

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

**PNÖMATİK YAPAY KAS TABANLI ÜST EKSTREMİTE
MANİPÜLATÖRÜNDE AGONİST-ANTAGONİST KONTROL**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Filiz ATAK METİNER

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Mühendisliği Bilim Dalı

MAYIS 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PNÖMATİK YAPAY KAS TABANLI ÜST EKSTREMİTE
MANİPÜLATÖRÜNDE AGONİST-ANTAGONİST KONTROL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Filiz ATAK METİNER

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Mühendisliği Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof.Dr. UĞUR ARİFOĞLU

MAYIS 2024

Filiz ATAK METİNER tarafından hazırlanan “Pnömatik Yapay Kas Tabanlı Üst Ekstremitte Manipülatöründe Agonist-Antagonist Kontrol” adlı tez çalışması 29.05.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektronik Mühendisliği Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof.Dr. UĞUR ARİFOĞLU** (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof.Dr. Akın Oğuz KAPTI**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr. Öğr. Üyesi M. Çağrı KUTLU**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “PNÖMATİK YAPAY KAS TABANLI ÜST EKSTREMİTE MANİPÜLATÖRÜNDE AGONİST-ANTAGONİST KONTROL” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../06/2024).

(imza)

Filiz ATAK METİNER





Aileme,



TEŞEKKÜR

Bu alıŐma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 122M619 Numaralı proje ile desteklenmiŐtir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teŐekkürlerimizi sunarız.

Yüksek lisans eğitimim boyunca desteğini esirgemeyen tez danıŐmanım Prof.Dr. UĞur ARİFOĞLU'na, Tübitak 1001 projesi kapsamında bana destek olan Prof.Dr. Akın OĞuz KAPTI, Doç.Dr. Sedat İRİ, Dr. ÖĞr. Üyesi Mustafa ağrı KUTLU ve ArŐ.Gör. Muhammed Ömer İbiŐ hocalarıma teŐekkürü borç bilirim. Bana her koŐulda destek olan aileme çok teşekkür ederim.

Filiz ATAK METİNER



İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Kapsamı.....	1
1.2. Tezin Amacı	2
1.2.1. Tezin ikincil amacı.....	2
1.3. Literatür Araştırması	2
1.4. Hipotez	4
1.4.1. Hipotezin öngördüğü durumlar	5
1.4.2. Deney ve analiz	5
2. PNÖMATİK YAPAY KASLAR	7
2.1. PYK Çeşitleri	7
2.1.1. Örgülü pnömatik yapay kaslar	7
2.1.2. Pileli pnömatik yapay kaslar	8
2.1.3. Ağlı pnömatik yapay kaslar	8
2.1.4. Gömülü pnömatik yapay kaslar	8
2.1.5. Festo pnömatik yapay kasları.....	9
2.2. Pnömatik Yapay Kasların Özellikleri	9
2.2.1. PYK'nın avantajları	10
2.2.2. PYK'nın dezavantajları.....	11
3. PYK'NIN STATİK KARAKTERİSTİĞİ	13
3.1. DMSP-20-200N RM-RM Özellikleri.....	14
3.2. DMSP-20-200N RM-RM'nin Statik Karakteristik Deneyi	15
4. PYK'NIN STATİK KUVVET MODELİ	31
4.1. DMSP-200N RM-RM'nin İzobarik Kuvvet Ölçümü Deneyi	31
4.2. Mevcut Statik Kuvvet Modelleri.....	35
4.3. Yeni Statik Kuvvet Modeli	36
4.4. DMSP 20-300N'nin Statik Kuvvet Modeli İçin Doğruluk Karşılaştırması	38
5. AGONİST ANTAGONİST SİSTEMİN KONTROLÜ	43
5.1. Agonist-Antagonist PYK Çiftinin Matematiksel Modeli.....	43
5.2. PID(Oransal, İntegral, Türev) Kontrolör.....	46
5.2.1. PID denetleyicinin özellikleri	47
5.2.2. PID parametreleri ayarlama yöntemleri.....	48
5.2.2.1. Manuel ayarlama	48
5.2.2.2. Ziegler-Nichols metodu	48

5.2.2.3. Loop tuning yazılımları	48
5.2.2.4. Frekans yanıtı yöntemleri	48
5.3. Tek PYK'lı Agonist-Antagonist Sistemin PID ile Konum Kontrolü Deneyi .	49
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR.....	59
EKLER	65
ÖZGEÇMİŞ.....	69



KISALTMALAR

MATLAB : Matrix Laboratory

PAM : Pneumatic artificial muscle

PID : Proportional, Integral, Derivative

PYK : Pnömatik yapay kas

ROMAC : Robotic Muscle Actuator





SİMGELER

A_{PE}	: Çevresel alan [m ²]
A_L	: Eksenel alan [m ²]
A_v	: PYK'ın fiber doğrultusundaki kesit alanı [m ²]
B	: Viskos sürtünmesi [m ² /s]
B_{0e}	: Başlangıçta PYK'nın kasılma durumu için viskos sürtünmesi [m ² /s]
B_{1e}	: Son durumda PYK'nın kasılma durumu için viskos sürtünmesi [m ² /s]
B_{0f}	: Başlangıçta PYK'nın gevşeme durumu için viskos sürtünmesi [m ² /s]
B_{1f}	: Son durumda PYK'nın gevşeme durumu için viskos sürtünmesi [m ² /s]
D	: PYK'nın iç çapı [mm]
D₀	: PYK'nın başlangıç iç çapı [mm]
e	: Takip hatası
F	: PYK'nın ürettiği kuvvet [N]
F_e	: Kasılma durumunda kuvvet [N]
F_f	: Gevşeme durumunda kuvvet [N]
F_L	: Eksenel kuvvet [N]
F_{PE}	: Çevresel kuvvet [N]
F_v	: Fibere dik yönde etkiyen kuvvet [N]
F₀	: Başlangıçta kuvvet [N]
F₁	: Son durumda kuvvet [N]
g	: Yerçekimi ivmesi [m/s ²]
H₀	: PYK'nın membran kalınlığı [mm]
K	: Yay katsayısı [N/m]
K_d	: Türev katsayısı
K₁	: İntegral katsayısı
K_p	: Oransal katsayısı
K₀	: Başlangıçta yay katsayısı [N/m]
K₁	: Son durumda yay katsayısı [N/m]
L, x	: PYK'nın kısalma miktarı [mm]
L₀	: PYK'nın başlangıç uzunluğu [mm]
L_F	: PYK'nın fiberinin uzunluğu [mm]

M	: Kütle [kg]
M_v	: Fibere dik yönde etki eden kuvvetin momenti [Nm]
n	: Fiberin sarım sayısı
P	: Basınç [bar]
P_e	: Kasılan kastaki basınç [bar]
P_f	: Gevşeyen kastaki basınç [bar]
P₀	: PYK'ya verilen başlangıç basınç [bar]
R	: Kasnak yarıçapı [mm]
u	: Kontrolcü sinyali
V	: PYK'nın hacmi
V₀	: PYK'nın ilk hacmi
Θ	: Eklem açısı [derece], Fiber sarım açısı [derece]
ΔP	: PYK'daki basınç değişimi [bar]
σ_L	: Fibere aksenal etki eden gerilme bileşeni
σ_{PE}	: Fibere çevresel etki eden gerilme bileşeni
σ_v	: Fibere dik etki eden gerilme bileşeni
τ	: Tork [Nm]

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Çeşitli iç çaptaki PYK'ların kasılma, öngerdirmeye, basınç ve kuvvet değerleri.....	14
Tablo 3.2. DMSP-20-200 PYK'nın kasılma durumunda basınç değişimine göre kasın boyunun değişimi.	17
Tablo 3.3. DMSP 20-200 PYK'nın gevşeme durumunda basınç değişimine göre kasın boyunun değişimi.	18
Tablo 3.4. DMSP 20-200 PYK için katalog değerleri, deney sonucu, bulunan fourier denklemi sonucu ve bulunan polinom denkleminin sonucu olan basınca göre boy değişim tablosu.	29
Tablo 4.1. DMSP 20-200N RM-RM için izobarik ölçüm sonuçları.	33
Tablo 4.2. DMSP 20-300 için izobarik ölçüm sonuçları.....	40
Tablo 4.3. DMSP 20-300 için yeni kuvvet modeli sonuçları.	41
Tablo 4.4. DMSP 20-300 için doğruluk oranı tablosu.	41
Tablo 4.5. DMSP 20-200N RM-RM için yeni kuvvet modeli sonuçları.	42
Tablo 4.6. DMSP 20-200N RM-RM için için doğruluk oranı tablosu.....	42
Tablo 5.1. Kapalı çevrim sisteminde denetleyicilerin etkileri.....	47
Tablo 5.2. Pozisyon kontrolü için uygulanan PID kontrolü sonuçları.	52



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Örgülü PYK.....	7
Şekil 2.2. Pileli PYK.....	8
Şekil 2.3. Yarlott tipi ağı PYK [31].....	8
Şekil 2.4. Paynter Hyperboloid gömülü PYK [31].....	9
Şekil 2.5. Festo PYK'sı [33].....	9
Şekil 2.6. PYK'nın yay olarak kullanılması [32].....	10
Şekil 3.1. Festo PYK'ları [35].	13
Şekil 3.2. Festo DMSP PYK'larının kodları ve kodlarının açıklamaları [33].	13
Şekil 3.3. DMSP-20-200N RM-RM.	14
Şekil 3.4. PYK'nın statik karakteristiği için kurulan deney düzeneği.	15
Şekil 3.5. Basıncın ayarlandığı ve konumun okunduğu Daisy Lab ekranı.	15
Şekil 3.6. Analog-dijital veri okuyan ve çıkış veren National Instruments'in kartı. .	16
Şekil 3.7. DMSP-20-200N RM-RM'nin kasılma ve gevşeme durumlarında basınca göre kısılma miktarları.	18
Şekil 3.8. DMSP-20-200N RM-RM'nin kasılma durumu için Cftool ortamında denklem türü, denklemin sonucu olan eğri ve denklemin katsayıları.	20
Şekil 3.9. DMSP-20-200N RM-RM'nin gevşeme durumu için Cftool ortamında denklem türü, denklemin sonucu olan eğri ve denklemin katsayıları.	21
Şekil 3.10. PYK'nın kasılma durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen fourier denkleminin sonucunun karşılaştırılması.	23
Şekil 3.11. PYK'nın kasılma durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen fourier denkleminin hata farkı grafiği.	23
Şekil 3.12. PYK'nın gevşeme durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen fourier denkleminin sonucunun karşılaştırılması.	24
Şekil 3.13. PYK'nın gevşeme durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen fourier denkleminin hata farkı grafiği.	24
Şekil 3.14. PYK'nın kasılma durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen polinom denklemin sonucunun karşılaştırılması.	26
Şekil 3.15. PYK'nın kasılma durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen polinom denkleminin hata farkı grafiği.	26
Şekil 3.16. PYK'nın gevşeme durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen polinom denkleminin sonucunun karşılaştırılması.	27
Şekil 3.17. PYK'nın gevşeme durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen polinom denkleminin hata farkı grafiği.	27
Şekil 3.18. DMSP-20-200N RM-RM'nin datasheetinde basınç, kuvvet ve kısılma yüzdesi grafiği [33].	28
Şekil 4.1. DMSP- 200N RM-RM'nin kuvvet karakteristiği için hazırlanan deney düzeneği.	31
Şekil 4.2. DMSP- 200N RM-RM'lik kas için Daisy Lab uygulamasında hazırlanan programın arayüzü.	32
Şekil 4.3. DMSP 20-200N RM-RM'nin statik kuvvet haritası.....	34

Şekil 4.4. DMSP 20-200N RM-RM'nin Festo katalogunda statik kuvvet haritası [33].	35
Şekil 4.5. Çeşitli PYK'lar için farklı statik kuvvet modellerinin doğruluk oranları [35].	39
Şekil 5.1. Kolun fiziksel modeli [47].	43
Şekil 5.2. a) PYK'ın çalışması, b)PYK'nın üç element ile modellenmesi [50].	44
Şekil 5.3. İki PYK'lı agonist antagonist sistem [51].	44
Şekil 5.4. Birim geribeslemeli bir sistemin blok diyagramı.	47
Şekil 5.5. Tek Pyk'lı Agonist-Antagonist sistemin kontrolü için hazırlanan deney düzeneği.	50
Şekil 5.6. Tek Pyk'lı Agonist-Antagonist sistemin kontrolü için hazırlanan deney düzeneği.	50
Şekil 5.7. Tek PYK'lı agonist antagonist sistemin PID ile konum kontrolü için SIMULINK programında hazırlanan deney düzeneği.	51
Şekil 5.8. PID ayar bloğu.	52
Şekil 5.9. Signal builder bloğu ile üretilen birinci referans sinyal.	53
Şekil 5.10. Signal builder bloğu ile üretilen ikinci referans sinyal.	53
Şekil 5.11. Birinci referans konuma göre enkoderden okunan konumun davranış grafiği.	54
Şekil 5.12. İkinci referans konuma göre enkoderden okunan konumun davranış grafiği.	55

PNÖMATİK YAPAY KAS TABANLI ÜST EKSTREMİTE MANİPÜLATÖRÜNDE AGONİST-ANTAGONİST KONTROL

ÖZET

Son zamanlarda robotları boyama, montaj, kaynak, kaldırma, yerleştirme vs. pek çok alanda görmekteyiz. Bu uygulamalar çoğunlukla insansı robotlar tarafından yapılmaktadır. İnsansı robotlar insan hareketlerini taklit etmeyi amaçlayan robotlardır. İnsansı robotlarda genellikle esnek yapısı nedeniyle insan kasına benzediğinden pnömatik yapay kaslar (PYK'lar) kullanılmaktadır. Bu çalışmada agonist- antagonist kas çiftini oluşturan PYK hakkında ayrıntılı araştırma yapılmış PYK çeşitleri, özellikleri, avantajları, dezavantajları ve çalışma prensibi açıklanmıştır. PYK'lar bakım kolaylığı, düşük maliyeti ve yüksek kuvvetlere dayanabilmesi nedeniyle günümüzde oldukça tercih edilen bir aktüatördür. PYK'yı daha yakından incelemek amacı ile statik modeli tasarlamak için deney düzeneği hazırlanmış, elde edilen veriler ile PYK'nın statik modelinin denklemi başarı ile bulunmuş ve katalog verileri ile karşılaştırılmıştır.

Statik kuvvet haritası; kuvvet, basınç ve uzunluk arasındaki ilişkiyi tanımlar. PYK'lar genellikle yüksek kuvvetlere çıkabildiğinden PYK'nın statik kuvvet haritasını oluşturmak oldukça önemlidir. PYK'nın statik kuvvet haritası için ayrı bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Bu veriler ile kuvvet haritası oluşturulmuştur. PYK'nın kuvvet modeli matematiksel olarak modellenmiş ve akademik çalışmalar sonucu bulunan diğer kuvvet modelleri ile karşılaştırılmıştır.

Agonist antagonist kaslar canlılarda eklem hareketinin oluşmasını sağlayan insanda kol ve bacaklarda bulunan birbirine zıt yönlü çalışan kaslardır. Bu çalışmada agonist-antagonist kasların çalışması hakkında açıklamalar yapılmış ve Agonist-antagonist kasların matematiksel modeli verilmiştir. agonist-antagonist kasların kontrolü hakkında literatür taraması yapılmış ve literatürde genellikle iki PYK kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu alanda kullanılan kontrol yöntemleri model tabanlı kontrol ve modelden bağımsız kontrol olarak iki tip olduğu görülmüştür. Kontrol stratejisi olarak Emedans kontrol, PID (Proportional, Integral, Derivative) kontrol, kayan kip kontrol (Sliding Mode Control-SMC), bulanık(fuzzy) kontrol ve Yapay sinir ağı gibi kontrol türleri kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada kontrolör olarak PID Kontrolcü seçilmiştir. Model tabanlı kontrolün zorluğundan dolayı modelden bağımsız kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Literatürdeki iki PYK kullanımı aksine maliyet açısından tasarruf sağlamak amacı ile bir PYK ve bir yay ile agonist-antagonist kasın konum kontrolü PID kontrolör kullanılarak yapılmıştır. Eklem hareketinin doğruluğu hem dijital ortamda hem de deney düzeneği üzerinde gözlemlenmiş ve kanıtlanmıştır.



AGONIST-ANTAGONIST CONTROL IN A PNEUMATIC ARTIFICIAL MUSCLE-BASED UPPER LIMB MANIPULATOR

SUMMARY

Nowadays, with the advancement of technology, artificial systems designed to imitate biological systems are increasingly increasing. These artificial systems have the potential to make things easier for humans, optimize industrial processes, and lead to significant advances in healthcare. PAMs (pneumatic artificial muscles) are artificial muscles that work with air or gas pressure and are designed to imitate the movement of natural human muscles. They are often used in robotic systems, biomechanical applications, industrial automation and rehabilitation devices.

In this study, in chapter 2, detailed research about PAM was made and PAM types, features, advantages, disadvantages and working principle were explained. There are many types of PAMs. In this study, braided, pleated, netted, embedded and Festo PAM types were examined. The general features of these PAMs are as follows: They work similar to natural muscles, act like a single-acting cylinder, can shorten to approximately 20%-35% of their current length, can be used as a spring at constant pressure or constant volume, and have initial forces up to ten times higher than the same type of pneumatic cylinder.

PAMs are an important technology used in many applications and offer a number of advantages. The main advantages of PAMs are: They are generally made of lightweight materials, which provides portability and flexibility of use. PAMs can produce a large force in a small volume, providing powerful and effective movement. Because air or gas is used, PAMs are generally environmentally friendly. PAMs do not require lubrication and are easy to maintain since they have few moving mechanical parts. They can be used in dirty and dusty environments. It does not leak, there is no need for vacuum or air evacuation. These advantages of PAMs contribute to their preference in many industrial and commercial applications and to pioneering various technological innovations.

While PAMs have many advantages, they also have disadvantages. Here are the main disadvantages of PAMs: Model-based control of PAMs is difficult and complex control algorithms may be needed in cases where precise control is required. It has high hysteresis. In contraction and relaxation states, the same shortening value does not occur at the same pressure. It may produce noise caused by air movement during operation, which can be a problem especially in indoor environments or applications that require quiet operation. The range of motion is limited. It has a slower response time compared to hydraulic or electric systems. Rubber material may undergo disinformation after a while. It is not resistant to welding spatters and sharp fragmented environments. These disadvantages do not mean that pneumatic artificial muscles may not be suitable in certain applications, but they are factors that should be considered in the design and application processes. Depending on the application requirements, these drawbacks may be minimized or tolerable.

The working principle of PAMs aims to imitate the movement of human muscles in a simple but effective way. With the change of air or gas pressure, the flexible sheath of the muscle expands or contracts, allowing the desired movement to occur. PAMs swell and shorten during contraction, that is, under pressure. It also contracts and lengthens when external force is applied. We can say that this principle forms the basis of pneumatic systems used in many industrial and commercial applications.

In Chapter 3, we wanted to find out the static characteristics of PAMs. For this, Festo's DMSP-20-200N RM-RM PAMs was used. This PAM has an inner diameter of 20 mm and a length of 200 mm. It can shorten up to 25% of its maximum length. The static characteristic represents the amount of muscle shortening relative to pressure. An experimental setup was prepared for this. In the experimental setup, a string encoder was connected to the PAMs and the output of the encoder was connected to the data logger card of National Instrument. By adjusting the pressure between 0-6 bars in the Daisy Lab application, the amount of shortening was found separately for both contraction and relaxation of the muscle. These data were transferred to the Matlab environment and equations were found with the curve fitting method both in the cftool environment and with the `fminsearch` command. Two types of equations were obtained. One of these is the Fourier equation. Although this equation is very close to the experimental results, a polynomial equation was also found as an alternative since it is a complex equation. The data obtained from the equations are presented graphically. Additionally, the experimental results and catalog data were compared. As a result of the comparison, it was seen that the experimental data did not match the catalog data exactly. There may be many reasons why the test results are not exactly the same as the catalogue, some of which may be air leakage in the experimental setup, rubber being a material that can stretch and undergo deformation, PAM not being a linear actuator, PAMs hysteresis being high, and by taking the average of PAMs contraction-relaxation states. It was thought that this might be due to comparison.

In Chapter 4, we wanted to find the static force model of PAM. PAMs are generally used because they produce high force, so it is important to find the force characteristic. PAM force can be measured in two different ways: isometric force measurement, that is, the length of the PAM is kept constant while the pressure increases, or isobaric force measurement, that is, the length of the PAM is variable while the pressure is maintained. Isobaric force measurement was used in this study. An experimental setup was prepared to find the relationship between force, length and pressure. DMSP-20-200N RM-RM, National Instruments data logger card, pressure regulator, pressure indicator, load cell indicator, linear ruler, DC motor, Load cell were used in the experiment. The aim of the experiment is to read the force values by keeping the pressure of the DMSP-200N RM-RM constant, increasing and decreasing the throttling ratio, creating a static force map and testing the force model to be found. For this, the pressure value to be given to PAM from the Daisy Lab application interface was adjusted to 6 bars with 0.5 increments starting from 0.5 bar, and the muscle length was adjusted to 21% reduction starting from 0% reduction rate and 3% increments. Separate force values were found for each pressure and throttling ratio. Two different force values were found for muscle contraction and relaxation. Feedback position control was made to adjust the throttle ratios. For position control, the position value read from the linear ruler was compared with the reference position value selected by the user and transmitted to the PID controller. The controller signal was transferred to the DC motor. When the desired position was reached, the engine stopped working and the force values were read from the load cell indicator or the computer interface.

Experimental results were tabulated and a static force map was drawn in Matlab environment for DMSP-20-200N RM-RM. According to these results, it was observed that the PAM force varies significantly with length, the maximum force can only be applied at the initial length, and the resulting force decreases as the contraction rate of the PAM is increased. Force static models available in the literature were researched and added to the study. The new static force model was created using the stress equations affecting pressure vessels. The equation found was compared with the experimental results and the error rate was calculated. The error rate found was compared with existing static force models and was found to have better performance.

In Chapter 5, the working principle of the agonist-antagonist system, its mathematical model and PID control with a PAM and a spring are explained. Agonist-antagonist systems refer to groups of muscles that work reciprocally. In this system, there is a pair of muscles: agonist and antagonist muscles. The agonist muscle represents the muscle that moves a joint in one direction, while the antagonist muscle represents the muscle that moves the same joint in the opposite direction. For example, the biceps and triceps muscles form an agonist-antagonist pair. The biceps bends the elbow (flexion), while the triceps muscle straightens it (extension). The operation of the two PAM agonist antagonist system is as follows; Initially, the length of the two muscles is adjusted to the same pressure, reaching half of the total shortening amount. To change the joint angle, pressure is applied to one of the muscles and the pressure of the other muscle is reduced by the same amount.

It was desired to find a mathematical model of the agonist-antagonist PAM pair. For this, a phenomenological model was used. In other words, PAM is likened to elements that do not actually exist but can define it. With this approach, PAM is modeled with spring, damping coefficient and contraction force and the equations are given in the thesis.

PID controller was used to control the agonist-antagonist system. PID controller consists of proportional controller, integral controller and differential controller. The working principle of this controller is as follows: The difference between the desired value, that is, the reference value and the current output, is calculated. This is an error signal. When the error signal comes to the PID controller, PID multiplies this error by a determined coefficient, takes its integral and derivative. The signal from the controller is sent to the system and a new output signal is obtained. Again, the new output value is compared with the input and the same operations are performed. There are many methods to adjust PID coefficients. Some of these are manual tuning, Ziegler-Nichols, Loop tuning software and frequency response methods.

It was desired to control the position of the agonist-antagonist system with PID using a PAM and a spring. In the literature, two PAMs are generally used for this movement. While some of the studies in the literature on the control of the agonist-antagonist system with PAM adopt a model-based control approach, in some others a model-independent control approach is used in order to avoid the complexity and difficulty of modeling. In this study, the model-independent control method was used and PID coefficients were adjusted by manual adjustment method. For this purpose, an experimental setup was set up. Encoder, DMSP 20-200N RM-RM PAM, spring, National Instrument data logger card, pressure regulator and pressure gauge materials were used in the experiment. The encoder is set to zero for the situation where PAM is unpressurized. As the PAM pressure is increased, the angle of the encoder increases, and at the maximum shortening of the PAM (at 6 bar), the encoder can show an angle

of up to 120 degrees. MATLAB/SIMULINK program was used for control. The circuit for the system was designed in the SIMULINK program. With this circuit, a reference variable signal was created, position information was read from the encoder with the analog input block, and the signal was sent to the pressure regulator with the analog output block. In this way, the system was tried to be controlled in real time. PID coefficients were calculated through experiments carried out via Simulink, and PID position control of the agonist-antagonist system was successfully carried out using a PAM and a spring.



1. GİRİŞ

Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte robotlar günümüzde hemen hemen her alanda kullanılmak üzere çeşitli şekil ve özelliklerde karşımıza çıkabilmektedirler. Temel olarak robotlar endüstriyel ve mobil robotlar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Mobil robotlar; insansı, biyolojik, işbirlikçi, duyurga çoklu ve sürü robotlar şeklinde sınıflandırılmaktadır [1].

İnsansı robotlar bunların arasında en gelişmiş ve karmaşık olanlarıdır. Bu robotlar ile amaçlanan, insan hareketlerini taklit ettirmek ve istenilen görevleri programlandığı şekilde yerine getirmektir. Endüstride insansı robotlardan genellikle robot kol tercih edilir. Kollardaki dirsek hareketi genellikle servo motor ya da yapay kaslar ile oluşturulan agonist- antagonist kas çifti ile sağlanır. Örneğin kola Vücut kısımları arasındaki açının arttırılması (ekstansiyon) hareketini yaptırmak için kolun arka yüzeyindeki kas (triseps) kasılırken tersini yaptırmak için antagonisti olan kolun ön yüzeyindeki kas (biceps) kasılır. Yapay kaslara basınç verildiğinde kısalan ve şişen basınç azaltıldığında duruma da incelen ve uzayan kaslardır. Bu özelliği ile insan kasına benzerdir. Bu yönü ile insanı taklit eden robotların yapımında tercih edilen bir aktüatördür. Bu çalışmada bir pnömatik yapay kas ve bir yay ile agonist-antagonist sistemin oluşturduğu dirsek hareketinin konum kontrolünü sağlamak hedeflenmiştir.

1.1. Tezin Kapsamı

Pnömatik yapay kas ile yapılacak Agonist-Antagonist kaslar basınç tankı ağırlığı nedeni ile endüstriyel amaçla kullanılmak üzere tasarlanacaktır. Belirlenen pnömatik yapay kasın statik karakteristiği ve statik kuvvet karakteristiği oluşturulacak deney düzenekleri ile belirlenecek ve deneyde elde edilen sonuçlar ile matematiksel model oluşturulacaktır. Başka bir deney düzeneğiyle bir PYK ve yay ile oluşturulan agonist-antagonist düzeneğin çalışması sonucu oluşan eklem hareketinin konum kontrolü PID kontrolcü ile yapılacaktır.

1.2. Tezin Amacı

Agonist- antagonist kaslar dirseği bükmeye yarar. Pnömatik yapay kas kullanılarak hazırlanacak deney düzeneği ile insan vücudunda kol ve bacaklarda bulunan agonist-antagonist kaslar taklit edilerek uç eyleyicinin konum kontrolünü sağlamaktır.

1.2.1. Tezin ikincil amacı

PYK'lar linner olmayan kaslardır ve modellenmesi genellikle karmaşık denklemlere dayanır. PYK'lar yüksek kuvvetlere dayandığından kuvvet modeli oluşturmak oldukça önemlidir. Bu çalışmadaki bir diğer amaç PYK'nın statik modelini ve statik kuvvet modelini bulmaktır.

1.3. Literatür Araştırması

Uç eyleyicilerin konum ve kuvvet kontrolü için şişebilen esnek tüp (Pnömatik yapay kas) kullanımı yeni bir fikir değildir. McKibben eyleyicileri 1950 ve 1960'larda geliştirilmiştir [2].

PYK her iki ucunda galvanizlenmiş çelik ve alüminyum alaşımından oluşan bağlantı elemanı bulunan esnek bir membrandan oluşur. Yapay kasa basınç verildiğinde membran genişler ve kısalır. Kastaki basınç azaltıldığında ise membran daralır ve uzar. Genleşme hareketi radyal yönde olurken, membranın kısalması aksel yönde olur. Bu kısalma ile birlikte yüke çekme kuvveti uygulanmış olur [3]. Pnömatik yapay kaslar bu çalışma şekli ile insan kasına benzerdir ve biyrobotik, endüstriyel, medikal, havacılık gibi birçok alanda kullanılmaktadır[4], [5], [6], [7], [8].

PYK'lar yalnızca doğrusal olarak tek yönde hareket ettirilebilirler. Agonistik bir çift oluşturmak için iki adet pnömatik yapay kas makara yardımı ile birbirine bağlandığında insan vücudunda kol ve bacaklarda bulunan agonist antagonist kas çiftine benzer bir yapı oluşturulabilir [9]. Agonist-antagonist kas çifti bükme hareketini yapar. Bu sistem Büchler ve ark [10], Boblan ve ark [11], Noritsugu ve Tanaka [12] tarafından kullanılmıştır.

Agonist antagonist kas çiftinin konum ve kuvvet kontrolü için farklı kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Konum ve kuvvet kontrolü hem temel hem de gelişmiş kontrol algoritmaları kullanılarak kontrol edilebilir. Temel kontrol algoritmaları; empedans, admitans, sertlik ve hibrit kontrol olarak örneklendirilebilir. Gelişmiş kuvvet kontrol algoritmaları; öğrenme tabanlı, bulanık mantık ve yapay zeka gibi

gelişmiş kontrolörler diğer temel kontrol algoritmalarının birlikte kullanılması sonucu oluşur [13].

Planlanmış bir hareketi gerçekleştirmek için klasik konum kontrol yöntemleri yeterli olabilmektedir. Ancak çevre ile etkileşimin yüksek olduğu alanlarda küçük hatalar sonucunda büyük temas kuvvetleri oluşabilmektedir. Bu da manipülatöre veya malzemeye zarar verebilmektedir. Çevre ile etkileşimin yüksek olduğu manipülatörlerde kuvvet kontrolü yapılması daha uygun olacaktır bunun için pasif etkileşim ve aktif etkileşim kontrolü yapılmalıdır. Pasif etkileşim kontrolünde temas kuvveti, manipülatörün yapısal esnekliğiyle ve uç işlevcisiyle kontrol altında tutulmaya çalışılır. Aktif etkileşim kontrolünü Siciliano ve Villani kuvvet kontrol algoritmalarını doğrudan ve dolaylı olarak ikiye ayırmıştır. Dolaylı kuvvet kontrol, kuvveti ölçerek sonucu algoritmaya dahil etme ile gerçekleşir. Doğrudan kuvvet kontrolde kuvveti istenilen referans değerden çıkarılarak algoritmaya eklenir [14].

Kuvvet ve konum kontrol algoritmasının en çok bilinen algoritmaları PID, empedans ve bulanık mantık kontroldür. Aşağıda hem konum hem de kuvvet kontrolü üzerine yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

Lee yapmış olduğu çalışmada, pnömatik yapay kasların agonist-antagonist konfigürasyonunda PID kontrolü kullanılarak kuvvet kontrolü gerçekleştirilmiştir. PID kontrolcüsü, pnömatik kasların istenen kuvvetlere hassas bir şekilde yanıt vermesini sağlamak için optimize edilmiştir [15].

Wong yapmış olduğu çalışmada, pnömatik yapay kasların PID kontrolüne bulanık mantık tabanlı kazanç ayarlama eklenmiştir. Bu yöntem, pnömatik kasın hem konum hem de kuvvet kontrolünü iyileştirmek için kullanılmıştır [16].

Zhang yapmış olduğu çalışmada, pnömatik yapay kasın pozisyon kontrolü için PID kontrolcüsünün optimizasyonu üzerine odaklanılmıştır. Parçacık sürü optimizasyonu kullanılarak PID kontrol parametreleri ayarlanmış ve deneysel olarak doğrulanmıştır [17].

He yapmış olduğu çalışmada, pnömatik yapay kasın PID kontrolü için yapay sinir ağı tabanlı ters model kullanılmıştır. Yapay sinir ağı, pnömatik kasın davranışını tahmin etmek için kullanılmış ve PID kontrolcüsü bu tahminlere dayanarak hareket kontrolünü gerçekleştirmiştir [18].

Empedans kontrol Hogan tarafından ortaya atılmıştır. Empedans kontrol kuvvet ve konum arasında ilişki tanımlayan dinamik kontrol yöntemidir. Genellikle manipülatörün çevreyle etkileşimde olduğu projelerde kullanılır [19]. Hogan empedans kuvvet kontrolünü agonist- antagonist kasların çalışmasını incelemesi sonucu bulmuştur. Ayrıca agonist- antagonist sistemi matematiksel modelini oluşturmuştur [20-22].

Love ve Book empedans kontrolünü gerçek zamanlı olarak kullanmışlardır. Empedans katsayılarının değişiminin sonuçlarını çalışmalarında yer vermişlerdir [23].

Mills ve Lokhorst değişken empedans kontrol algoritmasıyla 2-SD robotta gerçek zamanlı kontrol yapmıştır. Empedans kontrol algoritmasının istenen şekilde çalıştığını ve katsayıların değiştirilmesi sonucu kıyaslamaları çalışmalarında paylaşmışlardır [24].

Kaboli'nin yapmış olduğu çalışmada, pnömatik yapay kasların fuzzy mantık kontrolü, robotik uygulamalar için incelenmiştir. Fuzzy kontrolün pnömatik kasların hareket kontrolü ve kuvvet kontrolü performansını iyileştirebileceği gösterilmiştir [25].

Khedekar'ın yapmış olduğu çalışmada, pnömatik yapay kasların antagonistik konfigürasyonunda fuzzy kontrolü kullanılarak kuvvet kontrolü üzerine odaklanılmıştır. Fuzzy kontrolcü, pnömatik kasların istenen kuvvet ve pozisyon değerlerini takip etmek için kullanılmıştır [26].

1.4. Hipotez

Pnömatik yapay kaslar, hava basıncı ile kontrol edilen yapay kaslardır. Bu kaslar, belirli bir kuvvet uygulandığında kasılma ve gevşeme tepkileri gösterirler. Yaylar ise mekanik enerji depolayabilen ve belli bir kuvvete karşı gerilme veya sıkışma tepkisi veren unsurlardır.

Birbirine zıt çalışan iki kastan biri diğerinin antagonisti olur. Bir pnömatik yapay kas ve bir yay, agonist-antagonist bir sistemi oluşturabilir. Bu sistemde, pnömatik kas agonist olarak hareket ederken, yay da kasın konumunu dengelemek için antagonist olarak hareket eder.

PID kontrol algoritması, bir geri besleme kontrol algoritmasıdır. Bu algoritma, sistemdeki hata (istenilen konum ile gerçek konum arasındaki fark) üzerinden bir kontrol sinyali üretir. Proportional (P), Integral (I) ve Derivative (D) terimlerini

kullanarak, sistemdeki hata, hatanın zaman integrali ve hata değişiminin zaman türevi gibi parametreleri kullanarak kontrol sinyali hesaplanır.

1.4.1. Hipotezin öngördüğü durumlar

- PID kontrol algoritması, pnömatik yapay kas ve yayların konumunu istenilen konuma yönlendirebilir.
- Agonist-antagonist sistemi, belirli bir kuvvet dengesi ve istenen konumun korunması için etkili bir mekanizma sağlayabilir.
- PID kontrolünün hassas ayarları ve geri besleme mekanizması, sistemdeki dalgalanmaları ve istenmeyen konum kaymalarını minimize edebilir.
- Pyk'nın statik karakteristik modeli ve statik kuvvet haritası eğri uydurma ve mevcut modele yeni yaklaşımlar ile elde edilebilir.

1.4.2. Deney ve analiz

- Deneyler aracılığıyla, pnömatik yapay kas ve yay ile oluşturulan agonist-antagonist sistemin PID kontrolü altında nasıl davrandığını test edebiliriz.
- Deneylerin sonuçları, sistemin konum kontrol yeteneği ve PID kontrol algoritmasının etkinliği hakkında bilgi sağlayacaktır.
- Pyk'nın basınç - uzunluk arasındaki ilişki ile basınç-kuvvet-uzunluk arasındaki ilişkiyi bulabilmek için deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler ile PYK'nın matematiksel modelini test edebiliriz.

Bu hipotez, pnömatik yapay kaslar ve yaylarla oluşturulan agonist-antagonist sistemlerin PID kontrol algoritması kullanılarak konum kontrolü sağlayabileceğini ve PYK'nın matematiksel olarak eğri uydurma yöntemi ve mevcut modele yeni yaklaşımlar ile modellenebileceğini öne sürmektedir. Deneyler ve analizler, bu hipotezin doğruluğunu test edebilir ve sistem performansı hakkında bilgi sağlayabilir.



2. PNÖMATİK YAPAY KASLAR

PYK gaz ile çalışan esnek membran yapısına sahip iş elemanıdır. PYK'ya hava verilerek çalışması sağlanır. PYK'lar pnömatik silindir ile karşılaştırıldığında kasılma sırasında pnömatik silindirin kuvveti sabit kalırken PYK'ların kuvveti azalır. PYK'lar kasılma anında şişer ve kısalır. Dışarıdan kuvvet uygulandığında da daralır ve uzar. Bu özellikleri ile biyolojik kas ile PYK arasında ciddi benzerlik mevcuttur. Bu yüzden bu kaslar insan kolu benzeri robot kollarında daha çok kullanılmaktadır[27]. PYK'lar biyorobotik, medikal, endüstriyel ve havacılık alanlarında kullanılmaktadır.

2.1. PYK Çeşitleri

PYK'ların piyasada örgülü, pileli, ağı, gömülü ve Festo PYK'ları gibi çeşitleri bulunmaktadır.

2.1.1. Örgülü pnömatik yapay kaslar

Örgülü PYK etrafı örgülü kılıftan, elastik tüpten ve iç lastikten oluşur. Örgü lifleri pnömatik kasın boylamsal ekseninin etrafında sarmal bir şekilde standart açılarla yerleştirilmiştir. Joseph L. McKibben, 1950'lerde çocuk felci hastalarına yönelik bir ortez cihazının aktüatörü olarak bu kası üretti [28]. Bu kaslar basınç altında kısalır ve şişer. Kısalırken yani yük altında çekme kuvveti uygular. Şekil 2.1'de örgülü PYK'nın basit bir çeşidi gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Örgülü PYK.

2.1.2. Pileli pnömatik yapay kaslar

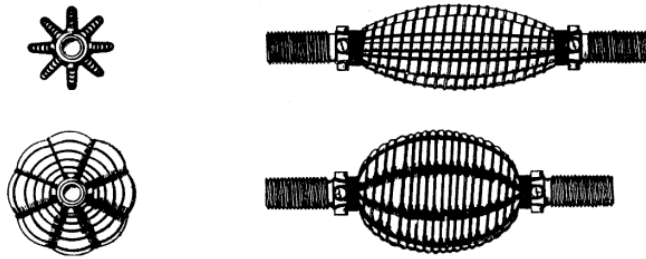
Pileli pnömatik yapay kaslar diğer yapay kaslar gibi basınç altında şişer ve kısalır. “Daerden tarafından membran yapısı geliştirilmiştir” [29-30]. Bu membranın özelliği basınç altında herhangi bir malzeme gerilmesi olmayışıdır. Membranın esneyebilmesi için az miktarda enerjiye ihtiyaç vardır. Şekil 2.2’de Pileli PYK’nın basınç altındaki durumu gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Pileli PYK.

2.1.3. Ağlı pnömatik yapay kaslar

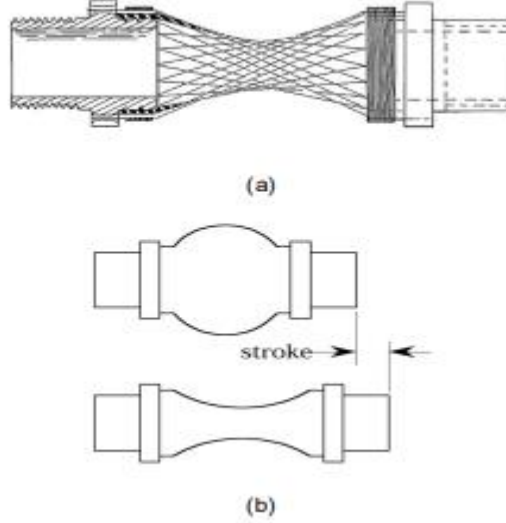
Ağlı pnömatik yapay kasların örgülü pnömatik yapay kaslara göre farkı membran etrafındaki örgülü ağları arasındaki boşlukların daha büyük olmasıdır. Bu yüzden membranı daha düşük basınçlara dayanabilmektedir. Ağlı PYK’ların ROMAC, Yarlott, Kukolj gibi pek çok türü bulunur. Şekil 2.3’te Yarlott tipi ağlı PYK gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Yarlott tipi ağlı PYK [31].

2.1.4. Gömülü pnömatik yapay kaslar

Bu PYK’larda kuvvet üreten kısım membranın içerisine gömülüdür. Bu yüzden sürtünme yoktur ayrıca ince bir membrandan oluşur. Bu nedenle örgülü PYK’lara göre histerezisi ve eşik basıncı daha azdır. Gömülü PYK’ların Morin, Baldwin, UPAM, Paynter Knitted, Paynter Hyperboloid, Kleinwachter gibi çeşitleri bulunmaktadır[31]. Şekil 2.4’te Paynter Hyperboloid gömülü PYK’nın basınç altında ve basınç verilmeden önceki durumu gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Paynter Hyperboloid gömülü PYK [31].

2.1.5. Festo pnömatik yapay kasları

Festo şirketi 2002 yılında Festo pnömatik yapay kasını geliştirmiş ve patentini almıştır. Festo PYK'larının fiberi yüksek basınca dayanıklı genişleyebilen kauçuk malzemeye gömülüdür. Günümüzde en çok tercih edilen pnömatik yapay kasların arasında yer almaktadır. Şekil 2.5'te Festo PYK'larının bir çeşidi verilmiştir.



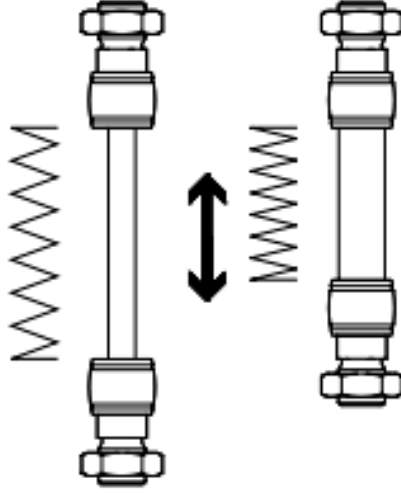
Şekil 2.5. Festo PYK'sı [33].

2.2. Pnömatik Yapay Kasların Özellikleri

- Aynı çaptaki geleneksel bir silindirden 10 kata kadar daha yüksek başlangıç kuvvetleri vardır.
- Büyük yüklerde bile son derece dinamik tepki verir.
- Tamamen sarsıntısız çalışır ve hareket eden mekanik parçası yoktur.
- Enkoder olmadan basınçla da kontrol edilebilir.
- Sürtünmesiz hareket eder.
- Tek etkili silindir gibi hareket ederler.
- Belirtilen oranda öngerilme yapılabilir.
- PYK'lar değişik boyutlarda üretilebilir.

- Kasın boyunun yaklaşık %20-%25'ine kadar kısalabilir.
- PYK sabit basınçta veya sabit hacimde yay olarak çalıştırılabilir[32]. Şekil 2.6'da PYK'nın yay olarak kullanımını gösterilmiştir.

Pressure/volume = constant



Şekil 2.6. PYK'nın yay olarak kullanılması [32].

2.2.1. PYK'nın avantajları

- PYK'lar, küçük bir hacimde büyük bir kuvvet üretebilirler. Bu, çeşitli uygulamalarda güçlü ve etkili hareket sağlar.
- Düşük basınçlı hava tüketir.
- Pnömatik yapay kaslar genellikle hafif malzemelerden yapılmıştır, bu da taşınabilirlik ve kullanım esnekliği sağlar.
- Doğal kas hareketlerine benzer bir kinematik yapısı vardır.
- Maliyeti aynı iş için kullanılan diğer pnömatik ürünlere göre daha düşüktür.
- Hava veya gaz kullanıldığından, pnömatik yapay kaslar genellikle çevre dostu ve toksik olmayan bir enerji kaynağına sahiptir.
- Pnömatik yapay kaslar, karmaşık olmayan yapıları ve az sayıda hareketli parçalarıyla bilinirler. Bu da dayanıklılıklarını artırır ve bakım maliyetlerini düşürür.
- Yağlama ihtiyacı bulunmamaktadır.
- Kirli ve tozlu ortamlarda kullanılabilir.
- Sızıntı yapmaz, vakuma ya da hava tahliyesine gerek yoktur.

2.2.2. PYK'nın dezavantajları

- Çift etkili kullanılamazlar.
- Kauçuk malzeme bir süreden sonra dezenformasyona uğrayabilir.
- Aşırı yüklemde çatlak oluşabilmektedir.
- Kaynak sıçramalarına ve keskin parçalı ortama dayanıksızdır.
- Histerezisi yüksektir. Kasılma ve gevşeme durumlarında aynı basınçta aynı kısıalma değeri oluşmaz.
- Lineer bir aktüatör olmadığından model tabanlı kontrolü zordur.
- Pnömatik sistemler, çalışma sırasında hava veya gazın hareketinden kaynaklanan gürültü üretebilir. Bu, özellikle kapalı ortamlarda veya sessiz çalışma gerektiren uygulamalarda sorun olabilir.
- Hareket alanı kısıtlıdır. Pnömatik silindirler kadar uzama ve kısıalma yapamazlar.
- Pnömatik yapay kasların hareket aralığı sınırlı olabilir. Özellikle uzun hareketler gerektiren uygulamalarda sınırlılıklar ortaya çıkabilir.
- Pnömatik yapay kaslar, hidrolik veya elektrikli sistemlere kıyasla daha yavaş tepki sürelerine sahip olabilirler. Bu, bazı hızlı ve hassas uygulamalarda dezavantaj oluşturabilir.



3. PYK'NIN STATİK KARAKTERİSTİĞİ

Bu çalışmada Festo PYK'larından DMSP-20-200N RM-RM kullanılmıştır. Şekil 3.1'de Festo'nun çeşitli PYK'ları gösterilmektedir. Şekil 3.2'de de ürün kodlarının açıklamaları gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Festo PYK'ları [35].

		DMSP	-	10	-	500N	-	RM	-	CM
Drive function										
Single-acting, pulling										
DMSP	Fluidic Muscle									
Internal dia. [mm]										
Nominal length [mm]										
...N	40 ... 9000									
First connection										
RM	Pneumatic connection, radial									
AM	Pneumatic connection, axial									
Second connection										
RM	Pneumatic connection, radial									
AM	Pneumatic connection, axial									
CM	No pneumatic connection									

Şekil 3.2. Festo DMSP PYK'larının kodları ve kodlarının açıklamaları [33].

3.1. DMSP-20-200N RM-RM Özellikleri

Bu PYK'nın iç çapı 20mm, strokun mevcut boyu 200mm'dir. Kasa basınç bağlantısı iki uçtan da yapılabilir(RM-RM). Bu kas -5°C-60°C sıcaklıkları arasında çalışabilmektedir. Maksimum daralmada çap genişlemesi 40 mm kadar olmaktadır. Bu kasa mevcut uzunluğunun %4'ü oranında öngerdirme yapılabilir ve kasılma sırasında maksimum kısılma miktarı kasın mevcut uzunluğunun %25'i kadardır. Bu yapay kas 0 ile 6 bar basınç arasında çalışabilmektedir ve maksimum 1500N çekme kuvveti uygulamaktadır[33]. Bu oranlar farklı kas uzunlukları için değişebilmektedir. Bu değişim Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Şekil 3.3'te DMSP-20-200N RM-RM'nin görseli gösterilmektedir.



Şekil 3.3. DMSP-20-200N RM-RM.

Tablo 3.1. Çeşitli iç çaptaki PYK'ların kasılma, öngerdirme, basınç ve kuvvet değerleri.

Farklı iç çaptaki PYK'lar(mm)	Maksimum izin verilebilir öngerdirme(mevcut uzunluğa göre)	Maksimum izin verilebilir kasılma(mevcut uzunluğa göre)	Çalışma basıncı(bar)	Üretilen kuvvet(N)
5	%1	%20	0...6	0...140
10	%3	%25	0...6	0...630
20	%4	%25	0...6	0...1500
40	%5	%25	0...6	0...6000

3.2. DMSP-20-200N RM-RM'nin Statik Karakteristik Deneyi

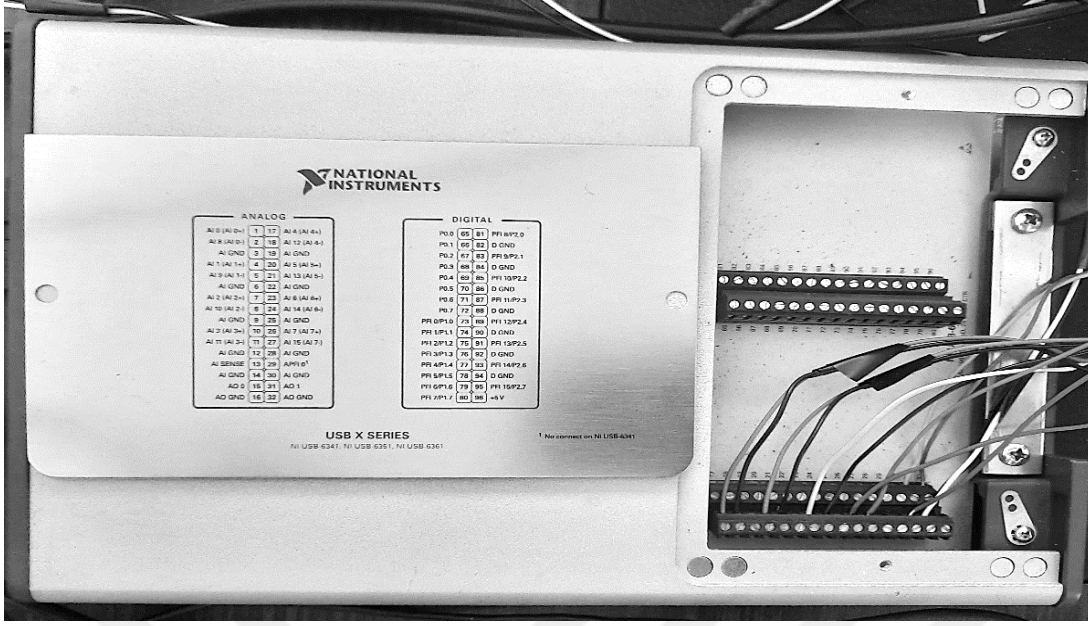
Hazırlanan deney düzeneği ile belirli basınç aralıklarında kasın boy değişimi 3 turda ölçülmüştür. Şekil 3.4'te deney düzeneği Şekil 3.5'te basıncın ayarlandığı ve konumun okunduğu ekran Şekil 3.6'da da kullanılan analog-dijital veri okuyan ve çıkış veren kart gösterilmiştir.



Şekil 3.4. PYK'nın statik karakteristiği için kurulan deney düzeneği.

PNÖMATİK YAPAY KAS LABORATUVARI	
KONUM	
0 BAR	KONUM OKU
0.5 BAR	
1 BAR	
1.5 BAR	
2 BAR	
2.5 BAR	
3 BAR	
3.5 BAR	
4 BAR	
4.5 BAR	
5 BAR	
5.5 BAR	
6 BAR	
0 BAR	
OTOMATİK	
GİT	DUR
BASINÇ VER	
19.12.2023 - 17:05:30	
KAS SERBEST BOYU	200
KAS TİPİ	200 20
DOSYA ADI	deneme kayıt_omer6
KAYIT KLASORU	C:\Users\Public\Documents\DASYLab\11.0.0\ENG\data
OKUNAN	
KONUM (mm)	KUVVET (N)
99,9	1
TEST DURUMU	
START	STOP
KAYDET	

Şekil 3.5. Basıncın ayarlandığı ve konumun okunduğu Daisy Lab ekranı.



Şekil 3.6. Analog-dijital veri okuyan ve çıkış veren National Instruments'ın kartı.

PYK'lar basınç altındayken şişer ve kısalır. Bu kısalma lineer değildir. Kasın karakteristiğini ortaya çıkarmak için öncelikle kas boyunun basınca göre nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu deneyde PYK ipli enkodere bağlanmıştır. Enkoderin analog çıkışı National Instrument'ın veri okuma kartına bağlanmış olup Daisy Lab programından ayarlanan basınç değeri, basınç regülatörüne gönderilmiştir. Basınç ölçümleri 0.5 bar aralıklar ile 0-6 bar arasında yapılmıştır. PYK hem kasılırken (basınç arttırılırken) hem de gevşerken (basınç azalttırılırken) ayrı ele alınmıştır. Tablo 3.2'de PYK kasılırken (basınç arttırılırken) boy değişiminin deney sonuçları gösterilmektedir. Tablo 3.3'de ise PYK eski haline dönerken (basınç azalttırılırken) boy değişiminin deney sonuçları gösterilmektedir.

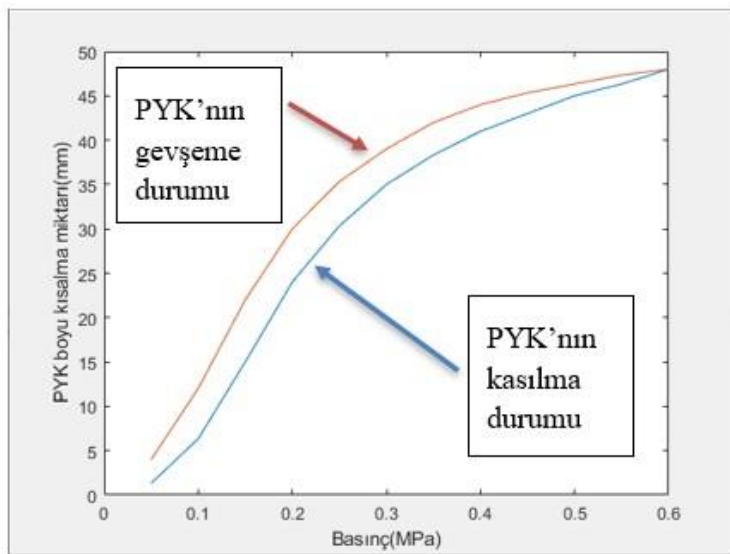
Tablo 3.2. DMSP-20-200 PYK'nın kasılma durumunda basınç değişimine göre kasın boyunun değişimi.

Basınç(bar) / PYK'nın boy değişimi(mm)	1. Tur	2. Tur	3. Tur	PYK'nın ortalama boy değişimi(mm)
0	0	0	0	0
0.5	1	1	2	1.3
1	6	6	7	6.3
1.5	14	15	16	15
2	23	24	25	24
2.5	30	30	31	30.3
3	35	35	35	35
3.5	38	38	39	38.3
4	41	41	41	41
4.5	43	43	43	43
5	45	45	45	45
5.5	47	46	46	46.3
6	48	48	48	48

Tablo 3.3. DMSP 20-200 PYK'nın gevşeme durumunda basınç değişimine göre kasın boyunun değişimi.

Basınç(bar) / PYK'nın boy değişimi(mm)	1. Tur	2. Tur	3. Tur	PYK'nın ortalama boy değişimi(mm)
6	48	48	48	48
5.5	48	47	47	47.3
5	47	46	46	46.3
4.5	46	45	45	45.3
4	44	44	44	44
3.5	42	42	42	42
3	39	39	39	39
2.5	36	35	35	35.3
2	30	30	30	30
1.5	22	22	22	22
1	12	12	12	12
0.5	4	4	4	4
0	0	0	0	0

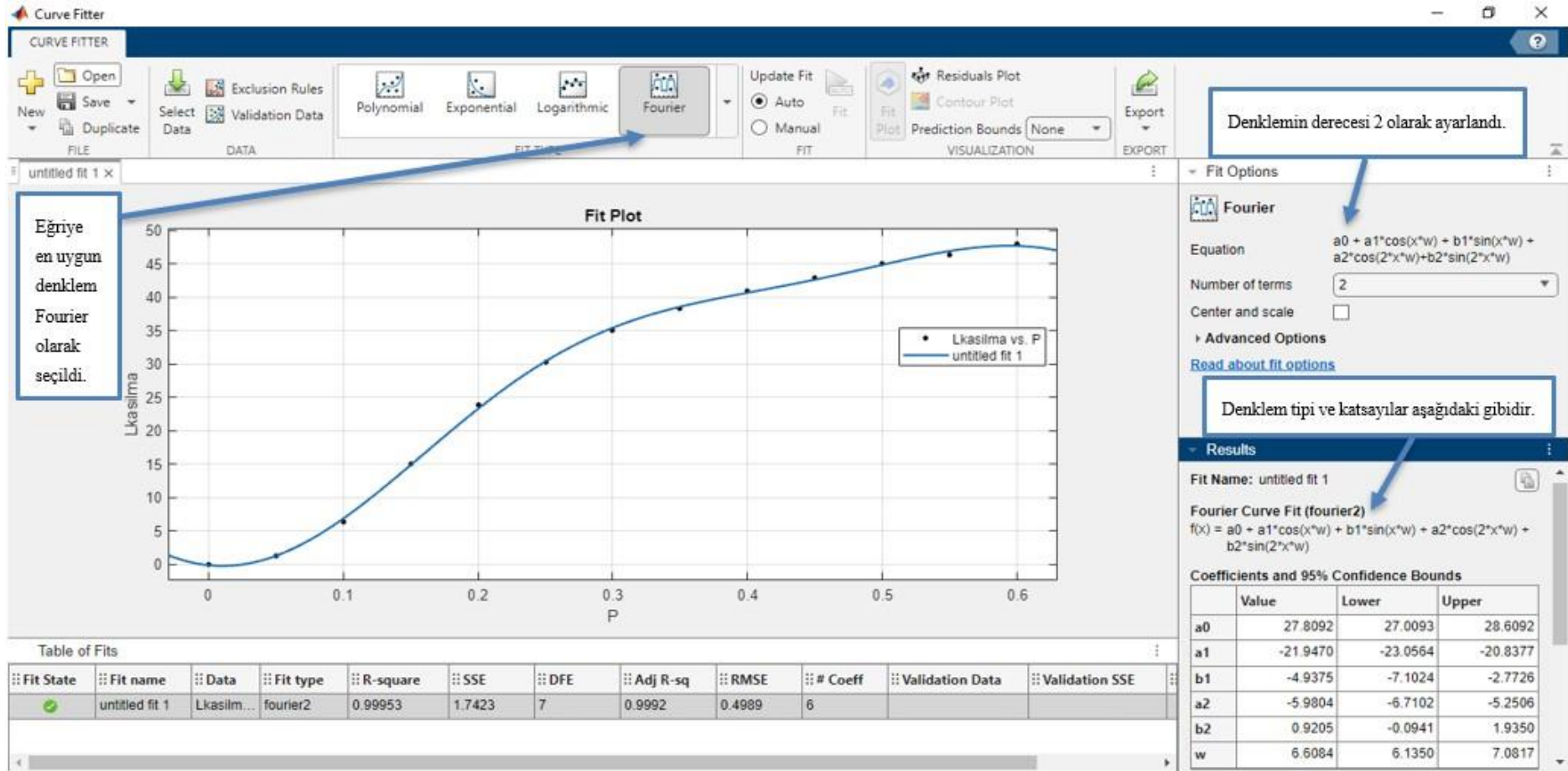
Literatürde verilen basınca göre uzunluk değişim denklemi sabit olarak bulunmamaktadır. Dene sonuçlarından yararlanarak öncelikle hem kasılma hem de gevşeme durumları için Matlab programında eğriler çizilmiştir. Şekil 3.7'de eğriler gösterilmiştir.



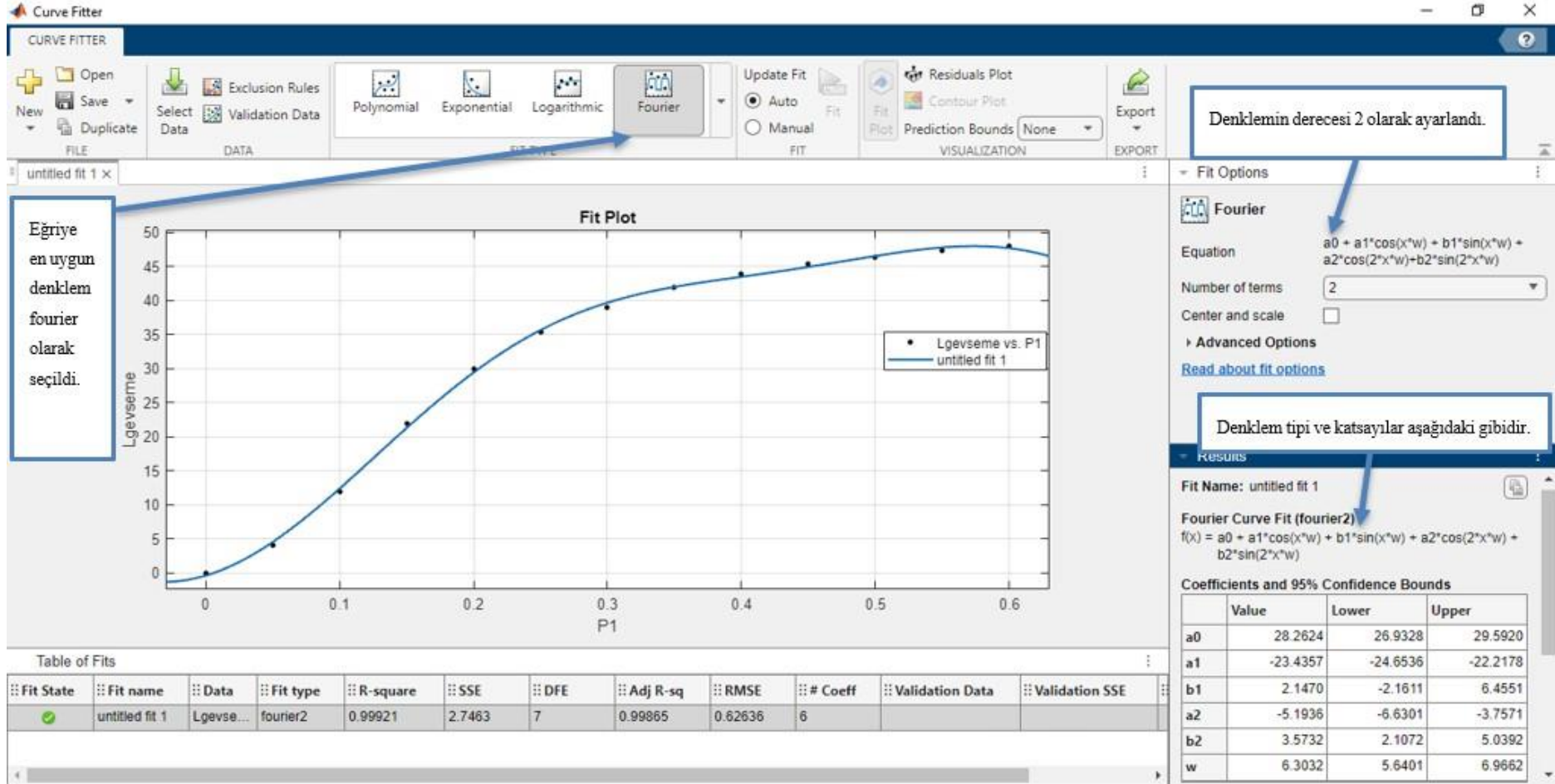
Şekil 3.7. DMSP-20-200N RM-RM'nin kasılma ve gevşeme durumlarında basınca göre kısalma miktarları.

Şekil 3.7'den de görüleceği üzere bu PYK'da kasılma ve gevşeme durumlarında histerezis etkisi vardır aynı basınçta aynı kısılma miktarı görülmemektedir. Bu yüzden her iki durum ayrı ele alınacak olup ayrı denklemler elde edilecektir. Eğri uydurma yöntemi ile Matlab programında hem Cftool ortamında hem de fminsearch komutu ile verilere uygun en yakın denklem bulunmuştur. Şekil 3.8'de PYK'nın kasılma durumu için Cftool ortamında bulunan eğri türü, denklemin sonucu olan eğri ve denklemin katsayıları gösterilmiştir. Şekil 3.9'da da PYK'nın gevşeme durumu için Cftool ortamında bulunan denklem türü, denklemin sonucu olan eğri ve denklemin katsayıları gösterilmiştir.





Şekil 3.8. DMSP-20-200N RM-RM'nin kasılma durumu için Cftool ortamında denklem türü, denklemin sonucu olan eğri ve denklemin katsayıları.



Şekil 3.9. DMSP-20-200N RM-RM'nin gevşeme durumu için Cftool ortamında denklem türü, denklemin sonucu olan eğri ve denklemin katsayıları.

Şekil 3.8’de ve Şekil 3.9’da kasın kasılma ve gevşeme durumundaki en uygun denklemleri bulmak için bir çok eğri türü denenmiştir. Doğru eğriyi bulmak için Arifoğlu’na göre;

Kötü olan eğrileri tespit etmek için Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da Table of Fits penceresinde yer alan SSE, Adj R-sq ve R-square değerleri de kullanılabilir. Genel olarak R-square ve Adj R-sq değeri 1’e yaklaştıkça eğrinin iyi olduğu, 1’den uzaklaştıkça ise eğrinin kötü olduğu bilinmelidir. SSE değeri ise küçüldükçe eğrinin iyi olduğu, büyüdüğüçe eğrinin kötü olduğu söylenebilir [34].

Bu bilgidan yola çıkılarak deney sonuçlarına en yakın ve sade eğri türü fourier, derecesi de 2 olarak seçilmiştir. Bu ifade Denklem 3.1’de verilmiştir. Bu denklemde $f(x)$ kısılma miktarını, x basınç miktarını $a_0, a_1, a_2, b_1, b_2, w$ katsayıları göstermektedir.

$$f(x) = a_0 + a_1 * \cos(x * w) + b_1 * \sin(x * w) + a_2 * \cos(2 * x * w) + b_2 * \sin(2 * x * w) \quad (3.1)$$

Şekil 3.8’de bulunan katsayılar Denklem 3.1’de yerine yerleştirilirse ve x yerine p (basınç), fonksiyonda L (kısılma miktarı) olarak yazılırsa yeni ifade Denklem 3.2’deki gibi olur.

$$L(p) = 27.8092 - 21.9470 * \cos(p * 6.6084) - 4.9375 * \sin(p * 6.6084) - 5.9804 * \cos(2 * p * 6.6084) + 0.9205 * \sin(2 * p * 6.6084) \quad (3.2)$$

Şekil 3.9’da bulunan katsayılar Denklem 3.1’de yerine yerleştirilirse ve x yerine p (basınç), fonksiyonda L (kısılma miktarı) olarak yazılırsa yeni ifade Denklem 3.3’teki gibi olur.

$$L(p) = 28.2624 - 23.4357 * \cos(p * 6.3032) + 2.1470 * \sin(p * 6.3032) - 5.1936 * \cos(2 * p * 6.3032) + 3.5732 * \sin(2 * p * 6.3032) \quad (3.3)$$

Denklem 3.2 ve Denklem 3.3’te de görüldüğü üzere kasılma ve gevşeme durumlarının denklemleri farklıdır. Bu durum PYK kasılırken ve gevşerken ayrı karakteristiğe sahip olduğunu gösterir.

Şekil 3.10’da PYK’nın kasılma deneyi sonucunda belli aralıklarda ölçülen kısılma miktarını ve eğri uydurma yöntemi ile türetilen fourier denklemden elde edilen sonuç gösterilmiştir. Şekil 3.11 de bu iki denklem arasındaki hata farkı hesaplanmıştır.

Şekil 3.12’da PYK’nın gevşeme deneyi sonucunda belli aralıklarda ölçülen kısılma miktarını ve eğri uydurma yöntemi ile türetilen fourier denklemden elde edilen sonuç gösterilmiştir. Şekil 3.13 de bu iki denklem arasındaki hata farkı hesaplanmıştır.



Lfourier =

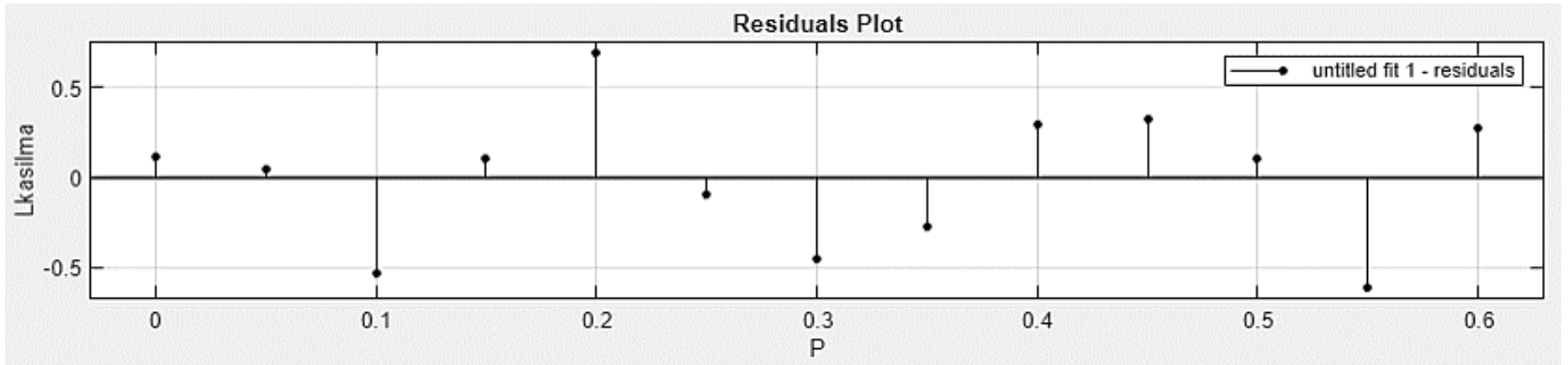
-0.1182 1.2911 6.8696 14.8958 23.3064 30.4229 35.4570 38.6031 40.7068 42.6733 44.8932 46.9458 47.7206

Lkasılma =

0 1.3333 6.3333 15.0000 24.0000 30.3333 35.0000 38.3333 41.0000 43.0000 45.0000 46.3333 48.0000

Şekil 3.10. PYK'nın kasılma durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen fourier denkleminin sonucunun karşılaştırılması.

23



Şekil 3.11. PYK'nın kasılma durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen fourier denkleminin hata farkı grafiği.

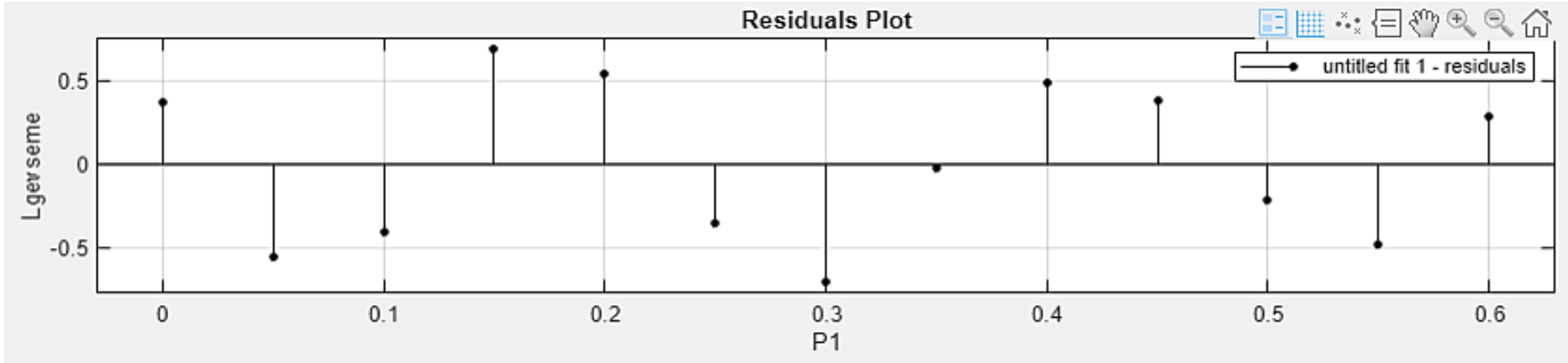
Lfourier =

47.7108 47.8140 46.5544 44.9566 43.5160 42.0202 39.7059 35.6842 29.4573 21.3111 12.4132 4.5569 -0.3669

Lgevseme =

48.0000 47.3333 46.3333 45.3333 44.0000 42.0000 39.0000 35.3333 30.0000 22.0000 12.0000 4.0000 0

Şekil 3.12. PYK'nın gevşeme durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen fourier denkleminin sonucunun karşılaştırılması.



Şekil 3.13. PYK'nın gevşeme durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen fourier denkleminin hata farkı grafiği.

Yukarıda 3.1’de verilen denklem sonuçlarına en yakın denklemdir ancak karmaşık bir denklemdir. Bu yüzden alternatif bir denklem de bulunmuştur. İlk bulunan denklem fourier denklemi iken Denklem 3.4’te paylaşılan ikinci dereceden bir polinom denklemdir. Bu denklemde $f(x)$ kısıalma miktarını, x basınç miktarını p_1, p_2, p_3 katsayıları göstermektedir.

$$f(x) = p_1 * x^2 + p_2 * x + p_3 \quad (3.4)$$

Şekil 3.8’de bulunan katsayılar Denklem 3.4’de yerine yerleştirilirse ve x yerine p (basınç), fonksiyonda L (kısıalma miktarı) olarak yazılırsa yeni ifade Denklem 3.5’deki gibi olur.

$$L(p) = -127.8055 * p^2 + 163.8994 * p - 4.4506 \quad (3.5)$$

Şekil 3.9’da bulunan katsayılar Denklem 3.4’de yerine yerleştirilirse ve x yerine p (basınç), fonksiyonda L (kısıalma miktarı) olarak yazılırsa yeni ifade Denklem 3.6’teki gibi olur.

$$L(p) = -177.9553 * p^2 + 188.8244 * p - 2.4542 \quad (3.6)$$

Şekil 3.14’te PYK’nın kasılma deneyi sonucunda belli aralıklarda ölçülen kısıalma miktarını ve eğri uydurma yöntemi ile türetilen polinom denklemden elde edilen sonuç gösterilmiştir. Şekil 3.15’te de bu iki denklem arasındaki hata farkı hesaplanmıştır.

Şekil 3.16’da PYK’nın gevşeme deneyi sonucunda belli aralıklarda ölçülen kısıalma miktarını ve eğri uydurma yöntemi ile türetilen polinom denklemden elde edilen sonuç gösterilmiştir. Şekil 3.17’de de bu iki denklem arasındaki hata farkı hesaplanmıştır.

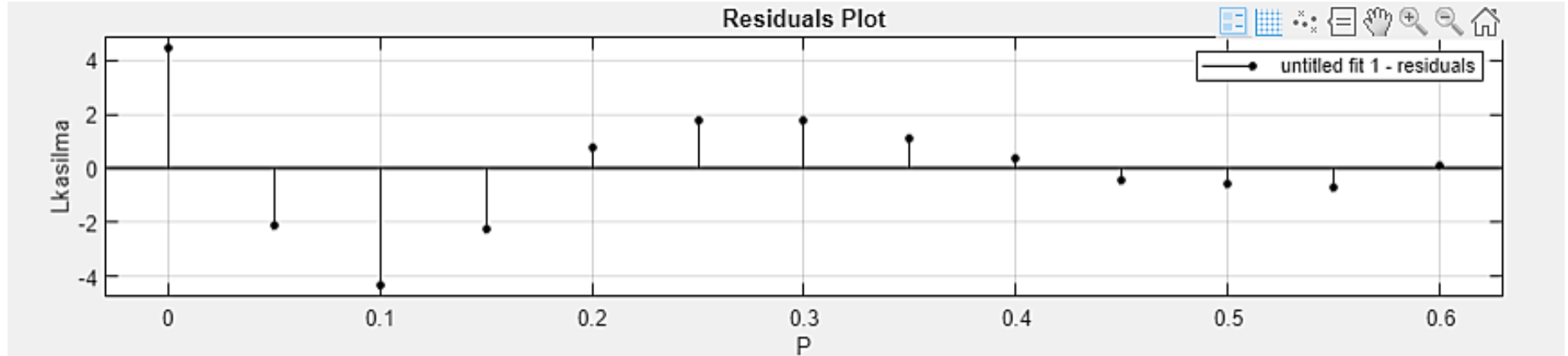
Lkasilmayeni =

-4.4506 3.4249 10.6613 17.2587 23.2171 28.5364 33.2167 37.2580 40.6603 43.4235 45.5477 47.0329 47.8791

Lkasilma =

0 1.3333 6.3333 15.0000 24.0000 30.3333 35.0000 38.3333 41.0000 43.0000 45.0000 46.3333 48.0000

Şekil 3.14. PYK'nın kasılma durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen polinom denklemin sonucunun karşılaştırılması.



Şekil 3.15. PYK'nın kasılma durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen polinom denkleminin hata farkı grafiği.



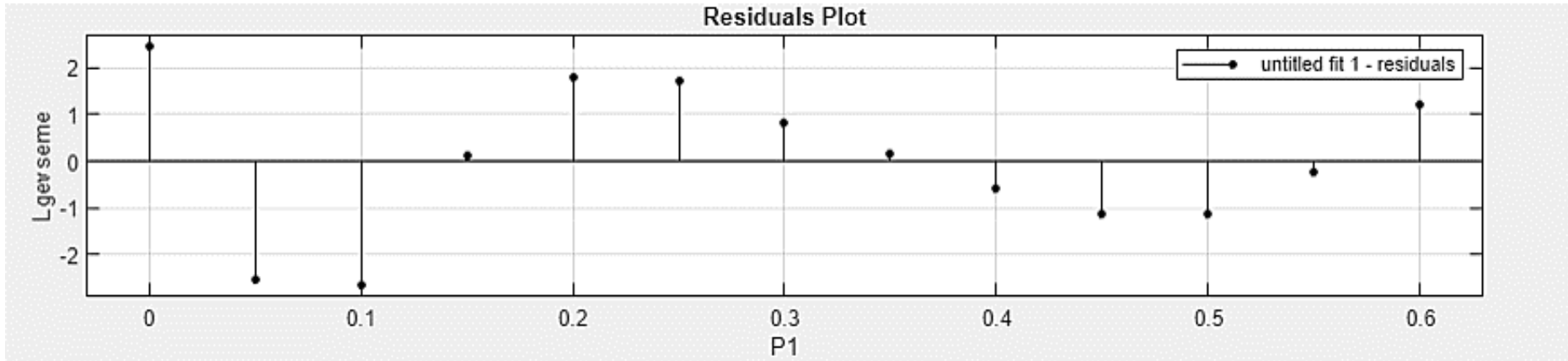
Lgevsemeyeni =

46.7765 47.5677 47.4692 46.4808 44.6027 41.8348 38.1771 33.6297 28.1925 21.8655 14.6487 6.5421 -2.4542

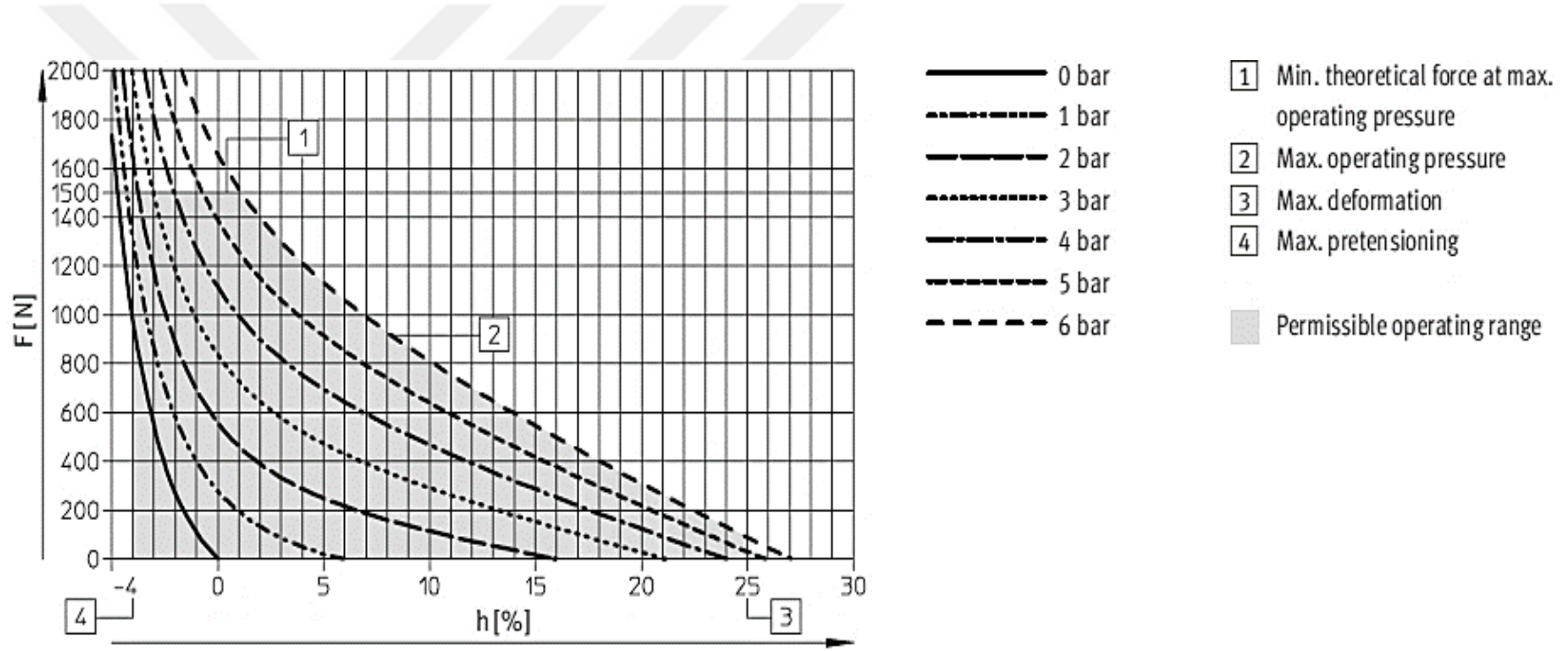
Lgevseme =

48.0000 47.3333 46.3333 45.3333 44.0000 42.0000 39.0000 35.3333 30.0000 22.0000 12.0000 4.0000 0

Şekil 3.16. PYK'nın gevşeme durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen polinom denkleminin sonucunun karşılaştırılması.



Şekil 3.17. PYK'nın gevşeme durumunda deney sonucu ve eğri uydurma sonucu elde edilen polinom denkleminin hata farkı grafiği.



Şekil 3.18. DMSP-20-200N RM-RM'nin datasheetinde basınç, kuvvet ve kısalma yüzdesi grafiği [33].

Tablo 3.4. DMSP 20-200 PYK için katalog değerleri, deney sonucu, bulunan fourier denklemi sonucu ve bulunan polinom denkleminin sonucu olan basınca göre boy değişim tablosu.

Basınç(bar) / PYK'nın boy değişimi(mm)	Katalog Sonucu	Deney Sonucu	Fourier Denklemi Sonucu	Polinom Denklemi Sonucu
0	0	0	-0.2426	-3.4524
1	12	9.1	9.6414	12.655
2	32	27	26.3818	25.7048
3	42	37	37.5814	35.6969
4	48	42.5	42.1114	42.6315
5	52	45.6	45.7238	46.5085
6	54	48	47.7157	47.3278

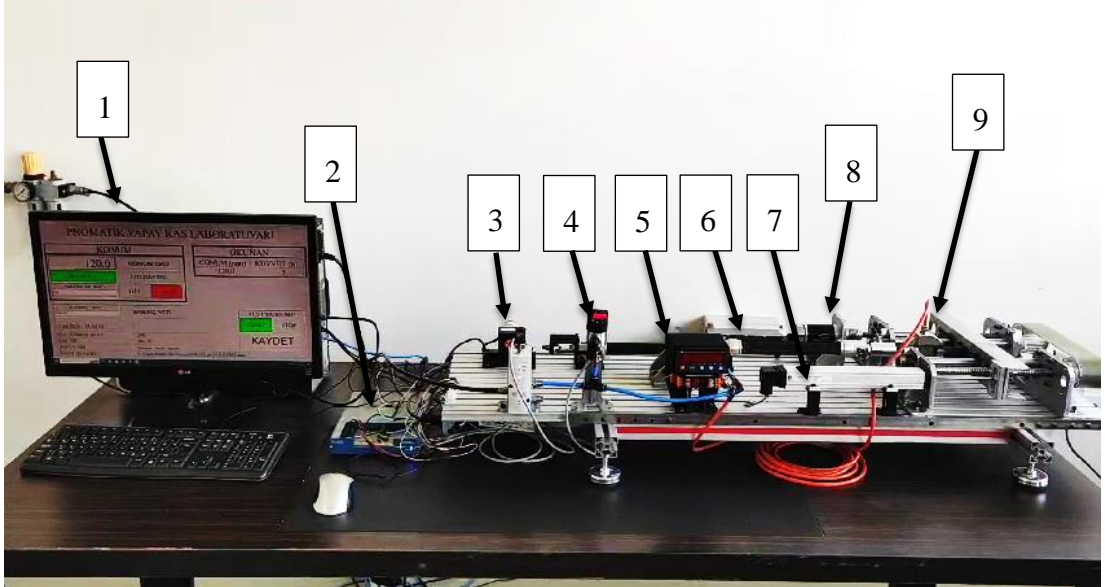
Şekil 3.18’de Festonun DMSP-20-200N RM-RM PYK’sı için katalog bilgileri verilmiştir. Tablo 3.4’te ise katalog değerleri, deney sonucu, bulunan fourier denklemi sonucu ve bulunan polinom denklemi sonucunun gevşeme ve kasılma durumlarının ortalaması baz alınarak verilmiştir. Bu tabloda fourier denkleminin deney sonucuna, polinom denklemine göre daha yakın olduğu görülmektedir ancak denklem olarak fourier denklemi polinom denkleminde daha karmaşıktır. Yani kullanıcı sonuç performansı ya da denklemin karmaşıklığı arasında seçim yapmak zorundadır. Deney sonuçlarının katalog ile birebir aynı çıkmamasının birçok nedeni olabilmektedir. Bunlardan bazıları deney düzeneğinde hava kaçağı olabilmesi, kauçuğun esneyebilen deformasyona uğrayabilen bir malzeme olması, PYK’nın lineer bir aktüatör olmaması, PYK’nın histerezisinin yüksek olması ve PYK’nın kasılma- gevşeme durumlarının ortalaması alınarak karşılaştırma yapılmasıdır.

4. PYK'NIN STATİK KUVVET MODELİ

Bir PYK esas olarak statik kuvvet haritasıyla karakterize edilir. Kuvvet haritasının kendisi şunları tanımlar: PYK'nın herhangi bir PYK uzunluğu ve basınç kombinasyonu için uyguladığı statik kuvvettir [35]. PYK kuvveti iki farklı yolla ölçülebilir [36]: izometrik kuvvet ölçümü yani basınç artarken PYK'nın uzunluğu sabit tutulur veya izobarik kuvvet ölçümü yani basınç korunurken PYK 'nın uzunluğu değişkendir. İzometrik kuvvet ölçümü literatürde Hildebrandt ve Minth tarafından kullanılmıştır [37,38]. İzobarik kuvvet ölçümü ise literatürde Chou, Tondu ve Wickramatunge tarafından kullanılmıştır [39-41]. Bu bölümde kuvvet ölçümü için izobarik yöntem kullanılmıştır.

4.1. DMSP-200N RM-RM'nin İzobarik Kuvvet Ölçümü Deneyi

Şekil 4.1'de deney düzeneği gösterilmiştir. Deneyde kullanılan materyaller: 1. Bilgisayar; 2. National Instruments data logger kartı; 3. Basınç regülatörü; 4. Basınç göstergesi; 5. Load cell göstergesi; 6. DMSP-20-200N RM-RM PYK; 7. Lineer cetvel; 8. DC motor; 9. Load cell'dir.



Şekil 4.1. DMSP- 200N RM-RM'nin kuvvet karakteristiği için hazırlanan deney düzeneği.

Deneyde amaçlanan DMSP-200N RM-RM'nin basıncı sabit tutulup kasılma oranı artırılıp azaltılarak kuvvet değerlerinin okunması, statik kuvvet haritasının çıkarılması ve bulunacak kuvvet modelinin test edilmesidir. Bunun için Şekil 4.2'te gösterilen Daisy Lab uygulamasının arayüzünden PYK'ya verilecek basınç değeri için BASINÇ_SEÇ kategorisinden basınç (0.5 bardan başlayarak 0.5 artışlar ile 6 bara) ve kas boyunun kasılma oranı için KONUM_SEÇ kategorisinden kasılma oranı (%0 kasılma oranından başlayarak %3'lük artışlar ile %21 kasılma oranına) seçildi. Her bir basınç ve kasılma oranı için ayrı ayrı kuvvet değeri bulundu. Kasın histerezisinden dolayı kasılma oranının hem artışı hem azalışı için iki farklı kuvvet değeri bulundu. Kasılma oranlarının ayarı için geri beslemeli konum kontrolü yapılmıştır. Konum kontrolü için lineer cetvelden okunan konum değeri kullanıcının seçtiği referans konum değeri ile kıyaslanıp PID kontrolcüye iletilmiştir. Kontrolcü sinyali Dc motora aktarılmıştır. İstenilen konuma gelindiğinde motor çalışmayı durdurmuş olup load cell göstergesinden ya da bilgisayarın arayüzünden kuvvet değerleri okunmuştur. Bulunan sonuçlar Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

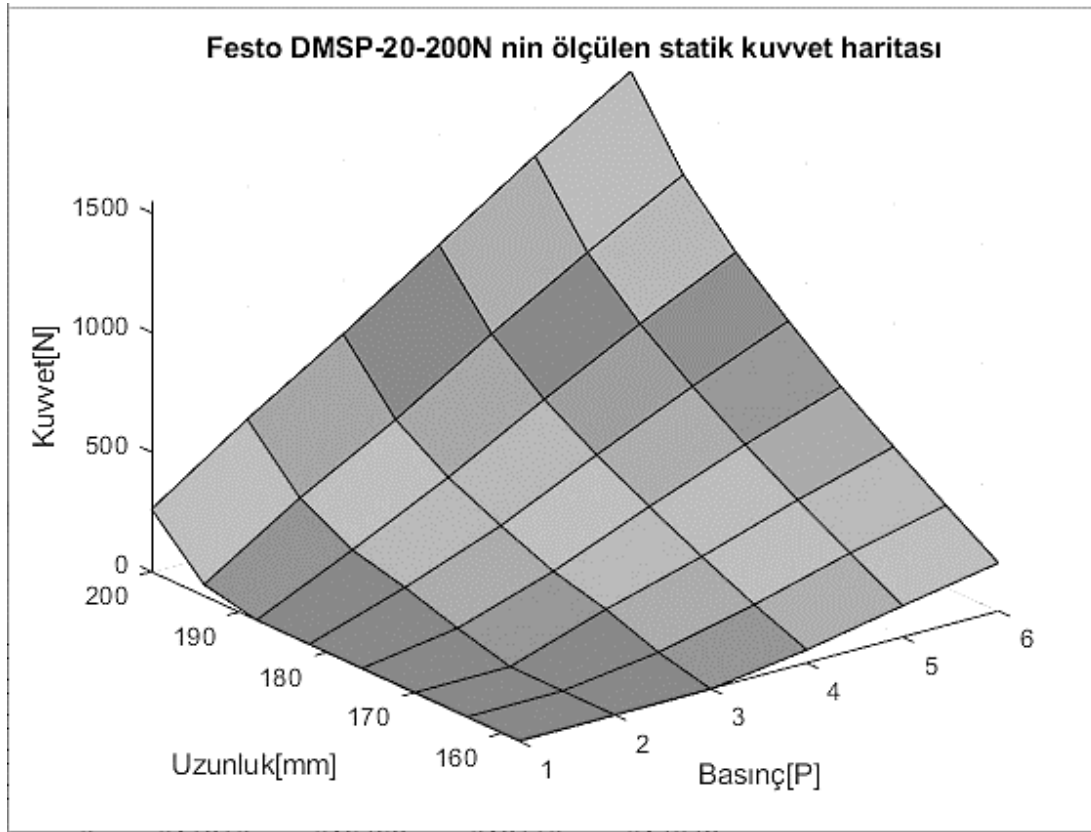
PNÖMATİK YAPAY KAS LABORATUVARI	
KONUM	
99,9	KONUM OKU
MANUEL	OTOMATİK
%KONUM_SEÇ %0	GİT DUR
BASINÇ_SEÇ 0 BAR	
BASINÇ VER	
19.12.2023 - 17:06:35	
KAS SERBEST BOYU	200
KAS TİPİ	200 20
DOSYA ADI	deneme kayıt omer6
KAYIT KLASORU	C:\Users\Public\Documents\DASYLab\11.0.0\ENG\data
OKUNAN	
KONUM (mm)	KUVVET (N)
3,0	1327
TEST DURUMU	
START	STOP
KAYDET	

Şekil 4.2. DMSP- 200N RM-RM'lik kas için Daisy Lab uygulamasında hazırlanan programın arayüzü.

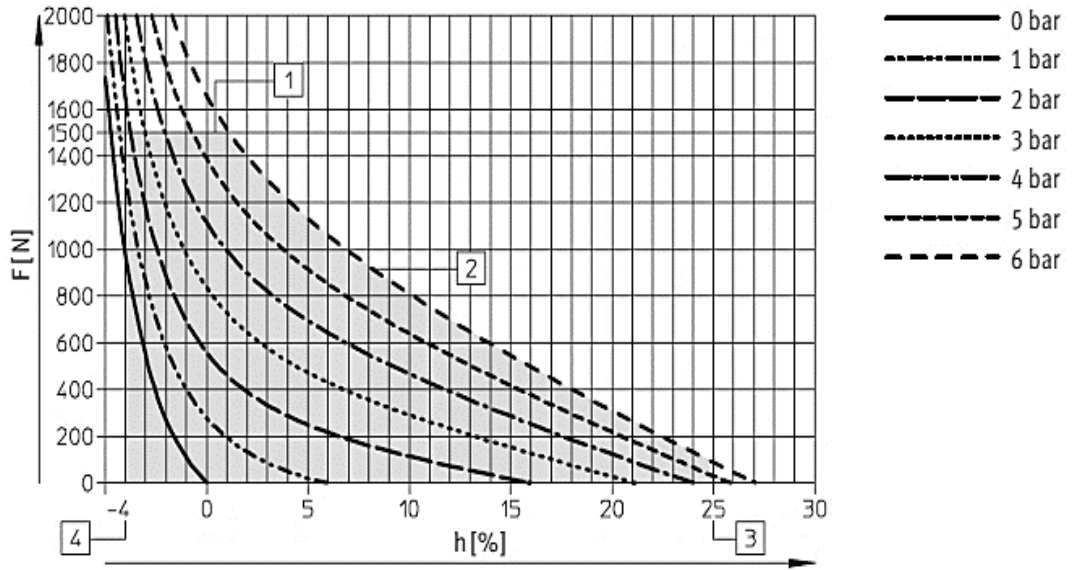
Tablo 4.1. DMSP 20-200N RM-RM için izobarik ölçüm sonuçları.

Kasılma/ Uzunluk		Basınç																							
		6 Bar	5,5 Bar	5 Bar	4,5 Bar	4 Bar	3,5 Bar	3 Bar	2,5 Bar	2 Bar	1,5 Bar	1 Bar	0,5 Bar												
0%	200	1507	1588	1398	1463	1268	1336	1136	1205	1006	1073	875	939	738	813	623	688	504	554	365	410	241	281	110	137
3%	194	1168	1266	1077	1155	961	1041	845	922	731	808	611	688	474	564	376	449	268	333	147	194	31	63	0	0
6%	188	946	1040	871	939	766	841	670	740	561	631	466	531	343	415	253	316	158	210	51	80	0	0	0	0
9%	182	766	850	702	765	611	676	528	586	440	492	351	404	248	308	171	219	110	147	0	0	0	0	0	0
12%	176	607	661	551	603	474	529	404	454	326	375	251	296	165	212	121	155	47	72	0	0	0	0	0	0
15%	170	457	512	415	458	347	395	290	330	223	262	162	195	116	146	53	78	0	0	0	0	0	0	0	0
18%	164	317	364	287	322	232	269	184	218	130	156	92	119	43	62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21%	158	186	216	157	184	117	145	82	101	40	71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablodaki 4.1'deki verilerden yararlanarak DMSP 20-200N RM-RM'nin statik kuvvet haritası Matlab programında üç boyutlu olarak çizilmiştir. PYK'nın histerezisinden dolayı İki farklı kuvvet değeri olduğundan kuvvetlerin ortalaması baz alınmıştır. Şekil 4.3'te çizilen kuvvet haritası gösterilmektedir. Bir PYK'nın statik kuvveti, uzunluğunun ve basıncının bir fonksiyonudur. Şekil 4.5'te DMSP 20-200N RM-RM'nin Festo katalogundaki kuvvet haritası gösterilmiştir. Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Tablo 4.1'de de görülebileceği gibi maksimum PYK kuvveti uzunluğa göre önemli ölçüde değişmektedir. Maksimum kuvvet yalnızca başlangıç uzunlukta uygulanabilir, PYK'nın kasılma oranı arttırıldıkça elde edilen kuvvet azalır. PYK maksimum kasılmada artık kuvvet uygulayamaz.



Şekil 4.3. DMSP 20-200N RM-RM'nin statik kuvvet haritası.



Şekil 4.4. DMSP 20-200N RM-RM'nin Festo kataloğunda statik kuvvet haritası [33].

4.2. Mevcut Statik Kuvvet Modelleri

PYK'lar temel olarak statik kuvvet haritalarıyla tanımlanır. Literatürde birçok farklı statik kuvvet modeli bulunmuştur. Tüm modeller matematiksel olarak doğru olsa da doğruluk oranları farklılık gösterir. İlk model Schulte tarafından McKibben Kasını tanımlamak için kullanıldı [42]. Bu modelde membran esnekliğinin etkileri tamamen ihmal edilmiştir. Denklem 4.1'de McKibben modeli gösterilmiştir.

$$F_{MK}(p, L) = -P * \frac{\partial V}{\partial L} = P * \frac{L_{Fiber}^2 (3 * \cos^2 \theta - 1)}{4 * \pi * n^2} \quad (4.1)$$

İkinci denklem Andrikopoulos tarafından ortaya atılmıştır. Denklemde c_0, c_1 ifadeleri optimizasyon problemi çözülerek bulunur [43]. Denklem 4.2'de verilmiştir.

$$F_{Andri}(p, L) = p * c_0 * \pi * \frac{D_0^2}{4} * \left[\frac{3}{\tan^2 \theta_0} * \left(1 - c_1 * \frac{L_0 - L}{L_0} \right)^2 - \frac{1}{\sin^2 \theta_0} \right] \quad (4.2)$$

Üçüncü denklem Sarosi ve ark. tarafından ortaya atılmıştır. Bu model aynı zamanda denklem 4.1'den esinlenilmiştir [44]. Denklem, Denklem 4.3'de verilmiştir.

$$F_{Saro}(p, L) = (c_0 * p + c_1) * e^{c_2 * \frac{L_0 - L}{L_0}} + P * \left(d_0 * \frac{L_0 - L}{L_0} + d_1 \right) + d_2 \quad (4.3)$$

Dördüncü denklem Hildebrandt tarafından ortaya atılmıştır. Festo PYK'lara özel bir modeldir. PYK pnömomatik pistonun değişken piston alanı ve mekanik yay ile kombinasyonu şeklinde modellenmiştir [45]. Denklem, Denklem 4.4'de verilmiştir.

$$F_{Hilde}(p, L) = p * A(L) - F_c(L) = p * \sum_{j=0}^2 c_j L^j - \left(\sum_{j=0}^3 d_j L^j + d_4 * L^{2/3} \right) \quad (4.4)$$

Beşinci denklem Wickramatunge tarafından ortaya atılmıştır. Festo PYK'larının statik kuvvet modelidir. Yer değiştirme-basınç bağımlı mekanik bir yaya eşdeğer olduğu varsayılmaktadır [46]. Denklem, Denklem 4.5'te verilmiştir.

$$F_{Wick}(p, L) = c_3 * p^2 + c_2 * p * \Delta L + c_1 * \Delta L^2 + c_0 * \Delta L, \quad \Delta L = L - \min(L) \quad (4.5)$$

Altıncı denklem Martens tarafından ortaya atılmıştır. Bu modelle diğer beş modeli karşılaştıran Martens en uygun modelin Denklem 4.6a ve 4.6b'de verilen model olduğunu iddaa etmiştir [35]. Bu modelin işaretli kısmı Martensin en yeni denklemidir.

$$F_{Martext}(p, L) = -p * \frac{\partial V}{\partial L} + \pi * H_0 * E_{ru}(L) * \left(L * \varepsilon_{pe} * \frac{\partial D}{\partial L} - D * \varepsilon_L \right) - \underbrace{\frac{L_0^2}{4 * \pi * n^2 * (\cos \theta_0)^2} * d_1 * p + d_2}_{E_{ru}(L)} \quad (4.6a)$$

$$E_{ru}(L) = c_3 * L^3 + c_2 * L^2 + c_1 * L + c_0 \quad (4.6b)$$

4.3. Yeni Statik Kuvvet Modeli

Kuvvet modelinin bulunması için basınçlı kaplara etkileyen gerilme denklemlerinden yararlanılmıştır [47]. Bu denklemler, Denklem 4.7 ve 4.8'de gösterilmiştir.

$$\sigma_{PE} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot H_0} \quad ve \quad A_{PE} = 2 \cdot H_0 \cdot L \quad (\text{Çevresel Gerilme ve Alan}) \quad (4.7)$$

$$\sigma_L = \frac{p \cdot D}{4 \cdot H_0} \quad ve \quad A_L = \pi \cdot D \cdot H_0 \quad (\text{Eksenel Gerilme ve Alan}) \quad (4.8)$$

H_0 : Cidar kalınlığı; L_f : Fiber uzunluğu; n : sarım sayısı; θ : fiber açısı

Fiber'e Etkiyen Gerilmeler;

Fiber doğrultusunda etkileyen gerilmenin harekete bir katkısı yoktur. Fiberde uzamaya neden olmaz.

Fibere dik etkileyen gerilmenin sonucu ortaya çıkan kuvvet ise fiber açısının değişiminde rol oynar.

Fibere etkileyen dik gerilme bileşeni Denklem 4.9'da gösterilmiştir.

$$\sigma_V = \frac{\sigma_{PE} + \sigma_L}{2} - \frac{\sigma_{PE} - \sigma_L}{2} \cos(2\theta) \quad \rightarrow \quad \sigma_V = \frac{3 \cdot p \cdot D}{8 \cdot H_0} - \frac{p \cdot D}{8 \cdot H_0} \cos(2\theta) \quad (4.9)$$

Fiber doğrultusunda PYK kesit alanını belirten denklem, Denklem 4.10'da verilmiştir.

$$A_V = \frac{\pi \cdot D \cdot H_0}{\cos(\theta)} \quad (4.10)$$

Gerilme ifadelerinden kuvvetler çekilirse denklemler, Denklem 4.11, 4.12, 4.13'teki gibi olur.

$$F_{PE} = \sigma_{PE} \cdot A_{PE} = p \cdot D \cdot L \quad (4.11)$$

$$F_L = \sigma_L \cdot A_L = p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} F_V = \sigma_V \cdot A_V &= \frac{3 \cdot p \cdot \pi \cdot D^2}{8 \cdot \cos(\theta)} - \frac{p \cdot \pi \cdot D^2}{8} \cdot \frac{\cos(2\theta)}{\cos(\theta)} = p \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \frac{3 - \cos 2\theta}{8 \cdot \cos \theta} \\ &= p \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \frac{3 - 2 \cdot \cos^2 \theta + 1}{8 \cdot \cos \theta} = p \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \frac{2 - \cos^2 \theta}{4 \cdot \cos \theta} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Virtüel iş prensibinden denklemler, Denklem 4.14a, 4.14b, 4.15a, 4.15b, 4.15c, 4.16 ve 4.17'deki gibi olur.

$$F_{PYK} \cdot dL + p \cdot dV + F_{PE} \cdot dD + F_L \cdot dL - M \cdot d\theta = 0 \quad (4.14a)$$

$$F_{PYK} = -p \cdot \frac{dV}{dL} - F_{PE} \cdot \frac{dD}{dL} - F_L + M \cdot \frac{d\theta}{dL} \quad (4.14b)$$

$$V(L, D) = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \quad \text{ve} \quad D(L) = \frac{(L_f^2 - L^2)^{0.5}}{n \cdot \pi} \quad \rightarrow \quad V(L) = \frac{L_f^2 \cdot L}{4 \cdot n^2 \cdot \pi} - \frac{L^3}{4 \cdot n^2 \cdot \pi} \quad (4.15a)$$

$$\frac{dV}{dL} = \frac{L_f^2}{4 \cdot n^2 \cdot \pi} - \frac{3 \cdot L^2}{4 \cdot n^2 \cdot \pi} \quad (4.15b)$$

$$\frac{dD}{dL} = \frac{-L}{n \cdot \pi \cdot (L_f^2 - L^2)^{0.5}} \quad (4.15c)$$

$$M = F_V \cdot \frac{D}{\cos \theta} \quad \text{ve} \quad \cos \theta = \frac{L}{L_f} \quad \rightarrow \quad M = p \cdot \frac{(L_f^2 - L^2)^{1.5}}{n^3 \cdot \pi^2} \cdot \frac{2 \cdot L_f^2 - L^2}{4 \cdot L^2} \quad (4.16)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{L}{L_f}\right) \quad \rightarrow \quad \frac{d\theta}{dL} = \frac{\left(\frac{-1}{L_f}\right)}{\left(1 - \frac{L^2}{L_f^2}\right)^{0.5}} = -\frac{1}{(L_f^2 - L^2)^{0.5}} \quad (4.17)$$

Bu ifadelerin tümünü yerine yazarsak kuvvet denklemi, Denklem 4.18a, 4.18b ve 4.18c'de gösterildiği gibi olur.

$$F_{PYK} = -p \cdot \left(\frac{L_f^2}{4.n^2.\pi} - \frac{3.L^2}{4.n^2.\pi} \right) - p \cdot \frac{(L_f^2 - L^2)^{0.5}}{n.\pi} \cdot L \cdot \frac{-L}{n.\pi.(L_f^2 - L^2)^{0.5}} - p \cdot \frac{\pi.D^2}{4} +$$

$$p \cdot \frac{(L_f^2 - L^2)^{1.5}}{n^3.\pi^2} \cdot \frac{2.L_f^2 - L^2}{8.L^2} \cdot \frac{1}{(L_f^2 - L^2)^{0.5}} \quad (4.18a)$$

$$= -p \left(\frac{L_f^2 - 3.L^2}{4.n^2.\pi} - \frac{L^2}{n^2.\pi^2} + \frac{L_f^2 - L^2}{4.n^2.\pi} + (L_f^2 - L^2) \cdot \frac{(2.L_f^2 - L^2)}{4.L^2.n^3.\pi^2} \right) \quad (4.18b)$$

$$F_{PYK} = -p \cdot \left(\frac{L_f^2 - 2.L^2}{2.n^2.\pi} - \frac{L^2}{n^2.\pi^2} - (L_f^2 - L^2) \cdot \frac{(2.L_f^2 - L^2)}{4.L^2.n^3.\pi^2} \right) \quad (4.18c)$$

ifadesini elde ederiz.

Sıfır kasılma oranı ve diğer kasılma oranları için iki farklı denklem sistemi önerilmiştir. Bu denklem sistemlerinin deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Sıfır kasılma oranı için düzenlenmiş denklem. Denklem 4.19'da gösterilmiştir.

$$F_{d0,PYK} = F_{PYK} - p \cdot D_0^2 \cdot \left(\frac{L^2}{b.L_f^2} \right) \quad (4.19)$$

Diğer kasılma oranları için düzenlenmiş denklem, Denklem 4.20'de gösterilmiştir.

$$F_{d,PYK} = F_{PYK} - p_{max} \cdot D_0^2 \cdot \left[a \cdot \left(\frac{L^2}{L_f^2} \right)^3 + b \cdot \left(\frac{L^2}{L_f^2} \right)^2 + c \cdot \left(\frac{L^2}{L_f^2} \right) + d \right] \quad (4.20)$$

$$(p_{max} = 0.6 \text{ MPa})$$

20 mm çapa sahip pnömatik yapay kaslar için parametreler;

$$a = -10.5662; b = 2.1501; c = 10.4171; d = -3.7603$$

4.4. DMSP 20-300N'nin Statik Kuvvet Modeli İçin Doğruluk Karşılaştırması

Martens tezinde kendi kuvvet modeli yaklaşımı ile bölüm 4.2'de verilen diğer kuvvet modeli denklemlerini kullanarak doğruluk karşılaştırması yapmıştır. Martens DMSP 20-200N için karşılaştırma yapmadığından DMSP 20-300N model olarak kullanılmıştır. Doğruluk yüzdesi için Denklem 4.21'de verilen ifade kullanılmıştır. Martensin birçok PYK'nın kuvvet modeli için karşılaştırma yaptığı doğruluk tablosu Şekil 4.5'te verilmiştir. Deneysel ölçüm olarak izobarik ölçüm kullanıldığından karşılaştırmada izobarik ölçüm dikkate alınacaktır. Şekil 4.5'e göre en iyi model Martensin eklentili modeli olup doğruluk oranı %1.92'dir.

$$\Delta F_{\%} = 100 * \left| \frac{F_{\text{Ölçülen}} - F_{\text{Model}}}{F_{\text{Ölçülen}}} \right| \quad (4.21)$$

$\Delta F_{\%}$ of	F_{MK}	F_{Andri}	F_{Wick}	F_{Hilde}	F_{Saro}	F_{Mart}	F_{MartExt}
isometric							
DMSP-10-250	51.16%	21.03%	11.68%	10.81%	8.01%	7.96%	7.38%
DMSP-20-250	31.64%	14.05%	9.45%	5.42%	4.43%	3.63%	3.32%
DMSP-20-300	34.1%	14.73%	9.2%	7%	6.87%	3.11%	3.54%
DMSP-20-353	30.94%	16.03%	9.95%	7.8%	7.42%	4.88%	4.68%
isobaric							
DMSP-20-300	31.35%	11.21%	8.12%	8.31%	6.37%	5.02%	1.92%
DMSP-20-353	36.12%	11.52%	9.18%	8.88%	1.89%	10.32%	2.24%

Şekil 4.5. Çeşitli PYK'lar için farklı statik kuvvet modellerinin doğruluk oranları [35].

Tablo 4.2'de DMSP 20-300N için izobarik ölçüm sonuçları verilmiştir. Tablo 4.3'te yeni kuvvet modelinin sonuçları verilmiştir. Ölçüm sonuçları ve yeni kuvvet modelinden yararlanarak Denklem 4.21 dikkate alınarak Tablo 4.4'te gösterilen doğruluk tablosu oluşturulmuştur. Bu işlemlerin sonucunda doğruluk oranı 1.75696 olarak bulunmuştur. Bu doğruluk oranı ile mevcut statik kuvvet modellerinden daha iyi sonuç elde edildiği görülmüştür. Ayrıca Tablo 4.5'te DMSP 20-200N RM-RM için yeni kuvvet modelinin sonuçları verilmiştir. Tablo 4.6'da doğruluk tablosu oluşturulmuştur. Bu işlemlerin sonucunda 20'lik kas için doğruluk oranı 2.2272 bulunmuştur.

Tablo 4.2. DMSP 20-300 için izobarik ölçüm sonuçları.

Kasılma/ Uzunluk		Basınç																							
		6 Bar	5,5 Bar	5 Bar	4,5 Bar	4 Bar	3,5 Bar	3 Bar	2,5 Bar	2 Bar	1,5 Bar	1 Bar	0,5 Bar												
0%	300	1548	1621	1418	1495	1286	1373	1160	1226	1026	1098	890	960	750	816	633	698	508	567	369	412	251	290	120	134
3%	291	1204	1300	1096	1187	982	1065	853	942	743	823	624	703	497	577	388	460	271	340	135	183	20	43	0	0
6%	282	980	1070	892	970	794	870	681	756	583	654	477	542	362	433	266	326	160	215	38	63	0	0	0	0
9%	273	803	880	728	797	636	706	541	609	456	517	363	420	263	320	181	227	89	126	0	0	0	0	0	0
12%	264	641	710	574	636	503	561	414	474	345	396	264	310	177	225	108	139	47	67	0	0	0	0	0	0
15%	255	495	550	437	490	377	425	304	349	223	262	175	210	102	138	59	77	0	0	0	0	0	0	0	0
18%	246	351	399	309	349	256	294	192	231	146	179	87	110	47	72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21%	237	213	247	178	209	139	165	86	113	64	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 4.3. DMSP 20-300 için yeni kuvvet modeli sonuçları.

Kasılma/ Uzunluk		Basınç											
		6 Bar	5,5 Bar	5 Bar	4,5 Bar	4 Bar	3,5 Bar	3 Bar	2,5 Bar	2 Bar	1,5 Bar	1 Bar	0,5 Bar
0%	300	1541	1412	1284	1155	1027	899	770	642	514	385	257	128
3%	291	1209	1090	971	852	733	615	496	377	258	139	20	-99
6%	282	992	890	787	684	582	479	376	274	171	68	-34	-137
9%	273	799	712	625	538	452	365	278	191	104	17	-70	-157
12%	264	627	555	484	412	340	269	197	125	54	-18	-90	-161
15%	255	473	416	359	302	246	189	132	75	18	-39	-96	-153
18%	246	336	293	250	208	165	122	80	37	-6	-48	-91	-134
21%	237	212	183	154	126	97	68	39	10	-19	-48	-77	-106

Tablo 4.4. DMSP 20-300 için doğruluk oranı tablosu.

Kasılma/ Uzunluk		Basınç											
		6 Bar	5,5 Bar	5 Bar	4,5 Bar	4 Bar	3,5 Bar	3 Bar	2,5 Bar	2 Bar	1,5 Bar	1 Bar	0,5 Bar
0%	300	0.4522	0.4233	0.15552	0.4313	0	0	0	0	0	0	0	0
3%	291	0	0.5475	1.12016	0.1173	1.3459	1.442	0.20	2.83	4.79	0	0	
6%	282	0	0.2242	0.88161	0.4403	0.1713	0	3.86	0	0	7.93		
9%	273	0.4983	2.1978	1.72956	0.5543	0.8779	0	5.7	0	0			
12%	264	2.1849	3.3101	3.77734	0.4839	1.4498	0	0	0	0			
15%	255	4.4444	4.8059	4.77454	0.6579	0	0	0	0				
18%	246	4.2735	5.1779	2.34375	0	0	10.90	11.1					
21%	237	0.4698	0	0	11.504	14.116							
Toplam Sapma=		1.75696											

Tablo 4.5. DMSP 20-200N RM-RM için yeni kuvvet modeli sonuçları.

Kasılma/ Uzunluk		Basınç											
		6 Bar	5,5 Bar	5 Bar	4,5 Bar	4 Bar	3,5 Bar	3 Bar	2,5 Bar	2 Bar	1,5 Bar	1 Bar	0,5 Bar
0%	200	1527	1399	1272	1145	1018	891	763	636	509	382	254	127
3%	194	1191	1074	957	839	722	604	487	370	252	135	17	-100
6%	188	971	870	770	669	568	467	366	265	164	63	-38	-139
9%	182	775	690	605	520	435	350	265	181	96	11	-74	-159
12%	176	599	530	460	391	322	252	183	114	44	-25	-94	-164
15%	170	442	387	333	279	224	170	116	62	7	-47	-101	-156
18%	164	300	261	221	181	142	102	62	22	-17	-57	-97	-137
21%	158	173	148	122	96	71	45	19	-6	-32	-57	-83	-109

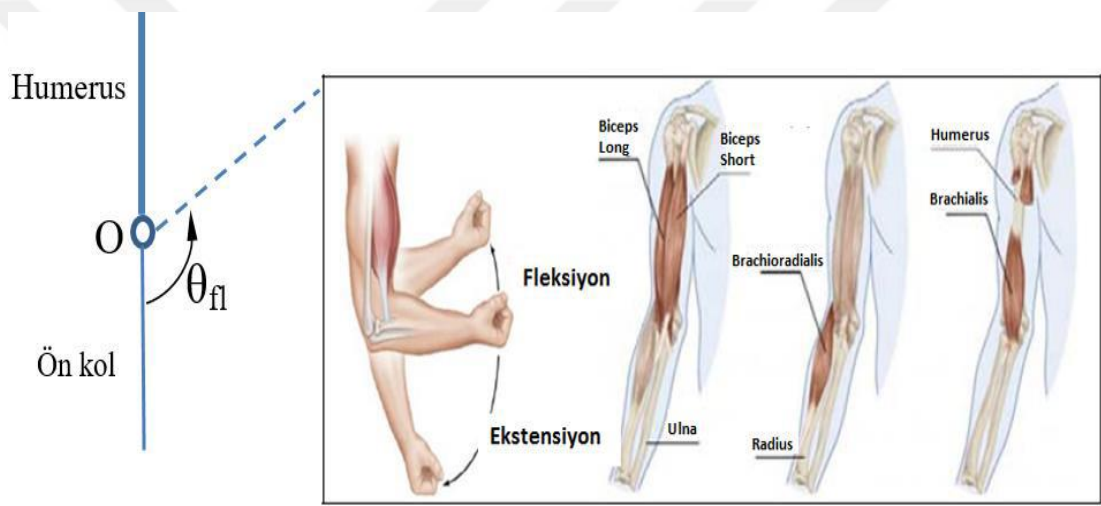
Tablo 4.6. DMSP 20-200N RM-RM için için doğruluk oranı tablosu.

Kasılma/ Uzunluk		Basınç											
		6 Bar	5,5 Bar	5 Bar	4,5 Bar	4 Bar	3,5 Bar	3 Bar	2,5 Bar	2 Bar	1,5 Bar	1 Bar	0,5 Bar
0%	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3%	194	0	0.23223	0.4162	0.7100	1.163	1.145	0	1.595	5.794	8.163	45.16	
6%	188	0	0.11481	0	0.1492	0	0	0	0	0	0		
9%	182	0	1.7094	0.9009	1.5151	1.023	0.142	0	0	12.990			
12%	176	1.2366	3.72389	2.9535	3.2178	1.075	0	0	5.524	6.382			
15%	170	3.28228	6.6345	4.0345	3.6269	0	0	0	0				
18%	164	5.36278	9.05923	4.5356	1.6304	0	0	0					
21%	158	6.98925	5.9322	0	0	0							

Ortalama Sapma=2.2272

5. AGONİST ANTAGONİST SİSTEMİN KONTROLÜ

Agonist-antagonist kas çifti insanlarda üst kol ve üst bacaklarda bulunur. Bu kaslar birbirine zıt olarak çalışır biri şişer ve kısalırken diğeri gevşer ve uzar bu davranış dirseğin hareketine yani ön kolda fleksiyon ve ekstansiyon hareketlerinin oluşmasına yardımcı olur. Dirseği biyolojik sistemde incelemek gerekirse dirsek, Şekil 5.1’de kolun fiziksel modelinde gösterilen humerus kol kemiği ile radius ve ulna kemikleri arasında bir eklemdir. Dirsek eklemi döner mafsalsal olarak kabul edilebilir [48].



Şekil 5.1. Kolun fiziksel modeli [47].

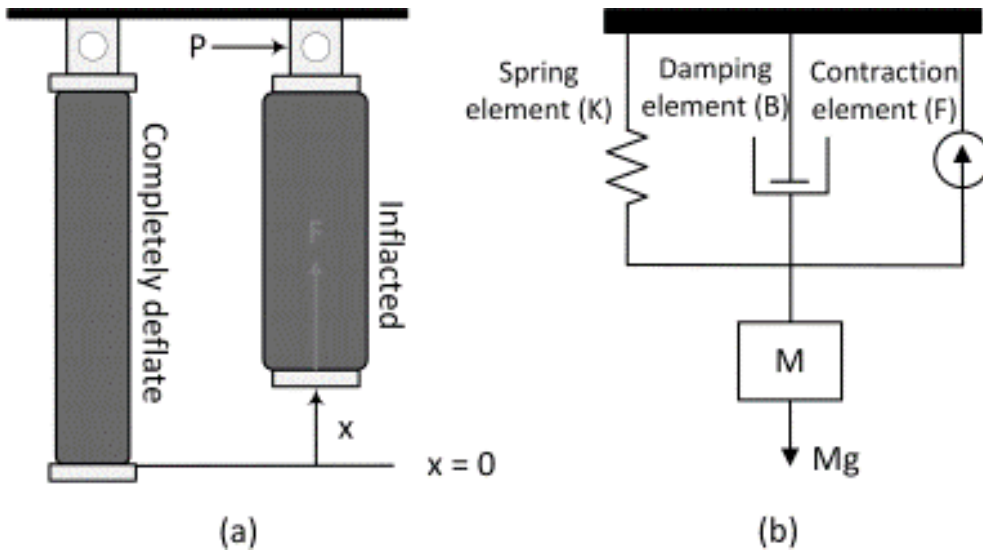
Bu bölümde kol ve bacaklardaki fleksiyon ve ekstansiyon hareketini taklit edecek sistem tasarlanacak ve kontrol edilecektir. Literatürde bu hareket için genelde iki PYK kullanılmaktadır ya da motorla dirsek hareketi yapılabilmektedir. Bu çalışmada bir PYK ve bir yay kullanılarak bu hareket kontrol edilmeye çalışılacaktır.

5.1. Agonist-Antagonist PYK Çiftinin Matematiksel Modeli

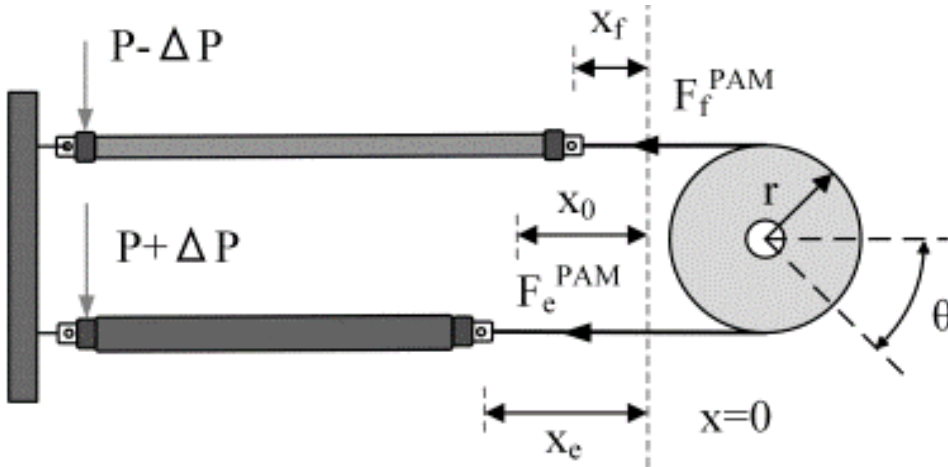
Bir sistemin matematiksel modeli sistemin dinamiğini tanımlayan diferansiyel denklemler ile oluşturulur. Matematiksel modeldeki denklemlerin çözülmesi ile istenilen girdiye göre sistem cevabı elde edilir.

Zhao ve Song’a göre “Matematiksel modeller için yaygın olarak iki ana kategori kullanılır; teorik model ve fenomenolojik model. Bu çalışmada fenomenolojik model

şu şekilde kullanılmaktadır: doğrusal olmayan sürtünme, yay ve sönüm bileşenlerinden oluşan etkilerin bir kombinasyonudur”[49]. Şekil 5.2'de yerçekimine karşı bir kütle çekilen bir PYK'nın dinamik davranışı gösterilmiştir. Şekil 5.3'te iki pnömatik yapay kas ile agonist antagonist kasın çalışması gösterilmiştir. İki PYK'lı agonist antagonist sistemin çalışması şu şekildedir; Başlangıçta iki kasın boyu toplam kısalma miktarının yarısına gelecek şekilde aynı basınca (P_0) ayarlanır. θ eklem açısını temsil eder. Açıyı değiştirmek için kaslardan birine basınç verilip diğer kasın basıncı aynı oranda azaltılır. Amaç bu sistemi tanımlayan denklemleri çözmek ve kontrolünü sağlamaktır.



Şekil 5.2. a) PYK'ın çalışması, b)PYK'nın üç element ile modellenmesi [50].



Şekil 5.3. İki PYK'lı agonist antagonist sistem [51].

Denklem 5.1 üç doğrusal olmayan ögeden oluşmaktadır. B(P) viskos sürtünmesini (sönüm katsayısını), F(P) kasılma kuvvetini ve K(P) yay sabitini temsil eder. Bu denkleme Reynolds modeli denilir ve PYK'lı sistemlerin kontrolünde genelde bu model kullanılır [50]. x ifadesi PYK'nın kısılma miktarını verir.

$$M * \ddot{x} + B(P) * \dot{x} + K(P) * x = F(P) - M * g \quad (5.1)$$

Denklem 5.2a, 5.2b, 5.2c ve 5.2d'de verilen denklemlerin değerleri deneysel olarak bulunabilmektedir. Denklemdeki e ve f ifadeleri sırası ile kasılma ve gevşeme durumlarını temsil eder. 0 ve 1 ifadeleri ise sırası ile ilk durum ve değişimden sonraki durumu temsil etmektedir [51].

$$K(P) = K_0 + K_1 * P \quad (5.2a)$$

$$B(P) = B_{0e} + B_{1e} * P \quad (5.2b)$$

$$B(P) = B_{0f} + B_{1f} * P \quad (5.2c)$$

$$F(P) = F_0 + F_1 * P \quad (5.2d)$$

Denklem 5.3'te toplam kuvvet formülü verilmiştir.

$$F^{PYK} = F(P) - B(P) * \dot{x} - K(P) * x \quad (5.3)$$

Denklem 5.4a ve 5.4b'de basıncın kasılma ve gevşeme anlarında değişim formülü verilmiştir.

$$P_e = P_0 + \Delta P \quad (5.4a)$$

$$P_f = P_0 - \Delta P \quad (5.4b)$$

İki PYK tarafından üretilen toplam tork Denklem 5.5'te verilmiştir. Burada r kasnağın yarıçapıdır.

$$\tau_{toplama} = (F_e^{PYK} - F_f^{PYK}) * r \quad (5.5)$$

Denklem 5.6a ve 5.6b'de Her PYK tarafından üretilen kuvvetler verilmiştir.

$$F_e^{PYK} = F_e - B_e * \dot{x}_e - K_e * x_e \quad (5.6a)$$

$$F_f^{PYK} = F_f - B_f * \dot{x}_f - K_f * x_f \quad (5.6b)$$

Denklem 5.7'de θ 'nın formülü verilmiştir. X_0 başlangıç kasılmasını x_e ve x_f kasılma ve gevşeme miktarını verir.

$$x_{e,f} = x_0 \pm r * \theta \quad (5.7)$$

Denklem 5.3, 5.5, 5.6a, 5.6b ve 5.7 kullanılarak tork ifadesi Denklem 5.8'de ki gibi yazılabilir. Bu Denklem 5.8a, 5.8b, 5.8c ve 5.8d'deki gibi düzenlenirse sonuç olarak sistemin dinamik davranışı Denklem 5.9'daki gibi modellenebilir [51].

$$\tau_{toplam} = \left[2 * F_1 - 2 * K_1 * x_0 - (B_{1e} - B_{1f}) * r * \dot{\theta}(t) \right] * r * \Delta P(t) - \left[B_{0e} + B_{0f} + (B_{1e} + B_{1f}) * P_0 \right] * r^2 * \dot{\theta}(t) - (2 * K_0 + 2 * K_1 * P_0) * r^2 * \theta(t) \quad (5.8a)$$

$$\delta_1 = \frac{[2 * F_1 - 2 * K_1 * x_0 - (B_{1e} - B_{1f}) * r * \dot{\theta}(t)] * r}{J} \quad (5.8b)$$

$$\delta_2 = \frac{-(2 * K_0 + 2 * K_1 * P_0) * r^2}{J} \quad (5.8c)$$

$$\delta_3 = \frac{-[B_{0e} + B_{0f} + (B_{1e} + B_{1f}) * P_0] * r^2}{J} \quad (5.8d)$$

$$\ddot{\theta}(t) = \delta_3 * \dot{\theta}(t) + \delta_2 * \theta(t) + \delta_1 * \Delta P(t) \quad (5.9)$$

F(P), K(P) ve B(P) ifadeleri deneysel olarak bulunması gereken parametrelerdir. Zhao ve Song hazırlamış oldukları deney düzeneği ile DMSP 20-200N RM-RM için katsayıları bulmuşlardır. Deneyi 0.2 bar'lık basınç artışıyla 0.6 bar'dan başlayarak 6 bara kadar değişen basınçla gerçekleştirilmiştir. En iyi uyum parametreleri, en küçük kareler doğrusal regresyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir [49]. Katsayılar Denklem 5.10a, 5.10b, 5.10c, 5.10d ve 5.10e'de verilmiştir.

$$F(P) = 194.8 + 204.0P \quad (5.10a)$$

$$K(P) = -63382 + 25085P \quad (0.6 \leq P \leq 2bar) \quad (5.10b)$$

$$K(P) = -16352 - 787.9P \quad (2 \leq P \leq 6bar) \quad (5.10c)$$

$$B(P) = -6275 + 946.4P \quad (Inflation) \quad (5.10d)$$

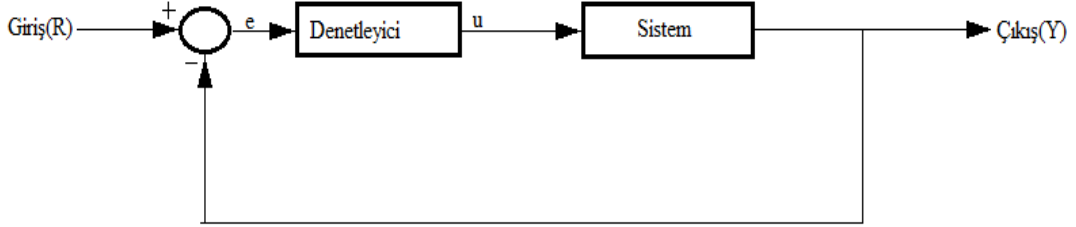
$$B(P) = 763.9 - 91.04P \quad (Deflation) \quad (5.10e)$$

5.2. PID(Oransal, İntegral, Türev) Kontrolör

PID terimi İngilizce “Proportional” (oransal), “Integral” (integral), “Derivative” (türevsel) sözcüklerinin baş harflerinden oluşmuştur [52]. Şekil 5.4'te birim geribeslemeli bir sistemin blok diyagramı verilmiştir. PID denetleyicisinin çalışmasını Şekil 5.4 üzerinden incelersek; R ifadesi referans değeri ile Y çıkış arasındaki farka takip hatası(e) denir. Hata sinyali PID denetleyicisine geldiğinde PID bu hatanın belirlenen bir katsayı ile çarpar(P), integralini(I) ve türevini(D) alır. Denetleyiciden

geçen bu sinyal(u) Denklem 5.11’de verilmiştir. Denetleyiciden çıkan sinyal(u) sisteme gönderilecek ve yeni bir çıkış sinyali elde edilecektir. Tekrar yeni çıkış değeri giriş ile karşılaştırılacak ve aynı işlemler yapılacaktır [53].

$$u = K_p e + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (5.11)$$



Şekil 5.4. Birim geribeslemeli bir sistemin blok diyagramı.

5.2.1. PID denetleyicinin özellikleri

- **Oransal denetleyici:** Sistemin hızını artırır, ancak sürekli hal hatasını düzeltmede etkili değildir [52].
- **İntegral denetleyici:** Sistemin sürekli hal hatasını düzeltir ancak geçici hal hatasını bozabilir [52].
- **Türevsel denetleyici:** Sistemin kararlılığını artırır, aşımı azaltır ve geçici hal hatasını düzeltir [52].

Kapalı çevrim sisteminde denetleyicilerin etkileri tablo 5.1’de verilmiştir [51].

Tablo 5.1. Kapalı çevrim sisteminde denetleyicilerin etkileri.

	Kapalı Çevrim Cevabı	Yükseliş Zamanı	Aşım	Yerleşim Zamanı	Sürekli Rejim Hatası
Oransal Denetleyici	K_p	Azalır	Artar	Küçük Oranda Değişir	Azalır
İntegral Denetleyici	K_I	Azalır	Artar	Artar	Elenir
Türevsel Denetleyici	K_D	Küçük Oranda Değişir	Azalır	Azalır	Küçük Oranda Değişir

5.2.2. PID parametreleri ayarlama yöntemleri

PID kontrolcülerin parametrelerini ayarlamanın birkaç yaygın yöntemi vardır. PID kontrolcülerin başarılı bir şekilde çalışabilmesi için bu parametrelerin doğru bir şekilde ayarlanması önemlidir. İşte PID kontrolcü parametrelerini ayarlamanın bazı yaygın yöntemleri:

5.2.2.1. Manuel ayarlama

Bu yöntemde, kullanıcı PID parametrelerini deneme yanılma yoluyla ayarlar. İlk olarak, P, I ve D terimleri sıfır olacak şekilde başlanır. Daha sonra, her bir terimi yavaş yavaş arttırarak veya azaltarak sistem davranışını gözlemleyerek en uygun parametreleri belirlemeye çalışılır. Bu yöntem basit olmasına rağmen, zaman alıcı ve sistem için uygun parametreleri bulmak zor olabilir.

5.2.2.2. Ziegler-Nichols metodu

Ziegler-Nichols, PID kontrolcü parametrelerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir metottur. Bu yöntemde öncelikle tüm katsayılar sıfır yapılır. Sisteme basamak girişi uygulanır ve çıkışta istikrarlı ve sabit genlikte salınım oluncaya kadar P katsayısı arttırılır [54]. Ardından, P terimi belirlenirken sistemin kritik kazancı ve periyodu belirlenir. Bu bilgilere dayanarak, farklı Ziegler-Nichols katsayıları kullanılarak PID parametreleri hesaplanır.

5.2.2.3. Loop tuning yazılımları

Birçok PID kontrolcü için ticari ve ücretsiz loop tuning yazılımları mevcuttur. Bu yazılımlar, kullanıcının sistemiyle ilgili bazı temel bilgileri girdikten sonra uygun PID parametrelerini otomatik olarak hesaplayabilir. Loop tuning yazılımları genellikle hızlı ve etkili bir şekilde PID parametrelerini ayarlamanıza yardımcı olabilir.

5.2.2.4. Frekans yanıtı yöntemleri

Frekans yanıtı teknikleri, sistemin frekans tepkisine dayalı olarak PID parametrelerini ayarlar. Bu yöntemlerde, sistemin frekans tepkisi ölçülür ve buna göre PID parametreleri belirlenir. Bu yöntem genellikle karmaşık olabilir ve genellikle daha gelişmiş kontrol uygulamaları için kullanılır. Kök eğrilerine ve bode diyagramına bakarak frekans cevabı yorumlanabilir [55].

PID parametrelerini ayarlarken, istenen kontrol performansını elde etmek için sistem özelliklerini ve kontrol gereksinimlerini dikkate almak önemlidir. Herhangi bir yöntem kullanılsada, genellikle birden fazla deneme gerektirebilir ve sistemdeki değişikliklere yanıt olarak zaman zaman revize edilmelidir.

5.3. Tek PYK'lı Agonist-Antagonist Sistemin PID ile Konum Kontrolü Deneyi

Agonist antagonist kaslar canlılarda bulunan birbirine zıt çalışan kaslardır ve bu çalışma stili sayesinde dirsek hareketi gerçekleştirilir. Literatürde genellikle bu hareket için iki PYK kullanılmıştır. PYK ile agonist- antagonist sistemin kontrolü ile ilgili literatürdeki çalışmaların bazısında model tabanlı kontrol yaklaşımı benimsenirken bazısında modellemenin karmaşıklığından ve zorluğundan kaçmak amacıyla modelden bağımsız kontrol yaklaşımının kullanıldığı görülmektedir. Model tabanlı yaklaşımın temel problemi, belirlenen modelin yalnızca o çalışma için geçerli olmasıdır. Model tabanlı kontrol kullanan bazı çalışmalar şunlardır:

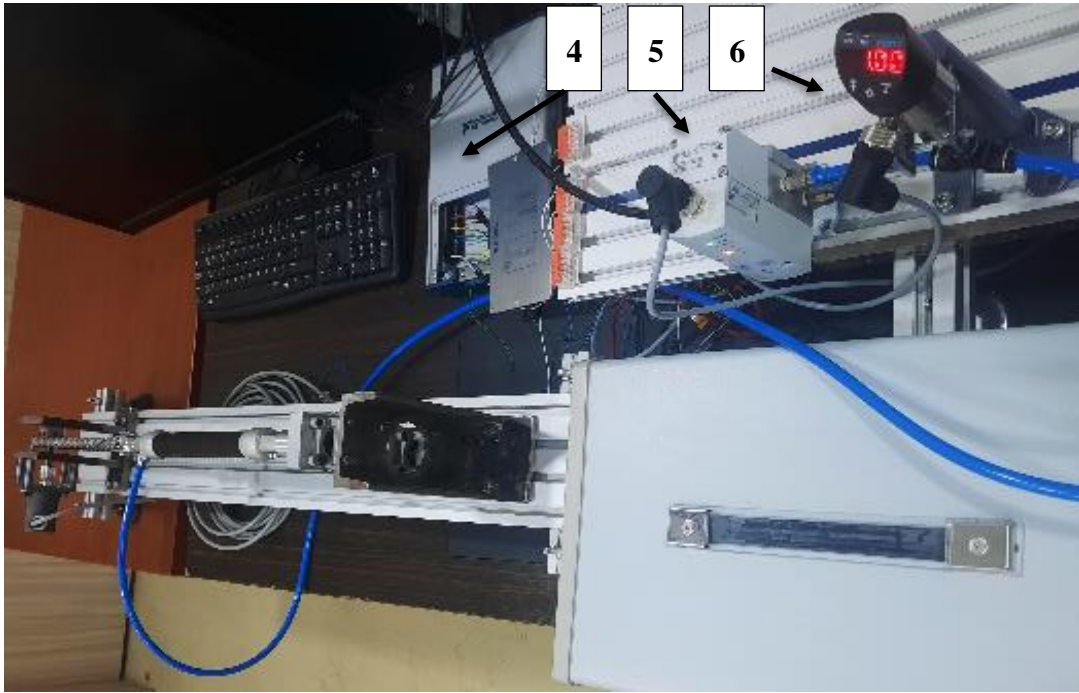
Dinh ve arkadaşları kayan kip kontrolü kullanarak agonist- antagonist sistemin kontrolünü sağlamak için model bazlı çalışma yapmıştır. Model için önce tek bir PYK'nın çalışmasına göre gerçekte PYK'da var olmayan sanal benzetmeler ile üç elaman ile tanımladığı modeli kullanmıştır [51].

Arrese ve arkadaşları hazırladıkları test düzeneği ile PYK'yı statik olarak tanımlamak istemişlerdir. Bu test düzeneğinde PYK'nın bir ucu sabit tutulup bir ucuna farklı ağırlıklar bağlanmıştır. Deneylerden ilki değişken hızlarda sabit bir yüke tabi tutulan PYK'nın kasılmanın ölçülmesinden oluşur. Diğer deney ise sabit hızlı PYK'ya farklı ağırlıklar bağlanarak kuvvet ölçülmesidir. Bulunana değerler ile denklem oluşturulmuş ve PID, Kayan kip kontrolü gibi kontrol çeşitleri kullanarak agonist-antagonist sistemin pozisyon kontrolünü yapmışlardır [56, 57].

Bu çalışmada tek PYK kullanılarak modelden bağımsız PID kontrol kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 5.5 ve 5.6'da verilmiştir. Deneyde kullanılan ekipmanlar şu şekildedir. 1-Enkoder, 2-DMSP 20-200N RM-RM PYK, 3-Yay, 4-National Instrument data logger kartı, 5. Basınç regülatörü, 6. Basınç göstergesidir.



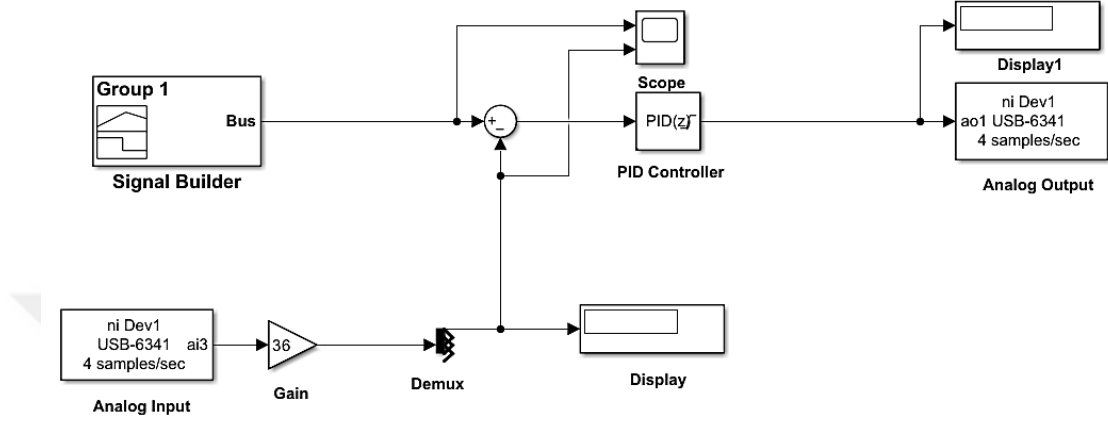
Şekil 5.5. Tek Pyk'lı Agonist-Antagonist sistemin kontrolü için hazırlanan deney düzeneği.



Şekil 5.6. Tek Pyk'lı Agonist-Antagonist sistemin kontrolü için hazırlanan deney düzeneği.

Bu deney düzeneği ile amaçlanan bir PYK ve bir yay ile dirsek hareketinin konum kontrolünü PID kontrol yöntemi ile sağlamaktır. PYK'nın basınçsız olduğu durum için enkoder sıfıra ayarlanmıştır. PYK basıncı arttırıldıkça enkoderin açısında artma olmaktadır ve enkoder PYK'nın maksimum kısalmasında (6 barda) enkoder 120 derece açiya kadar gösterebilmektedir. Kontrol için MATLAB/SIMULINK programı kullanılmıştır. SIMULINK programında sistem için devre tasarlanmıştır. Tasarlanan devre Şekil 5.7'de verilmiştir. Devrede Analog input bloğu enkoderden gelen veriyi okumak için kullanılmıştır. Analog output bloğu ise basınç regülatörüne sinyal göndermek için kullanılmıştır. Signal Builder bloğu ile referans konum grafiği çizilmiştir. PID bloğu ile PID kontrol için katsayılar ayarlanmıştır. Sum bloğu ile

referans konum ve analog input ile okunan veri birbirinden çıkarılmıştır. Gain bloğu ile enkoderden 0-10V arasında gelen veri açığa çevrilmek için çarpım olarak kullanılmıştır. Scope bloğu referans konum ve enkoderden okunan konum grafiğini karşılaştırmak için kullanılmıştır. Display bloğu ise anlık PID sinyalini ve konumu okumak için kullanılmıştır.



Şekil 5.7. Tek PYK'lı agonist antagonist sistemin PID ile konum kontrolü için SIMULINK programında hazırlanan deney düzeneği.

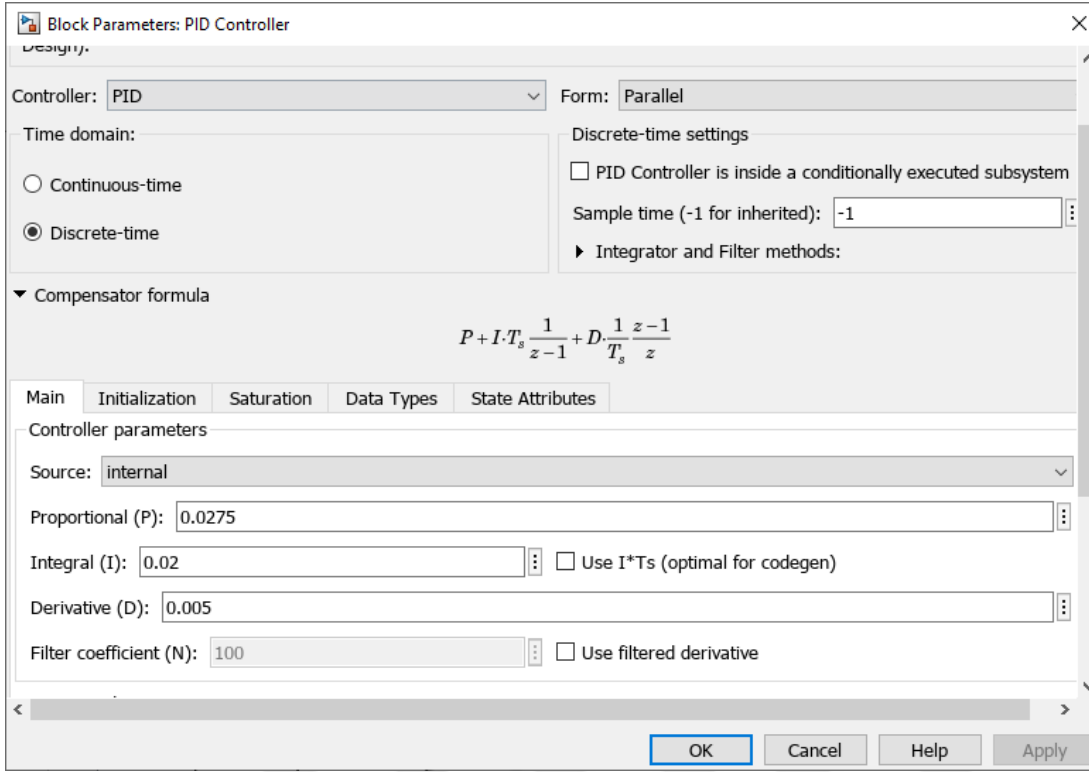
Bölüm 5.1'de iki PYK'lı sistem için matematiksel model verilmişti. Bu bölümde bir PYK'lı ve bir yaylı agonist-antagonist kasın matematiksel modelinde önceki bölümde Şekil 5.2'de bir PYK'nın üç element ile modellenmesi baz alınmıştır. PYK'nın matematiksel modeli Denklem 5.12'de verilmiştir. Deney setinde PYK'nın karşısında yay vardır ve PYK'nın kuvvetini az da olsa azaltıcı etkisi bulunur ayrıca PYK yatay olarak konumlandırıldığı için yer çekimi etkisi bulunmaz. Bu düzenlemeler sonucu Şekil 5.5'te verilen sistemin matematiksel modeli Denklem 5.13'teki gibi olur.

$$M * \ddot{x} + B(P) * \dot{x} + K(P) * x = F(P) - M * g \quad (5.12)$$

$$M * \ddot{x} + B(P) * \dot{x} + K(P) * x = F(P) - F_{YAY} \quad (5.13)$$

Bu model baz alınarak deneysel olarak PID katsayıları manuel ayarlama yöntemi ile bulunmuştur. PID ayar bloğu Şekil 5.8'de gösterilmiştir. PID parametreleri; $K_p=0.0275$, $K_i=0.02$ ve $K_d=0.005$ seçilmiştir. Ayrık zaman kontrol yapılmıştır. Örnekleme zamanı da sistemin hızı baz alınarak hesaplanmıştır. Basınç regülatörü saniyede bir değiştiğinden sistemin hızı 1 kabul edilmiştir. Nyquist-Shannon Örnekleme Teoremi'ne göre, örnekleme hızı, analog sinyaldeki en yüksek frekans bileşeninin en az iki katı olmalıdır, yani $2 \times f_{max}$ [58]. Bu teoriye göre örnekleme

zamanı en az 2 seçilmesi gerektiği görülmektedir. Yapılan deneyler ile optimum örnekleme zamanının 4 olduğu tespit edilmiştir.

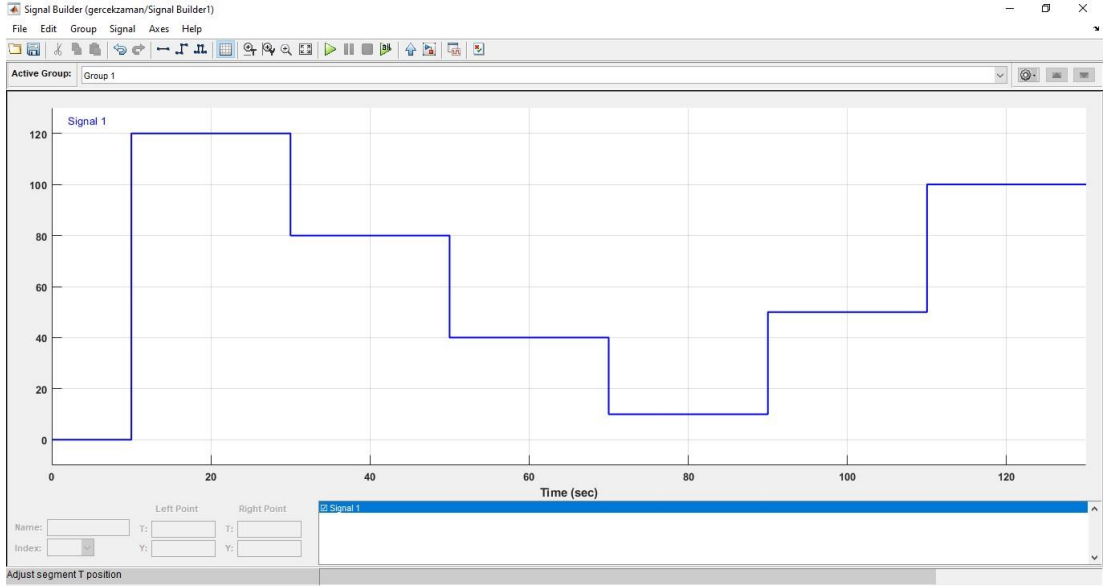


Şekil 5.8. PID ayar bloğu.

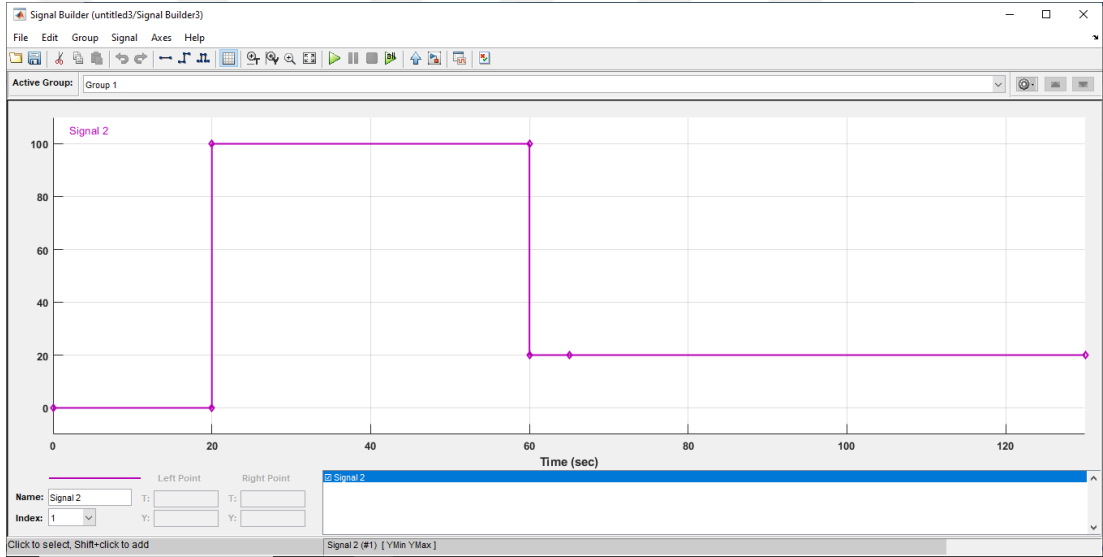
Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da signal builder bloğu ile üretilen referans sinyaller verilmiştir. Şekil 5.7'de verilen simulink devresinin çalıştırılması sonucu elde edilen, şekil 5.9'daki referansa göre okunan konumun davranış grafiği Şekil 5.11'de verilmiştir. Şekil 5.10'daki referansa göre okunan konumun grafiği ise Şekil 5.12'de verilmiştir. İlk grafikteki amaç PID kontrolcünün farklı konum değerlerine ulaşmasındaki performansını test etmektir. İkinci grafikteki amaç ise PID kontrolcünün sürekli haldeki davranışını gözlemlemektir. Bu grafiklerden yola çıkarak PID kontrolcüsünün performansı Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Pozisyon kontrolü için uygulanan PID kontrolü sonuçları.

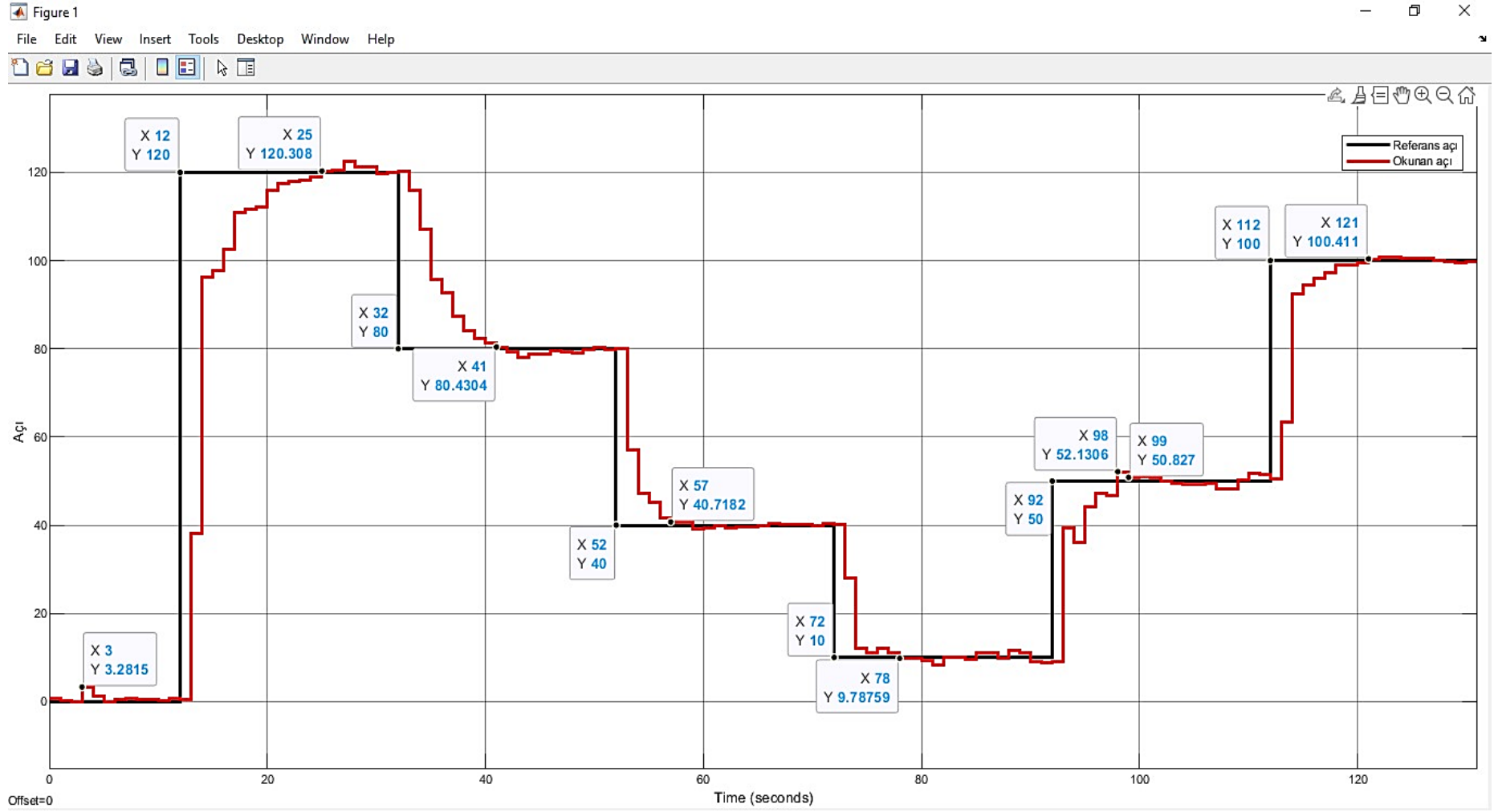
Kontrolör	Maksimum aşım (%)	Ortalama yükselme zamanı(s)	Ortalama kalıcı durum hatası (%)
PID Kontrol	11	9	2



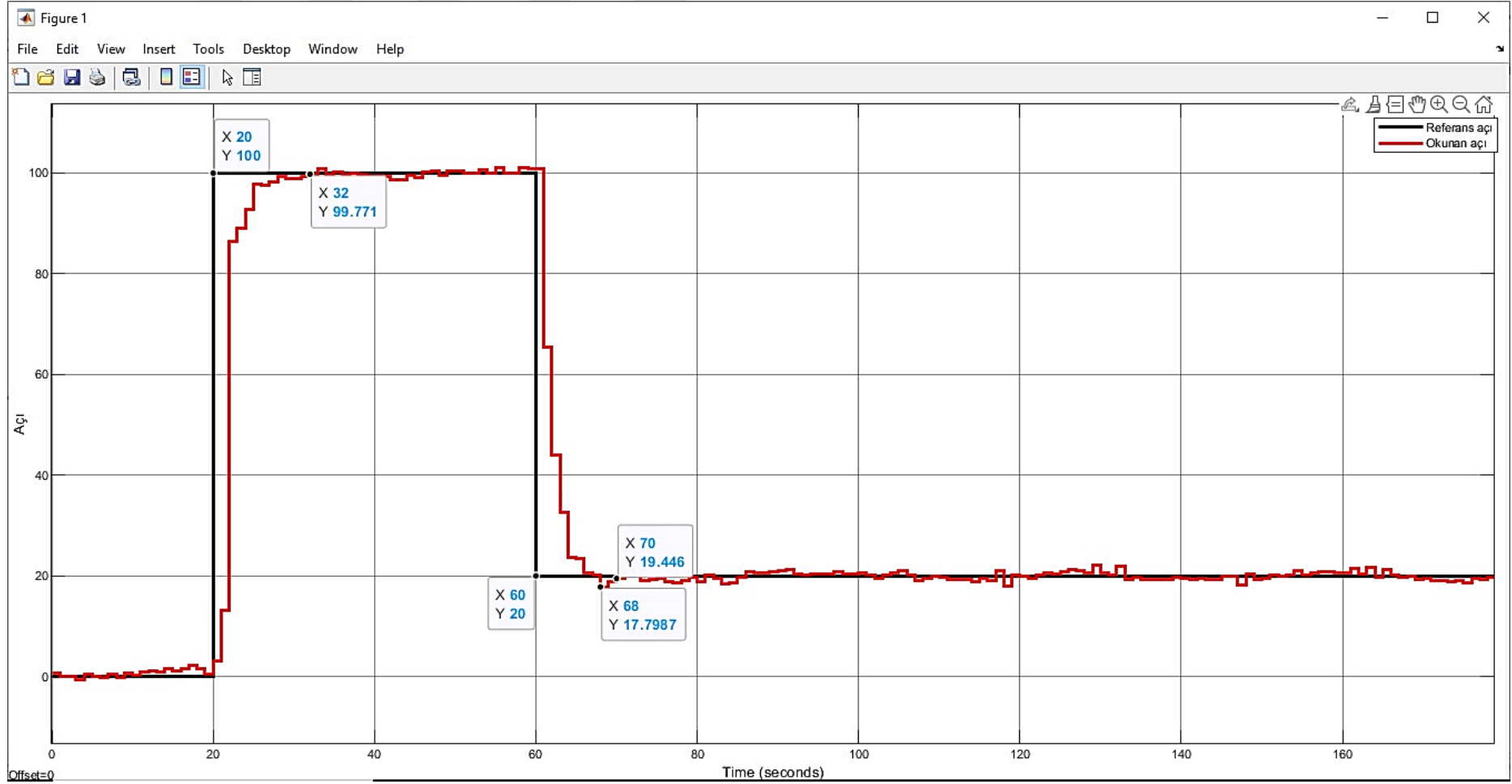
Şekil 5.9. Signal builder bloğu ile üretilen birinci referans sinyal.



Şekil 5.10. Signal builder bloğu ile üretilen ikinci referans sinyal.



Şekil 5.11. Birinci referans konuma göre enkoderden okunan konumun davranış grafiği.



Şekil 5.12. İkinci referans konuma göre enkoderden okunan konumun davranış grafiği.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bölüm 3'te PYK'nın statik karakteristik denklemi bulunmak istenmişti ve bunun için deney düzeneği hazırlanmıştı. Deney ile amaçlanan PYK'ya verilen basınca göre kastaki kısılma miktarının denklemini bulmaktı. Matlab ortamında hem fminsearch komutu ile hem de cftool ortamında eğri uydurma yöntemi ile başarılı bir şekilde deney sonucuna uygun iki denklem bulundu. Denklemler fourier ve polinom denklemleriydi. Fourier denkleminin deney sonucuna polinom denkleminden daha yakın olduğu gözlemlendi ancak polinom denklemi fourier denkleminden daha sade bir denklem olduğundan iki denklem türü de çalışmaya eklendi. Deney sonucu katalog değerleri ile karşılaştırıldı ve aynı olmadığı görüldü. Bu durumun nedenleri ise; deney düzeneğinde hava kaçağı olabilmesi, kauçuğun esneyebilen deformasyona uğrayabilen bir malzeme olması, PYK'nın lineer bir aktüatör olmaması, PYK'nın histerezisinin yüksek olması ve PYK'nın kasilma- gevşeme durumlarının ortalaması alınarak karşılaştırma yapılmasıdır.

Bölüm 4'te PYK'nın statik kuvvet modeli oluşturulmak istenmişti. Kuvvet modeli için izobarik ölçüm deney düzeneği hazırlanmıştı. Deneyde amaçlanan PYK'nın kuvvet, basınç ve uzunluk arasındaki ilişkiyi veren statik kuvvet haritasını çıkarmaktı. Statik kuvvet haritası deneydeki verilerden yararlanarak Matlab ortamında bulunmuştur. Ayrıca basınçlı kaplara etkiyen gerilme denklemlerinden yararlanarak yeni bir statik kuvvet modeli oluşturuldu ve mevcut statik modellerle karşılaştırıldı. Bulunan modelin performansının mevcut modellerden daha iyi olduğu kanıtlandı.

Bölüm 5'te PYK'lı agonist- antagonist sistemin kontrolü yapılmak istendi. Bunun için bir PYK ve bir yay kullanılarak PID kontrol ile MATLAB/SIMULINK ortamında gerçek zamanlı olarak konum kontrolü sağlanmak istendi. Deney düzeneği kuruldu ve modelden bağımsız deneysel olarak PID katsayıları bulundu. Farklı değerler üreten bir referans oluşturuldu ve enkoderin bu değerdeki değişime göre davranışı gözlemlendi. Katsayılar neticesinde enkoderin ortalama 9 saniyede referans değere ulaştığı görüldü. Aşımın sifıra çok yakın olduğu ve maksimum aşımın %11 olduğu tespit edildi. Sürekli

zamanda sürekli zaman hatasının tamamen sıfır olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni ise PYK'daki kauçuk malzemesinin genişlemesinden kaynaklıdır.

Özetle, deney sonuçlarına göre, modelden bağımsız PID kontrolü, agonist- antagonist sistemin konum kontrolünde basit ve etkili bir çözüm olduğu görülmektedir ancak PID katsayılarının deneysel yöntemle bulunması uzun süren bir işlemdir. Bu yüzden zamandan tasarruf ve sistem dinamiğine en uygun katsayıları bulmak için bulanık mantık ya da yapay zeka tabanlı sistemlerin kullanılması PYK'ların lineer olmayan davranışlarını göz ardı etmemizi sağlayabilir. Bu sistem endüstride pek çok alanda kullanılabilir özellikle çok tekrar gerektiren test düzeneklerinde kullanıma uygun olur.



KAYNAKLAR

- [1] GÜRGÖZE, G., & TÜRKOĞLU, İ. (2019). Kullanım Alanlarına Göre Robot Sistemlerinin Sınıflandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(1), 53-66.
- [2] SCHULTE, H., F., J., (1961) The Characteristics of The McKibben Artificial Muscle. The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics, National Academy of Science-National Research Council, Washington D.C., USA.
- [3] Daerden, Frank. (1999). Conception and realization of pleated pneumatic artificial muscles and their use as compliant actuation elements. Vrije Universiteit Brussel, Belgium.
- [4] Tongaoğlu, M. (2014). *EMG Kontrollü Pnömatik Eyleyicili İnsansı Endüstriyel Kol Tasarımı* [Doktora tezi] Marmara Üniversitesi.
- [5] Ege, M., & Küçük, S. (2015). Designing of a model of electrical controlled above knee prosthesis. *In 2015 Medical Technologies National Conference (TIPTEKNO)* (pp.1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/BIOROB.2008.4762811>
- [6] Bakır, M. (2019). *Yapay kaslar kullanarak hava araçlarında konum kontrolü* [Yüksek Lisans Tezi] Erciyes Üniversitesi
- [7] BAYSAL, C. V. (2020). Neural Network Based Inverse Modelling for Pneumatic Artificial Muscles. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Ejosat Ek Özel Sayı (HORA)), 55-62. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1115888>
- [8] Gülnergiz, E. T. (2020). *Eklemli imalatla üretilmiş pnömatik yapay kas ile el rehabilitasyon ortezi mekatronik sistem tasarımı* [Yüksek lisans tezi] İstanbul Gedik Üniversitesi
- [9] Betts, Gordon J., Peter, D. and Eddie, J. (2013) *Anatomy & physiology*. Openstax.
- [10] D. Büchler, R. Calandra, B. Schölkopf, and J. Peters. (2018). Control of musculoskeletal systems using learned dynamics models. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(4), 3161–3168. <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2849601>
- [11] I. Boblan, J. Maschuw, D. Engelhardt, A. Schulz, H. Schwenk, R. Bannasch, and I. Rechenberg. (2003), A Human-Like Robot Hand and Arm with Fluidic Muscles: Biologically Inspired Construction and Functionality. *Lecture Notes in Computer Science*, 3139:160-179. https://doi.org/10.1007/978-3-540-27833-7_12
- [12] T. Noritsugu and T. Tanaka. (1996, November, 11-14). Application of rubber artificial muscle manipulator as a rehabilitation robot. *Proceedings 5th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, Tsukuba, Japan.

- [13] Ayberk B. (2021). *Üç Serbestlik Dereceli Robotik Kolun Kartezyen Uzayda Empedans Kontrolü* [Yüksek lisans tezi] Bursa Teknik Üniversitesi
- [14] Siciliano, B. & Villani, L. (2012). *Robot force control*. Band 540 von The Springer International Series in Engineering and Computer Science. Springer Science & Business Media.
- [15] Lee, J. J., Lee, J. Y., Choi, T. (2006, October, 09-15). Control of Artificial Pneumatic Muscle for Robot Application. 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China
- [16] Wong, K. Y. (2019). Position and Force Control of Pneumatic Artificial Muscle Actuators Using PID Controller with Fuzzy Gain Scheduling.
- [17] Zhang, L. (2011). PID Position Control of a Pneumatic Muscle Actuator Using Particle Swarm Optimization.
- [18] He, Z. (2013). PID Control of a Pneumatic Muscle Actuator Based on Neural Network Inverse Model.
- [19] Hogan, N. (1985). Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I-III. *Trans. of ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, 107, 1. <https://doi.org/10.1115/1.3140701>
- [20] Hogan, N. (1984). Adaptive control of mechanical impedance by coactivation of antagonist muscles. *IEEE Transactions on automatic control*, 29(8), 681-690. <https://doi.org/10.1109/TAC.1984.1103644>
- [21] Hogan, N. (1989). Controlling impedance at the man/machine interface. In *1989 IEEE International Conference on Robotics and automation* (pp. 1626-1627). <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1989.100210>
- [22] Hogan, N. (1985). The mechanics of multi-joint posture and movement control. *Biological cybernetics*, 52(5), 315-331. <https://doi.org/10.1007/BF00355754>
- [23] Love, L. J., & Book, W. J. (1995). Environment estimation for enhanced impedance control. In *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Vol. 2, pp. 1854-1859). <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1995.525537>
- [24] Mills, J. K., & Lokhorst, D. M. (1993). Control of robotic manipulators during general task execution: A discontinuous control approach. *The International Journal of Robotics Research*, 12(2), 146-163. <https://doi.org/10.1177/027836499301200204>
- [25] Kaboli, M. (2006). Fuzzy Logic Control of Pneumatic Artificial Muscles for Robotic Applications.
- [26] Khedekar, P.A. (2014). Fuzzy Control of an Antagonistic Pneumatic Muscle System.
- [27] TARHAN, H., BASAR, H., B. (2006). *Pnömatik Yapay Kaslı Konum Kontrolü*, [Bitirme Tasarım Projesi], İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [28] Daerden, F.; Lefeber, D.; Verrelst, B.; Van Ham, R. (2001) Pleated pneumatic artificial muscles: Compliant robotic actuators. In *Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Expanding the Societal Role of Robotics in the Next Millennium, Maui, HI, USA, Volume 4*, pp. 1958–1963. <https://doi.org/10.1109/IROS.2001.976360>

- [29] Daerden, F. (1999). *Conception and realization of Pleated Pneumatic Artificial Muscles and their use as compliant actuation elements*, [PhD Thesis], Vrije Universiteit Brussel
- [30] Daerden F. and D., Lefeber. (2001). The concept and design of pleated pneumatic artificial muscles, *International Journal of Fluid Power*, vol. 2, no. 3, pp. 41–50. <https://doi.org/10.1080/14399776.2001.10781119>
- [31] Daerden, F., & Lefeber, D. (2002). Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation. *European journal of mechanical and environmental engineering*, 47(1), 11-21.
- [32] Festo. (2005). Fluidic Muscle DMSP/MAS Catalog, pp 2. FESTO Inc., Germany.
- [33] Festo. (2005). Fluidic Muscle DMSP/MAS Catalog, pp 9. FESTO Inc., Germany.
- [34] Arifoğlu, U. (2016) *MATLAB 9.1-Simulink ve Mühendislik uygulamaları* (1. Baskı). Alfa Yayınları.
- [35] Martens, M. (2021). *Control of pneumatic-muscle-actuator-driven joints in robotic applications* [Doktora Tezi]. Technical University of Berlin.
- [36] Boblan, I. (2010). *Modeling and regulation of a fluidic muscle pair* [Doktora Tezi]. Technical University of Berlin.
- [37] Hildebrandt, A., Sawodny, O., Neumann, R. and Hartmann, A. (2005). Cascaded control concept of a robot with two degrees of freedom driven by four artificial pneumatic muscle actuators. *In Proceedings of the American Control Conference, USA, vol.1, pages 680–685.* <https://doi.org/10.1109/ACC.2005.1470036>.
- [38] Minh, T. V., Tjahjowidodo, T., Ramon, H. and Van Brussel, H. (2010). Cascade position control of a single pneumatic artificial muscle–mass system with hysteresis compensation. *Mechatronics*, 20(3):402–414, <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.03.001>
- [39] Chou C. P. and Hannaford, B. (1994). Static and dynamic characteristics of McKibben pneumatic artificial muscles. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol.1, pages 281–286. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1994.350977>
- [40] Tondu, B. and Lopez, P. (2000). Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators. *IEEE Control Systems*, 20(2): pages 15–38. <https://doi.org/10.1109/37.833638>.
- [41] Wickramatunge, K. C. and Leephakpreeda, T. (2010). Study on mechanical behaviors of pneumatic artificial muscle. *International Journal of Engineering Science*, 48(2):188–198. <https://doi.org/10.1016/J.IJENGSCI.2009.08.001>
- [42] Schulte. H. J., (1961). The characteristics of the McKibben artificial muscle, in the application of external power in prosthetics and orthotics. Washington, dc: Nat. Acad. Sci.-Nat. Res. Council, ID: 56578299

- [43] Andrikopoulos, G., Nikolakopoulos, G. and Manesis, S. (2015). Incorporation of thermal expansion in static force modeling of pneumatic artificial muscles. *23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pages 414–420, <https://doi.org/10.1109/MED.2015.7158784>
- [44] Sárosi, J., Biro, I., Nemeth, J. and Cveticanin, L. (2015). Dynamic modeling of a pneumatic muscle actuator with two-direction motion. *Mechanism and Machine Theory*, 85: 25–34, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.11.006>
- [45] Hildebrandt, A., Sawodny, O., Neumann, R. and Hartmann, A. (2005). Cascaded control concept of a robot with two degrees of freedom driven by four artificial pneumatic muscle actuators. In *Proceedings of the American Control Conference*, vol. 1, pages 680–685. <https://doi.org/10.1109/ACC.2005.1470036>.
- [46] Wickramatunge, K. C. and Leephakpreeda, T. (2010). Study on mechanical behaviors of pneumatic artificial muscle. *International Journal of Engineering Science*, 48(2):pages188–198. <https://doi.org/10.1016/J.IJENGSCI.2009.08.001>
- [47] Kaptı A. O. (2023). Tübitak Araştırma Projesi Gelişme Raporu (Bilimsel Rapor)
- [48] Parlak, M., İ., Uzmay. (2019). Dirsek Fleksiyon Hareketinde Kasların Moment Taşıma Karakteristiklerinin İncelenmesi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c.7, Özel Sayı, ss. 924-932. <http://doi.org/10.36306/konjes.624043>
- [49] Zhao, W., Song, A. (2020). Active Motion Control of a Knee Exoskeleton Driven by Antagonistic Pneumatic Muscle Actuators. <https://doi.org/10.3390/act9040134>
- [50] Nguyen, M. L., Chen, X. and Yang, F. (2018). Discrete-Time Quasi-Sliding-Mode Control With Prescribed Performance Function and its Application to Piezo-Actuated Positioning Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 65(1): 942–950. <http://doi.org/10.1109/TIE.2017.2708024>.
- [51] Dinh, V. V., Mai, D. H., Duong, M. D. and Dao, Q. T. (2023). Prescribed Performance Function Based Sliding Mode Control of Opposing Pneumatic Artificial Muscles to Enhance Safety. *Journal of Applied Science and Engineering*, Vol.27, No2, Page2117-2126. [http://dx.doi.org/10.6180/jase.202402_27\(2\).0013](http://dx.doi.org/10.6180/jase.202402_27(2).0013)
- [52] Adıyan, A. (2012). *Sıvı seviye kontrolü için scada sistem tasarımı* [Doktora tezi] DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü
- [53] Bingül, Z.(2005). *Matlab ve Simulink'le Modelleme / Kontrol I*. Birsen Yayınevi.
- [54] Çukurova Üniversitesi. (2015). *Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(1), ss 4-5. ISSN 1019-1011
- [55] Eke, İ. (2022). Optimum PID Kazançları Genetik Algoritma İle Hesaplanan Otomatik Gerilim Regülatörü. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(3), 351-361. <https://doi.org/10.29137/umagd.1176936>

- [56] Arrese, A. P., Landaluze, J., Arenas, J. (2009). Research on the position control of a 1-DOF set-up powered by pneumatic muscles. *ReserchGate*. <https://doi.org/10.1109/ICMECH.2009.4957132>
- [57] Arrese, A. P., Landaluze, J., Arenas, J. (2010). Modelling in Modelica and position control of a 1-DoF set-up powered by pneumatic muscles. *ReserchGate*. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.05.002>
- [58] Wright, G. (2024). Nyquist theorem. TechTarget. <https://www.techtarget.com/whatis/definition/Nyquist-Theorem>





EKLER

EK A. Matlab kodları

EK B. Şekiller

EK A

Ek A1. PYK'nın statik karakterisği için Matlab'ta fminsearch komutu ile denklem elde etme kodu;

```
P=[0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6];  
syms a b c  
for i = 1:length(P)  
L(i)=a*P(i)^2+b*P(i)+c;  
end  
Lmod=L  
Lkasılma=[0 1.3333 6.3333 15 24 30.3333 35 38.3333 41 43 45 46.3333 48];  
fun = @(x) sum((Lkasılma - subs(Lmod, [a b c], x)).^2);  
x0=[0 0 0];  
options = optimset('MaxFunEvals',2000,'MaxIter',2000);  
[x,fval,exitflag,output] = fminsearch(fun,x0,options)
```

Ek A2. Bulunan katsayıların test edildiği Matlab komutu;

```
P=[0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6];  
syms a b c  
a=-127.8055; b=163.8994; c=-4.4506;  
for i = 1:length(P)  
L(i)=a*P(i)^2+b*P(i)+c;  
end  
Lkasılmayeni=L  
Lkasılma=[0 1.3333 6.3333 15 24 30.3333 35 38.3333 41 43 45 46.3333 48]
```

Ek A3. PYK'nın basınca göre kasılma ve gevşeme durumlarında kastaki kısalmanın çizildiği eğri;

```
clc, clear ,close all
```

```
P=[0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6];
```

```
P1=[0.6 0.55 0.5 0.45 0.4 0.35 0.3 0.25 0.2 0.15 0.1 0.05];
```

```
Lg=[1.3333 6.3333 15 24 30.3333 35 38.3333 41 43 45 46.3333 48];
```

```
Ld1=[48 47.3333 46.3333 45.3333 44 42 39 35.3333 30 22 12 4];
```

```
plot(P,Lg,P1,Ld1)
```

```
xlabel('Basınç(MPa)');
```

```
ylabel('PYK boyu kısalma miktarı(mm)');
```

Ek A4. PYK'nın statik kuvvet haritası için Matlab programında üç boyutlu çizim kodu;

```
x=[1:1:6];
```

```
y=[200:-6:158];
```

```
[X,Y]=meshgrid(x,y);
```

```
z=[261 47 0 0 0 0 0; 529 300.5 184 128.5 59.5 0 0 0;775.5 519 379 278 188.5 131  
52.5 0;1039.5 769.5 596 466 350.5 242.5 143 55.5;1302 1001 803.5 643.5 501.5 371  
250.5 131;1547.5 1217 993 808 634 484.5 340.5 201];
```

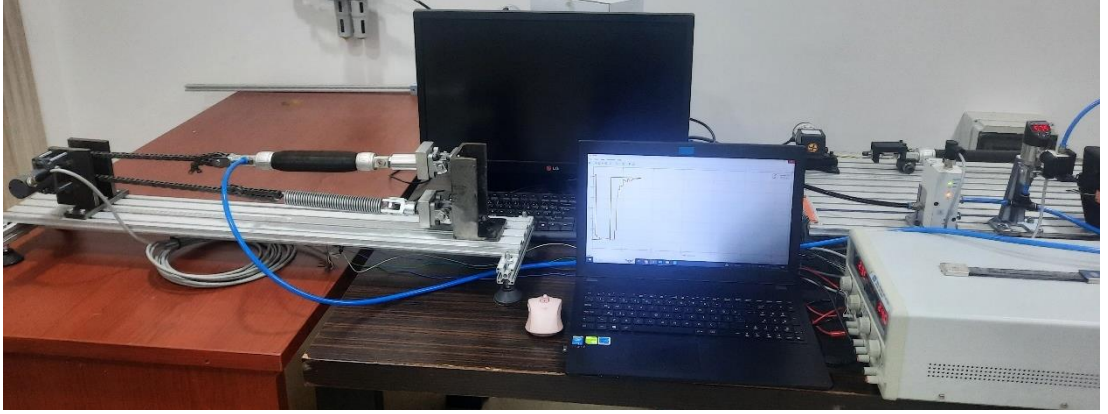
```
a=z'
```

```
surf(X,Y,a)
```

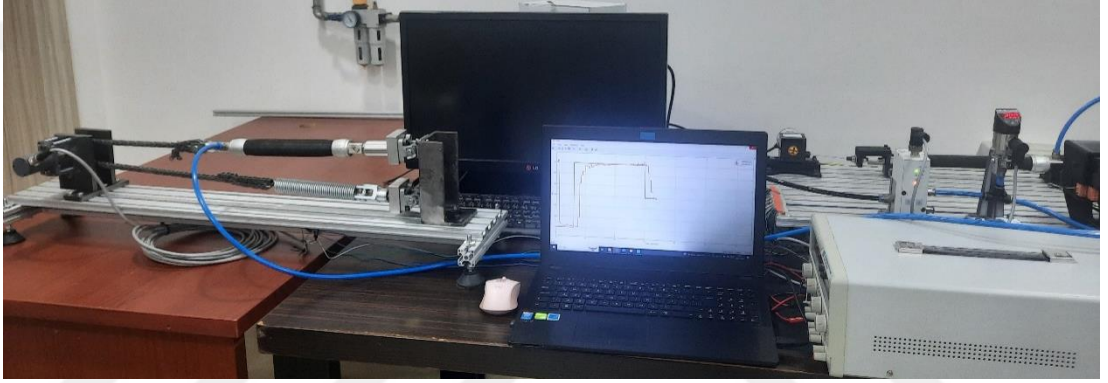
```
xlabel('Basınç[P]'); ylabel('Uzunluk[mm]'); zlabel('Kuvvet[N]');
```

```
title('Festo DMSP-20-200N nin ölçülen statik kuvvet haritası');
```

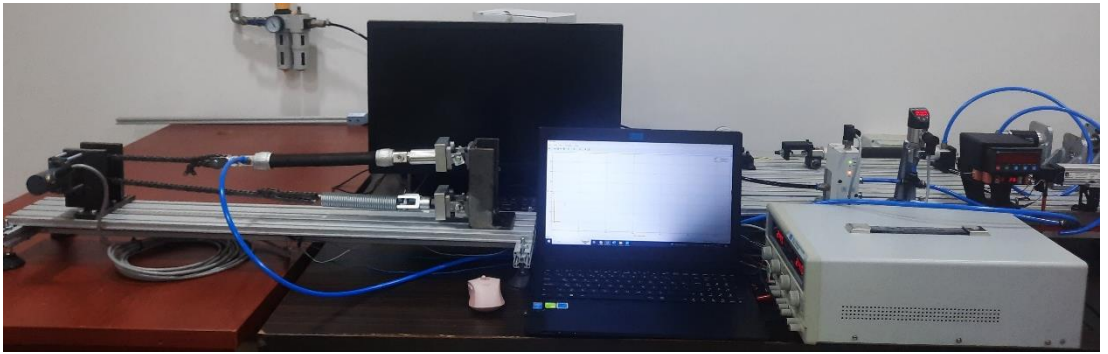
EK B.



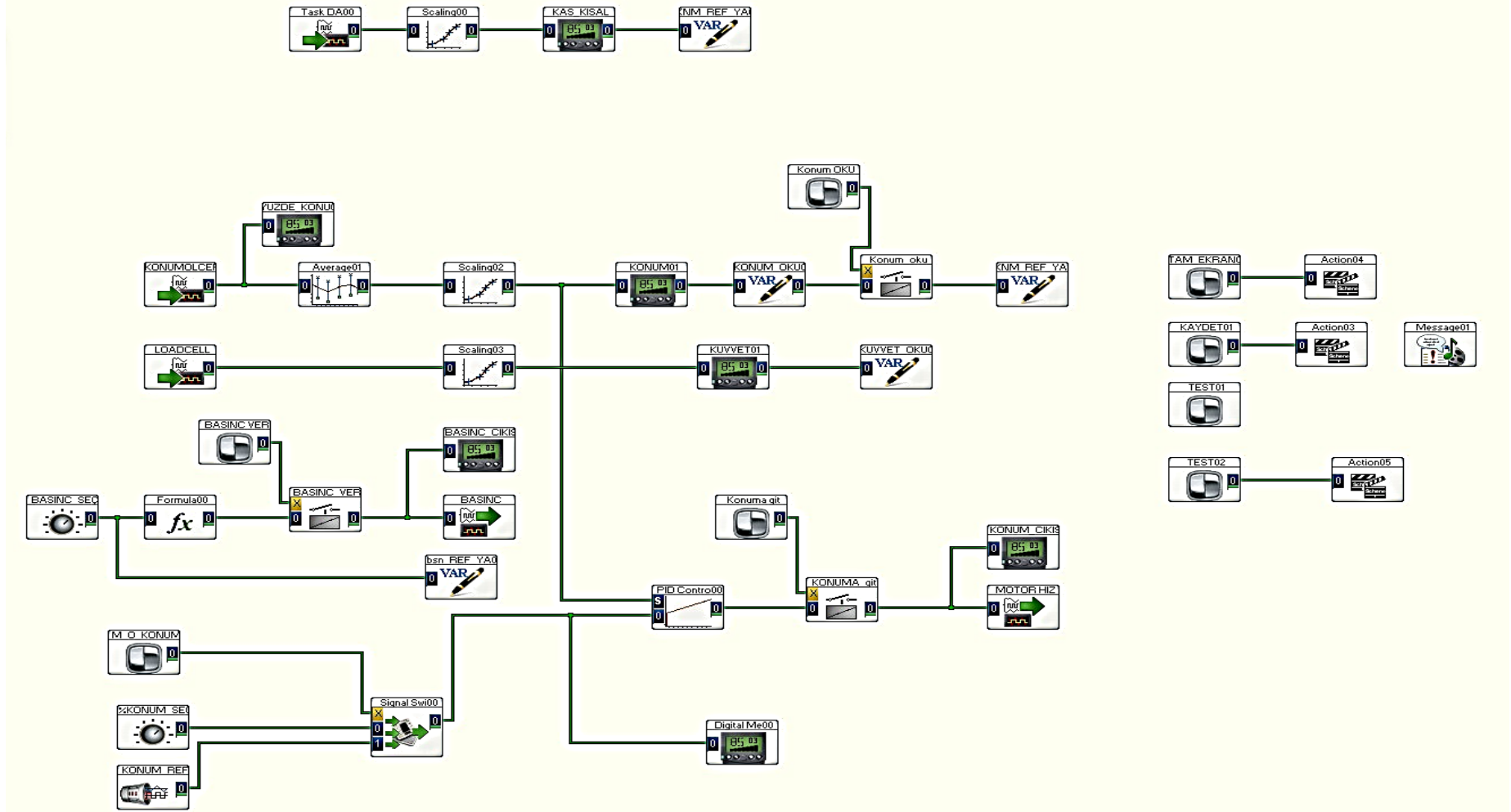
EK B1. Enkoderin maksimum açıda (120°) olduđunda sistem.



EK B2. Enkoderin 80° açıda olduđunda sistem.



EK B3. Enkoderin 0° açıda olduđunda sistem.



EK B4. Daisy Lab uygulamasında PYK'nın izobarik kuvvet ölçümü için hazırlanan devre.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Filiz ATAK METİNER

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
- **Yükseklisans** : Devam ediyor, Sakarya Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Elektronik Program

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Atak, F. (2024, 16-17, Mart). Bir Pnömatik Yapay Kaslı Agonist Antagonist Sistemin Pid İle Konum Kontrolü. B. Bayram(Ed.), *19th UBAK International Scientific Research Congress*(1,15-21), Ankara, Türkiye