T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ESNEK YÜZEYLİ OPTİK KUVVET SENSÖRLÜ ROBOTİK TUTUCU TASARIMI VE KONTROL ANALİZLERİ

Muhammed Halit ALZAİM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Claudıa Fernanda YAŞAR

Temmuz, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ESNEK YÜZEYLİ OPTİK KUVVET SENSÖRLÜ ROBOTİK TUTUCU TASARIMI VE KONTROL ANALİZLERİ

Muhammed Halit ALZAİM tarafından hazırlanan tez çalışması 22.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Claudıa Fernanda YAŞAR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Claudıa Fernanda YAŞAR, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Şeref Naci ENGİN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Murat DOĞRUEL, Üye
İstanbul 29 Mayıs Üniversitesi _____

Danışmanım Doç.Dr. Claudıa Fernanda YAŞAR sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Esnek Yüzeyli Optik Kuvvet Sensörlü Robotik Tutucu Tasarımı ve Kontrol Analizleri” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Muhammed Halit ALZAİM

İmza

Bu çalışmayı, başta büyük liderimiz Hz. Muhammed (s.a.v.), bize daima inanç ve azim aşılayan özgür Suriye'nin mücahit ve aziz şehitlerine ve özgürlük yolundaki kararlı duruşuyla ilham kaynağımız olan Cumhurbaşkanımız Sayın Ahmed El-Şaraa'ya ithaf ediyorum.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, sabrı ve motivasyonuyla bana her zaman yol gösteren değerli danışman hocam Claudia Fernanda YAŞAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca eğitim hayatım boyunca bilgi ve katkılarıyla beni destekleyen tüm hocalarıma, laboratuvar ve proje süreçlerinde yardımını gördüğüm arkadaşlarıma, ve bana her koşulda manevi destek olan sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmalarımda bana ilham veren özgür Suriye mücadelesine, fedakârlıklarıyla yol gösteren aziz şehitlere de şükranlarımı sunarım.

Muhammed Halit ALZAİM

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xiii
ÖZET xiv
ABSTRACT xvi
1 GİRİŞ 18
1.1 Robot Tutucuları 18
1.1.1 Robot Tutucuları Tarihçesi 19
1.1.3 Robot Tutucu Çeşitleri 21
1.2 Tutucu Sistemlerinde Kuvvet Kontrolü 23
1.3 Bu Tezin Kapsamı ve Amacı 24
2 KUVVET SENSÖRÜ SEÇİMİ VE PROTOTİPLEME SÜREÇLERİ 25
2.1 Optik Temelli Kuvvet Ölçümünde Literatürde Araştırmalar ve Uygulamalar 25
2.1.1 Yansıtıcı İç Yüzeyli Sensörler 25
2.1.2 Yansıtıcı Yüzeysiz Optik Kuvvet Sensörleri 26
2.2 Kameralı Optik Kuvvet Sensörleri Sensörler 28
2.3 Sensör Tipi Seçim Yaklaşımı 29
2.4 Esnek Yüzeyli Optik Kuvvet Sensörü Öntasarımı ve Ön deneyleri Mekanik 30
2.5 Elektronik ve Simülasyon Araştırma ve Testleri 31
2.5.1 Fotodiyotlara Uygun Işık Kaynağı (IR LED) Seçimi 31
2.6 Deneysel Kurulumlar ve Karşılaştırmalı Test Ortamları 33
2.6.1 Deney Setleri 33
2.6.2 Deneysel test ortamı ve gerçekleştirimi 36
2.6.3 Deneysel test sonuçları 37

3 OPTİK KUVVET SENSÖRÜ MEKANİK TASARIMI 39
3.1 Esnek Material Seçimi 39
3.2 Esnek Material Seçimi ve Üretimi 40
4 OPTIK KUVVET SENSÖRÜ ELEKTRONIK TASARIMI VE PROTOTİPİ 44
4.1 Optik Kuvvet Sensörü Devre Bileşenleri 45
4.1.1 BPW34 Fotodiyotunun Seçim Gerekçesi 45
4.1.2 Kızıl Ötesi LED Konik Açısı Araştırması 46
4.2 Sensör Devresi Tasarımı ve PCB Üretimi 47
4.2.1 Sensör Devresi Şema Tasarımı 47
4.2.2 Sensör Devresi Şema Tasarımı 48
4.2.3 Sensör Baskı Devre Prototip Üretimi 49
4.3 Kalibrasyon Sistemi Tasarımı ve Uygulama Süreci 50
4.3.1 Kalibrasyon Seti Tasarım ve Gerçekleştirimi 50
4.3.2 Kalibrasyon Seti Matematiksel Modellemesi 53
4.4 Kalibrasyon Sonucu 55
4.5 Sensör Statik Karekteristği 60
4.5.1 Giriş Aralığı ve Giriş Açıklığı 60
4.5.2 Tam Skala Çıkışı (FSO) 60
4.5.3 Statik Hassasiyet 61
4.5.4 Tekrarlanabilrlik hesabı 61
4.5.5 Doğruluk Hesabı 63
4.5.6 Histerezis Hesabı 65
4.5.7 Doğrusalsızlık Hesabı 67
4.6 Kuvvet Sensörünün Matematiksel Modellenmesi 70
5 TUTUCU SİSTEMİN MODELLENMESİ 74
5.1 Tutucu Sistem Mekanik Tasarımı 74
5.1.1 Tutucu Tasarımın Gerçekçiliği 76
5.2. Motor Sistem Tanımlaması 77
5.2.1 Deneysel Devre ve Potansiyometre Geri Beslemesi 77

5.2.2 Motor Tanımlanması Deneysel Kurulumu 78

5.2.3 Tanımanma Simulink Test Yapısı 78

5.2.4 Adım Cevabı ve İlk Gözlemler 79

5.2.5 Motor Matematiksel Modellemesi ve Transfer Fonksiyonu 80

5.3 Simscape Modelinin Kurulumu 81

5.3.1 Lineerleştirme İşlemi 82

5.3.2 Hareket Denkleminin 83

5.3.3 Sistemin Kararlılık Analizi – Hurwitz Yöntemi 83

6 KONTROL SİSTEM TASARIMI VE SİMÜLASYON ANALİZLERİ 85

6.1 Bozulma ve Gürültü Modellemesi 85

6.2 Açık Çevrim Pozisyon Kontrolü 87

6.2.1 Sistem Dinamiği ve Matematiksel Model 87

6.2.2 Bozulma ve Gürültü Etkilerinin Dahil Edilmesi 88

6.2.3 Simülasyon Sonuçları ve Yorum 90

6.3 Kapalı Çevrim Pozisyon Kontrolü 91

6.3.1 Kapalı Çevrim Pozisyon Kontrol Modelinin Yapısı 91

6.4 Kapalı Çevrim Kuvvet Kontrolü 95

6.4.1 Kapalı Çevrim Kuvvet Kontrol Modeli 95

SONUÇ **99**

KAYNAKÇA **100**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **105**

KISALTMA LİSTESİ

ADC	Aanlog-Digital Dönüştürücüsü
RTV	Oda Sıcaklığında Kürleşen Silikon
TI	Texas Instrument
SMD	Yüzey Montaj Elemanları
LED	Işık Yayan Diyot
CNC	Bilgisayar Nümerik Kontrollü
CCN	Evrişimli Sinir Ağı
LTI	Lineer Zamanla Değişmeyen
BIBO	Sınırlı Giriş - Sınırlı Çıkış
PID	Oransal-İntegral-Türevsel
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. 1 Endüstride yaygın vakumlu vantuz tutucu 21
Şekil 1. 2 Manyetik ilkesiyle çalışan bir tutucu örneği 21
Şekil 1. 3 Silikon esaslı esnek tutucu 22
Şekil 1. 4 (a) İki parmaklı tutucu (b) üç parmaklı parmak tutucu 22
Şekil 2. 1 Esnek yüzeyli optik kuvvet sensörlerin çalışma prensibi 26
Şekil 2. 2 Sabit optik sensörün çalışma prensibi 26
Şekil 2. 3 Dışsal fiberoptik kuvvet sensörleri prensibi 27
Şekil 2. 4 İntrinsik fiber optik sensör pernsibi 27
Şekil 2. 5 CNN ön işleme adımları 28
Şekil 2. 6 Esnek oyun hamuru ürün tasarımı 29
Şekil 2. 7 Ön testlerde kullanılan yarı küreler 30
Şekil 2. 8 BPW34 fotodiyot spektral duyarlılık grafiği 31
Şekil 2. 9 BPW34 fotodiyotunun iç yapısı 32
Şekil 2. 10 TI OPT101 sensörünün spektral duyarlılık eğrisi 32
Şekil 2. 11 TI OPT101'in fiziksel şekli ve iç yapı şeması 33
Şekil 2. 12 BPW34 Sensörünün breadboard üzerindeki deneysel bağlantısı 34
Şekil 2. 13 Adafruit VEML7700 sensörüyle kurulan ölçüm düzeneği 34
Şekil 2. 14 TI OPT101 sensörünün test düzeneği 35
Şekil 2. 15 Sensörlerin deformasyon yüzeyiyle test düzeneği 35
Şekil 2. 16 Simulink tabanlı STM32F410RB çoklu analog veri okuma modeli 36
Şekil 2. 17 Mavi yarı küre deneyinde sensör çıkış sinyali 37
Şekil 2. 18 Siyah yarı küre deneyinde sensör çıkış sinyali 38
Şekil 3. 1 Sensör tasarımı ve pürüzlü silikon yüzey yapısı 39
Şekil 3. 2 Silikon kalıplama kalıp parçaları ve pürüz delikleri 40
Şekil 3. 3 Parmak izi benzetimiyle üretilmiş pürüzlü silikon yüzey yapısı 41
Şekil 3. 4 Siyah pürüzlü silikon yüzey ile ilgili kalıp örneği 41
Şekil 3. 5 Üç Boyutlu Yazıcı İle Üretilmiş Sensör Gövdesi 42
Şekil 3. 6 Destekleme halkası eklenmeden önce ve sonra sensör tasarımı 42

Şekil 3. 7 Destekleme halkası ile sabitlenmiş sensör prototipi.....43
Şekil 4. 1 BPW34 Fotodiyot teknik resimi.....45
Şekil 4. 2 60° Ve 120° Konik açılı ışık kaynağı geometrisinin simülasyonu.....46
Şekil 4. 3 BPW34 Fotodiyotlara ait sensör devresinin şematiği 47
Şekil 4. 4 PCB 3B CAD modeli 48
Şekil 4. 5 Gerçek devre kartı: fotodiyot-LED yerleşimi ve alt yüzey bağlantıları 49
Şekil 4. 6 CNC Z eksenine monte yük hücresi ve dairesel kalibrasyon ucu 50
Şekil 4. 7 CNC Destekli kalibrasyon test düzeneği.....51
Şekil 4. 8 CNC destekli kalibrasyon test düzeneği.....51
Şekil 4. 9 HX711 Modülü ile yük hücresi arduino bağlantı şeması 52
Şekil 4. 10 Wheatstone köprüsü ile yük hücresi elektriksel modeli.....52
Şekil 4. 11 Gecikmeli 42 kuvvet adımı artışı ve azalışı 56
Şekil 4. 12 42 kuvvet adımın artışı ve azalışı gösteren sensör eğrisi 58
Şekil 4. 13 Fotodiyot çıkışı–kuvvet adımları kalibrasyon eğrisi (42 adım) 65
Şekil 4. 14 Kuvvet–fotodiyot kalibrasyon eğrisi (42 adım, offsetli).....68
Şekil 4. 15 Regresyon eğrisi: yük hücresi ve fotodiyot ADC çıktıs.....70
Şekil 4. 16 Kuvvet sensörünün regresyon temelli Simulink modeli 73
Şekil 4. 17 Hesaplanan ve ölçülen kuvvet çıktılarının karşılaştırılması.....73
Şekil 5. 1 Robotik tutucu sisteminin montaj görüntüsü ve hareket eksenleri.....75
Şekil 5. 2 Parmak içine yerleştirilen sensör ve kablo kanalının kesidi.....76
Şekil 5. 3 Servo motor iç potansiyometre hattı ve ADC girişi bağlantısı 77
Şekil 5. 4 Simulink motor sistem tanımlama deney blok diyagramı.....78
Şekil 5. 5 Simulink test modeli.....78
Şekil 5. 6 MATLAB çalışma alanında elde edilen vektörler 79
Şekil 5. 7 Giriş (mavi) ve çıkış (kırmızı) zaman cevabı grafikleri 79
Şekil 5. 8 Tutucu sisteminin Simscape multibody ortamındaki tam modeli 81
Şekil 5. 9 Tutucu sistem Simulink modeli: servo motor ve çalışma noktaları 81
Şekil 5. 10 Transfer fonksiyonu Simulink modeli.....82
Şekil 6. 1 Açık çevrim pozisyon kontrolü Simulink blok diyagramı 87
Şekil 6. 2 Açık çevrim sistemine gereken kontrol sinyali 90
Şekil 6. 3 Açık çevrim sistemin davranışı 90
Şekil 6. 4 Açık çevrimde konum hata sinyali.....91
Şekil 6. 5 Kapalı çevrim pozisyon kontrolüne ait Simulink blok diyagramı 92
Şekil 6. 6 Kapalı çevrim kontrollü sistemin davranışı.....93
Şekil 6. 7 Kapalı çevrimde konum hata sinyali 94

Şekil 6. 8 Kapalı çevrim konumlama kontrolü için gereken kontrol sinyali 94
Şekil 6.9 Kuvvet kapalı çevrim kontrolü block diyagramı 96
Şekil 6. 10 Kapalı çevrim kuvvet kontrolü sistem cevabı 97
Şekil 6. 11 Kapalı çevrim kuvvet kontrolü için gereken kontrol sinyali 97
Şekil 6. 12 Kuvvet-zaman grafiği üzerinde açıklamalı sistem davranışı 98
Şekil 6. 13 Pozisyon geçiş grafiği 98

TABLO LİSTESİ

Tablo 4. 1 Üç saniye gecikmeli veri seti kesiti 55
Tablo 4. 2 Yük hücresi ve fotodiyot verilerinin işlenmiş kesiti 57
Tablo 4. 3 Yük hücresi ve fotodiyot verilerinin işlenmiş kesiti 59
Tablo 4. 4 Sensör analizleri için veri tablolarından alınan önemli değerler 60
Tablo 4. 5 Ham veri setlerinden elde edilen sensör inceleme noktaları 61
Tablo 4.6 Doğruluk hesab tablosu 64
Tablo 4.7 Histerezis hesap tablosu 66
Tablo 4. 8 Yük hücresi ile mv biriminde fotodiyot çıkış ortalaması karşılıklı işlenmiş veri setinin kesiti 69
Tablo 5. 1 MG995 servo motor parametereleri 74
Tablo 5. 2 Sistem transfer fonksiyonunun parametreleri 82

ÖZET

Esnek Yüzeyli Optik Kuvvet Sensörlü Robotik Tutucu Tasarımı ve Kontrol Analizleri

Muhammed Halit ALZAİM

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Claudia Fernenda YAŞAR

Robot sistemleri, endüstri, sağlık ve hizmet sektörlerinde giderek artan bir kullanım alanına sahiptir. Bu sistemlerde çevreyle etkileşimi sağlayan en önemli bileşenler tutuculardır. Tutucuların nesneleri kavrama, taşıma ve manipüle etme başarımı, robotun genel performansını doğrudan etkilemektedir. Geleneksel sert tutucular hassas veya kırılgan nesnelerde yetersiz kalırken, esnek robotik tutucular düzensiz şekilli ve hassas nesnelerde daha güvenli ve uyumlu bir çözüm sunmaktadır.

Bu tezde, optik kuvvet sensörüyle entegre edilmiş bir robotik parmak tutucu tasarımı, mekanik yapısı, modellenmesi ve kontrolü ele alınmıştır. Tasarlanan tutucu; silikon malzemeden üretilmiş esnek parmak uçları, kızılötesi LED ve fotodiyot içeren özel bir sensör barındırmaktadır. Bu yapı, hem yumuşak teması hem de kuvvetin hassas ölçümünü mümkün kılmaktadır.

Tutucu uçları, özel bir kalıplama yöntemiyle yarım küre biçiminde üretilmiş ve CNC tabanlı sistem kullanılarak kalibre edilmiştir. Böylece deformasyon ile kuvvet arasındaki ilişki doğru şekilde modellenmiş ve fotodiyot çıkışıyla ilişkilendirilmiştir. Elde edilen model, kontrol sistemine geri besleme sağlamak amacıyla simülasyon ortamına entegre edilmiştir.

Servo motor MATLAB/Simulink ortamında sistem tanımlama (system identification) yöntemiyle modellenmiş, tutucu ise SolidWorks'te tasarlanıp Simscape'e aktarılmıştır. Daha sonra servo motor modeli, mekanik tutucu modeliyle entegre edilmiş ve bu birleşik yapı lineerleştirilerek sistemin transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Bu modele dayanarak iki kontrol döngüsü geliştirilmiştir: pozisyon kontrolü ve kuvvet kontrolü. Sistem nesneyle teması algıladığında kaba konumlamadan ince kuvvet ayarına geçerek hassas ve dengeli tutma sağlamaktadır.

Simülasyon sonuçları, geliştirilen kontrol yapısının kararlı ve hassas kuvvet kontrolü sağladığını ve yumuşak robotik uygulamalar için uygun olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, gerçek sensör prototipine dayanan bütünleşik bir tasarım, modelleme ve kontrol yaklaşımı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Robot tutucusu, parmak tutucu, esnek robotik, optik kuvvet sensörü, kuvvet kontrolü.

ABSTRACT

Design and Control Evaluation of a Robotic Gripper Equipped with a Soft Surface and Optical Force Sensor

Muhammed Halit ALZAİM

Department of Control and Automation Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Claudıa Fernanda YAŞAR

Robotic systems are now a familiar part of manufacturing, healthcare, and service industries. They are used because they can complete complex tasks with speed and consistency. Yet much of their performance depends on how they physically interact with the environment. The gripper is the main tool for this job. It is the part that actually grasps, moves, and manipulates objects. Conventional rigid grippers often struggle when the objects are fragile or irregular. Soft robotic grippers, on the other hand, can adapt to the surface of the object and apply forces in a gentler way, which reduces the risk of damage.

In this thesis, we focus on the design and control of a robotic finger gripper that includes an optical force sensor. The gripper has silicone fingertips and an optical sensing part made from infrared emitters and photodiodes. This combination allows compliant contact while also giving sensitive force measurements. The silicone parts were produced with a molding process, and calibration was carried out using a CNC test rig together with a load cell. This made it possible to capture how force, deformation, and sensor output are related and used inside the control model.

The servo motor driving the gripper was identified experimentally in MATLAB Simulink. That model was joined with the mechanical design of the gripper,

which had been created in SolidWorks and imported into Simscape. After linearization, a transfer function was obtained. With this model, position and force controllers were designed. Once contact with an object is detected, the system shifts from rough positioning to fine force control, resulting in stable gripping.

Simulation studies under different conditions showed reliable performance and suggest that the proposed design is well suited for soft robotic applications where safe handling is required.

Keywords: Robotic gripper, finger gripper, soft robotics, optical force sensor, photodiode, force control.

1
GİRİŞ

Bu bölümde, esnek yüzeyli optik kuvvet sensörüne sahip bir robot tutucu sisteminin geliştirilmesine yönelik yürütülen tez çalışmasının genel çerçevesi sunulmaktadır. Bölüm, tutucu sistemlerinin tarihsel gelişimini ve teknolojik evrimini özetlemekte; esnek robotik sistemlerde kuvvet kontrolünün önemini vurgulamaktadır. Bu bilgiler, önerilen sistemin neden geliştirildiğini açıklamak ve tezin amaçlarını tanımlamak için temel oluşturmaktadır.

Esnek tutucu sistemleriyle ilgili genel konular, bu bölümde literatüre dayalı şekilde ele alınmıştır. Bu kapsamda, tutucu çeşitleri, kuvvet sensörleri, kontrol yöntemleri ve uygulama alanları detaylandırılmıştır. Aynı zamanda, bu çalışmada geliştirilen sistemin bilimsel dayanağına yönelik motivasyon unsurları ve mühendislik yaklaşımı açıklanmıştır. Ayrıca, optik kuvvet ölçümünün silikon bazlı esnek parmak yapılarıyla nasıl bütünleştirildiği ve bu bütünleşmenin robotik sistemlere katkısı vurgulanmaktadır.

1.1 Robot Tutucuları

Robot Tutucuları, robotların çevrelerindeki fiziksel nesnelerle doğrudan etkileşim kurmasını sağlayan uç elemanlardır [1]. Nesneleri kavrama, tutma, taşıma, yerleştirme ve bırakma gibi işlemleri gerçekleştirerek, robotun görevlerini yerine getirilmesinde kritik bir rol oynar [2]. Robotik sistemlerin yalnızca belirli bir yönde hareket etmekle kalmayıp, aynı zamanda çevresel nesnelerin etkin bir şekilde yönetilebilmesi, tutucuların varlığına ve etkinliğine bağlıdır [3].

Bir robot tutucu sisteminin temel amacı; kavranacak nesnenin geometrisine, boyutuna, ağırlığına ve malzeme özelliklerine uygun bir şekilde kuvvet uygulayarak güvenli ve etkili bir tutuş sağlamaktır [4]. Tutucular, nesnenin şekli veya yüzey yapısı değişkenlik gösterse bile güvenli bir kavrama gerçekleştirmelidir

[5]. Özellikle hassas veya yumuşak nesnelerin tutulması esnasında, uygulanan kuvvetin hem yeterli hem de kontrollü olması büyük önem taşır [6].

Tutucu sistemleri genel olarak dört temel bileşenden oluşur: Kavrama mekanizması, tahrik sistemi, sensör birimleri ve montaj elemanlarıdır [7]. Tahrik sistemleri arasında mekanik, pnömatik ve hidrolik çözümler yer almakla birlikte, son yıllarda elektroaktif polimerler ve yumuşak aktüatörler gibi yenilikçi yapılar da kullanılmaktadır [8]. Sensör birimleri ise pozisyon, kuvvet ve temas bilgilerini sağlayarak, tutucuın çevresiyle olan etkileşimini geri besleme yoluyla kontrol etmesini sağlar. Modern robotik uygulamalarda tutucu sistemleri yalnızca taşıma göreviyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda hassas montaj, kalite kontrol, insan-robot etkileşimi ve medikal müdahale gibi karmaşık görevlerde de etkin şekilde kullanılmaktadır [9].

1.1.1 Robot Tutucuları Tarihçesi

Robot tutucularının tarihsel gelişimi, endüstriyel otomasyonun evrimiyle paralel olarak ilerlemiştir. 1950'li yıllarda geliştirilen ilk endüstriyel robotlardan biri olan Unimate, sabit kuvvet uygulayan mekanik yapısıyla üretim hatlarında görev almıştır [3]. Bu dönemdeki tutucular basit ve rijit yapılarda olup, genellikle düşük esneklik ve sınırlı kontrol kabiliyetine sahiptir.

1970'li yıllarda SCARA ve Delta robotlarının ortaya çıkışı; tutucu tasarımlarında hız, hassasiyet ve çok yönlülük ihtiyacını artırmıştır. Paralel kinematik yapıya sahip Delta robotları özellikle yüksek hız ve tekrarlanabilirlik avantajı ile dikkat çekmiştir [3]. 1980'lerden itibaren robotik ellerde kuvvet geri besleme sistemleri yaygınlaşmış, böylece tutucular pozisyon kontrolünün yanında uygulanan kuvveti de hassas şekilde ayarlayabilir hale gelmiştir [10].

1990'lı yıllardan itibaren biyomimetik yaklaşımların benimsenmesiyle birlikte, çok parmaklı robotik eller geliştirilmeye başlanmıştır. Bu tasarımlar insan elinin fonksiyonelliğini taklit ederek daha doğal ve esnek kavrama kabiliyetleri sunmuştur [1]. Son yıllarda ise esnek robotik yaklaşımı ile birlikte elastomerik malzemeler, silikon yüzeyler ve düşük güçlü aktüatörlerin kullanımı sayesinde kırılgan nesnelere zarar vermeden kavrama yapılabilmektedir [4], [11].

Ayrıca bu teknolojik gelişmeler, yalnızca mekanik yapıların değil, sensör teknolojilerinin de evrimini beraberinde getirmiştir. Özellikle esnek silikon

yüzeylere entegre edilen optik kuvvet sensörleri, reflektif ölçüm teknikleriyle birlikte gerçek zamanlı kuvvet geri beslemesini mümkün kılarak, tutucu sistemlerinin hassasiyetini artırmıştır [12].

1.1.2 Robot Tutucuları Kullanımı ve Seçimi

Robot tutucu sistemleri; endüstriyel üretim, lojistik, sağlık, tarım ve hizmet robotları gibi farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır [2],[13]. Endüstriyel ortamlarda, otomatik montaj, parça taşıma, paketleme ve kalite kontrol gibi işlemlerde yaygın şekilde görev alırlar. Tıbbi robotlarda ise cerrahi müdahaleler ve rehabilitasyon süreçlerinde yüksek hassasiyetli tutucu yapıları tercih edilir [48].

Tutucu seçimi yapılırken, tutulacak nesnenin boyutu, şekli, malzeme yapısı ve çevresel çalışma koşulları gibi faktörler dikkate alınmalıdır [14]. Bunun yanı sıra, sistemin enerji verimliliği, taşıma kapasitesi, üretim çevrim süresi ve maliyet etkinliği gibi mühendislik kriterleri de seçim sürecini belirleyen önemli parametrelerdir [15].

Esnek tutucu teknolojileri, özellikle düzensiz, değişken veya hassas yapılı nesnelerle çalışılması gereken uygulamalarda önemli avantajlar sunar. Örneğin Elastomerik veya silikon esaslı tutucular, çeşitli geometrilere uyum sağlayarak zarar vermeden kavrama gerçekleştirebilir. Adaptif tutucu sistemleri ise, ürün çeşitliliğinin yüksek olduğu üretim ortamlarında esneklik sağlar ve sistem verimliliğini artırır [16].

Bu sistemlerde, deformasyona dayalı optik kuvvet sensörlerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle fotodiyotlar ile ışık kaynakları kombinasyonları kullanılarak geliştirilen optik sensörler, silikon yüzeyin deformasyonuna bttağlı olarak kuvveti dolaylı ama hassas biçimde algılar [17], [18]. Elektromanyetik girişime karşı dayanıklı olmaları ve yüksek çözünürlük sağlamaları nedeniyle endüstriyel ortamlarda güvenle kullanılmaktadırlar [19].

Yeni nesil esnek tutucu sistemlerinde, optik sensörlerle entegre edilen kızılötesi ışık yansıma prensibi, gerçek zamanlı kuvvet geri beslemesi sağlarken, esnek yapılı sistemlerde güvenli ve etkili manipülasyon kabiliyeti sunmaktadır [12].

1.1.3 Robot Tutucu Çeşitleri

Robot tutucu sistemleri, farklı uygulamalara uygun şekilde çeşitli tasarımlarla geliştirilmektedir. Bu tutucu türleri, tutacakları nesnenin fiziksel özelliklerine, çevresel koşullara ve görev gereksinimlerine göre sınıflandırılabilir. Yaygın olarak kullanılan tutucu türleri şunlardır:

1.1.3.1 Vakumlu Tutucular Vakumlu tutucular

Negatif basınç oluşturarak nesneleri **Şekil 1.1**'de gösterildiği gibi yüzeylerinden tutan sistemlerdir. Genellikle düz, hava geçirmez ve sert yüzeylere sahip nesnelerin taşınmasında tercih edilirler. Kompakt yapıları ve hızlı çalışma kapasiteleri sayesinde otomasyon hatlarında yaygın olarak kullanılırlar. Ancak, gözenekli veya pürüzlü yüzeylerde etkinlikleri düşer [5].

Şekil 1. 1 Endüstride yaygın vakumlu vantuz tutucu

1.1.3.2 Manyetik Tutucular

Ferromanyetik malzemelerden yapılmış nesneleri elektromıknatıs veya kalıcı mıknatıs yoluyla tutan sistemlerdir **Şekil 1.2** Özellikle çelik parçaların taşınmasında uygundurlar. Temassız tutuş kabiliyeti sayesinde çizilme riskini azaltırlar ve hızlı taşıma işlemlerine olanak tanırlar. Endüstriyel robotik uygulamalarda, sac metal işleme ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [20].

Şekil 1. 2 Manyetik ilkesiyle çalışan bir tutucu örneği

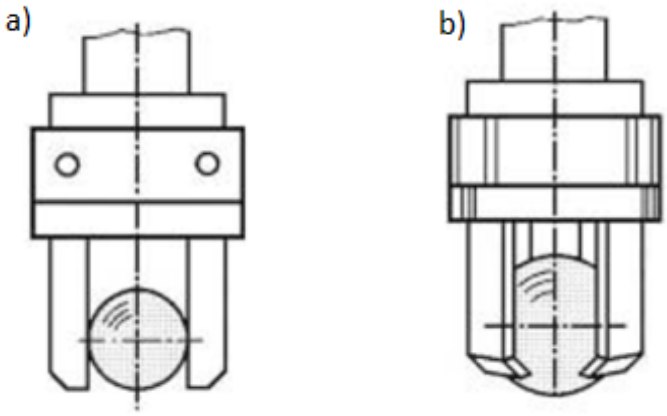
1.1.3.3 Esnek Tutucular

Şekil 1.3'te gösterildiği gibi esnek malzemeler, örneğin silikon ve elastomer, kullanılarak geliştirilen farklı şekil ve sertlikteki nesneleri hassas bir şekilde kavrayabilen sistemlerdir [16]. Özellikle gıda endüstrisi, medikal robotik ve insan-robot etkileşimi gibi hassas uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar [4]. Esnek yapıları sayesinde düzensiz ve kırılgan nesnelere zarar vermeden tutuş sağlarlar. Bu tutucular genellikle pnömatik veya düşük güçlü aktüatörlerle çalışır [11].

Şekil 1. 3 Silikon esaslı esnek tutucu

1.1.3.4 Parmaklı (Fingered) Tutucular

Parmaklı tutucu sistemleri, **Şekil 1.4**'te olduğu gibi birden fazla parmağa sahip olup, insan elinin doğal tutuş fonksiyonlarını taklit edecek şekilde tasarlanmıştır [1]. Her parmak bağımsız olarak veya kinematik bağlantı aracılığıyla hareket edebilir. Çoklu temas noktası oluşturarak özellikle karmaşık geometrilere sahip nesnelerin hassas tutulmasını sağlar. Biyomimetik tasarım anlayışıyla geliştirilen bu sistemler, adaptif kontrol stratejileriyle donatılabilir [10].



Şekil 1. 4 (a) İki parmaklı tutucu (b) üç parmaklı parmak tutucu

1.2 Tutucu Sistemlerinde Kuvvet Kontrolü

Robot tutucu sistemlerinin etkinliği, yalnızca nesneyi kavrayabilme kapasitesine değil, aynı zamanda uygulanan kuvvetin hassas ve kontrollü bir şekilde ayarlanabilmesine bağlıdır. Bu durum, özellikle kırılgan, esnek veya hassas yüzeyli nesnelerle çalışırken kritik önem taşır. Uygulanan kuvvetin fazla olması nesnede hasara, yetersiz olması ise kavrama başarısızlığına yol açabilir [21], [22].

Tutucu sistemlerinde kuvvet kontrolü genellikle iki temel yapı altında incelenir: açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol. Açık çevrim sistemlerde, uygulanan kuvvet önceden belirlenmiş bir değere göre uygulanır ve gerçek zamanlı geri besleme bulunmaz. Bu da sistemin ortam değişikliklerine veya nesne farklılıklarına karşı adaptif davranmasını engeller. Buna karşılık, kapalı çevrim kontrol sistemleri, tutucua entegre edilen kuvvet sensörleri sayesinde uygulanan kuvveti ölçerek, bu bilgiyi geri besleme olarak kontrol algoritmasına iletir. Böylece sistem, referans kuvvet ile gerçek kuvvet arasındaki farkı minimize etmeye çalışır [23], [24].

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde, en yaygın kullanılan yöntemlerden biri klasik PID (Proportional–Integral–Derivative) kontrol algoritmasıdır. Bununla birlikte, özellikle robotik etkileşimli uygulamalarda daha ileri kontrol stratejileri olan empedans ve admittans kontrolleri de yaygın şekilde kullanılmaktadır [14]. Empedans kontrolünde sistem, dış kuvvetlere karşı verilen tepkiyi düzenleyerek tutucuın uyumlu davranmasını sağlar. Admittans kontrolü ise, dış kuvvetlere göre sistemin hareket cevabını belirler.

Esnek tutucu sistemlerinde doğrudan kuvvet ölçümü, yapı elastik olduğu için daha karmaşık hâle gelir. Bu nedenle deformasyona dayalı ölçüm yöntemleri tercih edilir. Optik sensörler, özellikle fotodiyotlar ve farklı ışık kaynakları kullanılarak geliştirilen sistemlerde, ışık yansıma miktarına göre deformasyon tespiti yapar ve dolaylı olarak kuvvet bilgisi elde edilir. Bu yöntem, hem yüksek çözünürlük sağlar hem de elektromanyetik girişimden etkilenmeyen bir yapı sunar [25].

Bu sensörlerin etkin çalışabilmesi için kalibrasyon süreci büyük önem taşır. kalibrasyon işlemleriyle sensörün doğrusal olmayan davranışı modellenir ve kuvvet-deformasyon karakteristiği elde edilir. Bu karakteristik, kontrol algoritmalarının güvenilirliğini ve sistemin genel kararlılığını doğrudan etkiler [26].

Sonuç olarak, kuvvet kontrolü, robot tutucularının hassasiyet, güvenlik ve etkinliğini artırmak için kritik bir bileşen olarak değerlendirilmekte; özellikle esnek yüzeyli sistemlerde optik sensörlerin entegrasyonu ile bu kontrol süreci daha güvenilir ve esnek hale gelmektedir [6].

1.3 Bu Tezin Kapsamı ve Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, esnek yüzeyli, optik kuvvet sensörü entegreli bir robot tutucu sisteminin tasarımını, modellenmesini ve kontrol stratejilerini kapsamlı bir şekilde ele almaktır. Geliştirilen sistem, insan parmağının hassas tutuş kabiliyetini taklit eden silikon bazlı deformasyon yüzeyine ve reflektif prensiple çalışan bir optik sensör mekanizmasına sahiptir.

Çalışmada, hem mekanik tasarım hem de kontrol sistemi birlikte ele alınarak sistemin tamamı deneysel ve simülasyon ortamlarında test edilmiştir. İlk aşamada, silikon malzeme ve fotodiyot– kızıl ötesi LED kombinasyonlarından oluşan sensör prototipi geliştirilmiş, ardından bu yapı bir tutucu mekanizmasına entegre edilmiştir. Simulink ortamında gerçekleştirilen sistem modellemesinde, motor karakteristikleri, deformasyon davranışı ve sensör tepkisi göz önünde bulundurularak, pozisyon ve kuvvet kontrolü yapılmıştır.

Kontrol sistemi kapsamında PID temelli bir yapı kullanılmış ve hedef kuvvete ulaşılana kadar sistemin konumu adım adım güncellenmiştir. Kuvvet geri beslemesi, deformasyona bağlı ışık yansıma değişimlerinin ölçülmesiyle sağlanmış; bu sayede doğrudan mekanik sensöre gerek kalmaksızın kuvvet ölçümü gerçekleştirilmiştir. Elde edilen model, sistem doğrulama ve kalibrasyon testleri ile desteklenmiş ve sistemin güvenilirliği pratik olarak gösterilmiştir.

Bu tez, düşük maliyetli, hassas ve entegre edilebilir bir optik kuvvet sensörünün esnek robotik sistemlerle birleştirilmesini içeren bütüncül bir yaklaşım sunmakta ve özellikle hassas nesnelerle etkileşim gereken uygulamalarda yenilikçi bir çözüm önermektedir.

2
KUVVET SENSÖRÜ SEÇİMİ VE PROTOTİPLEME SÜREÇLERİ

Bu bölümde daha derin litaratür taraması yaparak hedeflenen sistem mekanik ve elektronik bileşenleri belirlemek için gerekli araştırma ve öntestler yapılmıştır.

2.1 Optik Temelli Kuvvet Ölçümünde Literatürde Araştırmalar ve Uygulamalar

Literatürde yer alan optik temelli kuvvet ölçüm sensörleri, bir ışık kaynağı (örneğin LED) ile bir algılayıcı (örneğin fotodiyot) arasındaki etkileşim prensibine dayanmaktadır. Uygulanan kuvvetin etkisiyle sensör gövdesinde meydana gelen mekanik değişimler, sistem içerisindeki ışığın yönü, yoğunluğu veya yayılım karakteristiklerini etkiler. Bu değişimler, alıcı bileşen tarafından tespit edilerek analog ya da dijital sinyal çıktısı elde edilir.

Bu prensiple çalışan optik kuvvet sensörleri, yapısal tasarımlarına göre üç ana gruba ayrılmaktadır:

2.1.1 Yansıtıcı İç Yüzeyli Sensörler

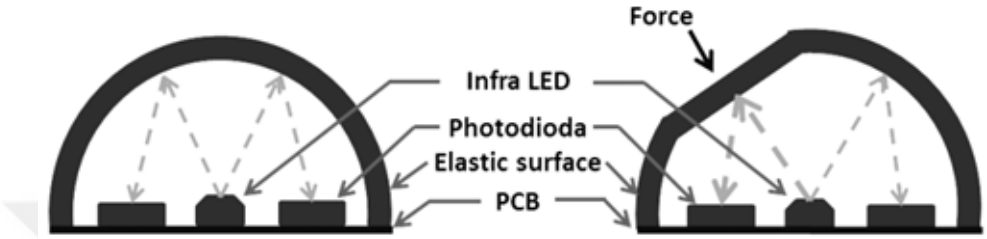
Bu tür sensörlerde ışık, bir emiter (ışık kaynağı) tarafından yayılarak yansıtıcı bir iç yüzeye çarpar ve daha sonra alıcıya yönlendirilir. Kuvvet uygulandıkça yansıma açısı veya mesafesi değişir ve bu değişim sensör çıkışına yansır. Bu sensörler, yansıyan yüzeyin sertliğine göre iki alt gruba ayrılmaktadır.

2.1.1.1 Sert Yüzeyli Sensörler

Kuvvet, iç yüzeyi yansıtıcı olan sert bir yapıya uygulanır. Bu tür sensör yapıları, yüksek mekanik rijitlik gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Optik kaldıraç sistemleri veya mikro ayna yapıları da bu gruba dahildir [27], [28].

2.1.1.2 Esnek Yüzeyli Sensörler

Bu sensörlerde yansıtıcı yüzey, elastomer veya silikon gibi deforme olabilen bir malzemeden oluşur. Yüzeye kuvvet uygulandığında bu malzemenin geometrisi değişir ve iç yüzeydeki ışığın yayılımı bozulur. Bu değişim, fotodiyot tarafından algılanarak kuvvet ölçümü gerçekleştirilir. Esnek robotik uygulamalar ve hassas kavrama sistemlerinde yaygın olarak kullanılır [29]. **Şekil 2.1**'de bu prensibe dayalı sensör yapısı gösterilmiştir [30].



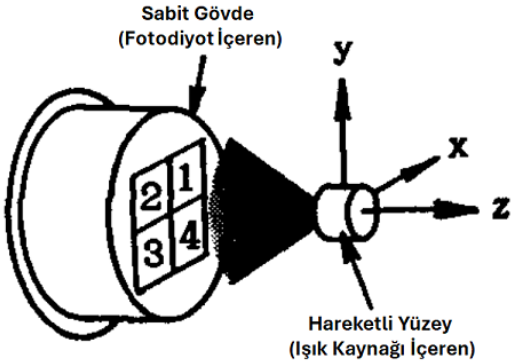
Şekil 2. 1 Esnek yüzeyli optik kuvvet sensörlerin çalışma prensibi

2.1.2 Yansıtıcı Yüzeysiz Optik Kuvvet Sensörleri

Bu sensörlerde ışık doğrudan bir yüzeyden yansımaz. Bunun yerine, yapıya kuvvet uygulandığında yapının mekanik şeklinin değişimesine bağıl ışığın yönünde, fazında veya kırılma şeklinde değişime uğrar.

2.1.2.1 Göndericisi Hareketli, Alıcısı Sabit Optik Kuvvet Sensörleri

Bu tasarıma sahib sensörlerde, kuvvet uygulandığında ışık kaynağı içeren gövde bölümü çeşitli hareket mekanizmaları kullanarak sabit algılayıcı veya algılayıcıların yönüne doğru hareket ederek yaklaşır. **Şekil 2.2**'de gösterilmiş örnekte olduğu gibi, yaklaşan ışığın şiddetine göre sinyal alınır. Bu yöntem çok eksenli kuvvet ölçümü gereken uygulamalarda yaygındır [31].

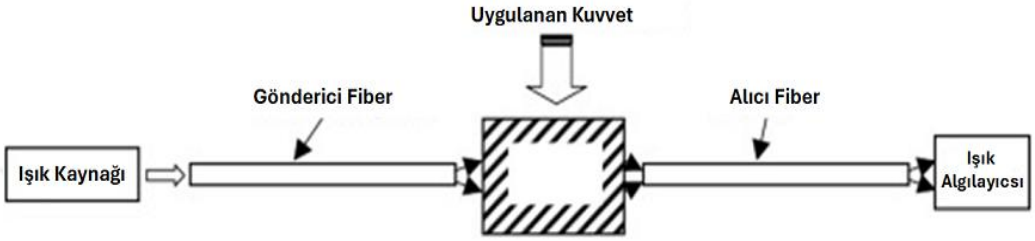


Şekil 2. 2 Sabit optik sensörün çalışma prensibi

2.1.2.2 Alıcısı Sabit, Göndericisi Sabit Optik Kuvvet Sensörleri

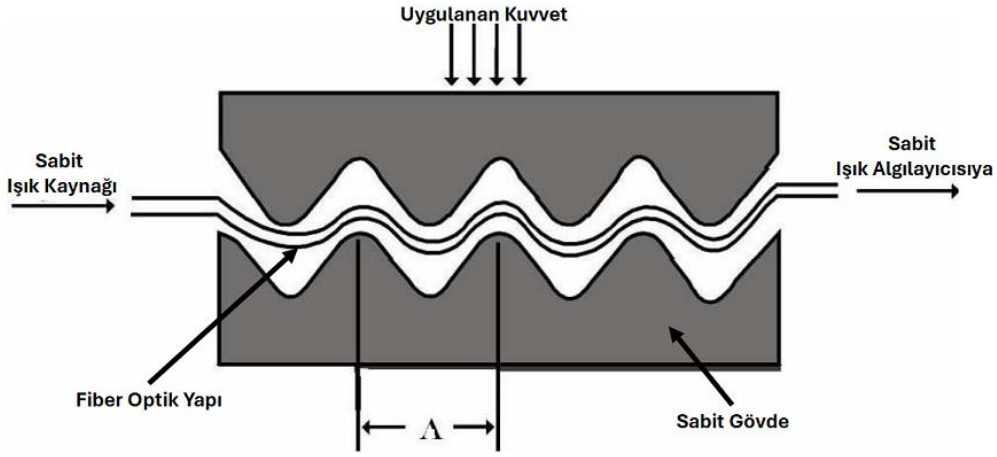
Işık sabit bir kaynaktan sabit bir algılayıcıya doğru çeşitli yöntemlerle ilerler. Bu tip sensörlerin en yaygın örneği fiber-optik sensörleridir. Bu sensörler, algılama noktasına göre ekstrinsik (dışsal) veya intrinsik (içsel) olarak sınıflandırılabilir.

- Dışsal bir fiber optik sensörde, **Şekil 2.3**'te gösterildiği gibi fiber sadece ışığı harici bir optik cihaza taşımak için röl alır; algılama fonksiyonu bu harici cihazda gerçekleşir. Bu sensörlerde fiber yapı sadece ışığı algılama konumuna ulaştırmak için bir araç görevi yapar [32].



Şekil 2. 3 Dışsal fiberoptik kuvvet sensörleri prensibi

- İçsel fiber optik sensörde, **Şekil 2.4**'te işaret edildiği gibi, uygulanan kuvvet, fiber yapının fiziksel şekil değişikliğine sepeb olur[8]. Fiber buna karşılık olarak içindeki ışığın bazı karakteristiklerini değiştirir ve diğer taraftaki algılayıcı bu değişimi elektronik sinyaline çevirir [9].



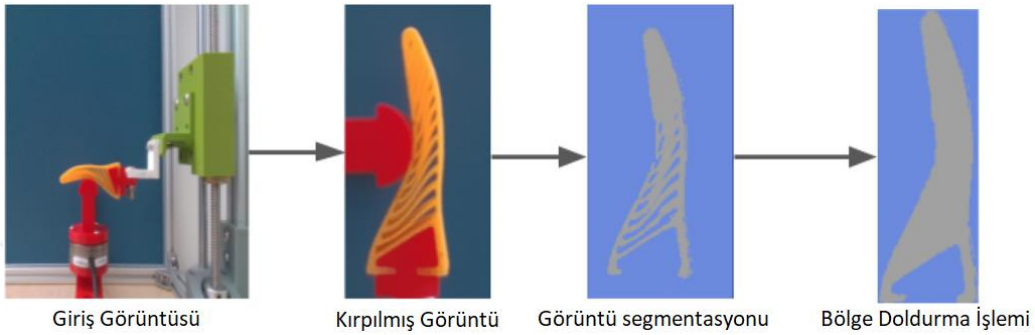
Şekil 2. 4 İntrinsik fiber optik sensör pernsibi

2.1.2.3 Alıcısı Hareketli, Göndericisi Sabit Optik Kuvvet Sensörleri

Bu yapıya sahib sensörler literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmadaki deneylere göre alıcının hareket ettirilmesi sinyal dengesini bozması ve istenmeyen görültüye yol açamsı, optik sensör tasarımlarında tercih edilmeme sebebi olabilirdir.

2.2 Kameralı Optik Kuvvet Sensörleri Sensörler

Şekil 2.5'te bir örneği gösterilen kamera temelli bu sistemlerde ışık ölçülmez. Bunun yerine yüzeyde veye gövdede oluşan deformasyon veya mekaniksel değişim kamera ile kaydedilir ve görüntü işleme algoritmalarıyla analiz edilir. Kuvvetin büyüklüğü, yönü veya temas noktası bu görüntü işleme proseslerinden hesaplanır[33] [27].



Şekil 2. 5 CNN ön işleme adımları

Bu tez çalışmasında, esnek yansıtıcı yüzeyli sensör prensibine dayalı bir sistem geliştirilmesini hedef alınmıştır. Kuvvet uygulandığında silikon yüzeydeki deformasyon, emiter–algılayıcı arasında ışığın davranışı değiştirerek ölçüm verisi elde edilip simülasyon ortamında çeşitli uygulamarda kullanılabilir hale getirilmesi planlanmıştır.

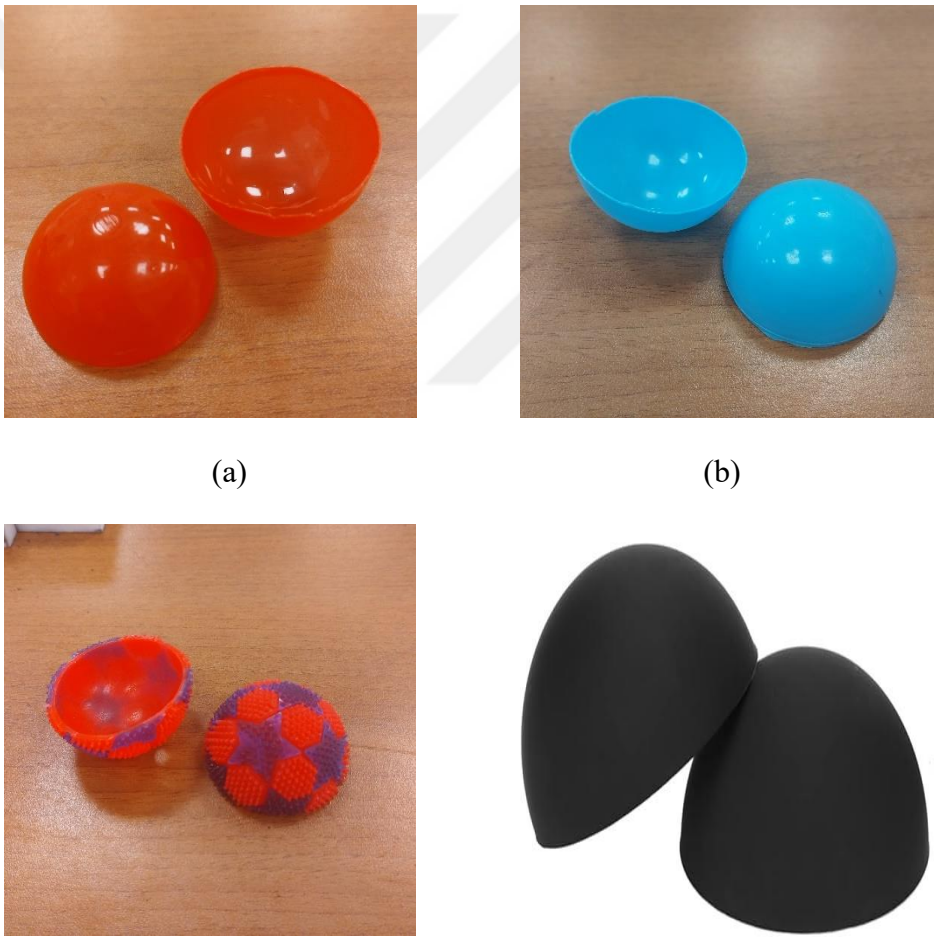
2.3 Sensör Tipi Seçim Yaklaşımı

Bu çalışmada tercih edilen sensör tipi, deformasyon tabanlı esnek yansıtıcı yüzeyli sensör sistemidir. Bu sensör yapısı, özellikle endüstride hassas ve Şekli 2.6'daki gösterildiği örnek gibi, hiçbir şekilde deformasyona uğramaması gereken nesnelerin güvenli şekilde kavranması amacıyla seçilmiştir. Tutma işlemi sırasında, referans kuvvet seviyesine ulaşana kadar nesnede oluşabilecek deformasyon ihtimalini ortadan kaldırmak gerekir. Dolaysıyla, silikon yüzey nesnenin şeklini alır. Böylece kavrama kuvveti nesneye zarar vermeden, kontrollü şekilde referans değerine ulaşana kadar uygulanabilir. Ayrıca sistemde kompakt gövde, düşük maliyet, elektromanyetik görültüden koruma ve analog sinyal üretimine uygunluğu gibi avantajlar sağlanmaya çalışıp endüstri ve tıbbi uygulamalarında kullanma potansiyelinin elde edilmesi visyon belirlenmiştir.

Şekil 2. 6 Esnek oyun hamuru ürün tasarımı

2.4 Esnek Yüzeyli Optik Kuvvet Sensörü Öntasarımı ve Ön deneyleri Mekanik

Seçilen çalışma prensibine dayanarak, malzeme sertliği, rengi, parlaklığı, ve hacmi gibi faktörler göze alınarak araştırma ve test işlemine planlanmıştır. Litaratürde bulunan araştırma ve uygulamalardan faydalanarak tasarım öncesi deneme ve fonksiyon test etme süreci başlatılmıştır. İnsan parmağı şekline yakın ve fiziken nesneyi tutarken deforme davranışı hemen hemen aynı olduğu için Kuppe şeklindeki yumuşa yüzeyli tip sensörleri seçilmiştir ve o yöne çalışma kapsamı daraltılmıştır. **Şekil 2.7**'te gösterilen ilk deneylerde basit küre şeklinde piyasada bulunan silikon ve esnek plastik ürünleri seçilmiştir ve yarı küreye kesilmiştir.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 2. 7 Ön testlerde kullanılan yarı küreler

2.5 Elektronik ve Simülasyon Araştırma ve Testleri

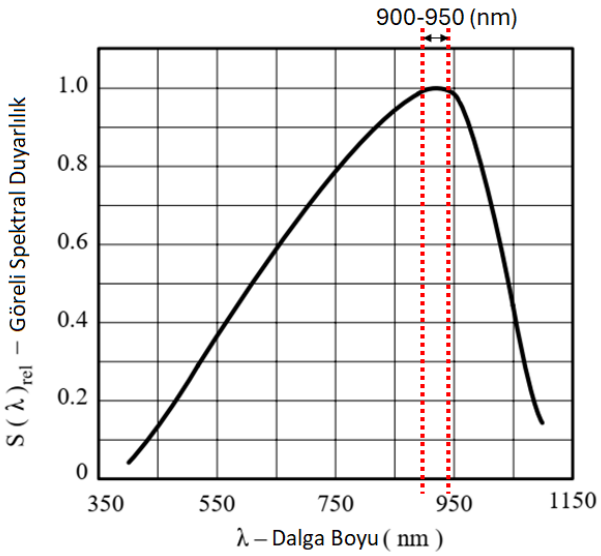
Bu çalışmada kullanılacak optik kuvvet sensörlerinin fotodiyot algılayıcıları, literatürde en yaygın tercih edilen örnekler arasından seçilmiştir [34], [35]. Bu sensörlerin her biri için spektral duyarlılık karakteristikleri incelenmiş ve uygun dalga boyuna sahip LED'lerin seçimi yapılmıştır.

2.5.1 Fotodiyotlara Uygun Işık Kaynağı (IR LED) Seçimi

Bu çalışmada kullanılan optik kuvvet algılayıcı sistemin temelini, fotodiyotların ışığa verdiği elektriksel tepkilerin analizi oluşturmaktadır. Bu kapsamda, farklı fotodiyot yapılarına sahip üç farklı algılayıcı incelenmiştir: BPW34, TI OPT101, ve Adafruit VEML7700. Her bir sensörün spektral duyarlılık eğrileri göz önünde bulundurularak, sistemin çalışacağı dalga boyuna en uygun kızılötesi (IR) LED'in seçilmesi amaçlanmıştır.

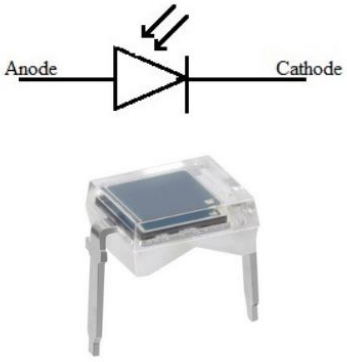
2.5.1.1 BPW34 Fotodiyotu

BPW34 fotodiyotu yüksek hassasiyetli silikon PIN yapısına sahip olup, özellikle 600–1050 nm aralığında ışığa duyarlıdır. Duyarlılığının tepe noktası yaklaşık 950 nm civarındadır. Bu durum, bu fotodiyot için ideal ışık kaynağının 900–950 nm dalga boyuna sahip bir IR LED olması gerektiğini göstermektedir. **Şekil 2.8**'de görüldüğü üzere, fotodiyot bu aralıkta maksimum göreli spektral duyarlılığa sahiptir [36]



Şekil 2. 8 BPW34 fotodiyot spektral duyarlılık grafiği

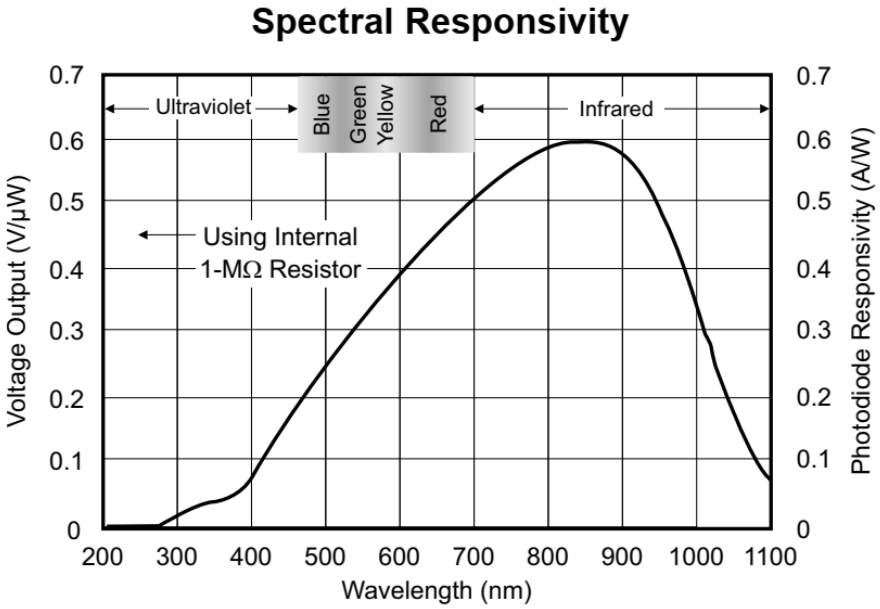
Ayrıca BPW34'ün küçük yapısı ve uygun maliyeti, yüksek çözünürlük isteyen uygulamalarda tercih edilmesine katkı sağlar. **Şekil 2.9**'da fotodiyotun fiziksel yapısı ve kutuplaması görülmektedir [37]



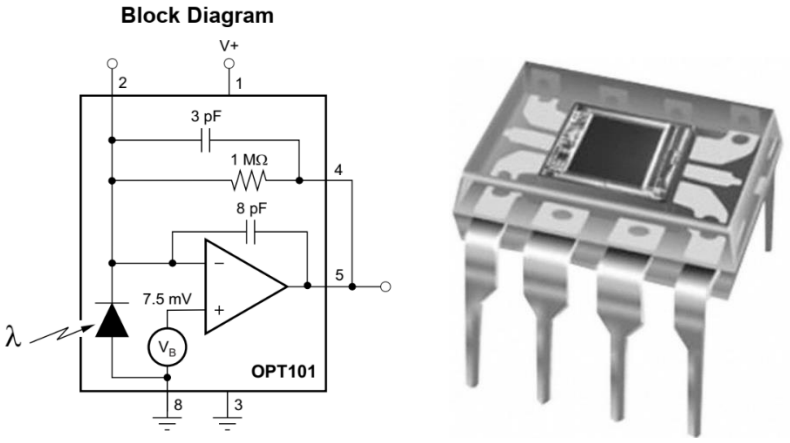
Şekil 2. 9 BPW34 fotodiyotunun iç yapısı

2.5.1.2 TI OPT101

Şekil 2.10'de görülen TI firmasına ait OPT101, entegre fotodiyot ve transimpedans yükselteç içeren bir sensördür. Bu yapı, harici yükselteç ihtiyacını ortadan kaldırarak uygulamada sadelik sağlar. Spektral duyarlılığı 300–1100 nm aralığındadır ve maksimum duyarlılığı yaklaşık 850 nm civarındadır.[37] Şekil 2.10'da görülen spektral tepki eğrisi, IR bölgede de iyi performans sunduğunu göstermektedir [38].



Şekil 2. 10 TI OPT101 sensörünün spektral duyarlılık eğrisi



Şekil 2. 11 TI OPT101'in fiziksel şekli ve iç yapı şeması

Bu sensör, hem analog çıkış vermesi hem de geniş besleme voltajı aralığı (2.7–36V) ile özellikle taşınabilir sistemlerde avantaj sağlar. Ancak, boyut olarak BPW34'e göre daha büyüktür.

2.5.1.3 Adafruit VEML7700

VEML7700, entegre dijital çıkışlı bir lux sensörüdür ve mikrodenetleyicilerle I2C üzerinden kolayca haberleşebilir. Yakın IR bölgesinde çalıştığı bilinmektedir . Ancak diğer fotodiyotlara kıyasla luks değeri verdiği için doğrudan fotodiyot akımı yerine hesaplanmış ışık yoğunluğu değeri sağlar. Bu, sistemin doğrudan analog ölçüm ihtiyacı varsa dezavantaj olabilir [39].

2.5.2 Emitter (LED) Seçimi

Yukarıda açıklanan üç sensörün spektral karakteristikleri dikkate alındığında, **900–950 nm** aralığında yayılan IR LED'ler tüm fotodiyotlarla uyumlu çalışabilecek optimum ışık kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Özellikle BPW34 için bu aralık, duyarlılığın maksimum olduğu bölgeyi temsil etmektedir. OPT101 ise 850–900 nm arasında en iyi yanıtı verirken, VEML7700 de bu aralıkta verimli çalışabilmektedir.

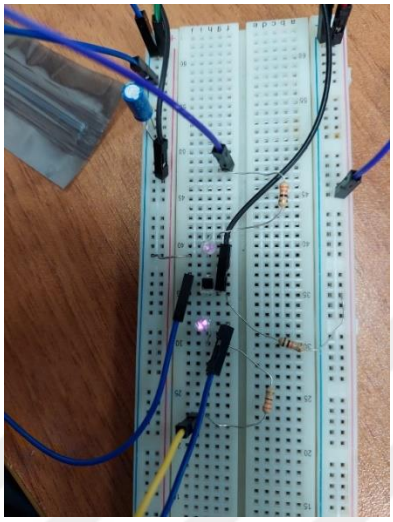
2.6 Deneysel Kurulumlar ve Karşılaştırmalı Test Ortamları

2.6.1 Deney Setleri

Bu çalışmada, farklı yapı ve çıkış türlerine sahip üç farklı optik sensörün (BPW34, TI OPT101, Adafruit VEML7700) performansı, deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Her bir sensör için ayrı bir breadboard düzeni hazırlanmış ve sensörün çalışmasını sağlayacak şekilde IR LED, dirençler ve bağlantı kablolarıyla donatılmıştır. Ayrıca

sistemlerde kullanılan LED'lerin dalga boyu, sensörlerin spektral duyarlılığına uygun şekilde seçilmiştir.

BPW34 fotodiyotunun test düzeneği **Şekil 2.12**'te gösterilmektedir. Burada fotodiyot, IR LED ile karşı karşıya konumlandırılmış, çıkışı harici yükselteçle ölçülmüş ve farklı kuvvet uygulamalarında yanıtı değerlendirilmiştir.



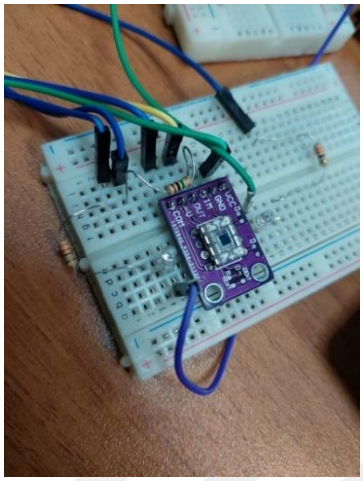
Şekil 2. 12 BPW34 Sensörünün breadboard üzerindeki deneysel bağlantısı

Adafruit VEML7700 sensörü entegre bir dijital ışık algılayıcısı olup I2C üzerinden Arduino ile haberleştirilmiştir. **Şekil 2.13**'te görüldüğü üzere, sensör modülü hazır devre kartı üzerinde yer almakta ve sistemin ışık değişimlerine karşı verdiği lux bazlı yanıt değerlendirilmiştir. LED modül sabit gerilim ile sürülmüş ve ışık şiddeti, deformasyonla değişen optik yansıma düzeyiyle ölçülmüştür.

Şekil 2. 13 Adafruit VEML7700 sensörüyle kurulan ölçüm düzeneği

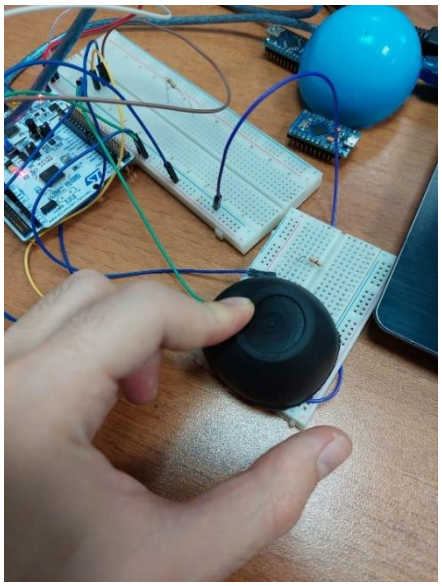
TI OPT101 ise entegre fotodiyot ve yükselteç yapısıyla test edilmiştir. Kurulan düzenek **Şekil 2.14**'te yer almakta olup, çıkış doğrudan analog gerilim şeklinde

alınmıştır. Sensör üzerine farklı deformasyon seviyeleriyle yansıtılan IR ışığın etkisi gözlemlenmiştir. Bu sayede doğrudan analog çıkış karakteristiği ile duyarlılığı karşılaştırmalı olarak test edilmiştir.



Şekil 2. 14 TI OPT101 sensörünün test düzeneği

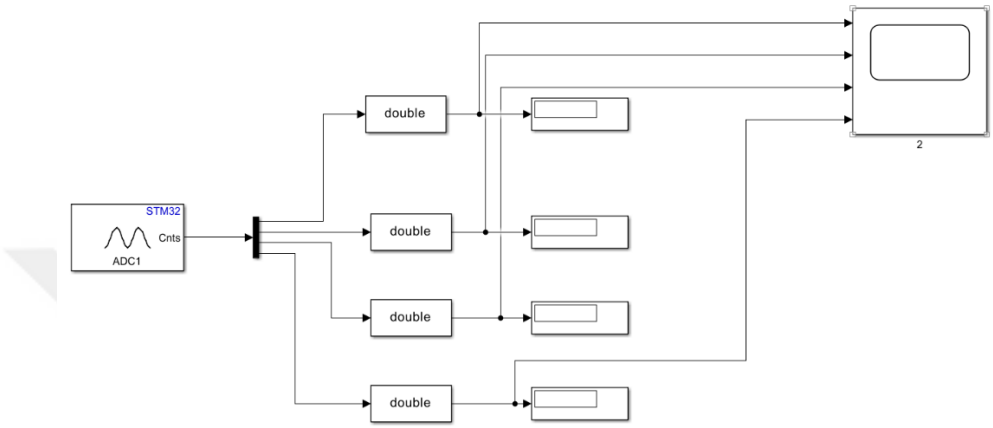
Son olarak, tüm bu sensörler, silikon deformasyon yüzeyiyle bütünleşik sistem üzerine entegre edilerek **Şekil 2.15**'teki gibi son uygulama senaryosu test edilmiştir. Bu senaryoda parmak basıncıyla oluşan kuvvet, deformasyon üzerinden ışık şiddetini değiştirmekte ve her sensörün bunu ne derece algılayabildiği karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.



Şekil 2. 15 Sensörlerin deformasyon yüzeyiyle test düzeneği

2.6.2 Deneysel test ortamı ve gerçekleştirimi

Bu çalışmada sensörlerden alınan analog verilerin okunması ve analiz edilmesi amacıyla STM32F410RB geliştirme kartı kullanılmıştır. STM32 kartı, doğrudan Simulink ortamına entegre edilerek programlanmış ve sensörlerden gelen sinyallerin okunması, izlenmesi ve değerlendirilmesi sağlanmıştır. **Şekil 2.16**'te Simulink ortamında oluşturulan model gösterilmektedir.



Şekil 2. 16 Simulink tabanlı STM32F410RB çoklu analog veri okuma modeli

Modelde, kartın ADC1 (Analog to Digital Converter) kanalı üzerinden analog sinyaller alınmakta ve çoklama bloğu yardımıyla dört ayrı kanala ayrılmaktadır. Her kanal üzerindeki veriler önce double veri tipine dönüştürülmekte, ardından hem dijital ekran bloklarına hem de ortak bir Scope (osiloskop) bloğuna yönlendirilerek zamana bağlı olarak gözlemlenmektedir. Bu yapı sayesinde sensör çıkışları anlık olarak izlenebilmekte ve karşılaştırmalı analiz yapılabilmektedir.

Bu sistemle aşağıdaki üç farklı sensörün çıkışları test edilmiştir.

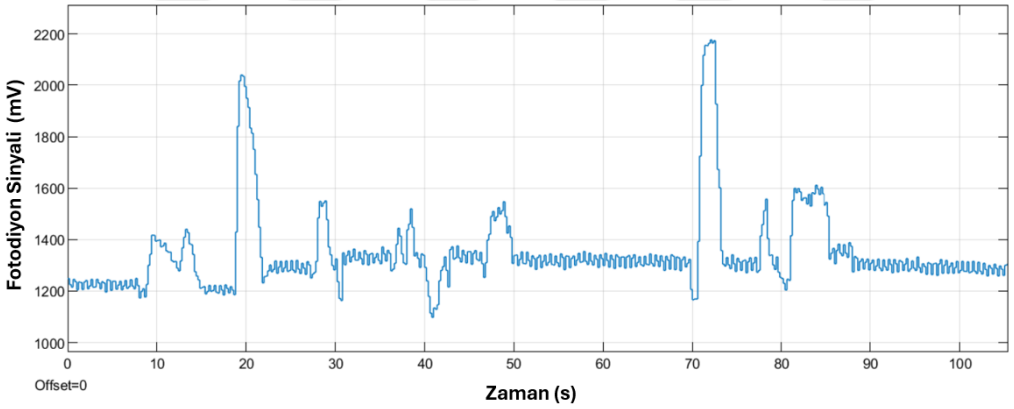
- BPW34 fotodiyotu (analog çıkış, harici yükselteç ile),
- TI OPT101 entegre yükselteçli fotodiyot,
- Adafruit VEML7700 I2C haberleşmeli dijital ışık sensörü.

2.6.3 Deneysel test sonuçları

Sensör sisteminin farklı yüzey özellikleriyle olan etkileşimini değerlendirmek amacıyla, ışık yansıtma karakteristiği birbirinden farklı olan iki yarı küre yüzey ile testler gerçekleştirilmiştir: siyah yüzey ve mavi yüzey. Bu iki malzeme, sistemin hem düşük hem de orta-yüksek yansıtıcılı yüzeylerdeki performansını gözlemleyebilmek amacıyla seçilmiştir.

Mavi yarı küre ile yapılan testin sonucunda elde edilen sensör çıkış grafiği Şekil 2.17'te sunulmaktadır. Bu grafikte, sistemin uygulanan parmak kuvvetleri

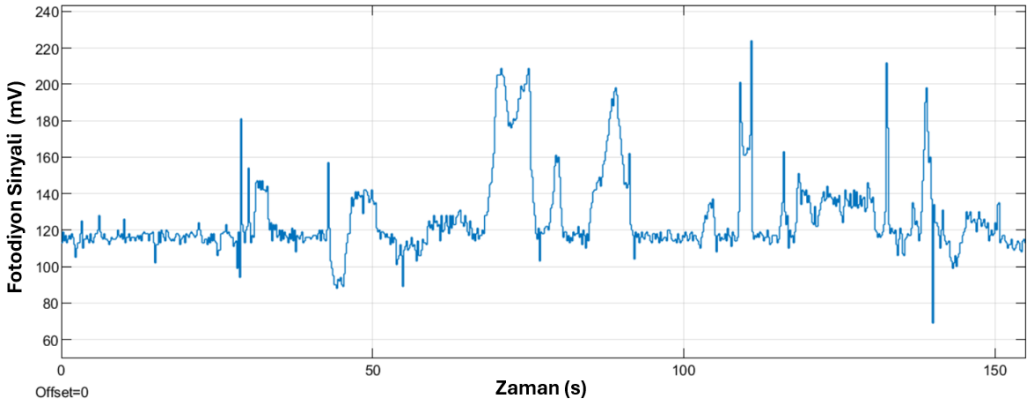
ne karşı yüksek duyarlılık gösterdiği ve özellikle kuvvet uygulama anlarında (örneğin 20. ve 70. saniyeler civarı) sinyalin hızlı ve kararlı şekilde yükseldiği gözlemlenmektedir. Temel sinyal seviyesi yaklaşık 1200–1300 birim civarında olup, kuvvet uygulanmasıyla bu değer 2000'in üzerine çıkmaktadır. Sinyal, kuvvet sona erdiğinde hızlı şekilde eski düzeyine dönmektedir. Bu davranış, sistemin tepkisel doğrusallığını ve deformasyon duyarlılığını başarılı biçimde yansıtmaktadır.



Şekil 2. 17 Mavi yarı küre deneyinde sensör çıkış sinyali

Siyah yarı küre yüzey ile yapılan testte ise elde edilen çıkış verisi Şekil 2.18'de gösterilmektedir. Siyah yüzeyin düşük yansıtma katsayısı nedeniyle ışığın büyük kısmı absorbe edilmiştir. Bu durum, fotodiyot tarafından algılanan ışık miktarının azalmasına ve dolayısıyla sinyal seviyesinin sınırlı kalmasına neden olmuştur. Grafik incelendiğinde, sinyalin ortalama olarak 120–150 birim seviyelerinde seyrettiği, ancak belirli kuvvet uygulamalarında 180–220 birim seviyelerine ulaştığı görülmektedir. Sinyalde zaman zaman kısa süreli parazit ve darbe benzeri

yapılar da gözlenmiş, bu da düşük sinyal seviyesinden kaynaklı olası hassasiyet sınırlamalarını göstermiştir.

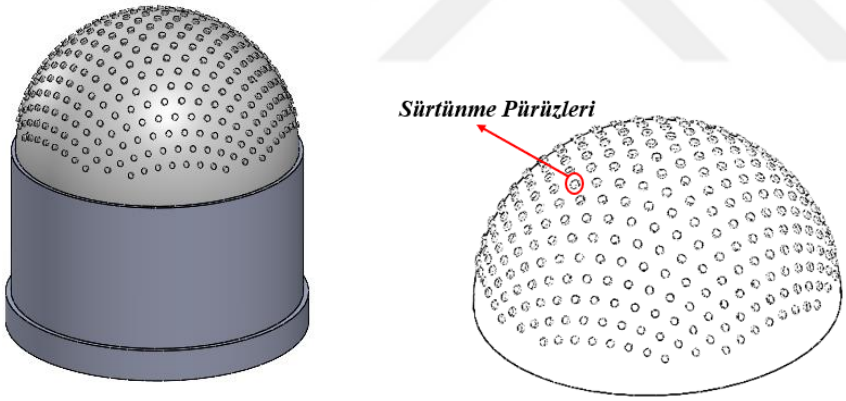


Şekil 2. 18 Siyah yarı küre deneyinde sensör çıkış sinyali

Bu iki yüzey arasındaki karşılaştırma, optik kuvvet algılamaya dayalı sistemin yüzey özelliklerine duyarlılığını açıkça ortaya koymaktadır. Yansıtıcılığı yüksek yüzeylerde sistem daha yüksek genlikli ve kararlı sinyaller üretirken, absorptif yüzeylerde sinyal seviyesi zayıflamakta ancak ölçüm yapılabilir düzeyde kalmaktadır. Bu da sistemin farklı yüzey şartlarında kullanılabilirliğini doğrulamakta ve gerçek uygulamalarda malzeme seçiminin etkisini göstermektedir.

3
OPTİK KUVVET SENSÖRÜ MEKANİK TASARIMI

Bu bölümde, sensörün mekanik tasarımında, silikon yüzeyin üzerinde yer alan düzenli pürüzler, literatürdeki diğer çalışmalarda optik ölçüm amacıyla değil [33]; tamamen mekanik tutuş güvenliğini artırmak amacıyla tasarlanmıştır. Bu yapı, özellikle insan parmak izi gibi yumuşak ve kaygın yüzeyli nesnelerle temas halinde, yüzeydeki mikro pürüzlerin oluşturduğu sürtünme sayesinde tutuş kararlılığını artırmıştır. Mikro düzeyde temas alanını genişleterek sürtünme katsayısını yükseltmekte ve böylece nesnelerin sensör yüzeyinden kayarak ayrılma riski azaltılmıştır. Şekil 3.1'de gösterilen nihai sensör yapısı, benzer çalışmalarda sıklıkla karşılaşılan düz ve pürüzsüz silikon yüzeylerin aksine, kayma direnci sağlayan yüzey dokusu ile farklılaşmaktadır.



Şekil 3. 1 Sensör tasarımı ve pürüzlü silikon yüzey yapısı

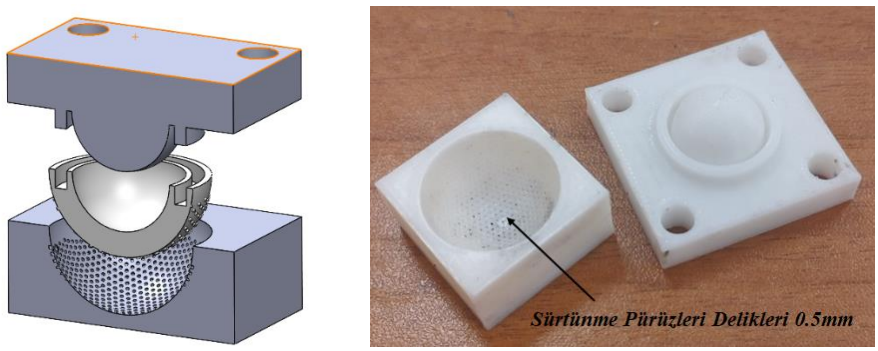
3.1 Esnek Material Seçimi

Sensörün esnek yüzeyi üretiminde tercih edilen malzeme, RTV2 tipi ve 10 Shore A sertliğinde silikon bazlı döküm elastomerdir. RTV'nin açılımı (oda sıcaklığında vulkanizasyon) silikonlardır. iki bileşenli yapıları sayesinde oda sıcaklığında kolaylıkla sertleşebilir ve düşük viskoziteleri sayesinde kalıp içerisindeki detayları yüksek hassasiyetle kopyalayabilir [53]. Bu özellikleri ile prototip üretimi ve hassas yüzeyli sensör yapıları için son derece uygundurlar. 10 Shore A sertliğe sahip

silikonun seçilmesinin temel sebebi, yüzeyin yüksek deformasyon kabiliyeti ile düşük kuvvetlere karşı duyarlılığını artırmaktır. Bu derece yumuşak bir silikon, üzerinde birkaç gramlık kütle uygulandığında yüzeyde belirgin bir şekil değişikliğine neden olur; böylece optik sensör sistemiyle entegre çalışırken küçük temasların dahi algılanmasını sağlar. Ayrıca bu malzeme, kırılgan ya da hassas nesnelerin (cam, plastik vb.) tutuşu sırasında ani kuvvet artımı olursa da zarar görmesini önler, yüzeye güvenli bir temas sunar. RTV2 silikon aynı zamanda biyouyumlu ve çevresel etkilere karşı dayanıklı olması nedeniyle uzun süreli kullanım için de uygundur. Bu malzemenin özellikleri, sensör sisteminin hem güvenilir hem de tekrarlanabilir ölçüm performansı sunmasında kritik rol oynar.

3.2 Esnek Material Seçimi ve Üretimi

Silikon yüzeyin kalıplama süreci, özel olarak tasarlanmış iki parçalı bir sistemle gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2). Üst kısımı pürüzlü, alt kısım ise üst kısmının pürüzlerine karşılıklı delikli formda üretilmiştir. Kalıbın delikli parçasındaki 0.5 mm çapındaki delikler, silikon yüzey üzerinde pürüzlü bir yapı oluşturmak amacıyla tasarlanmıştır. Bu delikler sayesinde döküm sırasında silikonun mikro yapılar oluşturması sağlanmıştır, böylece yüzeyde sürtünme artırıcı pürüzler oluştutulmuştur. Bu yapı, sensörün temas ettiği nesneyle daha güçlü bir mekanik tutuş elde etmesini sağlanmıştır. Kalıp sistemiyle, silikonun hassas geometrilerle üretilebilmesi ve her prototipte tekrarlanabilirliği mümkün kılınmıştır.



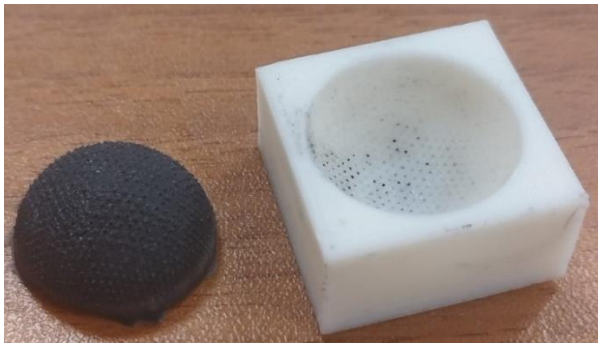
Şekil 3. 2 Silikon kalıplama kalıp parçaları ve pürüz delikleri

Elde edilen silikon yüzey, Şekil 3.3'teki gibi insan parmak izini taklit edecek şekilde dikkatlice üretilmiştir. Bu yapı ile, biyomimetik bir yaklaşım benimsenerek, parmak izinin doğal olarak sağladığı tutunma avantajını sensör yüzeyine aktarmayı amaçlanmıştır.

Pürüzler sayesinde yüzey ile temas eden nesneler arasında daha yüksek sürtünme oluşmakta ve bu da sensörün kaygan nesneleri daha güvenli bir şekilde tutmasına imkân vermektedir. Ayrıca yüzeyin bu yapısı, düşük kuvvetle gerçekleşen teması bile kararlı biçimde iletebilecek mekanik duyarlılığı desteklemektedir.

Şekil 3. 3 Parmak izi benzetimiyle üretilmiş pürüzlü silikon yüzey yapısı

Deneysel çalışmalarda, sensör sisteminin farklı ışık yansıtma ve emilim koşulları altındaki davranışlarını gözlemleyebilmek amacıyla siyah renkli bir silikon yüzey de üretilmiştir **Şekil 3.4** Siyah silikon, ışığı yansıtmak yerine büyük oranda absorbe etme eğilimindedir [kaynağı bul]; bu da optik algılayıcı sistemin sinyal şiddetinde düşüş yaratabilir. Ancak bu durum, düşük yansımalı yüzeylerle çalışan sistemlerin sınırlarını ve optik hassasiyet aralıklarını test etmek açısından önemlidir.



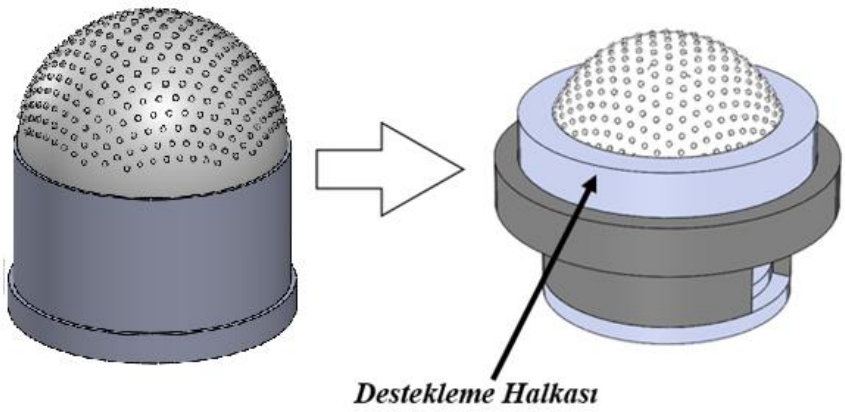
Şekil 3. 4 Siyah pürüzlü silikon yüzey ile ilgili kalıp örneği

Şekil 3.5'teki gösterildiği gibi, sensör sisteminin sert gövdesi, hızlı prototipleme amacıyla üç boyutlu yazdırma yöntemi ile üretilmiştir. Gövde tasarımı, silikon yüzeyin hassas şekilde oturmasına olanak tanırken; aynı zamanda kızıl ötesi LED, fotodiyot matrisi ve kablo bağlantıları gibi elektronik bileşenlerin doğru bir şekilde yerleştirilmesine imkân tanıyacak şekilde optimize edilmiştir. Yazdırılan parçaların

toleransları, silikon yüzeyin deformasyonunu engellemeyecek ancak güvenli biçimde sabitlenmesini sağlayacak şekilde ayarlanmıştır.

Şekil 3. 5 Üç Boyutlu Yazıcı İle Üretilmiş Sensör Gövdesi

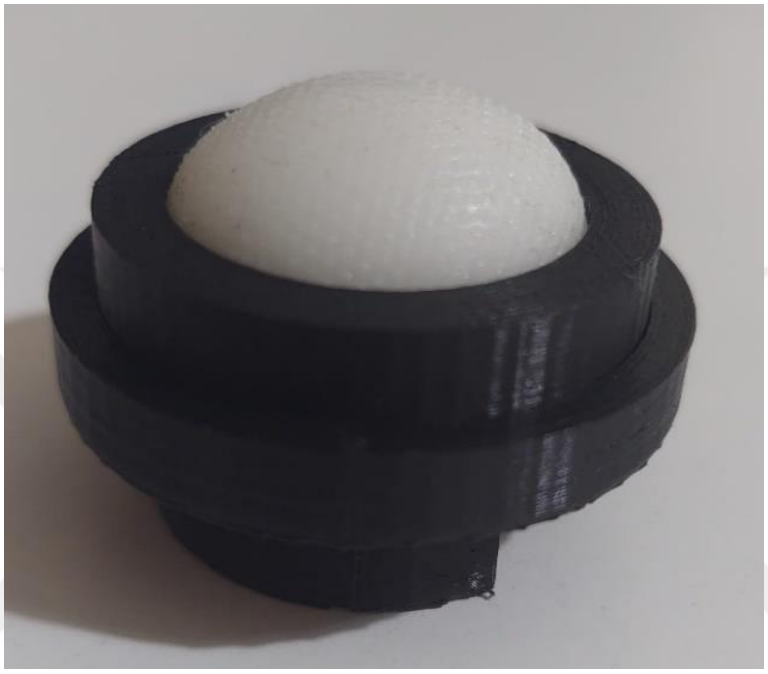
Pürüzlü Silikon Yüzey Örnekleri.Deformasyon sırasında silikon yapının konumu koruyabilmesi amacıyla çevresine sert plastikten imal edilmiş dairesel bir halka entegre edilmiştir (Şekil 3.6). Bu halka, silikonun yerinden çıkmasını veya aşırı gerilmeden dolayı zarar görmesini önleyerek deformasyonun daha geniş aralıklı, dengeli ve kontrollü gerçekleşmesini sağlamıştır. Böylelikle, sensör sisteminin uzun ömürlü, tekrarlanabilir ve mekanik olarak daha dayanıklı biçimde çalışması mümkün hâle gelmiştir.



Şekil 3. 6 Destekleme halkası eklenmeden önce ve sonra sensör tasarımı

Destek halkalı mekanik prototip, sensörün nihai kullanım koşullarına uygun şekilde güçlendirilmiş hâlidir. Şekil 3.7'deki görünen versiyonda silikon yarım küre, dış çevresine yerleştirilen siyah renkli destekleme halkası ile birlikte sabitlenmiştir.

Halka, silikonun deformasyon sırasında gövde dışına dağılmasını sınırlayarak daha kararlı bir çalışma sağlamıştır. Aynı zamanda, silikonun tekrarlı yükleme altında zamanla gevşeyip yerinden çıkmasını ya da kenarlarından yırtılmasını engellemiştir. Bu destekleyici yapı, sensörün uzun vadeli kullanımı için yapısal bütünlük sağlamış ve hassasiyetten ödün vermeden daha fazla deformasyona olanak tanımıştır.



Şekil 3. 7 Destekleme halkası ile sabitlenmiş sensör prototipi

4
OPTIK KUVVET SENSÖRÜ ELEKTRONIK TASARIMI VE PROTOTİPİ

Bu bölümde, fotodiyot ve kızılötesi LED bileşenlerinden oluşan optik kuvvet sensörünün mekanik, elektronik ve yapısal tasarımı ile prototipleme süreci ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Önceki bölümülerde bahsedilmiş ve literatürde yer almış benzer sensör prensiplerinden yola çıkılarak geliştirilen sistemde, deformasyonla değişen ışık iletimi temel alınarak kuvvet ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçüm doğruluğunu ve yüzey ile temas hassasiyetini artırmak amacıyla, sensör uçları yarı küresel yapıda ve elastik silikon malzeme ile kaplanmıştır.

Geliştirilen sensör, robot tutucusnun parmak ucuna entegre edilerek, tutma kuvvetinin doğrudan yüzey deformasyonuna bağlı olarak ölçülmesini sağlamaktadır. Bu amaçla, silikon kalıplama tekniği kullanılarak prototipler üretilmiş, optik yolun güvenilirliği ve mekanik bütünlük göz önünde bulundurularak hassas yerleşim yapılmıştır.

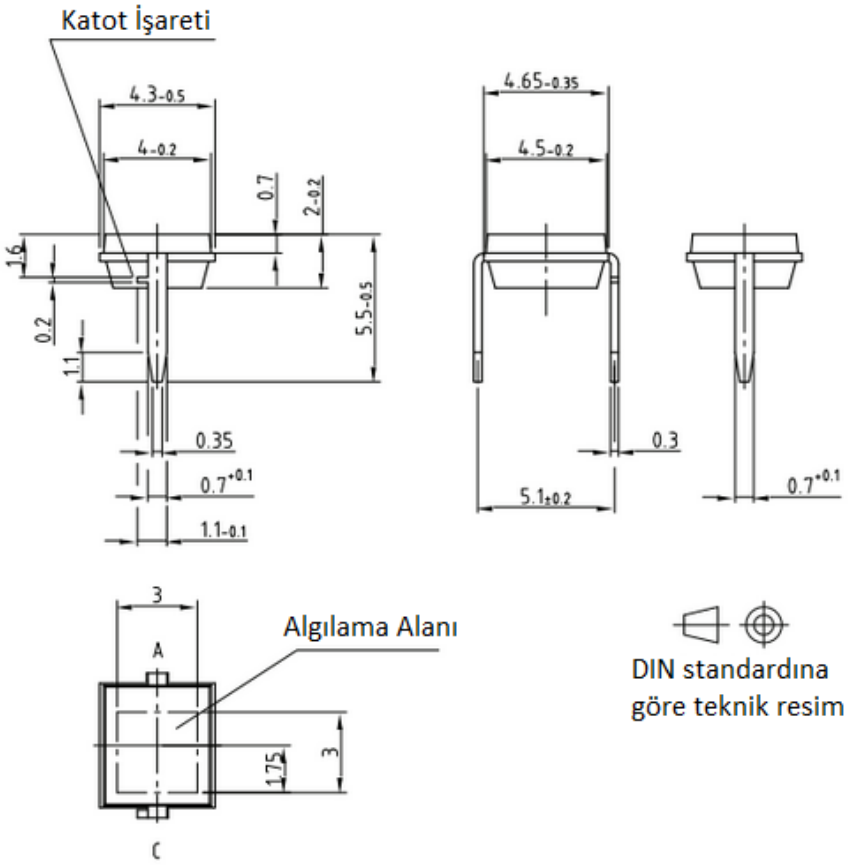
Kalibrasyon işlemi CNC makinesi kullaılmak üzere özel bir set tasarlanmıştır ve kalibrasyon sonuçlarına göre gerekli matmatiksel hespları yapılıp sensörünrobotik simülasyon ortamlarında kullanılmak üzere matematiksel modeli elde edilmiştir.

4.1 Optik Kuvvet Sensörü Devre Bileşenleri

4.1.1 BPW34 Fotodiyotunun Seçim Gerekçesi

Bu çalışmada fotodiyot olarak BPW34 tercih edilmiştir. Bu seçimin başlıca nedenlerinden biri, piyasada kolaylıkla tedarik edilebilmesi ve düşük maliyetli olmasıdır. Ayrıca BPW34, Şekil 4.1'de görüldüğü gibi 4.3×4.6 mm civarında kompakt bir yapıya sahip olması nedeniyle, sınırlı alana sahip sensör yerleşimlerinde önemli avantaj sunmaktadır [36].

Ayrıca BPW34, hızlı tepki süresi (100 ns) ile dinamik kuvvet değişimlerinin izlenmesini mümkün kılar. Düşük karanlık akımı sayesinde gürültü seviyesi düşük tutulabilir ve hassas ölçümler yapılabilir. PIN yapısındaki silikon diyot teknolojisi, yüksek doğruluk ve stabilite sunar. Son olarak, harici op-amp kullanımıyla duyarlılık veya çıkış karakteristiği istenilen şekilde ayarlanabilir, bu da sistemin daha esnek hale getirilmesini sağlar.



Şekil 4. 1 BPW34 Fotodiyot teknik resimi

4.1.2 Kızıl Ötesi LED Konik Açısı Araştırması

Literatürde gerçekleştirilen bir optik kuvvet sensörü optimizasyonu çalışmasında ışık kaynağının konik açısının sensör performansına etkisi incelenmiştir [40]. Bu analizde, farklı konik açıların sensör çıkışı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon ortamında, 60° ve 120° olmak üzere iki farklı konik açı seçilerek, sistemin optik karakteristiği değerlendirilmiştir (Şekil 4.2).

Şekil 4. 2 60° Ve 120° Konik açılı ışık kaynağı geometrisinin simülasyonu

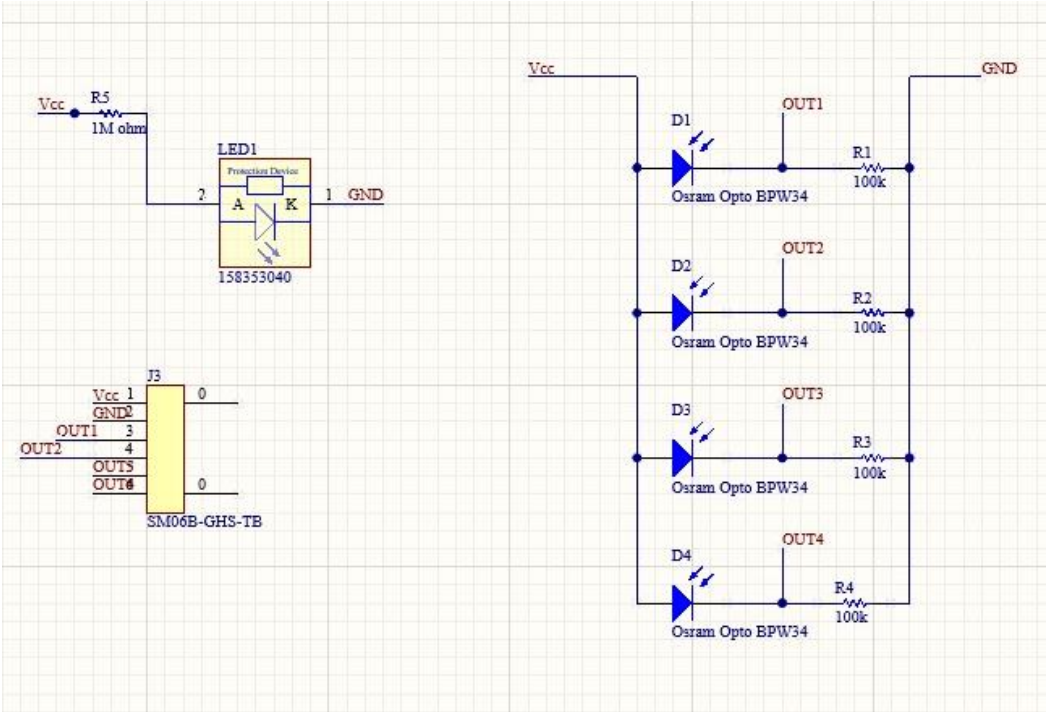
Çalışmadaki simülasyon sonuçları incelendiğinde, 60° olan dar konik açı, ışığın daha dar bir alana odaklanmasına neden olarak sensörün küçük mekanik değişimlerine karşı hassasiyetini artırmakta; buna karşılık 120° olan daha geniş konik açı ışığı daha geniş bir alana dağıtarak ölçüm aralığını genişletmektedir. Bu durum, tasarım aşamasında hassasiyet ve ölçüm kapasitesi arasında faktör önemliliğine göre tercih yapılabilir [40].

Bu ön çalışmada, hasassiyet faktörü daha önemli olduğu için 60° konik açısına sahibkızıl ötesiled ışık kaynağı kullanmaya karar alınmışrtır.

4.2 Sensör Devresi Tasarımı ve PCB Üretimi

4.2.1 Sensör Devresi Şema Tasarımı

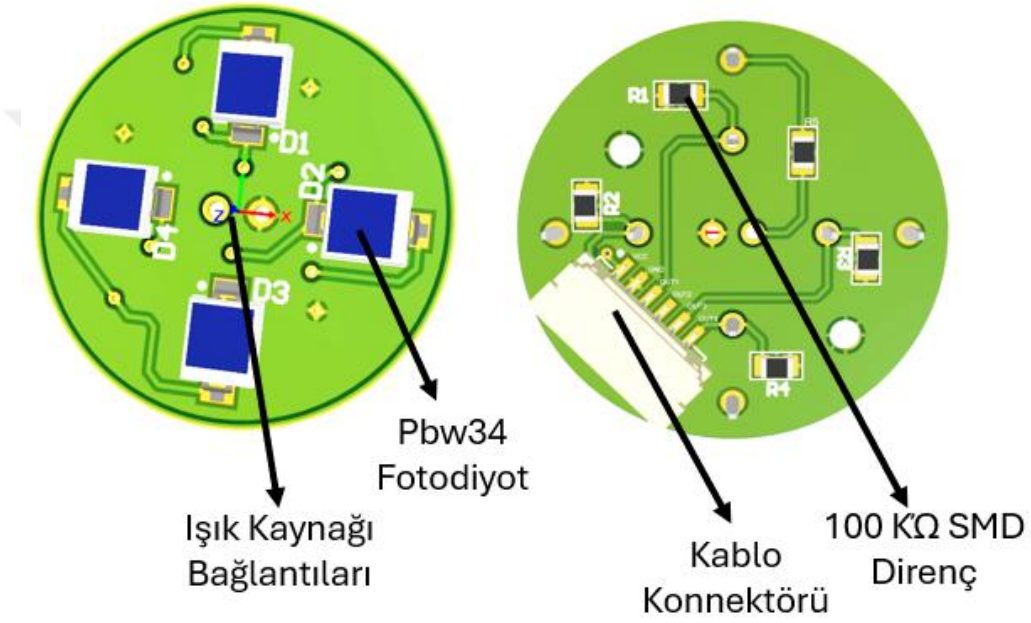
Bu çalışmada geliştirilen optik kuvvet sensör sistemine ait elektronik devre, BPW34 fotodiyotlarının sinyal işleyebilmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 4.3'teki Devre şeması, dört adet BPW34 fotodiyotunun her birine seri bağlanmış 100 kΩ'luk dirençlerle oluşturulan gerilim bölücü yapıdan meydana gelmektedir. Bu yapı sayesinde her bir sensörün analog çıkışı bağımsız olarak elde edilebilmekte ve sistemdeki dört ayrı noktadan kuvvet ölçümü gerçekleştirilebilmektedir. Fotodiyotlar üzerinden alınan çıkış sinyalleri, OUT1–OUT4 adlı pinleri üzerinden mikrodenetleyiciye aktarılmaktadır.



Şekil 4. 3 BPW34 Fotodiyotlara ait sensör devresinin şematiği

4.2.2 Sensör Devresi Şema Tasarımı

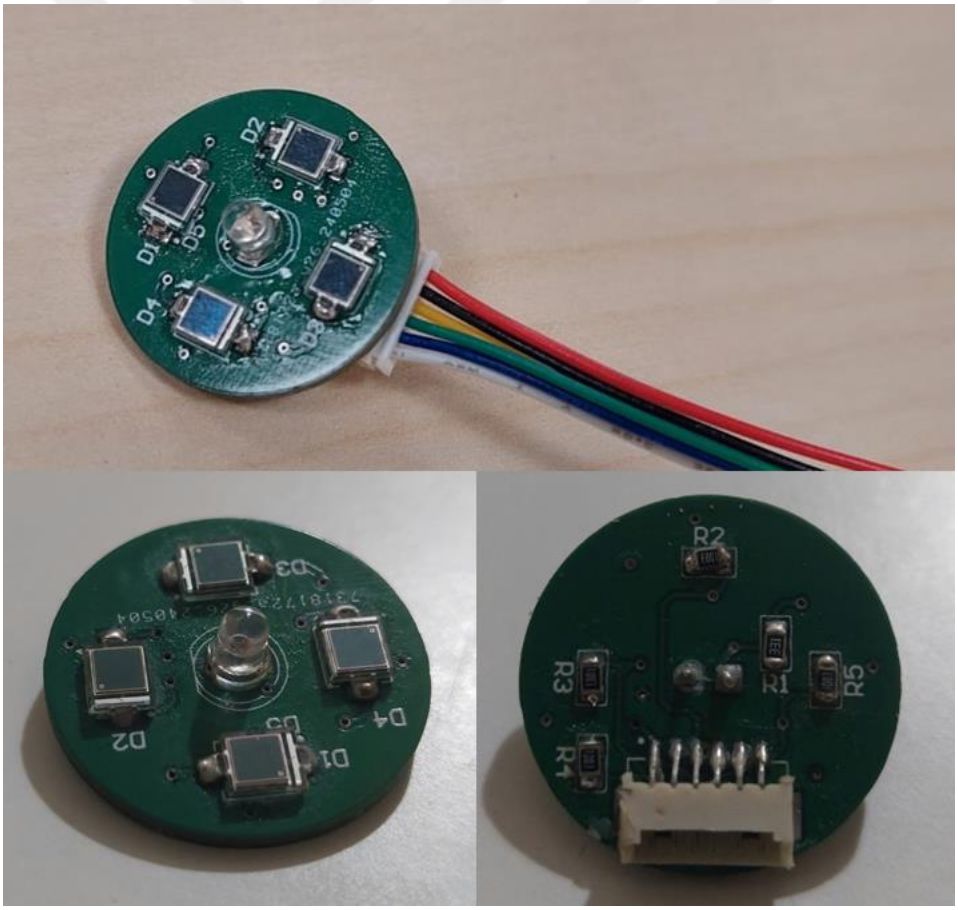
Devrenin fiziksel yerleşimi ve mekanik entegrasyonu göz önünde bulundurularak, kart geometrisi dairesel olarak tasarlanmıştır. Şekil 4.4'te olduğu gibi baskı devrenin üst yüzeyine, merkezden simetrik uzaklıklarda yerleştirilmiştir. Alt yüzeyde ise dirençler ve 6 pinli konnektör çıkışları bulundurulmuştur. Bu yapı, hem montaj kolaylığı hem de sinyal bütünlüğü açısından optimize edilmiştir. Ayrıca, test ve entegrasyon süreçlerinde daha dayanıklı ve gürültüsüz bağlantı sağlamak amacıyla özel 6 pinli kablo konnektörü tercih edilmiştir.



Şekil 4. 4 PCB 3B CAD modeli

4.2.3 Sensör Baskı Devre Prototip Üretimi

Şekil 4.5'teki prototipleme sürecinde üretilen kart, tasarlanan baskı devrenin birebir uygulamaya geçirilmiş halidir. Dört adet BPW34 fotodiyot, merkezde yer alan kızılötesi LED'in çevresine dairesel ve simetrik şekilde yerleştirilmiştir. Bu konumlandırma sayesinde merkezden gelen kızıl ötesi ışığın sensörler üzerindeki etkisi dengelenmiş ve yönsel farklar minimize edilmiştir. Fotodiyotların algılayıcı yüzeyleri yukarı bakacak şekilde lehimlenmiş, alt yüzeyde ise her bir fotodiyot için gerilim bölücü görevini gören yüzeye Montaj SMD dirençler yerleştirilmiştir. Sistemin dış bağlantıları için, dayanıklılığı ve sinyal kararlılığını artırmak amacıyla altı bağlantılı özel bir kablo konnektörü tercih edilmiştir. Bu yapı, testlerde kablo kopması, lehim zayıflığı gibi problemlerin önüne geçmiştir.



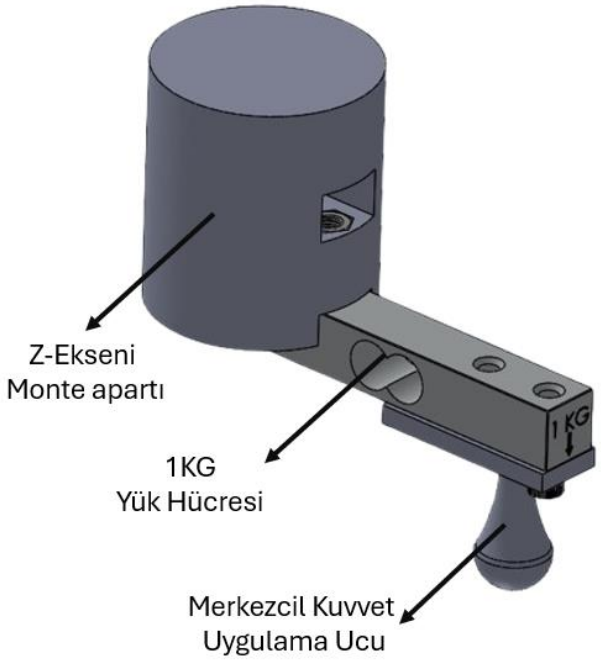
Şekil 4. 5 Gerçek devre kartı: fotodiyot-LED yerleşimi ve alt yüzey bağlantıları

4.3 Kalibrasyon Sistemi Tasarımı ve Uygulama Süreci

4.3.1 Kalibrasyon Seti Tasarım ve Gerçekleştirimi

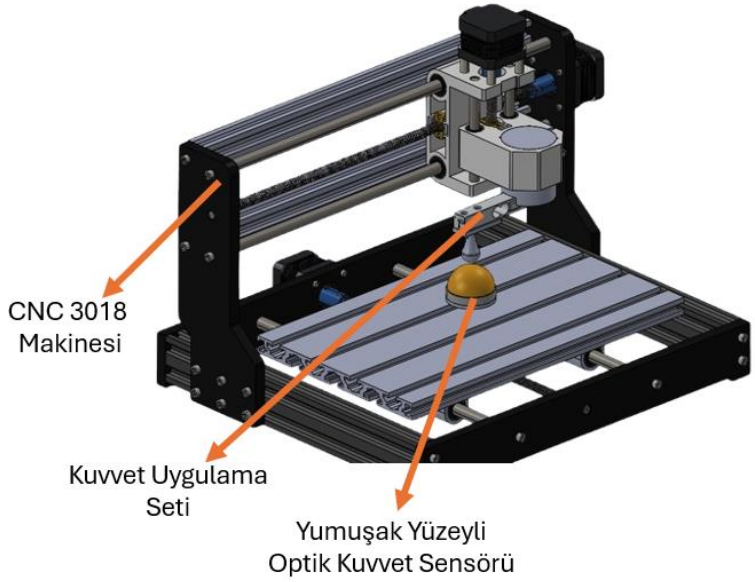
Geliştirilen optik kuvvet sensörünün doğrusal ölçüm tepkisinin elde edilebilmesi amacıyla Şekil 4.6'teki özel bir kalibrasyon sistemi tasarlanmıştır. Kalibrasyon sürecinde, bilinen kuvvet değerleri kontrollü şekilde sensör üzerine uygulanmış ve bu kuvvetlere karşılık gelen optik sensör çıkışları referans olarak kaydedilmiştir. Böylece, sensörün voltaj – kuvvet ilişkisinin karakterizasyonu mümkün hale getirilmiştir.

Kalibrasyon sisteminin temelinde, hassasiyet derecesi bilinen bir tek eksenli yük yer almaktadır. Bu yük hücresi, Şekil 4.7'deki gösterildiği gibi yukarıdan aşağıya kontrollü hareket eden CNC'nin Z ekseni taşıyıcısına sabitlenmiş, ucuna ise sensör yüzeyiyle temas edecek şekilde özel bir uç yerleştirilmiştir. Bu uç, hem tepe noktadan kontrollü kuvvet aktarımı sağlar hem de ölçüm tekrarlanabilirliğini artırır

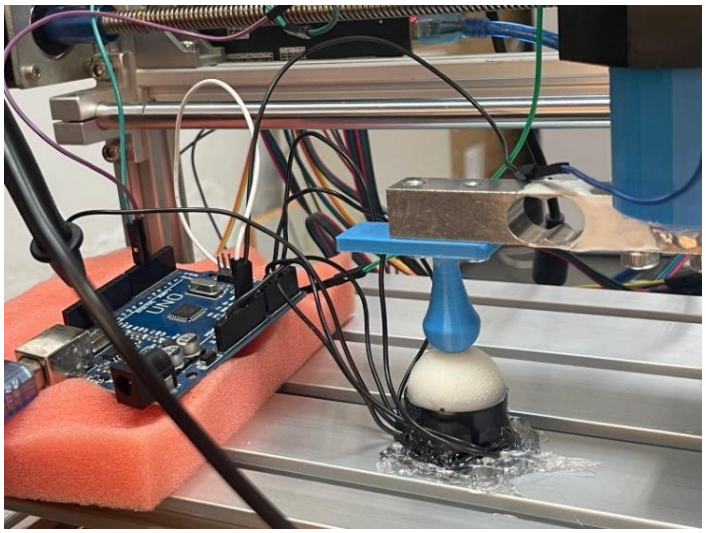


Şekil 4. 6 CNC Z eksenine monte yük hücresi ve dairesel kalibrasyon ucu

Uygulamada, kalibrasyon sırasında CNC sisteminin Z ekseni 0.1 mm'lik adımlarla aşağıya hareket ettirilmiş ve her adımda hem yük hücresinden gelen kuvvet verisi hem de optik sensör çıkışı kaydedilmiştir. Bu sayede deformasyon – kuvvet eğrisi çıkarılmıştır. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi, sistem, Arduino Uno geliştirme kartı üzerinden veri akışı sağlayacak şekilde yapılandırılmış ve test boyunca serial port üzerinden veri kaydı gerçekleştirilmiştir.



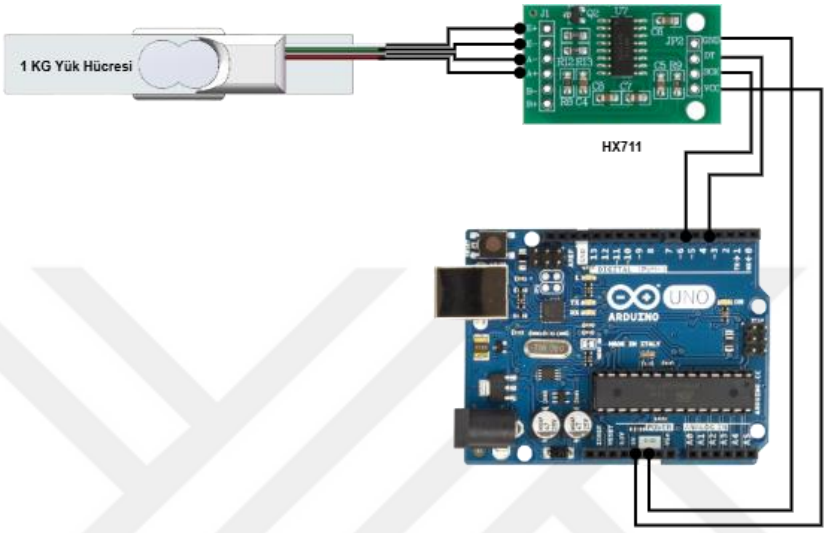
Şekil 4. 7 CNC Destekli kalibrasyon test düzeneği



Şekil 4. 8 CNC destekli kalibrasyon test düzeneği

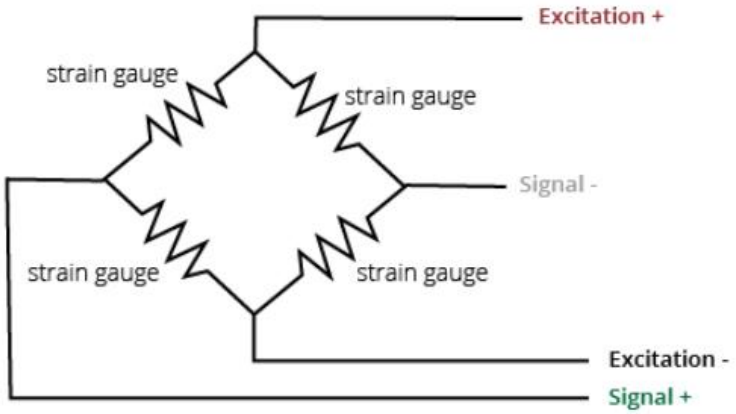
Bu sistem sayesinde sensör prototipinin çıkış doğruluğu test edilmiş, uygulanan kuvvetle çıkış voltajı arasındaki ilişki analitik olarak modellenmiştir. Elde edilen kalibrasyon verileri, optik sensörün deformasyon doğruluk sınırlarını belirlemek açısından kritik öneme sahiptir.

Yük hücresinden elde edilen analog sinyal, doğrudan mikrokontröller sistemine aktarılmaya uygun olmadığı için, sinyalin dijitalleştirilmesi ve yükseltilmesi amacıyla HX711 entegresi kullanılmıştır. Şekil 4.9'deki şemada görünen bu entegre, düşük seviye voltajları yüksek çözünürlükte dijital değerlere dönüştürebilen, özellikle load cell uygulamaları için tasarlanmış bir ADC içerir [53].



Şekil 4. 9 HX711 Modülü ile yük hücresi arduino bağlantı şeması

Yük hücresi, Şekil 4.10'de şeması bulunan dört adet strain gauge'un Wheatstone köprüsü biçiminde yerleştirilmesiyle çalışır. Bu yapı sayesinde, elastik deformasyonlar sonucu direnç değişimleri çok hassas biçimde voltaj farkına dönüştürülür. HX711 modülü, bu farkı yüksek doğrulukla ölçer ve seri haberleşme yoluyla Arduino'ya aktarır.



Şekil 4. 10 Wheatstone köprüsü ile yük hücresi elektriksel modeli

4.3.2 Kalibrasyon Seti Matematiksel Modellemesi

Tasarımı yapılan optik kuvvet sensörünün davranışını karakterize edebilmek amacıyla adım tabanlı bir kalibrasyon düzeneği geliştirilmiştir. Kalibrasyon işlemi, CNC makinesinin Z ekseni üzerinden sensörün deformasyon yüzeyine kontrollü ve artan miktarlarda baskı uygulanması yoluyla gerçekleştirilmiştir. Her bir adımda, sensörün analog voltaj çıkışı ile referans kuvvet (yük hücresi üzerinden) eş zamanlı olarak kaydedilmiştir.

Bu düzende, CNC'nin Z ekseni sabit uzunlukta adımlar hâlinde hareket etmektedir. Her bir adım, Δx büyüklüğünde bir doğrusal yer değiştirme ifade eder. Uygulanan toplam adım sayısı $s \in \{0,1,2,\ldots..N\}$ ile gösterilir ve adım sayısı ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (4.1) formüle gibi tanımlanır:

$$x = s\Delta x \tag{4.1}$$

Uygulanan kuvvet ile deformasyon arasında doğrusal bir ilişki varsayımı yapılmış ve sistem ilk yaklaşımda Hooke yasası ile modellenmiştir:

$$F = kx \tag{4.2}$$

(4.2) denkleminde F yük hücresinden uygulanan kuvvet, k Sensör sisteminin eşdeğer rijitlik katsayısıdır, x ise toplam yer değiştirme (deformasyon).

Yer değiştirme yerine adım sayısı ifadesi yerleştirildiğinde:

$$F(s) = k\Delta xs \Rightarrow F(s) = \alpha s \tag{4.3}$$

(4.3) denkleminde

$$\alpha = k\Delta x \tag{4.5}$$

Olup, bir adım başına düşen kuvveti ifade eden katsayıdır (g/step)

Diğer yandan, sensör tarafından üretilen analog voltaj çıktısı V_s uygulanan kuvvetin yaklaşık doğrusal bir fonksiyonu olarak modellenmiştir:

(4.4) denkleminde, kuvvetin adım sayısı cinsinden tanımıyla birleştirildiğinde sensör çıkışı doğrudan adım sayısına bağlı olarak (4.5) denkleminde gibi yazılabilir:

$$V_s = a\,F_s + b \tag{4.4}$$

$$V_s = a\alpha s + b \Rightarrow V_s = \gamma s + b \tag{4.5}$$

Bu çalışmada $a = 2.0804$ olarak elde edilmiştir, $b = 801.91$ sistemin başlangıç (offset) değeridir. ve $\gamma = a\alpha$, sistemin bir adım başına ürettiği çıkış voltajını temsil eder ($mV/step$).

Bu matematiksel zincir, kalibrasyon verilerinin analizinde regresyon eğrilerinin oluşturulmasına, sensör hassasiyetinin belirlenmesine ve ölçüm doğruluğunun değerlendirilmesine temel teşkil etmektedir.

4.4 Kalibrasyon Sonucu

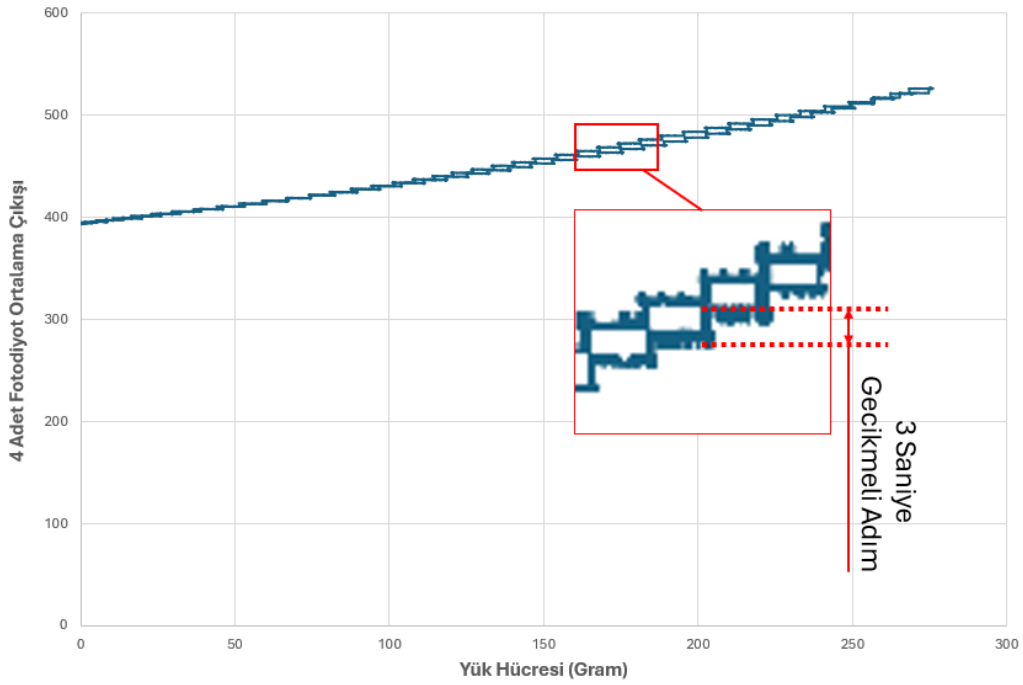
Her bir kalibrasyon denemesinde, CNC makinesine 42 adım aşağı ve ardından 42 adım yukarı yönde hareket edecek şekilde bir çevrim tanımlanmıştır. Bu çevrim, ölçümlerin tekrarlanabilirliğini ve tutarlılığını sağlamak amacıyla üç kez tekrarlanmıştır. Her bir adım arasında, mekanik sistemin durulmasını ve geçici salınımlar ile gürültü etkilerinin ortadan kaldırılmasını sağlamak amacıyla 3 saniyelik bekleme süresi G-code komutları aracılığıyla uygulanmıştır. Bu zaman gecikmesi ve mikrokontrolcünün sürekli veri okuma yapması nedeniyle, **Tablo 4.1'te** gösterildiği gibi tam çevrimde 5588 adet sürekli veri elde edilmiştir. Bu veriler hem fotodiyot ADC çıkışlarının ortalaması hem de yük hücresi ölçümlerini içermekte olup, doğrudan adım-adım ölçüm verisi yerine zamana bağlı sürekli sinyal dizileri şeklinde kaydedilmiştir.

Tablo 4. 1 Üç saniye gecikmeli veri seti kesiti

Adım #	**Fotodiyot ADC ortalama değerleri**	**Yük hücresi çıkışı (gr)**
1	400	1.13
2	400	1.13
-	-	-
-	-	-
-	-	-
2454	546	279.31
-	-	-
-	-	-
-	-	-
5588	409	0.85

Bu işlem sonucunda elde edilen fotodiyot çıkışları ortalaması ile yük hücresi verileri, gelecek analizler için uygun bir yapıya getirilmiştir. Bu yapı sayesinde, sensör tepkisi ile uygulanan kuvvet ilişkilendirilerek kalibrasyon eğrileri oluşturmuştur.

Şekil 4.11'de görüldüğü gibi, bu veri setinin ham biçimi sunulmaktadır; özellikle 3 saniyelik adım gecikmelerinin sistem yanıtına etkisini açık bir şekilde gösterilmektedir. Veri eğrisinde, adım geçişlerinde oluşan geçici kararsızlıkların zaman içinde nasıl oturduğu, artan ve azalan kuvvet adımları boyunca sistemin dinamik davranışıyla birlikte gözlemlenebilmektedir. Kırmızı kutu ile gösterilen detay alanında, her adımın başlangıcındaki sinyal dalgalanmalarının gecikme süresi sonunda dengeye ulaştığı görülmektedir. Böylece sensör kalibrasyon sürecinin güvenilirliği artırmaktadır.



Şekil 4. 11 Gecikmeli 42 kuvvet adımı artışı ve azalışı

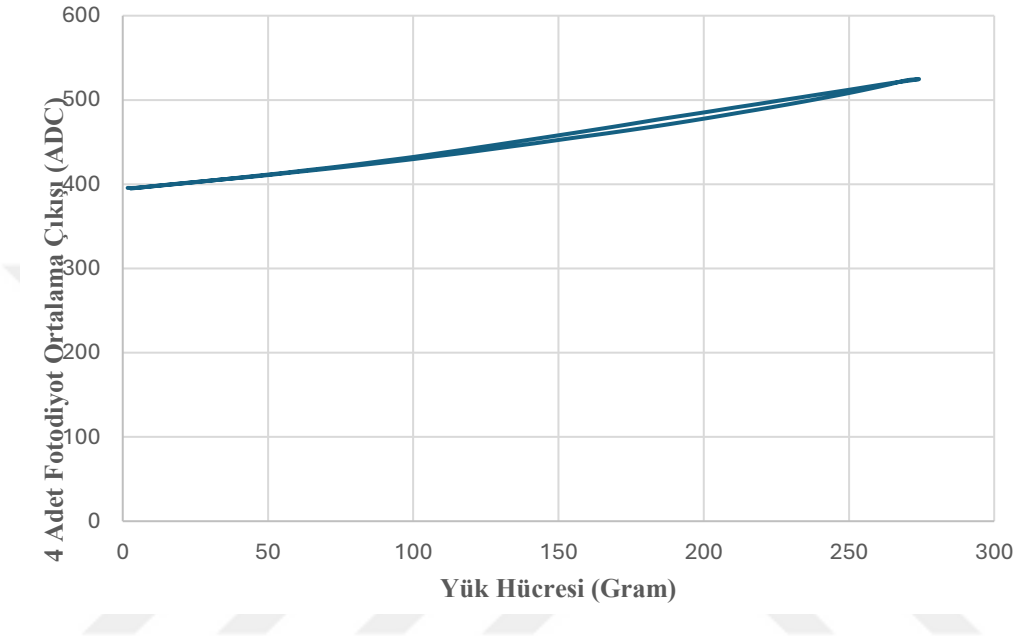
Sensör hesaplamaları ve gerekli analizleri yapılabilmesi, ve olabilecek kadar kararsızlıklarıden etkilenmeyen düz bir sensör eğrisinin elde edilmesi için, toplanan verilerin ortalaması alma yöntemiyle ham veriler işlenmiştir. Böylece 42 adım aşağı ve 42 adım yukarı olmak üzere her bir adımı temsil eden ortalama değerler ortaya konulmuştur. Bu işlem, hem fotodiyot çıkışları hem de yük hücresi verileri için karşılıklı olarak uygulanmıştır. Veri işleme sonuçları **Tablo 4.2**'de ve ona bağlı sensör eğrisi Şekil 4.13'te gösterilmişlerdir.

Tablo 4. 2 Yük hücresi ve fotodiyot verilerinin işlenmiş kesiti

Adım #	**Fotodiyot ADC ortalama değerleri**	**Yük hücresi çıkışı (gr)**
1	395.62	1.68
2	395.64	4.47
3	397.33	9.44
4	399.37	15.29
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
44	529.14	281.09
-	-	-
-	-	-
-	-	-
84	396.28	6.72

Yatay eksende yük hücresi tarafından ölçülen her adımda uygulanan kuvvet (gram cinsinden), düşey eksende ise dört fotodiyotun ortalama ADC değeri gösterilmiştir. Elde edilen sensör eğrisi, sistemin yukarı ve aşağı yöndeki kuvvet uygulamaları karşısındaki davranışı sunmaktadır. İlk gözlenmelerden görünüyor ki, sensörün tam doğrusal olmayan ama sürekli ve kararlı bir çıkış verdiği açıktır.

Hem artan hem de azalan kuvvet adımları boyunca sensörün benzer doğrultuda fakat küçük farklarla ayrışan yanıtlar vermesi dikkat çeken bir özelliktir. Bu ayrışmalar, sensörün histerezis karakteristiğini göstermesiyle birlikte, genel olarak sistemin kararlı bir performans sergilediğini teyit etmektedir. Bu doğrultuda, grafik hem kalibrasyon doğruluğunu hem de analizde kullanılacak sensör modeli için temel doğrultuyu görsel olarak sunmaktadır.



Şekil 4. 12 42 kuvvet adımın artışı ve azalışı gösteren sensör eğrisi

Fotodiyotların analog çıkışı, Arduino Uno tipi mikrokontröller ile okunmuştur, bu mikrokontröllerin Analog-Digital dönüştürücüsü (ADC) 10 bit çözünürlüğe sahiptir. Arduino Uno'da ADC, 0 ila 5 V arasındaki giriş gerilimini 0 ila 1023 arasında bir sayısal değere dönüştürmektedir. Bu sayede fotodiyot çıkışındaki analog gerilimler, sayısal ADC değerleri oljarak elde edilmiştir.

Bu değerlerin milivolt cinsinden karşılıklarının hesaplanabilmesi için (4.5) dönüşüm formülü kullanılmıştır:

$$V_{çıkış} = \frac{ADC}{1023} \times 5000 \tag{4.5}$$

Tüm analizlerde ve grafiksel karşılaştırmalarda, fotodiyot verilerine bu dönüşüm uygulanarak milivolt birimine çevrilmiş olup sensör analiz ve hesaplamalarında kullanılmak üzere **Tablo 4.3**'te düzenlenmiştir.

Tablo 4. 3 Yük hücresi ve fotodiyot verilerinin işlenmiş kesiti

Adım #	**Fotodiyot ortalama değerleri (mV)**	**Yük hücresi çıkışı (gr)**
1	1933.6	1.68
2	1933.7	4.47
3	1942	9.44
4	1952	15.29
5	1962.3	21.47
6	1972.6	28.08
- - 44 - -	- - 2575.8 - -	- - 281.09 - -
82	1954.3	17.42
83	1945.2	11.78
84	1936.9	6.72

Tablo 4.3'ten elde edilen ve analizlerde kullanılacak önemli değerlerden aşağıdaki **Tablo 4.4**'da gösterilmiştir. Sonuçlarda görüldüğü gibi ilk iki adımın giriş veya çıkış sinyaline etkili bir değişime sepeb olmadığı için 2. adım yani $1933.7\ mV$ çıkış offseti ve 4.47 g offseti olarak kabul edilmiştir.

Tablo 4. 4 Sensör analizleri için veri tablolarından alınan önemli değerler

İndeks	Değer adı	Sembolü	Değer	Birim
1	Minimum giriş değeri	X_{min}	1.63	$gram$
2	Maksimum giriş değeri	X_{max}	281.09	$gram$
3	Minimum çıkış değeri	Y_{min}	1933.6	mV
4	Maksimum çıkış değeri	Y_{max}	2575.8	mV
5	Çıkış offset değeri	Y_{offset}	1933.7	mV
6	Giriş offset değeri	X_{offset}	4.47	mV

4.5 Sensör Statik Karekteristği

4.5.1 Giriş Aralığı ve Giriş Açıklığı

Sensör aralığı r_r (4.6) değişebilen girişler arasındaki sınırları tanımlar. Giriş açıklığı r_i (4.7) ise girişin maksimum değeri X_{max} ile minimum değeri X_{min} arasındaki farktı [42].

$$r_r = (X_{min}\ , X_{max}) \tag{4.6}$$

$$r_i = X_{max} - \ X_{min} \tag{4.7}$$

$$r_r = (1.63\text{g}, 281.09\text{g})$$

$$281.09 - 1.63 = 279.46\ g$$

4.5.2 Tam Skala Çıkışı (FSO)

Tam skala çıkışı r_o hesaplamak için maximüm çıkış Y_{max} ile minimün çıkış Y_{min} arasındaki fark (4.8) denkleminde gibi alınır.

$$r_o = \ Y_{max} - \ Y_{min} \tag{4.8}$$

4.5.3 Statik Hassasiyet

Statik hassasiyet *S* çıkış sinyalindeki artış miktarının (Δy), istenen giriş sinyalindeki artış miktarına (Δx) oranıdır (4.10) formülde gösterilen gibi.

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{4.10}$$

$$S = \frac{642.2}{279.46} = 2.29$$

4.5.4 Tekrarlanabilirlik hesabı

Aynı giriş değerleri için yapılan ölçümlerin birbirine ne kadar yakın olduğunu gösterir. Genellikle *FSO* yani tam skala çıkışının yüzdesi olarak ifade edilir [34].

Ham veri tablolarından 3 deney tablolarından rastegele alınan üç okumaları için tekrarlanabilirlik hesplarında kullanılacak değerler aşağıdaki **Tablo 4.5**'te gösterilmiştir.

Tekrarlanabilirlik hesablaması için (4.11) formülü kullanılmıştır [41]:

$$\%\, Tekrarlanabilirlik = \frac{\max Y_i - \min Y_i}{FSO} \times 100 \tag{4.11}$$

(4.11)`da, $\max Y_i$ alınan üç deneydeki bir giriş noktasına karşılıklı okumalarının en büyük değeri, $\min Y_i$ ise en küçük değeridir.

Tablo 4. 5 Ham veri setlerinden elde edilen sensör inceleme noktaları

Giriş değeri (g)	Veri setleri	Minimüm çıkış değeri (mV)	Maximüm çıkış değeri (mV)	Tekrarlanabilirlik hesap sonucu
~50 g	1,2,3	2008.8	2012.46	%0.57
~172 g	1,2,3	2262.95	2272.73	%1.52
~265 g	1,2,3	2533	2546.43	%2.09

Yapılan tekrarlanabilirlik hesaplamaları sonucunda, sensör sisteminin farklı giriş seviyeleri için oldukça kararlı ve güvenilir bir performans sergilediği görülmüştür. Üç farklı giriş seviyesinde yapılan hesaplamalarda, tekrarlanabilirlik oranları sırasıyla %0.57, %1.52 ve %2.09 olarak bulunmuştur.

50 g seviyesinde elde edilen %0.57'lik düşük tekrarlanabilirlik oranı, sistemin düşük yük seviyelerinde dahi yüksek kararlılıkla çalışabildiğini göstermektedir.

Buna karşılık, yük arttıkça, özellikle sensörün üst değerleri seviyesine yaklaşıldığında, tekrarlanabilirlik oranında hafif artış gözlemlenmiştir. Bu durum, deformasyon artışına bağlı olarak sistemdeki mekanik ve optik etkileşimlerin daha karmaşık hale gelmesinden kaynaklanabilir. Ancak yine de %2.09 seviyesinde kalan bu değer, sistemin genel kararlılığı açısından oldukça iyi kabul edilebilir.

Sonuç olarak, tekrarlanabilirlik değerlendirmeleri, sensörün kalibrasyon doğruluğuna ve kararlı çalışmasına olumlu bir işaret vermektedir, ilerleyen bölümlerde ele alınacak olan doğruluk, doğrusalsızlık ve histerezis analizlerinin güvenilirliği için sağlam bir temel oluşturmuştur.

4.5.5 Doğruluk Hesabı

Bir fiziksel özelliğin ölçümünde gerçek değer ile sensörün gösterdiği değer arasındaki farktır [42]. Aşağıdaki FSO tam skala çıkışının yüzdesi veya bir ölçme noktasının olarak açıklanmaktadı.

Tam Skala Yüzdesine Göre Doğruluk:

Ölçüm hatasının, (4.11) formülde sensörün toplam çalışma aralığına (tam skala çıkışı) oranlanarak yüzde cinsinden ifade edilmesidir.

$$\% \, \varepsilon_f = \frac{Y_m - Y_t}{FSO} \times 100 \tag{4.11}$$

Okuma Yüzdesine Göre Doğruluk:

Ölçüm hatası (4.12) formülde % $\boldsymbol{\varepsilon_a}$, ölçüm noktasındaki gerçek değere oranlanarak yüzde olarak ifade edilmesidir.

$$\% \, \varepsilon_a = \frac{Y_m - Y_t}{Y_t} \times 100 \tag{4.12}$$

(4.12) formülünde,

- $Y_{m:}$ Ölçülen değer (sensör çıktısı)
- Y_t: Ideal çıkış değeri

Mutlak Hata:

Sistemin ölçüm mutlak hatası (4.13) formülde $\boldsymbol{\varepsilon}$, ölçüm sisteminin verdiği değer ile gerçek değer arasındaki doğrudan farktır. Birimi, ölçülen fiziksel büyüklüğün birimidir (örneğin gram, Millivolt, Newton vb.).

$$\varepsilon = Y_m - Y_t \tag{4.13}$$

(4.13) formülünde tam skala yüzdesine göre doğruluk, okuma yüzdesine göre doğruluk ve mutlak hata hesapları yapılarak **Tablo 4.7**'de düzenlenmiştir.

Tablo 4.6 Doğruluk hesab tablosu

Adım #	**Yük hücresi ölçülen çıkışı (g)**	**Fotodiyot offsetli ideal çıkışı (mV)**	**Fotodiyot offsetli ölçülen çıkışı (mV)**	**Mutlak hata ε (mV)**	**%FSO ε_f**	**%Okuma ε_a**
1	1.68	0	0	0	0	0
2	4.47	4.15	4.15	0	0	0
3	9.44	15.5	8.3	-7.2	-1.12	-46.45
4	15.29	31	18.3	-12.7	-1.98	-40.97
5	21.47	46.5	28.6	-17.9	-2.79	-38.49
6	28.08	77.5	38.9	-23.1	-3.6	-37.26
- 20 - - 44 - - 60 -	- 121.84 - - 281.09 - - 162.28 -	- 263.5 - - 635.5 - - 387.5 -	- 213.4 - - 642.1 - - 337.2 -	- -50.1 - - -6.6 - - -50.3 -	- -7.80 - - 1.03 - - -7.83 -	- -19.01 - - 1.04 - - -12.98 -
82	17.42	46.5	20.6	-25.9	-4.03	-55.7
83	11.78	31	11.5	-19.5	-3.04	-62.90
84	6.72	15.5	3.2	-12.3	-1.91	-79.35

4.5.6 Histerezis Hesabı

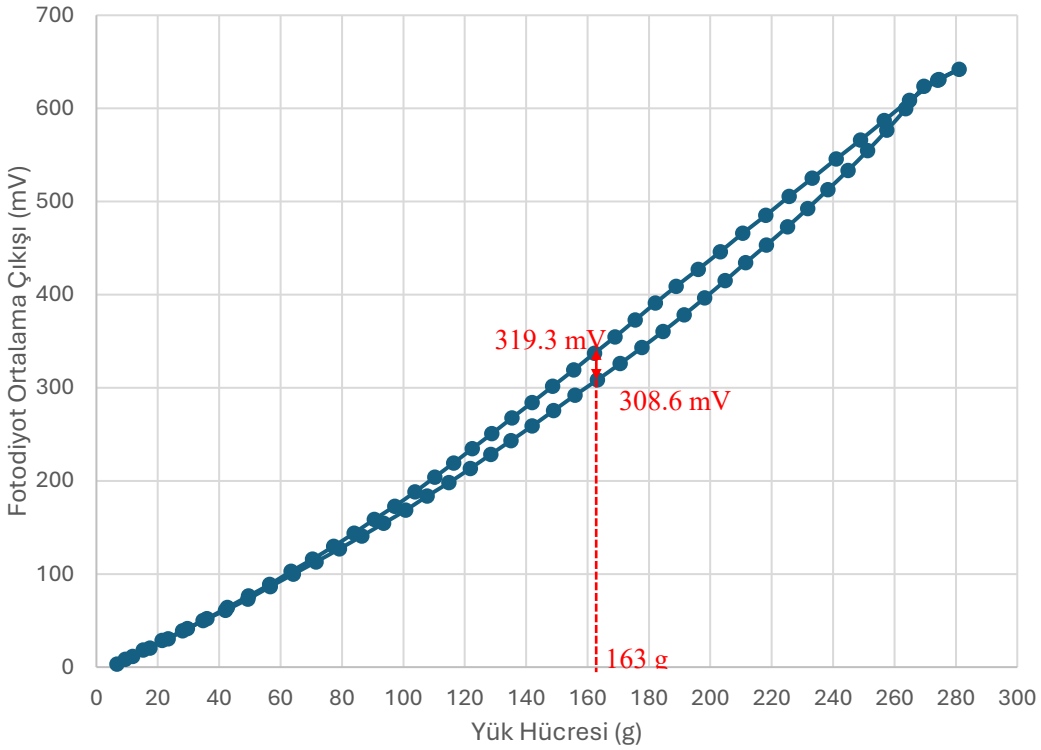
Sensörün bir giriş değerinde verdiği çıkış ile aynı giriş değerinin tersinde verdiği çıkışın farkıdır. Genelde tam skala çıkışının yani FSO'nun yüzdesi olarak açıklanmaktadır [43]. (4.14) formülde denkleme göre histerezis hesabı yapılıb **Tablo 4.8**'de düzenlenmiştir.

$$\%Histerezis = \frac{Y_{azalışlı} - Y_{tartışlı}}{FSO} \times 100 \tag{4.14}$$

Örnek:

Şekil 4.13'ta kalibrasyona ait histerizis grafın üstünde gösterilen 163g girişinde inceleme noktasının histerizis hesabları (4.14) formülde gibidir.

$$\%\ Histerzis = \frac{319.3 - 308.6}{642.1} \times 100 = \ \%1.66$$



Şekil 4. 13 Fotodiyot çıkışı–kuvvet adımları kalibrasyon eğrisi (42 adım)

Tablo 4.7 Histerezis hesap tablosu

Adım	Yük hücresi ölçülen çıkışı (g)	Fotodiyot offsetli artşlı çıkışı (mv)	Fotodiyot offsetli azalışlı çıkışı (mV)	Histerezis %FSO
1	1.68	0	0	0
2	4.47	4.15	3.2	0
3	9.44	8.3	11.2	0.45
4	15.29	18.3	21.6	0.51
5	21.47	28.6	30.5	0.29
6	28.08	38.9	41.3	0.37
12 - 21 - 33 -	64.13 - 128.49 - 211.55 -	99.8 - 228.5 - 434.3 -	102.9 - 234.8 - 446.2 -	0.48 - 0.98 - 1.83 -
40	257.52	576.8	587	1.60
41	263.7	599.6	608.7	1.41
42	269.64	623.8	633.3	1.48
43	274.07	630.3	642.1	1.84
44	281.09	642.1	649.3	1.12

4.5.7 Doğrusalsızlık Hesabı

Tasarlanan sensörlerde doğrusalsızlık hatası $\%\,\varepsilon_{dz}$; giriş ile çıkış arasındaki varsayılan ideal doğrusallığa kıyasla oluşan maksimum sapma olarak tanımlanır [42]. Doğrusalsızlık genelde FSO tam skala çıkışının yüzdesi olarak gösterilir ve (4.14) formülde gibi hesplanır.

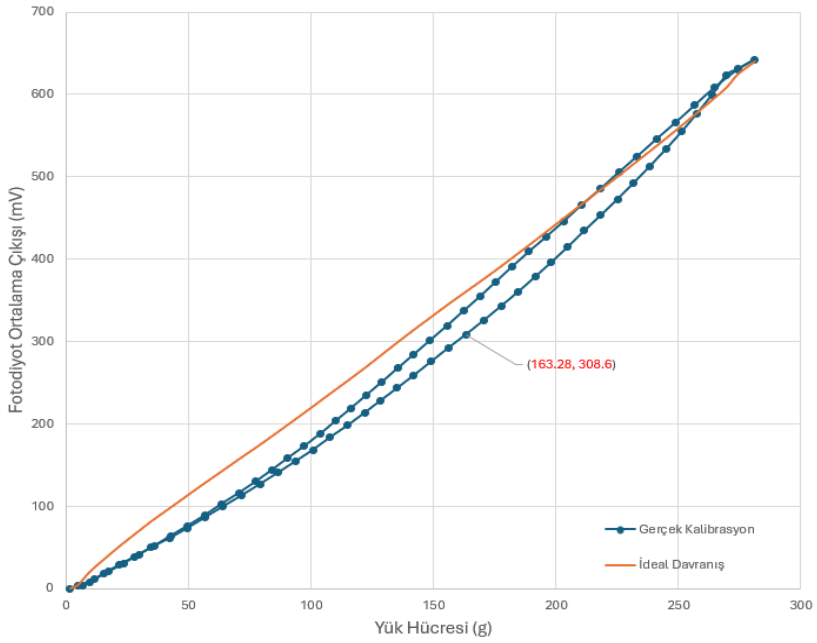
$$\%\,\varepsilon_{dz} = \frac{Y_m - Y_t}{FSO} \times 100 \tag{4.14}$$

(4.14) formülünde,

- $Y_{m:}$ Ölçülen değer (sensör çıktısı)
- Y_t: Ideal çıkış değeri

Yapılan hesaplamaların özet sonuçları **Tablo 4.9**'da verilmiştir. 42 adım boyunca yapılan hesaplamalarda, doğrusalsızlık hatası FSO'nun %-1.2 ila %-8.58 arasında değişmekteğini kaydedilmiştir. Özellikle düşük kuvvet seviyelerinde doğruluğun daha yüksek olduğu; yük arttıkça ise deformasyon etkileri ve ışıkığn yayılma davranışındaki bozulmalardan dolayı doğrusalsızlık etkisinin arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 4.14'te, elde edilen gerçek ölçüm verileri ile ideal doğrusal eğri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafikte, sistemin giriş kuvvetindeki artışlara karşılık sürekli ve kararlı bir yanıt verdiğini; ancak deformasyon arttıkça giriş-çıkış ilişkisinde belirli seviyelerde doğrusalızlık oluştuğunu açıkça görülmektedir.



Şekil 4. 14 Kuvvet–fotodiyot kalibrasyon eğrisi (42 adım, offsetli)

Bu sonuçlar, sistemin genel tasarımının stabil çalıştığını ve elde edilen kalibrasyon verisinin ileri düzey modelleme ve kontrol analizlerine uygun bir temel oluşturduğunu kabul edilmektedir.

Örnek olarak Şekil 4.14'te grafın üzerinde işaretlenen 163.28 g giriş noktasındaki 306.8 mV gerçek çıkış ve 360.5 mV ideal çıkış için doğrusalsızlık hesabı (4.15) formülde gibi yapılmıştır.

$$\% \varepsilon_{dz} = \frac{306.8 - 360.5}{642.1} \times 100 = \% - 8.36 \tag{4.15}$$

Tablo 4. 8 Yük hücresi ile mv biriminde fotodiyot çıkış ortalaması karşılıklı işlenmiş veri setinin kesiti

Adım #	**Yük hücresi ölçülen çıkışı (g)**	**Fotodiyot offsetli ideal çıkışı (mV)**	**Fotodiyot offsetli ölçülen çıkışı (mV)**	**Doğrusalsızlık % ε_{dz}**
1	1.68	0	0	0
2	4.47	4.15>>0	4.15>>0	0
3	9.44	15.5	8.3	-1.12
4	15.29	31	18.3	-1.98
5	21.47	46.5	28.6	-2.79
6	28.08	77.5	38.9	-3.6
- 20 - - 44 - - 60 -	- 121.84 - - 281.09 - - 162.28 -	- 263.5 - - 635.5 - - 387.5 -	- 213.4 - - 642.1 - - 337.2 -	- -7.80 - - 1.03 - - -7.83 -
82	17.42	46.5	20.6	-4.03
83	11.78	31	11.5	-3.04
84	6.72	15.5	3.2	-1.91

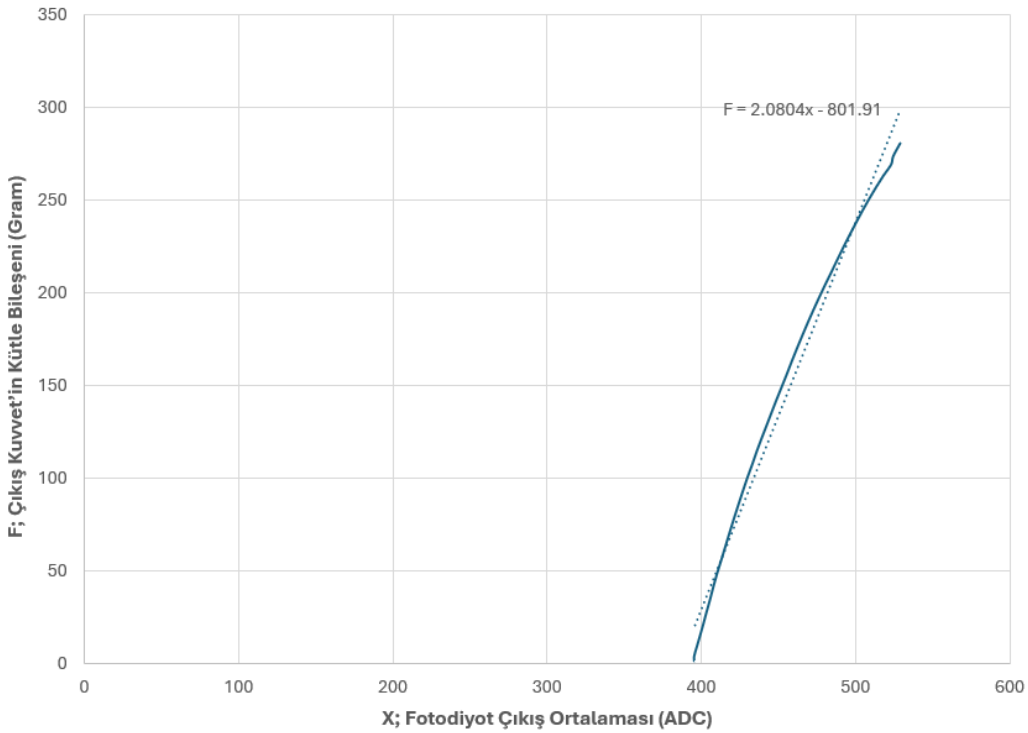
4.6 Kuvvet Sensörünün Matematiksel Modellemesi ve Simulink Entegrasyonu

Kuvvet sensörünün ölçüm karakteristiğini ifade eden matematiksel model, kalibrasyon sırasında elde edilen veri seti üzerinde regresyon uygulanarak oluşturulmuştur. Bu işlemde, dört adet fotodiyotun ortalama ADC çıkışı (bağımsız değişken) ile karşılık gelen yük hücresi kuvvet çıktısı (bağımlı değişken) arasındaki ilişki, doğrusal regresyon yöntemiyle modellenmiştir. Şekil 4.15'te gösterildiği gibi, elde edilen en uygun doğrusal denklem (4.16) formülde gibi ifade edilmiştir:

$$F_g(t) = ax - b \tag{4.16}$$

$F_g(t)$; Kuvvetin kütle bileşeni gram cinsinden çıktısı, x; Sensörün 4 fotodiyotundan elde edilen ADC ortalaması, a; kalibrasyon eğrisinden elde edilen doğrusal çarpan katsayısıdır. Bu çalışmada $a = 2.0804$ olarak elde edilmiştir, ve b; sistemin başlangıç (offset) değerinidir, Bu çalışmada $b = 801.91$.

Bu ifade; Şekil 4.16 gösterildiği gibi, ölçülen ADC değerlerinin doğrudan fiziksel kuvvete dönüştürülmesi için kullanılan doğrusal regresyon modelidir.



Şekil 4. 15 Regresyon eğrisi: yük hücresi ve fotodiyot ADC çıktısı

(4.15) formülünde elde edilen modelin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, model üzerinden hesaplanan kuvvet çıktıları ile ölçülen gerçek kuvvet çıktıları karşılaştırılmıştır. Her bir test adımı için hesaplanan kuvvet değeri ile ölçülen değer arasındaki fark alınarak (4.16) formüle göre mutlak hata elde edilmiştir. Elde edilen mutlak hata değerleri, **Tablo 4.10**'te gösterilmiştir.

$$\varepsilon_{er} = Y_m - Y_c \tag{4.17}$$

(4.17) formülde ε_{er} kuvvet mutlak hatası, Y_m sensörden ölçülen kuvvet, ve Y_c (4.15) formüldeki modelden hesaplanan kuvvettir.

Tablo 4.9'dan mutlak hata değerlerin ortalaması (4.18) formülde gibi hesaplanır.

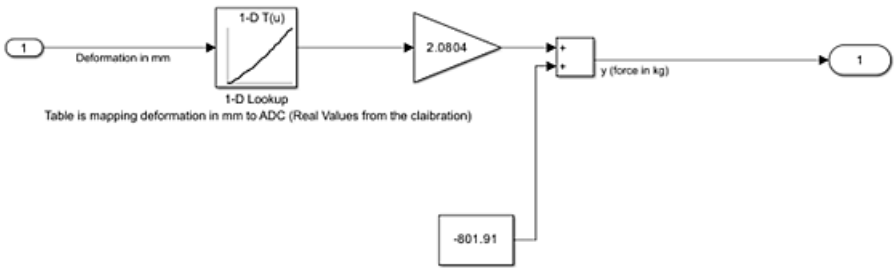
$$\bar{\varepsilon_{er}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{er_i} \tag{4.18}$$

(4.18) formülde n kuvvet adımı, ε_{er} bir adımdaki kuvvetin mutlak hatası ve $\bar{\varepsilon_{er}}$ sensörün mutlak kuvvet hatasıdır, 7.22g olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4. 15 Hesaplanan ve ölçülen kuvvet farkları

Adım	**Ölçülen sensöre kuvvet çıkışı (g)**	**(4.16) formüldeaki modelden hesaplanan kuvvet (g)**	**Mutlak Hata Değeri** ε_{er}
1	1.68	0	9.65944
2	4.47	0	9.65944
3	9.44	24.7	9.65944
4	15.29	28.95	9.65944
5	21.47	33.33	9.65944
6	28.08	37.74	9.65944
- 20 - 44 - 60	- 121.84 - 281.09 - 162.28	- 111.98 - 298.91 - 164.68	- 9.851084 - 17.82 - 2.40
82	17.42	29.95	12.53
83	11.78	26.05	14.27
84	6.72	22.510912	15.790912

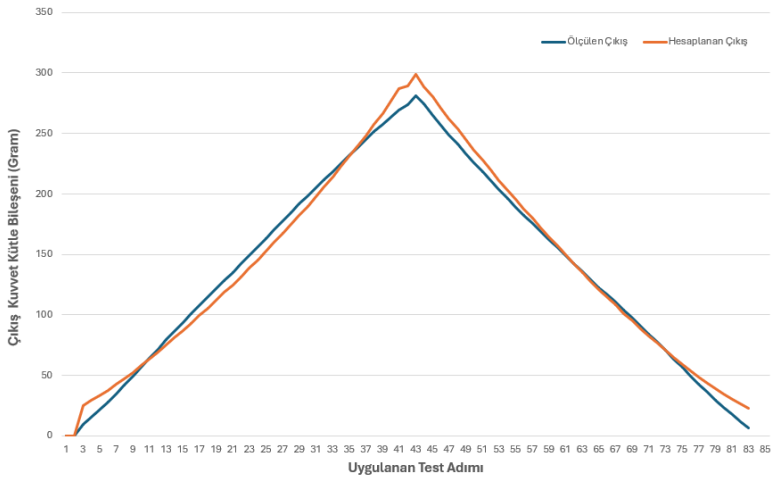
Ayrıca oluşturulan matematiksel model, Simulink ortamında bir blok diyagram biçiminde temsil edilmiştir. Bu blok yapısı, sistemin sonraki bölümlerdeki simülasyonlarında gerçek zamanlı kuvvet ölçümünü taklit edebilmek amacıyla kullanılmıştır. Modelin yapısı Şekil 4.16'da verilmiştir. Giriş olarak fotodiyot deformasyon değerine karşılık gelen ADC ortalaması verildiğinde, sistem çıkış olarak kuvvetin gram cinsinden tahminini üretmektedir.



Şekil 4. 16 Kuvvet sensörünün regresyon temelli Simulink modeli

Modelin geçerliliğini doğrulamak için, modelden elde edilen kuvvet çıktıları ile yük hücresinden elde edilen ölçümler karşılaştırılarak şekil 4.17'deki gibi grafiksel olarak yazdırılmıştır.

Burada hem modelin hem de gerçek sistemin aynı test adımlarında benzer eğilim sergilediği, dolayısıyla modelin doğruluğunun yeterli olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 17 Hesaplanan ve ölçülen kuvvet çıktılarının karşılaştırılması

5
TUTUCU SİSTEMİN MODELLENMESİ

Bu bölümde, tutucu sistemin tasarımı CAD yazılımları yardımıyla geliştirip simülasyon ortamlarında analizleri yapılmıştır ve matematiksel modelleri elde edilmiştir. Simülasyon ortamı olarak Matlab-Simulink ile Simscape Multibody yazılımı kullanılmış ve tutucu mekanizması, Solidworks ortamından Simscape'e aktarılmıştır. Sonrasında sistemin lineerleştirilmesi gerçekleştirilmiş ve transfer fonksiyon elde etmek için kullanılmıştır.

5.1 Tutucu Sistem Mekanik Tasarımı

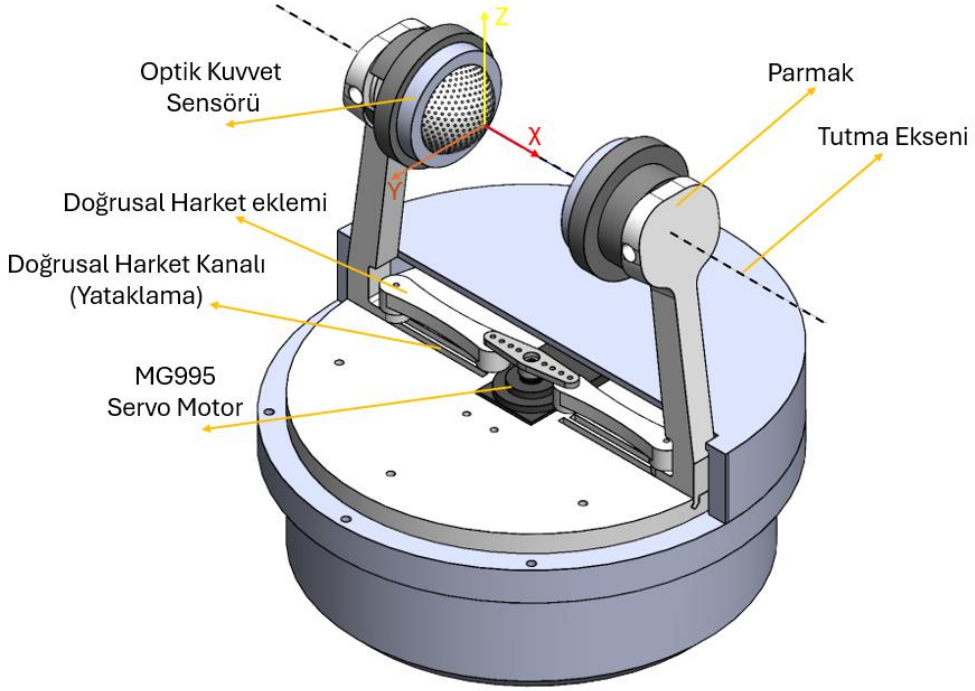
Şekil 5.1'de göstrilen, analizlerde Kullanılacak robotik parmak tutucu mekanizma tasarımı, hassas kuvvet kontrolü uygulamalarına yönelik doğrusal parmak hareketi gerçekleştirecek şekilde yapılmıştır. Parmaklar, daha önce geliştirilen optik kuvvet sensörü gövdesi ile monte edilecek şekilde yapılmıştır.

Tablo 5. 1 MG995 servo motor parametereleri

Parametre	**Açıklama**	**Değer**	**Birim**
V	Çalışma gerilimi	5	Volt
Γs	Kilitlenme torku	9.4	kgf·cm
υ_{op}	Çalışma hızı	7.48	rad/s
T	Çalışma sıcaklığı	0 –55	ºC
I_r	Çalışma akımı	500-900	mA

Tablo 5.1'de özellikleri açıklanan MG995 servo motoru ise metal dişlisi ile dayanıklılığ ve diğer ekonomik servo motorlara göre hassaslığı için hareket kaynağı

olarak seçilmiştir.Tasarımın ann hedefi, hassas nesnelerin yüzeylerine zarar vermeden tutma işlemini gerçekleştirip sensörler üzerinde merkezcil kuvvet uygulanması sağlanmaktır, bu tasarımı simülasyon prtamlarına aktarılarak sensör kalibrasyonu sürecindeki toplanan verilerle entegre edilip analizleri gerçekçi bir şekilde yapılabilecektir[44].

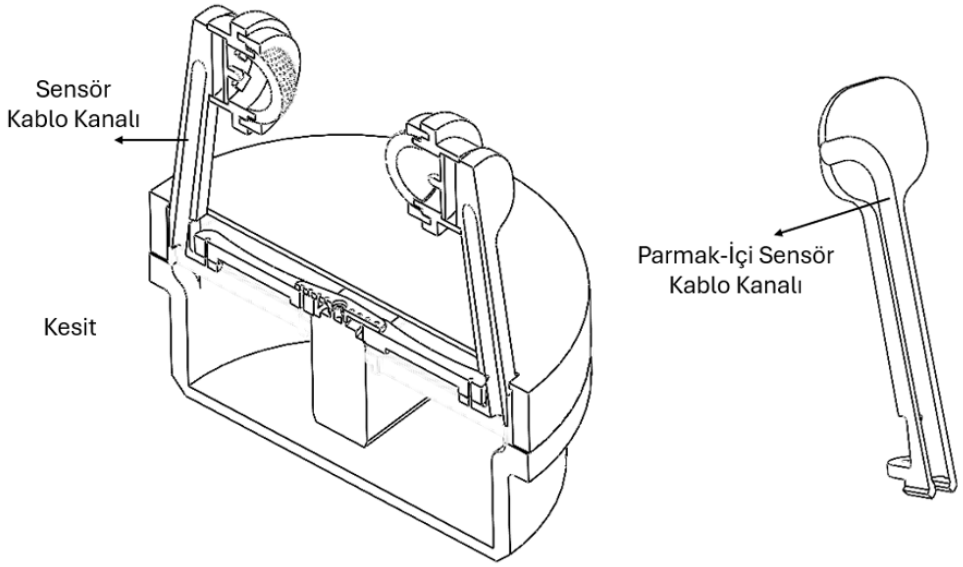


Şekil 5. 1 Robotik tutucu sisteminin montaj görüntüsü ve hareket eksenleri

5.1.1 Tutucu Tasarımın Gerçekçiliği

Tutucu sisteminde parmaklar, servo motorun döner hareketini doğrusal harekete çeviren bir eklem ve doğrusak yataklama sistemi ile tutulacak nesneye doğru hareket ettirilmektedir.

Tasarım süreci olabilecek kadar gerçekçi olması gözönünde bulundurarak çalıştırılmıştır, buna göre parmakların uç kısımlarına entegre edilen her bir sensör için mikrokontröllere geçecek gizli kablo kanalları tasarlanmıştır. Bu kanalın tasarımı kablolara zarar vermeden parmakla birlikte hareket etmesini imkan sağlamıştır. **Şekil 5.2'de** farklı kesit görünümleride parmak içi kablo kanalı ve sensör yerleşimi ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

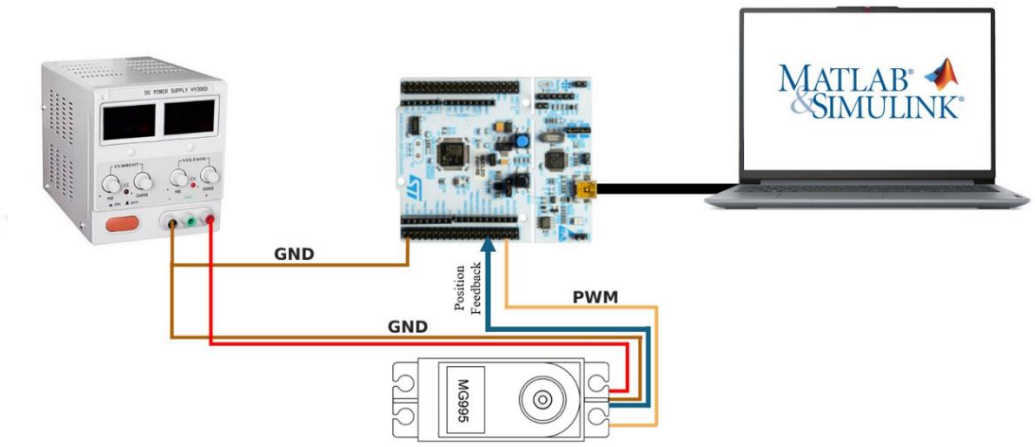


Şekil 5. 2 Parmak içine yerleştirilen sensör ve kablo kanalının kesidi

5.2. Motor Sistem Tanımlaması

5.2.1 Deneysel Devre ve Potansiyometre Geri Beslemesi

Sistem tanımlamasında kullanılan geri besleme, MG995 servo motorun içerisindeki potansiyometreden doğrudan alınmıştır. Şekil 5.3'te gösterildiği gibi potansiyometrenin orta ucuna bir hat lehimlenerek servo pozisyonuna karşılık gelen analog voltaj değeri elde edilmiştir.



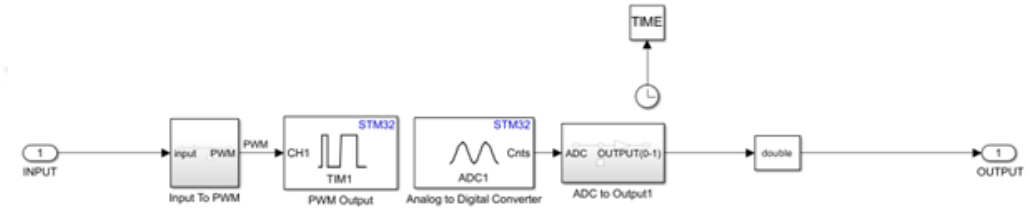
Şekil 5. 3 Servo motor iç potansiyometre hattı ve ADC girişi bağlantısı

Bu gerilim sinyali ADC yardımıyla örneklenmiş ve çıkış verisi olarak sistem tanımlama sürecinde kullanılmıştır.

5.2.2 Motor Tanımlanması Deneysel Kurulumu

MG995 model sürekli döner servo motorun dinamik karakteristiğini belirlemek amacıyla STM32F410RB tabanlı bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Sisteme PWM sinyali uygulanarak motor sürülmüş ve gerçek zamanlı geri besleme, servo motorun içerisindeki potansiyometreden doğrudan alınarak analog bir sinyal olarak STM32 kartının ADC girişine yönlendirilmiştir **Şekil 5.4**.

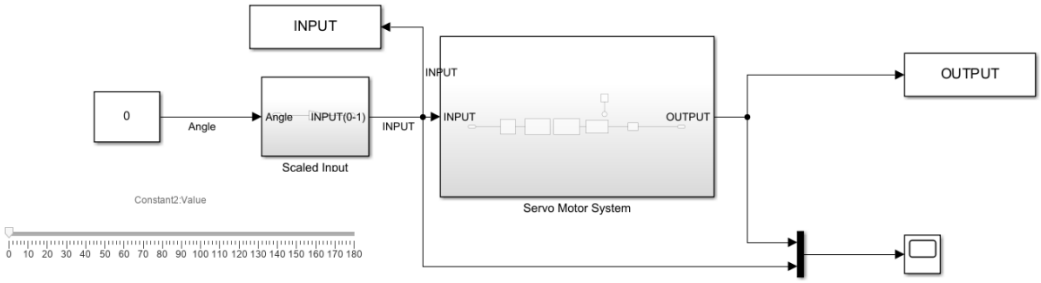
Bu sistem, Simulink ortamında modellenmiş olup PWM üretici bloğu, zamanlayıcı (TIM1), analogdan dijitale dönüşüm bloğu (ADC1) ve zaman damgalayıcı saat bloğu ile entegre edilmiştir.



Şekil 5. 4 Simulink motor sistem tanımlama deney blok diyagramı

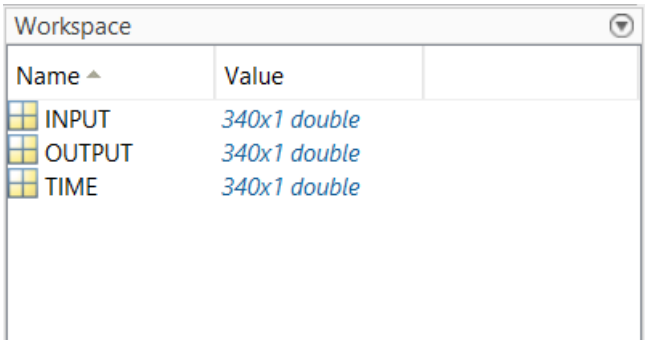
5.2.3 Tanımanma Simulink Test Yapısı

Sisteme uygulanan giriş, motorun çalışma aralığı olan 0–180° arasında olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Bu değerler, PWM darbe genişliği ile eşleştirilmiş ve uygun biçimde normalize edilmiştir (şekil 5.5).



Şekil 5. 5 Simulink test modeli

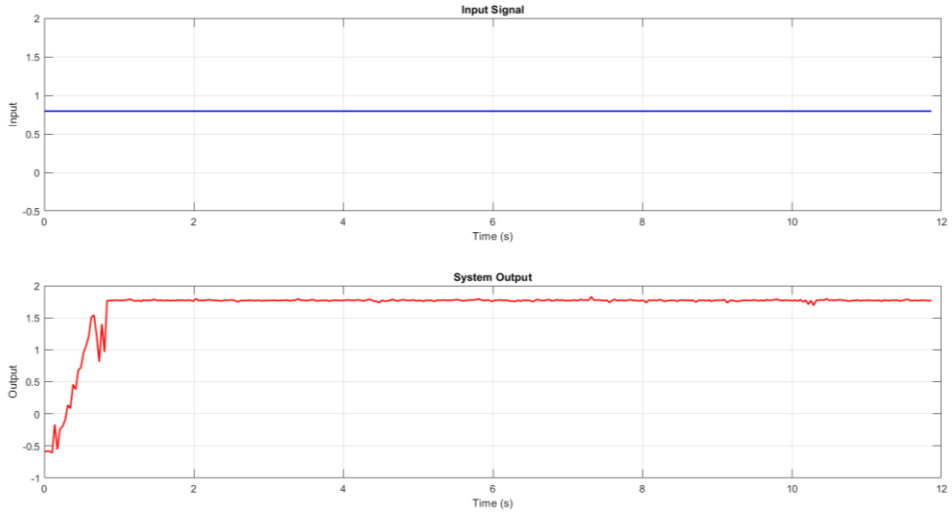
Çıkış sinyali, servo motorun potansiyometresinden alınan gerilim verisinin ADC ile dijitale çevrilmiş halidir. **Şekil 5.6'daki** gibi INPUT, OUTPUT ve TIME adlarında üç vektör MATLAB çalışma alanına aktarılmıştır.



Şekil 5. 6 MATLAB çalışma alanında elde edilen vektörler

5.2.4 Adım Cevabı ve İlk Gözlemler

Motor çıkışında hızlı bir yükselme gözlemlenmiş **Şekil 5.7** ve yaklaşık 1.5 saniye içerisinde durağan hale gelmiştir.



Şekil 5. 7 Giriş (mavi) ve çıkış (kırmızı) zaman cevabı grafikleri

Sistem durağan duruma kısa sürede ulaşmakta ve ihmal edilecek kadar küçük salınım göstermektedir.

5.2.5 Motor Matematiksel Modellemesi ve Transfer Fonksiyonu

Servo motorun davranışı, (5.1) formülde verilen standart birinci dereceden transfer fonksiyonu ile modellenmiştir.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \tag{5.1}$$

Burada, $G(s)$ Laplace uzayında sistemin transfer fonksiyonu, $\boldsymbol{K}$ kararlı durum kazancı, τ saniye cinsinden zaman sabiti, ve s Laplace değişkeni

Şekil 5.6'teki görünen veri matrislerinden toplanan verilerle MATLAB üzerindeki eğri uydurma yöntemiyle motorun konumlama davranışı veren aşağıdaki transfer fonksiyonu τ zaman sabiti $\tau = 0.425$ saniye olarak elde edilmiştir.

İlerleyen bölümlerdeki bahsediln analizlerde kullanılmak üzere elde edilen transfer fonksyonu Simulink ortamına aktarılmıştır.

Model, motorun karakteristiğini doğru bir şekilde temsil etmekte olup, kontrol uygulamaları için yeterli hızda bir yanıt sağlamaktadır.

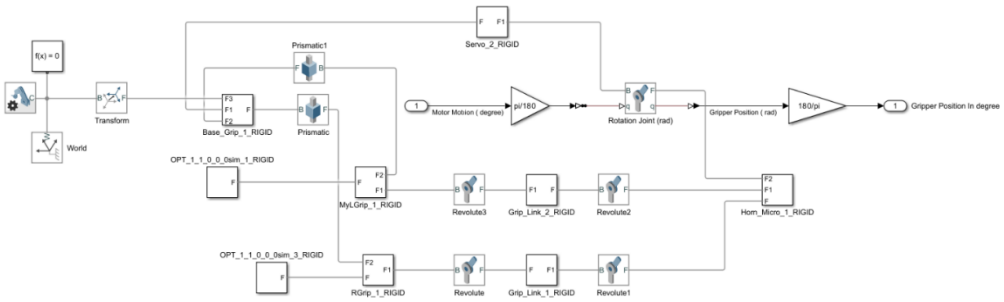
5.3 Simscape Modelinin Kurulumu

Tasarlanan tutucu sisteminin mekanik model montajı, Simscape Multibody ortamına aktarılmıştır. Aktarılan model içerisinde tüm kinematik bağlantılar (prizmatik, mafsal ve mesned bağlantılar) tanımlanmıştır.

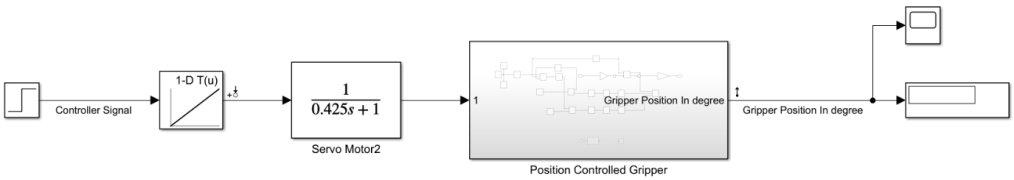
Simscape ortamında yapılan modelleme sırasında servo motorun hareketi **derece (°)** cinsinden tanımlanmıştır, ancak Simscape Multibody ortamı radyan cinsinden çalıştığından dolayı girişte ve çıkışta (5.2) formülde gibi derece-radyan arasındaki ters dönüşümler yapılmıştır.

$$\theta_{rad} = \frac{\theta_{derece} \cdot \pi}{180} \quad \rightarrow \theta_{derece} = \frac{\theta_{rad} \cdot 180}{\pi} \tag{5.2}$$

Böylece hem kontrol hem de konum geri beslemesi derece cinsinden rahatlıkla takip edilebilmiştir. Bu dönüşüm sistem matematiğinde, özellikle linearizasyon işlemi sırasında doğru ölçeklendirmeyi sağlamak için önemlidir.



Şekil 5. 8 Tutucu sisteminin Simscape multibody ortamındaki tam modeli



Şekil 5. 9 Tutucu sistem Simulink modeli: servo motor ve çalışma noktaları

5.3.1 Lineerleştirme İşlemi

Sistemin doğrusal olmayan Simscape modeli, MATLAB'in linear analysis aracı kullanılarak bir çalışma noktasında lineerleştirilmiştir. Lineerleştirme işlemi sırasında, servo motor ve mekanizma dinamiklerinin tamamı ele alınmıştır.

Lineerleştirme sonucunda (5.3) formülde gibi üçüncü dereceden transfer fonksiyon elde edilmiştir.

$$G_{tamgripper}(s) = \frac{K}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \tag{5.3}$$

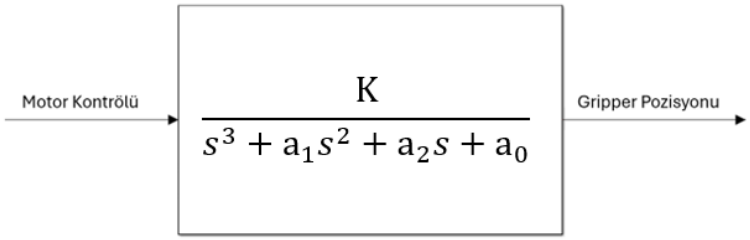
(5.3) formülünde tanımlı sistemin elde edilen parametreleri **Tablo 5.1**'de açıklanmıştır.

Tablo 5. 2 Sistem transfer fonksiyonunun parametreleri

Adım #	Terim	Değeri	Açıklama
1	K	2.353×10^6	Sistem Kazancı
2	a_3	1	Atalet momenti
3	a_2	2002	Sönümleme Katsayısı
4	a_1	1.005×10^6	Elastik Katsayı
5	a_0	2.353×10^6	Statik Katsayı

Bu transfer fonksiyonu, servo motor ile tutucu mekanizmasının tüm bileşenlerini temsil etmektedir.

Transfer fonksiyonu daha sonra kontrolün matamatiksel analizlerindaki önemli rol oynacağı gibi Simulink ortamına aktarılarak kontrol simülasyonunda da kritik rol alacaktır.



Şekil 5. 10 Transfer fonksiyonu Simulink modeli

5.3.2 Hareket Denkleminin

Transfer fonksiyonun payda polinomu sistemin karakteristik denklemini temsil etmektedir. Buradan sistemin hareket diferansiyel denklemi (5.4) formülde elde verilmektedir.

$$a_3\dddot{x} + a_2\ddot{x}(t) + a_1\dot{x}(t) + a_0x(t) = u(t) \tag{5.4}$$

(5.4) formülünde görüldüğü üzere sistemin, atalet bileşeni katsayısı a_0= 1, sönüm bileşenleri katsayıları a_1 ve a_2 (2002 ve 1.005×10^6 katsayıları), ve elastikiyet etkisi bileşeni katsayısı $a_0 = 2.353 \times 10^6$.Bu katsayılar mekanik, elektriksel, ve esnek tutucu yapısının tüm dinamik etkilerini içermektedir.

5.3.3 Sistemin Kararlılık Analizi – Hurwitz Yöntemi

Lineer zamanla değişmeyen (LTI) sistemlerin kararlılığı test etmek için kullanılan yöntemlerden biri Hurwitz kararlılık kriteridir. Bu kriter, (7.3)'teki gibi sistemin karakteristik denkleminden oluşturulan Hurwitz determinantlarının işaretlerine bakarak sistemin kutuplarının sol yarı düzlemde yer alıp almadığını belirler. Böylece sistemin kararlı olup olmadığı matematiksel olarak test edilebilir.

Bu çalışmada elde edilen sistemin karakteristik polinomu (5.5) formülde gibidir:

$$a_3\dddot{x} + a_2\ddot{x}(t) + a_1\dot{x}(t) + a_0x(t) = u(t) \tag{5.5}$$

Elde edilen transfer fonksiyona göre karakteristik katsayılar aşağıdaki gibidir:

- $a_3 = 1$
- $a_2 = 2002$
- $a_1 = 1.005 \times 10^6$
- $a_0 = 2.353 \times 10^6$

Hurwitz Matrisi ise (5.6)'da gibidir,

$$H = \begin{bmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ 1 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{bmatrix} \tag{5.6}$$

(5.6) formüldeki matrise ait determinantlar (5.7), (5.8) ve (5.9) formüllerde gibidir:

$$\Delta_1 = \ a_2 \tag{5.7}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ 1 & a_1 \end{vmatrix} = a_2 a_1 - a_0 \tag{5.8}$$

$$\Delta_3 = \begin{bmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ 1 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{bmatrix} = a_2 a_1 a_0 - {a_0}^2 - {a_2}^2 a_0 \tag{5.9}$$

Determinant hesap sonuçlarının tamamı $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3 > 0$ olduğunu bulunmuştır, dolaysıyla sistem kutuplarının tamamı sol yarı düzlemde yer almakta olduğu anlaşılmıştır. bu da sistemin BIBO yani sınırlı giriş - sınırlı çıkış tipinden kararlı olduğunu göstermiştir.

6
KONTROL SİSTEM TASARIMI VE SİMÜLASYON ANALİZLERİ

Bu bölümde, tasarlanan esnek yüzeyli robotik tutucu sisteminin kontrol algoritması açıklanmıştır. Tutucu sistemine, hassas ve uyarlanabilir kuvvet uygulayabilmesi amacıyla hem konum hem de kuvvet geri beslemeli yani kapalı çevrim kontrol stratejileri uygulanmalıdır.

İlk olarak sistemin açık çevrim davranışı, fiziksel bozulmalar (viskoz sürtünme, dış kaynaklı titreşim vs.) ve ölçüm gürültüleri altında değerlendirilmiş, ardından kapalı çevrim konum kontrol sistemi tasarlanarak sistemin kararlılığı, yanıt süresi ve doğruluğu iyileştirilmiştir. Konum kontrol sisteminde elde edilen performans, kuvvet kontrol yapısının temelini oluşturmuş ve böylece uç elemanın, hedeflenen tutma kuvvetini hassas bir şekilde uygulaması sağlanmıştır.

Önceki bölümde açıklanan, MATLAB/Simulink ortamında transfer fonksiyonu ve diğer parametreleri kullanarak çeşitli konrol testleri yapılmıştır. Literatürde yaygın olarak tercih edilen konum-kuvvet hibrit kontrol [46] yöntemlerine yakın olarak, bu çalışmada, optik ve deformasyon tabanlı kuvvet geri beslemesiyle kontrol edilen bir yapı sunulmuştur.

Bölümde, önce konum kontrolüne ilişkin açık ve kapalı çevrim analizler, ardından kuvvet kontrol yapısının tasarımı ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. Son olarak sistemin tümleşik performansı değerlendirilecek ve önerilen kontrol mimarisinin başarını analiz edilmiştir.

6.1 Bozulma ve Gürültü Modellemesi

Kontrol sistemi tasarımının ilk adımı olarak, robotik tutucu sistemin açık çevrim tepkisi; çevresel bozulmalar ve ölçüm kaynaklı gürültüler altında analiz edilmiştir. Bu tür dış etkiler, sistemin kararlılığını ve doğruluğunu önemli ölçüde etkileyebileceğinden, modelleme aşamasında fiziksel gerçeklik göz önünde bulundurularak sistem bozulmaları modellenmiştir.

Tutucu, endüstride kullanılan alüminyum 1060 malzemesinden imal edilmek üzere tasarlandığna göre,rijit gövde yapıya, iyi yağlanmış bağlantı noktalarına ve nispeten düşük kütleli (~69 gram) parmak-elemanlara sahip olduğunu varsayılmıştır. Kavrayıcı sistemin ucu, bir robot koluna entegre edilerek yumuşak nesneleri tutmak üzere tasarlanmıştır. Varsayılan koşullar altında, sistemin karşılaşabileceği bozulmalar aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır.

- Viskoz Sürtünme, hareketli bağlantı noktaları için 1.5 N·s/m değerinde viskoz sürtünme katsayısı olarak kabul edilmiştir. Bu değer, alüminyum malzemenin düşük yüzey pürüzlülüğü ve yağlanmış mafsal bölgeleri göz önüne alınarak seçilmiştir.
- Harici Bozulmalar, robot kolundan iletilen titreşimlerin sistem üzerindeki etkisini temsil etmek üzere, 0.5 genlikli ve 2π frekanslı sinüzoidal bir bozulma sinyali sisteme eklenmiştir. Bu sinyal, sistemin harici ani yük ve titreşimler altında nasıl tepki verdiğini test etmek amacıyla uygulanmıştır.
- Ölçüm Gürültüsü, elektronik aksamların sinyal dalgalanmalarından ortaya gelmekte olduğunu varsayılmıştır. Bu nedenle, konum geri besleme kanalına Gauss dağılımlı rastgele bir gürültü sinyali eklenmiştir, bu sinyalin genliği sistemin ölçüm hassasiyetine göre ± 0.01 derece aralığında sınırlandırılmıştır.

Tablo 6. 1 Sistemin modellenen bozulma ve gürültü parametreleri

Adım #	**Parametre türü**	**Kaynak**	**Modelleme yöntemi**	**Uygulanan değer**
1	Viskoz sürtünme	Hareketli bağlantılar	Konum türevi + sabit sayı	1.5 N·s/m
2	Harici bozulma	Robot kolundan gelen titreşimler	Sinüzoidal bozulma sinyali	Genlik = 0.25 frekans = 1 Hz
3	Ölçüm gürültüsü	Elektronik aksamları	Rastgele gauss dağılımlı gürültü	± 0.01 derece

Tablo 6. 1'da açıklanan bozulma ve gürültü sinyalleri, Simulink ortamında sisteme eklenmiş ve açık çevrim davranışı bu koşullar altında analiz edilmiştir.

6.2 Açık Çevrim Pozisyon Kontrolü

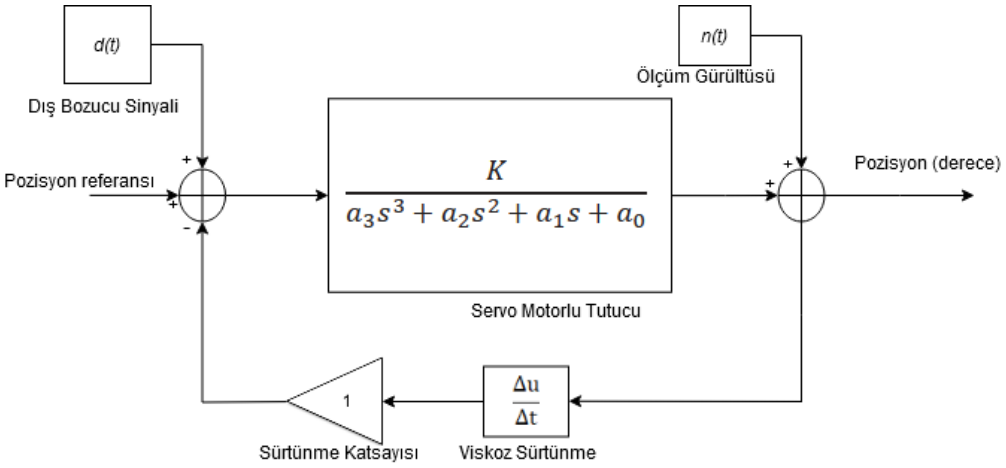
Kapalı çevrim sistem tasarımına geçmeden önce, önerilen robotik parmaklı gripper sisteminin açık çevrim davranışı modellenmiş ve Simulink ortamında detaylı şekilde analiz edilmiştir. Bu yaklaşımın temel amacı, sistemin doğal dinamiklerini anlamak, dış bozucu etkilere karşı tepkisini gözlemlemek ve kontrolsüz durumda sistemin kararlılığını sınamaktır.

6.2.1 Sistem Dinamiği ve Matematiksel Model

Önceki bölümlerde transfer fonksiyonu şeklinde sunulan tutucu sistemine uygulanan referans giriş sinyali, parmakların lineer hareketi olan milimetre cinsinden tanımlanmış olup, servo motorun çalıştığı açısal hareket bölgesine dereceye çevrilmiştir. Bu dönüşüm için kullanılan kazanç katsayısı, gripper parmaklarının açık halindeyken arasındaki mesafe 30 mm'dir buna karşılıklı motor hareketi 143°'dir matematiksel olarak (6.1) formülde gibi doğrusal bir oranla belirlenebilmiştir.

$$\theta_{giriş} = d_{giriş} \cdot \frac{143}{30} \tag{6.1}$$

Burada $\theta_{giriş}$ motora verilen konumlama referansı ve $d_{giriş}$ sisteme verilen parmak konumudur. Bu dönüşüm sonucu elde edilen açısal giriş, Şekil 6.1'de gösterildiği gibi bozucu etkilerle birlikte sistemin transfer fonksiyonuna uygulanmaktadır.



Şekil 6. 1 Açık çevrim pozisyon kontrolü Simulink blok diyagramı

6.2.2 Bozulma ve Gürültü Etkilerinin Dahil Edilmesi

Gerçek fiziksel sistemlerde karşılaşılması muhtemel dışsal etkiler, açık çevrim simülasyonuna dahil edilerek daha gerçekçi bir sistem davranışı gözlemlenmiştir. Bu kapsamda iki ana bozucu unsur modellenmiştir:

- **Dışsal Mekanik Titreşimler**

Tutucunun monte edileceği robot kolu titreşiminin yüzünden gelen mekanik titreşimidir. Sinüzoidal formda bir sinyal ile modellenen bu etki, referans giriş açısına doğrudan eklenmiş ve robot kolunun neden olabileceği istenmeyen hareketler temsil edilmiştir.

$$\theta_d(t) = A \cdot sin(2\pi f t) \tag{6.2}$$

(6.2) formülde, $\boldsymbol{\theta_d}$ dışsal mekanikten gelen bozulma, genliği $A = 0.5$ ve frekansı $f = 0.5\,Hz$'dir.

- **Viskoz Sürtünme (İyi Yağlanmış Alüminyum Mekanizma):** Parmak mekanizmasının yüzeyler arası hareketine karşı koyan direnç, viskoz sürtünme modeli ile tanımlanmıştır. Bu model (6.3) formülde gibi ifade edilir:

$$F_s = b \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} \tag{6.3}$$

(6.3) formülde, F_s sürtünme kuvveti, ve b sürtünme katsayısıdır, b'nin değeri $1.5\ \mathrm{N \cdot s/m}$ olarak kabul edilmiştir.

Simülasyonda sisteme uygulanan toplam kontrol sinyali, bu etkilerin bir araya getirilmesiyle (6.4) formülde gibi formüle edilmiştir:

$$\theta_{total}(t) = \theta_{giriş}(t) + \theta_b(t) - \theta_s(t) \tag{6.4}$$

(6.4) formülde $\theta_s(t)$ viskoz sürtünmeyi temsil eder.

Şekil 6.2'deki gösterilen bu sinyal sistemin transfer fonksiyonuna uygulanarak çıkış pozisyonu elde edilmiştir. Şekil 6.2'de görüldüğü üzere kontrol sinyali -250 ile +250 pwm birimi arasında değişmektedir, bu da gelecek kontrol çevrimleriyle kıyaslanıp kontrollörlerin enerji tüketimine dair faydalı bir değerlendirme kurmak için kullanılabilirdir.

Çıkışa ayrıca band-sınırlı beyaz gürültü (sensor noise) de eklenmiştir. Bu durum, gerçek sistemlerde sensör kaynaklı sinyal bozulmalarını yansıtmak amacıyla yapılmıştır.

- **Ölçüm Gürültüsü Modeli ve Parametreleri**

Kontrol sistemlerinde sensör çıkışlarında gözlemlenen rastgele dalgalanmalar, ölçüm gürültüsü olarak tanımlanır. Bu gürültüler, sistem doğruluğunu ve kararlılığını etkileyebilir; bu nedenle simülasyon ortamında bu etkiyi gerçekçi şekilde modellemek için beyaz gürültü bileşeni dahil edilmiştir.

Şekil 6.1'de blok olarak gösterilen ölçüm gürültüsü $n(t)$, matematiksel olarak (6.5) formülde gibi ifade edilir:

$$n(t) \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \tag{6.5}$$

(6.5)'daki $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$; sıfır ortalamalı ve varyansı σ^2 olan normal dağılımı ifade eder, σ^2 gürültü gücü olarak tanımlanır ve bu çalışmada $\sigma^2 = 0.0001$ olarak seçilmiştir. Örnekleme süresi $T_s = 0.01$ saniyedir.

Böylece, her 0.01 saniyede bir, $\mathcal{N}(0,0.0001)$ dağılımından rastgele bir değer üretilerek ölçüm sinyaline eklenmektedir.

Simülasyonda her çalıştırmada aynı gürültü profiline ulaşılabilmesi amacıyla rastgele sayı üreticiye sabit bir tohum değeri verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan tohum değeri 23341'dir. Bu sayede sonuçların tekrarlanabilirliği sağlanmaktadır.

Gürültü sinyali (6.6) formülde toplam çıkış modeline eklenmiştir:

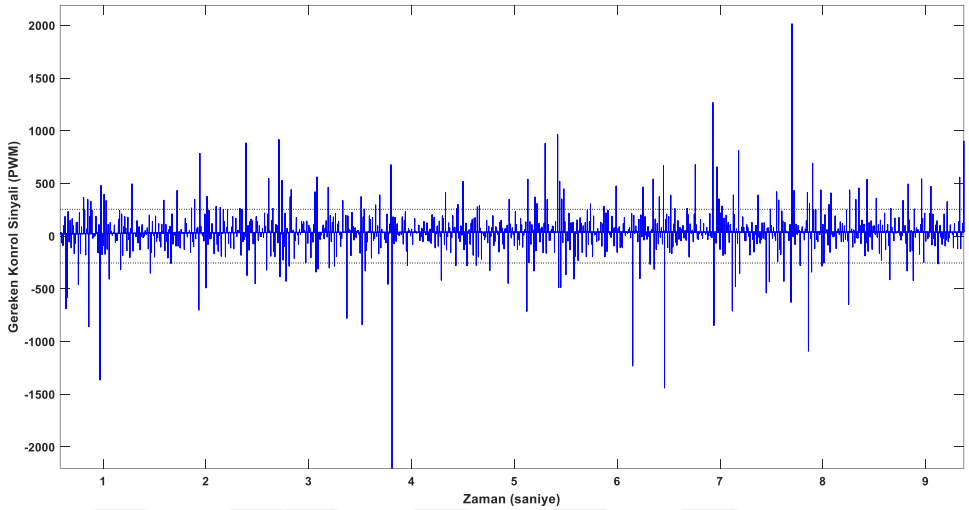
$$y_{\text{ölçüm}}(t) = y(t) + n(t) \tag{6.6}$$

$y(t)$: sistemin gerçek çıkışı, $y_{\text{ölçüm}}(t)$: sensörden okunan gürültülü çıkış sinyali ve $n(t)$ ölçüm gürültüsüdür.

Bu yapı sayesinde sensör kaynaklı ölçüm sapmaları gerçekçi bir şekilde modellenmiş ve kontrol algoritmasının bu sapmalara verdiği tepki test edilmiştir.

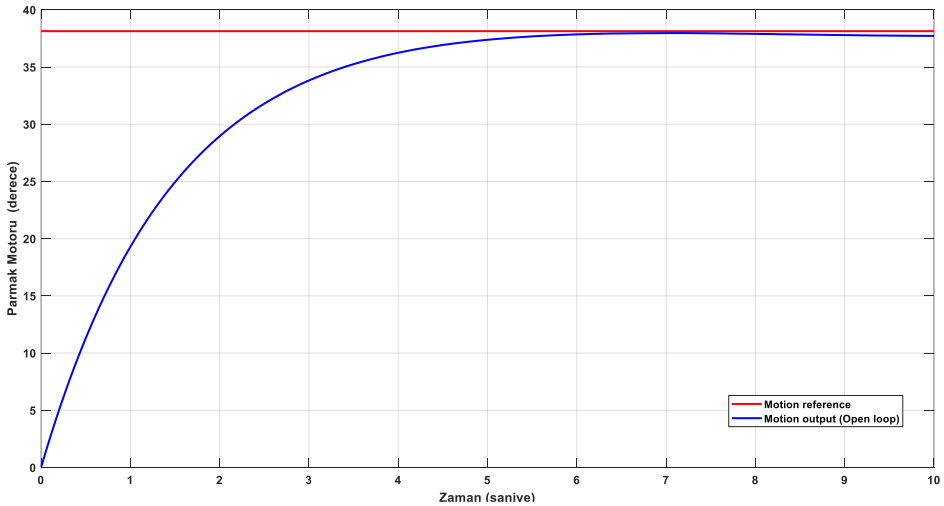
6.2.3 Simülasyon Sonuçları ve Yorum

Şekil 6.1'te açık çevrim pozisyon kontrolüne ait Simulink blok diyagramı gösterilmiştir, Şekil 5.5'te ise bu yapıya karşılık gelen sistem cevabı sunulmuştur.

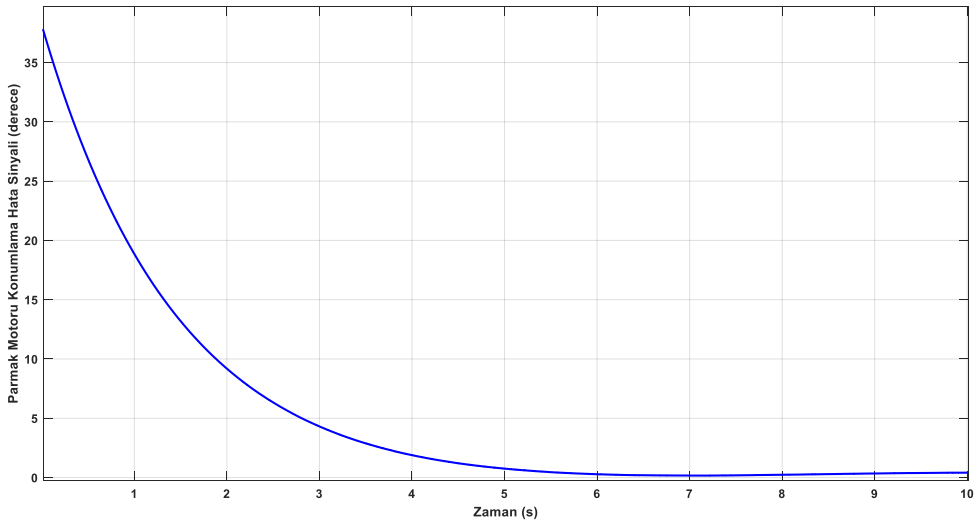


Şekil 6. 2 Açık çevrim sistemine gereken kontrol sinyali

Şekil 6.2'de görüldüğü üzere kontrol sinyali -250 ile +250 pwm birimi arasında değişmektedir, bu da gelecek kontrol çevrimleriyle kıyaslanıp kontrollörlerin enerji tüketimine dair faydalı bir değerlendirme kurmak için kullanılabilirdir.



Şekil 6. 3 Açık çevrim sistemin davranışı



Şekil 6. 4 Açık çevrimde konum hata sinyali

Sonuç olarak, Şekil 6.3 incelendiğinde, sistemin referans değere yaklaşık 6 saniye içinde ulaştığı görülmektedir. Bozucu sinyaller ve viskoz sürtünme etkisine rağmen sistem kararlı bir yanıt vermekte; ancak düşük frekanslı dışsal titreşimler ve ölçüm gürültüsü, çıkış sinyalinde küçük genlikli salınımlara sebep olmaktadır. Bu durum, açık çevrim kontrolün hassas uygulamalar için yeterli olmadığını göstermektedir. Bu doğrultuda, daha yüksek doğruluk ve bozuculara karşı daha dayanıklı bir kontrol stratejisi geliştirilmesi amacıyla bir sonraki aşamada kapalı çevrim pozisyon kontrol sistemi tasarlanmıştır.

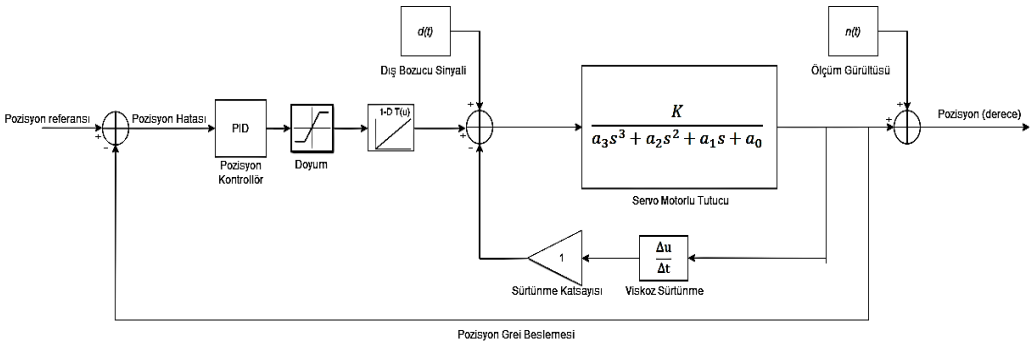
6.3 Kapalı Çevrim Pozisyon Kontrolü

Açık çevrim yapıların bozucu etkilere karşı duyarlılığı ve geri besleme eksikliği nedeniyle, sistemin kararlılığı ve doğruluğu kapalı çevrim bir kontrol stratejisi ile artırılmıştır. Bu amaçla, sistemin doğrusal transfer fonksiyonu üzerine kurulu bir PID tabanlı kontrolör Simulink ortamında uygulanmıştır.

6.3.1 Kapalı Çevrim Pozisyon Kontrol Modelinin Yapısı

Tutucunun, kapalı çevrim kuvvet kontrol sistemi şekil 6.5'de gösterilen blok diagramdaki gibi referans giriş ile çıkış pozisyonu arasındaki hata sinyaline dayalı olarak çalışan bir PID kontrolör içermektedir. Bu şekilde bir çift döngü kontol çevrimi oluşturulmuştur, kuvvet kontrolü Kontrolör çıkışı, motor sürücüsüne uygulanan konum komutunu belirler. Geri besleme döngüsü, sistem çıkışının doğrudan ölçülmesi ve kontrolörle karşılaştırılmasını sağlar. Sistem bloğuna ek

olarak; bozucu titreşim, ölçüm gürültüsü ve viskoz sürtünme etkileri de modele dahil edilmiştir.



Şekil 6. 5 Kapalı çevrim pozisyon kontrolüne ait Simulink blok diyagramı

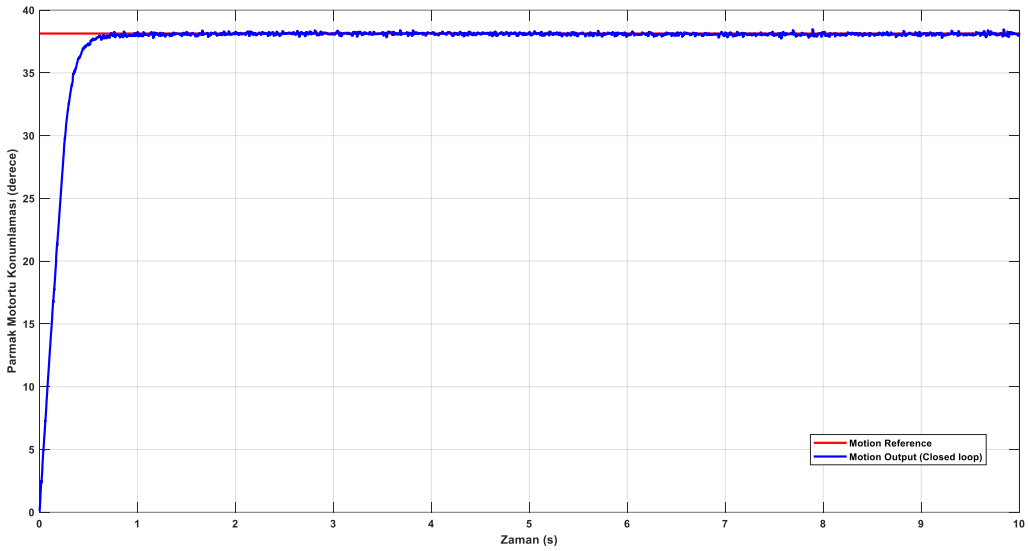
PID kontrollör transfer fonksiyonu (6.7) formülde gibidir:

$$PID(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d\, N}{1 + \frac{N}{s}} \tag{6.7}$$

PID kontrollörün kazanç parametreleri $K_p = 1.5, K_i = 0.6$ ve $K_d = 0.01$ şeklinde belirlenmiştir ve Kontrok katsayısı *N* ise değeri 100'dür. Sisteme uygulanan kontrol sinyali, dış titreşim bozucusu *d(t)* ve viskoz sürtünme momenti F_S ile birlikte (6.8) formülde toplam giriş olarak tanımlanır.

$$u(t) = u_{PID}(t) + d(t) - b\frac{d\theta(t)}{d(t)} \tag{6.8}$$

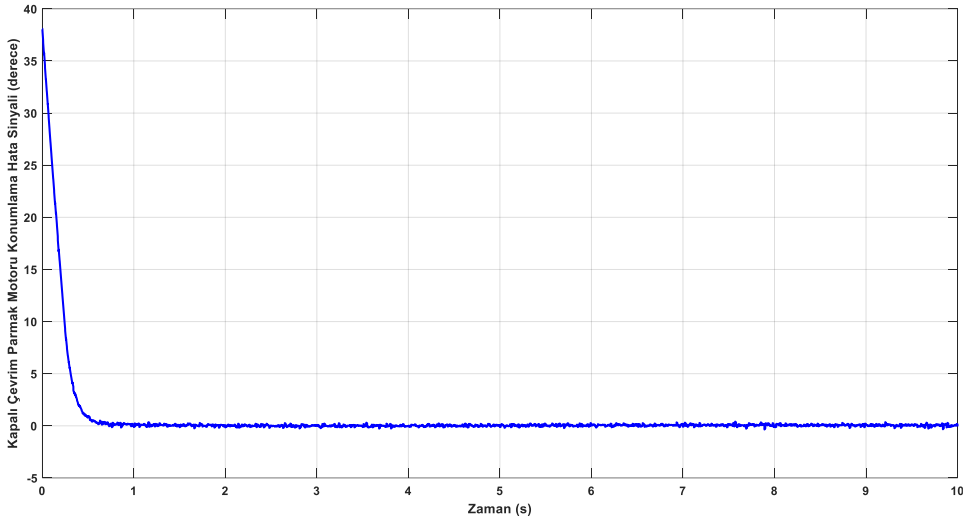
(6.8) formülünde b=1 olarak belirlenmiştir. Ölçüm gürültüsü çıkış sinyaline band-sınırlı beyaz gürültü olarak eklenmiştir. Sistemin referans pozisyon sinyaline göre çıkış pozisyonu şekil 6.6'de gösterilmiştir. görüldüğü üzere sistem yaklaşık 1 saniyede kararlı duruma geçerek referans pozisyonuna ulaşmakta ve salınım göstermemektedir.



Şekil 6. 6 Kapalı çevrim kontrollü sistemin davranışı

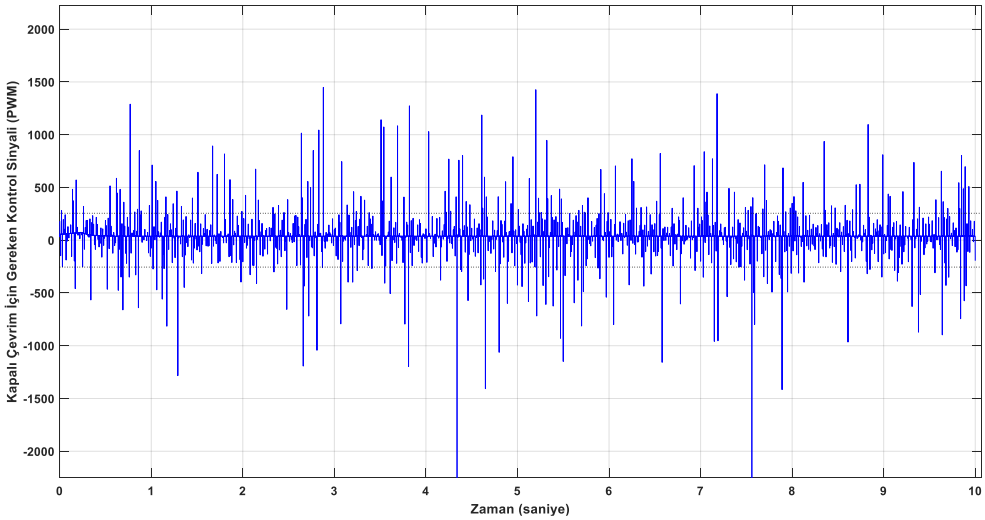
Bu durum, PID kazançlarının etkili bir şekilde ayarlandığını ve sistemin hızlı cevap verdiğini göstermektedir. Gürültüye ve dış bozuculara rağmen sapma miktarının düşük kalması, sistemin dayanıklılığını ve hassasiyetini ortaya koymaktadır.

Sistemin referans ile çıkışı arasındaki fark olan hata sinyali şekil 6.7'da gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, başlangıçta yüksek olan hata değeri kısa süre içerisinde sıfıra yaklaşmakta ve minimum dalgalanma ile kontrol sağlanmaktadır.



Şekil 6. 7 Kapalı çevrimde konum hata sinyali

Bu sonuç, PID denetleyicinin integral bileşeni sayesinde kalıcı hata olmadığını, türevsel bileşeniyle de sistemdeki ani değişimlerin sönümlendiğini göstermektedir. PID kontrolöründen çıkan PWM kontrol sinyali de incelenmiştir. Şekil 6.8'deki incelenen sinyal; sistemin referans pozisyona ulaşıncaya kadar aktif bir kontrol gerçekleştirdiği, ardından salınım ve bozuculara tepki verdiği gözlemlenmektedir.



Şekil 6. 8 Kapalı çevrim konumlama kontrolü için gereken kontrol sinyali

PWM sinyalinin ani sıçramaları, sistemin hem dışsal bozuculara hem de ölçüm gürültüsüne tepki verdiğini göstermektedir. Ancak bu durum sistem kararlılığını etkilememektedir.

Sonuç olarak, kapalı çevrim kontrol simülasyonu ile sistemin daha hızlı bir şekilde ve yüksek doğrulukla referans pozisyona ulaşabildiği, bozuculara karşı dayanıklı

bir yapı sergilediği ve PID parametrelerinin başarıyla ayarlandığı görülmüştür. Bu yapı, ileri düzey kontrol stratejileri için sağlam bir temel oluşturmuştur.

6.4 Kapalı Çevrim Kuvvet Kontrolü

Bu bölümde, esnek yüzeyli robotik parmaklı tutucunun kuvvet kontrollü çalışma performansı incelenmiştir. Sistemin; referans kuvveti takip etme performansı analiz edilmek için Simulink ortamında gerçekleştirilip kapalı çevrim kontrol sistemi olarak değerlendirilmiştir. Kuvvet kontrolü; pozisyonla kontrol edilemeyen dışsal temas koşulları, cisim yüzeyi farklılıkları ve deformasyon gibi belirsizlikleri dengelemek adına kritik öneme sahiptir.

6.4.1 Kapalı Çevrim Kuvvet Kontrol Modeli

Şekil 6.9'da Kuvvet kontrol yapısı, uygulanan kuvvetin referans kuvvet ile karşılaştırılmasıyla oluşan hata sinyalinin PID denetleyiciye iletilmesi ve elde edilen PWM çıkışının servo motora uygulanması temelinde çalışır. Bu yapıda kullanılan PID kontrolör, sürekli-zamanlı ve paralel formdadır. Kontrollörin matematiksel modeli (6.9) formülde gibi modellenmiştir:

$$PID(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d N}{1 + \frac{1}{sN}} \tag{6.9}$$

PID kazançları deneysel olarak belirlenmiş ve sistemin performansına göre aşağıdaki şekilde atanmıştır:

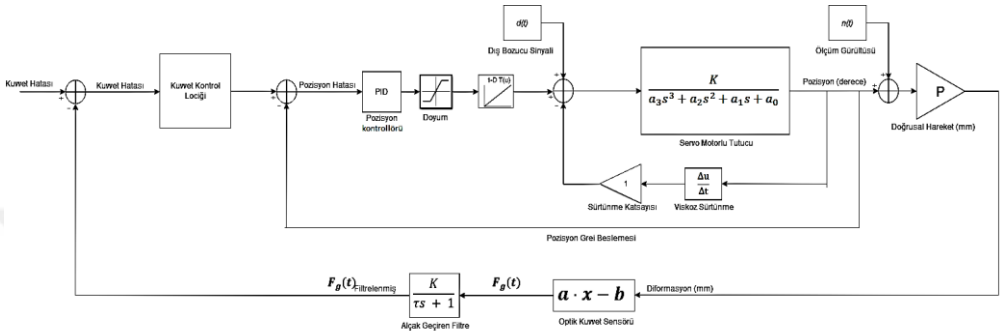
- $K_p = 3.4$: oransal kazanç
- $K_i = 2.25$: integral kazanç
- $K_d = 0.2$: türevsel kazanç
- $N = 100$: türev filtresi katsayısı

Ayrıca kontrolör çıkışı satürasyon bloğu ile sınırlandırılmıştır:

- Alt sınır: 2.5
- Üst sınır: 12.5

Bu sınırlandırma sonucunda oluşabilecek entegral birikimi için geri hesaplama yöntemi kullanılmış ve anti-windup kazancı olarak $K_b = 0.9$ atanmıştır.

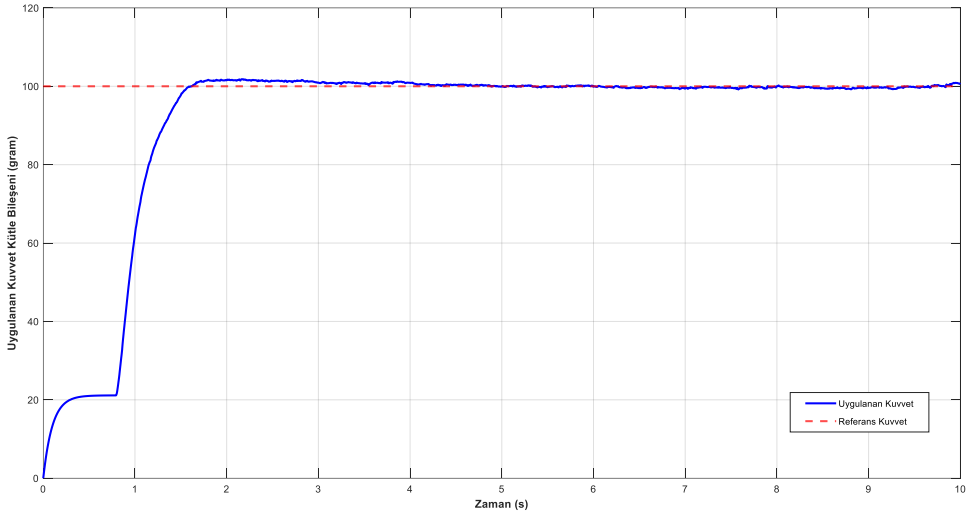
Önceki bölümlerde (4.16) forümlde belirlenen optik kuvvet sensör matematiksel modeli, çıkışı deformasyon değerine bağlı olup geri besleme bileşeni olarak kullanılmıştır Sisteme eklenen bozucu sinyal $d(t)$ ve ölçüm gürültüsü $n(t)$, önceki bölümlerde (6.4) ve (6.5) tanımlanan modeller doğrultusunda Simulink yapısına dahil edilmiştir.



Şekil 6.9 Kuvvet kapalı çevrim kontrolü block diyagramı

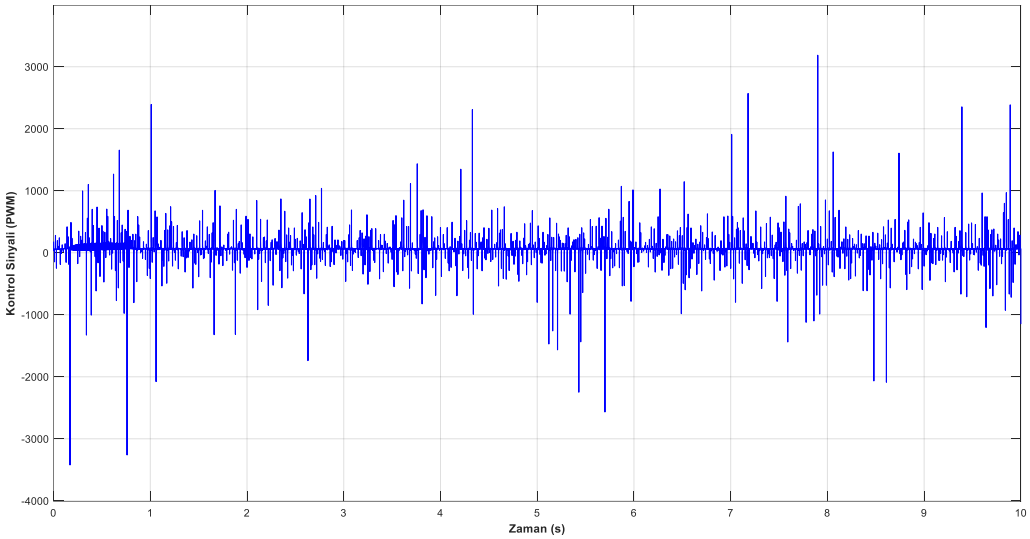
Şekil 6.10'daki simülasyon sonucuna göre sistem, referans kuvvetin kütle bileşeni 100 gram olan değerine yaklaşık 1.8 saniyede ulaşmaktadır. Bu seviyedeki görünen salınımlar sensörün silikon yüzeyinin küçük deformasyonlarından dolayı ortaya gelmektedir.

Bu salınım incelendiğinde yaklaşık $\mp 3g$ olduğunu görülmektedir, bu da önceki bölümlerde (4.18)'da sensörün hesaplanan mutlak hatası aralıkları içinde olduğu için tolere edilebilmiştir. PID kontrolörün başarıyla ayarlanması sonucu elde edilen çıkış, hem hızlı hem de kararlı bir yanıt göstermektedir. Referans ve uygulanan kuvvet arasındaki fark ihmal edilebilir seviyededir.



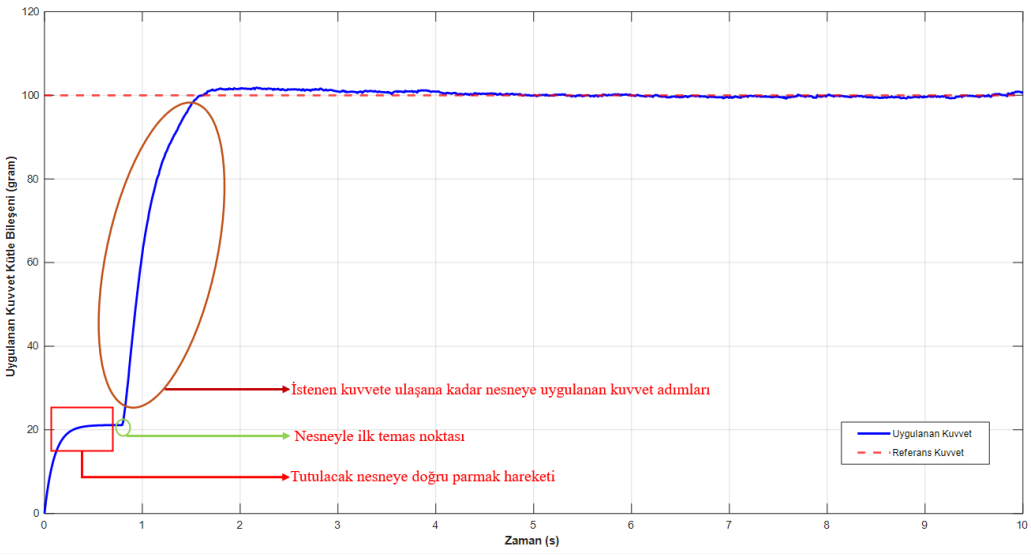
Şekil 6. 10 Kapalı çevrim kuvvet kontrolü sistem cevabı

Kuvvet kontrol sisteminin çıkışında üretilen PWM sinyali, sistemin referans kuvvete ulaşana dek aktif kontrol sağladığını göstermektedir. Sistemin karmaşık dinamik yapısı ve model içerisindeki bozuculara rağmen PWM sinyali, uygulanan kuvvetin dengede kalmasını sağlayacak şekilde tepki vermektedir.



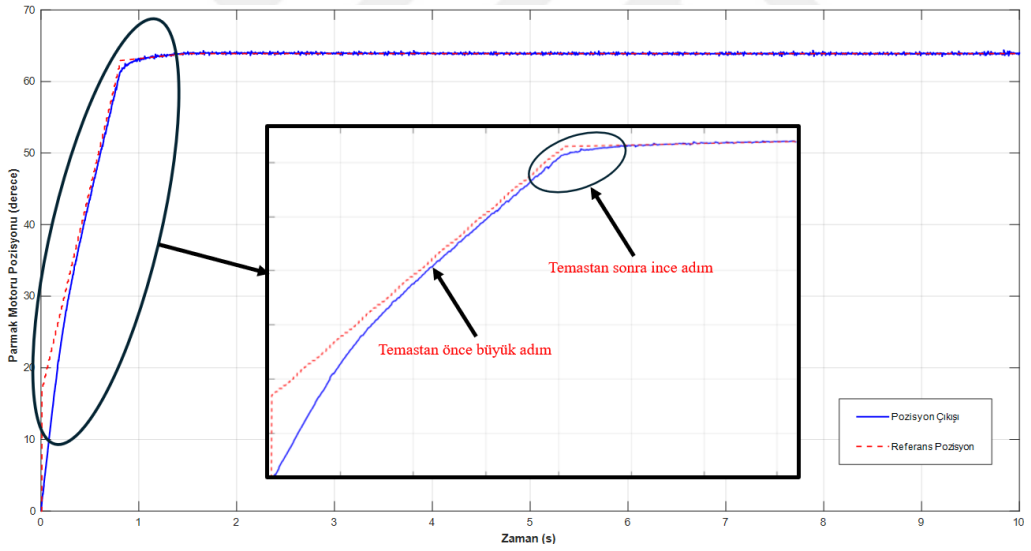
Şekil 6. 11 Kapalı çevrim kuvvet kontrolü için gereken kontrol sinyali

Kuvvet kontrol algoritması, ilk temas gerçekleşene kadar pozisyon komutlarını büyük adımlarla üretmekte, temas algılandıktan sonra ise 0.6 mm hassasiyetle adım adım ilerlemektedir. Bu durum, hassas nesne tutuşu açısından önemli bir özelliktir. **Şekil 6. 12**'daki grafikte detaylı şekilde verilmektedir.



Şekil 6. 13 Kuvvet-zaman grafiği üzerinde açıklamalı sistem davranışı

Servo motorun açısal pozisyonu, sistemin kuvvet kontrol süreci boyunca izlediği adım geçişlerini göstermiştir. Başlangıçta büyük açısal hareketler gözlenirken, temas sonrasında küçük adımlarla hedef konuma ulaşılmıştır.



Şekil 6. 14 Pozisyon geçiş grafiği

Sonuç olarak geliştirilen kapalı çevrim kuvvet kontrol sistemi, hassas nesnelerle teması zararsız biçimde gerçekleştirebilmekte, kuvveti kontrollü bir şekilde artırmakta ve dışsal bozuculara karşı kararlı yanıtlar sunabilmektedir. Gerçek ortama entegre edilebilecek düzeyde başarı sağlamıştır.

SONUÇ

Bu tez çalışmasında, esnek silikon yüzeye sahip optik kuvvet sensörlü bir robotik parmak gripper sistemi tasarlanmış, modellenmiş ve kontrol edilmiştir. Çalışmanın temel amacı, hassas nesnelerin güvenli ve kontrollü şekilde tutulabilmesini sağlayacak bir sistemin geliştirilmesidir. Bu doğrultuda hem mekanik tasarım hem de kontrol altyapısı detaylı şekilde ele alınmıştır.

Gerçekleştirilen sistem tanılama süreci sonucunda, gripper sisteminin üçüncü dereceden bir transfer fonksiyonu ile ifade edilebileceği belirlenmiş; bu model üzerinden açık ve kapalı çevrim pozisyon kontrol sistemleri tasarlanmıştır. Pozisyon kontrolü kapsamında öncelikle bozucu etkiler ve ölçüm gürültüleri göz önünde bulundurularak açık çevrim analizleri yapılmış, ardından PID temelli bir kapalı çevrim kontrol stratejisiyle sistem performansı iyileştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin referans konuma hızlı ve kararlı biçimde ulaşabildiğini göstermiştir.

Bununla birlikte, sistemin kuvvet kontrolü de kapsamlı şekilde ele alınmıştır. Esnek yüzeye entegre edilen optik sensör üzerinden elde edilen kuvvet geri beslemesi, yine PID tabanlı bir kontrol algoritmasıyla işlenmiş; kuvvet referansına göre sistemin uyarlanabilir şekilde hareket etmesi sağlanmıştır. Kuvvet kontrolü simülasyonlarında, hem düşük hem de yüksek kuvvet referansları için başarılı bir tutuş elde edilmiş, sistemin aşırı kuvvet uygulamadan hedef nesneye temas sağlayabildiği gösterilmiştir.

Sonuç olarak, geliştirilen robotik gripper sistemi; hassas, uyarlanabilir ve kontrol edilebilir yapısıyla yumuşak robotik tutuş uygulamaları için uygun bir aday olduğunu kanıtlamıştır. Gelecek çalışmalar kapsamında, sistemin fiziksel prototipi üzerinden gerçek zamanlı deneyler gerçekleştirilerek kontrol algoritmalarının pratik geçerliliği test edilebilir. Ayrıca, farklı malzeme özelliklerine sahip gripper yüzeyleri ve daha gelişmiş kontrol teknikleriyle sistemin hassasiyeti ve tepkiselliği artırılabilir.

KAYNAKÇA

[1] G. J. Monkman, S. H. Hesse, R. Steinmann, and H. Schunk, Robot Grippers. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2007. doi: 10.1002/9783527610280.

[2] S. Hirose and Y. Umetani, "The development of soft gripper for the versatile robot hand," Mechanism and Machine Theory, vol. 13, no. 3, pp. 351–359, 1978. doi: 10.1016/0094-114X(78)90059-9.

[3] A. Gasparetto and L. Scalera, "From the Unimate to the Delta robot: The early decades of industrial robotics," in Explorations in the History and Heritage of Machines and Mechanisms, Cham, Switzerland: Springer, 2019, pp. 284–295. doi: 10.1007/978-3-030-03538-9_23

[4] G. Rateni, M. Cianchetti, G. Ciuti, A. Menciassi, and C. Laschi, "Design and development of a soft robotic gripper for manipulation in minimally invasive surgery: A proof of concept," *Meccanica*, vol. 50, no. 11, pp. 2855–2863, 2015, doi: 10.1007/s11012-015-0261-6.

[5] P. V. P. Reddy and V. V. N. S. Suresh, "A review on importance of universal gripper in industrial robot applications," Int. J. Mech. Eng. Robot. Res., vol. 2, no. 2, pp. 255–263, Apr. 2013. doi: 10.18178/ijmerr.

[6] F. Dimeas, D. V. Sako, V. C. Moulianitis, and N. A. Aspragathos, "Design and fuzzy control of a robotic gripper for efficient strawberry harvesting," Robotica, vol. 33, no. 6, pp. 1085–1098, 2015, doi: 10.1017/S0263574714001155.

[7] G. D. Goh, G. L. Goh, Z. Lyu, M. Z. Ariffin, W. Y. Yeong, G. Z. Lum, D. Campolo, B. S. Han, and H. Y. A. Wong, "3D printing of robotic soft grippers: Toward smart actuation and sensing," Adv. Mater. Technol., vol. 7, no. 1, Art. no. 2101672, 2022, doi: 10.1002/admt.202101672.

[8] S. Cortinovis, G. Vitrani, M. Maggiali, and R. A. Romeo, “Control methodologies for robotic grippers: A review,” Actuators, vol. 12, no. 8, p. 332, Aug. 2023, doi: 10.3390/act12080332.

[9] P. M. Tracey, "Intrinsic fiber-optic sensors," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 1, pp. 96-98, Jan.-Feb. 1991, doi: 10.1109/28.67537.

[10] S. Y. Nof (Ed.), Handbook of Industrial Robotics, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 1999. doi: 10.1002/9780470172506.

[11] J. Peirs, J. Clijnen, D. Reynaerts, H. Van Brussel, P. Herijgers, B. Corteville, and S. Boone, A micro optical force sensor for force feedback during minimally invasive robotic surgery,” ens. Actuators A Phys., vol. 115, no. 2–3, pp. 447–455, Sep. 2004, doi: 10.1016/j.sna.2004.04.057.

[12] H. Su, I. I. Iordachita, J. Tokuda, N. Hata, X. Liu, R. Seifabadi, et al., Fiber-optic force sensors for MRI-guided interventions and rehabilitation: A review,” IEEE Sens. J., vol. 17, no. 7, pp. 1952–1963, Apr. 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2654489.

[13] J. Hughes, U. Culha, F. Giardina, F. Guenther, A. Rosendo, and F. Iida, “Soft manipulators and grippers: A review,” Front. Robot. AI, vol. 3, p. 69, 2016, doi: 10.3389/frobt.2016.00069.

[14] L. S. Lincoln, M. Quigley, B. Rohrer, C. Salisbury, and J. Wheeler, “An optical 3D force sensor for biomedical devices,” in Proc. IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics (BioRob), 2012, pp. 799–804, doi: 10.1109/BioRob.2012.6290820.

[15] K. Takács, A. Mason, L. B. Christensen, and T. Haidegger, “Robotic grippers for large and soft object manipulation,” IEEE Access, vol. 8, pp. 191144–191163, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3032093.

[16] J. Amend, N. Cheng, S. Fakhouri, and B. Culley, “Soft Robotics Commercialization: Jamming Grippers from Research to Product,” *Soft Robot*, vol. 3, no. 4, pp. 213–222, Dec. 2016, doi: 10.1089/soro.2016.0021.

[17] G. N. Bakalidis, E. Glavas, N. G. Voglis, and P. Tsalides, “A flow-cell optosensor for lead based on immobilized dithizone,” Sens. Actuators B Chem., vol. 29, no. 1, pp. 77–82, 1995, doi: 10.1016/0925-4005(95)01556-3.

[18] J. W. Lincoln and M. C. Lucas, “An optical 3D force sensor for biomedical devices,” in Proc. IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics (BioRob), 2012, pp. 799–804, doi: 10.1109/BioRob.2012.6290820.

[19] Z. Cheng, X. Liu, Y. Lei, Q. Pan, and R. Li, “Development of a High-Precision Optical Force Sensor With μN-Level Resolution,” *IEEE Sens J*, vol. 22, no. 13, pp. 12738–12745, Jul. 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3176447.

[20] H. Wang, J. Cui, K. Tian, and Y. Han, “Three-degrees-of-freedom orientation manipulation of small untethered robots with a single anisotropic soft magnet,” Nat. Commun., vol. 14, no. 1, 2023, Art. no. 7068, doi: 10.1038/s41467-023-42783-5.

[21] J. Becedas, I. Payo, and V. Feliu, “Two-flexible-fingers gripper force feedback control system for its application as end effector on a 6-DOF manipulator,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 3, pp. 599–615, Jun. 2011, doi: 10.1109/TRO.2011.2132850.

[22] J. O. Templeman, B. B. Sheil, and T. Sun, “Multi-axis force sensors: A state-of-the-art review,” Sens. Actuators A Phys., vol. 302, 2020, Art. no. 111772, doi: 10.1016/j.sna.2019.111772.

[23] B. P. Huynh and Y.-L. Kuo, “Optimal fuzzy impedance control for a robot gripper using gradient descent iterative learning control in fuzzy rule base design,” Appl. Sci., vol. 10, no. 11, p. 3821, 2020, doi: 10.3390/app10113821.

[24] M. Tavakoli, A. Talasaz, and R. V. Patel, “Robotic grippers for minimally invasive surgery: State of the art and future directions,” IEEE Trans. Med. Robot. Bionics, vol. 1, no. 4, pp. 289–302, 2019, doi: 10.1109/TMRB.2019.2941945.

[25] R. Wen, K. Yuan, Q. Wang, S. Heng, and Z. Li, “Force-guided high-precision grasping control of fragile and deformable objects using sEMG-based force prediction,” IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 2, pp. 2762–2769, 2020. doi: 10.1109/LRA.2020.2974439.

[26] A. Note, “Optical force sensing—design considerations,” Application Note, Coherent Inc., 2023. (Datasheet).

[27] D. De Barrie, M. Pandya, H. Pandya, M. Hanheide, and K. Elgeneidy, “A deep learning method for vision-based force prediction of a soft Fin Ray gripper using simulation data,” Front. Robot. AI, vol. 8, 2021, Art. no. 631371, doi: 10.3389/frobt.2021.631371.

[28] S. I. Yaniger, “Force sensing resistors: A review of the technology,” Interlink Electronics White Paper, 2006. (Datasheet).

[29] H. Harasaki and J. S. Arora, “New concepts of transferred and potential transferred forces in structures,” Comput. Methods Appl. Mech. Eng., vol. 191, no. 3–5, pp. 385–399, 2001. doi: 10.1016/S0045-7825(01)00279-1.

[30] Á. Tar and G. Cserey, “Development of a low cost 3D optical compliant tactile force sensor,” in Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics (AIM), 2011, pp. 236–240, doi: 10.1109/AIM.2011.6027100.

[31] S. Hirose and K. Yoneda, "Development of optical six-axial force sensor and its signal calibration considering nonlinear interference," Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation, Cincinnati, OH, USA, 1990, pp. 46-53 vol.1, doi: 10.1109/ROBOT.1990.125944.

[32] M. Ramakrishnan, G. Rajan, Y. Semenova, and G. Farrell, “Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials,” Sensors, vol. 16, no. 1, p. 99, 2016, doi: 10.3390/s16010099.

[33] V. Kakani, X. Cui, M. Ma, and H. Kim, “Vision-based tactile sensor mechanism for the estimation of contact position and force distribution using deep learning,” Sensors, vol. 21, no. 5, p. 1920, 2021, doi: 10.3390/s21051920.

[34] A. A. Potdar, S. Fletcher, and A. P. Longstaff, “Performance characterisation of a new photo-microsensor based sensing head for displacement measurement,” *Sens Actuators A Phys*, vol. 238, pp. 60–70, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.sna.2015.12.007.

[35] *I. Yun, Ed., ‘Photodiodes - From Fundamentals to Applications’. InTech, Dec. 19, 2012. doi: 10.5772/3406.*

[36] Vishay Semiconductors, “BPW34, BPW34S Silicon PIN photodiode,” (datasheet), Vishay, 2015.

[37] F. Ravotti, M. Glaser, M. Moll and F. Saigne, "BPW34 commercial p-i-n diodes for high-level 1-MeV neutron equivalent fluence monitoring," 2007 9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, Deauville, France, 2007, pp. 1-8, doi: 10.1109/RADECS.2007.5205483.

[38] Texas Instruments, “OPT101 monolithic photodiode and single-supply transimpedance amplifier,”. (datasheet).

[39] K. Rembor, “Adafruit VEML7700 Ambient Light Sensor,” Adafruit Learning System, 2019. (Datasheet).

[40] M. H. Alzaim, S. Abu Zaid, G. B. Eid, C. F. Yaşar, M. Doğan, and O. Ferhanoğlu, “Design and development of a flexible optical force sensor for robotic applications,” in Proc. Int. Conf. Biomed. Adv. Technol. Syst. (ICBATS), United Arab Emirates, Apr. 2025. (İnceleme altında).

[41] J. G. Webster and H. Eren (Eds.), Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurement, 2nd ed., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014. doi: 10.1201/b15664.

[42] A. D. Helfrick and W. D. Cooper, Modern Electronic Instrumentation and Measurement Techniques, rev. ed. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1990. (Eski kaynak).

[43] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, 5th ed., Cham, Switzerland: Springer, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-19303-8.

[44] M. H. Alzaim and C. F. Yaşar, “Design and analysis of a soft-surface robotic finger gripper with optical force sensor,” in Proc. Int. Conf. Knowl. Eng. Commun. Syst. (ICKECS), India, 2025, doi: 10.1109/ICKECS65700.2025.11034812.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. M. H. Alzaim and C. F. Yaşar, "Design and Analysis of a Soft-Surface Robotic Finger Gripper with Optical Force Sensor," 2025 International Conference on Knowledge Engineering and Communication Systems (ICKECS), Chickballapur, India, 2025, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICKECS65700.2025.11034812.

2. Muhammed Halit ALZAİM, Sana Abu Zaid, Gharra Bostani Eid, Claudia Fernanda YAŞAR, Mustafa DOĞAN, and Onur FERHANOĞLU, “Design and Development of a Flexible Optical Force Sensor for Robotic Applications.”, ICBATS. United Arab Emirates, Apr. 2025. (under review)