekleştirilmiştir. Test donanımının kontrol blok şeması Şekil 3.2’de verilmiştir.



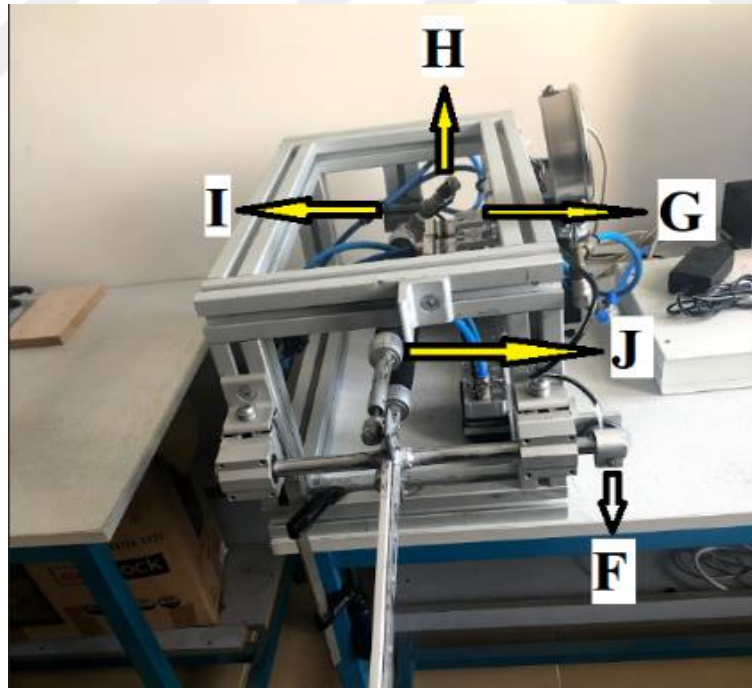
Şekil 3.2. Pnömatik yapay kas kontrol test düzenegi için kontrol sistem blok diyagramı

### 3.1.1. Deney Düzeneginin Parçaları

Pnömatik yapay kas kontrol test düzenegine ve donanım bileşenlerine genel bakış Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te etiketlerle gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Pnömatik Yapay Kas Kontrol Test Düzenine Genel Bakış



Şekil 3.4. Pnömatik Yapay Kas Kontrol Test Düzeninin Bileşenleri

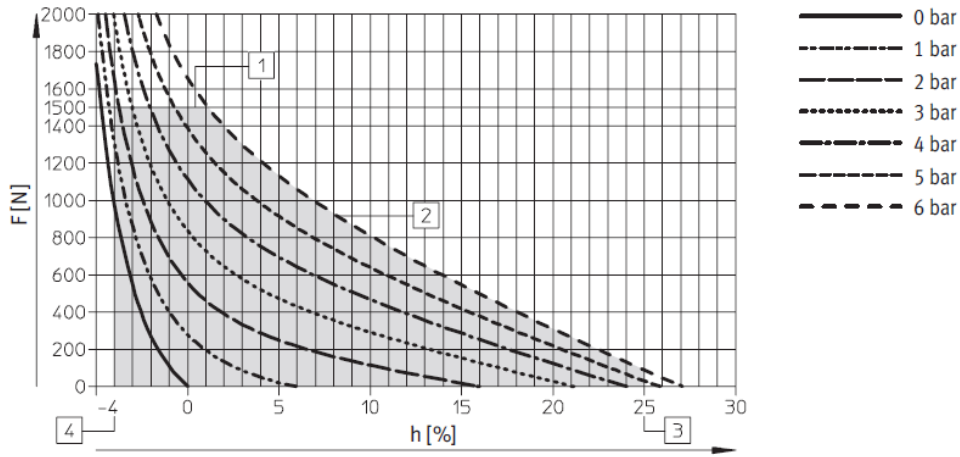
Şekil 3.3'te A etiketi ile gösterilen, sensörlerden gelen verinin, Matlab/Simulink ile işlendiği masaüstü bilgisayardır. Bilgisayarda Matlab/Simulink arayüzü ile robotik ortez arasında iletişim kuran tüm sinyaller kontrol edilebilmektedir. Çalışmadaki tüm kontrolör deneyleri bu bilgisayar ile yapılmıştır. B etiketi ile 'DC güç kaynağı', C etiketi ile 'veri toplama ve kontrol birimi' gösterilmektedir. Bu birim analog aktif filtre ve ATMEL Arm Cortex M3 mikroişlemci kartlarından oluşmaktadır. Sistemde, sensör ve aktüatör konfigürasyonları ve kontrolör tasarımlarını uygulamak için Matlab/Simulink blokları derlenir ve 'veri toplama ve kontrol birimi'nde çalışan ATMEL Arm Cortex M3 mikroişlemciye gönderilir ve çalıştırılır. ATMEL Arm Cortex M3 mikroişlemci hem çift yönlü veri aktarımı hem de sistemi kontrol etmek için kullanılmaktadır.

Şekil 3.3'te D ile belirtilen "Analog Sinyal Yükseltici ve Valf Sürücü Birimi"dir. İçerisinde basınç, kuvvet ve pozisyon sensörleri için analog sinyal amplifikatörü ve valf sürücü devresi yer almaktadır. E etiketi bir sabit yükü ifade etmektedir. Kontrol deneyleri esnasında sistemin yük altında testi için sabit 2 kg ağırlığı olan dumbbell, kuvvet kazancı 7.42 olan döner kolun ucuna bağlanmıştır. Pnömatik yapay kasa yük etkisi bu şekilde 14.84 kg olarak uygulanmıştır.

Şekil 3.4'te F etiketi ile PYK'nin, döner ekleminin pozisyon ölçümü için kullanılan enkoder gösterilmektedir. Bu çalışmada Bourns firmasının manyetik temassız, tek turlu AMS22 tipi enkoderi kullanılmıştır. G ile gösterilen deney düzeneği elemanı PWM yöntemi ile çalıştırılan Matrix firmasının MX890 serisi hızlı aç/kapa valfleridir.

Deney düzeneği donanım bileşenlerinin yer aldığı Şekil 3.4'te H etiketi ile gösterilen 0-100 psi aralığında çalışabilen eleman Honeywell 24PCFM66 serisi basınç sensörüdür. I etiketi 0-100 kg aralığındaki ağırlık için kuvvet ölçümü yapabilen, 1/1000 hassasiyete sahip S tipi Zemic H3-C3 tipi yük hücresini (load-cell) ifade etmektedir.

Şekil 3.4'te Festo marka DMSP-20 serisi, 0-6 bar aralığında çalışabilen, 250 mm uzunluğundaki pnömatik yapay kas J ile gösterilmektedir. Çalışmamızda kullandığımız Festo pnömatik yapay kas (PYK), DMSP-20-250N-RM-CM'dir. Burada DMSP, kasın sıkıştırılmış bağlantıya sahip olduğunu; 20, kasın iç çapını (mm); 250N kasın nominal uzunluğunu (mm); RM, ilk pnömatik bağlantının radyal olduğunu ve CM, ikinci pnömatik bağlantının olmadığını ifade etmektedir. Bu kasın kaldırabileceği maksimum yük basınç altında 150 kg ve boşta serbest asılı halde 80 kg'dır. Ayrıca nominal uzunluğunun %25'ine kadar kasılabilir, %4'üne kadar uzayabilir ve çalışma basıncı 0-6 bar aralığındadır. Bu çalışmada kullanılan PYK için nominal uzunluğun kasılmasının,  $h$ [%] bir fonksiyonu olarak izin verilen kuvvet  $F$ [N], yani Festo kasımızın çalışma aralığı aşağıdaki diyagramda verilmiştir.



Şekil 3.5. PYK'nin çalışma aralığı

Deney düzeneğinde kullanılan donanım bileşenlerinin ve elektronik devrelerin detayları ilgili BAP raporunda verilmektedir (Baysal, 2013).

### 3.1.2. Deney Düzeneğinin Kalibrasyon Kontrolü

Tez çalışması esnasında, kontrol deneylerine başlamadan önce sistemde kullanılan basınç, kuvvet ve pozisyon sensörlerinin ilk kalibrasyon değerleri

kontrol edilmiş ve deney düzeneğinin genel anlamda çalışmasının doğruluğu tekrar test edilmiştir.

Deneyler yapılmadan önce ölçüm yapılan fiziksel büyüklüklerin doğru elde edilebilmesi için pozisyon, basınç ve kuvvet sensörleri için önceki kalibrasyon değerleri kontrol edilmiş ve güncel ölçüm fonksiyonları oluşturulmuştur. Basınç sensörü (PS2, PS1), harici CL1 sınıfı bir manometre seti (+/- 1 psi doğruluk) yardımıyla oluşturulan düzenek kullanılarak kalibre edilmiştir. Kuvvet sensörü (LD2), hassas tartıyla tartılan test ağırlıkları (+/- 1 gr doğruluk) kullanılarak kalibre edilmiştir. Pozisyon sensörü (POS) ise dijital su terazisi (+/- 1 derece doğruluk) kullanılarak kalibre edilmiştir. Dijital Sinyal İşleme kontrolörü üzerindeki ADC (Analog-Dijital Dönüştürücü), 12 bit çözünürlüğe sahiptir ve 0-3.3V arası bir analog işaretin sayısal değeri 0-4095 arasındadır. Deney düzeneğinde aynı anda sadece bir kas ile çalışıldığı için sadece çalışılan kas için sensör karakteristikleri güncellenerek oluşturulmuştur. Buna göre Çizelge 3.1’de ölçüm fonksiyonları verilmiştir.

Çizelge 3.1. Güncellenen Sensör Karakteristikleri

Sensör Adı	Giriş Aralığı (u)	Atmel Mikroişlemci Kartı Kalibrasyonu (a)	Fiziksel Kalibrasyon (o)
Basınç (PS2) (bar)	0-6 bar	$a = u * 3300 / (4 * 4095)$	$o = (a * 0.00212) + 0.15$
Basınç (PS2) (psi)	0-100 psi	$a = u * 3300 / (4 * 4095)$	$o = (a * 0.03126)$
Pozisyon (POS) (derece)	-120... +120 derece	$a = u * (0.995 * 3300) / (4 * 4095)$	$o = (a * 0.082) + 9.5$
Kuvvet (LD2) (kg)	0-100 kg	$a = u * 3300 / (4 * 4095)$	$o = (a * 0.0312) - 0.25$

Deney düzeneğinin doğruluğu test edilirken bu tez çalışmasında kullanılan deney düzeneğine benzer yapıda olan çalışmalar kıyaslama amacıyla kullanılmıştır. Başlangıçta, PYK kontrol test düzeneğinin doğruluğu bir modelleme deneyiyle kontrol edilmiştir ve dolayısıyla Wickramtunge ve diğerleri tarafından ifade edilen doğrusal olmayan elastik ilişkiye çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan doğruluk testinin performansının tatmin edici (Wickramtunge ve Leephakpreda 2013) olduğu sonucuna varılmıştır. Dinamik özellikler analiz edildiğinde, PYK'nin uygulanan farklı basınç değerleri için farklı çalışma eğrilerine sahip olduğu ve bu eğrilerin Festo kas eğrilerine benzediği görülmüştür ve bu benzerlik ile sistemin doğru çalıştığı teyit edilmiştir.

### 3.2. Kayan Kip Kontrolör

Kayan Kip Kontrolü (SMC), dikkat çekici doğruluk, sağlamlık ve kolay ayarlama ve uygulama özelliklerine sahip doğrusal olmayan bir kontrol tekniğidir. Kayan Kip Kontrol (SMC) teorisi için ilk adım 1950'lerin başlarında "Değişken Yapı Kontrolü (VSC)" olarak atılmıştır. Değişken Yapı Kontrolü, stabilizasyon için sistem yapısının değişimini ifade etmektedir.

Değişken Yapı Kontrolü-Bileşen Sistemler için

- Her iki sistem de salınımlıdır ve yakınsak olarak kararlı değildir. "Birleştirilmiş" sistem yakınsak olarak kararlıdır. Kararlı bir yapı, iki kararsız yapı kullanılarak elde edilebilir.
- Bileşen sistemlerde bulunmayan özellik VSC tarafından elde edilir.Yani, bileşecek sistemlerde bulunmayan özellik birleştirilmiş sistemde bulunur.

Kayan Kip, sistem yörüngesinin, durum alanının "seçili" çizgisi/düzlemi/yüzeyi boyunca hareket etmesi olarak tanımlanmaktadır. Kayan Kip Kontrolü de kayma moduna ulaşmak amacıyla tasarlanmış genellikle Değişken Yapı Kontrolü (VSC) tipinde olan kontroldür.

Kayan Kip Kontrolü (SMC), sistemleri ve sistem durumlarını, kayan yüzey adı verilen durum alanındaki belirli bir yüzeyde çalıştırmak için tasarlanmıştır. Kayma yüzeyine ulaşıldığında, Kayan Kip Kontrolü, durumları kayma yüzeyinin yakın çevresinde tutar. Bu nedenle, Kayan Kip Kontrolü (SMC) iki parçalı bir kontrol tasarımıdır. İlk bölüm, kayan bir yüzeyin tasarımını içerir, böylece kayan yüzey, tasarım özelliklerini karşılar. İkincisi, anahtarlama yüzeyini sistem durumu için cazip hale getirecek bir kontrol kanununun seçimi ile ilgilidir.

Kayan Kip kontrolünün (SMC) iki ana avantajı vardır. Bunlardan birincisi, sistemin dinamik davranışının, kayan fonksiyonun özel seçimi ile şekillendirilebilmesi ve ikincisi de, kapalı döngü cevabı ile sistemin bazı belirsizliklere karşı tamamen duyarsız hale gelmesidir. Bu prensip, sınırlandırılmış olan parametre belirsizliklerini, bozucu unsuru ve nonlineerliği modellemeye dayanır. Pratik açıdan Kayan Kip Kontrolü, harici bozucu unsurlara ve yoğun model belirsizliklerine maruz kalan doğrusal olmayan sistemlerin kontrol edilmesini sağlar.

Kayan Modun Konsepti:

- Kayan manifold,  $(n-m)$  boyutuna sahip sistem durum uzayının bir alt uzayıdır.
- Tek bir yüzey olabilir veya birkaç yüzeyin kesişimi ile verilebilir.
- Durum yörüngesi kayan manifoldu sürekli olarak geçtiğinde, etrafındaki durum daima manifolda yöneldiğinden, kayan bir mod uygulanır.

Tasarım İçerikleri:

İki elemanın tasarlanması gerekir:

- Kayan moddaki sistemin istenen şekilde gelişmesi için kayan manifold tasarımı bunlardan birincisidir. Örneğin, doğrusallaştırmaya neden olur ve

durumu yakınsak olarak sifira ayarlanır veya bazı optimallik şartlarını yerine getirir.

- Bunlardan ikincisi, kayma modunu güçlendirmek için seçilmesi gereken “kontrol kanunu”dur.

Eşdeğer Sistem ve Özellikleri:

Kayma modunda sistemi tanımlayan, derecesi azaltılmış durum denklemine “eşdeğer sistem” denir. Eşdeğer sistemin dinamiği, kayan manifoldun uygun şekilde tasarlanmasıyla belirlenebilir.

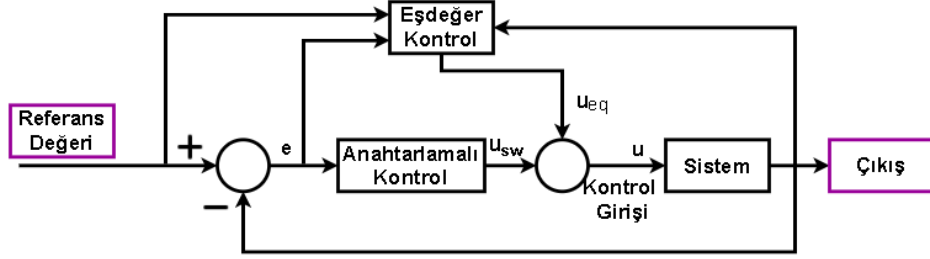
Kayan moddaki sistem iki ilginç özelliğe sahiptir. Bunlardan biri derece azaltma, yani, kayma modundaki sistem derecesinin  $n$ 'den  $n-m$ 'ye değiştirilmesidir. Bir diğeri de değişmezlik özelliğidir. Sistem “eşleşmiş belirsizliklere”, yani kontrol kanalı üzerinden sistemi etkileyen belirsiz terimlere duyarsızdır.

Sonuç Olarak:

- Sistemi değişken bir yapı sistemi yapan, değişken bir yapı kontrolü, dengeleyici bir etkiye sahip olabilir.
- Kayma modu uygulaması, kontrol kanununun seçimine (başlangıç koşullarını ve kayma değişkeni tanımını dikkate alarak doğru boyutlandırma ile) bağlıdır.
- Kayma modunda sistem azaltılmış/indirgenmiş derecededir (reduced order).
- Kayan moddaki sistem dinamiği isteğe bağlı olarak atanabilir.
- Kayan moddaki sistem iyi bir sağlamlık özelliğine sahiptir.

Kayan Kip Kontrolünün sistemlerde uygulanma şekli genel olarak Şekil 3.6'daki gibidir.





Şekil 3.6. Kayan Kip Kontrolün (SMC) Genel Yapısı

Kayan kip kontrolü (SMC), durum uzayında bir düzlem kullanan değişken bir yapı kontrolü (VSC) biçimidir. Bu düzleme kayan yüzey denir ve amaç durum hatalarını en aza indirerek durum değerlerini bu yüzeye yakın tutmaktır. İdeal olarak, durum değeri yüzeyden uzaktaysa, durum değerini kayan yüzeye doğru itmek için bir anahtarlama kazancı kullanılır. Yüzeyde bir kez, durumlar yüzey boyunca kayma modu adı verilen şekilde kayar. Anahtarlama, kontrol stratejisine doğal bir kararlılık ve sağlamlık getirirken, aynı zamanda pratikte istenmeyen ve modellenmemiş dinamikleri harekete geçirebilen çatırdamayı (yüksek frekanslı anahtarlama) da getirir (Slotine ve Li, 1991).

Kayma modu iki kısma ayrılır: eşdeğer kontrol terimi  $u_{eq}$  ve anahtarlama kontrol terimi  $u_{sw}$ . "Anahtarlama kontrol" terimi, durum değişkenini kayan yüzeyden kayma yüzeyine doğru itmeyi amaçlarken; "Eşdeğer kontrol" terimi, sistem modelini kullanarak durum değişkeninin kayan yüzey üzerindeki kayan yüzeye ulaşmasını sağlamayı amaçlamaktadır (Wang ve ark., 2001).

Tek giriş tek çıkışlı n'inci derece doğrusal olmayan sistemlerinin bir sınıfını dikkate aldığımızda:

$$\dot{x}^n = f(x, t) + g(x, t)u(t) + d(t) \quad (3.1)$$

$$\mathbf{x} = [x, \dot{x} \dots x^{(n-1)}]^T, \quad y = x \quad (3.2)$$

Burada,  $x = [x, \dot{x} \dots x^{(n-1)}]^T \in R^n$ , ölçüm için uygun olduğu varsayılan sistemin durum vektörüdür.  $f(x, t)$  ve  $g(x, t)$  sistemin bilinmeyen sürekli doğrusal olmayan fonksiyonlarıdır,  $u \in R^n$  ve  $y \in R^n$  sırasıyla sistemin girdisini ve çıktısını ifade etmektedir. Bozulmanın sınırlı olduğu, yani  $|d(t)| \leq D$  olduğu varsayılır. Kontrolün amacı, istenen  $x_d = [x, \dot{x} \dots x^{(n-1)}]^T$  durumunu izlemek için  $x = [x, \dot{x} \dots x^{(n-1)}]^T$  durumunu elde etmektir.

İzleme hatası genellikle aşağıdaki formdaki gibi verilmektedir:

$$e = x - x_d = [e, \dot{e} \dots e^{(n-1)}]^T \quad (3.3)$$

Kayma modu için "kayan yüzey" olarak adlandırılan anahtarlama işlevi aşağıdaki gibi seçilebilir:

$$s(x, t) = Ce = c_1 e + c_2 \dot{e} + \dots + c_{n-1} e^{(n-2)} + e^{(n-1)} \quad (3.4)$$

Kayan kip kontrolü (SMC) iki aşamaya ayrılmıştır. Bunlar,  $s(x, t) \neq 0$  olduğu yaklaşma fazı ve  $s(x, t) = 0$  olduğu kayma fazıdır. Kayma fazında  $s = 0$  ve  $\dot{s} = 0$  durumu vardır ve eşdeğer kontrol,  $u_{eq}$  system dinamiklerini kayan yüzeyde kalmaya zorlar.

Bu tez çalışmasında pnömatik yapay kasların kontrolü için model tabanlı kontrolör olarak, nonlinear dinamik sistemler için etkili ve uygun olduğu bilinen kayan kip kontrolü (SMC) kullanılmıştır. Ve bu kontrolör için pnömatik yapay kasın fenomenolojik modeli (Reynolds ve ark., 2003) tercih edilmiştir.

Bu çalışmada model tabanlı kontrolör deneyleri için kullanılan 3 elemanlı fenomenolojik modele göre bir kütleyi harekete geçiren pnömatik yapay kasın dinamiği, yay elemanı, sönümleyici eleman ve kasılma elemanının paralel konfigürasyonuna göre doğrusal olmayan şekilde modellenmektedir (Reynolds ve ark., 2003).

Bu 3 elemana karşılık gelen katsayılar pnömatik yapay kasın giriş basıncına bağlıdır. Ek olarak sönümlenme katsayısı pnömatik yapay kasın hava ile doldurulması veya havasının dışarı boşaltılmasına da bağlıdır. Kayan Kip Kontrolünde kullanılan fenomenolojik model için denklemler şu şekildedir:

$$M\ddot{x} + B(P)\dot{x} + K(P)x = F(P) - Mg \quad (3.5)$$

$$K(P) = K_0 + K_1P \quad (3.6)$$

$$B(P) = B_{0i} + B_{1i}P \quad (\text{kasılma} - \text{inflation}) \quad (3.7)$$

$$B(P) = B_{0d} + B_{1d}P \quad (\text{gevşeme} - \text{deflation}) \quad (3.8)$$

$$F(P) = F_0 + F_1P \quad (3.9)$$

Denklemden M, yüklerin kütlelerini; x, PYK'nin yer değiştirmesini; g, yerçekimi ivmesini ifade eder. P, PYK'nin iç hava basıncıdır. K(P) yay katsayısını gösterir. B(P), sönümlenme katsayısıdır ve PYK'nin basınçlandırılıp basınçlandırılmamasına bağlıdır. F(P), kasılma elemanı tarafından sağlanan etkili kuvvettir.

Denklemlerdeki katsayılar ise Xing ve arkadaşlarının (2012) yaptığı çalışma ile benzerlik kurularak belirlenmiştir. Buna göre katsayılar Çizelge 3.2'deki gibidir:

Çizelge 3.2. Fenomenolojik Modelin Parametreleri

Parametre	Katsayı Değeri
$F_0$	179
$F_1$	1.39
$K_0$	5.71
$K_1$	$3.07 \cdot 10^{-3}$
$B_{0i}$	1.01
$B_{1i}$	$6.91 \cdot 10^{-3}$
$B_{0d}$	6
$B_{1d}$	$-8.03 \cdot 10^{-4}$

PYK'nin dinamik davranışına göre Qian ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2015) denklem şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\ddot{x} = \frac{1}{M}(F_0 - B_0\dot{x} - K_0x - Mg) + \frac{1}{M}(F_1 - B_1\dot{x} - K_1x)P \quad (3.10)$$

$$y = x \quad (3.11)$$

Burada,  $y$  PYK'nin yörüngesidir,  $P$  PYK'nin basıncıdır,  $\dot{x}$  ve  $\ddot{x}$  sırasıyla sistemin istenen hızı ve ivmesidir.

Bu denklemlere göre,  $f(x, t)$  ve  $g(x, t)$  şu şekildedir:

$$f(x, t) = \frac{1}{M}(F_0 - B_0\dot{x} - K_0x - Mg) \quad (3.12)$$

$$g(x, t) = \frac{1}{M}(F_1 - B_1\dot{x} - K_1x) \quad (3.13)$$

Kontrol girişi  $u$ , eşdeğer kontrol terimi  $ueq$  ve anahtarlama kontrol terimi  $usw$  toplamıdır.

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (3.14)$$

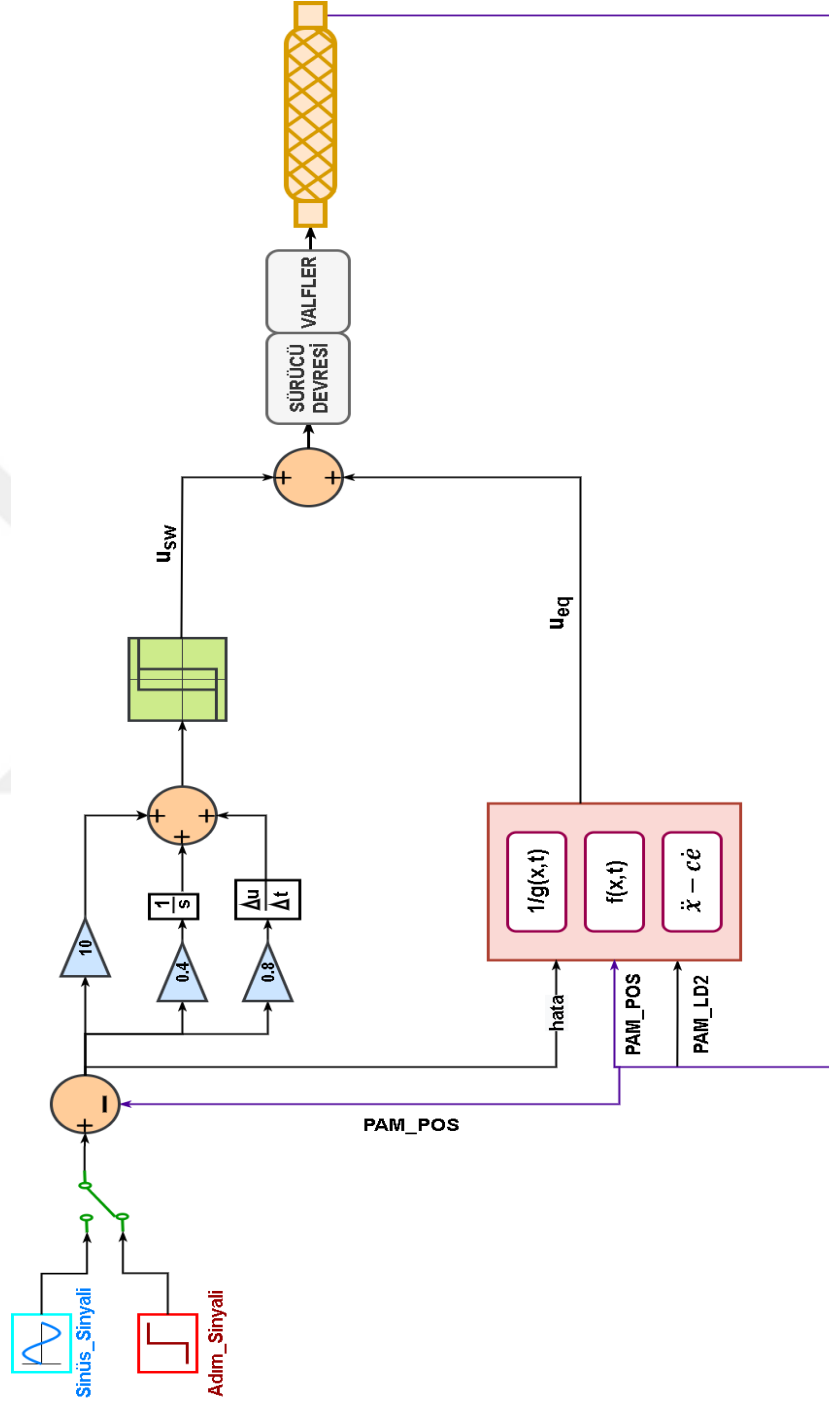
Burada,

$$u_{sw} = -\eta \operatorname{sgn}(s), \eta \geq D \quad (3.15)$$

$$u_{eq} = \frac{1}{g(x, t)} (-f(x, t) + \ddot{x} - c\dot{e}) \quad (3.16)$$

SMC'nin sağlamlığının ve sadeliğinin sağladığı avantajlara rağmen yaygın bir şekilde kullanılmasını engeleyen 2 temel sorun vardır. Bunlardan ilki, matematiksel olarak uygulamalı/pratik bir sistemi mükemmel bir şekilde modellemek imkansızdır ve her daim belirsiz dinamikler vardır. Özellikle PKA sistemlerinde sistem parametreleri tam olarak bilinmemektedir ve bazı parametreler de uygulama sırasında değişkenlik göstermektedir. Bunun yanı sıra kayan kip kontrolde (SMC), anahtarlama kontrolörün süreksiz olması ile sistemde kötü etkilere sebep olabilecek çatırdama ortaya çıkmaktadır (Qian ve ark., 2015).

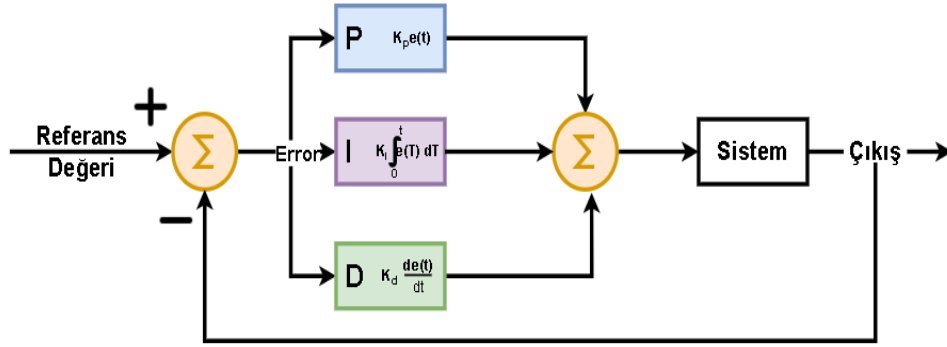
Tüm bu denklemler kullanılarak ve denklemdaki katsayılar için Çizelge 3.2'deki değerler kullanılarak Matlab/Simulink'te hem basınç kontrolü için hem de pozisyon kontrolü için (Şekil 3.7) Kayan Kip Kontrol (SMC) ile tasarımlar yapılmıştır.



Şekil 3.7. SMC ile Pozisyon Kontrolü

### 3.3. PID Kontrolör

Pnömatik yapay kasların kontrolü için incelenecek ikinci yöntem, modelden bağımsız kontrol yöntemlerinden biri olan PID (oransal, integral, türev) kontrolüdür. PID kontrolde P, şu anki hatayı, I geçmişteki hataların birikimini ve D, mevcut değişim oranına bağlı olarak gelecekteki hataların bir tahminini ifade etmektedir. Bir PID denetleyici sürekli olarak bir hata değerini, yani amaçlanan sistem durumu ile mevcut sistem durumu arasındaki farkı hesaplar. Kontrolör, süreç kontrol girdisini ayarlayarak hatayı en aza indirmeye çalışır. Aşağıda, Şekil 3.8’de PID kontrolörün genel yapısı verilmiştir.



Şekil 3.8. PID Kontrolün Genel Yapısı

PID kontrolör yapısı içinde oransal kontrolör, P, çıkışta mevcut hata değeri ile orantılı bir çıktı değeri üretir. Orantılı yanıt, hatayı orantılı kazanç sabiti olarak adlandırılan sabit bir  $K_p$  ile çarpılarak ayarlanabilir. Yani hata orantılı bir kazanç ile çarpılır ve bu şekilde yükselme süresini azaltmaya yardımcı olurken kalıcı durum hatasını hiçbir zaman ortadan kaldıramaz. İntegral kontrolör, I, zaman içindeki anlık hatayı toplar, integral kazancı,  $K_i$  ile çarpılır ve kontrolör çıkışına ekler. İntegral terimin katkısı, hem hatanın büyüklüğü hem de hatanın süresi ile orantılıdır ve integral terimi, sürecin ayar noktasına doğru hareketini hızlandırır ve orantılı kontrolörle ortaya çıkan kalıcı sabit durum hatasını ortadan kaldırır.

Bununla birlikte, integral terimi geçmişte birikmiş hatalara yanıt verdiği için, mevcut değerin ayar noktası değerini aşmasına neden olabilir. Yani, integral kontrolör, sabit durum hatasını azaltıcı etki eder ancak geçici cevabı daha kötü yapabilir. Bir türev kontrolör, hatanın zaman içindeki eğiminin belirlenmesi ve bu değişim oranının türev kazancı  $K_d$  ile çarpılmasıyla hesaplanır. Türev işlemi, sistem davranışını tahmin eder ve böylece sistemde yerleşme süresini ve kararlılığını iyileştirir. Bu sebeple türev kontrolör, çıkışın değişim hızını yavaşlatır, aşımı azaltır, sistem kararlılığının artmasına ve geçici cevabın düzelmesine etki eder. Her bir kontrolör parametresinin ( $K_p, K_d, K_i$ ) kapalı döngü bir sisteme etkisi, Çizelge 3.3'te özetlenmiştir.

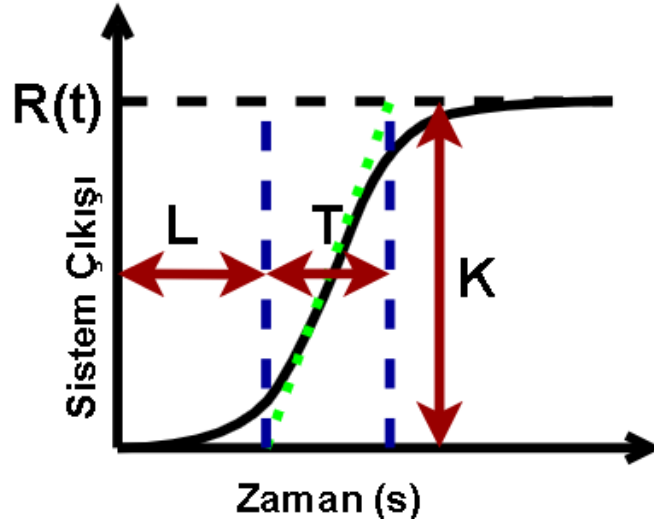
Çizelge 3. 3. PID Kontrol İçin Parametrelerin Etkisi

Kontrolör Parametresi	Yükselme Zamanı	Maksimum Aşım	Ayarlama Zamanı	Kalıcı Durum Hatası	Stabilite
$K_p$	Azalır	Artar	Küçük Değişim	Azalır	Bozulur
$K_i$	Azalır	Artar	Artar	Ortadan Kalkar	Bozulur
$K_d$	Küçük Değişim	Azalır	Azalır	Etki Etmez	$K_d$ küçükse artar

Bir PID döngüsünü ayarlamak için birkaç yöntem vardır. En etkili yöntemler genellikle bir tür süreç modelinin geliştirilmesini ve ardından dinamik model parametrelerine göre P, I ve D'nin seçilmesini içerir. PID kontrolde parametrelerin ayarlanması için kullanılan, Ziegler-Nichols (Z-N) yöntemi, manuel ayarlama, Cohen – Coon (C – C) yöntemi, dahili model kontrol (IMC) yöntemi gibi birkaç yöntem vardır (Tan ve ark., 2006). Bunlardan en yaygın bilineni ve kullanılanı Ziegler-Nichols yöntemidir (Ziegler ve Nichols, 1995). Bu yöntemin 2



uygulanma şekli vardır. Bunların ilkinde açık çevrimli sistemde kontrolörün çıkışına yani sistemin girişine bir basamak tepkisi uygulanır. Bu durumda sistemin çıkış eğrisi S-biçimli bir eğridir. Bu eğrinin maksimum noktasından teğet çizildiğinde, teğetin x eksenini kestiği nokta ile başlangıç noktası arasındaki zaman, ölü zamanı ( $L$ ), aynı nokta ile referans değeri ve teğetin kesiştiği noktadan x eksenine indirilen dikmenin kestiği nokta arasındaki fark ise zaman sabitini ( $T$ ) verir (Şekil 3.9). Elde edilen  $T$  ve  $L$  değerleri ile Çizelge 3.4'teki kurallardan faydalanılarak kontrolör parametreleri bulunur.



Şekil 3. 9.Sistemin açık çevrim basamak cevabı

Çizelge 3.4. Açık Çevrim Ziegler-Nichols PID Ayar Yöntemi

Kontrolör Tipi	$K_p$	$T_i=K_p/K_i$	$T_d=K_d/K_p$
<b>P</b>	$T/L$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0.9T/L$	$L/0.3$	0
<b>PID</b>	$1.2T/L$	$2L$	$0.5L$

Ziegler-Nichols yönteminin uygulanmasında ikinci yöntem, kapalı çevrim ile yapılır ve negatif geri beslemeli kontrol sisteminin basamak girişi ile sürekli

salınımda test edilmesine dayanır. Bu yöntem uygulanırken PID kontrolörün I ve D katsayıları başlangıçta 0 yapılır ve kontrolörün sadece oransal etki ile çalışması sağlanır. Sistemin girişine bir basamak girişi uygulanır ve  $K_p$  kazancı sıfırdan başlayarak sistemin çıkışında sürekli ve aynı genlikte salınım elde edilinceye kadar artırılır. Sistem osilasyona girdiği andaki P değerine  $K_u$  ve osilasyon frekansına  $P_u$  dendiğinde PID parametreleri Çizelge 3.5'te verilen kurallara bu değerler yerine konularak bulunur.

Çizelge 3. 5. Kapalı Çevrim Ziegler-Nichols PID Ayar Yöntemi

Kontrolör Tipi	$K_p$	$T_i=K_p/K_i$	$T_d=K_d/K_p$
<b>P</b>	0.5 $K_u$	$\infty$	0
<b>PI</b>	0.45 $K_u$	1/1.2 $P_u$	0
<b>PID</b>	0.6 $K_u$	0.5 $P_u$	0.125 $P_u$

Pnömatik yapay kas için önerilen kontrol stratejileri çalışmalarının çoğu karmaşık parametreler içermektedir ve karmaşık matematiksel denklemlerle bağlantılıdır. Ancak PID, basit yapısı sayesinde kontrol uygulamaları endüstrisinde mevcut en önemli seçenektir, çünkü son derece nonlineer sistemlerle uğraşırken zorlukla karşılaşılsa bile PID için dikkate alınması gereken sadece üç parametre mevcuttur. Bu nedenle araştırmacıların çoğu, PID kontrolörü tercih etmektedir (Jamian ve ark., 2020).

PID algoritması, kapalı döngü kontrolünde hata değerini azaltmak için üç terimli (P, I, D) kontrol yasası izlenerek verilir.

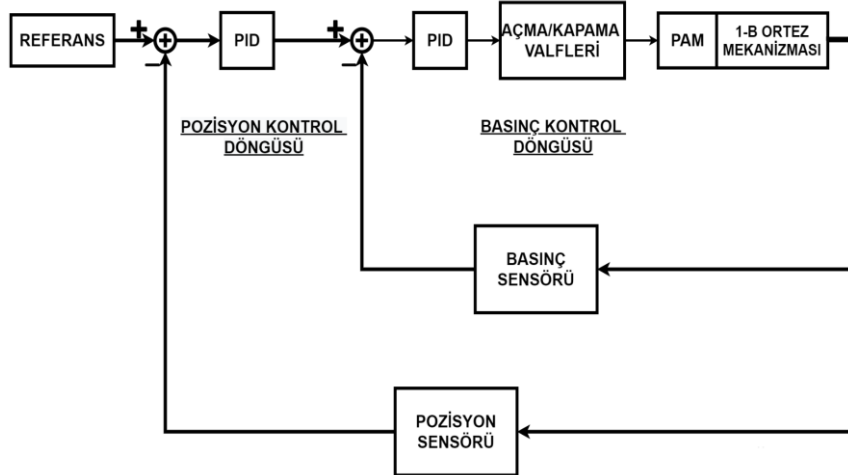
$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(\tau) d\tau + T_D \frac{d}{dt} e(t) \right]$$

Sezgisel olarak, mevcut değişim dikkate alınarak bu değerler zaman açısından şu şekilde yorumlanabilir; P mevcut hataya bağlıdır, I geçmiş hataların

toplamıdır ve D gelecekteki hataların bir tahminidir. Bu üç eylemin ağırlıklı toplamı ile kontrol edilen süreç, istenen seviyeyi ayarlamak için kullanılır. Çalışmamızda hem basınç kontrolü hem de pozisyon kontrolü için PID yöntemi uygulanmıştır. PID ayarlaması için Ziegler-Nichols reaksiyon hızı yöntemi kullanılmıştır (Ziegler ve Nichols, 1995).

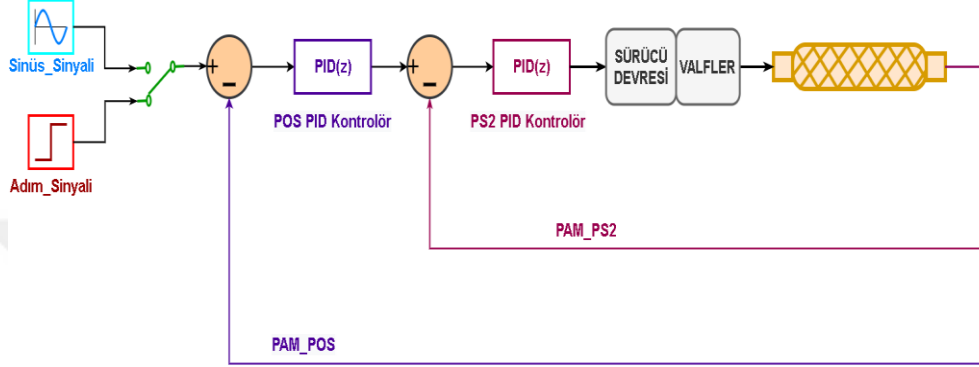
PID ile basınç kontrolü için basınç sensöründen gelen verilerin, referans basınç girişiyle kıyaslandığı geri beslemeli kontrolör yapısı kullanılmıştır. Sistemin adım yanıtını kullanarak Ziegler-Nichols reaksiyon hızı yöntemini uygularken, P, I ve D parametreleri  $K_p = 3$ ,  $T_i = 0.2$  ve  $T_d = 0.8$  olarak hesaplanmıştır.

Pozisyon kontrolü için Şekil 3.10'da görüldüğü gibi basınç ve pozisyon kontrolünden oluşan kaskat kontrolör kullanılmıştır. Pozisyon kontrolü için tek döngülü bir PID ve kaskat PID kontrolü uyguladık. Tek döngü pozisyon kontrolünün başarılı bir sonuç vermediğini gözlemlenmiştir. Bu nedenle, kaskat PID yaklaşımı kullanılmıştır. Konum kontrolü için, PYK'nin birincil kontrol girişi basınç olduğundan iç döngü basınç kontrolü olarak seçilir. Uygulamanın performansı sonuçlar bölümünde verilmiştir.



Şekil 3.10. PID Kaskat Kontrollör ile Pozisyon Kontrolü Blok Diyagramı

Kaskat kontrolör için basınç geri besleme kısmındaki P,I,D parameteri  $K_p = 4$ ,  $T_i = 1.2$  ve  $T_d = 0.7$  iken pozisyon geri besleme kısmındaki P,I,D parametreleri,  $K_p = 2$ ,  $T_i = 1$  ve  $T_d = 0.19$  değerine sahiptir.



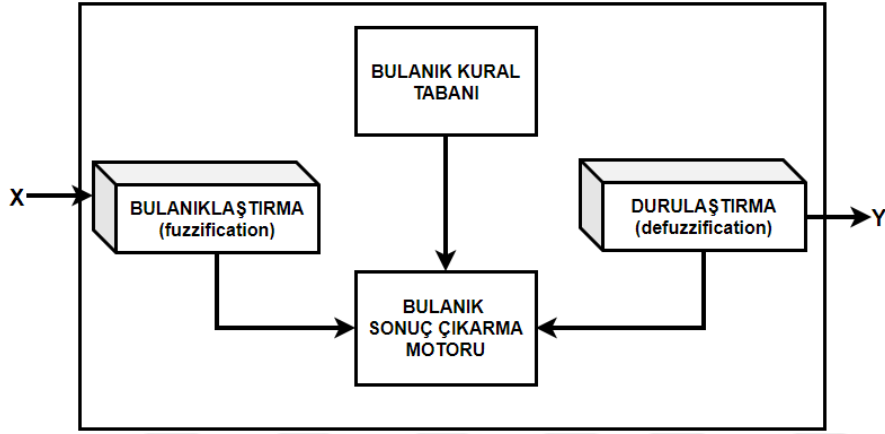
Şekil 3.11. PID Kaskat Kontrolör ile Pozisyon Kontrolü

Çalışma boyunca tüm kontrolör tasarımlarında, kontrolörlerin sinüs sinyali ve adım tepkisi blokları ortaktır. Bu bloklarda kullanılan uygulamaya göre sadece genlik değişikliği yapılmıştır. İstenen frekans değerinde ayarlanabilen sinüzoidal sinyal bu tez çalışması için 0.1 Hz, 0.5 Hz, 1 Hz frekanslarına ayarlanmıştır.

### 3.4. Bulanık PID Kontrolör

Bulanık mantık bir olayın ne dereceye kadar olduğunu, bir koşulun ne dereceye kadar var olduğunu ölçer. Çeşitli bulanık girdi ve çıktılara ait üyelik dereceleri, bir takım eğri kümeleri ile tanımlanır. Bulanık kümeler bulanık bir alan, yani belirlenen kuralların girdi ve çıktılar arasında oluşturduğu bütün birlikteliklerin kümesini temsil eden bulanık bir bölge oluşturacaktır. Bulanık alanın büyüklüğü, kuralın bulanıklığını ya da belirsizliğini yansıtır. Bulanık küme kesinleştikçe alan daha da küçülür. Bulanık mantığın amacı, bir giriş alanını bir çıkış alanına eşlemektir ve bunu yapmak için IF-THEN kuralları olarak adlandırılan birincil mekanizma listesi kullanılır. Bulanık bir sistemin temel

konfigürasyonu Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Modelden bağımsız bir kontrol algoritması olarak, bulanık mantık teorisi, doğrusal olmayan ve iyi tanımlanamamış sistemlerin kontrol problemleriyle başa çıkma konusunda sezgi temelli yaklaşımı kullanması ile büyük ilgi uyandırmaktadır (Qian ve ark., 2015).



Şekil 3.12. Bulanık bir sistemin temel konfigürasyonu

Burada “bulanıklaştırma (fuzzifier)” aşamasında gerçek dünyanın değerleri bulanık kümelerde üyelik değerlerine dönüştürülür. Daha sonra “Bulanık Sonuç Çıkarma Motoru” ile IF-THEN kuralları girdi ve çıktı uzayında tanımlı bulanık bir ilişkiye dönüştürülür. “Durulaştırma (defuzzifier)” kısmında ise bulanık küme gerçek dünyanın değerlerine dönüştürülür.

Bulanıklaştırma aşamasında kullanılan üyelik fonksiyonu (MF), giriş alanındaki her noktanın 0 ile 1 arasındaki bir üyelik değerine nasıl eşlendiğini tanımlayan bir eğridir.

Bir bulanık A kümesi U uzayında tanımlanan ve  $[0,1]$  aralığında değerler alabilen  $\mu_A(x)$  üyelik fonksiyonu ile karakterize edilen kümedir

$$A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in U\}$$

şeklinde gösterilir.

Üyelik fonksiyonunun aldığı değerlere üyelik değerleri denir.  $\mu_A(x)$ ,  $x$ 'in bu uzaya ne kadar üye olduğunun ölçüsüdür.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{ise, } x \text{ tamamen } A \text{ kümesinin üyesidir.} \\ (0,1) & \text{ise, kısmen } A \text{ kümesinin üyesidir.} \\ 0 & \text{ise, } A \text{ kümesinin üyesi değildir.} \end{cases}$$

Üyelik fonksiyonlarının şekli tecrübeye göre veya data toplandıktan sonra ilgili parametre ayarları yapıp seçilir. Matlab Bulanık Araç Kutusunda kullanılacak, trimf (üçgensel), trapmf (ikizkenar yamuk şeklinde) gaussmf (gauss eğrisi şeklinde) vb. gibi 11 üyelik fonksiyonu bulunmaktadır.

Bulanık sonuç çıkarma işlemi, bulanık mantık kullanarak girdilerden çıktı elde etme işlemidir. Bulanık sonuç çıkarımında, bulanık üyelik fonksiyonları, üyelik değerleri, IF-THEN kuralları ve bulanık mantık operatörleri kullanılır. Tüm kurallar paralel olarak değerlendirilir ve kuralların sırası önemsizdir. Kurallar yararlıdır çünkü değişkenlere ve bu değişkenleri tanımlayan sifatlara atıfta bulunurlar. Kuralları yorumlayan bir sistem kurabilmeniz için kullanmayı planladığınız tüm terimleri ve bunları tanımlayan sifatlara tanımlamanız gerekir. İnsan bilgi ve tecrübesi ile IF-THEN kuralları kullanılarak sistemlerin kontrolü gerçekleştirilebilir.

IF <bulanık önerme>, THEN <bulanık önerme>

IF-THEN kurallarının yorumlanması 3 aşamalı bir süreçtir:

1. **Girdileri Belirsizleştirme:** Öncüldeki tüm bulanık ifadeleri 0 ile 1 arasında bir dereceye kadar üyelik derecesine getirilir.
2. **Bulanık Operatörü Çoklu Parça Öncüllerine Uygulama:** Öncülde çok sayıda parça varsa bulanık mantık operatörlerini uygulanır ve öncül parça 0 ile 1 arasındaki tek bir sayıya çözümlenir. Bu, kural için destek derecesidir.

3. **Çıkarım Yöntemini Uygulama:** Çıktı bulanık kümesini biçimlendirmek amacıyla kuralın tamamı için destek derecesi kullanılır. Bulanık kural ile çıktıya bulanık küme atanır. Bu bulanık küme, sonucun niteliklerini belirtmek için seçilen bir üyelik fonksiyonu ile temsil edilir. Öncül kısmen doğruysa, yani 1'den küçük bir değere sahipse, çıktı bulanık küme uygulama yöntemine göre kesilir. Genel olarak, tek kural tek başına etkili değildir. 2 veya daha fazla kural gereklidir. Her kuralın çıktısı bulanık bir kümedir. Her kural için çıkış bulanık kümeleri daha sonra tek bir çıkış bulanık kümesinde toplanır.

Bir çıktı eğrisi bulanık mantık biçimindeyken ikili (binary) sisteme göre çalışan denetleyicilere yardımcı olamaz. Bu nedenle son adım, bulanık çıktı eğrisinin sayısal tek bir değere dönüştüğü “durulaştırma” (defuzzifier) sürecidir. En yaygın durulaştırma tekniği eğri altında kalan alanın ağırlık merkezinin hesaplanmasıdır.

Tüm bu ‘Bulanık Kontrol’ işlem adımları Matlab ile yapılabilir. Bunun için Matlab içerisinde yer alan “Fuzzy Logic Toolbox”ı kullanılır. Fuzzy Logic Toolbox’ta bir sistemi kurmak, kontrol etmek ve gözlemlemek için dinamik olarak birbirine bağlı 5 temel GUI aracı vardır:

1. Bulanık Sonuç Çıkarma Sistemi Editörü (Fuzzy Inference System-FIS)
2. Üyelik Fonksiyonu Editörü (Membership Function editör)
3. Kural Editörü (Rule Editor)
4. Kural İzleyicisi (Rule Viewer)
5. Yüzey İzleyicisi (Surface Editor)

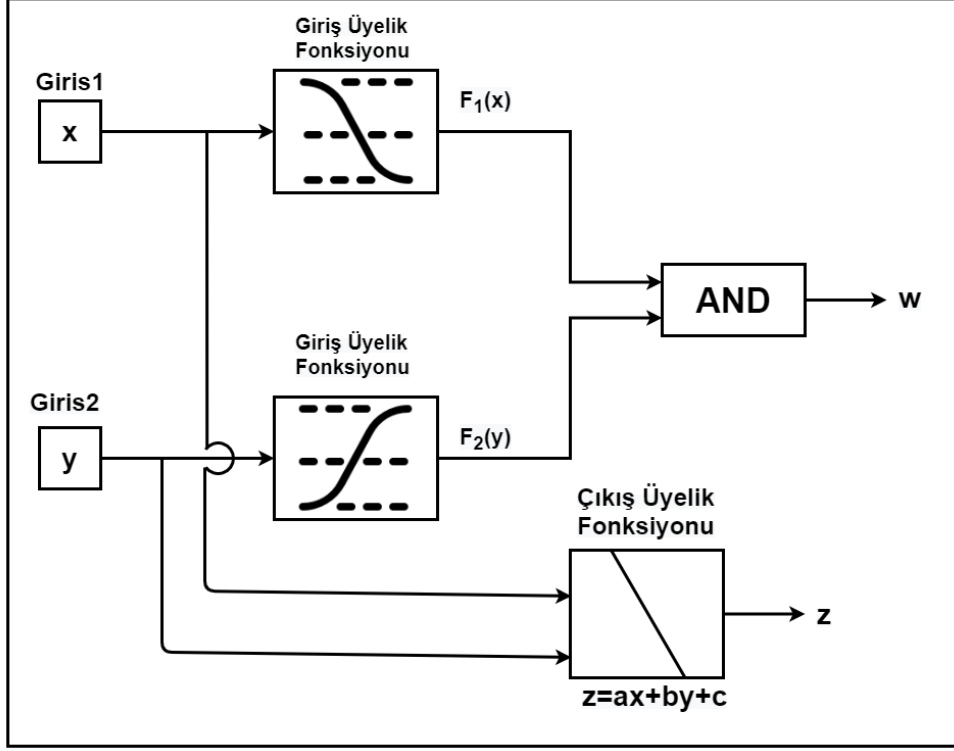
Burada Kural İzleyicisi bloğu, Bulanık Mantık Kontrolör bloğunun bir uzantısıdır ve simülasyon esnasında kuralların nasıl kullanıldığını görmemizi

sağlar. Fuzzy Logic Toolbox'ta Bulanık sonuç çıkarma için Mamdani ve Sugeno yöntemleri yer alır ve çalışmaya göre bunlardan biri seçilebilir.

Mamdani tip bulanık çıkarım yöntemi, bulanık küme teorisi kullanılarak yapılan ilk kontrol sistemleri arasındadır ve ayrıca en sık görülen bulanık metodolojisidir. Toolbox için tanımlanan Mamdani tip çıkarım, çıktı üyelik fonksiyonlarının bulanık kümeler olmasını bekler. Yani, agregasyon (toplama/kümeleme) işleminden sonra durulaştırma (defuzzification) gerektiren her çıktı değişkeni için bulanık bir küme vardır. Mamdani tipi bulanık kontrolörün üyelik işlevlerinin seçimi ve bulanık kurallarının tasarımı uzman deneyimlerine bağlıdır, bu da kontrolörün öznelliğini o kadar güçlü kılar ki, teorik olarak güvenilir ve titiz değildir ve bulanık kuralları değiştirmek için çok sayıda ayarlama ihtiyacı duyulabilir.

Sugeno tip bulanık çıkarım yöntemi, Takagi-Sugeno (T-S) tarafından önerilmiştir ve doğrusal olmayan bir sistemin lokal girdi-çıkı ilişkilerini temsil eden, bulanık IF-THEN kuralları ile tanımlanmaktadır. Bu yöntemde, bulanık çıkarımın ilk iki aşaması olan girişlerin bulanıklaştırılması ve bulanık operatörün uygulanması, Mamdani yöntemi ile aynıdır. Mamdani ile sugeno arasındaki temel fark, Sugeno çıktı üyelik fonksiyonlarının doğrusal veya sabit olmasıdır (Şekil 3.13). Şimdiye kadar, T-S bulanık mantık kontrolü, robot kontrolünde (Yang ve ark., 2015) kapsamlı bir şekilde benimsenmiştir. Dolayısıyla, T-S bulanık mantık kontrolü, PYK'lerin yüksek hassasiyetli izleme kontrolünde uygun bir seçimdir (Chen ve ark., 2019). Sugeno tip bulanık kontrolörün oldukça düşük hesaplama karmaşıklığı olmasından dolayı gerçek zamanlı kontrol uygulamaları için daha uygun olduğu görülmüştür (Tóthová ve Pítel, 2015).





Şekil 3.13. Sugeno Tip Bulanık Çıkarımının Gösterimi

Bir Sugeno tip bulanık modelinde tipik bir kural vardır:

$$IF \text{Giris1} = x \text{ ve } \text{Giris2} = y \quad THEN \text{Çıktı } z = ax + by + c$$

Zero-order Sugeno modeli için  $z$  sabittir (yani  $a = b = 0$ ).

Her  $z_i$  çıkışı kuralın  $w_i$  ağırlık oranına bağlıdır. Örneğin  $\text{Giris1} = x$  ve  $\text{Giris2} = y$  olan AND kuralı için  $F_{1,2}(\cdot)$   $\text{Giris1}$  ve  $\text{Giris2}$  için üyelik fonksiyonları olmak üzere,

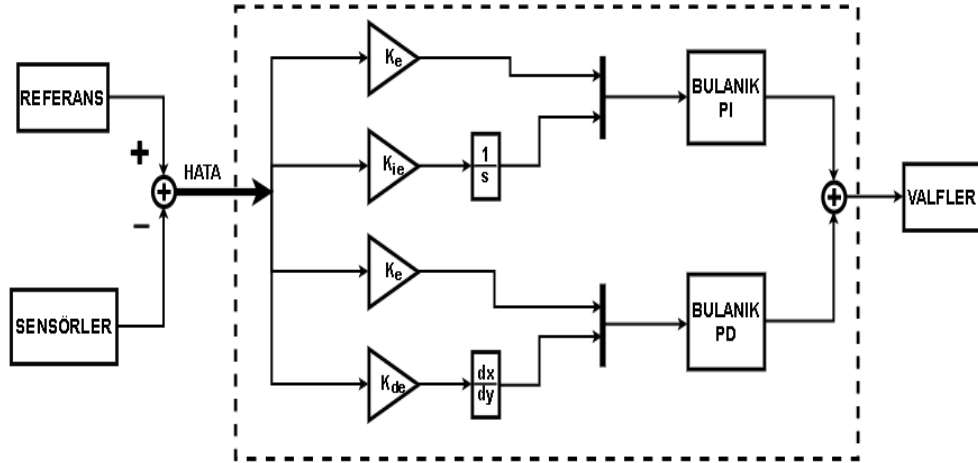
$$w_i = \text{AndMethod}(F_1(x), F_2(y))$$

N kuralların sayısı olmak üzere sistemin son çıktısı şu şekilde hesaplanır:

$$\text{Son Çıktı} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

Denklemden N, kuralların sayısı olmak üzere, son çıktısı, tüm kural çıktılarının ortalamasıdır.

Bu çalışmada bulanık PID kontrolör tasarımı yapılırken, bulanık PI ve bulanık PD kontrolörlerinin kombinasyonundan oluşan bulanık PID kontrolör yapısı seçilmiştir. Şekil 3.14, bulanık PID kontrolörün genel blok diyagramını gösterir. Her iki bulanık blok da Sugeno tipi kontrolörlerdir. Bulanık PI ve bulanık PD kontrolörleri aynı anda ve ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, sonuçlar kontrolörün nihai çıktısı olarak birleştirilir. Bulanık PD için girişler hata ve hatanın türevi iken bulanık PI için girişler hata ve hatanın integralidir ve tüm girişler uygun kazançlara sahiptir. Hata miktarı, referans değer ile sensörlerden gelen veriler arasındaki farktan hesaplanır. Kazançlar hata için  $K_e$ , hatanın türevi için  $K_{de}$  ve hatanın integrali için  $K_{ie}$  ile gösterilir. Çizelge 3.6'da bulanık kurallar verilmiştir ve  $f(e)$  hem PD hem de PI uygulaması için kullanılan kural fonksiyonunu göstermektedir. Basınç kontrolü ve pozisyon kontrolü için benzer mantık kullanılmıştır (Jantzen, 1998).

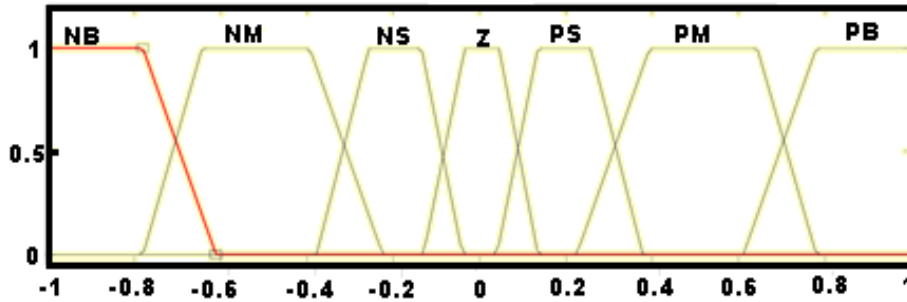


Şekil 3.14. Bulanık PID Kontrolör (Hošovský,2009)

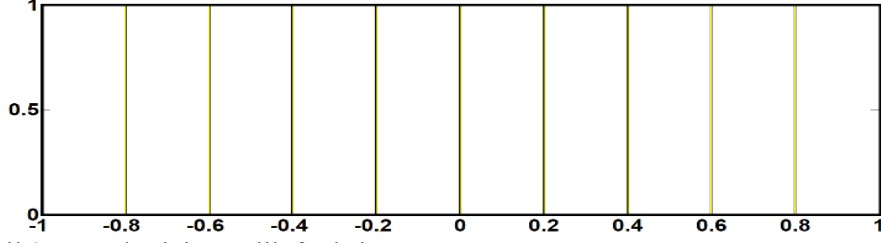
Çizelge 3.6. Bulanık PI ve PD bloklar için bulanık kurallar

$f(e)$ e	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	-0.8	-0.67	-0.53	-0.4	-0.26	-0.13	0
NM	-0.67	-0.53	-0.4	-0.26	-0.13	0	0.13
NS	-0.53	-0.4	-0.26	-0.13	0	0.13	0.26
Z	-0.4	-0.26	-0.13	0	0.13	0.26	0.4
PS	-0.26	-0.13	0	0.13	0.26	0.4	0.53
PM	-0.13	0	0.13	0.26	0.4	0.53	0.67
PB	0	0.13	0.26	0.4	0.53	0.67	0.8

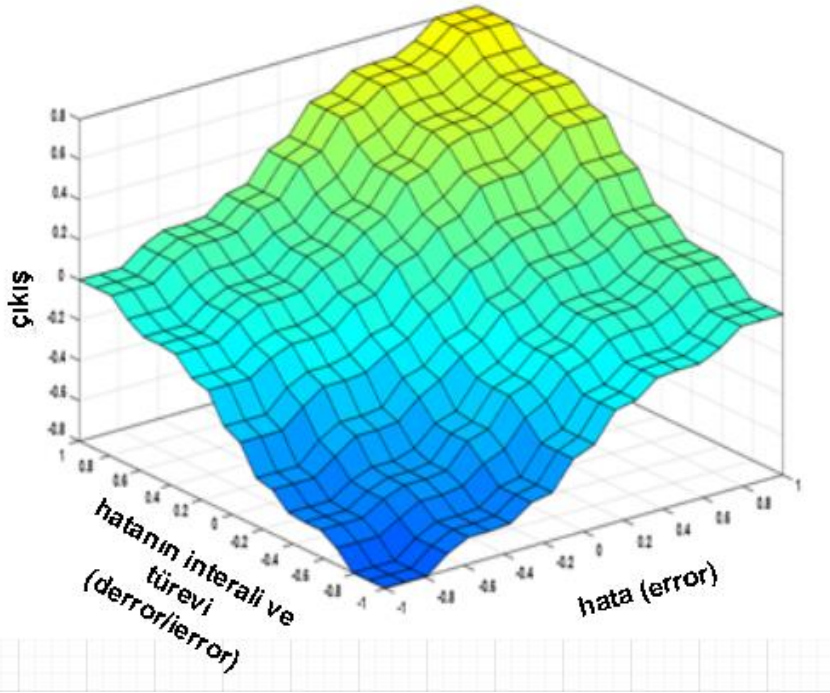
Bulanık PID kontrolörü için, hata, hatanın türevi ve hatanın integrali, bulanık üyelikler kullanılarak bulanık girdiler olarak değerlendirilir ve çıkarım mekanizması (inference mechanism) bulanık çıktı verir. Bulanık çıktının bulanıklığı giderilir ve ortaya çıkan PWM sinyali, geri bildirimle sistem kontrolü sağlamak için valflere gönderilir. Şekil 3.15'te gösterildiği gibi, yamuk üyelik fonksiyonları, [-1 1] aralığındaki girişler için seçilir. Yedi üyelik işlevi şu şekilde temsil edilir: NB: Negatif Büyük, NM: Negatif Orta, NS: Negatif Küçük, Z: Sıfır, PS: Pozitif Küçük, PM: Pozitif Orta ve PB: Pozitif Büyük. Şekil 3.16, Sugeno sıfır-derece tipini kullanan çıktı üyelik fonksiyonlarını gösterir. Şekil 3.17'de, bulanık PID kontrolör için kontrol yüzeyi verilmiştir.



Şekil 3.15. Girdiler (hata, hatanın türevi, hatanın integrali) için üyelik fonksiyonları

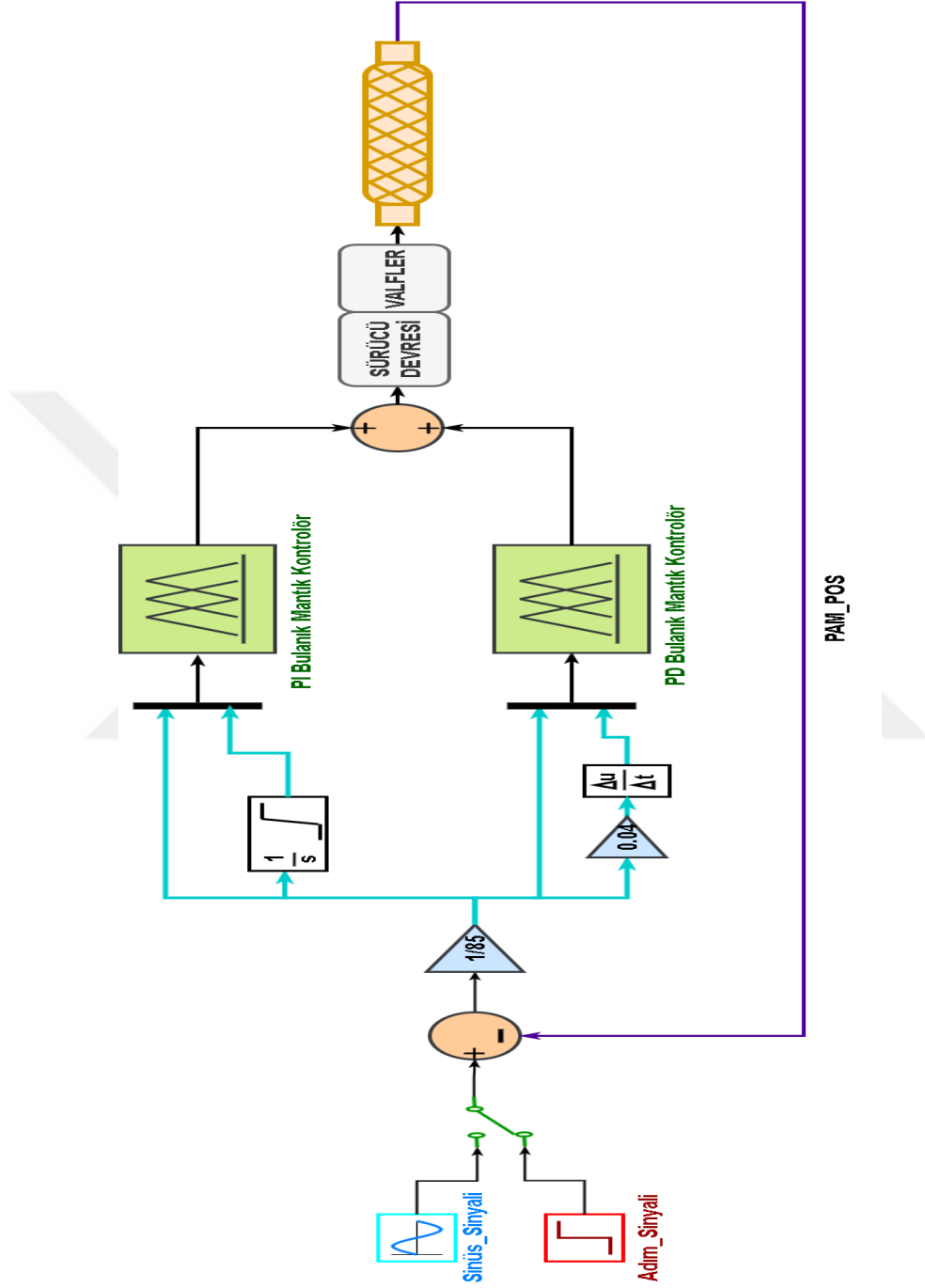


Şekil 3.16. Çıktı için üyelik fonksiyonu



Şekil 3.17. Bulanık PID için Kontrol Yüzeyi

Şekil 3.18'de bulanık PID kontrolör ile pozisyon kontrolü için Simulink blokları verilmiştir. Tüm kontrolör yapılarında olduğu gibi kontrolör çıkışı, PWM sinyaline dönüştürülerek sürücü devresi ile aç/kapa valflere gönderilmektedir. Kontrolör çıkışından valflere aktarılan sinyal ile pnömatik yapay kasın basınç ve/veya pozisyon bilgisi ve referas girişleri kıyaslanarak elde edilen hata değerine göre hava giriş valfinin veya egzoz valfinin açılması sağlanır.



Şekil 3.18. Bulanık PID Kontrolör ile Pozisyon Kontrolü



#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada pnömatik yapay kasların pozisyon kontrolü için, doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde kullanılan, model tabanlı ve modelden bağımsız olmak üzere 2 ana yaklaşımı temel alan kontrolörler kullanılmıştır. Bunlardan model tabanlı yaklaşım için “Kayan Kip Kontrolü” (SMC) kullanılırken, modelden bağımsız yaklaşımda “PID Kontrol” ve “Bulanık PID Kontrol” kullanılmıştır. Bu kontrolör yaklaşımları uygulanırken kullanılan sistemde pnömatik yapay kas, hızlı aç/kapa valfleri ile çalıştırılmaktadır.

Pozisyon kontrolü için birincil değişken olan basınç kontrol edilmeden pozisyon kontrolünün oldukça zor olacağı düşünüldüğünden ilk olarak pnömatik yapay kasın basınç kontrolü incelenmiştir.

Hem basınç hem de pozisyon kontrolü deneyleri gerçekleştirilirken kontrol yöntemlerinin performansı, adım yanıtı ve referans sinüzoidal sinyal takibi kullanılarak değerlendirilmiştir. Kontrolörler hem PYK'nin basınç kontrolü hem de 1-B deneysel ortezin konum kontrolü için uygulanmıştır.

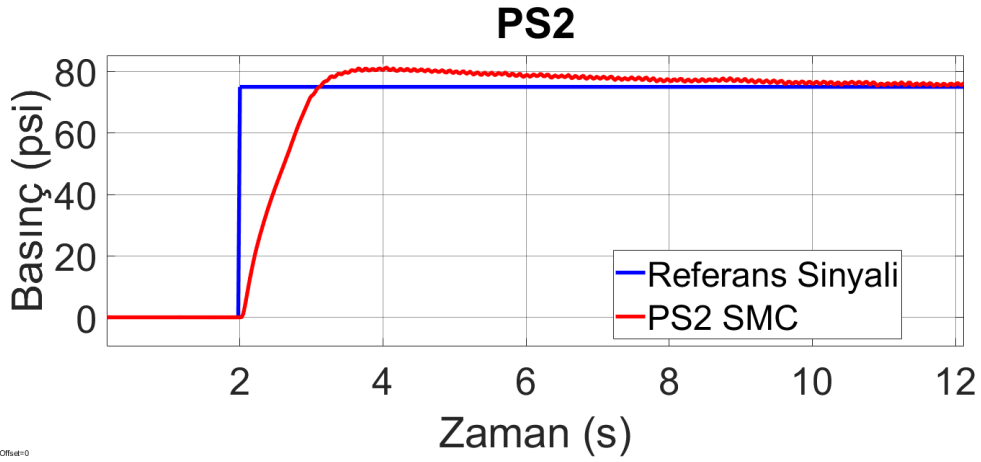
İnsan kas iskelet sisteminde mafsallı eklemler için eklem dönme hızı 100 derece/saniye'dir. Bu durumda bir rehabilitasyon cihazında egzersiz için 1 Hz döngü frekansı, gerekli fizyoterapi egzersiz aralıklarından fazladır. Bu nedenle kontrol deneylerinden referans sinüs sinyal takibi için 0.1 Hz ve 0.5 Hz frekansları seçilmiştir. Rehabilitasyon için kol ortezinin hareket aralığı (ROM), PYK'de yaklaşık olarak 5-75 psi basınç aralığına karşılık gelen döngüsel pasif egzersiz için -15 ile 70 derece arasında seçilmiş ve 14.84 kg sabit ağırlık ile deneyler yapılmıştır. Salınımı önlemek amacıyla basınç akışını azaltmak için akış kısma valfleri kullanılmıştır.

Aşağıda 2 alt bölümde, performans testi sonuçları model tabanlı ve modelden bağımsız tüm kontrol modları için basınç kontrolü ve pozisyon kontrolü için gruplanmış olarak verilmiştir.

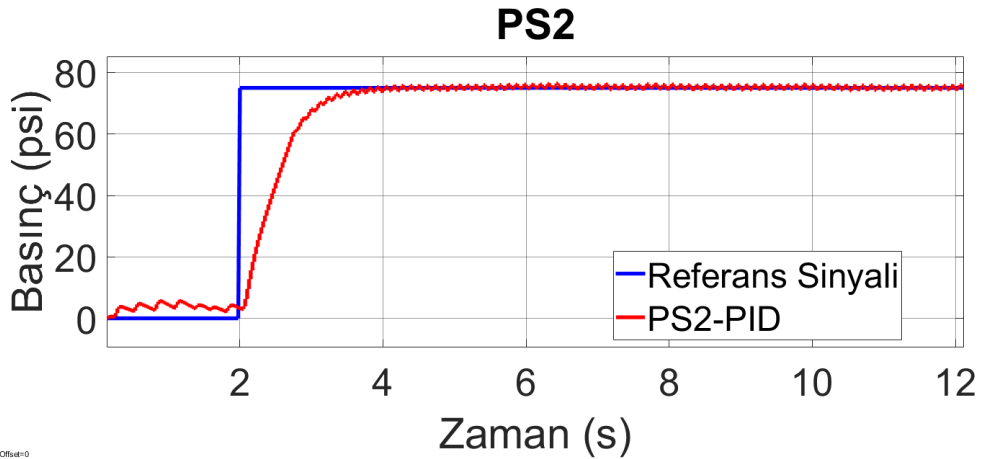
#### 4.1. Basınç Kontrolü

Pnömatik yapay kas kontrolünün birincil/temel değişkeni basınç olduğu için çalışmada öncelikli olarak basınç kontrolü yapılmıştır. Basınç kontrolü yapılırken hem adım tepkisine hem de sinüzoidal basınç sinyali takibine bakılmıştır.

Şekil 4.1- 4.2 ve 4.3'te PYK'nin basınç kontrolünde adım tepkisine olan yanıtlar, kayan kip kontrolü (SMC), PID ve bulanık PID kontrol için verilmiştir.

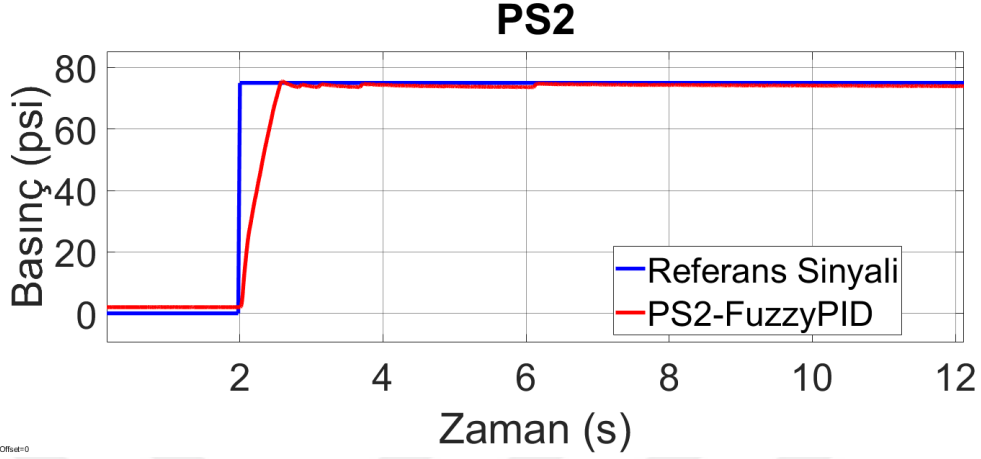


Şekil 4.1. Kayan Kip Kontrolör (SMC) ile Basınç Kontrolü için Adım Tepkisi



Şekil 4.2. PID Kontrolör ile Basınç Kontrolü için Adım Tepkisi





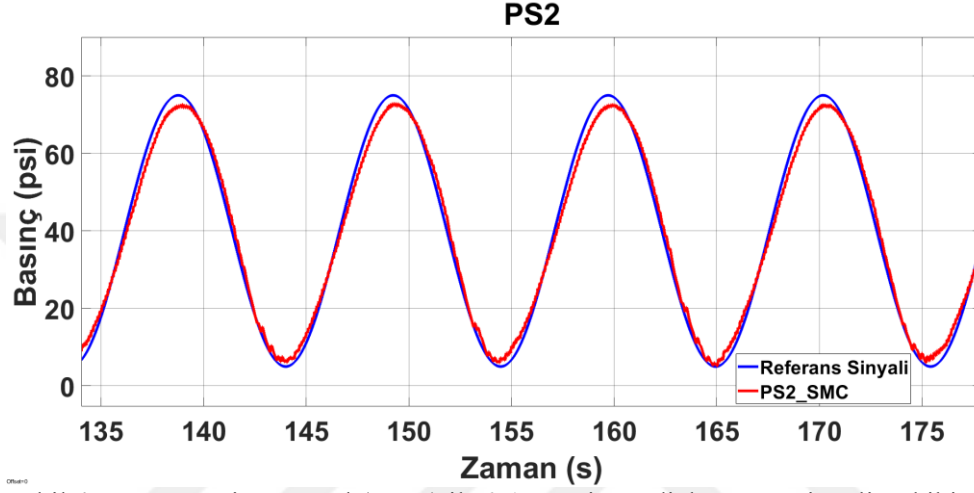
Şekil 4.3. Bulanık PID Kontrolör ile Basınç Kontrolü için Adım Tepkisi

Şekil 4.1- 4.2 ve 4.3'te ve Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi, geleneksel PID kontrolü ve bulanık PID kontrolünde aşma olmamasına rağmen, kayan kip kontrolünde %8'lik bir aşma meydana gelmiştir. Geleneksel PID ile basınç kontrolü için adım tepkisi yanıtında, yaklaşık  $\pm 0.8$  psi aralığında bir salınım gözlenirken, kayan kip kontrolünde yaklaşık  $\pm 3$  psi aralığında bir salınım gözlemlenmiştir. Bulanık PID'de ihmal edilebilir küçük bir sabit durum hatası olmasına rağmen geleneksel PID kontrol ve kayan kip kontrole kıyasla salınım yok denebilecek düzeydedir.

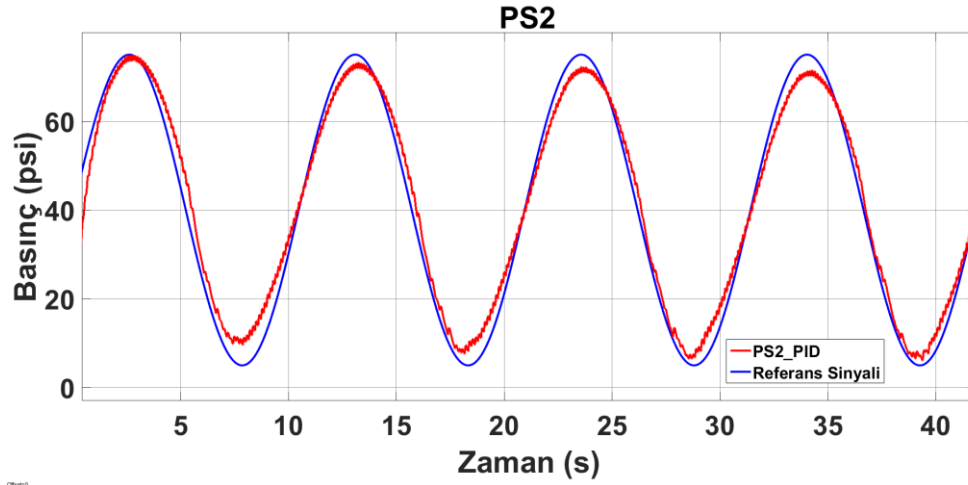
Çizelge 4.1. Basınç kontrolü için uygulanan Kayan Kip, PID ve Bulanık PID Kontrolü Sonuçları

Kontrolör	Aşma (%)	Yükselme Zamanı (s)	Kalıcı Durum Hatası (psi)
Kayan Kip Kontrolü Control SMC)	8	2.1	3
PID Kontrol	~0	3.6	0.8
Bulanık PID Kontrolü	~0	1.1	1.3

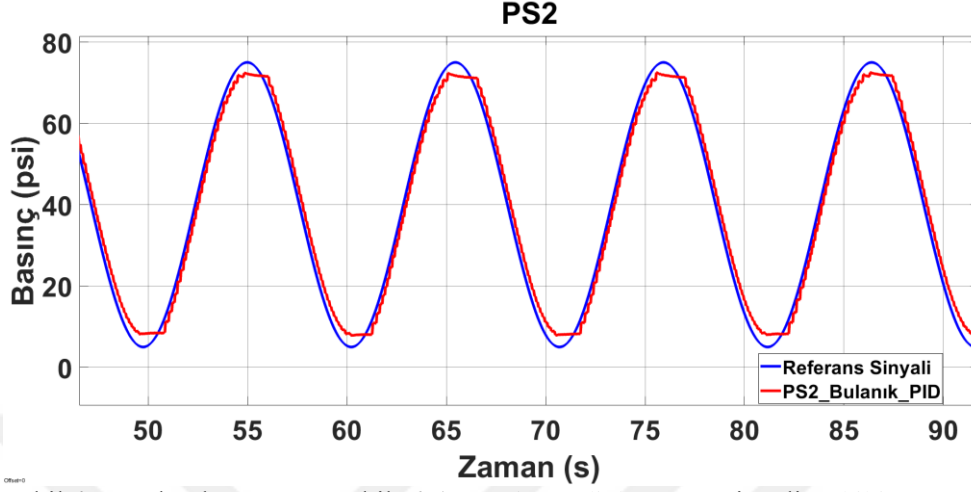
Şekil 4.4- 4.5 ve 4.6’da basınç kontrolünde sırasıyla kayan kip kontrolü (SMC), PID kontrol ve bulanık PID kontrolü için 0.1 Hz frekansındaki sinüzoidal basınç sinyali takibi sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.4. Kayan Kip Kontrol (SMC) ile 0.1 Hz Sinüzoidal Basınç Sinyali Takibi

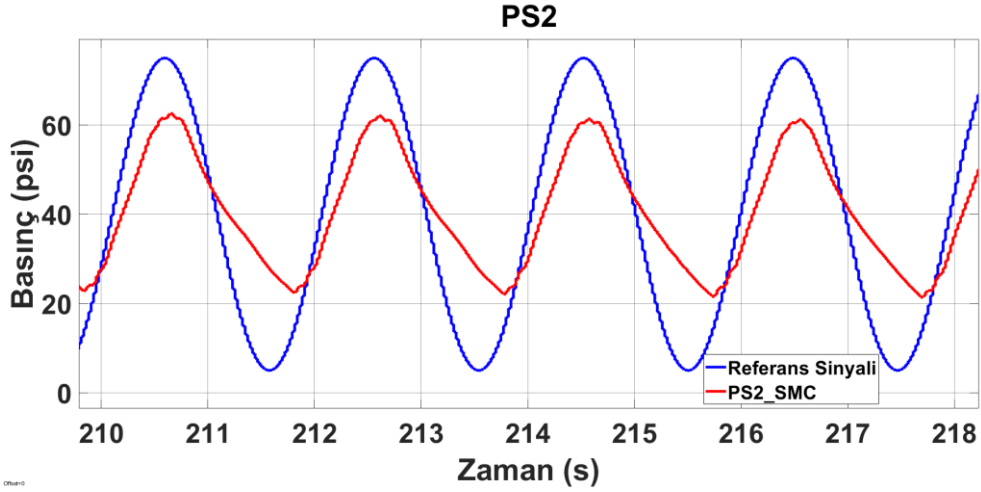


Şekil 4.5. PID Kontrol ile 0.1 Hz Sinüzoidal Basınç Sinyali Takibi

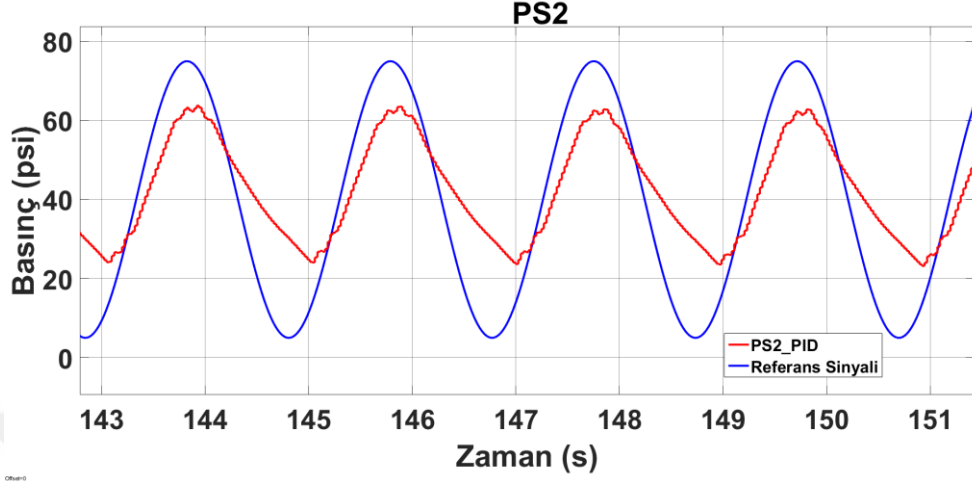


Şekil 4.6. Bulanık PID Kontrol ile 0.1 Hz Sinuzodial Basiñç Sinyali Takibi

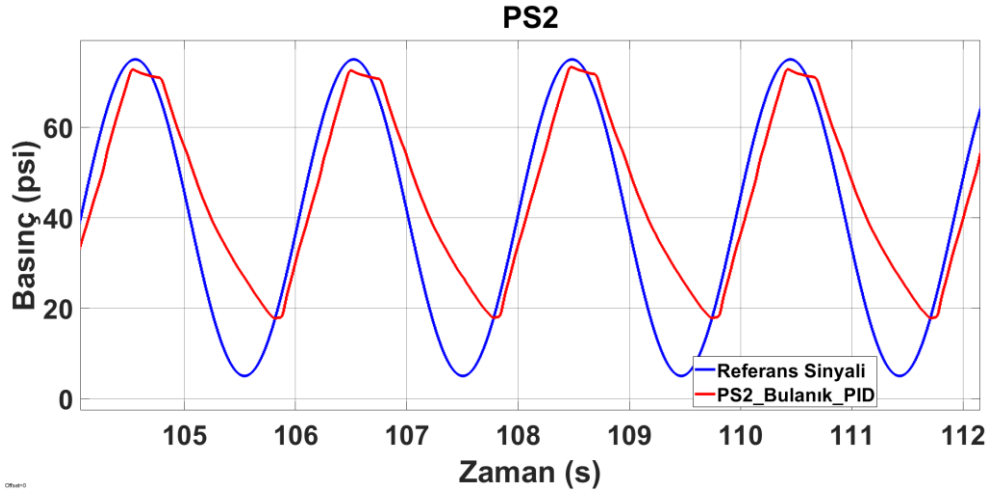
Şekil 4.7- 4.8 ve 4.9’da basıñç kontrolünde sırasıyla kayan kip kontrolü (SMC), PID kontrol ve bulanık PID kontrolü için 0.5 Hz frekansındaki sinüzodial basıñç sinyali takibi sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.7. Kayan Kip Kontrol (SMC) ile 0.5 Hz Sinuzodial Basiñç Sinyali Takibi



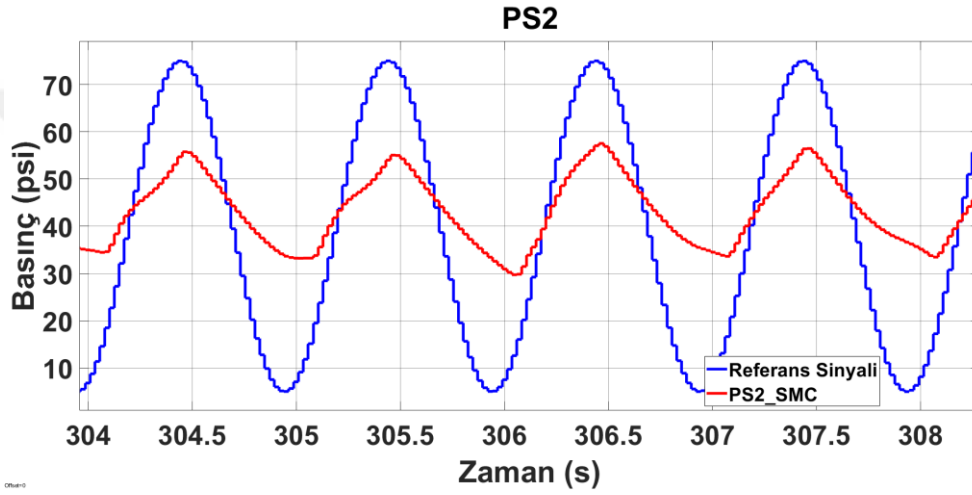
Şekil 4.8. PID Kontrol ile 0.5 Hz Sinuzodia Basınç Sinyali Takibi



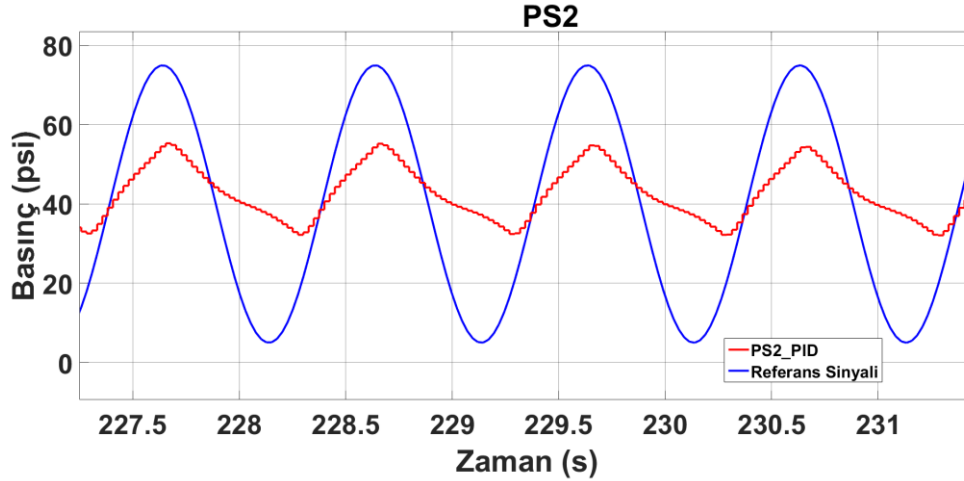
Şekil 4.9. Bulanık PID Kontrol ile 0.5 Hz Sinuzodial Basınç Sinyali Takibi

Basınç kontrolünde sinuzodial referans basınç sinyali takibi sonuçları incelendiğinde frekans arttıkça hatanın arttığı görülmektedir. Şekil 4.4- 4.5 ve 4.6'da görüldüğü gibi, 3 kontrolör de 0.1 Hz frekansta sinüzoidal referans sinyali takibinde iyi performans göstermiştir. Ancak, Şekil 4.7- 4.8 ve 4.9'da görüldüğü gibi, frekansın 0.5 Hz'e yükselmesiyle Bulanık PID, akış kısma valfinin neden olduğu olumsuz bir hataya rağmen en iyi performansı göstermektedir.

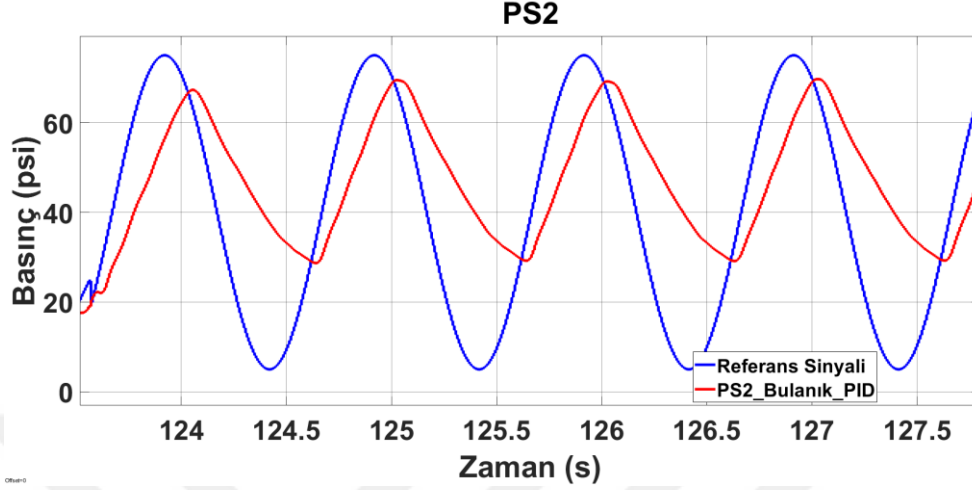
Bir rehabilitasyon cihazında egzersiz için gerekli fizyoterapi egzersiz aralıklarından fazla olmasına rağmen, pnömatik yapay kasa hava giriş çıkışı sağlayan aç/kapa valflerinin sınırlarını görmek amacıyla basınç kontrolü deneyleri 1 Hz ile de yapılmıştır. Aşağıda, Şekil 4.10- 4.11 ve 4.12’de’te basınç kontrolünde sırasıyla kayan kip kontrolü (SMC), PID kontrol ve bulanık PID kontrolü için 1 Hz frekansındaki sinüzoidal basınç sinyali takibi sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.10. Kayan Kip Kontrol (SMC) ile 1 Hz Sinüzoidal Basınç Sinyali Takibi



Şekil 4.11. PID Kontrol ile 1 Hz Sinüzoidal Basınç Sinyali Takibi



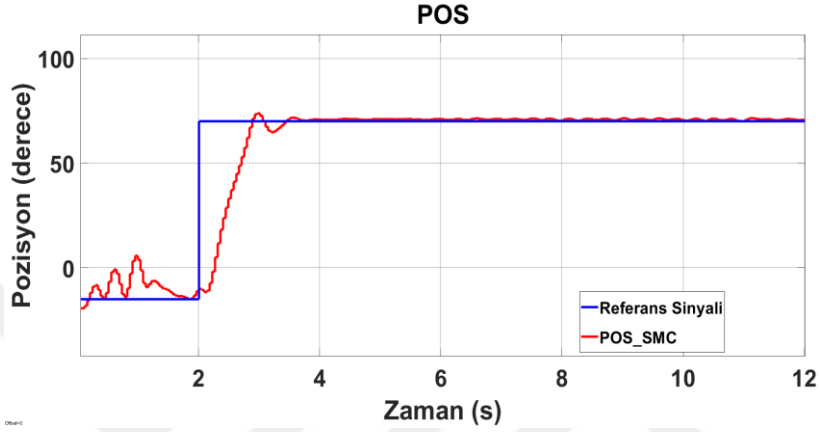
Şekil 4.12. Bulanık PID Kontrol ile 1 Hz Sinuzodial Basiñç Sinyali Takibi

Şekillerden de görüldüğü üzere frekansın daha da artması ve akış kısma valflerinin de etkisi ile hatanın da arttığı görülmektedir. Hata artışına rağmen 1 Hz frekansta sinüzoidal basıñç dinyali takibi için en iyi sonucu, diğere frekans değerlerinde olduğu gibi bulanık PID kontrolör vermiştir. Şekil 4.10- 4.11 ve 4.12'deki sonuçlara göre ayrıca pnömatis yapay kas ile 1 Hz frekansta çalışacak bir sistem tasarlanırken çalışma aralığının küçültülmesi gerektiği sonucu çıkarılmaktadır.

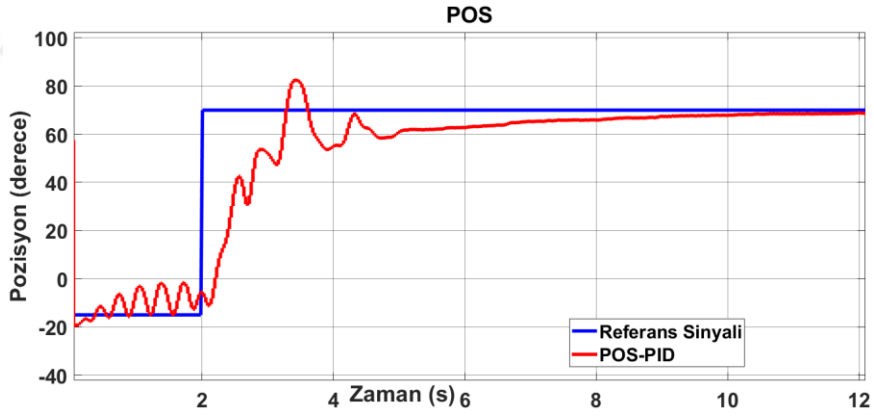
#### 4.2. Pozisyon Kontrolü

Pnömatis yapay kasın pozisyon kontrolü için basıñç kontrolüne benzer değerlendirmeler yapılmıştır. Tek PID kontrolü uygulanırken hem basıñç hem de konum geri beslemesi ile kaskat PID yapısı oluşturulmuş ve pozisyon kontrolü deneyi sadece konum bilgisinin geri besleme olarak kullanıldığı tek PID kontrolün yanı sıra kaskat PID kontrolör ile de yapılmıştır. Kaskat yapının kullanılmasının nedeni, kasın kasılması ve gevşemesi sırasında basıñcın birincil sistem girdisi olması ve dolayısı ile kontrolde daha iyi sonuç vereceğinin düşünülmesidir.

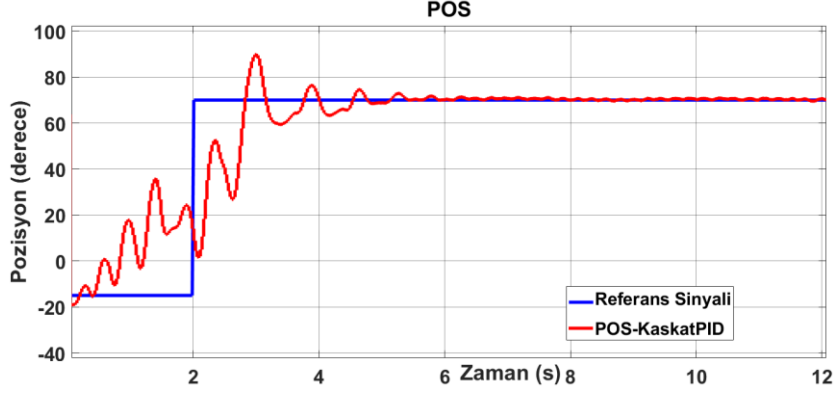
Şekil 4.13- 4.14- 4.15 ve 4.16'da, pnömatik yapay kasın pozisyon kontrolü için sırasıyla kayma modu kontrolü, tek PID, kaskat PID ve bulanık PID kontrol için adım tepkisine yanıt sonuçları verilmiştir.



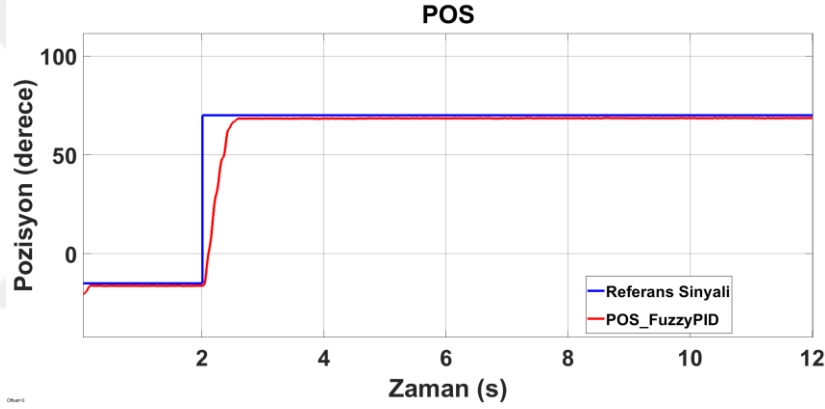
Şekil 4.13. Kayan Kip Kontrolör (SMC) ile Pozisyon Kontrolü için Adım Tepkisi



Şekil 4.14. Tek PID Kontrolör ile Pozisyon Kontrolü için Adım Tepkisi



Şekil 4.15. Kaskat PID Kontrolör ile Pozisyon Kontrolü için Adım Tepkisi



Şekil 4.16. Bulanık PID Kontrolör ile Pozisyon Kontrolü için Adım Tepkisi

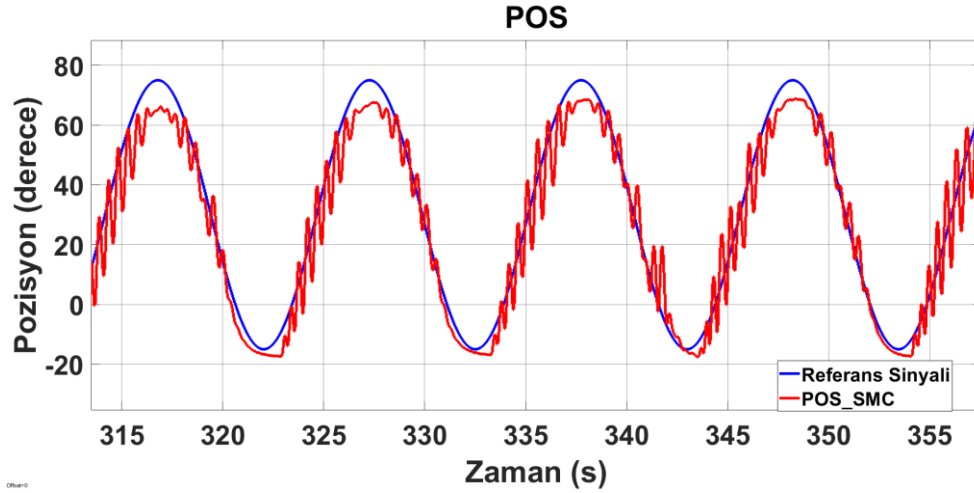
Şekil 4.15'ten de anlaşılacağı üzere tek PID kontrolün, adım tepkisinde yeterli sonucu vermediği görülmüştür. Bu sebeple kontrolörlerin sinüs sinyali takibinde basınç ve konum geri bildiriminin kullanıldığı kaskat PID kontrolü kullanılmıştır. Şekil 4.13- 4.14- 4.15 ve 4.16'da ve Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi, bulanık PID kontrolünde aşma olmamasına rağmen, kaskat PID kontrolünde yüzde 17,85'lik bir aşma ve kayan kip kontrolünde %5,71'lik bir aşma meydana gelmiştir. Tek PID ile pozisyon kontrolü için adım yanıtında, yaklaşık  $0.8^\circ$  aralığında bir salınım gözlenirken, SMC'de yaklaşık  $1.0^\circ$  aralığında bir salınım gözlemlenmiştir. Ve son olarak, bulanık PID için sabit durum hatası  $0,5^\circ$  'dir ve bu değer, kaskat PID kontrole ve SMC'ye kıyasla çok daha iyi bir performanstır.



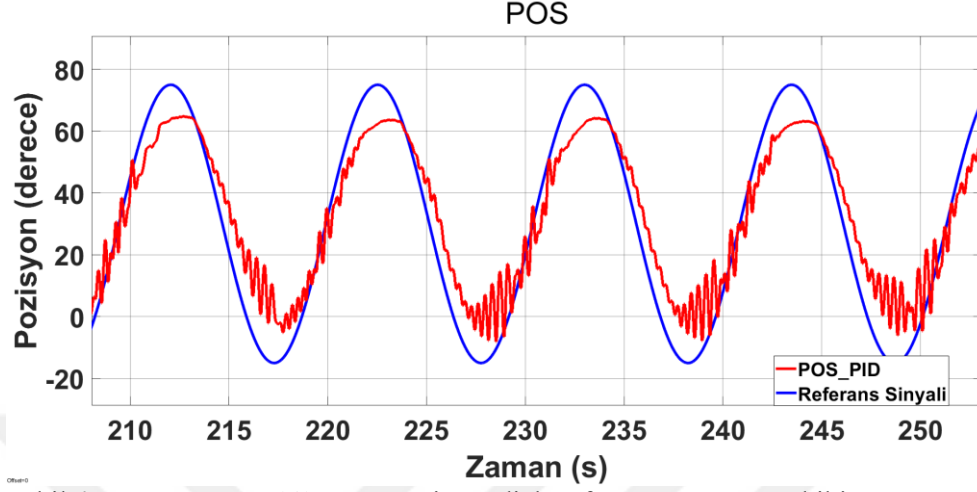
Çizelge 4.2. Pozisyon kontrolü için uygulanan Kayan Kip, PID ve Bulanık PID Kontrolü Sonuçları

Kontrolör	Aşma (%)	Yükselme Zamanı (s)	Kalıcı Durum Hatası
Kayan Kip Kontrolü (SMC)	5.71	2.89	1.0°
Kaskat PID Kontrol	17.85	3.27	0.8°
Bulanık PID Kontrolü	~0	2.6	0.5°

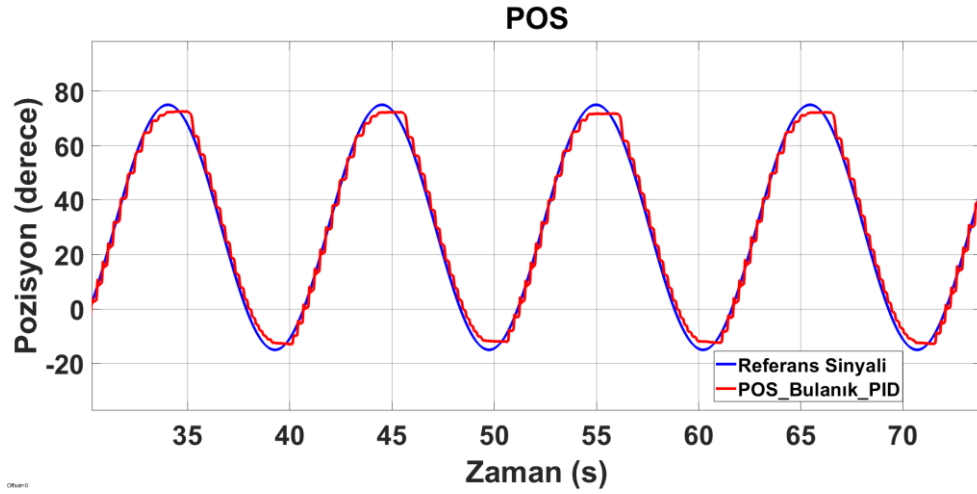
Şekil 4.17- 4.18 ve 4.19'da pozisyon kontrolünde sırasıyla kayan kip kontrolü (SMC), PID kontrol ve bulanık PID kontrolü için 0.1 Hz frekansı için sinüzoidal referans yörünge takibi sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.17. Kayan Kip Kontrol (SMC) ile 0.1 Hz Sinüzoidal Referans Yörünge Takibi

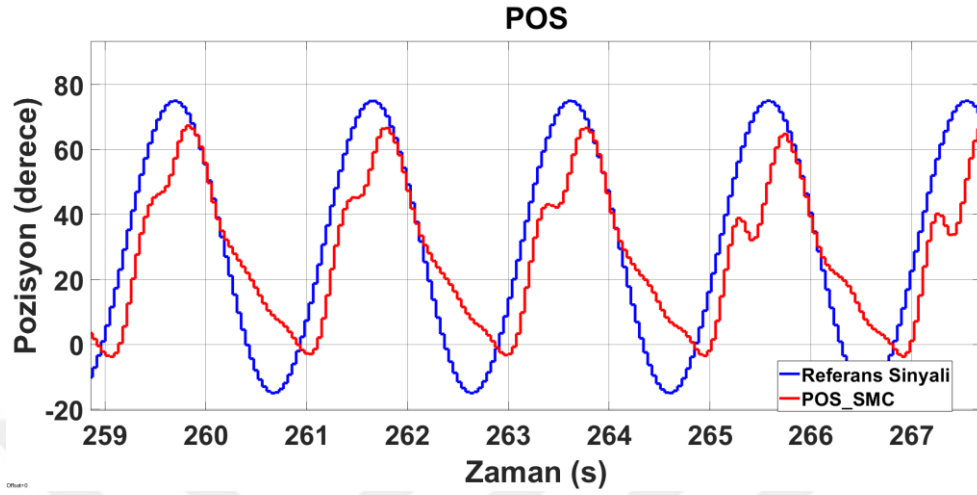


Şekil 4.18. PID Kontrol ile 0.1 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi

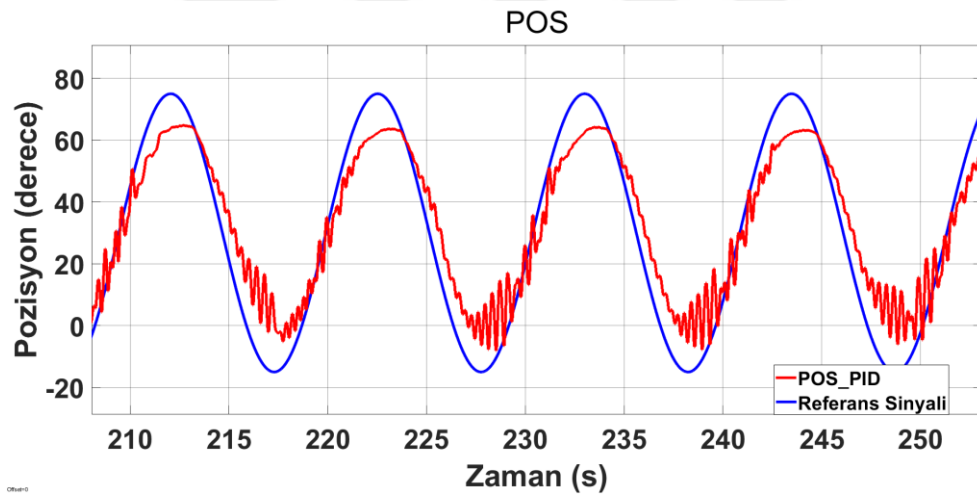


Şekil 4.19. Bulanık PID Kontrol ile 0.1 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi

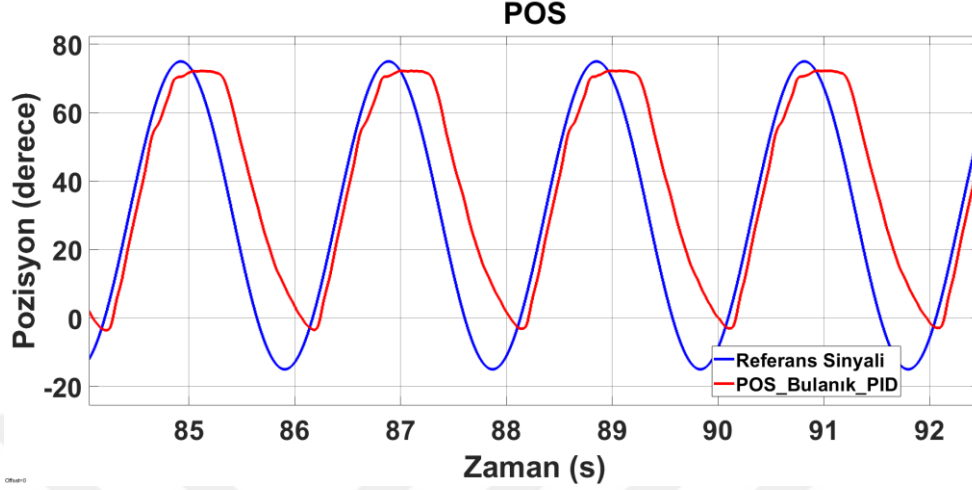
Şekil 4.20- 4.21 ve 4.22’de pozisyon kontrolünde sırasıyla kayan kip kontrolü (SMC), PID kontrol ve bulanık PID kontrolü için 0.5 Hz frekansı için sinuzodial referans yörünge takibi sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.20. Kayan Kip Kontrol (SMC) ile 0.5 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi



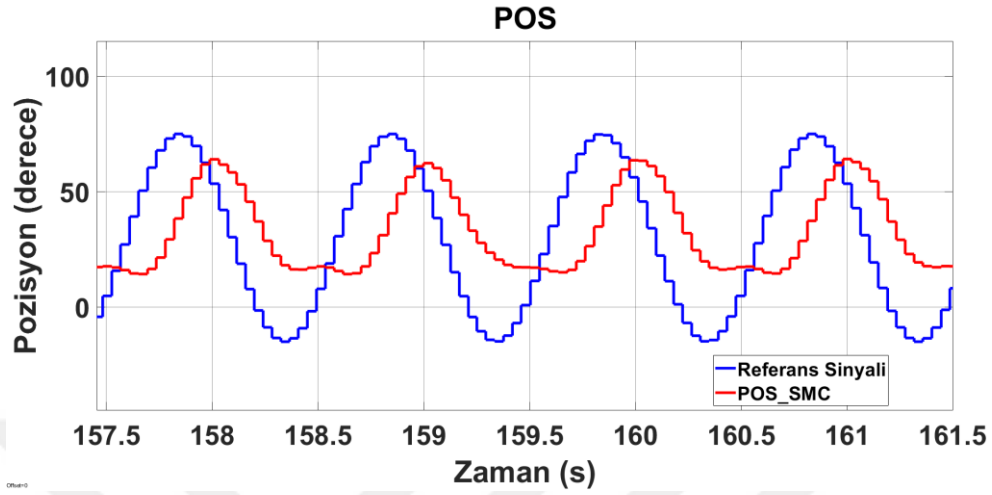
Şekil 4.21. PID Kontrol ile 0.5 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi



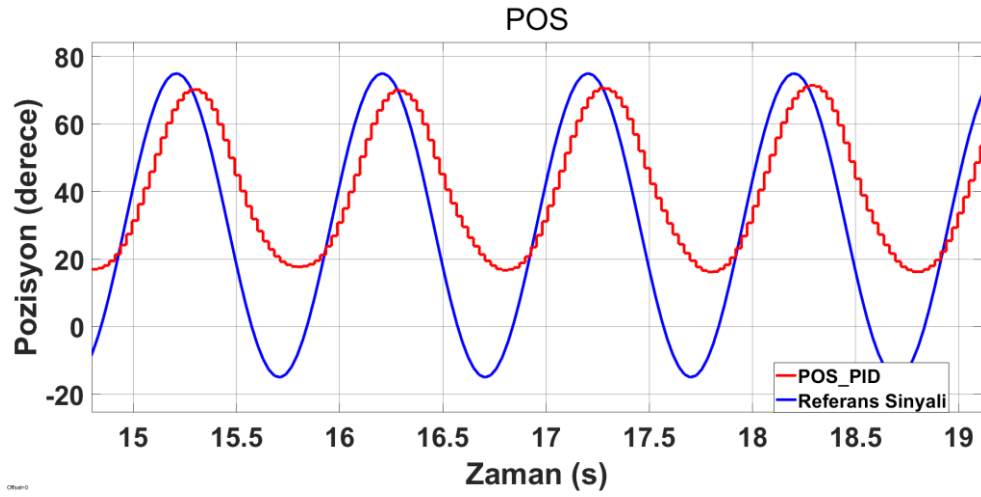
Şekil 4.22. BulanıkPID Kontrol ile 0.5 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi

Sinuzodial referans yörünge sinyali izlemeye, pozisyon kontrolü sonuçlarına bakıldığında, basınç kontrolünde olduğu gibi, frekans arttıkça hatanın arttığı görülmüştür. Ek olarak, pozisyon kontrolü sırasında tüm frekans değerlerinde sinüs sinyalinin izlenmesi sırasında beklenenden daha yüksek bir hata değeri oluşmuştur. Bunun hem basınç girişini hem de çıkışını etkileyen kısma valflerinden kaynaklandığı ve konumun sistemde doğrudan kontrol edilebilir bir parametre olmadığından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Bunun yanı sıra, bulanık PID kontrolün, uygulanan 3 kontrolörden en akıcı performansa sahip olduğu görülmektedir.

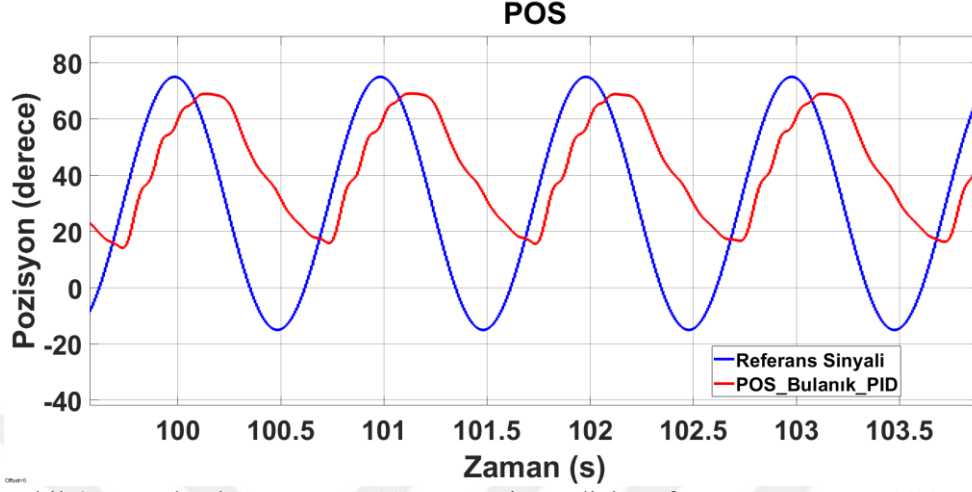
Pozisyon kontrolü için de basınç kontrolündekine benzer sebeple 1 Hz frekansındaki referans sinüs sinyali takibi deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.23- 4.24 ve 4.25'te bu deneylerin sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.23. Kayan Kip Kontrol (SMC) ile 1 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi



Şekil 4.24. PID Kontrol ile 1 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi



Şekil 4.25. Bulanık PID Kontrol ile 1 Hz Sinuzodial Referans Yörünge Takibi

Pnömatik yapay kas pozisyon kontrolü için 1 Hz frekansına sahip Sinuzodial Referans Yörünge sinyalinin takibini gösteren bu şekillerden de anlaşılacağı üzere ve hem frekansın fazla olması hem de sistemdeki kısma valflerinin olumsuz etkisinden dolayı takip esnasında yüksek oranda hata meydana gelmiştir. Böyle bir cihaz tasarımı planlanırken basınç kontrolüne paralel şekilde pozisyon için de çalışma aralığının dar tutulması, tasarlanan cihazın daha iyi performans gösterebileceği yine verilen şekillerden anlaşılmaktadır.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, temel olarak, rehabilitasyon uygulamalarında kullanmak amacıyla pnömatik yapay kas (PYK) için, doğrusal olmayan kontrol yöntemlerinin deneysel incelemesi ve yapılan kontrolör tasarımlarının değerlendirilmesi yapılmıştır. PYK avantajları ve uygulama potansiyelleri bilinmesine ve daha önce de kontrol çalışmaları yapılmasına rağmen, elde edilen yöntemlerin uygulamaya özel olması, hava giriş çıkışı için hızlı aç/kapa valflerini kullanan çalışmaların azlığı ve kontrolörlerin kapsamlı performans kıyaslamasının yapılmamış olması bizi bu çalışmayı yapmaya teşvik eden etken olmuştur. Bunun için, daha önceki bir BAP projesinde tasarlanmış ve imal edilmiş olan 1B deneysel robotik kol ortezi üzerinde uygulamalar yapılmıştır. Deneysel ortez düzeneğinde yer alan Festo pnömatik yapay kaslar için PYK kontrolünü zorlaştırırsa da daha ekonomik ve hızlı olduğu aç/kapa valfleri tercih edilmiştir.

Çalışma esnasında, pnömatik yapay kasın kontrolü için literatürde yaygın olan doğrusal olmayan, model tabanlı ve modelden bağımsız kontrol yöntemleri tespit edilmiş ve deneysel çalışmalarda uygulanmak için bunlardan üç tanesi seçilmiştir. Seçilen bu üç kontrolörden model tabanlı olan “Kayan Kip Kontrol”dür ve modelden bağımsız olanlar da “PID Kontrol” ve “Bulanık PID Kontrol”dür. Deneysel sonuçlara dayalı olarak hem model tabanlı hem de modelden bağımsız kontrol yöntemlerinin kıyaslanması, etkili, verimli ve basit bir kontrolör tasarımı için bir yol haritasının belirlenmesine yardım etmektedir.

Kontrolör performansları 0.1 Hz ve 0.5 Hz olmak üzere 2 ayrı frekanstaki sinüzoidal referans sinyali takibi ile değerlendirilmiştir. Referans sinyali takibi deneyleri yapılırken sistemin performans testi için PYK’ye 14.84 kg ağırlık değerinde sabit bir yük uygulanmıştır. Model tabanlı kontrolör olan Kayan Kip Kontrolü için model parametreleri, benzer bir çalışmanın model parametreleri ile eşleştirilmiş ve deneyler bu şekilde yapılmıştır. Ancak gerek pnömatik yapay kasın doğrusal olmayan yapısının katkısı gerekse de referans alınan çalışma ile bizim

çalışmamızda deneylerin yapıldığı ortamların farklı olmasından kaynaklı pnömatik yapay kas modellenirken, birebir kasın çalışmasına uygun model parametreleri elde etmek oldukça güç olduğundan Sinuzoidal Referans Yörünge Takibi esnasında en kötü performansı model tabanlı olan Kayan Kip Kontrolü vermiştir.

Özetle, deney sonuçlarına göre, modelden bağımsız kontrolör olan bir Sugeno tipi kombine bulanık PID kontrolörü, pnömatik yapay kasın rehabilitasyon işlevleri için gereken esnek ve uyumlu hareket kontrolünde basit ve etkili bir çözüm olabilecek en başarılı performansı vermektedir. Geliştirmeler için model tabanlı kontrol yaklaşımları yerine, kendini optimize edebilen bulanık kontrol kiplerinin analizi ise gelecekteki çalışmalarda incelenmeye değer yönler olacaktır.



## KAYNAKLAR

- Ahn, K. K., & Thanh, T. D. C., 2005. Nonlinear PID control to improve the control performance of the pneumatic artificial muscle manipulator using neural network. *Journal of mechanical science and technology*, 19(1), 106-115.
- Andrikopoulos, G., Nikolakopoulos, G., & Manesis, S., 2014. Advanced nonlinear PID-based antagonistic control for pneumatic muscle actuators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(12), 6926-6937.
- Aziz, S., & Bone, G. M., 1998, October. Automatic tuning of an accurate position controller for pneumatic actuators. In *Proceedings. 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications (Cat. No. 98CH36190) (Vol. 3, pp. 1782-1788)*. IEEE.
- Bağlar, E. T., & Baysal, C. V., 2020. An Experimental Evaluation of Control Modes for Pneumatic Artificial Muscles Using Fast on/off Valves. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(2), 401-412.
- Baldwin, H. A., 1969. Realizable models of muscle function. In *Biomechanics* (pp. 139-147). Springer, New York, NY.
- Baysal, C. V., 2013. Biyo-işaret Geri Beslemeli Deneysel Amaçlı Robotik Kol Ortezi Tasarımı.MMF2013BAP12 nolu Bilimsel Araştırma Projesi Sonuç Raporu. 27s. (yayınlanmamış).
- Bone, G. M., & Chen, X., 2012, June. Position control of hybrid pneumatic-electric actuators. In *2012 American Control Conference (ACC)* (pp. 1793-1799). IEEE.
- Boržiková, J., Pitel, J., Tóthová, M., & Šulc, B., 2011, May. Dynamic simulation model of PAM based antagonistic actuator. In *2011 12th International Carpathian Control Conference (ICCC)* (pp. 28-31). IEEE.

- Caldwell, D. G., Medrano-Cerda, G. A., & Goodwin, M. J., 1993, October. Braided pneumatic actuator control of a multi-jointed manipulator. In Proceedings of IEEE Systems Man and Cybernetics Conference-SMC (Vol. 1, pp. 423-428). IEEE.
- Caldwell, D. G., & Tsagarakis, N., 2002. Biomimetic actuators in prosthetic and rehabilitation applications. *Technology and Health Care*, 10(2), 107-120.
- Caldwell, D. G., Tsagarakis, N. G., Kousidou, S., Costa, N., & Sarakoglou, I., 2007. 'Soft' Exoskeletons for Upper and Lower Body Rehabilitation - Design, Control and Testing. *International Journal of Humanoid Robotics* 4(3): 549-73.
- Carneiro, J. F., & de Almeida, F. G., 2012. A high-accuracy trajectory following controller for pneumatic devices. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(1-4), 253-267.
- Chang, M. K., Liou, J. J., & Chen, M. L., 2011. T-S fuzzy model-based tracking control of a one-dimensional manipulator actuated by pneumatic artificial muscles. *Control Engineering Practice*, 19(12), 1442-1449.
- Chen, S. H., Lien, W. M., Wang, W. W., Lee, G. D., Hsu, L. C., Lee, K. W., ... & Chen, W. S., 2016. Assistive control system for upper limb rehabilitation robot. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 24(11), 1199-1209.
- Chen, C., Huang, J., & Wu, D., 2019, July. Nonlinear Disturbance Observer Based TS Fuzzy Logic Control of Pneumatic Artificial Muscles. In 2019 IEEE 4th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM) (pp. 12-17). IEEE.
- Chiang, C. J., & Chen, Y. C., 2017. Neural network fuzzy sliding mode control of pneumatic muscle actuators. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 65, 68-86.

- Chillari, S., Guccione, S., & Muscato, G., 2001, December. An experimental comparison between several pneumatic position control methods. In Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228) (Vol. 2, pp. 1168-1173). IEEE.
- Chou, C. P., & Hannaford, B., 1994, May. Static and dynamic characteristics of McKibben pneumatic artificial muscles. In Proceedings of the 1994 IEEE international conference on robotics and automation (pp. 281-286). IEEE.
- Chou, C. P., & Hannaford, B., 1996. Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12(1): 90–102.
- Daerden, F. 1999. Conception and realization of pleated pneumatic artificial muscles and their use as compliant actuation elements. Vrije Universiteit Brussel, Belgium.
- Festo, AG. 2007. “Fluidic Muscle DMSF.” MAS, Operation instructions, FESTO, Esslingen, ....  
[https://www.festo.com/rep/en\\_corp/assets/pdf/info\\_501\\_en.pdf](https://www.festo.com/rep/en_corp/assets/pdf/info_501_en.pdf).
- Hall, K. L., 2011. Dynamic control for a pneumatic muscle actuator to achieve isokinetic muscle strengthening. Doctoral dissertation, Wright State
- Hamiti, K., Voda-Besancon, A., & Roux-Buisson, H., 1996. Position control of a pneumatic actuator under the influence of stiction. *Control Engineering Practice*, 4(8), 1079-1088.
- Hildebrandt, A., Sawodny, O., Neumann, R., & Hartmann, A., 2005, June. Cascaded control concept of a robot with two degrees of freedom driven by four artificial pneumatic muscle actuators. In Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005. (pp. 680-685). IEEE.
- Hošovský, A., 2009. Fuzzy adaptive controller for one-DOF PAM-based actuator with reference model. *Applied Science in Thermodynamics and Fluid Mechanics*, 3(2), 1-7.

- Hošovský, A., & Havran, M., 2012. Dynamic modelling of one degree of freedom pneumatic muscle-based actuator for industrial applications. *Tehnički vjesnik*, 19(3), 673-681.
- Hošovský, A., Mižáková, J., & Piteľ, J., 2014, July. Improved modeling of pneumatic muscle actuator using recurrent neural network. In 2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) (pp. 4019-4024). IEEE.
- Hsu, S. C., & Lin, C. Y., 2013, May. Periodic motion control of a heavy duty pneumatic actuating table using low-cost position sensors and hybrid repetitive control. In 2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (pp. 1-6). IEEE.
- Jamian, S., Salim, S. N. S., Kamarudin, M. N., Zainon, M., Mohamad, M. S., Abdullah, L., & Hanafiah, M. A. M., 2020. Review on controller design in pneumatic actuator drive system. *Telkomnika*, 18(1), 332-342.
- Jantzen, J., 1998. Tuning of fuzzy PID controllers. Technical University of Denmark, Department of Automation, Bldg, 326.
- Jouppila, V., 2014. Modeling and control of a pneumatic muscle actuator. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-3428-7>.
- Jouppila, V. T., Gadsden, S. A., Bone, G. M., Ellman, A. U., & Habibi, S. R., 2014. Sliding mode control of a pneumatic muscle actuator system with a PWM strategy. *International journal of fluid power*, 15(1), 19-31.
- Kelasidi, E., Andrikopoulos, G., Nikolakopoulos, G., & Manesis, S., 2011, June. A survey on pneumatic muscle actuators modeling. In 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (pp. 1263-1269). IEEE.
- Krishna, S., Nagarajan, T., & Rani, A., 2011. Review of Current Development of Pneumatic Artificial Muscle. *Journal of Applied Sciences*, 11, 1749-1755.
- Leephakpreeda, T., 2011. Fuzzy logic based PWM control and neural controlled-variable estimation of pneumatic artificial muscle actuators. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 7837-7850.

- Liska, O. N. D. R. E. J., More, M. A. R. C. E. L., Janacova, D. A. G. M. A. R., & Charvatova, H. A. N. A., 2013. Design of rehabilitation robot based on pneumatic artificial muscles. In *Proceedings of Mathematical Methods and Optimization Techniques in Engineering* (pp. 151-154).
- Low, K. H., 2011, August. Robot-assisted gait rehabilitation: From exoskeletons to gait systems. In *2011 Defense Science Research Conference and Expo (DSR)* (pp. 1-10). IEEE.
- Lu, B., Dao, G. L., & Liu, H., 2010. Modeling and constant pressure control of pneumatic suspension system for zero-gravity simulation. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 44(2), 379-385.
- Maciejasz, P., Eschweiler, J., Gerlach-Hahn, K., Jansen-Troy, A., & Leonhardt, S., 2014. A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 11(1), 3.
- Meghanathan, Natarajan., 2015. 348 *Advances in Intelligent System and Computing Intelligent Systems in Cybernetics and Automation Theory*. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-18503-3>.
- Meller, M., Kogan, B., Bryant, M., & Garcia, E., 2018. Model-based feedforward and cascade control of hydraulic McKibben muscles. *Sensors and Actuators A: Physical*, 275, 88-98.
- Nakamura, T., Saga, N., & Yaegashi, K., 2003, December. Development of a pneumatic artificial muscle based on biomechanical characteristics. In *IEEE International Conference on Industrial Technology, 2003* (Vol. 2, pp. 729-734). IEEE.
- Noor, S. B. M., Ali, H. I., & Marhaban, M. H., 2011. Design of combined robust controller for a pneumatic servo actuator system with uncertainty. *Scientific Research and Essays*, 6(4), 949-965.
- Noritsugu, T., & Tanaka, T., 1997. Application of rubber artificial muscle manipulator as a rehabilitation robot. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 2(4), 259-267.

- Pitel', J., Balara, M., & Boržiková, J., 2007. Control of the actuator with pneumatic artificial muscles in antagonistic connection.
- Qian, J., Huang, J., & Ri, S., 2015, November. Adaptive fuzzy sliding mode control for pneumatic muscle actuator. In 2015 Chinese Automation Congress (CAC) (pp. 431-436). IEEE.
- Repperger, D. W., Johnson, K. R., & Phillips, C. A., 1999, June. Nonlinear feedback controller design of a pneumatic muscle actuator system. In Proceedings of the 1999 American Control Conference (Cat. No. 99CH36251) (Vol. 3, pp. 1525-1529). IEEE.
- Repperger, D. W., Phillips, C. A., Neidhard-Doll, A., Reynolds, D. B., & Berlin, J., 2005. Power/energy metrics for controller evaluation of actuators similar to biological systems. *Mechatronics*, 15(4), 459-469.
- Reynolds, D., Repperger, D., Phillips, C., & Bandry, G., 2003. Modeling the dynamic characteristics of pneumatic muscle. *Annals of biomedical engineering*, 31(3), 310-317.
- Sárosi, J., Biro, I., Nemeth, J., & Cveticanin, L., 2015. Dynamic modeling of a pneumatic muscle actuator with two-direction motion. *Mechanism and Machine Theory*, 85, 25-34.
- Schulte, H. F., & Pearson, J. R., 1961. Characteristics of the braided fluid actuator.
- Schröder, J., Kawamura, K., Gockel, T., & Dillmann, R., 2003. Improved control of a humanoid arm driven by pneumatic actuators. *Proceedings of Humanoids 2003*.
- Šitum, Ž., Trslíć, P., Trivić, D., Štahan, V., Brezak, H., & Sremić, D. (2015). Pneumatic muscle actuators within robotic and mechatronic systems. In *Proceedings of International Conference Fluid Power, Fluidna tehnika 2015* (pp. 175-188). Faculty of Mechanical Engineering.
- Slotine, J. J. E., & Li, W., 1991. *Applied nonlinear control* (Vol. 199, No. 1). Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall.

- Son, N. N., Van Kien, C., & Anh, H. P. H., 2017. A novel adaptive feed-forward-PID controller of a SCARA parallel robot using pneumatic artificial muscle actuator based on neural network and modified differential evolution algorithm. *Robotics and Autonomous Systems*, 96, 65-80.
- Sugar, T. G., He, J., Koeneman, E. J., Koeneman, J. B., Herman, R., Huang, H., ... & Ward, J. A., 2007. Design and control of RUPERT: a device for robotic upper extremity repetitive therapy. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 15(3), 336-346.
- Taheri, B., Case, D., & Richer, E., 2012, December. Design of robust nonlinear force and stiffness controller for pneumatic actuators. In 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC) (pp. 1192-1198). IEEE.
- Takanaka, K., & Nakmura, T., 2013, February. Development of pneumatic control system for walking assist using dual On/Off valves. In 2013 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM) (pp. 138-143). IEEE.
- Tan, W., Liu, J., Chen, T., & Marquez, H. J., 2006. Comparison of some well-known PID tuning formulas. *Computers & chemical engineering*, 30(9), 1416-1423.
- Tang, T. F., Chong, S. H., Chan, C. Y., & Sakthivelu, V., 2016, October. Point-to-point positioning control of a pneumatic muscle actuated system using improved-PID control. In 2016 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS) (pp. 45-50). IEEE.
- Thanh, T. D. C., & Ahn, K. K., 2006. Nonlinear PID control to improve the control performance of 2 axes pneumatic artificial muscle manipulator using neural network. *Mechatronics*, 16(9), 577-587.
- Tondu, B., & Lopez, P., 2000. Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators. *IEEE control systems Magazine*, 20(2), 15-38.
- Tóthová, M., 2013, May. Dynamic modeling of PAM based actuator using modified Hill's muscle model. In Proceedings of the 14th International Carpathian Control Conference (ICCC) (pp. 307-310). IEEE.

- Tóthová, M., & Piteľ, J., 2013, September. Simulation of actuator dynamics based on geometric model of pneumatic artificial muscle. In 2013 IEEE 11th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY) (pp. 233-237). IEEE.
- Tóthová, M., & Piteľ, J., 2015. Simulation of fuzzy adaptive position controllers for pneumatic muscle actuator. In 2015 IEEE 13th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY) (pp. 55-59). IEEE.
- Tsagarakis, N. G., & Caldwell, D. G., 2003. Development and control of a 'soft-actuated' exoskeleton for use in physiotherapy and training. *Autonomous Robots*, 15(1), 21-33.
- Wang, J., Rad, A. B., & Chan, P. T., 2001. Indirect adaptive fuzzy sliding mode control: Part I: fuzzy switching. *Fuzzy sets and Systems*, 122(1), 21-30.
- Wickramatunge, K. C., & Leephakpreeda, T., 2009, March. Empirical modeling of pneumatic artificial muscle. In *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (Vol. 2, No. 0)*.
- Wickramatunge, K. C., & Leephakpreeda, T., 2010. Study on mechanical behaviors of pneumatic artificial muscle. *International Journal of Engineering Science*, 48(2), 188-198.
- Xing, K., Xu, Q., He, J., Wang, Y., Liu, Z., & Huang, X., 2008, October. A wearable device for repetitive hand therapy. In 2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (pp. 919-923). IEEE.
- Xing, K., Xu, Q., He, J., Wang, Y., Liu, Z., & Huang, X., 2012. Sliding mode tracking for actuators comprising pneumatic muscle and torsion spring. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 34(2-3), 255-277.
- Yang, X., Hua, C. C., Yan, J., & Guan, X. P., 2015. A new master-slave torque design for teleoperation system by TS fuzzy approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23(4), 1611-1619.



- Yao, B., Zhou, Z., Liu, Q., & Ai, Q., 2016. Empirical modeling and position control of single pneumatic artificial muscle. *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, 18(2), 86-94.
- Zidek, K., & Seminsky, J., 2011, January. Automated rehabilitation device based on artificial muscles. In *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of 22nd International DAAAM Symposium*, Vienna: DAAAM (pp. 1113-1114).
- Ziegler, J. G., & Nichols, N. B., 1942. Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*, 64(11).



## ÖZGEÇMİŞ

Elif Tuğba BAĞLAR, 13 Nisan 1995'te Mersin'de doğdu. İlkokulunu DSİ Baraj İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra 2012 yılında Mehmet Özöncel Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. Lisans eğitimini aldığı Çukurova Üniversitesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümü'nden Haziran 2017'de mezun oldu ve Eylül 2017'de aynı yerde yüksek lisans eğitimine başladı. 2018 yılının mart ayında Çukurova Üniversitesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen burada çalışmaya devam etmektedir.