

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**YILANSI ROBOT TASARIMI, TOPOLOJİ OPTİMİZASYON
ANALİZİ, İMALATI VE KONTROLÜ**

Yusuf COŞKUN

Yüksek Lisans Tezi

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mekatronik Mühendisliği Bilim Dalı

TEMMUZ 2024

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**YILANSI ROBOT TASARIMI, TOPOLOJİ OPTİMİZASYON ANALİZİ,
İMALATI VE KONTROLÜ**

Tez Yazarı
Yusuf COŞKUN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Muhammet AYDIN

TEMMUZ 2024
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Yılınsı Robot Tasarımı, Topoloji Optimizasyon Analizi, İmalatı ve Kontrolü

Yazarı: Yusuf COŞKUN

İlk Teslim Tarihi: 10.06.2024

Savunma Tarihi: 16.07.2024

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

| | | |
|-----------|--|--------------------------|
| Danışman: | Dr. Öğr. Üyesi Muhammet AYDIN Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi | <i>İmza</i> Onayladım |
| Başkan: | Dr. Öğr. Üyesi Serhat AKSUNGUR Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Arapgir Meslek Yüksekokulu | Onayladım |
| Üye: | Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇELİK Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi | Onayladım |

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Yılınsı Robot Tasarımı, Topoloji Optimizasyon Analizi, İmalatı ve Kontrolü” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

16.07.2024

Yusuf COŞKUN



ÖNSÖZ

Bu çalışmada, her eklemi hareketli olan, 8 eklemli ve 7 serbestlik dereceli bir yılanlı robot tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan robotun kütlesini ve hacmini azaltmak amacıyla, sonlu elemanlar analizi programı olan ANSYS bilgisayar destekli mühendislik yazılımı kullanılarak topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Bu optimizasyon süreci, robotun boyutlarını küçültmeyi ve böylece daha dar alanlarda hareket etmesini amaçlamaktadır. Tasarlanan robotun bir prototipi üretilmiş ve dinamik simülasyonlarla karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Yılanlı robotun hareket kabiliyetini artırmak için, serpantin ve yan dönme hareketleri hem simülasyon ortamında hem de fiziksel prototip üzerinde taklit edilmiştir.

Hem lisans hem de yüksek lisan öğrenim süresince bilgi birikiminden üst düzeyde yararlandığım ve tez çalışmalarım boyunca sorularımı asla cevapsız bırakmayan, bilgilerini açık bir şekilde aktaran değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Muhammet AYDIN'a gönülden teşekkürü borç bilirim.

Maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen arkadaşım Mekatronik Mühendisi Berkan BAYSEL'e, desteğini her zaman üzerimde hissettiğim babam Etem COŞKUN'a ve tüm aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yusuf COŞKUN
ELAZIĞ, 2024

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|-----------|
| ÖNSÖZ..... | iv |
| İÇİNDEKİLER | v |
| ÖZET | vi |
| ABSTRACT | vii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | viii |
| TABLolar LİSTESİ | x |
| EKLER LİSTESİ | xi |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | xii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. DOĞADAKİ CANLILARIN HAREKETİ | 6 |
| 2.1. Yılsanı Hareket Tipleri | 6 |
| 2.1.1. Serpantin Hareketi (Lateral Undulation) | 6 |
| 2.1.2. Doğrusal Hareket (Rectilinear Locomotion) | 7 |
| 2.1.3. Akordeon (Concertina)..... | 7 |
| 2.1.4. Yan Dönme (Sidewinding Locomotion) | 8 |
| 3. MODELLEME VE KONTROL | 9 |
| 3.1. Tasarım..... | 9 |
| 3.1.1. Rulman | 10 |
| 3.1.2. Gövde..... | 11 |
| 3.1.3. Kuyruk | 12 |
| 3.1.4. Kafa..... | 12 |
| 3.2. SimMechanics İle Dinamik Modelleme ve Konum Kontrolü | 13 |
| 3.3. Yılan Robotun Matematiksel Modeli | 18 |
| 3.4. Kinematik | 20 |
| 4. MATERYAL VE METOT | 24 |
| 4.1. Tüm Sistemin Statik Analizi..... | 24 |
| 4.2. Tüm Sistemin Modal (Doğal Frekans) Analizi..... | 28 |
| 4.3. Rijit Dinamik Analiz | 30 |
| 4.4. Topoloji Optimizasyonu | 34 |
| 4.4.1. Birinci Statik Analiz..... | 34 |
| 4.4.2. Optimizasyon | 37 |
| 4.4.3. İkinci Statik Analiz..... | 38 |
| 4.4.4. Eklem Parçasının Fiziki Prototipi..... | 39 |
| 4.4.5. Optimizasyon Sonucu Oluşan Modelin Analizleri..... | 41 |
| 4.5. Prototip Üretimi..... | 45 |
| 5. BULGULAR..... | 49 |
| 6. SONUÇLAR..... | 51 |
| KAYNAKLAR | 53 |
| EKLER | 56 |
| ÖZGEÇMİŞ | |

ÖZET

Yılanlı Robot Tasarımı, Topoloji Optimizasyon Analizi, İmalatı ve Kontrolü

Yusuf COŞKUN

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2024, Sayfa: xii + 55

Günümüzde robotik sistemler, teknolojinin hızlı ilerlemesiyle birlikte önemli ölçüde gelişmektedir. Özellikle, biyolojiden esinlenen robotlar, arama-kurtarma robotları gibi kritik alanlarda önemli ilerlemeler sağlamıştır. Doğal afetlerin artmasıyla birlikte, özellikle depremler gibi dar ve sıkışık alanlarda etkili bir şekilde çalışabilen robotların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu bağlamda, yılan benzeri robotlar, karmaşık ve erişilmesi zor alanlarda başarılı bir şekilde faaliyet gösterebilmeleriyle öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, dar alanlarda hareket etmesi öngörülen yılan benzeri bir robotun topoloji optimizasyonu, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Amaç, yapısal bütünlüğü ve mukavemeti koruyarak robotun kütle ve hacim açısından daha hafif hale getirilmesidir. Bu kapsamda, robotun özgün tasarımı, sekiz elemandan oluşacak şekilde yapılandırılmıştır. Dinamik analizler, serpantin ve yan dönme hareketlerinin modellenmesi yoluyla gerçekleştirilmiş ve bu modellerin fiziki prototip üzerinde test edilmesi sağlanmıştır. Robotun kontrolü, MATLAB'a bağlı SimMechanics arayüzünde PID kontrol metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, yılan benzeri robotların dar ve sıkışık alanlarda daha verimli ve etkili bir şekilde kullanılabilmesi için yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: FEA, Sonlu Elemanlar Yöntemi, ANSYS, Yılanlı Robot, SimMechanics, Topoloji Optimizasyonu

ABSTRACT

Design, Topology Optimization Analysis, Manufacturing and Control of Snake-like Robot

Yusuf COŞKUN

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechatronics Engineering

July 2024, Pages: xii + 55

Today, robotic systems are developing significantly with the rapid advancement of technology. In particular, biology-inspired robots have made significant progress in critical areas such as search and rescue robots. With the increase in natural disasters, the use of robots that can work effectively in tight and cramped spaces, such as earthquakes, is becoming widespread. In this context, snake-like robots stand out with their ability to operate successfully in complex and hard-to-reach areas.

In this thesis, the topology optimization of a snake-like robot, which is envisaged to move in tight spaces, is carried out using the finite element method. The aim is to make the robot lighter in terms of mass and volume while maintaining structural integrity and strength. In this context, the original design of the robot was configured to consist of eight elements. Dynamic analyses were performed by modeling the serpentine and side rotational motions and these models were tested on physical prototype. The control of the robot was realized using PID control method in SimMechanics interface connected to MATLAB. This study was carried out for more efficient and effective use of snake-like robots in narrow and cramped spaces.

Keywords: FEA, Finite Element Analysis, Ansys, Snake-like Robot, SimMechanics, Topology Optimization

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | Sayfa |
|-------------|---|
| Şekil 1.1. | Hirose'nin ACM R1 yılansı robotu [13]..... 3 |
| Şekil 1.2. | Burdick ve Chirikjan'ın tasarımı [14]..... 4 |
| Şekil 1.3. | Shan'ın yılansı robot tasarımı [15] 4 |
| Şekil 2.1. | Yanal dalgalanma hareketi..... 7 |
| Şekil 2.2. | Yılanın doğrusal hareketi [16] 7 |
| Şekil 2.3. | Yılanın akordeon hareketi [17] 8 |
| Şekil 3.1. | SolidWorks ortamında oluşturulan Prototip 10 |
| Şekil 3.2. | Tasarımda kullanılan 608zz rulman ölçüleri..... 11 |
| Şekil 3.3. | Gövde eklemi..... 11 |
| Şekil 3.4. | Kuyruk eklemi 12 |
| Şekil 3.5. | Kafa eklemi..... 12 |
| Şekil 3.6. | Matlab'a aktarılan robot modeli..... 13 |
| Şekil 3.7. | SimMechanics blok diyagramı 14 |
| Şekil 3.8. | PID kontrol bloğu 15 |
| Şekil 3.9. | Eklem derecesi..... 16 |
| Şekil 3.10. | Eklem açısının hata değeri 16 |
| Şekil 3.11. | PID kontrol ile yan dönme hareketi 18 |
| Şekil 3.12. | PID kontrol ile serpantin hareketi 18 |
| Şekil 3.13. | Serpenoidal hareket için oluşturulan simulink modeli..... 19 |
| Şekil 3.14. | Serpenoidal hareketi için konum değişimleri..... 20 |
| Şekil 3.15. | Koordinat Sistemleri 21 |
| Şekil 3.16. | İleri kinematik analiz için oluşturulan simulink modeli..... 23 |
| Şekil 4.1. | Sisteme uygulanan sınır koşulları 26 |
| Şekil 4.2. | Tüm sistemin toplam deformasyonu..... 26 |
| Şekil 4.3. | Tüm sistemin gerinim miktarı..... 27 |
| Şekil 4.4. | Tüm sistemin gerilme değeri 27 |
| Şekil 4.5. | Modal analiz sonuçları..... 29 |
| Şekil 4.6. | Robotun rezonansa uğradığı mod 30 |
| Şekil 4.7. | 30 derecelik hareket grafiği 31 |
| Şekil 4.8. | Yan dönme hareketi örneği..... 32 |
| Şekil 4.9. | Serpantin hareketi simülasyonu 32 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 4.10. | Serpantin hareketiyle alınan yol..... | 33 |
| Şekil 4.11. | Yan dönme hareket simülasyonu | 33 |
| Şekil 4.12. | Eklem sınır şartları..... | 35 |
| Şekil 4.13. | Eklem toplam deformasyonu | 35 |
| Şekil 4.14. | Eklem gerilme miktarı | 36 |
| Şekil 4.15. | Eklem gerinim miktarı | 36 |
| Şekil 4.16. | Optimizasyon sonucu oluşan eklem parçası | 37 |
| Şekil 4.17. | Yeniden tasarlanan model..... | 37 |
| Şekil 4.18. | Optimize edilen parçanın gerilme sonucu..... | 38 |
| Şekil 4.19. | Optimize edilen parçanın gerinim sonucu | 38 |
| Şekil 4.20. | Optimize Edilen Parçanın Deformasyon Sonucu..... | 39 |
| Şekil 4.21. | Optimizasyon öncesi hassas terazi ölçümü | 40 |
| Şekil 4.22. | Optimizasyon sonrası hassas terazi ölçümü..... | 40 |
| Şekil 4.23. | Aynı sınır şartları verilen robot..... | 41 |
| Şekil 4.24. | Optimizasyon yapılan robotun toplam deformasyon miktarı..... | 42 |
| Şekil 4.25. | Optimizasyon yapılan robotun gerilme miktarı | 42 |
| Şekil 4.26. | Optimizasyon yapılan robotun gerinme miktarı | 43 |
| Şekil 4.27. | Optimizasyon sonrası modal analiz | 44 |
| Şekil 4.28. | Rezonans değerleri..... | 45 |
| Şekil 4.29. | Üretilen prototip..... | 46 |
| Şekil 4.30. | Tasarlanan kontrol arayüzü..... | 47 |
| Şekil 4.31. | Test alanı..... | 48 |
| Şekil 4.32. | Prototibin serpantin hareketi | 48 |
| Şekil 4.33. | Prototibin yan dönme hareketi | 49 |

TABLULAR LİSTESİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Tablo 3.1. Serpantin Hareketi Konum Değerleri | 17 |
| Tablo 3.2. Yan Dönme Hareketi Konum Değerleri | 17 |
| Tablo 3.3. D-H Parametreleri Yerleşimi | 22 |
| Tablo 4.1. PLA Malzeme Özellikleri | 25 |
| Tablo 4.2. Statik Analiz Sayısal Sonuçları..... | 28 |
| Tablo 4.3. Modal Analiz Sayısal Sonuçları..... | 29 |
| Tablo 4.4. Her İki Modelin Karşılaştırma Tablosu | 39 |
| Tablo 4.5. Optimize Edilen Robotun Sonuçları | 43 |
| Tablo 4.6. Optimizasyon İşleminin Karşılaştırılması..... | 44 |
| Tablo 4.7. Optimizasyon Sonrası Modal Analiz Değerleri | 45 |

EKLER LİSTESİ

| | Sayfa |
|--|-------|
| Ek- 1: Matematiksel Model Kodu | 56 |
| Ek- 2: İleri Kinematik Hesaplama Kodu | 57 |
| Ek- 3: Kafa Eklemının Yeniden Tasarımı | 58 |



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

| | |
|---------------|-------------------------|
| F | : Kuvvet |
| f | : Frekans |
| M | : Moment |
| m | : Kütle |
| W | : Watt |
| ε | : Birim uzama (Gerinim) |
| σ | : Gerilme |
| α | : Amplitüd |
| β | : Faz farkı (radyan) |
| Φ | : Mod şekli |

Kısaltmalar

| | |
|-----|---|
| BDT | : Bilgisayar Destekli Tasarım |
| D-H | : Denavit Hartenberg |
| FEA | : Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi) |
| Hz | : Hertz |
| PID | : Proportional-Integral-Derivative (Kontrol) |
| PLA | : Biopolimer Polilaktik Asit |
| XML | : Extensible Markup Language (Genişletilebilir İşaretleme Dili) |

1. GİRİŞ

Günümüzde artan doğal afetler, özellikle depremler gibi trajik olaylar sırasında, göçük altında kalan canlılara geç ulaşılması veya hiç ulaşılabilmesi nedeniyle hayatlarını kaybetmektedirler. Bu tür olayların önlenmesi için, kokuya duyarlı hayvanların izlerini takip etme yöntemleri kullanılmıştır; ancak dar alanlara erişim gibi faktörler, canlılara ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Ayrıca, tehlikeli bölgelerde insan ve hayvan gibi canlıların arama kurtarma çalışmalarına katılması, canlıların hayatını riske atabilecek bir başka sorundur. Bu tür olayların önlenmesi amacıyla, dar alanlarda hareket edebilen, her eklemi hareketli olan yılan benzeri bir sürüngen robot tasarlanmıştır. Bu tasarımın amacı, arama kurtarma operasyonlarında canlı takibini, insan veya hayvan araştırmacılarından önce gerçekleştirerek, trajik olayların önüne geçilmesine katkıda bulunmaktır.

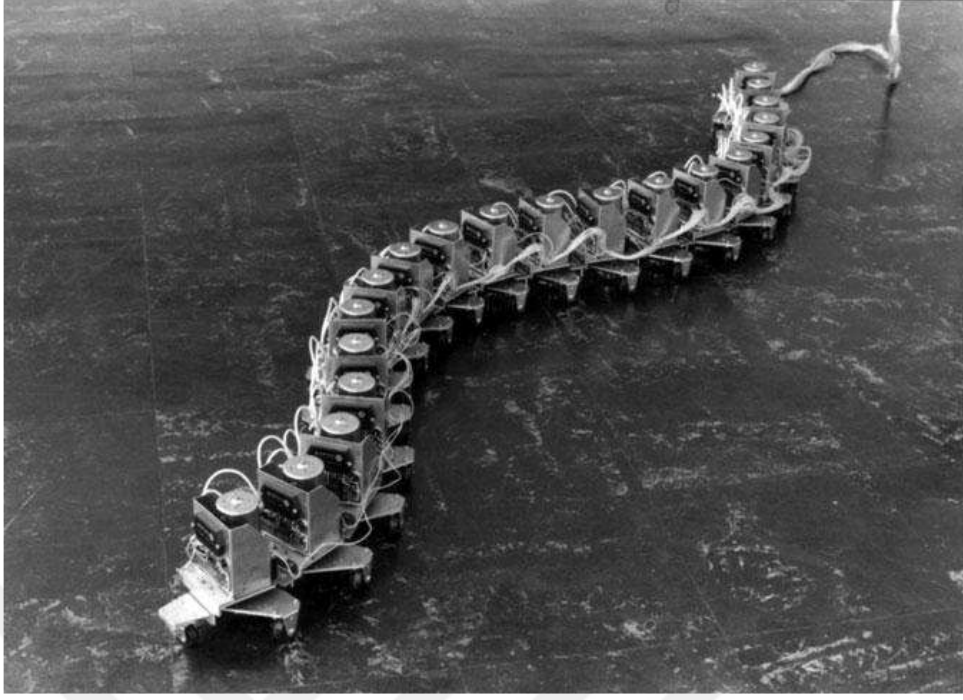
Robotik, farklı disiplinlerin bir araya geldiği ve programlanabilir makineler olan robotların çalışmalarını inceleyen bir alandır. Robotlar, çevreleriyle etkileşime girerek görevleri otonom veya yarı otonom olarak yerine getirebilirler. Bu işlevleri gerçekleştirebilmek için algılayıcılar, eyleyiciler ve kontrolcüler gibi bileşenlerle donatılmışlardır. Bu bileşenler, robotların çevrelerindeki durumları algılamalarını, planlamalarını ve eylemlerini yürütmelerini sağlayacak şekilde entegre edilmiştir [1]. Robotlar, özel amaçlı donanım ve yazılımdan oluşan fiziksel birer cihaz olarak tanımlanabilirler ve otonom olarak çalışabilirler [2]. Otonom bir şekilde faaliyet gösteren bir robotun işlevselliği ve karmaşıklığı giderek artabilir; hatta karmaşık gelişimsel dizileri, doğrudan insan müdahalesi olmadan kendi kendine organize edebilme yetisine sahip olabilirler [3]. Bu robotlar, hareketlilik, öz bakım, sosyal etkileşimler gibi çeşitli faaliyetleri yerine getirebilirler ve özellikle yaşlı bireylerin bağımsız yaşamlarını sürdürmelerine yardımcı olabilirler. Ek olarak, kullanım amaçlarına bağlı olarak, robotlar arkadaş, dost, asistan veya hizmetçi gibi farklı roller üstlenebilirler [4].

Biyomimetik, biyolojik sistemleri taklit eden robotlar tasarlamak ve geliştirmek için doğadan ilham alan büyüleyici bir robotik alandır. Bu robotlar, canlı organizmaların yapısını, işlevini ve davranışını taklit etmek için üretilmiştir. Biyomimetik robotlar, doğal sistemleri taklit ederek dikkate değer yetenekler ve verimlilikler elde edebilirler. Örneğin, biyomimetik yumuşak robotlar organik dokuların yumuşaklığını ve özelliklerini taklit eden hidrojel kullanırlar. Kendi kendini iyileştirme özelliklerinin avantajlı olduğu tıp gibi çeşitli alanlarda uygulama alanı bulmaktadırlar [5]. Biyomimetik robotların en önemli özelliklerinden biri doğal hareket ve davranışları taklit edebilmeleridir. Örneğin, gerçekçi gözlere ve doğal hareket modellerine sahip robotik balıklar, biyolojik çalışmalarda sosyal davranışları incelemek için kullanılmıştır. Bu robotlar, araştırmacıların hayvanlardaki kolektif hareket ve sosyal etkileşimleri anlamalarına yardımcı olmaktadır [6]. Biyomimetik robotlar, doğal afet müdahale senaryolarında kullanım potansiyeli

nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Doğadan ilham alan bu robotlar, afet müdahale çabalarına yardımcı olabilecek yetenekler sunmaktadırlar. Örneğin, biyomimetik robotlar, balık veya penguen gibi hayvanların hareketlerini ve davranışlarını taklit edecek şekilde tasarlanabilir ve böylece su altı arazileri gibi zorlu ortamlarda gezinmelerine olanak tanınabilir [7].

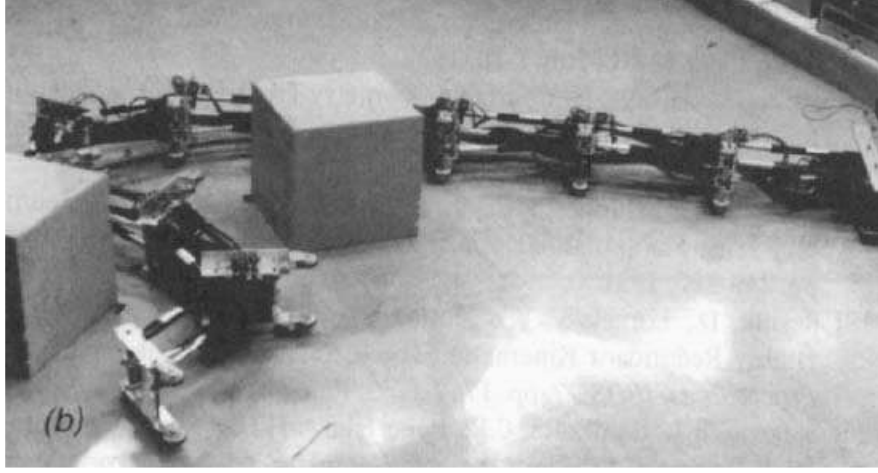
Gerçek yılanların hareketinden esinlenen yılan benzeri robotlar, biyomimetik robotik alanında kapsamlı araştırmalara konu olmuştur. Bu robotlar, afet müdahale senaryoları da dâhil olmak üzere çeşitli uygulamalar için çok uygun olmalarını sağlayan benzersiz yetenekler sergilemektedir. Yılan benzeri robotlar, doğal yılanların hareketlerini ve vücut şekillerini taklit ederek karmaşık ve düzensiz ortamlarda gezinebilirler, bu da onları afetten etkilenen bölgelerde arama ve kurtarma operasyonları gibi görevler için ideal hale getirir [8]. Ayrıca, yılan benzeri robotlar, modüler tasarım ve sürekli esnek yapı gibi özelliklerle geliştirilmiştir ve bu da onlara biyolojik yılanlara benzer esneklik ve uyarlanabilirlik sağlamaktadır [9]. Bu robotlar, gerçek yılanların hareketlerini taklit ederek, geleneksel tekerlekli robotlar için zorlu olan ortamlarda ilerleyebilmektedirler [10]. Yılan benzeri robotların afet müdahalesinde kullanılması, dar alanlarda, tünellerde ve borularda hareket etme yetenekleriyle umut vaat ettiğini göstermiştir ve bu da onları afetten etkilenen bölgelerde inceleme ve arama operasyonları gibi görevler için değerli varlıklar haline getirmektedir [11].

Japon bilim insanı Shiego Hirose'nin gerçekleştirdiği bilinen ilk çalışma, 1972 yılına dayanmaktadır. Hirose ile birlikte Umetami, yaklaşık 2 metre uzunluğunda yılan benzeri bir robot geliştirmişlerdir. Bu çalışma, yılanların Serpantin hareketlerini matematiksel olarak modellemeyi ve yılan benzeri robotların ileriye ve yana doğru hareketlerini sağlayan algoritmalar oluşturmaya amaçlamıştır. Robotun tasarımında her bir eklemde pasif tekerlekler kullanılmış ve eklemlere entegre edilen servo motorlar sayesinde robotun sağ-sol hareketleri sağlanmıştır. Şekil 1.1'de bu robotun tasarımı gösterilmektedir [12].



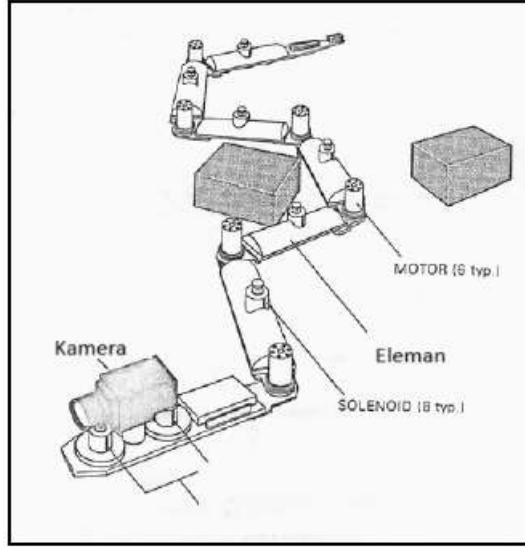
Şekil 1.1. Hirose'nin ACM R1 yılanı robotu [13]

Joel Burdick ve öğrencisi Greg Chirikjian, yılanların doğal hareket mekanizmalarını inceleyerek yılan benzeri robotların tasarımı ve kontrolü üzerine çalışmalar yapmışlardır. Burdick'in araştırmaları, yılan robotların hareket yeteneklerini geliştirmeyi, engelleri aşma kapasitelerini artırmayı ve dar alanlarda manevra yapabilme yeteneklerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmalar, yılan benzeri robotların tıbbi endoskopik cerrahi, arama-kurtarma operasyonları ve keşif görevlerinde kullanılma potansiyelini vurgulamaktadır. Burdick ve Chirikjian'ın geliştirdiği prototip, her biri 3 serbestlik derecesine sahip 10 segmentten oluşmaktadır. Her eklemden servo motorlar ile hareket kontrol edilirken, konum bilgisi için lineer potansiyometreler kullanılmıştır. Bu tasarım Şekil 1.2'de gösterilmektedir [13].



Şekil 1.2. Burdick ve Chirikjan'ın tasarımı [14]

Shan, kendi çalışmasında diğer araştırmacılar gibi her ekleme bir servo motor eklemiştir, ancak yılan robotunun hareket şekillendirme sistemini farklı bir şekilde tasarlamıştır. Shan, her ekleme birer selenoid kullanarak, selenoidin aktif olduğu uzvu kısıtlamış ve bu sayede robotun çalışma alanında kendi yönünü belirlemesini sağlamıştır. Shan'ın tasarımı Şekil 1.3'te gösterilmektedir [14].



Şekil 1.3. Shan'ın yılanı robot tasarımı [15]

2005 yılında, robotik ve otonom sistemler alanındaki gelişmeleri sergileyen amfibi yılan benzeri bir robot olan Amphibot I geliştirilmiştir [15]. 2008 yılında, yılan robotlarda engel destekli hareket araştırılarak yılanların verimli hareket için arazi düzensizliklerini nasıl kullandığı gösterilmiştir [8].

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde canlıların hareket tiplerinden, üçüncü bölümünde tasarım aşamalarından ve robotun eklem parçalarından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise, SolidWorks ortamında tasarlanan robot, Matlab/SimMechanics ara yüzünde dinamik olarak modellenmiş ve her eklemi PID kontrol metodu ile kontrol edilmiştir. Beşinci bölümde, literatürdeki araştırmalardan yararlanılarak sistemin matematiksel modeli anlatılmıştır. Model belirli denklemler kullanılarak Simulink ortamında oluşturulmuştur ve sonuçlar grafiksel olarak incelenmiştir. Ayrıca, kinematik model Denavit Hartenberg parametreleri kullanılarak dinamik model üzerinden oluşturulmuş ve aynı anda simüle edilmiştir. Altıncı bölümde tasarlanan modelin optimizasyon işleminden bahsedilmiş ve bu süreç detaylı olarak ele alınmıştır. Yedinci bölümde fiziksel prototip üretimiyle elde edilen bulgular verilmiş, sekizinci bölümde ise sonuçlar ve önerilerden bahsedilmiştir.



2. DOĞADAKİ CANLILARIN HAREKETİ

Doğada bulunan canlı türlerinin her birinin kendine özgü hareket kabiliyetleri bulunmaktadır. Yüzyıllar boyunca, bu hareketlerin çevresel koşullara bağlı olarak değiştiği ve evrildiği gözlemlenmiştir. Her canlının hareket tarzı, genellikle temas ettiği ortamla olan ilişkisinden kaynaklanır. İnsanlar, katı bir zemin üzerinde hareket etmek için ayaklarını kullanarak, yani bir dayanak noktası oluşturarak zemini iter. Diğer yandan, deniz canlıları su ortamında yaşadıkları için yüzgeç hareketiyle suyu iterler ve ilerlerler. Geniş bir perspektiften bakıldığında, aslında canlıların hareketindeki amaç aynıdır ancak bu amacı gerçekleştirmek için kullanılan yöntemler farklılık gösterebilir.

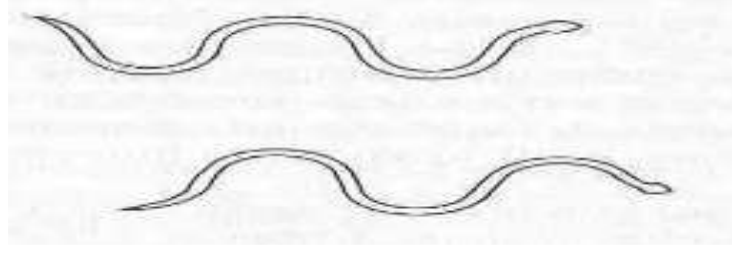
2.1. Yılanlı Hareket Tipleri

Yılanlar uzumsuz canlılar olduğundan hareketlerini gövde hareketleriyle gerçekleştirmektedirler. Yılanlar ortam koşullarına göre kendilerini korumak ve rahat hareket edebilmek için birçok hareket tipi geliştirmiştir. Bunların en bilindik olanları [16];

- Serpantin (Lateral Undulation)
- Doğrusal Hareket (Rectilinear Locomotion)
- Akordeon (Concertina)
- Yan Dönme (Sidewinding Locomotion)

2.1.1. Serpantin Hareketi (Lateral Undulation)

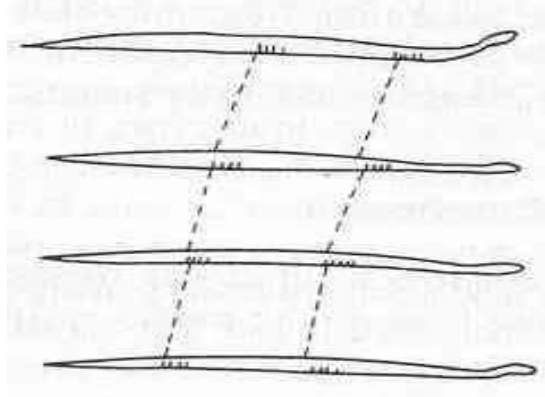
Yılanlar arasında en yaygın kullanılan hareket türü, serpantin (yanal dalgalanma) hareketidir. Bu hareket, yılanın gövdesiyle zemin arasındaki sürtünme sayesinde başından kuyruğuna doğru yayılan bir harekettir. Ancak, bu hareket düz ve kaygan zeminlerde etkili değildir, çünkü yılan, temas yüzeyinden itme kuvveti sağlayamaz. Bunun yerine, yılanın hareket için zemin üstünde bulunan taşlar, çimenler, bitkiler gibi unsurlardan itme alması gerekmektedir. Bu hareketin temel prensibi, yılanın yanal yönde hareket etmesiyle birlikte, başından kuyruğuna doğru bir itme oluşturmasıdır. Gövdedeki dalgalanma, yılanın tüm vücudu boyunca yayılarak bu hareketi oluşturur. Serpantin hareketi Şekil 2.1'de görüldüğü gibidir [16].



Şekil 2.1. Yanal dalgalanma hareketi

2.1.2. Doğrusal Hareket (Rectilinear Locomotion)

Doğrusal hareket, belirli yılan türlerinin sergilediği bir hareket şeklidir. Bu tür hareket, yılanların doğrusal bir doğrultuda ileri doğru hareket etmelerini ifade eder. Yılanlar, genellikle düz ve kaygan yüzeylerde veya su ortamlarında bu hareketi gerçekleştirirler. Bu hareket tipi, genellikle normal yılan boyutunun üzerinde olan yılanlar tarafından kullanılan bir harektir ve genellikle avlarına yaklaşmadan hemen önce gerçekleştirilir. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, bu hareket türü oldukça yavaş bir ilerlemeyi temsil eder, çünkü karın altındaki kasların kasılması ve pulların toprağa sıkıca temas etmesi, hareketin hızını yavaşlatır [16].

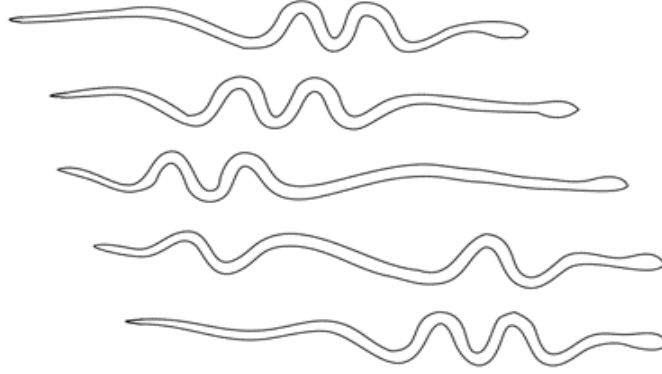


Şekil 2.2. Yılanın doğrusal hareketi [16]

2.1.3. Akordeon (Concertina)

Concertina hareketi sırasında, yılanın vücudu dalgalanır; ilerlemek istediği alana sıkışan kısmı genişlerken geri kalan kısmı daralır. Bu sayede yılan, dar alanlarda ilerleyebilir ve vücudunu engellere uyumlu hale getirerek hareket edebilir. Ancak, ivme ve hız düşüklüğü nedeniyle bu hareket diğerlerine göre verimsizdir. Bununla birlikte, diğer hareket türlerinden avantajlı kılan

yönü, dar alanlarda yılanın sapmadan doğru bir şekilde ilerleyebilmesidir. Şekil 2.3'te yılanın akordeon hareketi gösterilmektedir [17].



Şekil 2.3. Yılanın akordeon hareketi [17]

2.1.4. Yan Dönme (Sidewinding Locomotion)

Bu hareket türü genellikle kaygan zeminler veya kumlu yüzey koşullarında kullanılır. Yılan, hareket halindeyken sadece iki temas noktasına sahiptir. Kayma sürtünmesini azaltmak için, vücudu ile zemin arasındaki bazı temas noktalarını kesmesi gerekir. Bu teknik, kaymayı en aza indirerek, bazı yılanların kilometrelerce yol gitmesine olanak tanır [18].

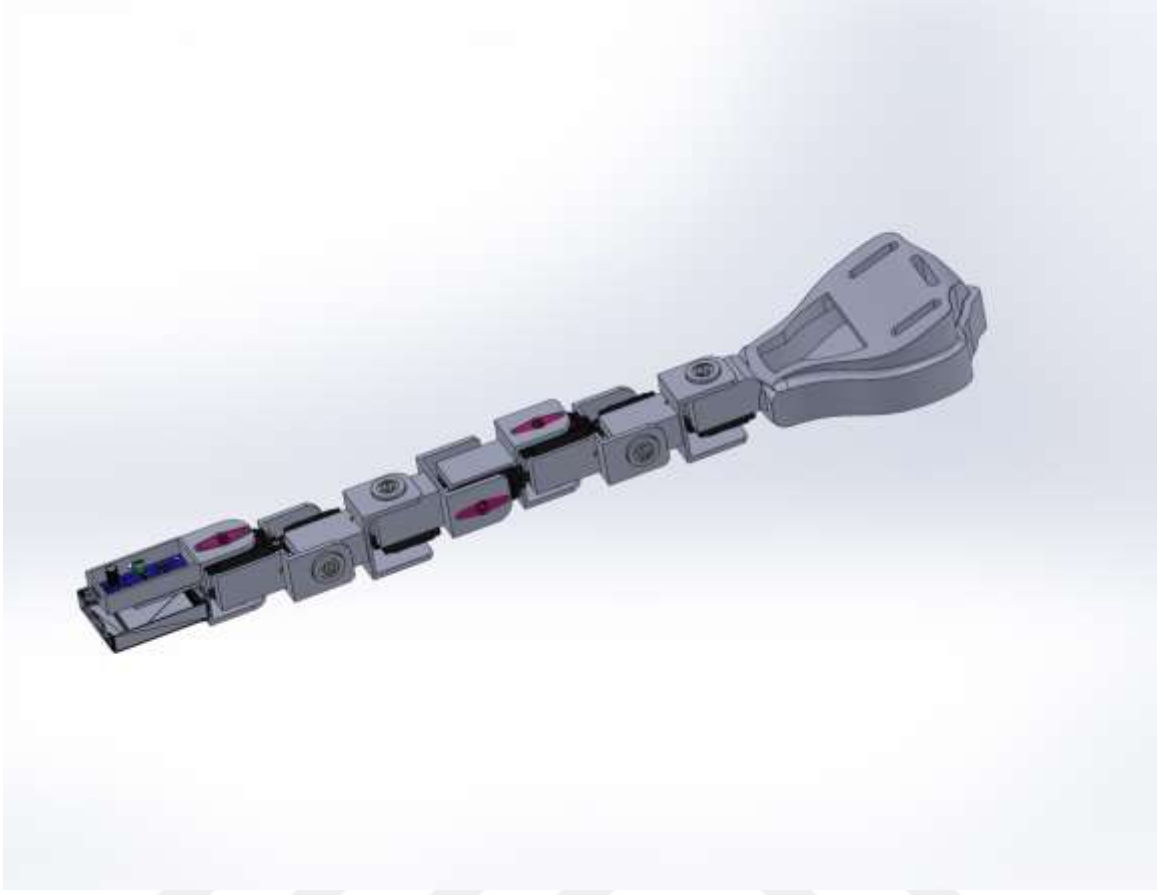
3. MODELLEME VE KONTROL

Bu bölümde, yılan benzeri robotun tasarımı ile birlikte bilgisayar destekli dinamik, kinematik ve matematiksel modelleri ele alınacaktır. Robotun tasarımı, SolidWorks yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş, modelleme çalışmaları ise MATLAB ortamında devam ettirilmiştir. Ayrıca, tasarlanan robot sisteminin konum kontrolü, MATLAB'a entegre SimMechanics arayüzünde PID kontrol yöntemi kullanılarak sağlanmıştır.

3.1. Tasarım

Bu bölümde SolidWorks paket programında modellenen robotun, tasarımından ve parçalarından bahsedilecektir.

Yılan benzeri robotun tasarımı sırasında, yılanların doğal esnek hareket kabiliyeti dikkate alınarak, her bir eklem hareketli olarak tasarlanmıştır. Bu robot tasarımında, bir kuyruk, bir kafa ve altı adet gövde parçası olmak üzere toplamda sekiz eklem bulunmaktadır. Bu parçalar, birbiriyle bağlanarak bütünsel bir gövde oluşturmak üzere monte edilmiştir. Robotun kuyruk bölgesinde katlı sistem tasarımı yapılarak elektronik kartlar yerleştirilmiştir. Yılanı robot prototipinin tasarımı SolidWorks ortamında gerçekleştirilmiş olup Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. SolidWorks ortamında oluşturulan Prototip

3.1.1. Rulman

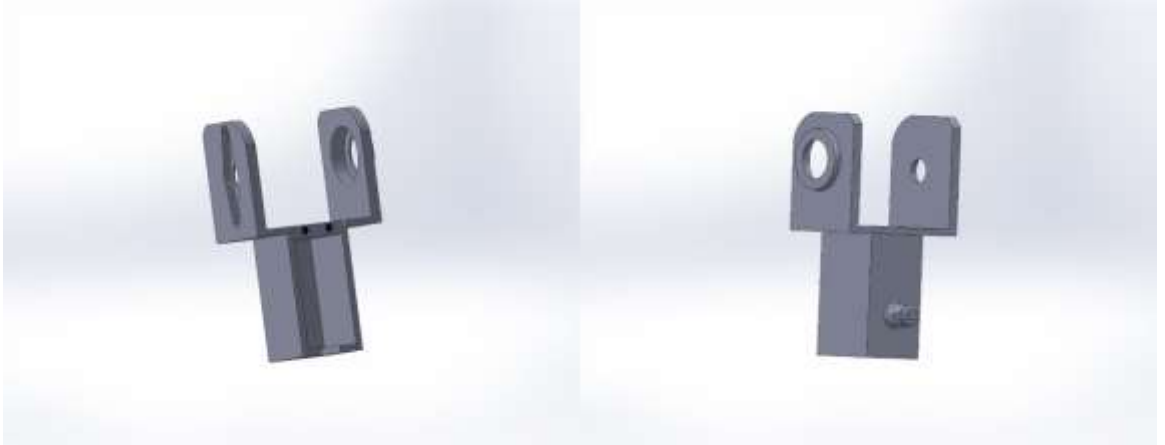
Robotun bağlantı noktalarında, hareketin daha verimli ve sürtünmesiz olması için her bir eklemden rulman kullanılmıştır. Böylece, robotun hareketinin akıcı ve etkili olmasını amaçlamaktadır. Her bir eklemin bağlantı uçları, rulmanların dış ve iç çap ölçüleri dikkate alınarak modellenmiştir. Tasarımda kullanılan rulman Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Tasarımda kullanılan 608zz rulman ölçüleri

3.1.2. Gövde

Robotun gövde kısmı, altı adet eklemden oluşmaktadır. Bu eklemler ardışık olarak birleştirilerek tek bir model oluşturur. Her bir gövde eklemi, hareket kabiliyetine sahiptir ve bu hareket gövdeye monte edilen servo motorlar aracılığıyla sağlanır. Tasarlanan modelin uzunluğu 92 mm ve genişliği 53 mm'dir. Tasarlanan modelin önlü ve arkalı görünümü Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Gövde eklemi

3.1.3. Kuyruk

Kuyruk kısmının tasarımı, elektronik kartların konumlandırılması için ve daha estetik görünmesi için katlı sistem olarak modellenmiştir. Servo motor kontrol kartı olan PCA 9685 ve Arduino UNO kontrolcü, robotun kuyruk kısmına yerleştirilmiştir. Kuyruğun uzunluğu 95 mm ve genişliği ise 54 mm'dir. Kuyruk tasarımı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Kuyruk eklemi

3.1.4. Kafa

Robotun kafa eklemi sağa ve sola hareket edecek şekilde tasarlanmıştır. Hareketin yönünü belirlemesi açısından önemli bir eklemdir. Robotun kafa eklemi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

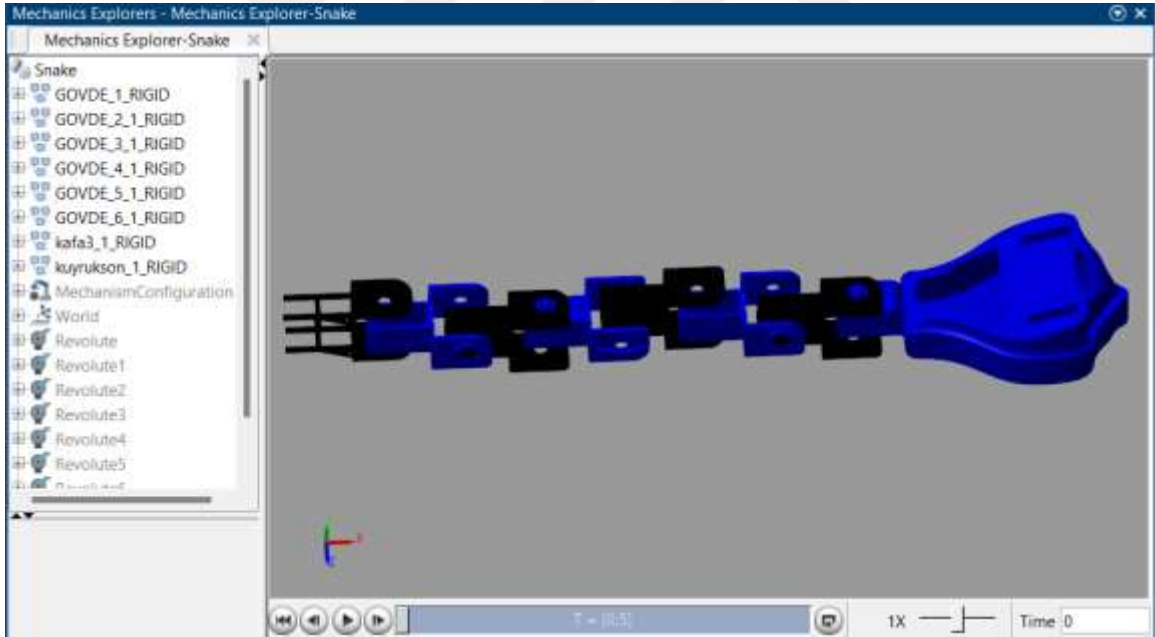


Şekil 3.5. Kafa eklemi

3.2. SimMechanics İle Dinamik Modelleme ve Konum Kontrolü

Bu bölümde, MATLAB/SimMechanics ara yüzü kullanılarak SolidWorks'te tasarlanan robot dinamik olarak modellenecek ve PID kontrol yöntemi ile konum kontrolü gerçekleştirilecektir. Robotun serpantin hareketi ve yan dönme hareketleri sırasında eklemlerin konumları PID blokları kullanılarak kontrol edilecektir.

PID kontrol yaklaşımı ile konumlandırılacak yılan robot modelinin üç boyutlu tasarımı için SolidWorks katı modelleme programı kullanılmıştır. Bu süreçte, yılan robot modelinin katı model olarak MATLAB/SimMechanics platformuna aktarılabilmesi için öncelikle SolidWorks kullanılarak bir XML dosyası oluşturulmuştur. Daha sonra, MATLAB'ın ana komut satırında "smimport" komutu kullanılarak bu XML dosyası ile yılan robot modelinin Simulink bloklarına dönüştürülmüş ve mekanizmanın tanımlanması gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem sayesinde, yılan robot modeli MATLAB ortamına başarılı bir şekilde aktarılmış ve katı model kullanılarak oluşturulan SimMechanics Simulink blokları, mekanizmanın simülasyonunda etkin bir şekilde kullanılmıştır. SolidWorks'ten Matlaba aktarılan robot modeli Şekil 3.6'da gösterilmektedir.

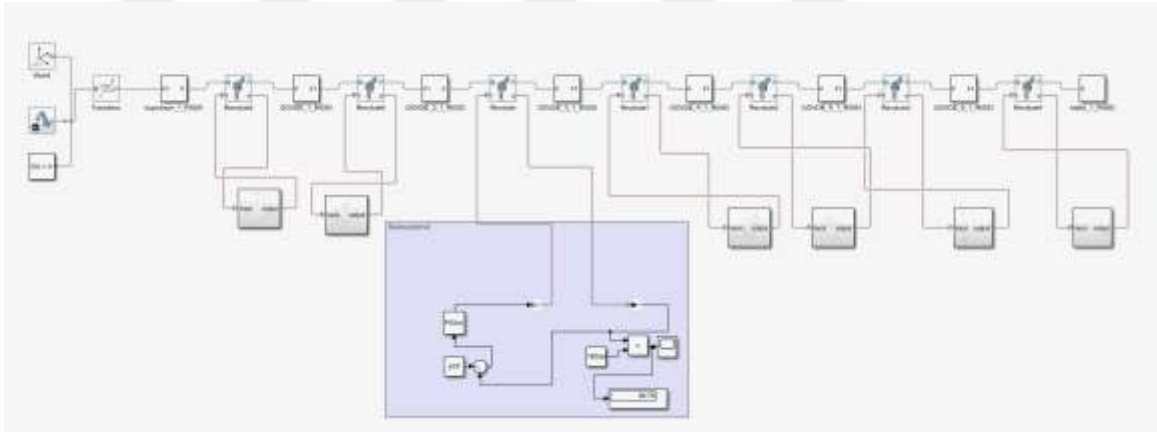


Şekil 3.6. Matlab'a aktarılan robot modeli

MATLAB içindeki bir araç olan Simulink'te PID kontrolü, çeşitli sistemleri kontrol etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. PID kontrolörü, istenen ayar noktası ile gerçek çıkış arasındaki hata sinyaline dayalı olarak bir sistemin çıkışını düzenlemek için oransal, integral ve türev kontrol eylemlerini birleştirir.

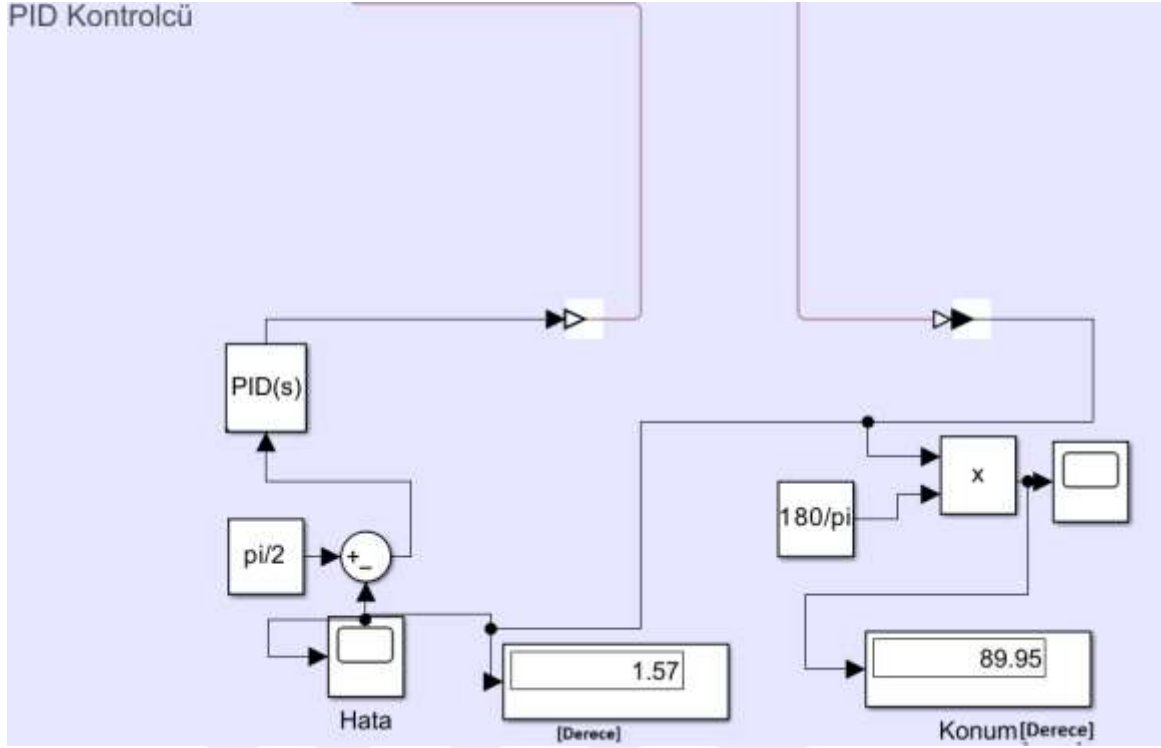
PID kontrolü, robotların konumunu, yörüngesini ve kararlılığını düzenlemek ve korumak için robotik sistemlerde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Kontrol girdilerini ayarlamak için algılayıcı verilerinin işlenmesini içerir ve robotun istenen bir yolu veya konumu doğru bir şekilde izlemesini sağlar [19]. PID kontrolörü, farklı sistem türlerini idare etme kabiliyeti, basitliği ve parametre ayarlama kolaylığı nedeniyle çeşitli robotik uygulamalarda çok yönlülüğü ve etkinliği açısından değerlidir [20].

SimMechanics'te pozisyon kontrolünü gerçekleştirmek için gerekli bloklar, Simulink'te PID kontrol aşamasının ilk adımı olarak eklenmiştir. Mekanizmanın diğer bileşenlerinin yerleşimini kontrol etmek, giriş elemanının veya robotun eklemlerinde motorun bulunduğu kısmının konumunu kontrol etmeyi gerektirir. Mekanizma yedi serbestlik derecesine sahip olduğu için yedi adet konum kontrolü oluşturulmuştur. Mekanizmanın PID kontrolü için oluşturulan blok diyagramı Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. SimMechanics blok diyagramı

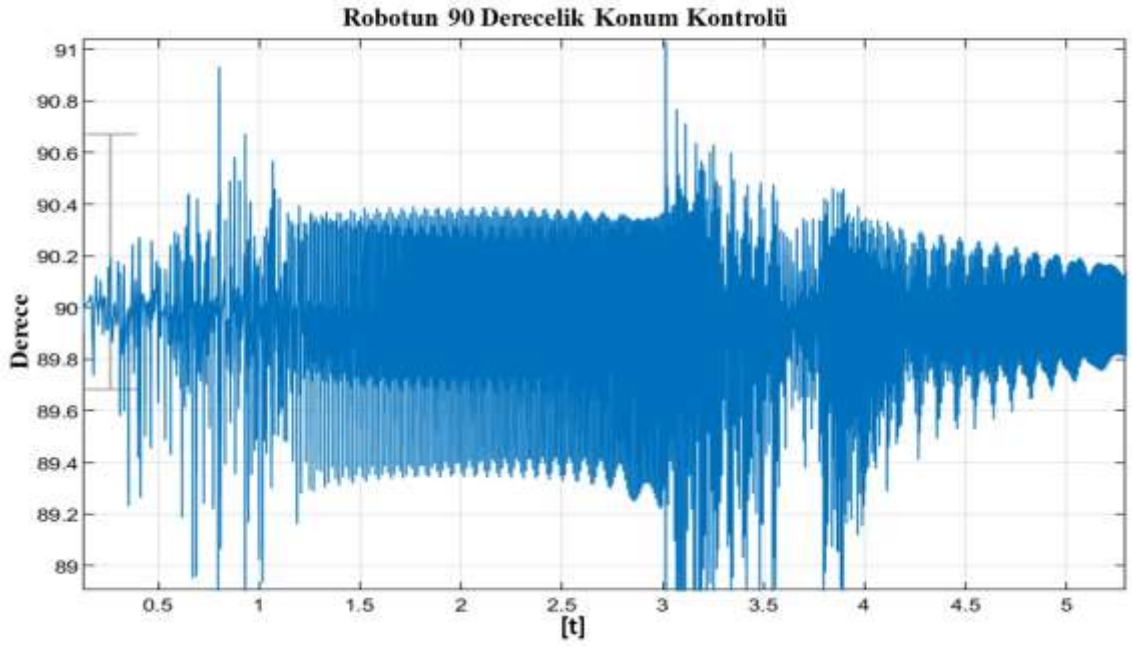
Bu model, yılan robotun serpantin ve yan dönme gibi karmaşık hareketlerini simüle etmek için kullanılmıştır. Her bir eklem için istenen açıyı elde etmek amacıyla PID kontrolü uygulanmıştır. Bu açılar derece cinsinden girilmiş ve PID bloğuna giriş sinyalleri olarak verilmiştir. Derece cinsinden giriş olarak verilen istenen açı, eklemin konumunu belirlemek için PID kontrolü tarafından işlenir. Genellikle, PID bloğunun çıkışı radyan cinsindedir. Ancak, istenilen açılar ve çıkışlar derece cinsinden tercih edilirse, PID bloğunun radyan cinsinden çıkışı dereceye çevrilir. Böylece, istenilen açılar hem sayısal hem de grafiksel olarak elde edilmiş olur. Şekil 3.8'de verilen örnekte, bir eklem üzerindeki 90 derecelik bir açının PID kontrolü analiz edilmektedir.



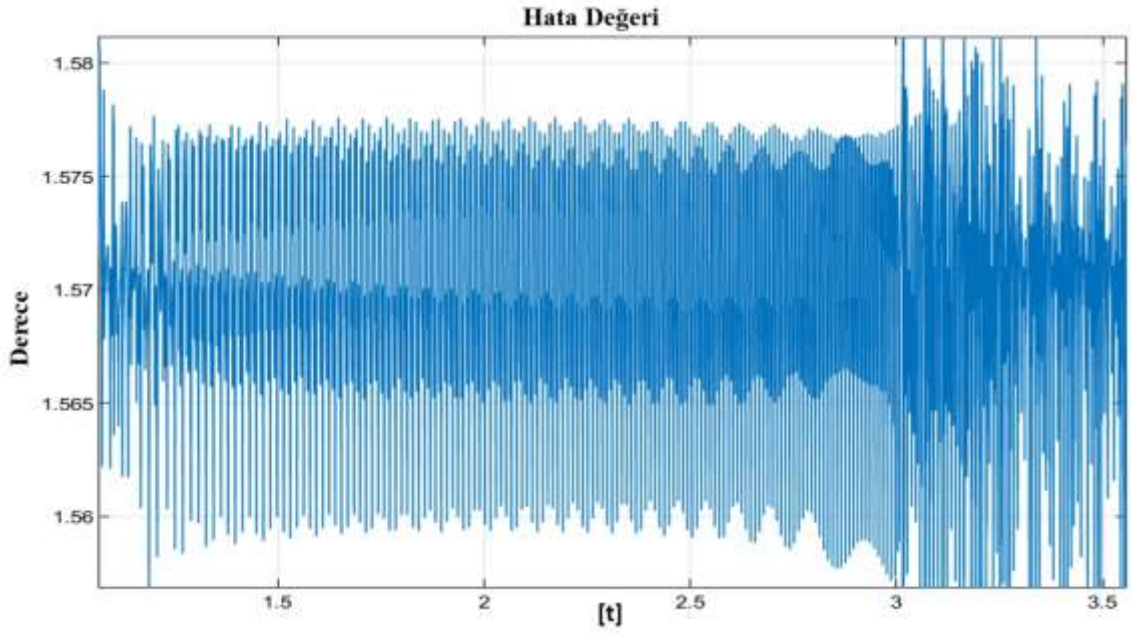
Şekil 3.8. PID kontrol bloğu

Bu örnekte, yılan robotun serpantin hareketi simüle edilmiştir. Robotun bir eklemının başlangıçtaki 90 derece olan açısı 45 dereceye düşürülmüş ve ardından başlangıç konumuna dönmek için tekrar 45 derece artırılmıştır. PID bloğu kullanılarak ani yükseliş veya düşüşler engellenmiştir. Ayrıca son konum olarak elde edilen sayısal çıkış 89.95 derece olarak bulunmuştur.

Şekil 3.9, eklem uzununun açı değerinin yakından bir görünümünü vermektedir. Grafikte 90 dereceye çok yakın olduğu görülmektedir. 89 ile 91 değerleri arasında farklı değerler almaktadır. Örnekte ki eklemının hata değeri Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Yerleşme noktasında, 90 dereceye ulaşıldığında, hata değeri 1,57 derece olarak hesaplanmıştır. Her eklemi hareketli olan ve her eklemında PID kontrolcü olan robot için bu hata değerinin oldukça küçük ve kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu düşünülebilir.



Şekil 3.9 Eklem derecesi



Şekil 3.10. Eklem açısının hata değeri

Robotun, serpantin hareketi ve yan dönme hareketi yapabilmesi için eklemlerin konumları kontrol edilmiştir. Yan dönme hareketi için sağa-sola dönen eklemlere hareket verilmiş, serpantin hareketi için ise yukarı-aşağı hareket eden eklemlere hareket verilmiştir. Her iki hareket için 10 saniyelik zaman dilimi içerisinde ilk açıları 90 derece olan robot eklemleri 90 ve 45 derece arasında

PID kontrolcü ile kontrol edilmiştir. Konum kontrolü sayesinde istenilen hareketler simüle edilmiştir. Robot hareketleri sırasında eklemler arasındaki açı değerleri Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilmiştir. Bütün eklemlere 0’dan 7’ye kadar numara verilerek isimlendirilmiştir.

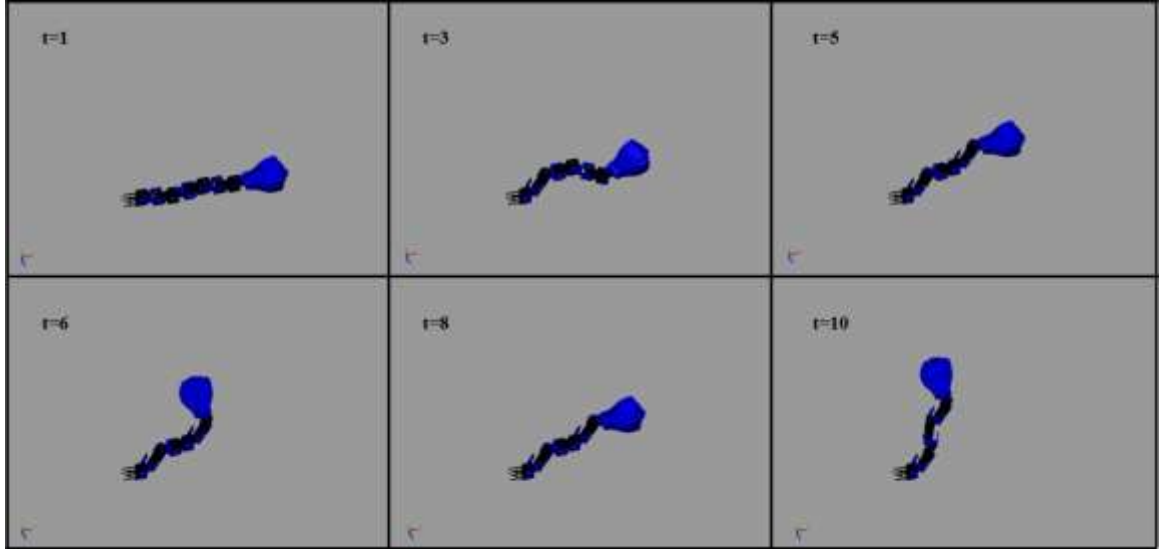
Tablo 3.1. Serpantin hareketi konum değerleri

| Eklemler | Son Konum [Derece] | Hata [Derece] |
|-----------------|---------------------------|----------------------|
| 0-1 | 90 | 1.28 |
| 1-2 | 135 | 1.36 |
| 2-3 | 90 | 0.28 |
| 3-4 | 45 | 0.008 |
| 4-5 | 90 | 0.86 |
| 5-6 | 135 | 0.0256 |
| 6-7 | 90 | 0.022 |

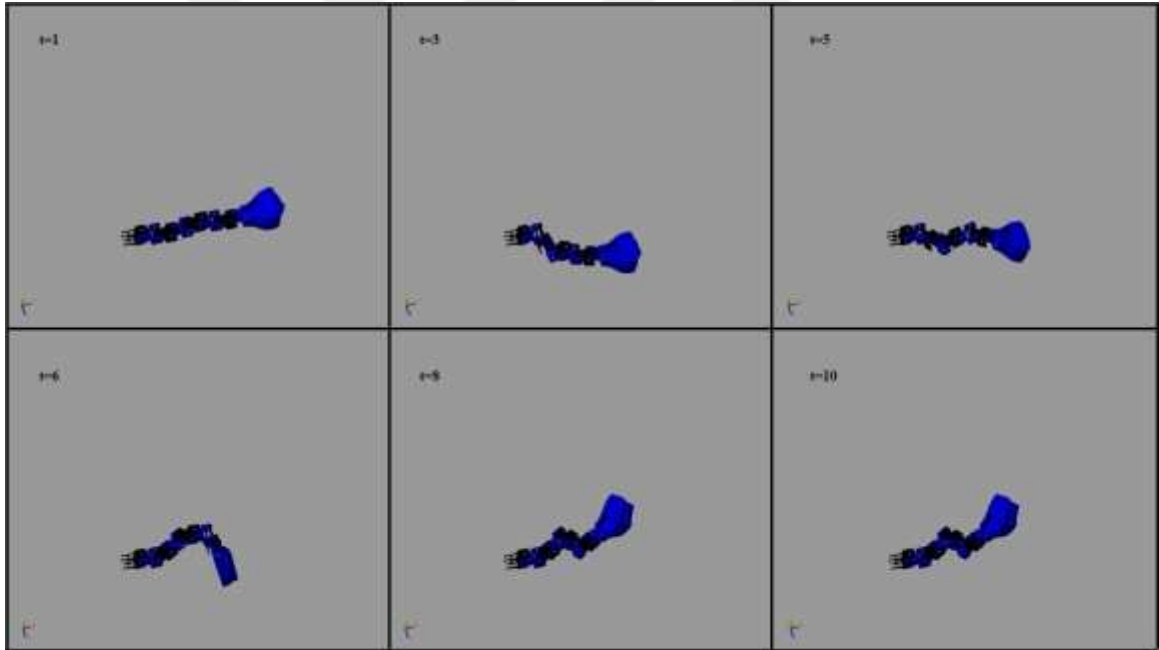
Tablo 3.2. Yan dönme hareketi konum değerleri

| Eklemler | Son Konum [Derece] | Hata [Derece] |
|-----------------|---------------------------|----------------------|
| 0-1 | 45 | 1.003 |
| 1-2 | 90 | 0.69 |
| 2-3 | 135 | 0.63 |
| 3-4 | 90 | 0.19 |
| 4-5 | 45 | 1.1 |
| 5-6 | 90 | 1.57 |
| 6-7 | 135 | 1.59 |

Robotun yan dönme ve serpantin hareketlerinin 10 saniyelik videolarından alınan, fotoğraflar Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. PID kontrol ile yan dönme hareketi



Şekil 3.12. PID kontrol ile serpantin hareketi

3.3. Yılan Robotun Matematiksel Modeli

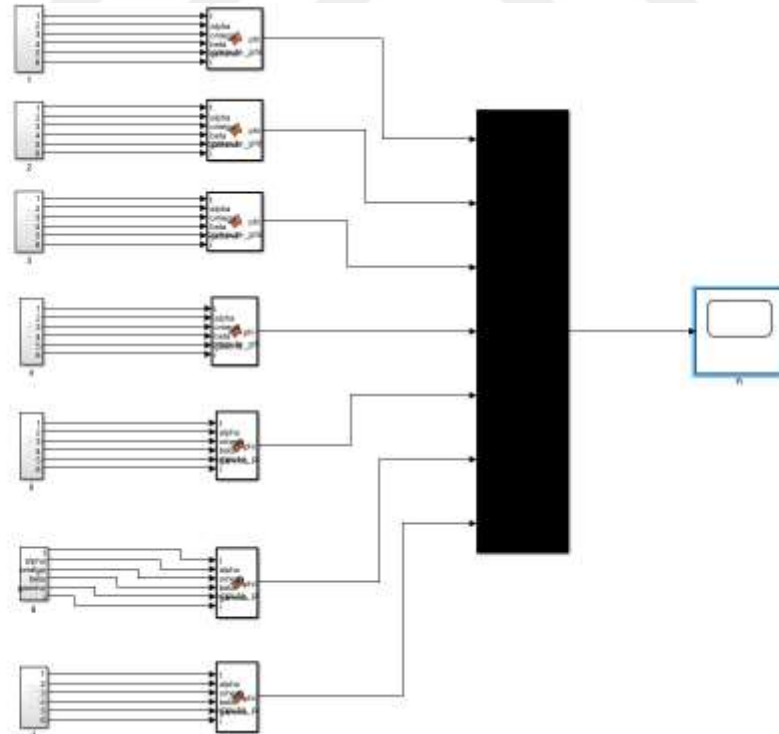
Bu bölümde SimMechanics üzerinden dinamik olarak modellenen yılan robotun ileri yön kinematiği hesaplanacaktır. Kinematik hesaplamalar, D-H parametreleri kullanılarak bir fonksiyon

bloğu içinde kod yazılarak gerçekleştirilecektir. Bu hesaplamalar, girilen açılara dayanarak son tutucu konumunu, yani kafa eklemının konumunu hesaplayacaktır.

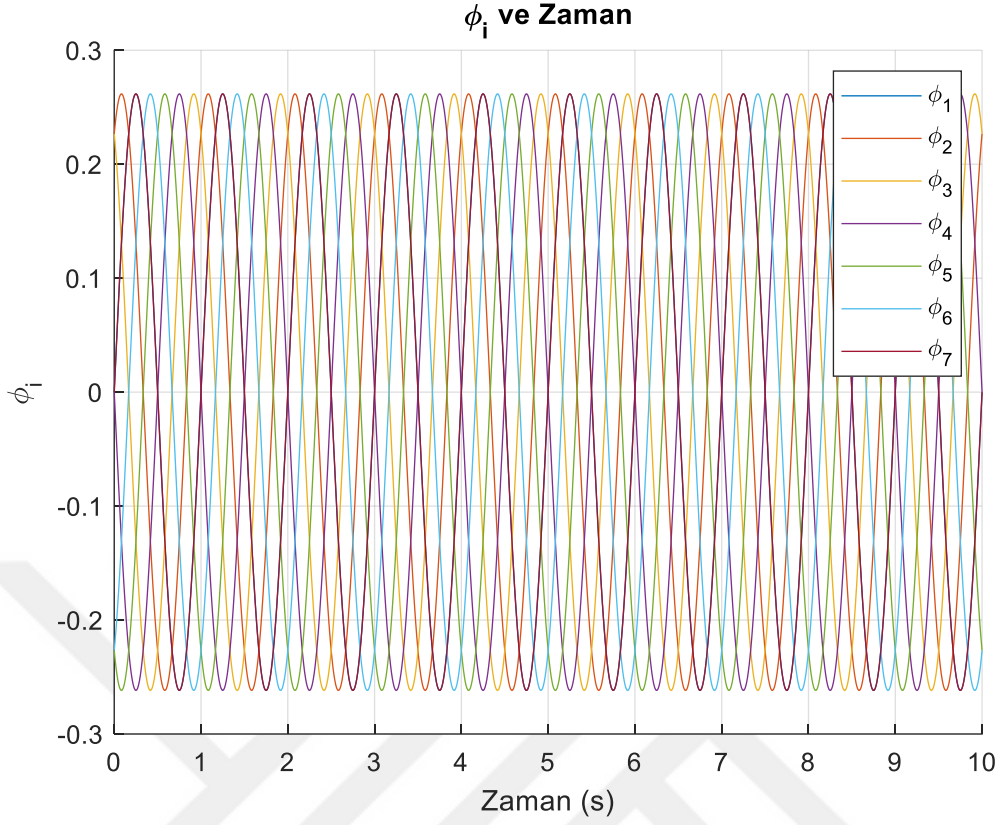
Yılan robotların en önemli özelliği, farklı ortamlara uyum sağlama yetenekleridir. Bu amaca ulaşmak için, araştırmacılar yılan robotların hareketlerini kontrol etmek amacıyla çeşitli yöntemler kullanmaktadır. Yılan hareketi, yılan robotlarının yüzeyde ilerlemesi için yaygın olarak kullanılan bir yürüyüş şeklidir. Bu tür bir hareket, yüzey ile yüzey arasındaki teğetsel ve normal sürtünme katsayılarının farkına dayanır. Bu nedenle sürtünme, serpenoidal hareketin üretilmesinde anahtar bir rol oynar. Bu yürüyüşü gerçekleştirebilmek için, birbirini takip eden eklemler arasındaki göreceli açı, robotun α genişliği ve γ ile sinüzoidal bir şekilde Denklem 3.1’de gösterildiği gibi değişmelidir [21].

$$\phi_i = \alpha \sin(\omega \cdot t + (i - 1) \cdot \beta) + \gamma \quad i = 1, \dots, n - 1 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1, referans değerleri $\alpha=\pi/12$, $\beta=\pi/3$, $\gamma=0$ and $\omega=2\pi$ rad/s kullanılarak simulinkte modellenmiş ve Serpenoidal hareketi için oluşturulan simulink modeli Şekil 3.13’te, model çıktısı ise Şekil 3.14’te gösterilmiştir. Modellemede kullanılan fonksiyon kodu EK-1’de verilmiştir.



Şekil 3.13. Serpenoidal hareket için oluşturulan simulink modeli



Şekil 3.14. Serpenoidal hareketi için konum değişimleri

3.4. Kinematik

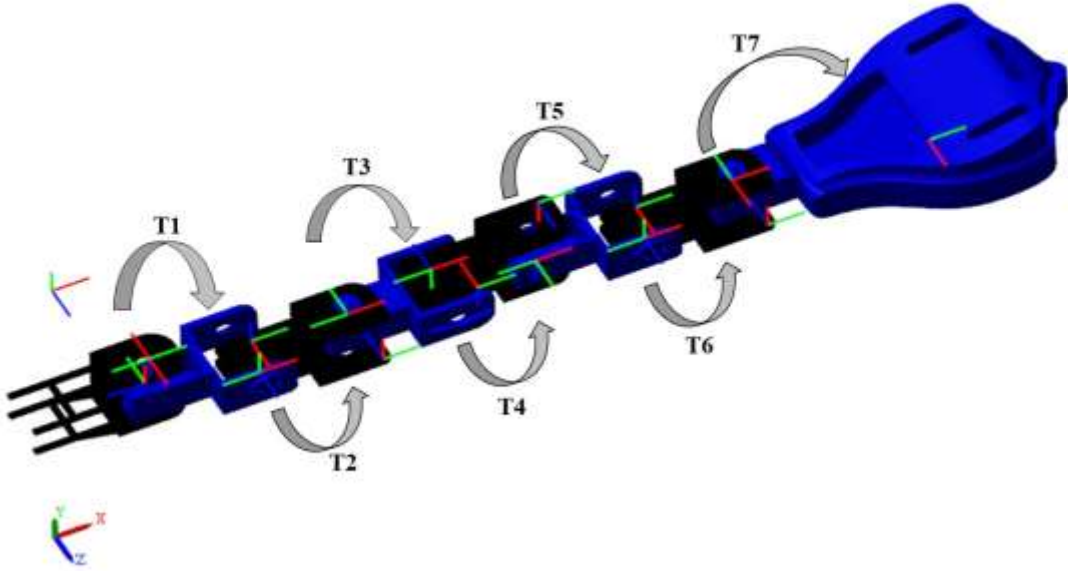
D-H parametreleri, robotik manipulatörlerin kinematiğini tanımlamak için kullanılan dört temel parametreden oluşan bir settir. Bu parametreler, robotun yapısal özelliklerine bağlı olarak bir bağlantıdan diğerine dönüşüme izin verir [22]. D-H parametreleri, tüm eklemlerin koordinat sistemleri arasındaki ilişkiyi kurdukları için robotların modellenmesinde çok önemlidir [23]. D-H yöntemi kullanılarak her bir ekleme için bir koordinat sistemi oluşturulur ve bitişik eklemler için homojen bir dönüşüm matrisi elde etmek üzere dört parametre belirlenir. Bu yöntem, robotik sistemlerin kinematik analizini kolaylaştırarak, robotun hareketini ve konumunu hassas bir şekilde modellemeye imkan tanır [24].

D-H parametreleri kullanılarak yılan robotun ileri kinematik analizi için Simulink blokları oluşturulmuştur. Bu yöntem, robotun her ekleminin bağlantılarını ve hareketlerini matematiksel olarak modellemeye olanak tanır. D-H parametreleri, belirli açılar temelinde ekleme konumlarını hesaplamak amacıyla bir fonksiyon bloğunda kodlanmıştır. Denklem 3.2 ile Denklem 3.3'te sunulan D-H parametreleri kullanılarak Simulink'te modellenen kinematik denklemler ile robotun hareket ve konumu hassas bir şekilde simüle edilmektedir.

$${}^{n-1}T_n = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos a_n & \sin \theta_n \sin a_n & a_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos a_n & -\cos \theta_n \sin a_n & a_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin a_n & \cos a_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$${}^{n-1}T = \prod_{i=1}^8 {}^{i-1}T_i \quad (3.3)$$

Yılan robot, 8 döner eleman ve toplam 7 serbestlik derecesine sahiptir. Kinematik analiz için D-H parametreleri kullanılmıştır [25]. Her bir eklemdaki dönme hareketleri ve eklemler arasındaki bağlantılar bu parametreler ile tanımlanmıştır. Toplam 8 eleman için homojen dönüşüm matrisleri (T) kullanılarak bir D-H tablosu oluşturulmuştur. Tablo 3.3'te her eklem için D-H parametreleri, yani dönme açıları, eklem uzunlukları, açısal ofsetler ve bağlantılar listelenmektedir. Her bir eklem için bir XYZ koordinat sistemi oluşturulmuş olup her eklem Z eksenine etrafında dönmektedir. Bu koordinat sistemleri, Şekil 3.15'te gösterildiği gibi manipülatörün her eksen etrafındaki hareketini tanımlar ve manipülatörün nihai konum ve yöneliminin belirlenmesine yardımcı olur. Bu sayede, manipülatörün kinematik modeli ve hareketleri daha iyi anlaşılır ve kontrol edilebilir hale getirilir.



Şekil 3.15. Koordinat Sistemleri

Tablo 3.3. D-H parametreleri yerleşimi

| J | Teta | d | a | alfa |
|----------|-------------|----------|----------|-------------|
| 1 | teta1 | 0.155 | 0 | 0 |
| 2 | teta2 | 0.92 | 0 | 90 |
| 3 | teta3 | 0 | 0 | -90 |
| 4 | teta4 | 1.84 | 0 | 90 |
| 5 | teta5 | 0 | 0 | 90 |
| 6 | teta6 | 1.84 | 0 | -90 |
| 7 | teta7 | 0 | 0 | 90 |
| 8 | teta8 | 1.5 | 0 | 0 |

Bu D-H parametreleri kullanılarak Simulink içinde ileri kinematik analizi yapılmış ve bu hesaplamalar için bir fonksiyon bloğu ve D-H parametreleri kullanılmıştır. Şekil 3.16'daki blok model, bu hesaplamaların nasıl yapıldığını ve sonuçları göstermektedir. Her eklem D-H parametreleri, robotun konumunu ve yönelimini belirlemek için kullanılmaktadır. Fonksiyon bloğundaki kodlar, bu parametreleri kullanarak ileri kinematik hesaplamalarını gerçekleştirmektedir. Elde edilen sonuçlar, Simulink blok modeli ile görselleştirip robotun belirli bir konumundaki son konumunu kırmızı alanda göstermektedir. Yazılan fonksiyon kodu Ek-2'de verilmiştir.

4. MATERYAL VE METOT

Bu kısımda, bilgisayar ortamında tasarlanmış yılan benzeri bir robotun topoloji optimizasyonu metodu ile optimize edilmesi anlatılmaktadır. Optimizasyon öncesinde sonlu elemanlar (FEA) yöntemiyle analizler gerçekleştirilmiştir.

İlk aşamada, robotun üç boyutlu modeli bilgisayar ortamında oluşturulmuş ve malzeme özelliklerine dayalı olarak statik analizler ANSYS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ardından, sistemin doğal frekanslarını belirlemek amacıyla yine ANSYS yazılımı kullanılarak modal analiz yapılmış ve dinamik hareketleri, rijit gövde dinamiği analizi ile değerlendirilmiştir.

Analiz sonuçlarına dayanarak, parçaların kütle ve hacim açısından azaltılması, mukavemetin dengede kalması ve görüntü estetiğinin iyileştirilmesi amacıyla hareket eklemlerine optimizasyon uygulanmıştır.

Tasarım, SolidWorks programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve ardından PLA (Poliaktik Asit) filament kullanılarak 3D yazıcı ile üretim tamamlanmıştır. Parçaların optimizasyonu için ANSYS programı ile gerekli statik ve dinamik analizler yapılmış ve elde edilen veriler, bilgisayar ortamındaki verilerle karşılaştırılmıştır. Topoloji optimizasyonu sayesinde, kütle ve hacim azaltılarak robotun daha dar alanlarda rahat hareket etmesi ve boyut/maliyet açısından iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

4.1. Tüm Sistemin Statik Analizi

Statik analiz, statik denge durumundaki fiziksel sistemlere etki eden kuvvetler ve torklar gibi yüklerin analizini içeren bir mekanik dalıdır. Bu analiz, yapıların ve sistemlerin çeşitli yükler altında hareket etmeden nasıl davrandığını anlamak için kritik öneme sahiptir. Statik analiz, yapıların stabilitesini ve yapısal bütünlüğünü belirlemek amacıyla nesnelere uygulanan kuvvetlerin ve momentlerin değerlendirilmesini kapsar [26]. Tasarlanan robotun ANSYS yazılımında analiz edilebilmesi için üzerinde bulunan motor, rulman ve elektronik kartlar çıkartılmıştır. Çıkartılan bu elemanlar sistemin üzerine binen kuvvetler olarak gösterilmiştir. Analiz sürecinde, tasarlanan mekanik sistem üzerine binen yükler ve momentler sınır şartları olarak esas alınmıştır.

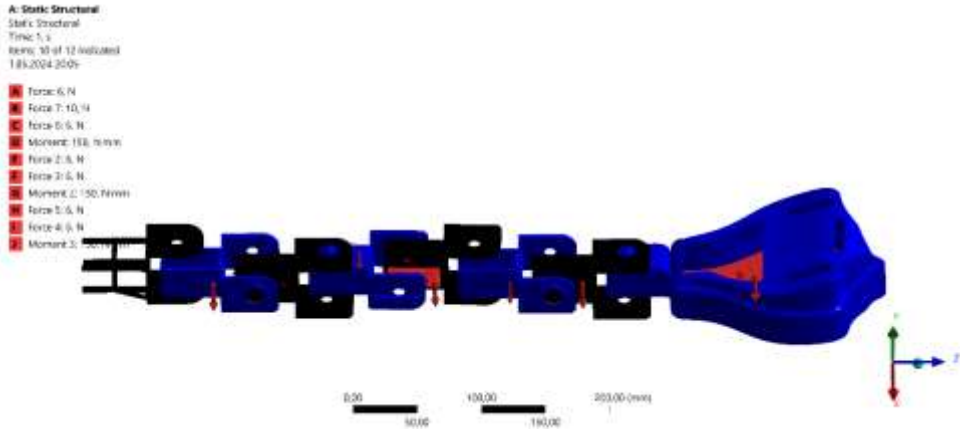
Tasarımı somutlaştırmak amacıyla tasarlanan fiziksel prototip, PLA malzemesi kullanılarak üretilmiştir. Simülasyon ve deneysel çalışmalarından elde edilen sonuçların tutarlı olması için, prototip üretiminde kullanılan PLA malzemesi, analiz sürecinde kullanılan PLA malzeme özellikleri ile aynı olmalıdır. Malzeme özellikleri Tablo 4.1'de gösterilmektedir [27].

Tablo 4.1. PLA malzeme özellikleri

| Özellik | Değer |
|---------------------------|------------------------|
| Yoğunluk | 1.24 g/cm ³ |
| Çekme Dayanımı | 55-75 MPa |
| Kopma Uzaması | 5-10% |
| Elastisite Modülü | 2.7-16 GPa |
| Termal Genleşme Katsayısı | 68-72 µm/m·K |
| Erime Noktası | 150-160 °C |
| Termal İletkenlik | 0.13-0.45 W/(m·K) |

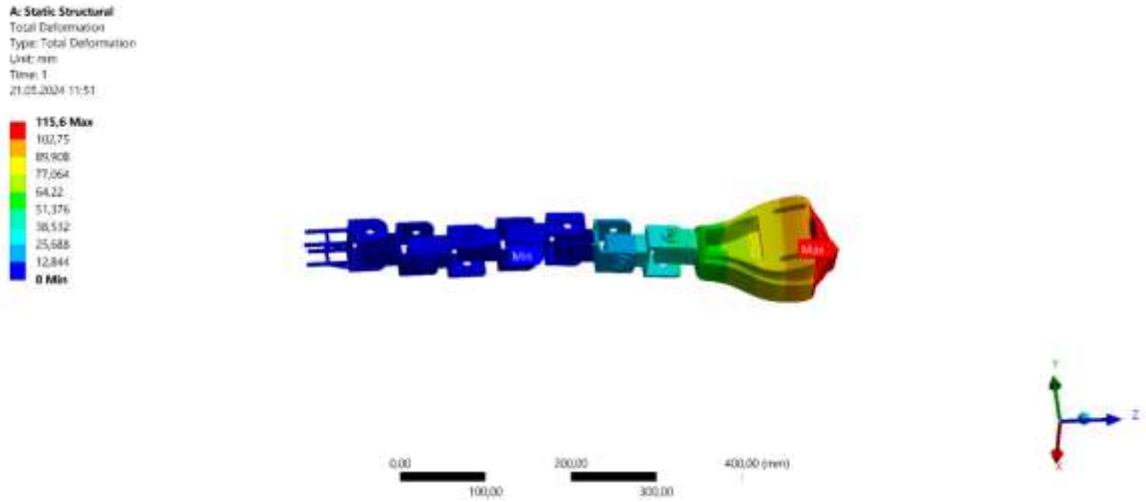
ANSYS yazılımında analiz gerçekleştirilmeden önce sistemin matematiksel olarak modellenmesi gerekmektedir. Bu modelleme, mesh (ağ) adı verilen küçük parçalara ayırma yöntemidir. ANSYS'teki mesh oluşturma süreci, karmaşık sistemlerin doğru sayısal analizini sağlamak amacıyla fiziksel alanın daha küçük elemanlara bölünmesini içerir. Sonlu elemanlar analizi bağlamında, mesh yapısı, incelenen sistemin geometrisini ve fiziksel özelliklerini tam olarak temsil etmek için gereklidir [28]. Mesh kalitesi simülasyonun doğruluğunu ve verimliliğini önemli ölçüde etkiler. ANSYS, kullanıcıların çözüm ayrıntılarını veya gradyanları etkili bir şekilde yakalamak için belirli ilgi alanlarında ağı hassaslaştırmasına olanak tanıyan çeşitli ağ algoritmaları ve kontrolleri sunar [29].

Yılan robotun tüm gövdesi için statik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, toplam deformasyon, gerilme, gerinim ve reaksiyon kuvvetlerini içermektedir. Analiz öncesinde en doğru sonuçların elde edilebilmesi için uygun mesh ataması büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, %80 kaliteli mesh ile 920458 düğüm ve 588189 eleman oluşturulmuştur. Bu detaylı mesh ataması, analizde daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Analiz için sınır koşulları oluşturulmuş ve Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

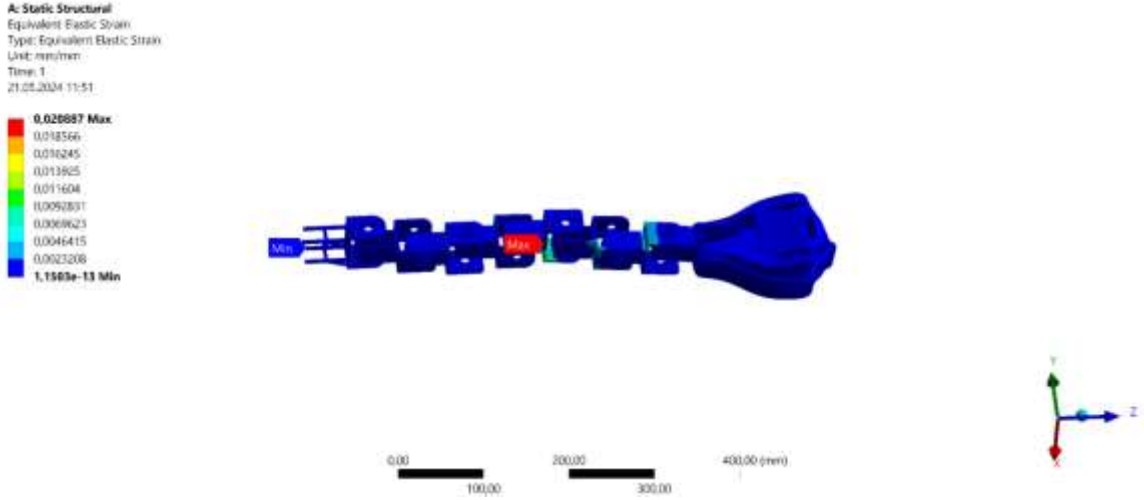


Şekil 4.1. Sisteme uygulanan sınır koşulları

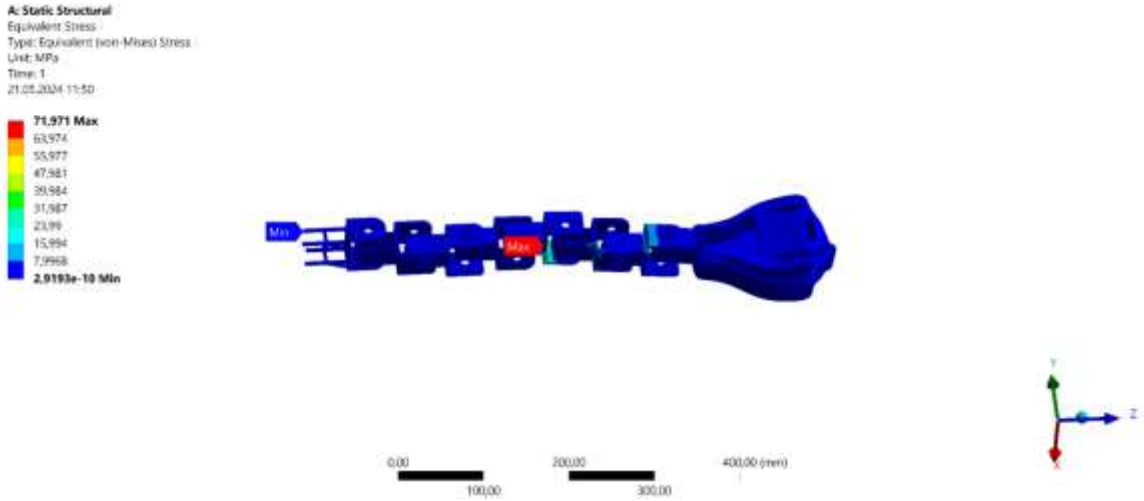
Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'teki analiz sonuçlarına dayanarak, yılan robotun belirtilen noktadaki davranışı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Toplam deformasyon değeri 115,6 mm olarak belirlenmiş olup, bu değer yapının genel deformasyonunu göstermektedir. Gerinim miktarı 0,020887 mm olarak hesaplanmış ve malzemenin uzama veya sıkışma miktarını temsil etmektedir. Ayrıca, malzeme üzerindeki gerilme değeri 71,971 MPa olarak ölçülmüş, bu da malzemenin iç kuvvetlerinin yoğunluğunu ifade etmektedir.



Şekil 4.2. Tüm sistemin toplam deformasyonu



Şekil 4.3. Tüm sistemin gerinim miktarı



Şekil 4.4. Tüm sistemin gerilme değeri

Analiz sonuçlarına ek olarak, darbe kuvvetlerine karşılık olarak hesaplanan reaksiyon kuvvetleri de değerlendirilmiştir. Bu reaksiyon kuvvetleri, yapı üzerinde dengelenen kuvvetlerdir ve yapının dengesini sağlamak için gereklidir. Belirtilen darbe kuvvetlerine karşılık olarak hesaplanan reaksiyon kuvvetleri 46 N olarak ölçülmüştür. Son olarak analiz sonucunda tasarımın ağırlığı 617,81 g ve hacmi ise 494,25 mm³ olarak bulunmuştur.

Bu sonuçlar, topoloji optimizasyonu yapıldıktan sonra yeni tasarımın analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması açısından önemlidir. Statik analiz sonuçları Tablo 4.2’de gösterilmektedir.

Tablo 4.2. Statik Analiz Sayısal Sonuçları

| Analiz Sonuçları | Sonuçların Değerleri |
|-------------------------|-----------------------------|
| Toplam Deformasyon | 115,6 mm |
| Gerinim [ϵ] | 0,020887 mm |
| Gerilme [σ] | 71,971 MPa |
| Reaksiyon Kuvvetleri | 46 N |
| Mesh Düğüm Sayısı | 920,458 |
| Mesh Eleman Sayısı | 588,189 |
| Kütle [m] | 617,81 gr |
| Hacim [V] | 494,25 mm ³ |

4.2. Tüm Sistemin Modal (Doğal Frekans) Analizi

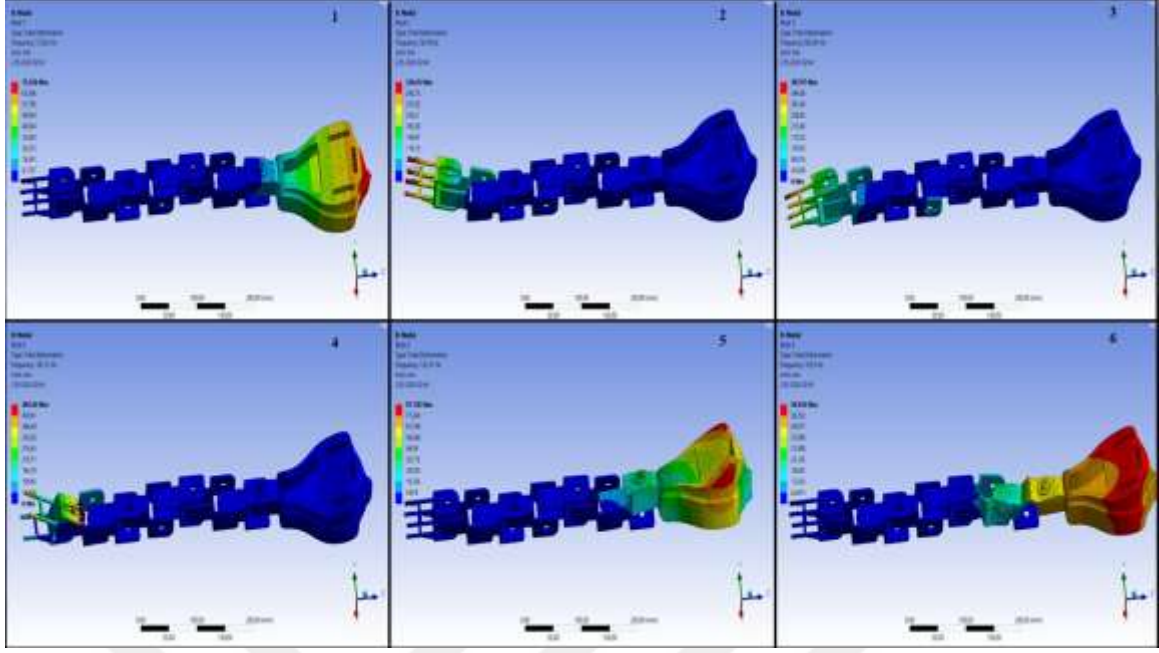
Bu analiz türünde sisteme uygulanan titreşimlerin mod değerleri ölçülerek hangi frekans aralıklarında çalışabilecekleri ya da hangi frekanslarda rezonansa uğrayacağı hesaplanacaktır. Robotun dinamik titreşim özelliklerini ve yapısal bütünlüğünü belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Modal analiz, makine mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan temel bir tekniktir. Bu analiz, sistemlerin dinamik davranışlarını incelemek için doğal frekansları, mod şekillerini ve sönüm oranlarını içeren modal parametrelerini belirleyerek yapılır [30]. Bu analiz, yapıların içsel özellikleri hakkında değerli bilgiler sağlar ve bu nedenle mühendislik sistemlerinin sağlık durumunu izlemek için etkili bir araç olarak kabul edilir [31]. Sistemlerin doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirleyerek, mühendislerin mekanik yapıların dinamik performansını daha kapsamlı bir şekilde anlamalarını sağlar [32].

Modal analizde, rezonans, bir sistemin belirli frekanslarda daha büyük genliklerle titreştiği olgusunu ifade eder [33]. Bir sistemin uyarma frekansı doğal frekansıyla eşleştiğinde rezonans meydana gelir ve bu durum, önemli titreşim genliklerine ve potansiyel yapısal sorunlara yol açabilir [34].

Bu analitik inceleme, her bir bileşenin doğal titreşim modlarını ve frekanslarını belirleyerek yapı üzerinde olası titreşim etkilerini tespit etmeyi hedeflemiştir. Servo motorlar tarafından uygulanan kuvvetleri ve hareket sırasında oluşabilecek potansiyel kuvvetleri değerlendiren bu çalışma, yılan robotun mekanik dengesini güvence altına almak ve optimize etmek için önemli bir kılavuz sağlamaktadır.

Analiz sonucunda toplamda 6 adet mod değeri bulunmuştur. Mod değerlerinin analiz sonuçları Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



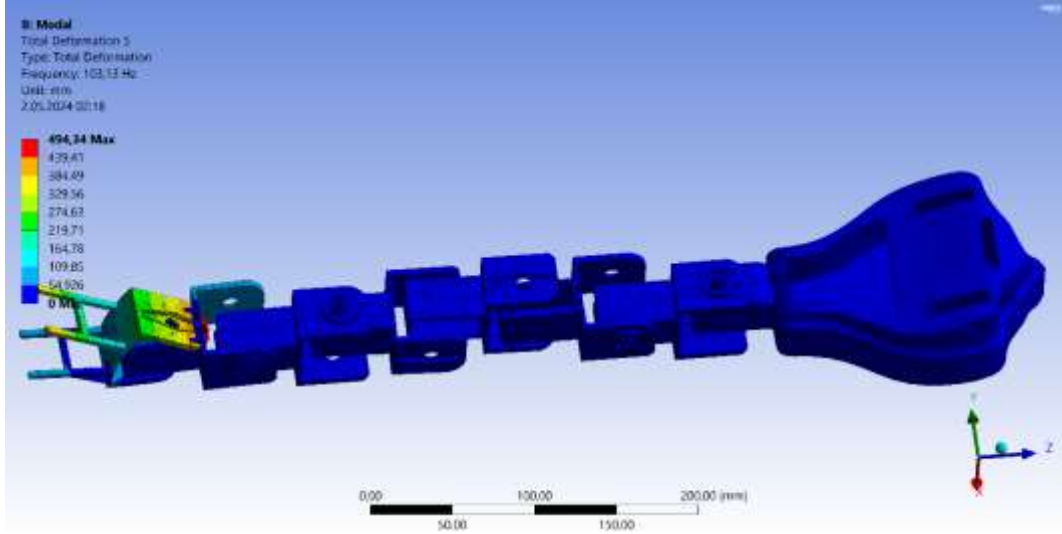
Şekil 4.5. Modal analiz sonuçları

Her bir mod değerinin frekans aralığında ki deformasyon miktarı Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Modal analiz sayısal sonuçları

| Mod (Φ) Numarası | Frekans (f) [Hz] | Deformasyon Miktarı |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 7,2553 | 73,536 mm |
| 2 | 58,18 | 330,45 mm |
| 3 | 80,524 | 387,07 mm |
| 4 | 103,13 | 494,34 mm |
| 5 | 122,37 | 87,102 mm |
| 6 | 165,9 | 56,534 mm |

Görüldüğü üzere 4. mod değerinde, deformasyon miktarı üst düzeyde olup bir sonraki mod değerinde ise azalma vardır. Robot bu mod değerinde; 103,13 Hz'lik frekansta 494,34 mm'lik deformasyonla rezonansa uğramıştır. Rezonansa uğrayan robotun deformasyonu Şekil 4.6'da görüldüğü üzere kuyruk bölümünde gerçekleşmiştir.



Şekil 4.6. Robotun rezonansa uğradığı mod

4.3. Rijit Dinamik Analiz

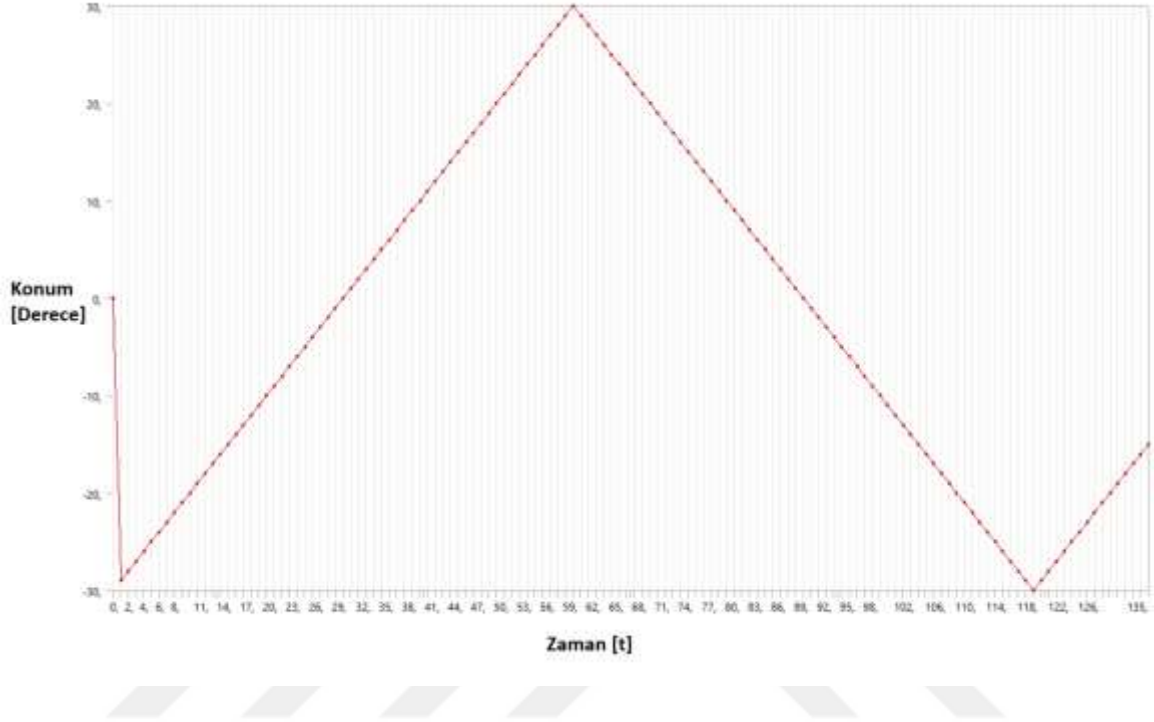
Robotun hareket tahminini iyileştirmek amacıyla statik ve modal analizlerin ardından rijit gövde dinamik analizi gerçekleştirilmiştir.

Genel olarak, rijit cisim dinamik analizi, karmaşık sistemleri rijit cisimler olarak ele alarak çalışmayı basitleştiren ve araştırmacıların çeşitli mekanik, biyolojik ve moleküler sistemlerin davranışları ve performansları hakkında değerli bilgiler edinmesini sağlayan güçlü bir araçtır. Rijit cisim dinamik analizi, biyomekanik, robotik, moleküler dinamik ve havacılık ve uzay mühendisliği gibi çeşitli disiplinlerde yaygın olarak kullanılan temel bir yöntemdir. Bu analiz, karmaşık sistemleri tanımlanmış kütle dağılımı ve geometriye sahip katı cisimler olarak ele alarak basitleştirmektedir. Rijit cisim dinamiği, yalnızca öteleme ve dönme hareketlerini dikkate alarak, deformasyonları veya iç gerilmeleri hesaba katmaksızın sistem davranışının incelenmesine olanak tanır [35]. Ayrıca, uyumlu mekanizmaların analizinde, esnek yapıların dinamik davranışını incelemek için sözde katı cisim modelleri kullanılmakta ve karmaşık sistemleri anlamada katı cisim modellemesinin etkinliği gösterilmektedir [36].

Bu analiz, robotun temel hareketleri olan Serpantin ve yan dönme hareketlerini simüle etmek için yapılmış ve eklemler 30 derecelik bir açıyla hareket ettirilmiştir. Analizin amacı, yılan robotun gerçek dünya koşullarında nasıl davranacağını incelemektedir. Prototip üretiminden önce gerçekleştirilen bu analiz, tasarım sürecinde ortaya çıkabilecek hataları ve performans iyileştirme fırsatlarını tespit etmek için büyük önem taşımaktadır.

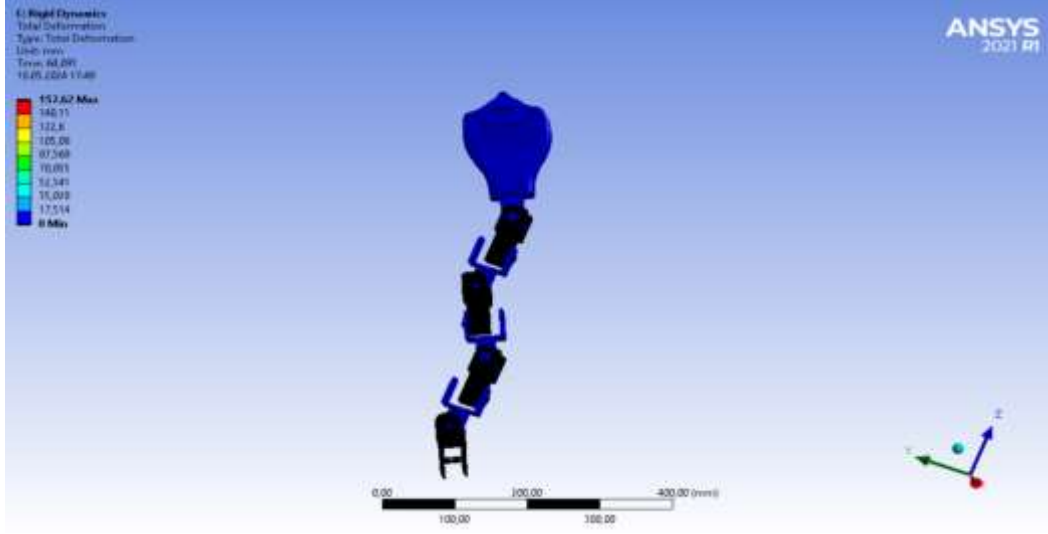
Yılan robot serpantin ve yan dönme hareketi için; 0 dereceden +30 dereceye, daha sonra +30 dereceden tekrar 0 dereceye ve 0 dereceden -30 dereceye giderek bir nevi sinüs dalgası

oluşturmaktadır. Tek bir eklem için 135 saniyede oluşturulan hareket grafiği Şekil 4.7’de verilmiştir.



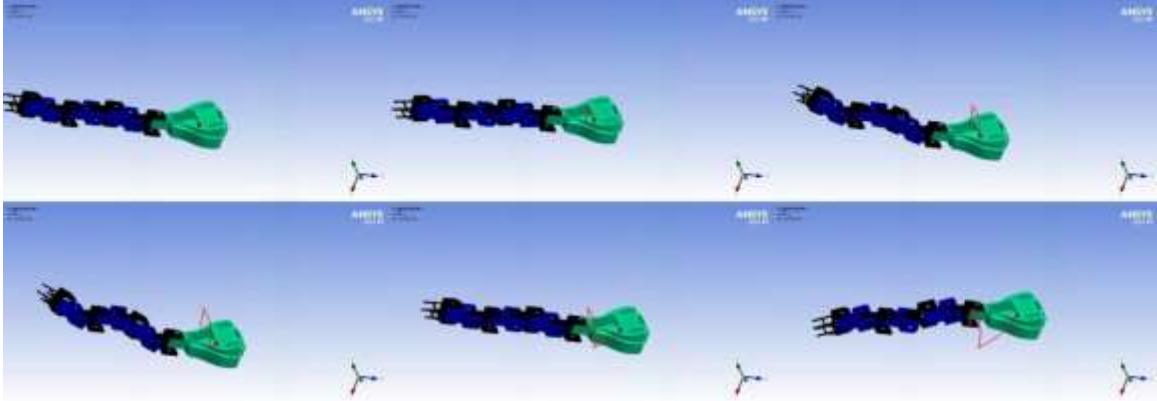
Şekil 4.7. 30 derecelik hareket grafiği

Analiz sonuçları, 30 derecelik açılarla hareket ettirilen robotun hiçbir eklemde çakışma olmadığını göstermiştir. Ayrıca, robotun 30 dereceden daha büyük açılarla da çalışabileceği anlaşılmıştır. Şekil 4.8’de görüldüğü üzere, yan dönme hareketi yapan robotun 30 derecelik dönüşü eklem çakışması olmadan gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir.

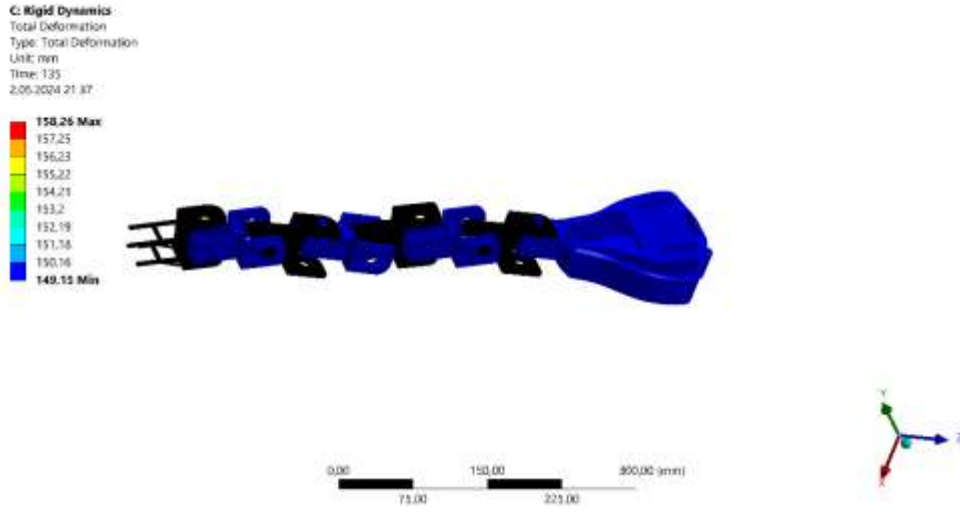


Şekil 4.8. Yan dönme hareketi örneği

Serpantin hareketin toplam yer değiştirmesi 158,26 mm olarak hesaplanmıştır. Bu veri, yılan robotun belirli bir hareketle ne kadar mesafe kat edebileceğini ve hareketin toplam etkisini anlamak için önemli bir referans noktası oluşturmaktadır. Serpantin hareketi Şekil 4.9'da, kat ettiği mesafe ise Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

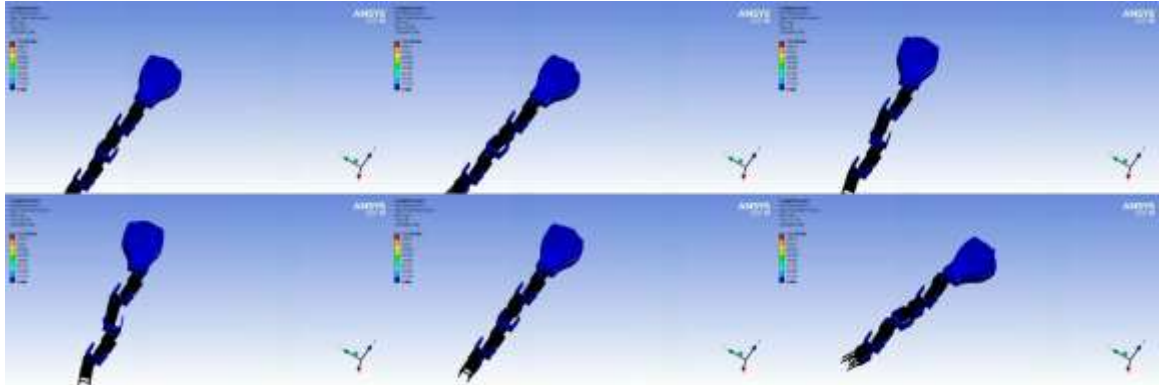


Şekil 4.9. Serpantin hareketi simülasyonu



Şekil 4.10. Serpantin hareketiyle alınan yol

Yılan robot, serpantin hareketinin ardından yine 30 derecelik açılarla 135 saniyede yan dönme hareketini gerçekleştirmiştir. Bu hareketin toplam yer değiştirmesi 155,6 mm olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, yan dönme hareketinin serpantin hareketine kıyasla daha kısa bir mesafe kat ettiğini göstermektedir. İki hareketin karşılaştırılması ile yapılan analiz, yılan robotun farklı hareket modlarının performansını değerlendirmek için önemli bir araç sunmaktadır. Robotun yan dönme hareketi Şekil 4.11'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Yan dönme hareket simülasyonu

Alınan sonuçlar, 30 derecelik açı hareketleriyle eklemlerin çakışmadığını ve açı değerlerinin arttırılabileceğini göstermiştir. Yapılan prototipte açıların 45 dereceye çıkarılması planlanmaktadır. Bir diğer önemli bulgu ise, serpantin hareketinin yan dönme hareketine göre daha fazla yol kat ettiğidir. Bu sonuçlar, prototip ile fiziksel hareketler karşılaştırılarak doğrulanacaktır. Sonuçlar kısmında bu analiz ifadelerine değinilecektir.

4.4. Topoloji Optimizasyonu

Bu kısımda, yılan benzeri bir robotun hareket uzuvlarından biri olan gövde eklemine topoloji optimizasyonu uygulanmıştır.

Topoloji optimizasyonu, mühendislik ve robotik gibi alanlarda uygulama alanı bulan bir tasarım aracıdır [37]. Tasarımcılara ve mühendislere, tasarımlarını yalnızca daha hafif değil, aynı zamanda daha uygun ve verimli olan optimize edilmiş tasarımlara dönüştürme yetisi verir [38]. Topoloji optimizasyonu sayesinde, bir tasarımın yapısal uygunluğu ve performansı, içindeki malzemelerin dağılımı yeniden düzenlenerek geliştirilebilir [39]. Topoloji yapısının en önemli faydalarından biri, tasarım uzayında optimum yük olasılıkları oluşturma yeteneğidir. Bu, tasarımcıların ve mühendislerin yük dağılımı için en etkili yöntemleri belirlemelerine olanak tanıyarak, yapısal bütünlüğün ve performansın artmasını sağlar [40]. Mümkün olan en iyi tasarımın önceden bilindiği, organize bir tasarım süreci sağlayarak daha etkili ve faydalı tasarım iterasyonlarını kolaylaştırır [41].

Optimizasyon Sürecinde ilk olarak, sınır koşullarına bağlı kalarak birleşim parçasının statik ve mukavemet özelliklerini incelemek için statik analiz yapılmıştır. Statik analiz sonuçlarına dayanarak topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Topoloji optimizasyonu sonuçları ile yeniden yapılandırılan tasarım yeniden çizilmiş ve bu yeni tasarıma da statik analiz uygulanmıştır. Son olarak, optimize edilen parça ile eski parçanın analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

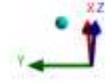
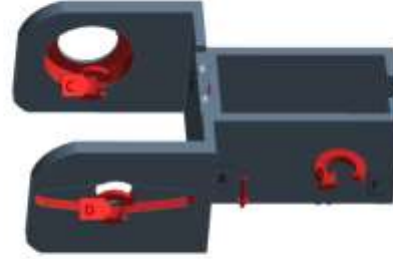
4.4.1. Birinci Statik Analiz

Statik analiz öncesinde, eklem parçası mesh işlemine tabi tutulmuştur. Parçanın mesh sonuçlarına göre düğüm ve eleman sayısı matematiksel olarak hesaplanmıştır. Toplamda 640627 düğüm ve 429295 eleman oluşturulmuştur.

Statik analizin gerçekleşmesi için parçanın sınır koşulları belirlenmiştir. Parçanın sabitleneceği ve kuvvetin uygulanacağı noktaların tanımlanması önemlidir. Parça döner mafsala sahip olduğundan, moment, kuvvet ve sabitleme yükleri verilmiştir. Parçanın sınır şartlarıyla birlikte görüntüsü Şekil 4.12’de sunulmuştur.

D: Static Structural
Static Structural
Time: 1, s
21.05.2024 10:34

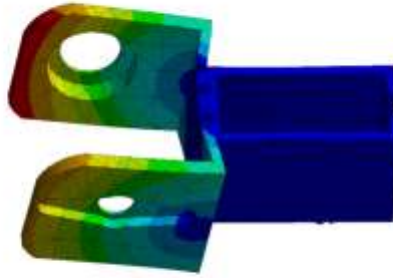
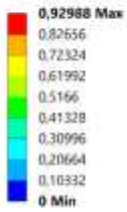
- A Force: 150, N
- B Moment \pm : 1500, N-mm
- C Moment \pm : 1500, N-mm
- D Moment: 1500, N-mm
- E Force 2: 5, N
- F Fixed Support



Şekil 4.12. Eklem sınır şartları

Analiz sonuçlarına göre, uygulanan yükler ve sınır koşulları sonucunda bir malzemenin veya yapı elemanının ne kadar deforme olduğunu ifade eden toplam deformasyon büyüklüğü Şekil 4.13'te görüldüğü gibi 0,92988 mm'dir. Bu yer değiştirme, uygulanan sınır koşullarına göre parçanın toplam yer değiştirmesini temsil etmektedir.

D: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
21.05.2024 10:38



Şekil 4.13. Eklem toplam deformasyonu

Verilen sınır şartlarına göre gerilme miktarı Şekil 4.14'te görüldüğü üzere 35,869 Mpa olarak hesaplanmıştır.

D: Static Structural

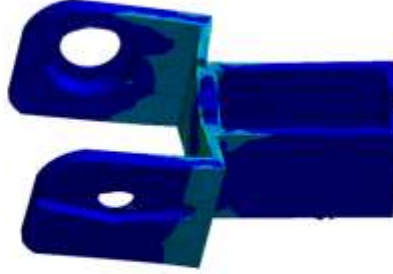
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

21.05.2024 10:34



Şekil 4.14. Eklem gerilme miktarı

Eklem gerinim sonucu ise 0.010408 mm olarak hesaplanmıştır. Gerinim analizinin sonucu Şekil 4.15'te gösterilmiştir.

D: Static Structural

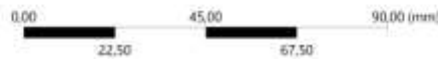
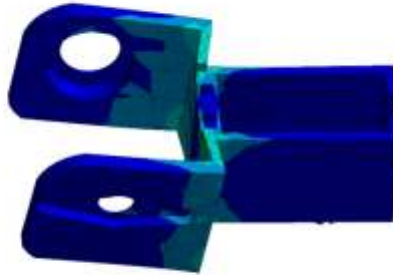
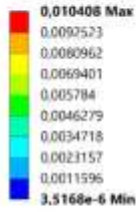
Equivalent Elastic Strain

Type: Equivalent Elastic Strain

Unit: mm/mm

Time: 1

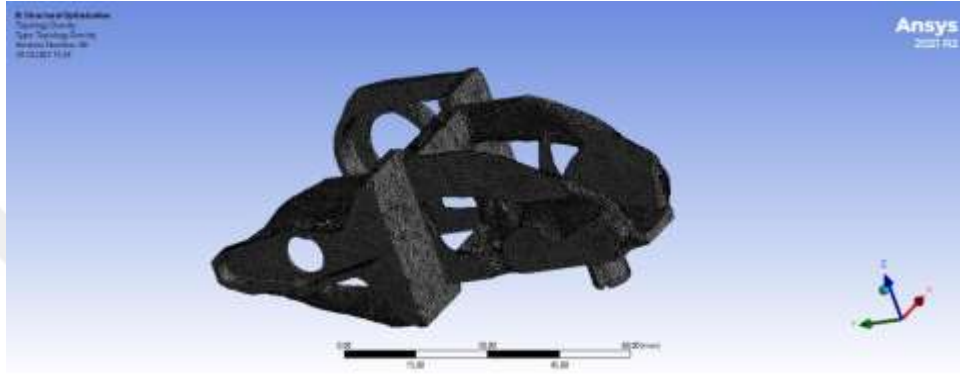
21.05.2024 10:38



Şekil 4.15. Eklem gerinim miktarı

4.4.2. Optimizasyon

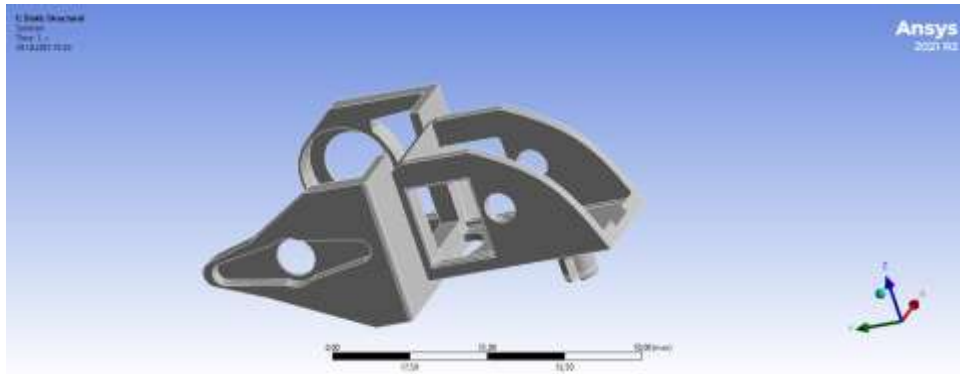
Analiz, ANSYS programında 48 iterasyonla gerçekleştirilmiştir. Hacim ve kütle oranının %50 oranında azaltılması hedeflenmiştir. Analiz öncesinde parçanın hacmi programda 25,115 mm³ ve kütlesi 31,394 gr olarak ölçülmüştür. Bu süreçte, yapısal performansı korumayı hedeflerken malzeme kullanımını en aza indirerek hafif ancak işlevsel ve dayanıklı tasarımlar elde etmek amaçlanmaktadır. Optimizasyon sonucunda ortaya çıkan parça Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Optimizasyon sonucu oluşan eklem parçası

Optimizasyon sonucuna göre, parçanın kütlesi ve hacmi neredeyse %49,86 oranında azaltılmıştır. Parçanın yeni hacmi 12,524 mm³ ve kütlesi 15,655 gram olarak ölçülmüştür.

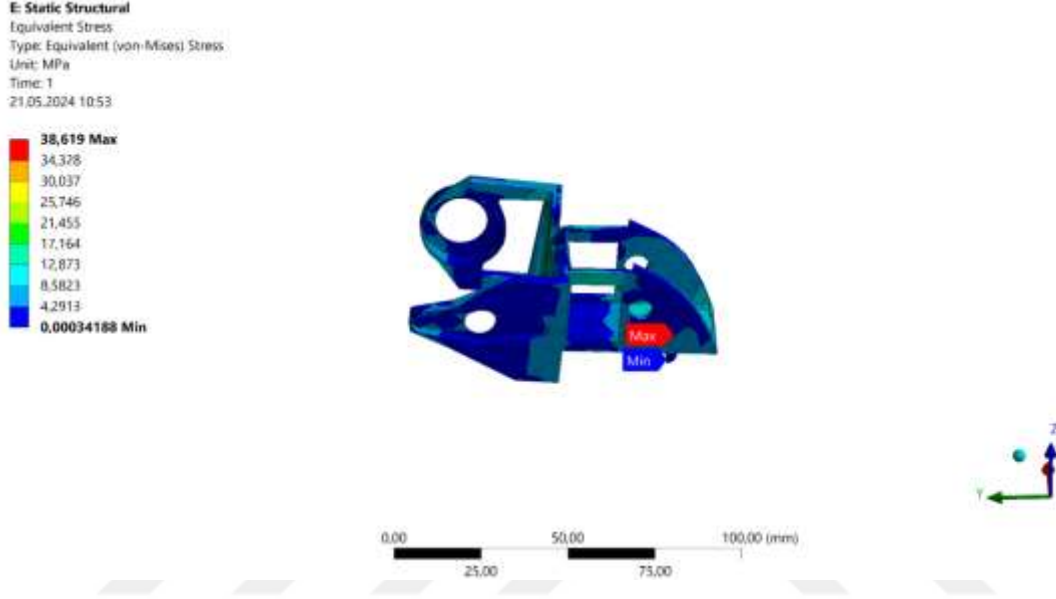
Optimizasyon sonucunda ortaya çıkan yeni tasarımın bozuk olduğu tespit edildiğinden, modelleme işlemi manuel olarak yeniden yapılmıştır. Yeni tasarım, optimize edilen parçaya benzeyecek şekilde daha estetik bir tasarımla yeniden oluşturulmuştur. Bu işlem, Ansys programının bir alt penceresi olan Space Claim'de gerçekleştirilmiştir. Yeni model Şekil 4.17'de gösterilmektedir.



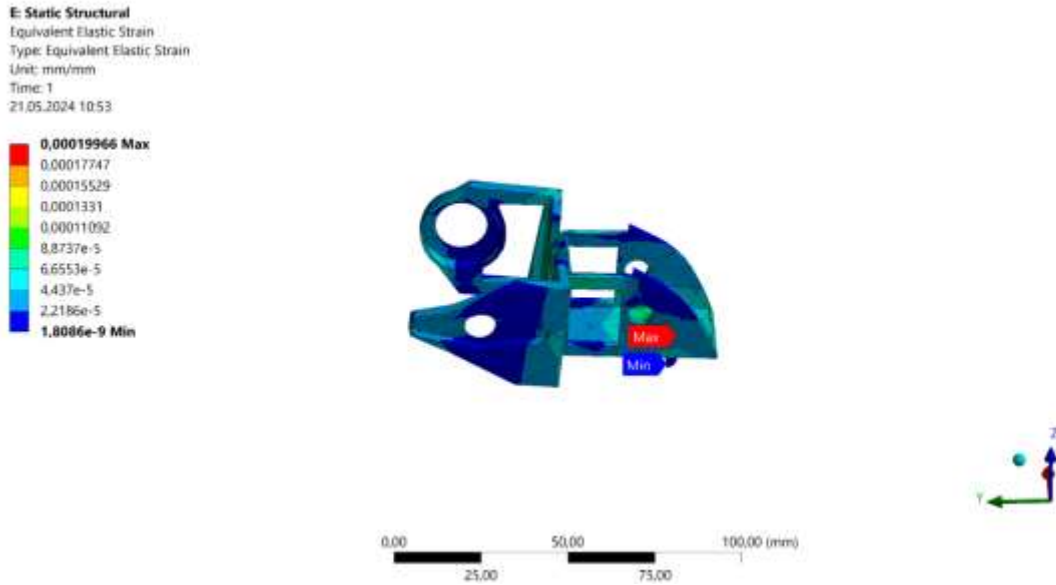
Şekil 4.17. Yeniden tasarlanan model

4.4.3. İkinci Statik Analiz

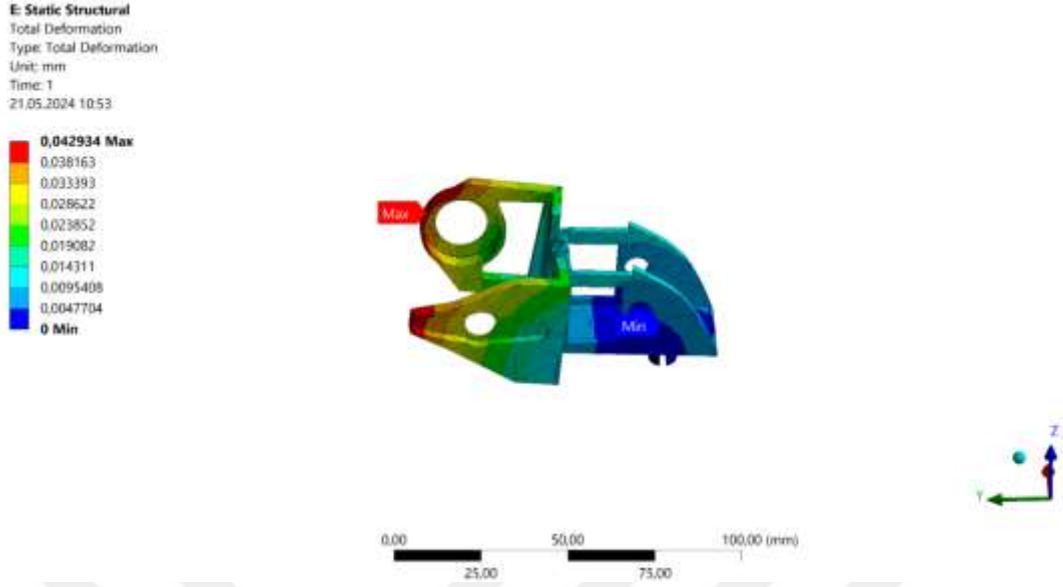
Modelin son hali, optimizasyon yapılmadan önceki birinci statik analizde olduğu gibi aynı sınır şartlarında tekrar analiz edilmiştir. Bu kapsamlı analiz sonucunda elde edilen gerilme dağılımları Şekil 4.18'de, gerinim oranları Şekil 4.19'da ve toplam deformasyon sonuçları Şekil 4.20'de sunulmuştur.



Şekil 4.18. Optimize edilen parçanın gerilme sonucu



Şekil 4.19. Optimize edilen parçanın gerinim sonucu



Şekil 4.20. Optimize Edilen Parçanın Deformasyon Sonucu

Optimizasyon çalışması sonrasında bulunan sonuçlar Tablo 4.4'te karşılaştırılmıştır. Tablo 4.4'te optimizasyon öncesi ve sonrası bulunan sonuçlar gösterilmektedir. Parçanın kütle değeri, 31,394 gramdan 15,655 grama düşerek %50,133'lük bir azalma sağlanmıştır. Hacimde de aynı oranda bir azalma meydana gelmiştir. Hacim değeri, 25,115 mm³ iken %50,133 oranında azalarak 12,524 mm³ olmuştur.

Tablo 4.4. Her iki modelin karşılaştırma tablosu

| Analiz Parametresi | Birinci Analiz Değeri | İkinci Analiz Değeri |
|--------------------|------------------------|------------------------|
| Toplam Deformasyon | 0,92988 mm | 0,042934 mm |
| Gerinim | 0,010408 mm | 0,001997 mm |
| Gerilme | 35,869 MPa | 38,619 MPa |
| Ağırlık | 31,394 gr | 15,655 gr |
| Hacim | 25,115 mm ³ | 12,524 mm ³ |

4.4.4. Eklem Parçasının Fiziki Prototipi

Robotun eklem parçası bilgisayar ortamında analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan optimizasyonun doğruluğunu gerçek hayatta görmek için parça PLA malzeme kullanılarak 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir. İlk olarak optimize edilmemiş parça basılmıştır. Ardından optimize edilmiş parça aynı koşullar altında basılmıştır. İlk basılan parçanın kütlesi 23,50 gr, ikinci basılan parçanın kütlesi ise 12,00 gr'dır. Tartım işlemi hassas terazi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Deneyisel olarak %48,936'lık bir kütle azalması tespit edilmiştir. Ölçüm sonuçları Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Optimizasyon öncesi hassas terazi ölçümü

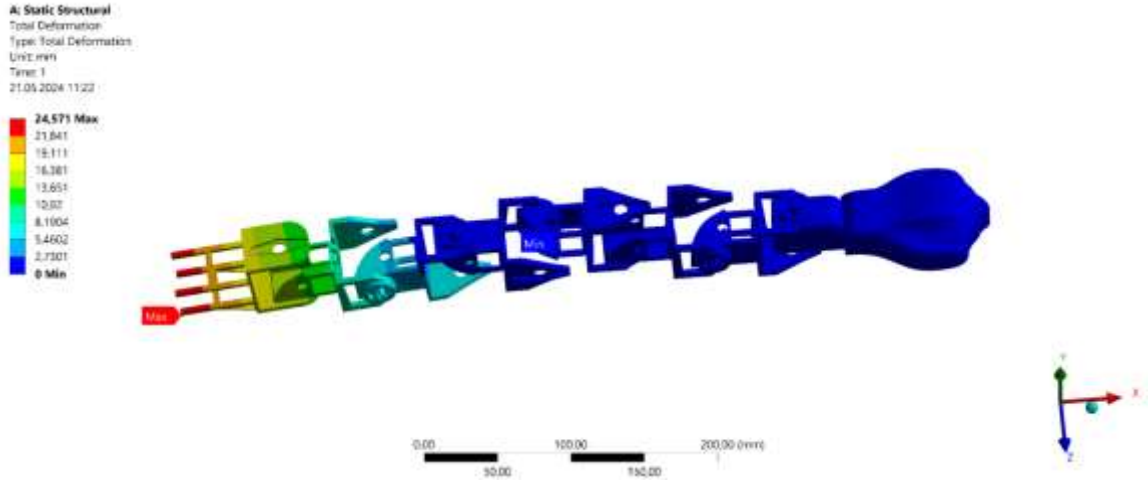


Şekil 4.22. Optimizasyon sonrası hassas terazi ölçümü

Yapılan optimizasyon sonucunda bilgisayar destekli analiz aracı olan Ansys yazılımında bulunan sonuçlar fiziki olarak karşılaştırılmıştır. Ancak, parçanın bilgisayar bulgusu olan kütle miktarı ile 3D yazıcıda Üretilen parçanın kütle miktarı uyuşmamaktadır.

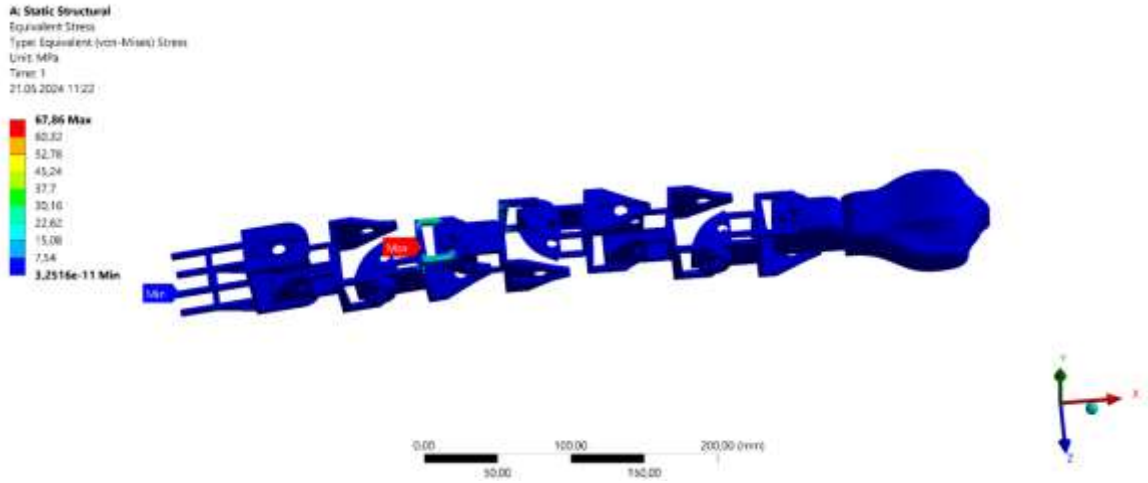
Öte yandan, bilgisayar analizinde gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda kütle miktarı 31,394 gr'dan 15,655 gr'a düşmüştür, yani toplamda %50,133 oranında azalma görülmüştür. 3 boyutlu yazıcıdan çıkan parçaların karşılaştırılması sonucunda ise, kütle miktarı 23,50 gr'dan 12,00 gr'a düşmüş ve yaklaşık olarak %48,936'lık bir kütle azalması tespit edilmiştir.

Eklem parçalarının küçülmesiyle birlikte, robotun kafası gövde eklemine göre orantısız şekilde büyük kalmıştır. Bu durumu düzeltmek amacıyla kafa eklemi, gövde eklemine boyutlarına uygun olacak şekilde yeniden tasarlanmıştır. Bu tasarım Ek-3'te verilmiştir.



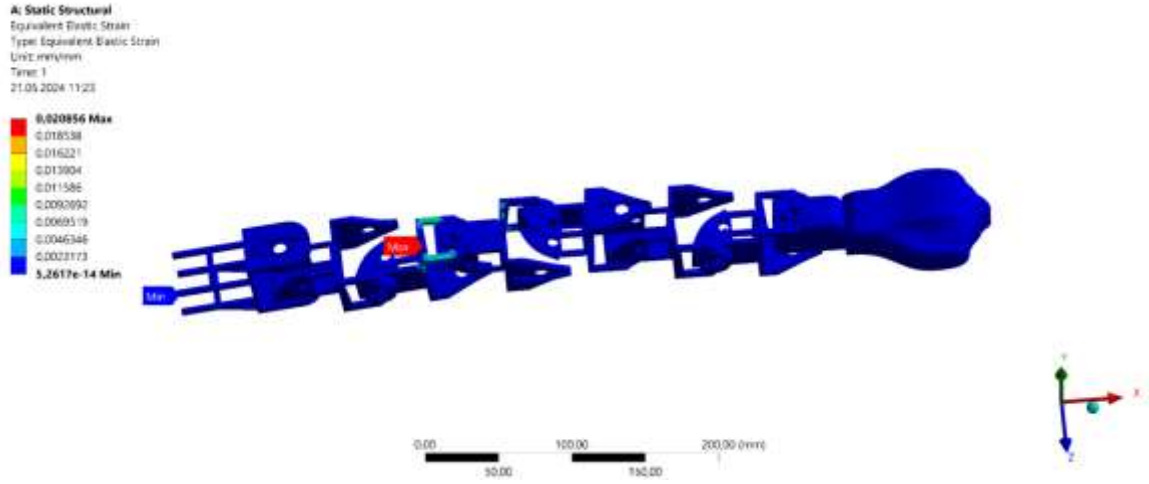
Şekil 4.24. Optimizasyon yapılan robotun toplam deformasyon miktarı

Analiz sonucunda, robotun gerilme miktarının 67,86 MPa olduğu hesaplanmıştır. Optimizasyon öncesindeki gerilme miktarıyla karşılaştırıldığında, bu değerde bir azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, robotun dayanıklılığını artıracak ve kırılma riskini azaltacağı için olumlu bir gelişme olarak değerlendirilmektedir. Gerilme miktarı Şekil 4.25'te gösterilmektedir.



Şekil 4.25. Optimizasyon yapılan robotun gerilme miktarı

Gerilme miktarı ise 0,020856 mm olarak hesaplanmıştır. Yapılan ilk analize göre bu değerde de bir azalma gözlenmektedir. Gerilme sonucu Şekil 4.26'da gösterilmektedir.



Şekil 4.26. Optimizasyon yapılan robotun gerinme miktarı

Optimizasyondan sonra oluşan modelin ağırlık ve hacminde de değişiklik olmuştur. Robotun optimizasyon yapılmadan önceki kütle ve hacmine göre %70 azalma meydana gelmiştir. Robotun kütlesi 182,64 gr hacmi ise 146,11 mm³ olarak hesaplanmıştır. Analiz sonucunda bulunan sayısal değerler Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Optimize edilen robotun analiz sonuçları

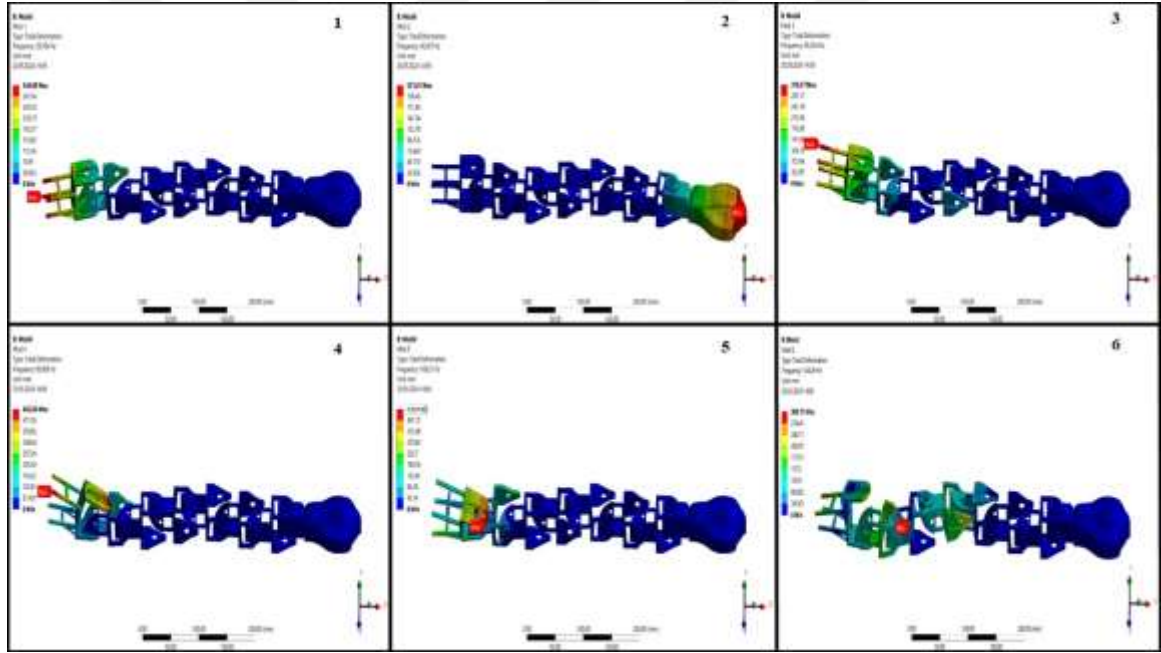
| Analiz Sonuçları | Sonuçların Değerleri |
|--------------------|------------------------|
| Toplam Deformasyon | 24,571 mm |
| Gerinim | 0,020856 mm |
| Gerilme | 67,86 MPa |
| Mesh Düğüm Sayısı | 348183 |
| Mesh Eleman Sayısı | 194688 |
| Ağırlık | 182,64 gr |
| Hacim | 146,11 mm ³ |

Tablo 4.6 incelendiğinde, optimizasyon öncesi ve sonrası analiz sonuçlarının karşılaştırılması görülmektedir.

Tablo 4.6. Optimizasyon işleminin karşılaştırılması

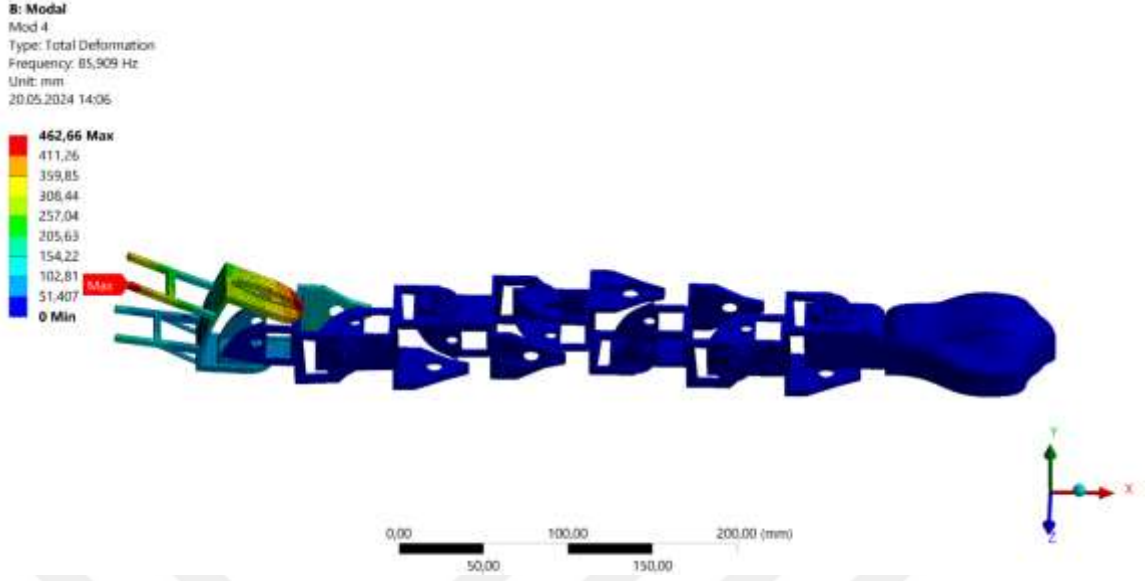
| Analiz Sonuçları | Optimizasyon Öncesi | Optimizasyon Sonrası | Yüzdellik Azalma |
|--------------------|------------------------|------------------------|------------------|
| Toplam Deformasyon | 115,6 mm | 24,571 mm | %78,71 |
| Gerinim | 0,020887 mm | 0,020856 mm | %0,148 |
| Gerilme | 71,971 MPa | 67,86 MPa | %5,71 |
| Mesh Düğüm Sayısı | 920458 | 348183 | %62,17 |
| Mesh Eleman Sayısı | 588189 | 194688 | %66,90 |
| Ağırlık | 617,81 gr | 182,64 gr | %70,43 |
| Hacim | 494,25 mm ³ | 146,11 mm ³ | %70,43 |

Optimizasyonu yapılan robota tekrardan modal analiz yapılmış ve 6 adet mod değeri bulunmuştur. Mod değerleri Şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.27. Optimizasyon sonrası modal analiz

Modal analiz sonuçlarına göre 4. ve 5. mod değerlerinde sistem rezonansa uğramıştır. Şekil 4.28’de görüldüğü gibi sistem 85,909 Hz’lik frekansta 462,66 mm’lik deformasyona uğrayarak rezonansa uğramıştır. Tablo 4.7’deki mod değerlerinde, frekans ve deformasyon miktarları verilmiştir.



Şekil 4.28. Rezonans değerleri

Tablo 4.7. Optimizasyon sonrası modal analiz değerleri

| Mod Numarası | Frekans [Hz] | Deformasyon Miktarı |
|--------------|--------------|---------------------|
| 1 | 29,784 | 346,09 mm |
| 2 | 42,457 | 221,01 mm |
| 3 | 45,034 | 318,57 mm |
| 4 | 85,909 | 462,66 mm |
| 5 | 108,27 | 406,26 mm |
| 6 | 144,28 | 308,71 mm |

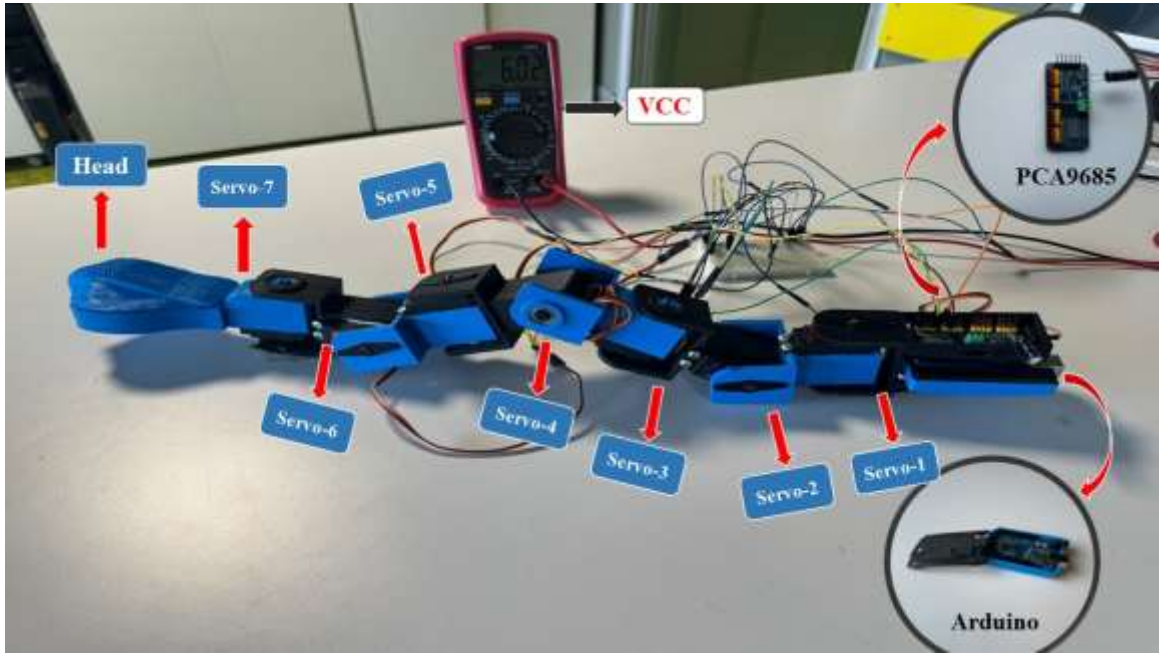
Optimizasyon sonucunda oluşan modele ait modal analiz sonuçları incelendiğinde, ilk yapılan analiz sonuçlarına göre daha fazla rezonans görülmektedir. Kütlece azalma ve şekil değişikliği, doğal frekansları değiştirerek rezonansın arttığını göstermiştir. Bu artış, robotun yapısını olumsuz etkileyecektir.

4.5. Prototip Üretimi

Teorik analiz ve simülasyon çalışmalarının ardından yılan robotun prototipi üretilmiştir. Prototip üretim süreci, her bir parçanın 3D yazıcı kullanılarak PLA filament ile imal edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Her bir eklem hareketi, tahrik elemanı olarak eklenen servo motorlar tarafından sağlanmıştır. Servo motorların kontrolü, PCA9685 ve Arduino mikrodenetleyici kartı

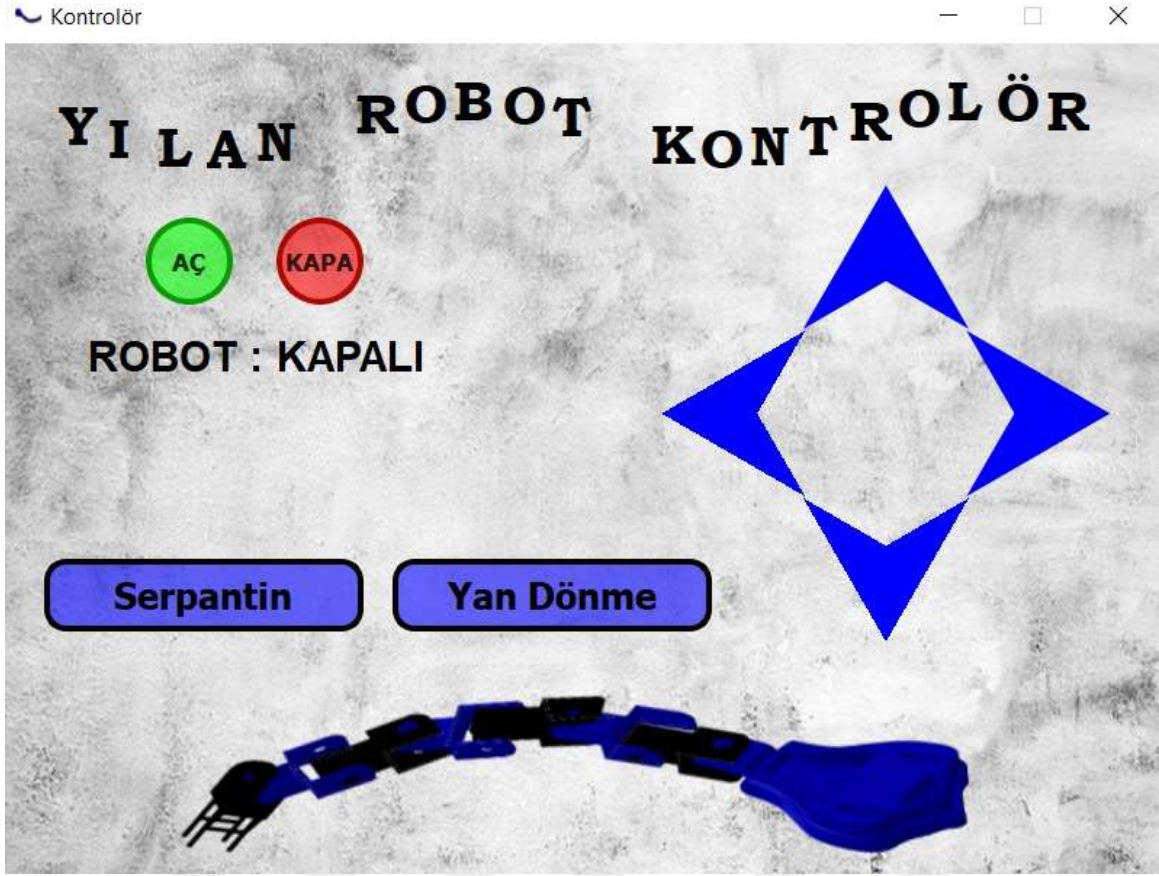
kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Prototipin hareket kabiliyeti, serpantin ve yan sarma hareketlerine yönelik olarak Arduino'da oluşturulan kodlarla sağlanmıştır. Ayrıca, hareketlerin daha hassas bir şekilde kontrol edilmesi amacıyla PID kontrol algoritmaları Arduino kodlarına entegre edilmiştir.

Bu aşamada, prototipin performansı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan testler, prototipin tasarım hedeflerine uygun olarak çalıştığını göstermiştir. Yılan robotun serpantin ve yan dönme hareketlerindeki başarılı performansı, tasarımın başarısını doğrulamıştır. Prototipin görseli Şekil 4.29'da sunulmuştur.



Şekil 4.29. Üretilen prototip

Prototip robotun hareketlerinin uzaktan kontrol edilebilmesi amacıyla, Qt Designer aracı kullanılarak çeşitli stil öğeleri ile zenginleştirilmiş bir kontrol arayüzü geliştirilmiştir. Bu arayüz, Python kodları ile yazılmış olup, Bluetooth modülü aracılığıyla Arduino ile iletişim sağlamaktadır. Serpantin ve yan dönme hareketleri için tasarlanmış olan bu arayüz, Şekil 4.30'da gösterilmektedir. Kullanıcı, istenilen hareketi gerçekleştirmek için ilgili tuşa bastığında, o harekete ait kodlar aktif hale gelmektedir.



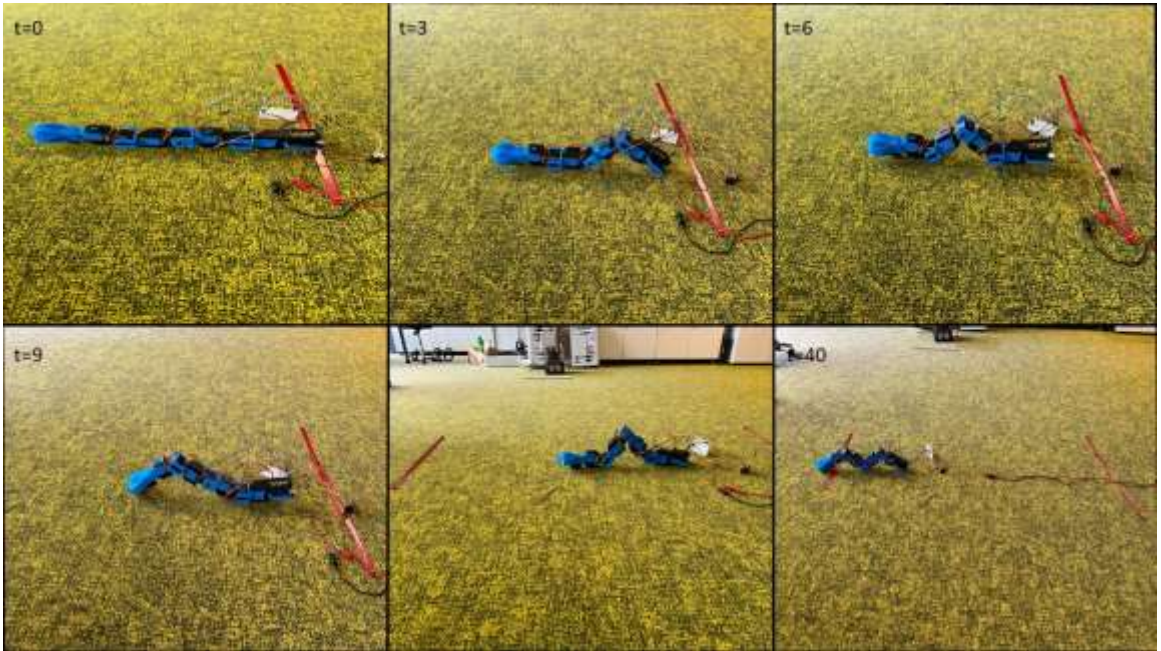
Şekil 4.30. Tasarlanan kontrol arayüzü

Prototipin hareket kabiliyetini değerlendirmek amacıyla, 1,5 metrelik bir alanda sürtünlü bir halı üzerinde Serpantin ve yan dönme hareketleri test edilmiştir. Serpantin hareketi, 1,5 metrelik mesafeyi yaklaşık 45 saniyede tamamlarken, yan dönme hareketi yaklaşık olarak 60 saniyede tamamlanmıştır. Bu testler, prototipin serpantin ve yan dönme hareketlerindeki performansını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Testlerin yapıldığı alan Şekil 4.31’de gösterilmektedir.

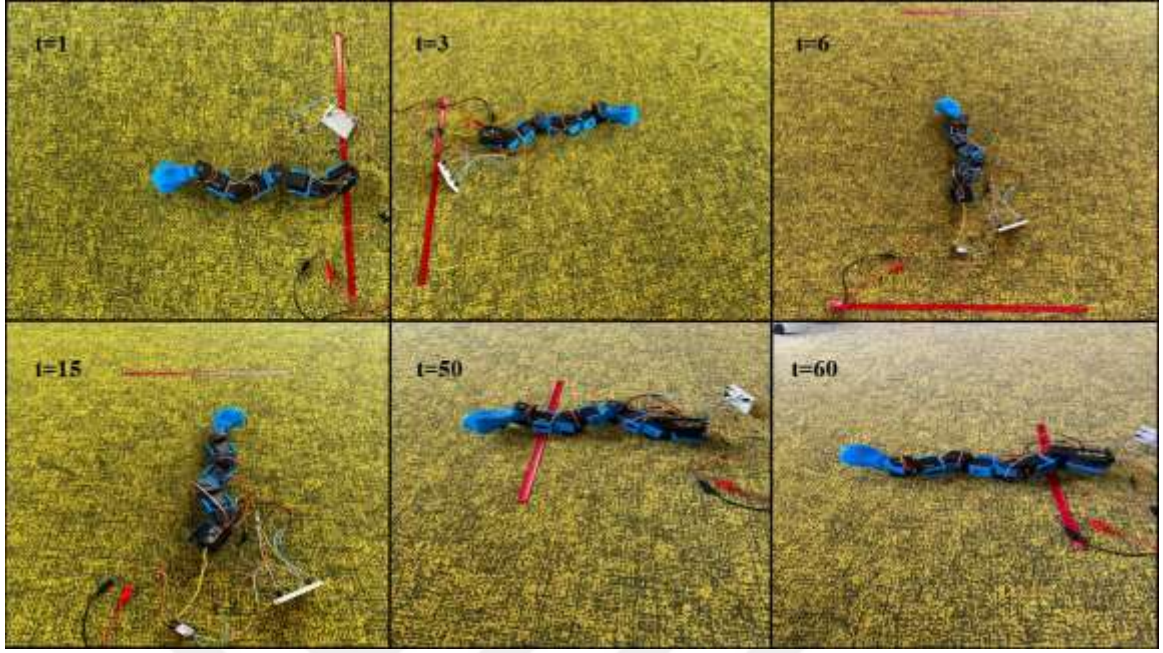


Şekil 4.31. Test alanı

Serpantin hareketinin hızı ve manevra kabiliyeti belirlenen alanda başarılı bir şekilde sonuçlanmıştır. Yanal dönüş hareketi ise daha yavaş olmasına rağmen istikrarlı bir performans sergilemiştir. Bu sonuçlar, prototipin tasarım ve yazılım aşamalarının gerçekleştirildiği başarıyla göstermektedir. Şekil 4.32’de, 1,5 metrelik bir alan üzerinde serpantin hareketinin izlediği yol, Şekil 4.33’te ise yan dönme hareketi gösterilmektedir.



Şekil 4.32. Prototibin serpantin hareketi



Şekil 4.33. Prototibin yan dönme hareketi

5. BULGULAR

Topoloji optimizasyonu için sonlu elemanlar analizleri tamamlandıktan sonra, optimize edilmemiş ve optimize edilmiş robotların karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırmada, kütle ve hacim değerlerinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca, deformasyon miktarının da azaldığı tespit edilmiştir. Gerilme ve gerinim değerlerinde de bir azalma kaydedilmiş olup, bu durum olumlu olarak değerlendirilmiştir. Bu olumlu değerlendirme, kullanılan PLA malzemesinin gerilme dayanımının 55-75 MPa arasında olmasından kaynaklanmaktadır.

Yapılan optimizasyon sonucunda ANSYS yazılımında elde edilen bilgisayar destekli analiz sonuçları fiziksel testlerle karşılaştırılmıştır. Ancak, bilgisayarda hesaplanan parça kütlesi ile 3D yazıcıdan üretilen parçanın kütlesi arasında bazı farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılık, kullanılan her PLA malzemesinin aynı özelliklere sahip olmamasından kaynaklanabilir. Bilgisayar analizinde kullanılan PLA malzeme özellikleri ile genel değerleri temsil ederken, pratikte kullanılan malzemenin özellikleri tam olarak aynı olmayabilir. Bilgisayar analizinde gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda kütle miktarı 31,394 gr'dan 15,655 gr'a düşmüş ve bu da %50,133 oranında bir azalma sağlamıştır. 3D yazıcıdan çıkan parçaların karşılaştırılması sonucunda ise kütle miktarı 23,50 gr'dan 12,00 gr'a düşmüş ve yaklaşık %48,936 oranında bir kütle azalması tespit edilmiştir. Ağırlık ve hacimdeki azalma miktarları, hem bilgisayar analiz sonuçlarında hem de 3D yazıcıdan üretilen eklem parçalarında neredeyse aynıdır. Bu tutarlılık, yapılan optimizasyon çalışmalarının etkinliğini ve doğruluğunu teyit etmektedir. Tablo 5.1'de analiz karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 5.1. Topoloji optimizasyonu sonuçları

| Analizler | Toplam Deformasyon (mm) | Gerinim (mm) | Gerilme (MPa) | Ağırlık (gr) | Hacim (mm ³) |
|---|-------------------------|--------------|---------------|--------------|--------------------------|
| Optimizasyon Öncesi Sistemin Analizi | 115,6 | 0,020887 | 71,971 | 617,81 | 494,25 |
| Optimizasyon Öncesi Gövde Eklemine Analizi | 0,092988 | 0,010408 | 35,869 | 31,394 | 25,115 |
| Optimizasyon Sonrası Gövde Eklemine Analizi | 0,042934 | 0,001997 | 38,619 | 15,655 | 12,524 |
| Optimizasyon Sonrası Sistemin Analizi | 24,571 | 0,020856 | 67,86 | 182,4 | 146,11 |

Optimizasyondan önce sistemin ilk analizi, yani robotun montajlı haline yapılan analiz sonucunda gerilme miktarı 71,971 MPa olarak tespit edilmiştir. Kütle ve hacimde yapılan azalmalar

sonucunda bu değer 67,86 MPa'a dūřmūřtūr. Optimizasyon sonucunda gerilmenin azalması, robotun yapısal bütünlüğünü ve dayanıklılığını artırır. Bu, robotun daha zorlu koşullarda ve uzun süreli kullanımda bile performansını korumasını sağlar. Aynı zamanda, düşük gerilme değerleri, robotun ömrünü uzatır ve bakım ihtiyaçlarını azaltır, böylece daha güvenilir ve sürdürülebilir bir sistem elde edilir.

Toplam deformasyon miktarı 115,6 mm'den 24,571 mm'ye dūřmūřtūr. Bu önemli azalma, robotun yapısal dayanıklılıęının ve dengesinin arttıęını göstermektedir. Azalan deformasyon, robotun yük altında daha az esnedięini ve daha saęlam bir yapıya sahip olduęunu ifade eder.

Optimizasyon çalışmaları sonucunda gerinim değerinde çok büyük bir değişim gözlemlenmemiştir. Bu durum, robotun yapısal bütünlüğünün korunduğunu ve malzemenin elastik özelliklerinde belirgin bir farklılık olmadığını göstermektedir. Gerinim değerinin büyük ölçüde sabit kalması, robotun optimize edilmiş tasarımıının esnekliğini ve mukavemetini koruduğunu ifade eder.

Bu bulgu, optimize edilen robotun dayanıklılık ve performans açısından beklenen seviyede olduğunu, ancak kütle, hacim ve deformasyon açısından önemli iyileştirmeler sağlandığını ortaya koymaktadır. Gerinim değerinde büyük bir değişim olmaması, robotun optimize edilmiş tasarımıının orijinal mekanik özelliklerini muhafaza ettiğini gösterir.

Sonuç olarak, optimize edilmiş robotun gerinim değerlerinde büyük bir değişim gözlemlenmemesi, robotun esneklik ve dayanıklılık özelliklerinin korunduğunu, diğer yandan kütle ve deformasyon azaltma hedeflerinin başarıyla gerçekteştirildiğini teyit etmektedir

6. SONUÇLAR

Biyolojiden esinlenen robotlar, arama-kurtarma alanında önemli gelişmeler sağlamıştır. Bu robotlar, canlıları tehlikeye atmadan kurtarma çalışmalarının yapılmasına olanak tanımaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, birçok hayvan benzeri robot geliştirilmiştir. Bu robotlardan biri olan yılan benzeri robotlar, ilham kaynağı olan yılanların kıvrımlı hareketlerinden esinlenerek tasarlanmıştır. Özellikle deprem gibi doğal afetlerde, yılan benzeri robotların sürünerek canlı takibi yapabilmesi büyük bir önem taşımaktadır. Dar alanlardan geçebilme yetenekleri, bu robotları arama-kurtarma çalışmalarında oldukça cazip kılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, yılan benzeri bir robotun gövde eklemlerine topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Robotun, her bir eklemi hareketli olarak tasarlanmıştır, bu da daha esnek hareketlilik sağlamıştır. Topoloji optimizasyonu sürecinde, bilgisayar destekli mühendislik yazılımı kullanılarak gövde eklemlerinin yapısal düzeni ve malzeme dağılımı optimize edilmiştir. Bu optimizasyonun ana hedefi, robotun kütle ve hacminde önemli bir azalmaya ulaşmaktır. Optimizasyon sonucunda elde edilen daha hafif ve daha küçük boyuttaki robot, dar alanlarda daha etkin bir şekilde manevra yapabilir hale gelmiştir. Özellikle, arama-kurtarma operasyonları gibi karmaşık ve sıkışık ortamlarda çalışan robotlar için bu durum, hayati öneme sahiptir. Daha az kütleyle sahip olmak, robotun enerji verimliliğini artırır ve daha uzun süreli görevler için daha uygun hale getirir. Ayrıca, daha küçük boyutlar, robotun taşınabilirliğini artırır ve daha fazla uygulama alanına olanak tanır. Bu optimizasyon çalışması, yılan benzeri robotların performansını artırmak ve pratik kullanımlarında daha etkin hale getirmek amacıyla yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, robotik sistemlerin gelişimine ve araştırma alanındaki ilerlemelere katkı sağlayacaktır.

Gelecekteki çalışmalar, daha güçlü servo motorlar kullanarak optimize edilmiş bir yılan benzeri robotun, görüntü işleme teknikleri ve gerekli sensörlerin entegrasyonu ile canlı takibi yapabilme yeteneğini araştırmayı hedeflemektedir. Bu amaçla, mevcut PLA malzemesi yerine karbon fiber kompozitler kullanılacaktır. Karbon fiber kompozitlerin yüksek mukavemet ve düşük ağırlık özellikleri, robotun daha verimli ve esnek hareketler yapmasını sağlayacaktır. Bu malzeme değişikliği ile robotun dayanıklılığı ve performansı artırılabilecek, aynı zamanda enerji verimliliği ve hareket kabiliyeti önemli ölçüde iyileştirilecektir. Ayrıca, entegre edilecek olan çeşitli sensörler (örneğin, LiDAR, ultrasonik sensörler ve kızılötesi sensörler) ile robotun çevresel algılama yetenekleri artırılacak ve bu sayede daha güvenilir ve hassas canlı takibi gerçekleştirilebilecektir. Sonuç olarak, bu ileri malzeme, motor ve sensör entegrasyonunun, yılan benzeri robotların arama-

kurtarma ve benzeri uygulamalarda daha etkili ve güvenilir bir şekilde kullanılmasına olanak tanınması beklenmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Merat, F. (1987). Introduction to robotics: mechanics and control. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 3(2), 166-166. <https://doi.org/10.1109/jra.1987.1087086>
- [2] Albuquerque, D., Castro, J., & Sousa, A. (2018). A requirements definition framework for the robotic systems domain - an exploratory study. *Anais Do WER18 - Workshop Em Engenharia De Requisitos*. <https://doi.org/10.17771/pucrio.wer.inf2018-49>
- [3] Oudeyer, P., Kaplan, F., & Hafner, V. V. (2007). Intrinsic motivation systems for autonomous mental development. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 11(2), 265-286. <https://doi.org/10.1109/tevc.2006.890271>
- [4] Walters, M. L., Dautenhahn, K., Te Boekhorst, R., Koay, K. L., Kaouri, C., Woods, S., ... & Werry, I. (2005, August). The influence of subjects' personality traits on personal spatial zones in a human-robot interaction experiment. In *ROMAN 2005. IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2005*. (pp. 347-352). IEEE.
- [5] Cheng, Y., Chan, K. H., Wang, X., Ding, T., Li, T., Lü, X., ... & Ho, G. W. (2019). Direct-ink-write 3d printing of hydrogels into biomimetic soft robots. *ACS Nano*, 13(11), 13176-13184. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b06144>
- [6] Landgraf, T., Bierbach, D., Nguyen, H., Muggelberg, N., Romanczuk, P., & Krause, J. (2016). Robofish: increased acceptance of interactive robotic fish with realistic eyes and natural motion patterns by live trinidadian guppies. *Bioinspiration & Biomimetics*, 11(1), 015001. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/11/1/015001>
- [7] Shintake, J., Cacucciolo, V., Shea, H., & Floreano, D. (2018). Soft biomimetic fish robot made of dielectric elastomer actuators. *Soft Robotics*, 5(4), 466-474. <https://doi.org/10.1089/soro.2017.0062>
- [8] Transteth, A. A., Leine, R. I., Glocker, C., Pettersen, K. Y., & Liljebäck, P. (2008). Snake robot obstacle-aided locomotion: modeling, simulations, and experiments. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(1), 88-104. <https://doi.org/10.1109/tro.2007.914849>
- [9] Liljebäck, P., Stavadahl, Ø., & Pettersen, K. Y. (2005). Modular pneumatic snake robot 3d modelling, implementation and control. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), 19-24. <https://doi.org/10.3182/20050703-6-cz-1902.01274>
- [10] Wu, X. and Ma, S. (2009). Adaptive creeping locomotion of a cpg-controlled snake-like robot to environment change. *Autonomous Robots*, 28(3), 283-294. <https://doi.org/10.1007/s10514-009-9168-1>
- [11] Tian, Y., Gómez, V. M. G., & Ma, S. (2015). Influence of two slam algorithms using serpentine locomotion in a featureless environment. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. <https://doi.org/10.1109/robio.2015.7418764>
- [12] Hirose, S. (1993). *Biologically inspired robots. Snake-Like Locomotors and Manipulators*.
- [13] Chirikjian, G. S., & Burdick, J. W. (1994). A modal approach to hyper-redundant manipulator kinematics. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 10(3), 343-354.

- [14] Shan, Y., & Koren, Y. (1993). Design and motion planning of a mechanical snake. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 23(4), 1091-1100.
- [15] Crespi, A., Badertscher, A., Guignard, A., & Ijspeert, A. J. (2005). Amphibot i: an amphibious snake-like robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 50(4), 163-175. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2004.09.015>
- [16] Yıldırım, Ş., & Yaşar, E. (2015). Development of an obstacle-avoidance algorithm for snake-like robots. *Measurement*, 73, 68-73.
- [17] Ariizumi, R., & Matsuno, F. (2017). Dynamic analysis of three snake robot gaits. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(5), 1075-1087.
- [18] Shmakov, O. (2006). Snakelike robots locomotions control. *Mechatronics–Foundations and Applications*.
- [19] Aung, H. H. and Oo, Z. M. (2018). Path tracking control of obstacle avoiding robot using ultrasonic sensor. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 7(12), 499-503. <https://doi.org/10.7753/ijsea0712.1005>
- [20] Elkhateeb, N. A. and Badr, R. I. (2017). Novel pid tracking controller for 2dof robotic manipulator system based on artificial bee colony algorithm. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 13(1), 55-62. <https://doi.org/10.1515/ecce-2017-0008>
- [21] Haghshenas-Jaryani, M., & Vossoughi, G. (2009, February). Modeling and sliding mode control of a snake-like robot with holonomic constraints. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* (pp. 454-461). IEEE.
- [22] Араффа, X., Ткач, М. М., & Khlaponin, Y. I. (2019). Applying the forward kinematic of the biped robot with 12 dof based denavit and hartenberg method. *Modern Information Security*, (1). <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2019.013647>
- [23] Guo, S., Li, H., Ji, J., & Ming, Z. (2014). Kinematic analysis and simulation of a new-type robot with special structure. *Advances in Manufacturing*, 2(4), 295-302. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0094-x>
- [24] Li, P. (2020). Research on robot boxing movement simulation based on kinect sensor. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020(1). <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01761-x>
- [25] Corke, P. I. (2007). A simple and systematic approach to assigning Denavit–Hartenberg parameters. *IEEE transactions on robotics*, 23(3), 590-594.
- [26] Roman, A. S., Streveler, R. A., Steif, P. S., & DiBello, L. V. The development of a q matrix for the concept assessment tool for statics. *2010 Annual Conference & Exposition Proceedings*. <https://doi.org/10.18260/1-2--16659>
- [27] Letcher, T., & Waytashek, M. (2014, November). Material property testing of 3D-printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer. In *ASME international mechanical engineering congress and exposition* (Vol. 46438, p. V02AT02A014). American Society of Mechanical Engineers.
- [28] Meneghetti, G., Campagnolo, A., Avalle, M., Castagnetti, D., Colussi, M., Corigliano, P., ... & Zuccarello, B. (2018). Rapid evaluation of notch stress intensity factors using the peak stress method: Comparison of commercial finite element codes for a range of mesh patterns. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 41(5), 1044-1063.
- [29] Fan, H., Zhang, J., Zhang, W., & Liu, B. (2020). Multiparameter and multiobjective optimization design based on orthogonal method for mixed flow fan. *Energies*, 13(11), 2819. <https://doi.org/10.3390/en13112819>

- [30] Palomba, I. and Vidoni, R. (2019). Flexible-link multibody system eigenvalue analysis parameterized with respect to rigid-body motion. *Applied Sciences*, 9(23), 5156. <https://doi.org/10.3390/app9235156>
- [31] Cheng, L., Busca, G., & Cigada, A. (2017). Experimental strain modal analysis for beam-like structure by using distributed fiber optics and its damage detection. *Measurement Science and Technology*, 28(7), 074001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa6c8c>
- [32] Luo, H. T., Wang, W., Fu, J., & ZHAO, F. Q. (2018, June). Equivalent modeling method and experimental verification of honeycomb sandwich panels. In *International Conference on Computational, Modeling, Simulation and Mathematical Statistics (CMSMS 2018)*, Xi'an, China (pp. 24-25).
- [33] Li, J., Li, R., & Ruan, X. (2022). Resonance analysis of multiple grid-connected inverters' series and parallel network. *IET Renewable Power Generation*, 17(5), 1106-1118. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12666>
- [34] Hong, L., Shu, W., Wang, J., & Rizwan, M. (2019). Harmonic resonance investigation of a multi-inverter grid-connected system using resonance modal analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(1), 63-72. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2018.2877966>
- [35] Koolstra, J. and Eijden, T. v. (2005). Combined finite-element and rigid-body analysis of human jaw joint dynamics. *Journal of Biomechanics*, 38(12), 2431-2439. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.10.014>
- [36] Yu, Y., Li, Q., & Xu, Q. (2017). Pseudo-rigid-body dynamic modeling and analysis of compliant mechanisms. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(9), 1665-1678. <https://doi.org/10.1177/0954406217707547>
- [37] Chuang, C., Chen, S., Yang, R. and Vogiatzis, P. (2017). Topology optimization with additive manufacturing consideration for vehicle load path development. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 113(8), 1434-1445. <https://doi.org/10.1002/nme.5549>
- [38] Bahlau, J. and Lee, E. (2022). Designing moulded pulp packaging using a topology optimization and superimpose method. *Packaging Technology and Science*, 35(5), 415-423. <https://doi.org/10.1002/pts.2639>
- [39] Zhu, J. and Chen, X. (2017). An engineering constraint method for continuum structural topology optimization. *Advances in Mechanical Engineering*, 9 (12), 168781401774338. <https://doi.org/10.1177/1687814017743387>
- [40] Hu, Z., Vambol, O., Sun, S., and Zeng, Q. (2021). Development of a topology optimization method for the design of composite lattice ring structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1), 112, 6-13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238266>
- [41] Kentli, A. (2020). Topology optimization applications on engineering structures. *Truss and Frames - Recent Advances and New Perspectives*, 1-23. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90474>

EKLER

EK- 1: MATEMATİKSEL MODEL KODU

```
function phi = compute_phi(t, alpha, omega, beta, gamma, i)
phi = alpha * sin(omega * t + (i - 1) * beta) + gamma;
end
```



EK- 2: İLERİ KİNEMATİK HESAPLAMA KODU

```
function H = forwardKinematics(th1,th2,th3,th4,th5,th6,th7)
a = zeros(1,8);
al = [0 -90 90 90 -90 -90 90 0];
d = [0.155 0.92 0 1.84 0 1.84 0 1.5];
th = rad2deg([0 th1 th2 th3 th4 th5 th6 th7]);
A = zeros(4,4,length(a));
H = eye(4);
for i = 1:length(a)
    A(:, :, i) = [cosd(th(i)) -sind(th(i))*cosd(al(i)) sind(th(i))*sind(al(i)) a(i)*cosd(th(i));
                 sind(th(i)) cosd(th(i))*cosd(al(i)) -cosd(th(i))*sind(al(i)) a(i)*sind(th(i));
                 0 sind(al(i)) cosd(al(i)) d(i);
                 0 0 0 1];
    H = H*A(:, :, i);
End
```

EK- 3: KAFA EKLEMİNİN YENİDEN TASARIMI



