

**MİKRO-FİBER YAPILAR KULLANAN TIRMANAN
ROBOTUN TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE ÜRETİMİ**

**DESIGN AND OPTIMIZATION OF CLIMBING ROBOTS
UTILIZING MICRO-FIBER ARRAYS**

AHMET ÇALIŞ

Dr.ÖZGÜR ÜNVER
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2013

AHMET ÇALIŞ'in hazırladığı “**Mikro-Fiber Yapılar Kullanan Tırmanan Robotun Tasarımı, Optimizasyonu Ve Üretimi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Dr. S. Çağlar Başlamışlı

Danışman

Dr. Özgür Ünver

Üye

Yrd. Doç. Dr. Yiğit Taşçıoğlu

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafında **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof.Dr.Fatma SEVİN DÜZ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

20/02/2013

Ahmet Çalış

ÖZET

MİKRO-FİBER YAPILAR KULLANAN TIRMANAN ROBOTUN TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE ÜRETİMİ

AHMET ÇALIŞ

Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Özgür Ünver

Şubat 2013, 92 Sayfa

Bu çalışma TÜBİTAK destekli olarak “Mikro-Fiber Yapılar İle Birçok Farklı Yüzeyle Tırmanabilen Enerji-Verimli Gözlem, İnceleme ve İstihbarat Robot Tasarımı ve Üretimi” isimli ve “110E186” numaralı proje kapsamında yapılmıştır. Bu tez, bu projenin bir parçası olarak yapılmıştır. Robotlar uzun yıllardır endüstride ve günlük hayatta kullanılmakta olup yaygınlıkları her geçen gün artmaktadır. İnsanların tehlikeli işlerde ve ulaşılması zor yerlerde robotları kullanmayı tercih etme sebeplerinden bazıları; insan sağlığını ve güvenliğini riske atmamak ve robotların kendilerine verilen görevleri eksiksiz yerine getirmelerini sağlamaktır. Tırmanma ve bu esnada istenilen görevi yerine getirme işi robotlar tarafından çok daha kolay ve verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Tırmanan robotlar üzerine son yıllarda birçok çalışma ve yenilik yapılmıştır. Bu sayede tırmanan robotlar çeşitli görevlerde aktif olarak kullanılmıştır. Tırmanan robotlar nükleer güç santralleri, uçaklar, binalar, borular vb. gibi yerlerde bakım-onarım, inceleme, gözetleme ve keşif amacıyla kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında bir çok farklı yüzeye tırmanabilen hiyerarşik esneklikleri sahip tırmanan robotu tasarımı yapılmıştır ve testleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tırmanan robot, optimizasyon.

ABSTRACT

DESIGN AND OPTIMIZATION OF CLIMBING ROBOTS UTILIZING MICRO-FIBER ARRAYS

AHMET ÇALIŞ

Master of Science, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Dr. ÖZGÜR ÜNVER

February 2013, 92 pages

This work is prepared with the support of TÜBİTAK Project named “Designing and Manufacturing of Energy Efficient Various-Surface Climbing Robots Utilizing Micro-Fibers for Surveillance, Inspection, and Security Purposes” with the code number “110E186”. Robots have been used for many years in industrial applications and daily life and their penetration is being increased every day. Main reasons people use robots are; increasing health safety of people and ability of robots finishing any given duty without any flaw. Climbing and executing a given duty can be done effortlessly and efficiently by climbing robots.

In recent years, there has been many study and improvement in climbing robots. Thus, climbing robots are used actively in many missions. Climbing robots are being used in nuclear facilities, on planes, buildings, pipelines etc. for inspection, surveillance, maintenance and repair.

In this work, climbing robot design is optimized according to components it used and ratio between adhesion and robot size. Climbing tests are examined if performance levels are met. Further studies are done to increase climbing safety and performance.

Key Words: Climbing robot, optimization.

TEŞEKKÜR

“Mikro-Fiber Yapılar İle Birçok Farklı Yüzeylere Tırmanabilen Enerji-Verimli Gözlem, İnceleme ve İstihbarat Robot Tasarımı ve Üretimi” isimli ve“110E186” numaralı projeyi desteklediği için TÜBİTAK’a teşekkür ederim. Bu tez, bu projenin bir parçası olarak yapılmıştır.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
KABUL VE ONAY SAYFASI.....	i
ETİK.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Problem Tanımı.....	1
1.2. Motivasyon.....	1
1.3. Tezin Amacı.....	1
1.4. Hedefler.....	2
1.5. Bölümler.....	3
2. TASARIM.....	4
2.1. Literatürde Tırmanan Robotlar.....	4
2.1.1. Vakumla Tekniği İle Tırmanma.....	4
2.1.2. Girdaplama Tekniği İle Tırmanma.....	4
2.1.3. Manyetik Tutunma Tekniği İle Tırmanma.....	4
2.1.4. Mekanik Tutunma Tekniği İle Tırmanma.....	4
2.1.5. Elektrostatik Tutunma Tekniği İle Tırmanma.....	4
2.2. Literatürde Geçen Elastomer Tabanlı Tırmanan Robotlar.....	5
2.2.1. Mini-Whegs.....	5
2.2.2. Waalbot.....	6
2.2.3. Stickboy.....	7

İÇİNDEKİLER DİZİNİ(Devam Ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.2.4. Geckobot	7
2.2.5. Fourbar	8
2.2.6. Tankbot.....	8
2.3. Değerlendirme.....	9
3. TIRMANAN ROBOT TASARIMI VE MATEMATİKSEL MODELLEMESİ	13
3.1. Robotun Özellikleri	13
3.2. Tırmanan Robotun Kuvvet Analizi ve Boyutsal Modellemesi.....	14
3.2.1. Motor Seçimi	14
3.2.2. Batarya Seçimi.....	15
3.2.3. Tutunma Kuvveti/Ağırlık-Boy Optimizasyonu	16
3.2.4. Kuvvet Analizi	21
3.2.5. Serbest Cisim Diyagramı	22
3.2.6. Kuyruk Etkisi	22
3.2.7. Elastomer Ayrılma Kuvveti	24
3.2.8. Robot ve Elastomere Etkiyen Kuvvetlerin Analizi	25
3.2.9. Hiyerarşik Esneklik.....	27
3.2.10. Şase Tasarımı.....	28
3.2.11. Şase Tasarımı-I	29
3.2.12. Şase Tasarımı-II	30
3.2.13. Şase Tasarımı-III	33
3.2.14. Kuyruk Tasarımı.....	35
3.2.15. Teker Tasarımı.....	36
3.2.16. Tekerlerin Üretimi.....	38
3.2.17. Süngerlerin Üretimi	39

İÇİNDEKİLER DİZİNİ(Devam Ediyor)

Sayfa

4. TIRMANAN ROBOT MEKANİK, ELEKTRONİK VE YAZILIM ENTEGRASYONU	41
4.1. Sensörler Ve İşlevleri.....	41
4.1.1. Kızılötesi Yakınlık Sensörü	42
4.1.2. Eğim Ölçer-İvme Sensörü.....	42
4.2. Geliştirme Kartları Teknik Özellikleri ve Gereken Pin Sayıları	43
4.3. Kullanılan Yardımcı Donanımlar	44
Motor Shield.....	44
Xbee Anten	44
Xbee Shield	45
Xbee USB Shield	45
4.4. Labview Arayüzü	45
4.4.1. Arduino Initialization Görsel Arayüzü	45
4.4.2. Arduino Analog Read Görsel Arayüzü	47
4.4.3. Scaling And Mapping Görsel Arayüzü	47
4.4.4. Compound Arithmetic Görsel Arayüzü.....	48
4.4.5. Arduino PWM Write Görsel Arayüzü.....	49
4.4.6. Arduino Digital Write Görsel Arayüzü.....	49
4.4.7. Case Structure:.....	50
4.5. Tırmanma Güvenliği	51
4.6. Kablosuz İletişim	51
4.6.1. Xbee Anten	51
4.7. Aktif Kuyruk Kontrolü	52
4.8. Labview Kullanıcı Arayüzü	54

İÇİNDEKİLER DİZİNİ(Devam Ediyor)

	<u>Sayfa</u>
5. TIRMANAN ROBOT TESTLERİ.....	54
5.1. Kablosuz İletişim ve Kontrol Testleri.....	54
5.2. İleri Gidiş Kontrolü	55
5.3. Sağ-Sola Dönüş Kontrolleri	55
5.4. Tırmanma Güvenliği Sistemi Çalışma Testleri.....	56
5.5. PID Kuyruk Kontrolü Testleri	56
5.6. Tırmanma Testleri	56
5.6.1. Dik Yüzeyde Tırmanma Testi.....	57
5.6.2. İç ve Dış Düzlemler Arası Geçiş ve Tırmanma Testi.....	58
5.6.3. Dik Yüzeylerde Bekleme Testi	59
5.6.4. Dik Yüzeyden Ters Yüzeye Geçiş ve Ters Yüzeyde Tırmanma	59
5.6.5. Yük Taşıma Testleri	60
5.6.6. Ters Yüzeylerde Bekleme Testi	60
5.6.7. Engel Aşma Testleri.....	60
5.7. Sonuçlar ve Öneriler.....	61
5.7.1. Sonuçlar.....	61
5.7.2. Öneriler	62
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	64
EKLER.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	74

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Mini-Whegs (solda) ve Mini-Whegs B00 (sağda [12], [13], [28])	6
Şekil 2.2. Waalbot II [11]	6
Şekil 2.3. Stickybot [7]	7
Şekil 2.4. Geckobot [5]	8
Şekil 2.5. Fourbar [1]	8
Şekil 2.6. Tankbot [4].....	9
Şekil 3.1. Motorlar İçin Watt-Gr Grafiği (Seçilen Motor Yeşil Nokta ile Belirtilmiştir)	14
Şekil 3.2. Teker Motoru 1000:1 32 RPM Dişli Kutulu HP DC Motor	14
Şekil 3.3. Batarya için Watt-Gr Grafiği	15
Şekil 3.4. Tırmanan Robot Taslağı(Robotun Şase Boyu L_4 , Şase Eni L_3 , Şase Kalınlığı L_5 , Teker Temas Alanı Boyu L_1 , Teker Temas Alanı Eni L_2 , Kuyruk Boyu L_6 , Kuyruk Kalınlığı L_7 , Kuyruk Eni L_8	16
Şekil 3.5. L_4 Boyunun Teker Yarıçapına Oranının Dış Düzlemler Arası Geçişe Etkisi.....	18
Şekil 3.6. Tekerler Arası Dış Düzlemler Arası Geçişe Etkisi(Kırmızı, Sarı ve Yeşil Renkler farklı tekerler arası mesafe-teker yarıçapı oranını temsil etmektedir).....	18
Şekil 3.7. Teker Yarıçapı ve L_1 Arasındaki Bağınıtını	18
Şekil 3.8. Tutunma Kuvveti/Ağırlık Boy Grafiği, Tutunma Kuvveti-Ağırlık Boy Grafiği.....	20
Şekil 3.9. Robot ve Elastomer Üzerindeki Kuvvet Dağılımları	21
Şekil 3.10. Serbest Cisim Diyagramını	22
Şekil 3.11. Ön Arka Tekerlerin Kuvvet Dağılımını(Ek-2).....	23
Şekil 3.12. 0.5 N Kuyruk Basma Kuvveti ile Ön Arka Tekerlerin Kuvvet Dağılımını (EK-3).....	23

ŞEKİLLER DİZİNİ(Devam Ediyor)

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.13. Elastomer Ayrılma Modeli	24
Şekil 3.14. Elastomer Ayrılma Kuvveti Açısı Analizi [6] (EK-4)	24
Şekil 3.15. Elastomer Ayrılma Açısı	25
Şekil 3.16. Ön ve Arka Tekerlere Etkiyen Toplam Kuvvetler 0-360° Arası	26
Şekil 3.17. Ön ve Arka Tekerlere Etkiyen Toplam Kuvvetler 0-360° Arası	26
Şekil 3.18. Ön ve Arka Tekerlere Etkiyen Toplam Kuvvetler 0-360° Arası	27
Şekil 3.19. Hiyerarşik Esneklikler	27
Şekil 3.20. Rocker Boogie [29]	28
Şekil 3.21. Şase Tasarımı-I (Sağ Modül).....	29
Şekil 3.22. ŞaseTasarımı-I Sonlu Elemanlar Analizi (Von Misses Stress)	30
Şekil 3.23. Şase Tasarımı-I Sonlu Elemanlar Analizi (Deplasman)	30
Şekil 3.24. Tırmanan Robot Şase Tasarımı-II	31
Şekil 3.25. Sonlu Elemanlar Analizi Şase Tasarımı-II (Von Misses Stress)	31
Şekil 3.26. Sonlu Elemanlar Analizi Şase Tasarımı-II (Deplasman)	31
Şekil 3.27. Tırmanan Robot Şase Tasarımı-II	32
Şekil 3.28. Robot Şase Tasarımı-II (Solda) Ve Bileşenleri (Sağda).....	32
Şekil 3.29. Şase Tasarımı-III	33
Şekil 3.30. Şase Tasarımları (Soldan Sağa, Şase Tasarımı-III, Şase Tasarımı-III Draft, Şase Tasarımı-II)	34
Şekil 3.31. Sonlu elemanlar analizi Şase Tasarımı-III (Von Misses Stress)	34
Şekil 3.32. Sonlu Elemanlar Analizi Şase Tasarımı-III (Deplasman)	34
Şekil 3.33. Robot Şase Tasarımı-III (Solda) Ve Bileşenleri (Sağda).....	35
Şekil 3.34. Kuyruk Tekerleği.....	35
Şekil 3.35. Teker ve Kuyruk Laser Kesim için CAD çizimi	36

ŞEKİLLER DİZİNİ(Devam Ediyor)

Sayfa

Şekil 3.36. 1000 Nmm Tork Altında Sonlu Elemanlar Analizi (Von Misses Stress)	36
Şekil 3.37. 1000 Nmm Tork Altında Sonlu Elemanlar Analizi (Deplasman).....	37
Şekil 3.38. Tekerlerin İzometrik Görüntüsü	37
Şekil 3.39. Tekerler Arası Hız Farkı.....	38
Şekil 3.40. Teker Yapıştırma Kalıbı	39
Şekil 3.41. Üretilmiş Teker	39
Şekil 3.42. Hot Wire Düzeneği Ve Hot Wire Düzeneği İle Kesilmiş Sünger Tekerleği.....	40
Şekil 4.1. İvme Sensörü Kullanıcı Arayüzü Üç Boyutlu Uzay Pozisyon Görüntüsü	42
Şekil 4.2. Kullanılan Sensör ve Donanımlar Soldan-Sağa-Yukarıdan-Aşağıya: Arduino Uno Xbee Sheild, Arduino Uno Motor Drive, Arduino Uno, Arduino Mega, Arduino Nano, Nano Xbee Sheild, Nano Motor Drive, Xbee USB Sheild, 2 Adet Xbee, 2 adet Kuvvet Sensörü, 2 Adet Yakınlık Sensörü, İvme Sensörü	44
Şekil 4.3. Arduino Başlatma VI'ı	45
Şekil 4.4. Tırmanan Robotta kullanılan Arduino Başlatma Görsel Arayüzü Konfigürasyonu	45
Şekil 4.5. Create Komutu Seçenekleri.....	46
Şekil 4.6. Arduino Analog Read VI'ı	47
Şekil 4.7. 1 Numaralı Analog Pinden Sinyal Okuma.....	47
Şekil 4.8. Arduino Scaling And Mapping Görsel Arayüzü	47
Şekil 4.9. Arduino Scaling And Mapping Görsel Arayüz Konfigürasyonu	47
Şekil 4.10. Arduino Scaling And Mapping Görsel Arayüz Ayarları.....	48
Şekil 4.11. Arduino Scaling And Mapping Görsel Arayüz Ayarları.....	48

ŞEKİLLER DİZİNİ(Devam Ediyor)

Sayfa

Şekil 4.12. Genel Tırmanma Güvenliği Göstergesi Blok Diagram Konfigürasyonu	48
Şekil 4.13. Arduino PWM Write Görsel Arayüzü.....	49
Şekil 4.14. Arduino PWM Write Görsel Arayüz Konfigürasyonu.....	49
Şekil 4.15. Arduino Digital Write Görsel Arayüzü	49
Şekil 4.16. Arduino Digital Write Görsel Arayüz Konfigürasyonu.....	50
Şekil 4.17. Arduino Digital Write Görsel Arayüz Konfigürasyonu.....	50
Şekil 4.18. Case Structure.....	50
Şekil 4.19. Yön kontrolü Case Structure=True	50
Şekil 4.20. Yön Kontrolü Case Structure=False	50
Şekil 4.21. Yapışma Kuvvetinden (Sarı Ok) Dolayı Tekerlerde Kullanılan Süngerlerin Deformasyonu (Sarı Bölge) ve Bu Sayede Yapışma Yüzeyinin Genişlemesi (Kırmızı Bölge).....	51
Şekil 4.22. Xbee Anten İletişim Test Ekranı.....	52
Şekil 4.23. Xbee Anten Modem Configuration Sekmesi	52
Şekil 4.24. PID Kontrolcü Görüntüsü	53
Şekil 4.25. Labview Kullanıcı Arayüzü.....	54
Şekil 5.1. İleri Gidiş Kontrolü(Sarı Çerçeve İçinde).....	55
Şekil 5.2. Sola Dönüş Kontrolü(Sarı Çerçeve İçinde)	55
Şekil 5.3. Sağa Dönüş Kontrolü(Sarı Çerçeve İçinde).....	55
Şekil 5.4. Tırmanma güvenliği Anlık Gösterimi	56
Şekil 5.5. Cam Yüzeye Tırmanma.....	58
Şekil 5.6. Cam İç Düzlemler Arası Geçiş.....	58
Şekil 5.7. Ahşap İç Düzlemler Arası Geçiş	58
Şekil 5.8. Ahşap Yüzey Boyalı Duvar Arası Düzlem Geçışı.....	59

ŞEKİLLER DİZİNİ(Devam Ediyor)

	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.9. Ahşap Dış Düzlemler Arası Geçiş	59
Şekil 5.10. Akrilik Yüzeyde Dik Düzlemde Tavana Geçiş.....	59
Şekil 5.11 Akrilik Yüzeyde Ters Tırmanma.....	59
Şekil 5.12. 269 Gr Ağırlık ile Tırmanma.....	60
Şekil 5.13. 10 mm Çapında Silindirik Engelden Geçiş.....	60
Şekil 5.14. 12x23 mm Ebatlarında Dikdörtgensel Kesite Sahip Engellerden Geçiş	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Elastomer kullanan tırmanan robotların karşılaştırılması.....	10
Çizelge 3.1. Pleksiglass Mekanik Özellikleri.....	13
Çizelge 3.2. Pololu 1:1000 32RPM HP DC Motor Teknik Verileri.....	15
Çizelge 3.3. Şase Teknik Verileri.....	35
Çizelge 3.4. Tekerlerin Teknik Özellikleri	37
Çizelge 3.5. Sünger Teknik Özellikleri.....	40
Çizelge 3.6. Tırmanan Robot Bileşenlerinin Teknik Özellikleri	40
Çizelge 4.1. Yakınlık Sensörü Teknik Özellikleri	42
Çizelge 4.2. İvme Sensörü Teknik Özellikleri	42
Çizelge 4.3. Boardların Pin Sayıları.....	43
Çizelge 4.4. Kullanılacak Sensör ve Donanımlar ve Pin Gereksinimleri.....	43
Çizelge 4.5. Boyutsal Karşılaştırma.....	44
Çizelge 4.6. PID Katsayı ve Değerleri	53
Çizelge 5.1. Tırmanan Robot Bileşen ve Ekipman Ağırlıkları	57
Çizelge 5.2. Başarı Kriterleri ve Test Sonuçları	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

T_{fm}	Ön Motor Torku
T_{rm}	Arka Motor Torku
F_{fm}	Motor Torkundan Dolayı Ön Tekerde Oluşan Normal Kuvvet
F_{fmg}	Robotun Ağırlığından Dolayı Ön Tekerde Oluşan Kuvvet
F_{fp}	Ön Tekerdeki Elastomerin Ayrılma Kuvveti Normal Bileşeni
F_{fric}	Sürtünme Kuvveti
F_{ft}	Kuyruk Basma Kuvvetinden Dolayı Ön Tekerde Oluşan Kuvvetin Normal Bileşeni
F_F	Ön Tekerdeki Normal Kuvvet
F_R	Arka Tekerdeki Normal Kuvvet
F_{NF}	Ön Tekerde Oluşan Normal Kuvvet
F_{NR}	Arka Tekerde Oluşan Normal Kuvvet
F_p	Elastomer Ayrılma Kuvveti
F_{rm}	Motor Torkundan Dolayı Arka Tekerde Oluşan Normal Kuvvet
F_{rmg}	Robotun Ağırlığından Dolayı Arka Tekerde Oluşan Kuvvet
F_{rp}	Arka Tekerdeki Elastomerin Ayrılma Kuvveti Normal Bileşeni
F_{rt}	Kuyruk Basma Kuvvetinden Dolayı Arka Tekerde Oluşan Kuvvetin Normal Bileşeni
F_s	Elastomer Gevşeme Kuvveti
F_{shear}	Elastomer Kesme Kuvveti
F_x	X Eksenine Yönünde Oluşan Kuvvet
L_1	Ön Teker Merkezi Ağırlık Merkezi Arası Mesafe

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ(Devam Ediyor)

L_2	Ağırlık Merkezi Arka Teker Merkezi Arası Mesafe
L_3	Kuyruk Boyu
r_w	Teker Yarı Çapı
t_t	Kuyruk Motoru Merkezi İle Arka Teker Merkezi Arası Mesafe
b	Elastomer Genişliği
E	Elastomerlerin Elastisite Modülü
R	Yapışma Enerjisi
d	Elastomer Kalınlığı
m_r	Robotun Toplam Ağırlığı
m_s	Robotun Şasesinin Ağırlığı
m_m	Robotta Kullanılan Motorların Ağırlığı
m_t	Robotun Tekerlerinin Ağırlığı
m_k	Robotun Kuyruğunun Ağırlığı
m_c	Robotta Kullanılacak Ekipmanların Ağırlığı(Sabit Ağırlık)
K_c	Kontrolcü Katsayısı
T_i	İntegral Süresi(dk)
T_d	Tepki Süresi(dk)
τ	Tepki Süresi
T_p	Zaman Sabiti

Kısaltmalar

TÜBİTAK Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu

1. GİRİŞ

1.1. Problem Tanımı

Robotlar yıllardır tehlikeli görevlerde kullanılmakta ve kullanım alanları her geçen gün hızla artmaktadır. İnceleme, gözlem, gözetleme, arama-kurtarma, keşif, bakım, onarım vb. eylemlerde insanların çeşitli yüzeylere tırmanması gerekebilmekte, insan hayatının tehlikede olabileceği şartlar oluşabilmekte ve/veya yüksek maliyetli ve uzun uğraşlar sonucu inşa edilen iskele vb. yapılar kurulması gerekebilmektedir. Bu nedenlerle bu tip görevleri insanlar yerine yapabilecek birçok yüzeye tırmanabilen, düşük maliyetli, çevreye ve çalıştığı yüzeye zarar vermeyen robotların yapılması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Robotlar kendilerine verilen görevleri daha güvenli, daha hızlı, eksiksiz ve düşük maliyetli yapabilmektedir.

1.2. Motivasyon

Bu tezin motivasyonu;

- İnsan sağlığını ve güvenliğini riske atabilecek tırmanma ile ilgili olan görevleri insanlardan alarak olabildiğince robotların yapmasını sağlamak,
- Bu görevlerde harcanan zamanı asgari düzeye indirmek,
- Bu görevler için harcanan maddi kaynakları asgari düzeye indirmek.

Tırmanma ve dik yüzeylerde çalışma gibi yüksek risk taşıyan görevlerin insanlar tarafından yapılması hem yüksek maliyetler getirmekte hem de insan hayatını tehlikeye atmaktadır. Ek olarak tırmanma gerektirecek görevin gerçekleştireceği yüzeyler için ihtiyaç duyulan iskele vb. yapıların kurulması yüksek maliyetler getirmektedir. Dahası tırmanılacak yüzey hassas bir yüzeyse tırmanan robotlar bu tip yüzeylere zarar vermeden herhangi bir iskele vb. yapıya gerek duymadan bu görevi gerçekleştirebilmektedir. Bu nedenlerle tırmanan robotlar kendilerine verilen görevleri çok daha düşük maliyetlerle ve iskele vb. yapılar kurulmasına gerek kalmadan çok daha düşük maliyetlerle yerine getirebilirler.

1.3. Tezin Amacı

Tırmanan robotlar üzerine son yıllarda birçok çalışma ve yenilik yapılmıştır. Bu sayede tırmanan robotlar çeşitli görevlerde aktif olarak kullanılmışlardır. Nükleer güç santralleri, uçaklar, binalar, borular vb. gibi yerlerde inceleme, gözlem,

gözetleme, arama-kurtarma, keşif, bakım, onarım amacıyla kullanılmaktadırlar. Bu tez çalışması kapsamında belirlenen amaçlardan bazıları aşağıda maddeler olacaktır.

- Literatürde yer alan süreklilik arz etmeyen ayaklı yapışma tekniklerinin yerine tekerli, süreklilik arz eden, daha stabil, hiyerarşik esnekliklere sahip, engel aşma kabiliyeti olan, daha hızlı tırmanma gerçekleştirebilecek bir robot tasarlamak,
- Tırmanan robotlarda kullanılacak olan motor ve dişli kutusu seçimlerini yapmak,
- Tasarlanacak tırmanan robotta kullanılacak elektronik ve mekanik özellikleri belirlemek ve bunlara uygun tasarımı gerçekleştirmek,
- Tırmanan robotlarda kullanılacak sensörleri ve iletişim donanımlarının seçimlerini yapmak,
- Tırmanan robotlarda maksimum yapışma elde edebilmek için boyutsal analiz yaparak optimum boyutsal değerlere ulaşmak,
- Tırmanan robotlarda optimum tutunma ve optimum boyutsal değerlere ulaşmak için bir bilgisayar yazılımı geliştirmek,
- Optimizasyon sonucu elde edilen değerlere uygun olarak robot tasarlamak ve testlerini gerçekleştirmek,
- Modellerdeki değerleri deneysel olarak doğrulamak.

1.4. Hedefler

Bu tezin başarılı sayılabilmesi için hedeflenen başarı kriterleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Tasarlanan robotun bir saniyede kendi boyunun yarısı kadar mesafe kat edebilmesi,
- Dönüş yarıçapının 100 cm'den az olması,
- Güç tüketiminin 3 watttan az olması,
- Dik yüzeylerde 2 dakika, ters yüzeylerde 10 saniye bekleyebilmesi,
- Kendi ağırlığından daha fazla yük taşıyabilmesi,
- İç düzlemler arası geçişler yapabilmesi,
- Üzerindeki batarya sayesinde 10 dakikadan uzun bir süre güç kaynağına bağlı olmadan çalışabilmesi,

- Boyalı duvar, ahşap, metal, cam ve seramik gibi sıklıkla karşılaşılan yüzeylere istikrarlı bir şekilde tırmanabilmesi,
- Özellikle istihbarat amaçlı kullanımlar için; bir yüzey üzerinde durdurulduğunda neredeyse hiç enerji harcamadan (bilgi aktarımı için kullanılan enerji hariç) uzun süreler pozisyonunu koruyabilmesi,
- Gerektiğinde üzerine takılabilecek ek donanım, algılayıcı ve eyleyicileri taşıyacak düzeyde taşıma kapasitene sahip olması,
- Yüzey geçişlerini sorunsuz gerçekleştirebilmesi,
- Dik yüzeyler üzerinde bulunabilen pürüzlü yüzeyler için 1 cm, az pürüzlü yüzeyler için 2 cm yüksekliğindeki engelleri aşabilmesi,
- Tutunma kuvveti/Toplam Ağırlık oranının en yüksek olacağı boyutlar tespit edilerek güvenli bir tutunma gerçekleştirilmesi,
- Cm, mm, μ m mertebelerinde hiyerarşik esneklikler sayesinde yüzey düzensizliklerine uyum sağlama ve yüksek stabilitede tırmanma gerçekleştirme.

1.5. Bölümler

İkinci bölümde, literatürde yer alan birçok tutunma teknikleri arasından elastomer tipi tırmanma tekniği kullanan robotların ve mekanizmalarının olumlu ve olumsuz yönlerinin belirlenerek tez kapsamında üretilecek olan robotun tasarımına karar verilmesi yer almaktadır.

Üçüncü bölümde, ikinci bölümde karar verilen tasarımın ve kullanılacak tutunma tekniğinin CAD çizimleri ve FEM analizleri, tasarımların kullanılacak olan motorlar ve kuyruk vb. yardımcı mekanizmalara göre optimizasyonu ayrıca üretim ve montaj aşamaları yer almaktadır.

Dördüncü bölümde, tasarım aşamaları tamamlanan robotun hareketini sağlayacak motorların, kuyruk ve tırmanma güvenliği parametrelerinin kontrolünü ve gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlayacak olan donanım ve yazılımın hazırlanması montajı ve kalibrasyonları yer almaktadır.

2. TASARIM

2.1. Literatürde Tırmanan Robotlar

Literatürde yer alan tırmanan robotlar incelendiğinde farklı tutunma teknikleri ve farklı tutunma yöntemleri karşımıza çıkmaktadır. Bu tırmanma teknikleri; vakumlama, girdaplama, elektro-mıknatıslanma, mekanik tutunma ve statik elektriklemedir.

2.1.1. Vakumla Tekniği İle Tırmanma

Bir pompa yardımıyla basınç farklı yaratarak tutunma sağlanır. Pürüzsüz yüzeyler güvenli tutunma sağlayan yöntem, pürüzlü, gözenekli veya düzensiz yapı gösteren yüzeylerde vakum ortamı oluşmayacağından tırmanma güvenliği düşüktür [14], [15], [16], [17], [18], [19].

2.1.2. Girdaplama Tekniği İle Tırmanma

Bir pompa yardımıyla yüzey ile robotun gövdesi arasındaki hava sürekli dışarı atılarak bir basınç farkı oluşturulur ve bu sayede robotun yüzeyde kalması sağlanır. Bu tekniğin dezavantajları yüksek güç tüketimi ve yüksek gürültü seviyesi ve yüzey düzensizliklerine olan hassasiyetidir. Bu sebeplerden dolayı gözlem ve keşif amaçlı, yüksek enerji ihtiyacı nedeniyle kablosuz olarak dahili bir güç kaynağı ile istenilen sürelerde kullanılamazlar [20].

2.1.3. Manyetik Tutunma Tekniği İle Tırmanma

Ferromanyetik yüzeylere manyetik alan kullanarak tırmanır. Sadece ferromanyetik yüzeylerde kullanılabilir. Enerji tüketimleri yüksektir [21], [22], [23].

2.1.4. Mekanik Tutunma Tekniği İle Tırmanma

Bu tekniği kullanan robotlar tutunmayı gerçekleştiren uzuvlarında tırmanma yüzeyine mekanik olarak tutunmayı sağlayacak iğne, çengel, tırnak vb. yapılar kullanmaktadır [24], [25], [26].

2.1.5. Elektrostatik Tutunma Tekniği İle Tırmanma

Oldukça yeni olan bu teknik ile robotun tırmanma yüzeyiyle temas halindeki paletlerindeki paneller 5kV gibi yüksek voltaj ile yüklenerek bir elektrik alan oluşturulur ve tutunma sağlanır. Ahşap, beton, metal gibi farklı yüzeylerde çalışabilmektedir. Ancak robot düzlem geçişleri yapabilmesine rağmen manevra, sağa sola dönme kabiliyeti ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır [27].

Yukarıda verilen teknikleri kullanan robotlar yüksek gürültü seviyeleri nedeniyle gözetleme ve keşif, yüksek enerji tüketimleri nedeniyle dahili bir güç kaynağı ile uzaktan kontrollü, düşük manevra kabiliyeti nedeniyle keşif ve yüzey hassasiyeti nedeniyle değişik yüzeylere tırmanma amaçlı kullanılamazlar. Bu nedenlerle bu tez kapsamında tasarlanacak olan robot birçok yüzeyde çalışabilen, sessiz, düşük enerji tüketimi ile kablosuz olarak kullanılabilen bir robot olmalıdır.

Tırmanan robotlarda tutunma tekniklerinin ve robotun mekanik tasarımı dışında robotun esnekliği de tırmanma performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Mekanik tasarım yapılırken hiyerarşik esneklikler hesaba katılarak tasarım yapılarak robotun bulunduğu yüzey üzerindeki düzensizlikleri kompanse ederek tutunma performansının artırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca tırmanan robotlarda kullanılan aktif veya pasif kuyruk sayesinde tırmanma sırasında robot üzerindeki kuvvetlerin tırmanma güvenliği artıracak şekilde dağıtılmasını ve düzlemler arası geçişlerde daha stabil olmasını sağlamaktadır.

2.2. Literatürde Geçen Elastomer Tabanlı Tırmanan Robotlar

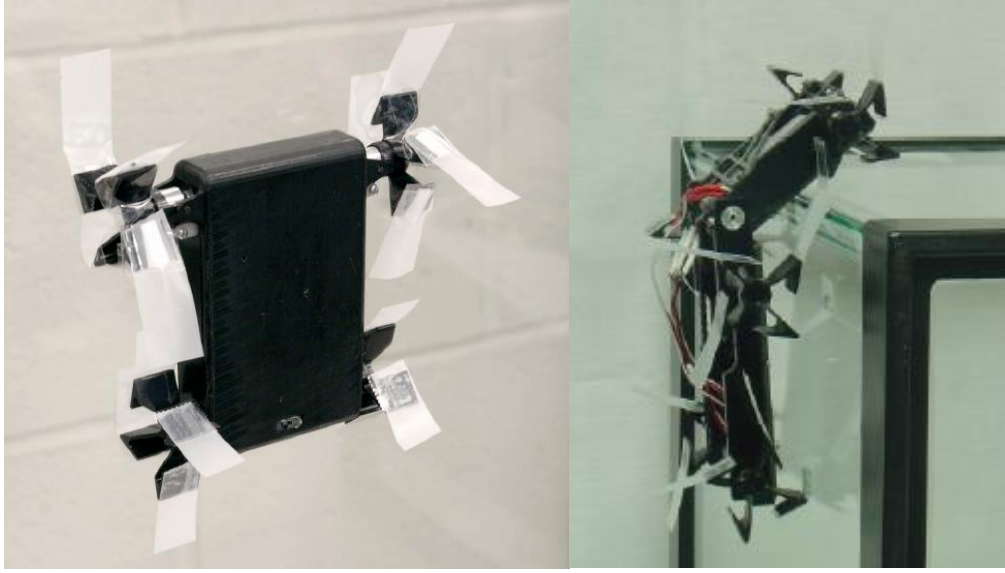
Literatürde tutunma tekniği olarak elastomer kullanan robotlar incelendiğinde karşıma 6 farklı yaklaşım çıkmaktadır. Bu yaklaşımları da kendi içlerinde tutunma yöntemleri olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Bu yaklaşımlar ve tutunma yöntemleri;

- Ayaklı Tırmanan Robotlar,
 - Waalbot [11],
 - Stickybot [7],
 - Geckobot [5],
 - Fourbar [1],
- Tekerli Tırmanan Robotlar,
 - Mini Whegs [12], [13], [29],
 - Tankbot [4].

2.2.1. Mini-Whegs

Ofis bandı kullanarak pürüzsüz yüzeylerde ilerleyebilir. Sınırlı dönme kabiliyeti vardır. Dik veya ters yüzeylerde tırmanma gerçekleştirebilir. Mini-Whegs B00'da robota bir mafsal eklenerek dış düzlemler arası geçiş kabiliyeti kazandırılmıştır.

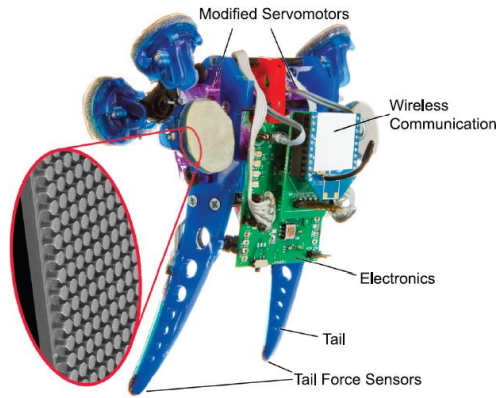
Ancak ofis bantlarının çok çabuk kirlenmesi ve yıpranması nedeniyle kısa süre kullanılabilir, ayrıca yük taşıma kabiliyeti ile ilgili bilgi verilmemiştir [12], [13], [28].



Şekil 2.1. Mini-Whegs (solda) ve Mini-Whegs B00 (sağda [12], [13], [28])

2.2.2. Waalbot

Mikro fiber padler kullanarak yüzeye tutunan waalbot, dik ve ters yüzeylerde nispeten hızlı ilerleyebilir ve iç düzlemler arası geçişler yapabilir. 100 grama kadar yük taşıyabilir. Ayrıca yarı otonom tutunma kazanım sistemi sayesinde robotun tutunma güvenliği belli değerlerin altına düştüğü anda ileri-geri yükleme (rocking motion) sayesinde adezyon geri kazanımı sağlanarak tutunma güvenliği artırılmıştır [11].

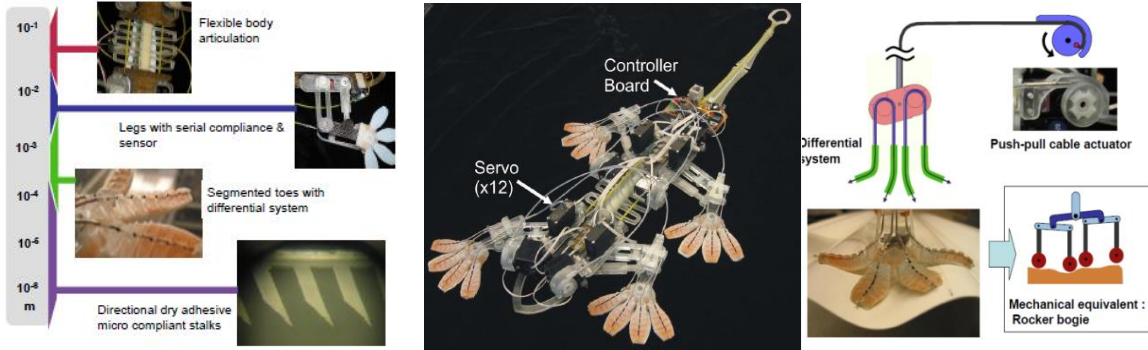


Şekil 2.2. Waalbot II [11]

2.2.3. Stickboy

Stickybot kullandığı sistemler bakımından en karmaşık robotlardan biridir. Aktif yapışma ve aktif soyulma mekanizması olan tek robottur. Dik ve pürüzsüz yüzeylerde tırmanma gerçekleştirebilir ancak yük taşıma, engel aşma ve yönelme kabiliyetleri yoktur. Ters yüzeylerde çalışmamaktadır. Stickybot düzgün yüzeylerde tırmanırken 3 ana prensip kullanmaktadır. Bunlar;

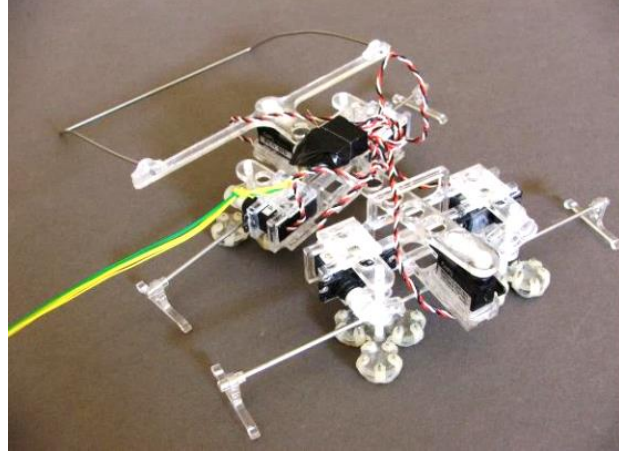
- Santimetre mertebesinde mikron mertebesine kadar değişen hiyerarşik esnekliği kullanarak tırmanma yüzeyine uyum sağlamaktadır (Şekil 2.3.).
- Yönlendirilmiş fiber elastomerler kullanarak tutunma kuvvetini kontrol ettiğinden tutunma ve soyulma gerçekleştirerek gövde boyunca ayrılma kuvvetlerinin yayılmasını engellemektedir.
- Gövde uyumluluğu yönlendirilmiş elastomerlerle uyumlu çalışan kuvvet kontrol mekanizmasını kullanarak robot üzerindeki kuvvetlerin eşit dağılmasını ve ayaklardaki tutunma kuvvetinin kontrolünü sağlamaktadır [7].



Şekil 2.3. Stickybot [7]

2.2.4. Geckobot

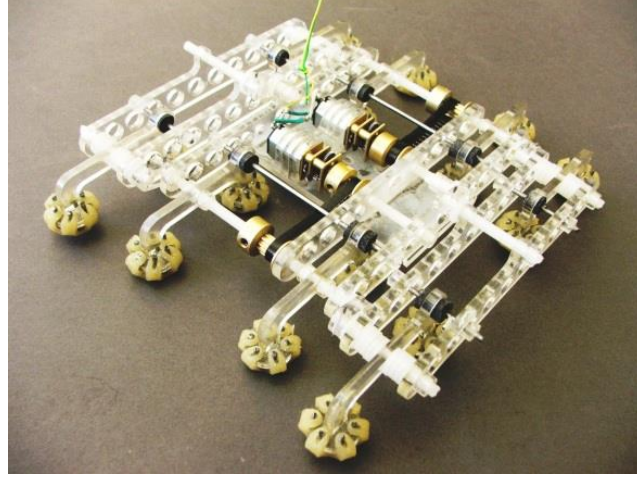
Geckobot düz kuru elastomer kullanarak tutunma gerçekleştirmektedir. Pürüzsüz dik ve ters yüzeylerde çalışabilmektedir. Yük taşıma kapasitesi çok düşüktür. Düzlemler arası geçiş yapamamaktadır [5].



Şekil 2.4. Geckobot [5]

2.2.5. Fourbar

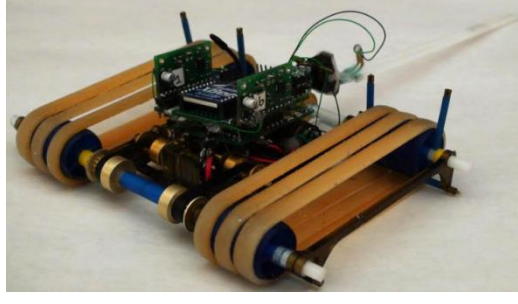
Düz kuru elastomer kullanarak tutunma gerçekleştirmektedir. Birçok farklı yüzeyde dik ve ters tırmanma kabiliyetine sahiptir. 200 grama kadar yükleri taşıyabilmektedir. Ancak dönme ve düzlemler arası geçiş yapma kabiliyeti yoktur [1].



Şekil 2.5. Fourbar [1]

2.2.6. Tankbot

Düz kuru elastomer kullanarak tutunma gerçekleştirmektedir. İç düzlemler *geçişlerin tamamını ve bazı dış düzlemler arası geçişleri yapabilmektedir. 300 grama kadar yükleri taşıyabilmektedir. Diğer robotlara kıyasla çok daha hızlı tırmanma gerçekleştirmektedir.



Şekil 2.6. Tankbot [4]

Tankbot paletli tasarımı sayesinde kesintisiz olarak tırmanabilmekte, birçok pürüzlü, pürüzsüz yüzeylerde (ahşap, boyalı duvar, tuğla duvar, metal yüzeyler) titreşimsiz tırmanma ve güçlü bir tutunma gerçekleştirebilmektedir. 115 gram ağırlığındaki Tankbot 300 grama kadar yükleri taşıyabilmekte bu sayede çeşitli görevlerde kullanılabilmesi için gerekli olan ekipmanların robota eklenmesine olanak sağlamaktadır. Yapılan çalışmalarda, Tankbot 60 gramdan 150 grama kadar farklı boyutlarda üretilmiş ve bütün robotlar 0'dan 360 dereceye kadar olan yüzeylerde başarılı bir şekilde yukarı aşağı tırmanma gerçekleştirmiştir. Bu robotlara soyulma kuvvetini ön tekerlere aktarmak ve düzlemler arası geçişlere yardımcı olması amacıyla aktif veya pasif kuyruk eklenmiştir. Tankbot 16 mm'ye kadar engelleri aşabilmektedir ve minimum dönüş çapı 80 cm'dir [4].

2.3. Değerlendirme

Tırmanan robotların gündelik hayatta gerçek amaçlar doğrultusunda kullanılabilmesi için öncelikle aşağıdaki soruların cevapları verilmelidir;

- Hangi tutunma yöntemi kullanılmadır?
- Boyutsal analiz, optimum tutunma güvenliğine ulaşmak için, nasıl yapılmalıdır?
- İstihap haddi nasıl azami değerlere çekilebilir?
- Aktif-pasif kuyruk tasarımı ve kontrol metodu nasıl olmalıdır?
- Gerçek zamanlı tırmanma güvenliği izleme sistemi tasarımı nasıl yapılmalıdır?

Aşağıda düz ya da fiberli elastomer kullanan bazı tırmanan robotların karşılaştırma çizelgesi verilmiştir;

	Tankbot	Geckobot	Waalbot II	Stickybot	Mini-Whegs	Fourbar
Ağırlık (gr)	60-150	115	85	370	87	115
Ölçüler	12x25x2	12x18x2	12.3x13x5	20x60x6	5.4x8.9x3	11x12x2
Dönme	Evet	Evet	Evet	Hayır	Evet	Hayır
İç Düzlemler arası geçiş	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Evet	Hayır
Dış Düzlemler arası geçiş	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır
Stabilite	Yüksek	Düşük	Orta	Orta	Orta	Yüksek
Ters tırmanma	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Evet(Dengesiz)	Evet
Engel Aşma	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır
Dikey yüzeyde bekleme (dk)	10	3	*	*	*	*
Ters yüzeyde bekleme (dk)	0.5	0	*	*	*	40
Yüzey düzgünlüğü	Micro/nano	Nano	Micro/nano	Nano	Nano	Micro/nano
Dikey yük taşıma kapasitesi (gr)	<300	25	100	Yok	Yok	200
Güç Tüketimi (watt)	2	*	2.4	*	*	1.5
Dikey Hız (cm/s)	12	1	5	4	*	4
Soyulma	Pasif	Pasif	Pasif	Aktif	Pasif	Pasif
Ayak tasarımı	Teker	Ayak	Ayak-Teker	Ayak	Ayak-Teker	Ayak

Çizelge 2.1. Elastomer kullanan tırmanan robotların karşılaştırılması

*=Belirtilmemiş

Ayaklı tırmanan robotlar tırmanma eylemini ayakları altındaki elastomerler ile sağlayan robotlardır. Ayaklı robotlarda bir takım ayak yüzeye tutunurken gövdenin bir kısmı veya tamamı ileri giderek diğer takım ayakların tutunması sağlanır ve tutunma için gerekli ön yükleme kuvvetini yüzey ile temas halindeki ayakların tutunma kuvvetinden sağlayan robotlardır. Bu tip robotlar Çizelge 2.1.'de görüleceği üzere tekerli robotlarla karşılaştırıldığında bir çok dezavantajı beraberinde getirmektedir.

Tırmanan robotlarda kullanılan elastomerlerin yeterli tutunmayı sağlayabilmeleri için belirli bir önyüklemeye kuvvetiyle tırmanma yüzeyine bastırılmaları gerekmektedir. Ayaklı robot tasarımlarında dikkat edilmesi gereken en önemli kriterlerden biri budur. Tekerli tasarımlarda da gerekli olan ön yükleme robota eklenmiş aktif veya pasif kuyruk mekanizmasıyla sağlanmaktadır [3], [4], [10].

Ayaklı robotlarda tutunma kuvvetleri istenilen değerlerin altına indiğinde rocking motion (ileri-geri yükleme) ile tutunma istenilen değerlere tekrar ulaştırılabilir [1].

Ayaklı tırmanan robotlarda, ayak tasarımı dikkat edilmesi gereken noktalardan bir diğeri de ayakların tırmanma yüzeyinden belirli bir açı yaparak soyulmasının sağlanmasıdır. Bu sayede motorun uygulaması gereken tork azalırken robotun güç tüketimi düşecektir. Ancak, ayaklı robotlarda ön yükleme kuvveti yüzeye temas eden ayakların sahip olduğu tutunmadan sağlandığı için güvenlik faktörleri ve aşırı tutunma arasında optimum bir değer yakalanması gerekmektedir. Bu nedenle tutunma aşamasında olan ayaklara gerekli ön yükleme sağlandıktan sonra soyulma gerçekleşmesi gerekmekte ve ayak tasarımı bu hususlar dikkate alınarak yapılmalıdır [11].

Tekerli robotlarda ön yükleme robotun ön ve arka bölümündeki normal kuvvetlerinin kuyruk yardımıyla eşitlenmesiyle sağlanır. Kuyrukta ve/veya motor mili bağlantı noktalarında bulunan sensörler sayesinde robotun güvenli tutunma değerlerine sahip olup olmadığı gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilir. Robotun ağırlığı ve enerji tüketimi mümkün olan en düşük değerlerde tutulmak istendiğinden eklenen her sistemin avantaj ve dezavantajları değerlendirilmelidir [3], [11].

Ayaklı robot tasarımları dar bölgelerde çevik ve engel aşmada başarılı olmasına rağmen birçok parçadan oluşma ve yüksek serbestlik dereceli sistemler

kullanması nedeniyle yavaş ve ağır olmakta dolayısı ile tekerli tırmanan robotlara oranla daha yüksek güç tüketmektedirler.

Tekerli tasarımların ana avantajı düşük güç tüketimi, yüksek hareket kabiliyeti, düşük ağırlık ve basit mekanik tasarımı nedeniyle daha stabil olmalarıdır [3].

Çizelge 2.1’de görülebileceği gibi tekerli tasarımlar;

- Manevra kabiliyeti,
- Düzlemler arası geçiş yapabilme kabiliyeti,
- Ayaklı robotlara kıyasla çok daha hızlı hareket edebilmeleri,
- Yüksek yük taşıma limitleri,
- Düşük güç tüketimleri,
- Basit mekanik tasarım,
- Düşük ağırlık,
- Yüksek yük taşıma kapasiteleri,
- Ayaklı robotlara kıyasla daha hızlı hareket edebilmeleri,
- Yüksek hareket ve manevra kabiliyeti,
- Düzlemler arası geçiş yapabilmeleri,
- Güvenli ve kararlı tırmanma,
- Yük taşıma kapasitelerinden dolayı; kablosuz iletişim, kumanda ve online tırmanma performansı izleme sistemleri kullanılabilir,
- Esnek yapılarından dolayı istenilen görevleri gerçekleştirmede kullanılacak ekipmanların eklenip çıkarılabilmesi,
- Verilen görevlere göre robotların ölçeklendirilebilmesi.

nedenleriyle daha avantajlıdır. Bu sayede kablosuz iletişim, kumanda ve online tırmanma performansı izleme gibi fazladan ağırlık oluşturabilecek sistemlerin kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

Yukarıda verilen nedenlerden dolayı bu tez kapsamında tasarlanacak olan tırmanan robotun enerji verimliliği, hız ve düşük ağırlık kriterleri göz önünde bulundurularak tekerli bir tasarıma sahip olmasına karar verilmiştir. Bu tasarımın ana avantajı, düşük güç tüketimi, yüksek hareket kabiliyeti, düşük ağırlık ve basit mekanik tasarımı nedeniyle daha stabil olmasıdır [3].

3. TIRMANAN ROBOT TASARIMI VE MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

3.1. Robotun Özellikleri

Ayaklı robot tasarımları dar bölgelerde çevik ve engel aşmada başarılı olmasına rağmen birçok parçadan oluşma ve yüksek serbestlik dereceli sistemler kullanması nedeniyle yavaş, ağır ve güç tüketimleri yüksektir.

Tekerli tasarımlar manevra kabiliyeti, düzlemler arası geçiş yapabilmeleri, ayaklı robotlara kıyasla çok daha hızlı hareket edebilmeleri, yüksek yük taşıma limitleri ve düşük güç tüketimleri nedeniyle daha avantajlıdır. Bu sayede kablosuz iletişim, kumanda ve gerçek zamanlı tırmanma performansı izleme gibi ekstra ağırlık oluşturabilecek sistemlerin kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

Robot malzemesi seçiminde ise aranılan kriterler şu şekilde belirlenmiştir;

- Ulaşılabilir,
- Hafif,
- Dayanıklı,
- İşlenmesi kolay,
- Ucuz,
- Estetik.

Yukarıda verilen kriterler incelendiğinde bunların hepsinin rahatlıkla sağlandığı akrilik (pleksiglass) kullanımına karar verilmiştir. Bu malzemenin tek dezavantajı anlık darbelere karşı kırılabilir olmasıdır.

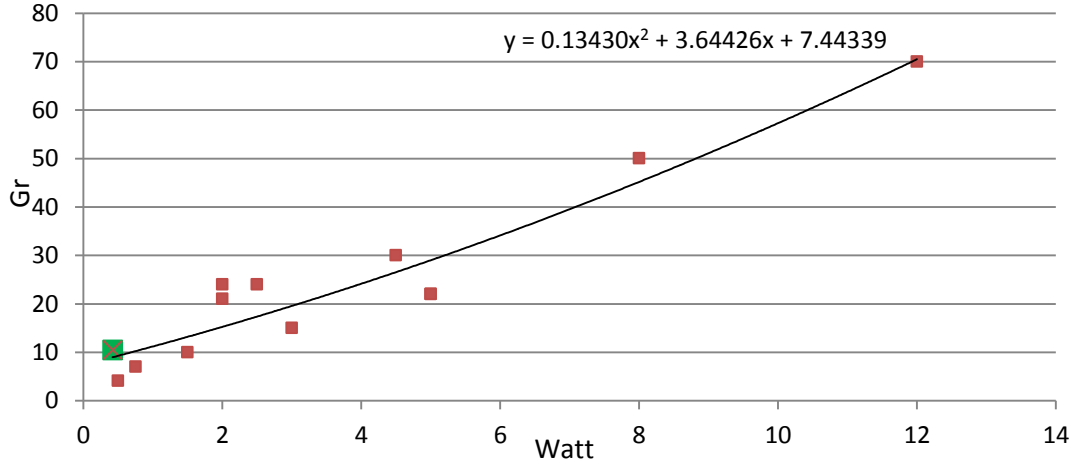
Pleksiglass'ın Mekanik Özellikleri	
Yoğunluk	1.10 g/cm ³
Çekme Dayanımı	80 MPa
Kopma Uzaması	5.5%
Elastisite Modülü	3300 Mpa
Kesme Modülü	1700 Mpa
Poisson Oranı	0.37

Çizelge 3.1. Pleksiglass Mekanik Özellikleri

3.2. Tırmanan Robotun Kuvvet Analizi ve Boyutsal Modellemesi

3.2.1. Motor Seçimi

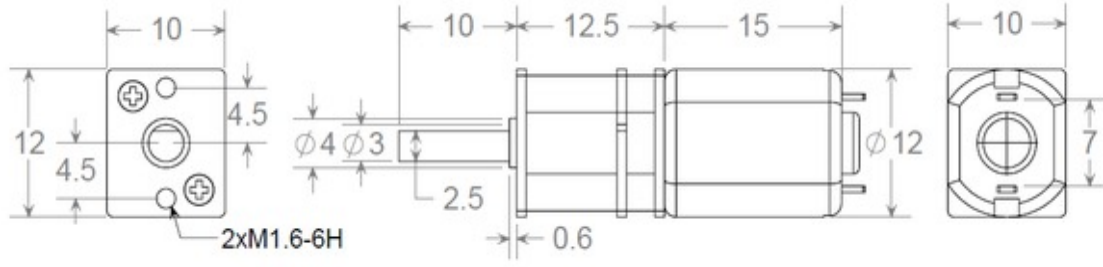
Tırmanan robotlarda tasarımı belirleyen en önemli unsurlardan birisi de motor seçimidir. Motor seçimi piyasada bulunan 5 gramdan 70 grama kadar değişen motorlar arasından yapılmıştır. Tasarlanacak olan robotta kullanılacak motor seçiminde ağırlık boyut ve motorun devir sayısı dikkat edilmesi gereken parametrelerdendir. Buna göre piyasada hali hazırda satılmakta olan görece küçük boyuttaki elektrik motorların (ve dişli kutularının) enerji yoğunluğu incelenmiştir (Bkz. Denklem 3.1.).



Şekil 3.1. Motorlar İçin Watt-Gr Grafiği (Seçilen Motor Yeşil Nokta ile Belirtilmiştir)
 $y = 0.13430x^2 + 3.64426x + 7.44339$ (3.1)



Şekil 3.2. Teker Motoru 1000:1 32 RPM Dişli Kutulu HP DC Motor

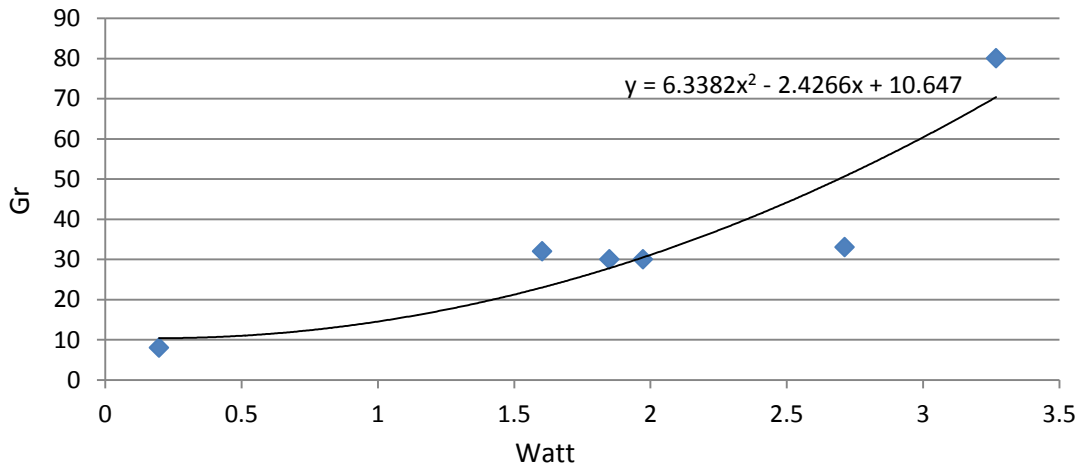


Ölçüler:	27.5 x 10 x 12 mm
Ağırlık:	10.49gr
Şaft Çapı:	3 mm
Dişli Oranı:	1000:1
Serbest Çalışma Hızı@6V:	32 rpm
Serbest Çalışma Akımı@6V:	70 mA
Duruş Akımı@6V:	1600 mA
Stall torque @ 6V:	882Nmm

Çizelge 3.2. Pololu 1:1000 32RPM HP DC Motor Teknik Verileri

3.2.2. Batarya Seçimi

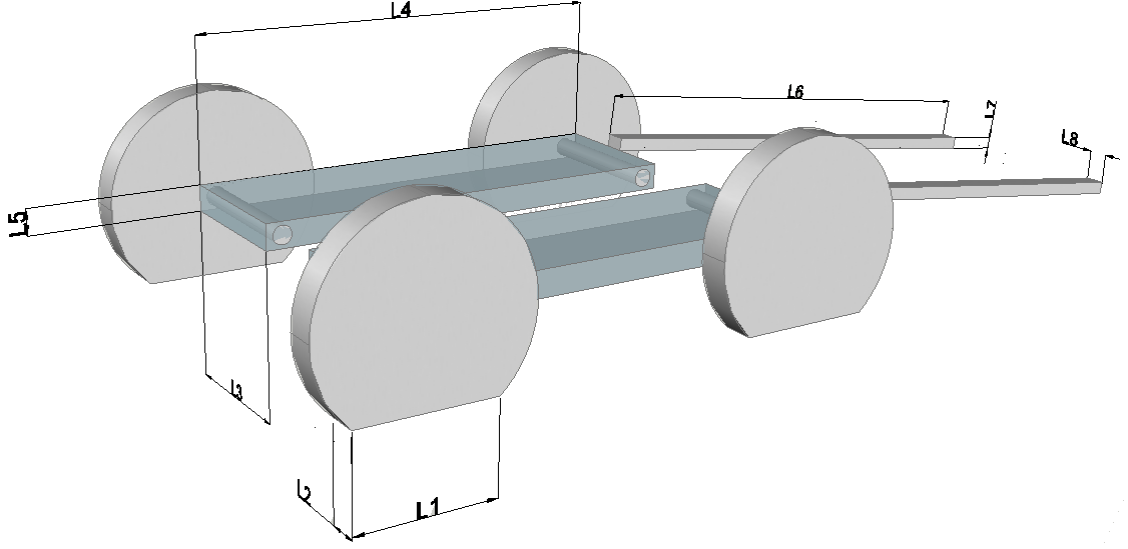
Tırmanan robotun 10 dakika dik yüzeye tırmanma gerçekleştirebilmesi için piyasada bulunan temini kolay bataryalar için bir Gr-Watt grafiği elde edilmiştir.



Şekil 3.3. Batarya için Watt-Gr Grafiği

$$y = 6.3382x^2 - 2.4266x + 10.647 \quad (3.2)$$

3.2.3. Tutunma Kuvveti/Ağırlık-Boy Optimizasyonu



Şekil 3.4. Tırmanan Robot Taslağı (Robotun Şase Boyu L_4 , Şase Eni L_3 , Şase Kalınlığı L_5 , Teker Temas Alanı Boyu L_1 , Teker Temas Alanı Eni L_2 , Kuyruk Boyu L_6 , Kuyruk Kalınlığı L_7 , Kuyruk Eni L_8)

Tırmanan robotlarda tutunmayı sağlayan elastomerlerin alanı (L^2) robotun boyunun karesi ile orantılıyken robotun ağırlığı (L^3) boyunun kübüyle orantılıdır.

$$L \rightarrow 0 \quad m_{robot} \cong 75gr \quad (3.3)$$

$$L \rightarrow \infty \quad \frac{L^2}{L^3} \rightarrow 0 \quad (3.4)$$

Kablosuz iletişim ve kablosuz kontrol sistemleri robot boyu 0 cm değerine yaklaşırken bile ihtiyaç duyulan iletişim kartı, motor sürücü kartı, anakart ve batarya ağırlıkları yaklaşık olarak 75 gr kabul edilmiştir. Matematiksel model sonucunda tasarlanacak olan robotun boyutsal olarak bir optimum noktasının olması gerektiği kanıtlanmaktadır. Robotun toplam ağırlığı m_r , robotta kullanılması planlanan ekipmanların (kablosuz iletişim, sensörler vb.) sabit ağırlığı m_c , robotun şasesinin ağırlığı m_s , robotta kullanılan motorların ağırlığı m_m , robotun Tekerlerinin ağırlığı m_t , robotun kuyruğunun ağırlığı m_k olarak kabul edilirse;

$$m_r = m_c + m_s + 3m_m + 2m_t + m_k \quad (3.5)$$

Her bir tekerleğin dönmeye karşı göstereceği kuvveti yaklaşık olarak;

$$F_{adh} = F_p \quad (3.6)$$

kabul edilebilir. F_p , denklem (3.22)'den bulunur. (ΔP , elastomerlerden sağlanan tutunma kuvveti yaklaşık olarak 10 Kpa olarak kabul edilmiştir).

Bir tekerdeki elastomerin tutunma kuvvetini yenmek için gereken motor torku aşağıdaki denklem ile motor gücü (P_m) ise, motor torku (T_m) ve açısal hız (ω) (Bkz. Denklem 3.9) ile hesaplanır.

$$T_m \cong 0.93r_w F_p \quad (3.7)$$

$$P_m = T_m \cdot \omega \quad (3.8)$$

$$P_m = 0.93r_w F_p \cdot \omega \quad (3.9)$$

$$m_m = A_x P_m^2 + B_x P_m + C_x \quad (3.10)$$

F_p , denklem (3.22)'den bulunur. Piyasada bulunan motorların watt-gr grafiğinden elde edilen denklem (3.1) denklem (3.10)'da yerine yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir;

$$m_m = 0.13430P_m^2 + 3.64426P_m + 7.44339 \quad (3.11)$$

Piyasada bulunan bataryaların watt-gr grafiğinden elde edilen denklem (3.2) denklem (3.10)'da yerine yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir;

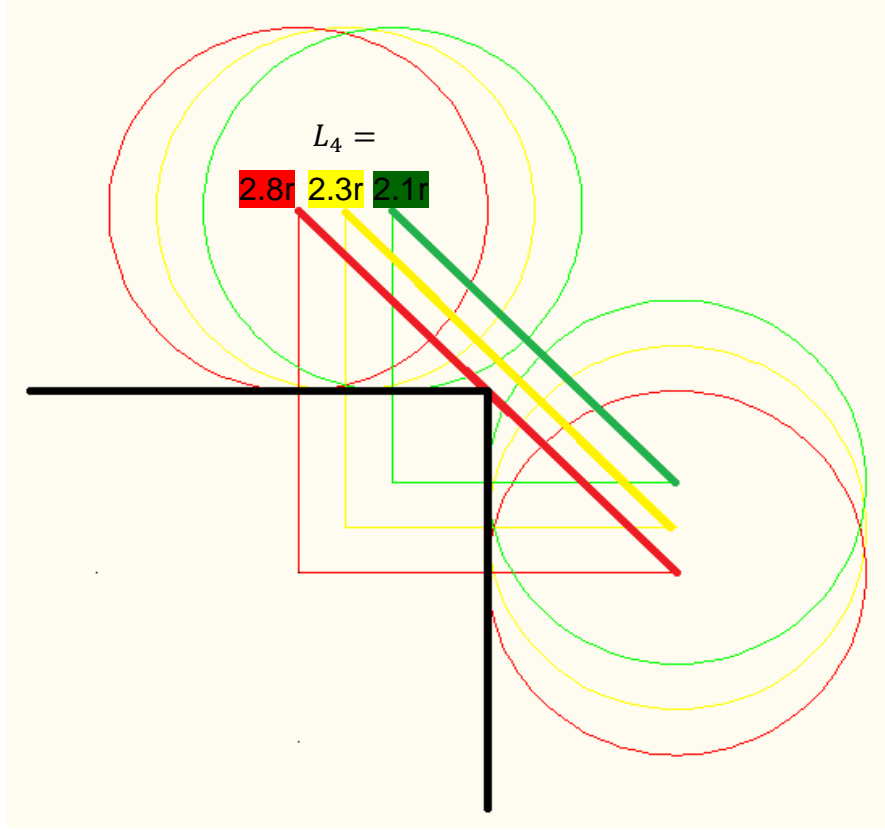
$$m_m = 6.3382P_m^2 - 2.4266P_m + 10.647 \quad (3.12)$$

Böylece bütün değişkenler robotun boyutsal değişkenleriyle ifade edilmiştir. Ağırlık, tutunma kuvveti ve robotun boyutla ilgili bu denklemler robotun tutunma kuvveti/toplam ağırlık-boyut (F_{adh}/m_r) ilişkilendirilmesi için regrasyon yapılırken kullanılacaktır.

Boyutsal optimizasyonun yapılabilmesi için bazı giriş koşullarının belirlenmesi gerekmektedir.

Bu koşullar, tasarlanacak robotun hedefler bölümünde belirlenen kriterlerden dış düzlemler arası geçişi gerçekleştirebilmesi için teker merkezleri arasındaki mesafe teker yarıçapının maksimum 2.3 katı kadar olması gerekmektedir. Tekerlerin birbirlerine çok yakın olması elastomerlerin birbirlerine yapışmasına neden olabileceğinden bu değer daha küçük seçilmesi tırmanma güvenliğini düşürecektir.

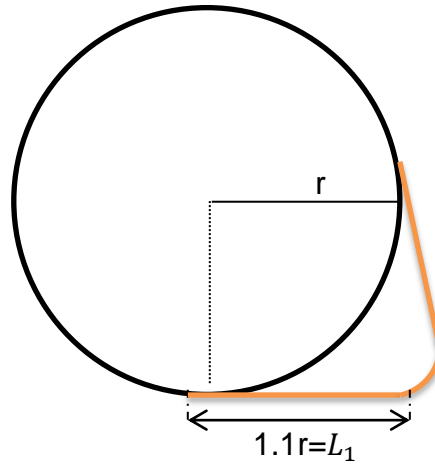
L_2 boyu L_1 'e eşit olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.5. L_4 Boyunun Teker Yarıçapına Oranının Dış Düzlemler Arası Geçiş Etkisi

Şekil 3.6. Tekerler Arası Dış Düzlemler Arası Geçiş Etkisi(Kırmızı, Sarı ve Yeşil Renkler farklı tekerler arası mesafe-teker yarıçapı oranını temsil etmektedir)

Tırmanan robotun hedeflenen hızı 0.5 Boy/s olduğundan saniyede robot boyunun yarısı kadar mesafe kat edilebilmesi için tekerler arası mesafenin teker çapına oranı 2.3 seçilmesi durumunda açılmal hız 1.15 rad/s olmak durumundadır.



Şekil 3.7. Teker Yarıçapı ve L_1 Arasındaki Bağntı

Tutunma alanı boyu ön-arka tekerlerdeki elastomerlerin birbirine yapışmasına neden olmayarak güvenli bir tutunma için ihtiyaç duyulan tutunma alanı sağlaması için teker yarıçapının 1.1 katı olarak kabul edilmiştir.

Optimizasyon kodu yazılırken robotun şase dayanımı şase boyu L_4 , ile şase kalınlığı L_5 , arasında robotun boyu artarken şase kalınlığının da orantılı olarak artması için sehim/robot boyu oranı δ/L_4 , 0.05 olarak kabul edilmiştir. Akrilik-Pleksiglass® levhalar için izin üretici tarafından önerilen sehim/boy oranı 0.5-1.0% arası seçilebilmektedir.

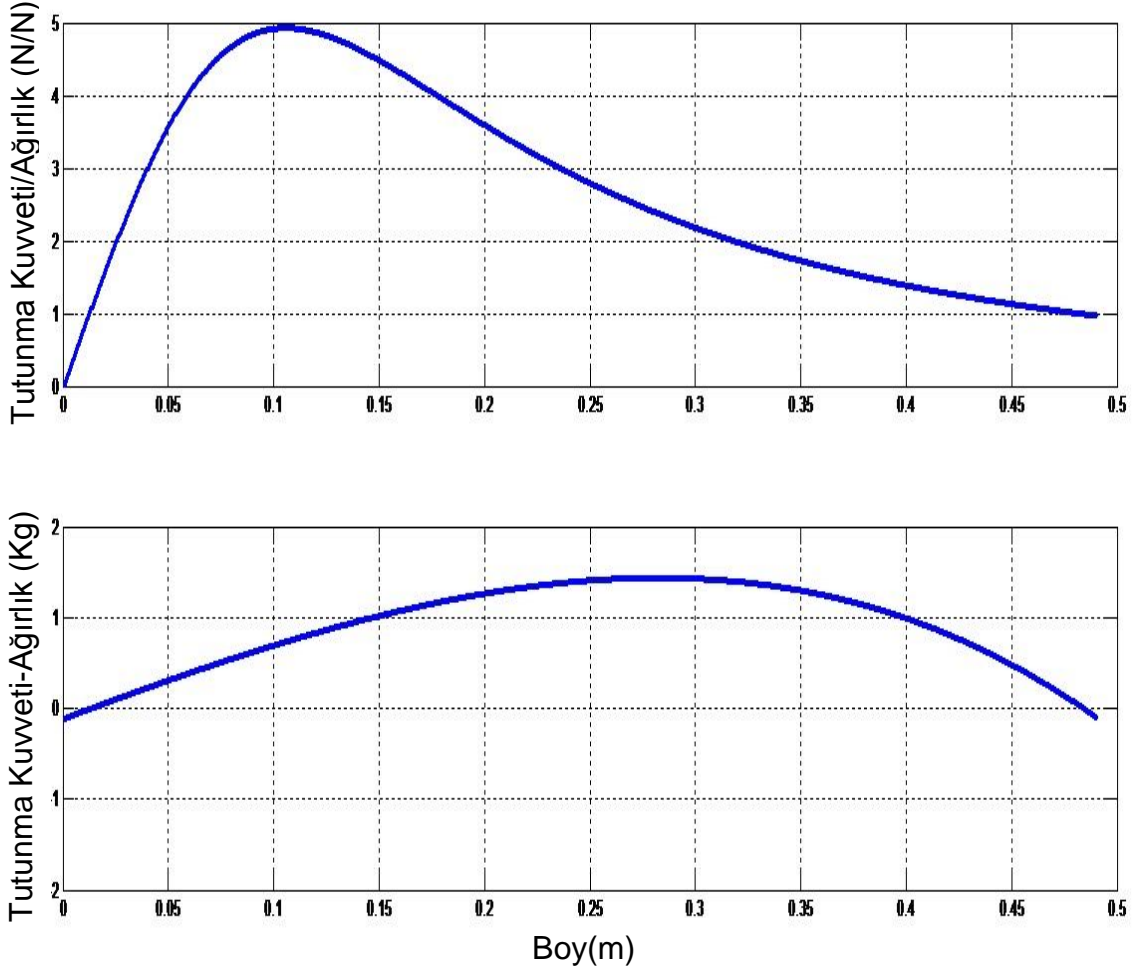
$$\delta = \frac{ML_4^2}{9\sqrt{3}EI} \quad (3.13)$$

$$x = \frac{L_4}{\sqrt{3}} \quad (3.14)$$

$$\frac{\delta}{L_4} = \frac{2T_m\delta}{L_4} = 0.05 \quad (3.15)$$

$$L_5 = \sqrt[3]{\frac{14.4\Delta PL_1^2 L_2 L_4}{L_3 E}} \quad (3.16)$$

Robotun boyutsal optimizasyonu için Matlab programından faydalanılmıştır (Bkz. Matlab Kodu EK-1).



Şekil 3.8. Tutunma Kuvveti/Ağırlık Boy Grafiği, Tutunma Kuvveti-Ağırlık Boy Grafiği

Şekil 3.8.'te verilen boyutsal analizde tutunma kuvvetinin ağırlığa oranı maksimize edilmeye çalışılmıştır. Bu durumun fiziksel anlamı robotun stabilitesinin ve ağırlığının kaç katı oranınca yüzeye yapışabileceğinin sayısal bir karşılığıdır.

Bu grafiğe göre tasarlanacak olan robot 7-12 cm arasında olmalıdır. Robot boyu 10.5 cm iken tutunma kuvvetinin robot ağırlığına oranı 4.93 olmaktadır. Yukarıda verilen analiz ilk verilerden ortaya çıkan sonuçları yansıtmaktadır ve tasarım kriterlerinin değişmesi ile değişebilir. Bunun sebebi tasarım sırasında çok fazla değişkenin olması ve bu değişkenlerin hepsinin aynı anda maksimize edilememesidir.

Maksimum taşıma kapasitesi maksimize edilmek istenilmesi durumunda robotun 27-33 cm civarında yük taşıma kapasitesinin maksimum değerine ulaştığı

görülmektedir. Robot boyu 28.3 cm iken taşıma kapasitesi 1.45 Kg olarak maksimum değerine ulaşmaktadır.

3.2.4. Kuvvet Analizi

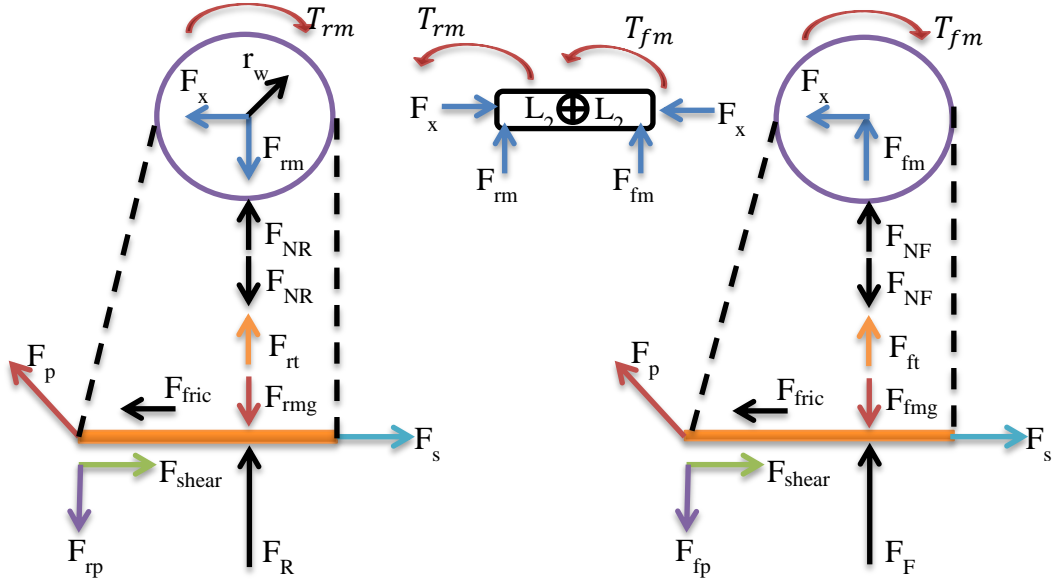
Tırmanan robotların boyutları belirlenirken dikkat edilmesi gereken en önemli parametreler robotun ağırlığı, boyu ve ağırlık merkezinin yerden yüksekliği ve tutunmayı gerçekleştirecek elastomerlerin boyutlarıdır.

Ağırlık merkezi tırmanma yüzeyinden uzaklaştıkça tırmanan robotun ön tekerlerinin yüzeyden kopmasına neden olacak moment etkisi artmaktadır.

Elastomerler ve robot üzerindeki kuvvet dağılımı stabil bir tırmanma başarmada önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle bu kuvvetlerin analiz edilmesi gerekmektedir [3]. Robot ve elastomer üzerindeki kuvvetler;

- Robot ağırlığından kaynaklanan kuvvetler,
- Kuyruk önyükleme kuvveti,
- Motor torklarından kaynaklanan kuvvetler,
- Elastomerlerin ayrılma kuvveti.

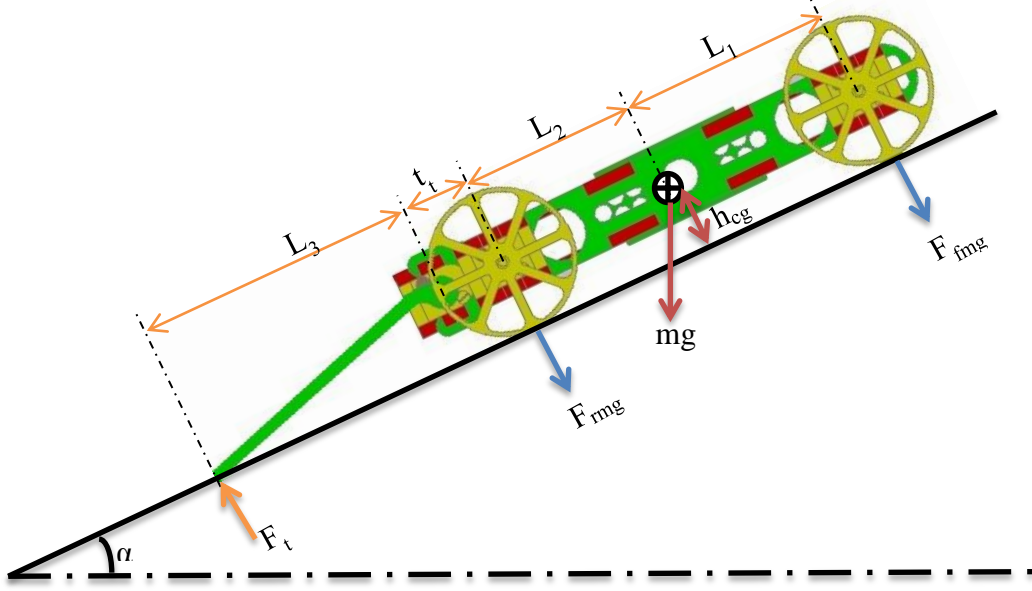
olarak sınıflandırılabilir (Bkz. Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. Robot ve Elastomer Üzerindeki Kuvvet Dağılımları

3.2.5. Serbest Cisim Diyagramı

Yerçekiminden kaynaklanan, robotun ön ve arka tekerlerdeki kuvvet dağılımı aşağıda görülebilir.



Şekil 3.10. Serbest Cisim Diyagramı

Yerçekiminden kaynaklanan kuvvetlerin normal bileşenleri aşağıdaki formüllerden hesaplanabilir.

$$F_{fmg} = mg \left(\frac{L_2 \cos \alpha - h_{cg} \sin \alpha}{L_1 + L_2} \right) \quad (3.17)$$

$$F_{rmg} = mg \left(\frac{L_1 \cos \alpha + h_{cg} \sin \alpha}{L_1 + L_2} \right) \quad (3.18)$$

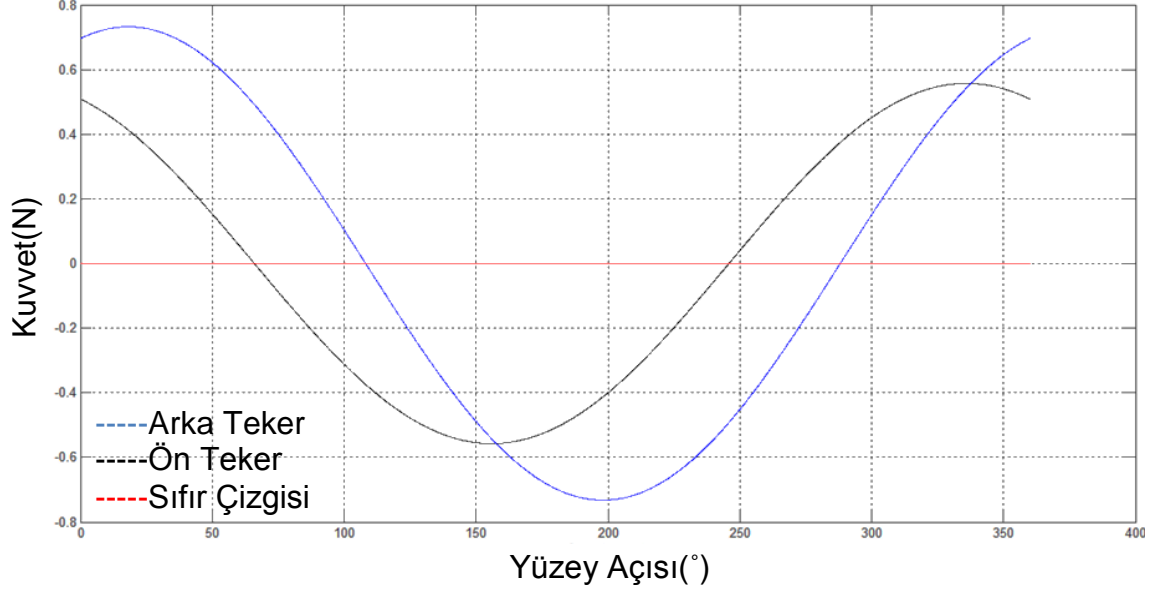
3.2.6. Kuyruk Etkisi

Kuyruk tırmanan robotlarda arka tekerlerdeki kuvvetlerin yüzeye bastırmak suretiyle ön tekerlere aktarılmasında kullanılmaktadır [3]. Önyükleme kuvveti F_t 'nin ön ve arka tekerlere etkileyen normal bileşeni ön teker için F_{ft} , arka teker için F_{rt} , olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir (t_t , arka teker merkezi ile kuyruk motoru merkezi arası mesafedir).

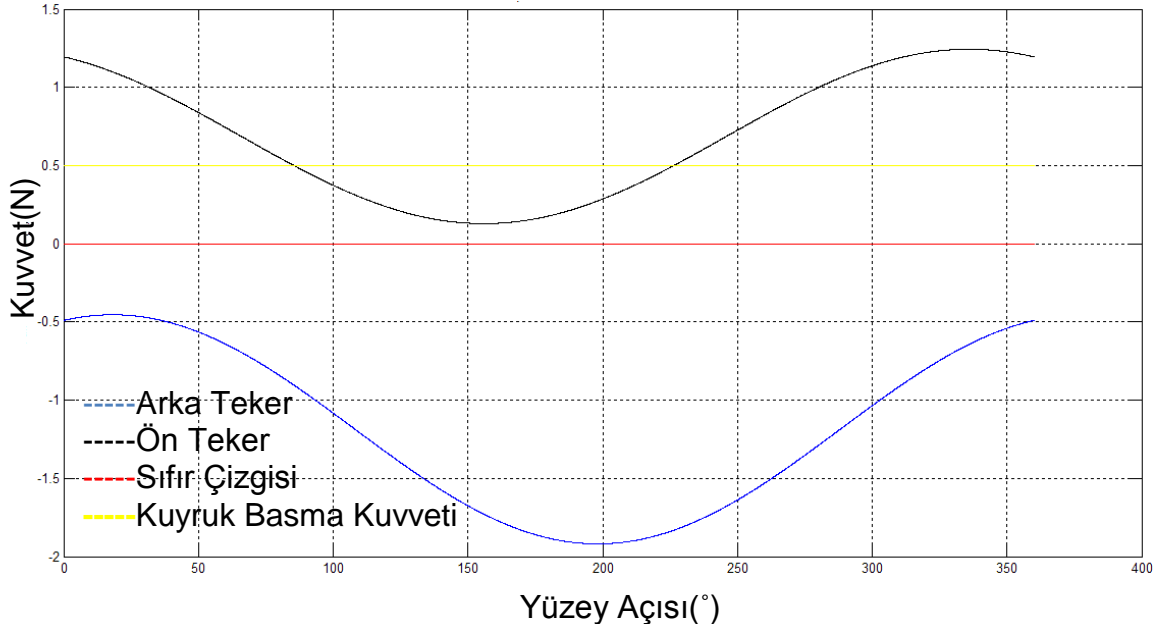
$$F_{ft} = F_t \left(\frac{L_3 + t_t}{L_1 + L_2} \right) \quad (3.19)$$

$$F_{rt} = -F_t \left(1 + \frac{L_3 + t_t}{L_1 + L_2} \right) \quad (3.20)$$

0-360 derece eğim arasında hesaplanan ön arka tekerler arası kuvvet dağılımı, Şekil 3.11. kuyruk etkisi olmadan, Şekil 3.12. 0.5 N kuyruk basma kuvveti ile görülebilir. 0.5 N kuyruk önyükleme kuvveti ile ön tekerler negatif bölgeye hiç geçmezken, kuyruk etkisi olmadan 60 derece civarında negatif bölgeye geçtiği görülmektedir.



Şekil 3.11. Ön Arka Tekerlerin Kuvvet Dağılımı (Ek-2)



Şekil 3.12. 0.5 N Kuyruk Basma Kuvveti ile Ön Arka Tekerlerin Kuvvet Dağılımı (EK-3)

3.2.7. Elastomer Ayrılma Kuvveti

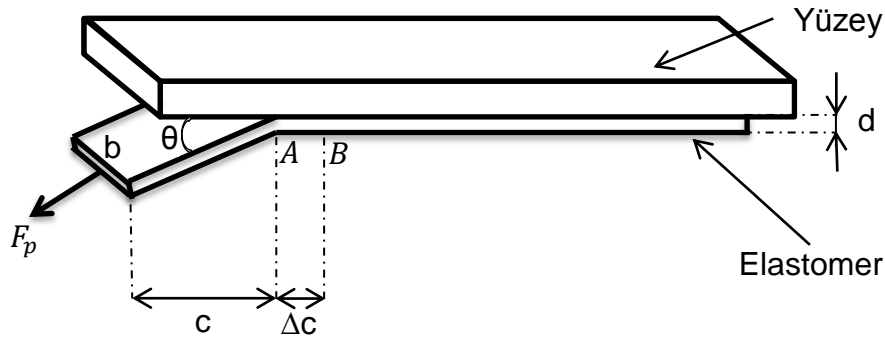
Elastomerlerin ayrılma kuvveti dikdörtgense ayrılma modeli yardımıyla bulunabilir [6].

$$-bR\Delta c + F_p(1 - \cos\theta)\Delta c + \frac{F_p^2\Delta c}{2bdE} = 0 \quad (3.21)$$

Denklem (3.21)'teki ifade sadeleştirilirse;

$$\left(\frac{F_p}{b}\right)^2 \frac{1}{2dE} + \frac{F_p}{b}(1 - \cos\theta) = R \quad (3.22)$$

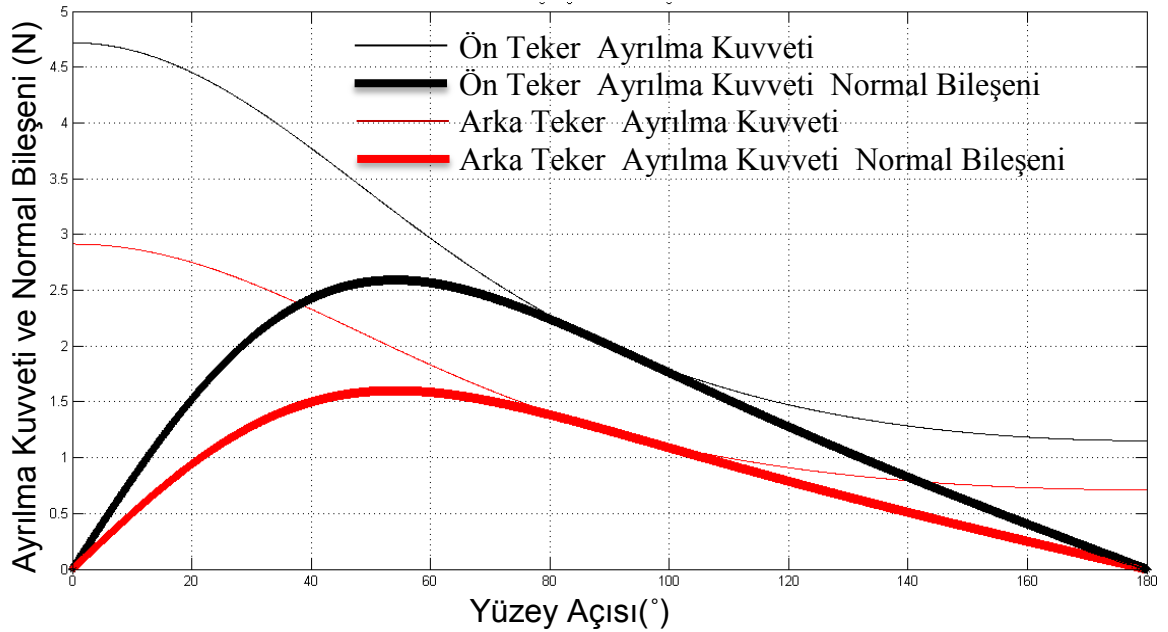
'R' değeri yapışma enerjisidir ve cam yüzeyleri için 70N/m olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.13. Elastomer Ayrılma Modeli

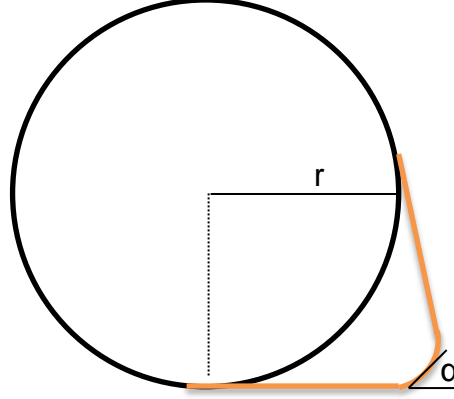
3.2.7.1. Elastomer Ayrılma Açısı Analizi

Yapılan analizlerde arka tekerler 21mm, ön tekerler 35mm genişliğinde seçilmiştir.



Şekil 3.14. Elastomer Ayrılma Kuvveti Açısı Analizi [6] (EK-4)

Yukarıdaki grafikten görüleceği gibi elastomerlerin ayrılma açısı tutunma kuvvetinin normal bileşenini dolayısıyla tırmanma performansını etkilemektedir. Bu nedenle elastomerlerin tekerlere sabitlenme şekli elde edilecek tutunma kuvvetini etkileyecek en önemli faktörlerden biridir.



Şekil 3.15. Elastomer Ayrılma Açısı

Elastomer ayrılma açısını 40° - 70° aralığında tutabilmek ve tutunma alanını maksimize edebilmek için elastomer teker arası bağlantı elastomerlerin tekerden ayrılarak soyulmasına izin verecek şekilde yapılmalıdır. Elastomerlerin tekerlerin yan yüzeylerine dikilmesi suretiyle bu yapı elde edilmiştir.

3.2.8. Robot ve Elastomere Etkiyen Kuvvetlerin Analizi

Robot ve elastomere etkiyen tüm kuvvetler aşağıdaki bağıntıyla ifade edilebilir.

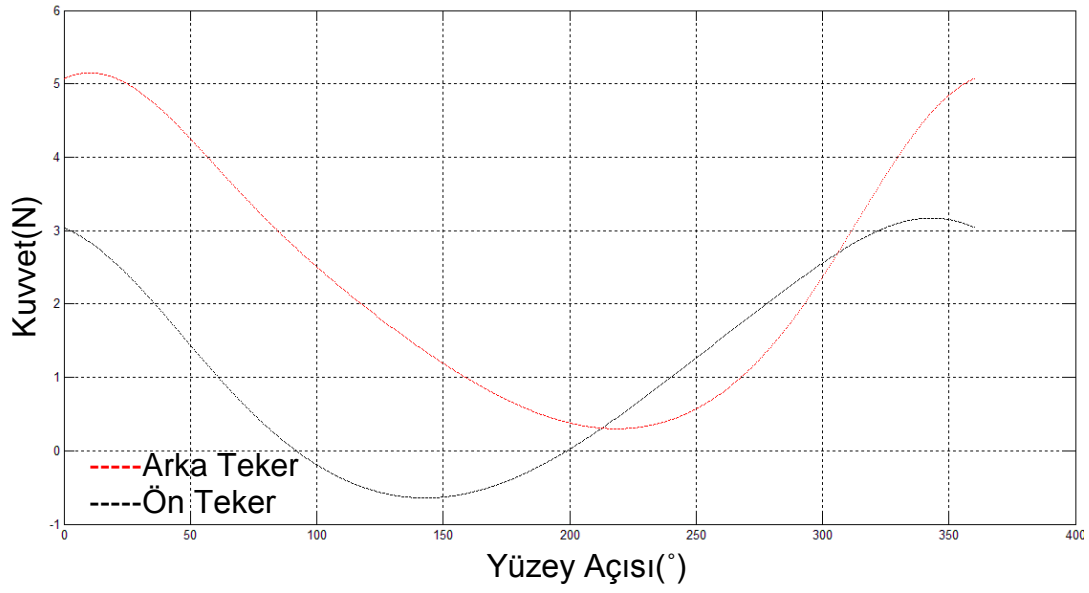
Ön teker için:

$$F_F = F_{fmg} + F_{ft} + F_{fm} + F_{fp} \quad (3.23)$$

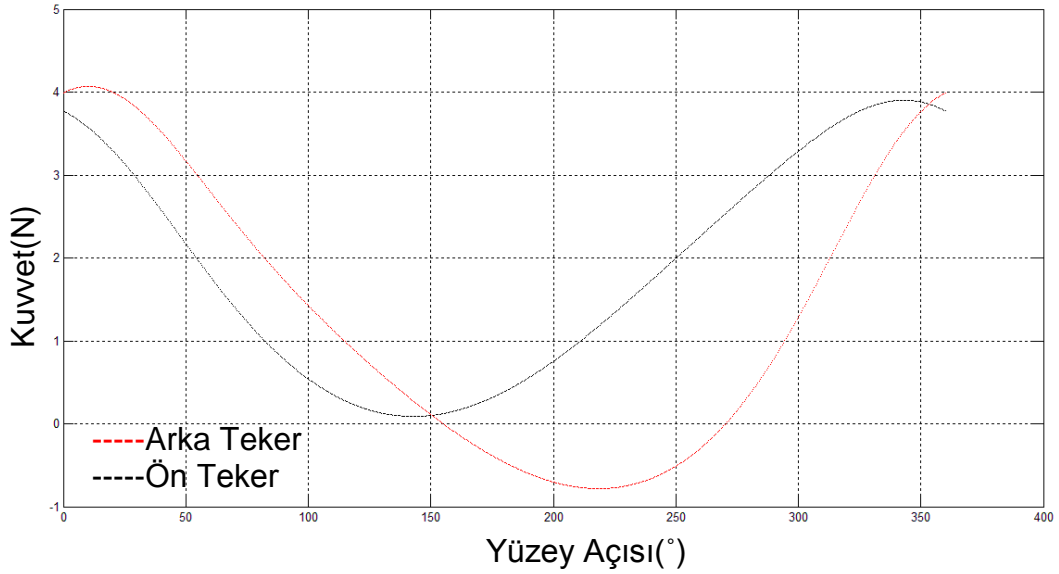
Arka teker için:

$$F_R = F_{rmg} + F_{rt} + F_{rm} + F_{rp} \quad (3.24)$$

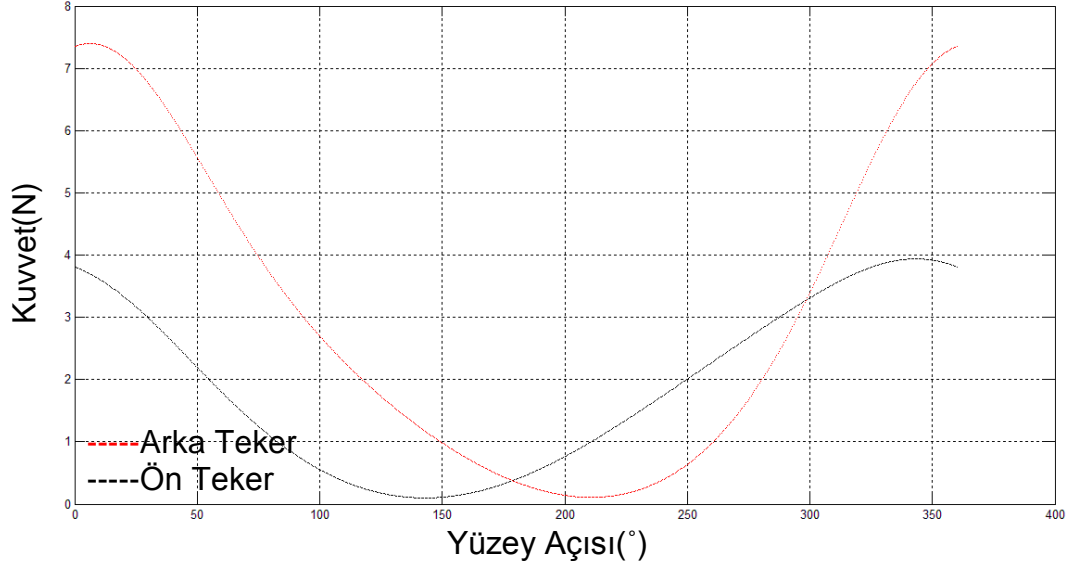
Yukarıdaki ön ve arka tekerde oluşan kuvvetlerin 0-360 derece eğim arasında hesaplanan kuvvet dağılımı '0' N kuyruk kuvveti etkisi altında 22m arka teker, 35mm ön teker genişliği için analiz edilirse (EK-5);



Şekil 3.16. Ön ve Arka Tekerlere Etkiyen Toplam Kuvvetler 0-360° Arası '0.35' N kuyruk kuvveti etkisi altında 22 mm arka teker, 35 mm ön teker genişliği için analiz edilirse;



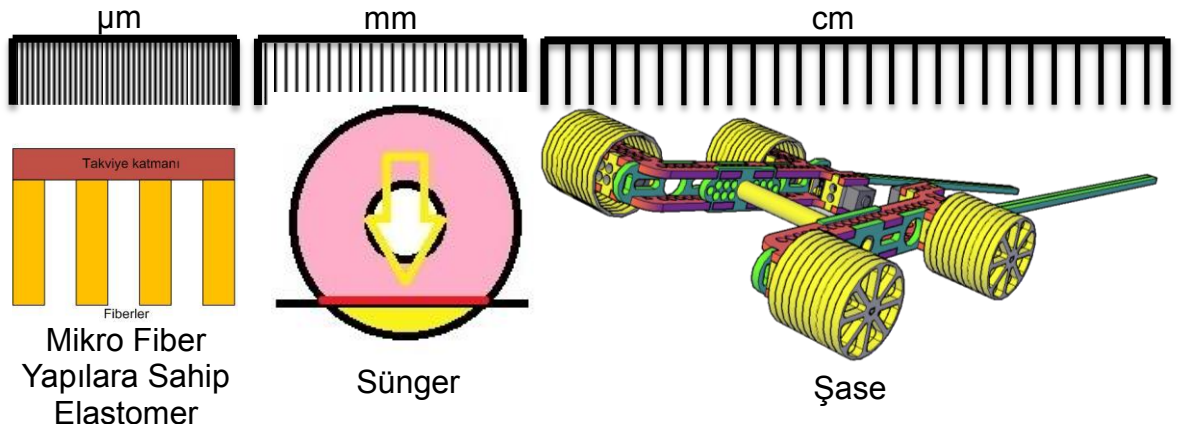
Şekil 3.17. Ön ve Arka Tekerlere Etkiyen Toplam Kuvvetler 0-360° Arası '0.35' N kuyruk kuvveti etkisi altında 45 mm arka teker, 50 mm ön teker genişliği için analiz edilirse;



Şekil 3.18. Ön ve Arka Tekerlere Etkiyen Toplam Kuvvetler 0-360° Arası

3.2.9. Hiyerarşik Esneklik

Tırmanan robotlarda yüksek bir tutunma kuvveti elde edebilmek için uzuvların yüzeye düzgün bir şekilde basabilmesi gerekmektedir. Tırmanma yüzeyindeki düzensizlikler, üretim hataları, robotun rijitliği gibi faktörler tutunma problemlerine neden olabilir. Bu etkiler geniş bir skalada karşımıza çıkmaktadır. Stabil bir tırmanma ve yüksek bir tutunma kuvveti elde etmek için bu geniş skalada karşımıza çıkan uyumsuzluklara uyum sağlayabilmek için çeşitli metotlar kullanılmaktadır [1]. Şase-tekerlerdeki süngerler-mikro fiber yapılaraya sahip elastomerler 3 katman boyutunda cm-mm- μm olarak hiyerarşik esneklik (Bkz. Şekil 3.19.) sağlamakta ve robotun yüzeye uyum sağlamasına katkıda bulunmaktadır.



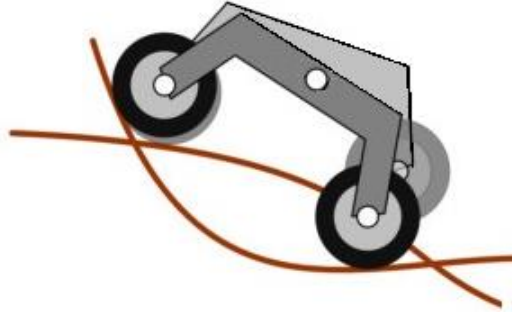
Şekil 3.19. Hiyerarşik Esneklikler

3.2.10. Şase Tasarımı

Tırmanan robotların şase tasarımında dikkat edilmesi gereken parametreler;

- Ağırlık,
- Kuyruk pozisyonu ve boyu,
- Hiyerarşik esneklikler,
- Ağırlık merkezi pozisyonudur.

Şase tasarlanırken hesaplamalar üretimde 3 mm'lik akrilik plakaların kullanılacağı göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Şase imalatı 2 eksenli lazer tezgahında (Gravograph LS100Ex) yapılacağından tasarımda imalattan kaynaklanan kısıtlamalar dikkate alınmıştır. Bağlantı noktaları 2 eksenli tezgahta üretebilecek aynı zamanda bütünlüğü sağlayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanacak olan robot iki tane iki tekerli ayna yansıması modül robotların orta noktalarından bir mil yardımıyla birleştirilmesinden oluşturulmuştur. Bu sayede robot dört tekerli olmasına karşın tripod gibi davranacak ve her türlü zemine ve eğime uyum sağlayacaktır. Ayrıca düzlemler arası geçiş yapması kolaylaşacak ve sonuç olarak tırmanma güvenliği ve robotun çevikliği artmış olacaktır.



Şekil 3.20. Rocker Boogie [29]

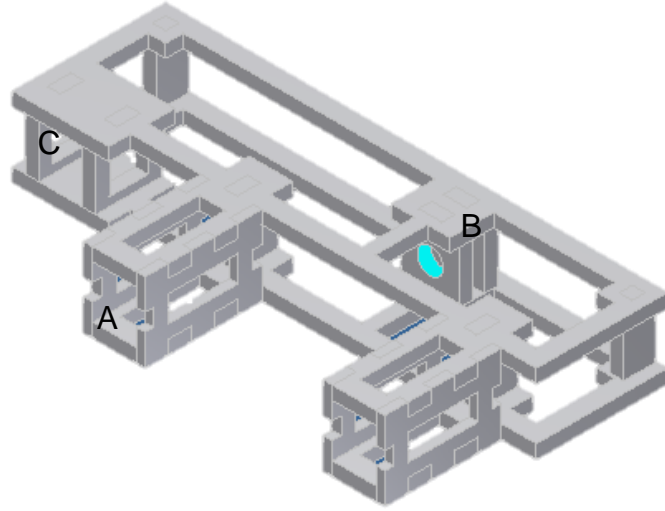
Robotun stabil bir şekilde tırmanma gerçekleştirmesi için motorlar tekerlerin içine yerleştirilmiştir. Ayrıca tekerlerde kullanılacak elastomerlerin tutunma alanının artırılması ve yüzey süreksizliklerine uyum sağlayabilmesi için tekerler ile elastomerler arasında esnek bir yapı kullanılacaktır. Bu esnek yapı fiberlerin sisteme kazandıracığı mikro boyuttaki hiyerarşik esnekliği bir üst düzeye taşıyarak milimetre düzeyinde bir esneklik sağlayacaktır. Böylece tekerleğin altında yerle temas edecek olan teğet bölge daha fazla deforme olarak bu noktada belirgin bir alanın oluşturulması hedeflenmiştir. Bir başka deyişle robot tasarımında teker

kullanılmasına rağmen temas alanı olarak neredeyse ayaklı robotlarda kullanılan pedlerin alanı kadar bir aktif temas alanının oluşturulması planlanmaktadır. Böylece çok stabil robotların tasarlanması hedeflenmektedir. Fiberli elastomerlerden beklenen tahmini yapışkanlık değeri 20 kPa civarındadır. Burda da kullanılacak esnek malzemenin değeri 20 kPa'dan çok daha düşük olmalıdır.

Hiyerarşik yapıya son santimetreler mertebesinde hareket sunan iki modül robotu birbirine bağlayan mil sağlayacaktır. Böylece tırmanan robotta mikrometre, milimetre ve santimetreler mertebesinde büyük bir spektrumu tarayan hiyerarşik esneklik sağlanmış olacaktır.

Aşağıda tüm analizler sonucunda gerçekleştirilen ilk robot tasarımının CAD çizimleri verilmektedir.

3.2.11. Şase Tasarımı-I

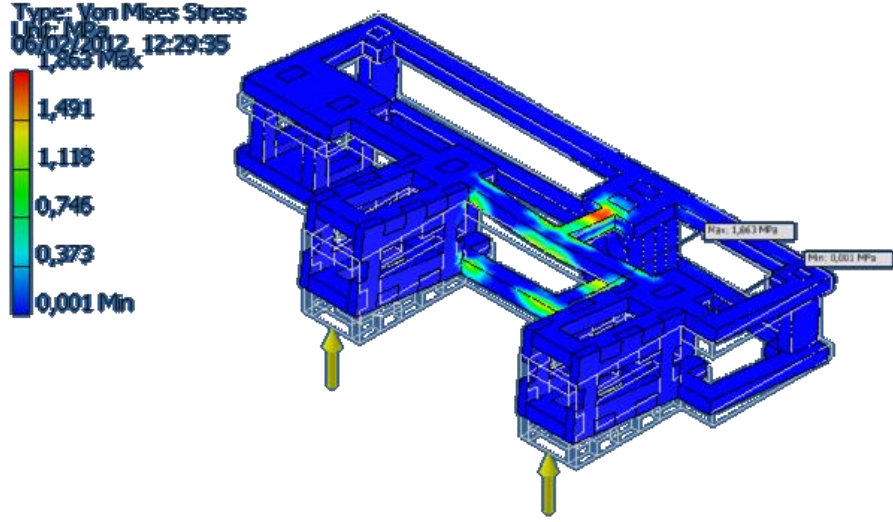


Şekil 3.21. Şase Tasarımı-I (Sağ Modül)

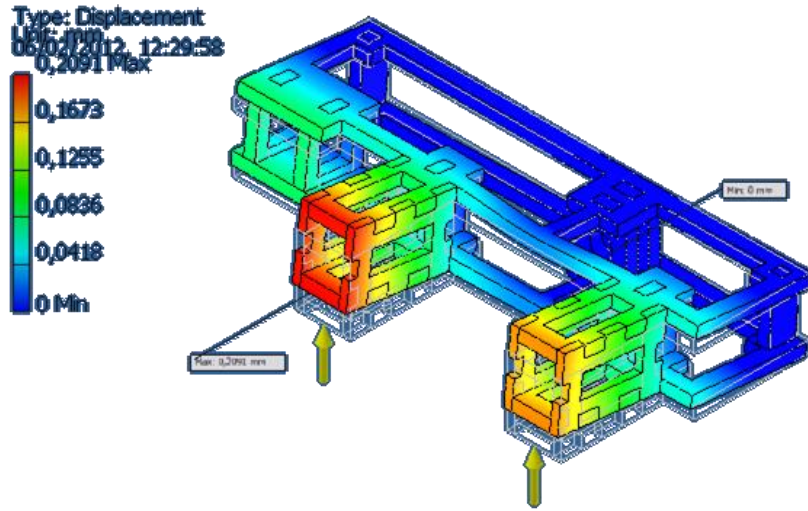
(A: Motor yatağı, B: Şase bağlantı mil yatağı, C: Kuyruk motor yatağı)

Şase tasarımı için belirleyici parametre kullanılacak motorların boyutları olmuştur (Şekil 3.21.). Bu sayede mümkün olan en kompakt yapı elde edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan sonlu eleman analizleri sayesinde (Şekil 3.22, Şekil 3.23) tekerlerin şaseye uygulayacağı kuvvetler simule edilip, kuvvetlerin yoğunlaştığı yerler tespit edilmiştir. İlk tasarımda Von-Mises basınçları ile gerginliğin yüksek olduğu yerler belirlenerek üretim yapılmadan ikinci tasarımın oluşturulmasına karar verilmiştir.



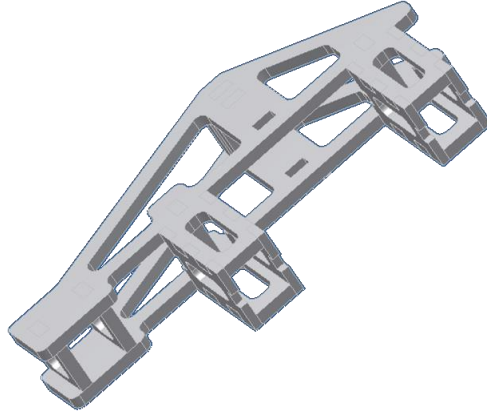
Şekil 3.22. ŞaseTasarımı-I Sonlu Elemanlar Analizi (Von Misses Stress)



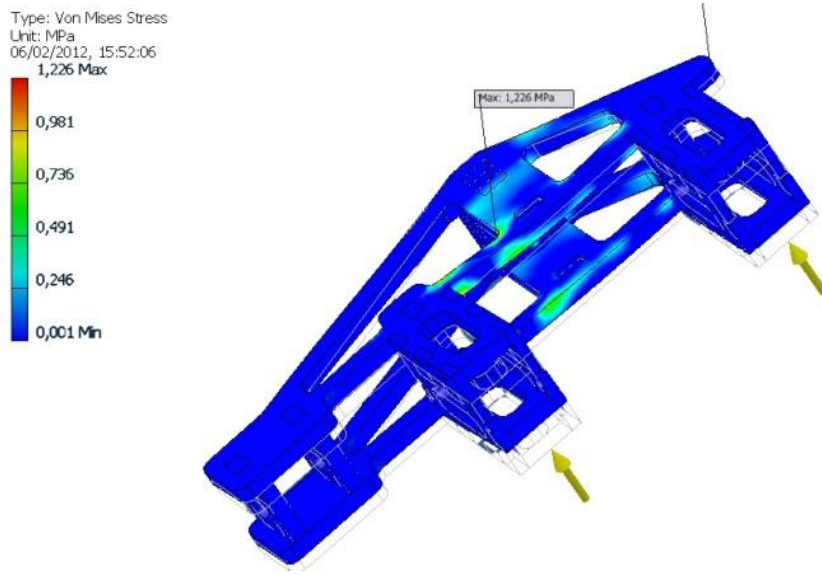
Şekil 3.23. Şase Tasarımı-I Sonlu Elemanlar Analizi (Deplasman)

3.2.12. Şase Tasarımı-II

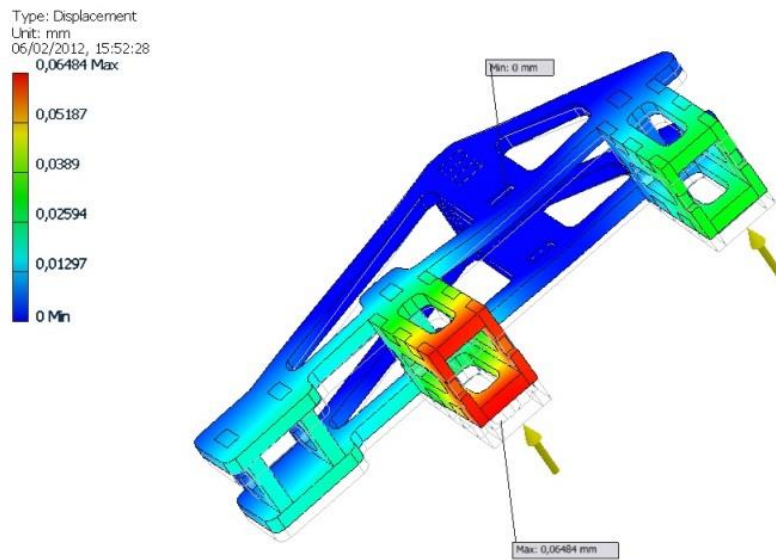
İlk tasarımın mil yatağı şase bağlantıları güçlendirilerek mil uzunluğu artırılmış ve köşeler yuvarlatılarak stres konsantrasyonlar düşürülmeye çalışılmıştır, ayrıca şase bağlantıları da güçlendirilerek ikinci tasarım gerçekleştirilmiştir(Şekil 3.24.).



Şekil 3.24. Tırmanan Robot Şase Tasarımı-II

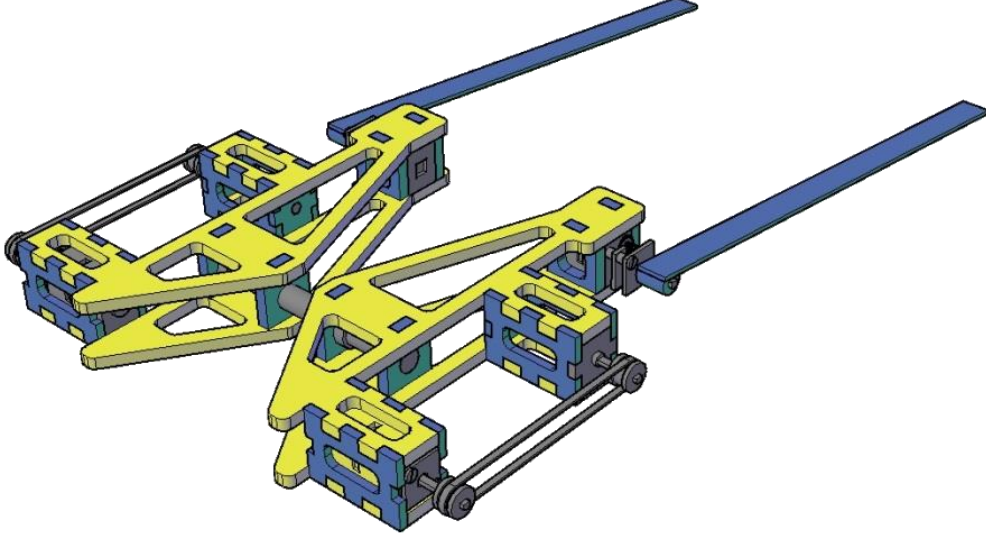


Şekil 3.25. Sonlu Elemanlar Analizi Şase Tasarımı-II (Von Misses Stress)

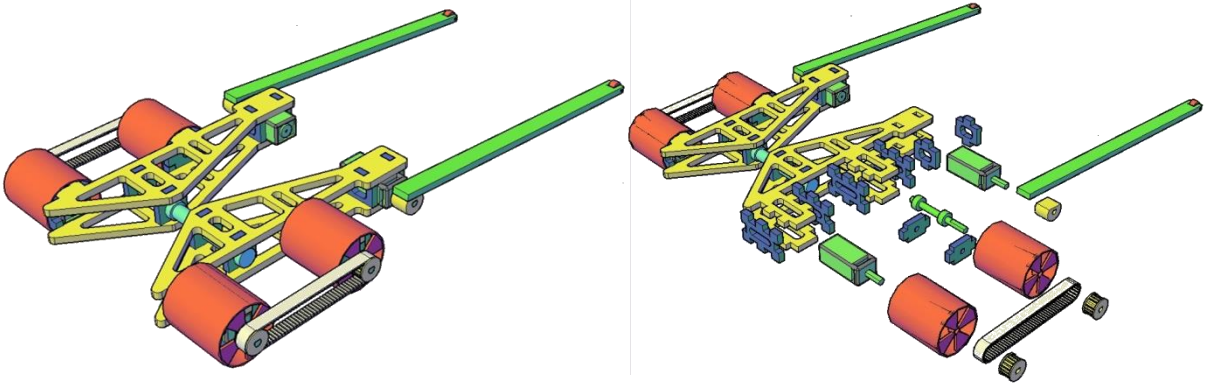


Şekil 3.26. Sonlu Elemanlar Analizi Şase Tasarımı-II (Deplasman)

Motorların yerleşimi; ilk ve ikinci tasarımda motorların yuva yükseklikleri 12 mm iken motorlar 90 derece döndürülerek boylamasına yerleştirilmiş ve şase yüksekliği 2 mm azaltılmış ve ağırlık merkezi tırmanma yüzeyine olabildiğince yaklaştırılmıştır.

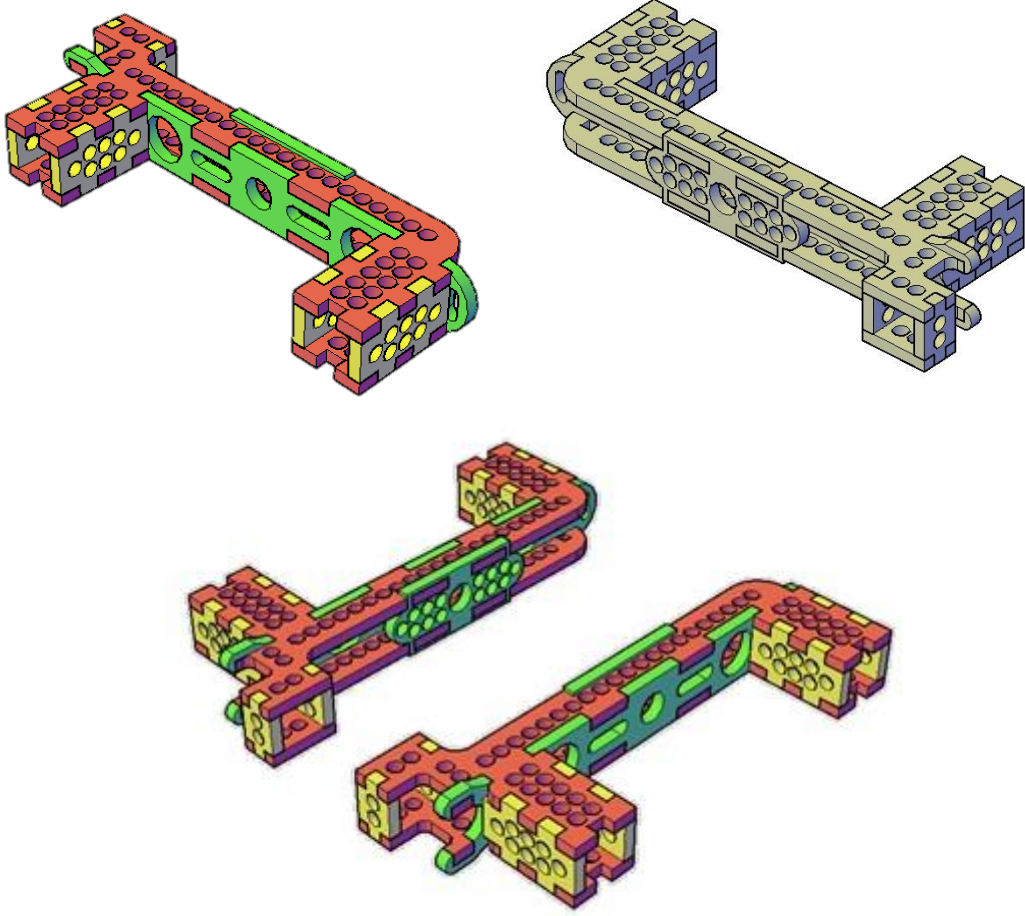


Şekil 3.27. Tırmanan Robot Şase Tasarımı-II



Şekil 3.28. Robot Şase Tasarımı-II (Solda) Ve Bileşenleri (Sağda)

3.2.13. Şase Tasarımı-III

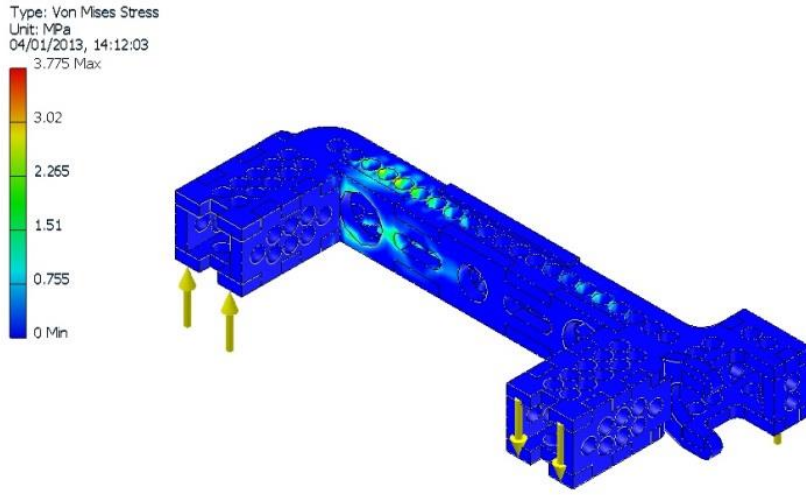


Şekil 3.29. Şase Tasarımı-III

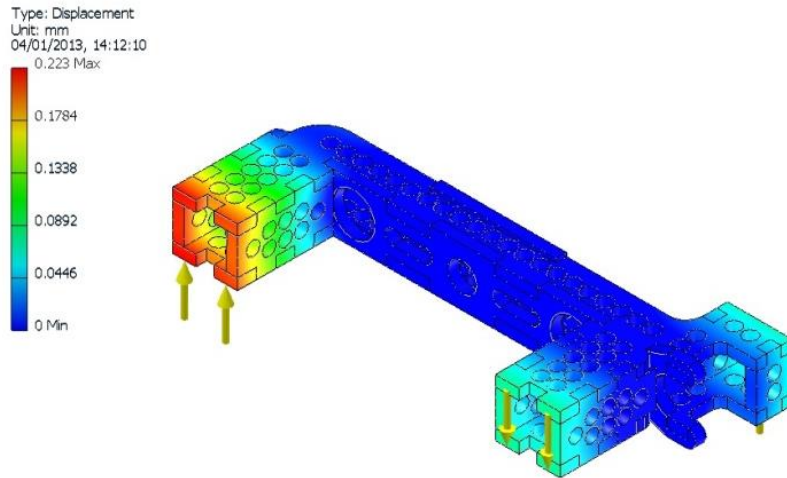
Şase Tasarımı-II'nin düzlem geçişlerinde kuyruk motorlarının pozisyonu dolayısıyla tırmanma güvenliğini olumsuz etkileyecek yapısı III. tasarımda düzeltilmiş ve şase mümkün olduğunca daraltılarak kompakt bir hale getirilmiş ve kullanılacak olan ekipmanlar ve yük taşıma için daha geniş bir alan sağlanmıştır.



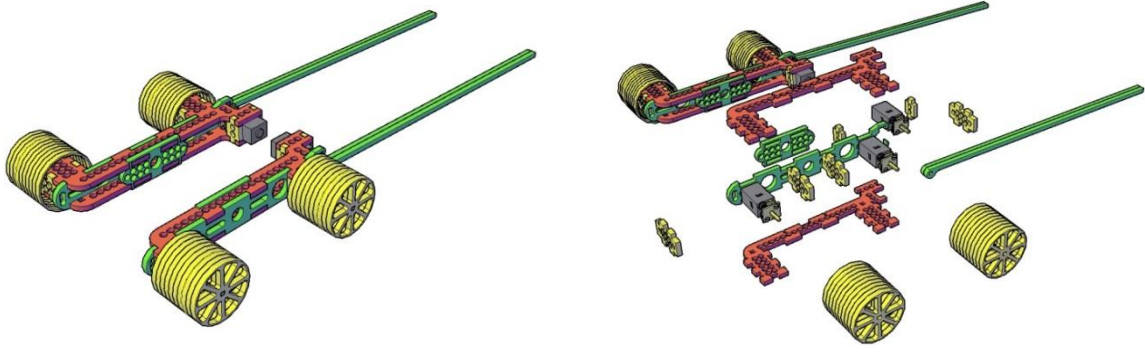
Şekil 3.30. Şase Tasarımları (Soldan Sağa, Şase Tasarımı-III, Şase Tasarımı-III Draft, Şase Tasarımı-II)



Şekil 3.31. Sonlu elemanlar analizi Şase Tasarımı-III (Von Misses Stress)



Şekil 3.32. Sonlu Elemanlar Analizi Şase Tasarımı-III (Deplasman)



Şekil 3.33. Robot Şase Tasarımı-III (Solda) Ve Bileşenleri (Sağda)

	Hacim(cm ³)	Yoğunluk(gr/cm ³)	Ağırlık(gr)	Adet	Toplam(gr)
Şase	16.35	1.15	18.80	2	37.60

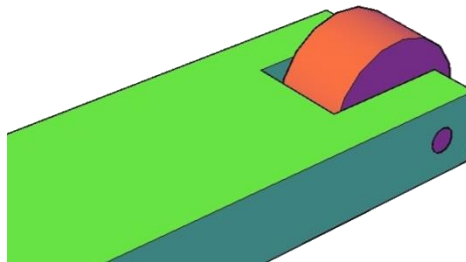
Çizelge 3.3. Şase Teknik Verileri

3.2.14. Kuyruk Tasarımı

Tasarlanan robotun yüzey düzensizliklerine uyum sağlayabilmesi için iki ayrı şase ve teker grubundan oluştuğundan, bağımsız kuyruk mekanizmasına ihtiyaç duymaktadır. Kuyruklar birer motor yardımıyla kontrol edilmektedir. Kuyruk basma kuvveti kontrolü her bir tekerleğin altına yerleştirilecek yakınlık sensörlerinden gelecek verilerin PID kontrolcüsünde işlenmesiyle yapılacaktır.

Robot tasarımlanırken, kuyruk motorlarının pozisyonları düzlem geçişlerine engel olmayacak ve kuyrukların robotun enine doğru istenmeyen bir moment oluşturmasını engelleyecek şekilde tekerlerin merkezinden geçen hayali çizgiye yakın olacak şekilde konumlandırılmıştır.

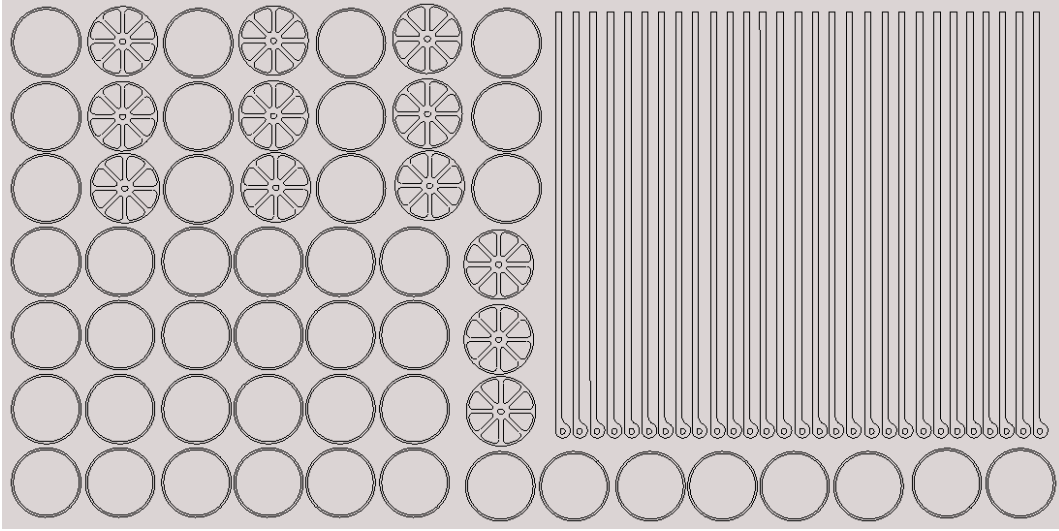
Robotun hareketi sırasında kuyruğun sürekli yere dokunmasından dolayı bir sürtünme kuvveti oluşturması kaçınılmazdır. Sürtünme etkisini azaltmak için Şekil 3.34.'de görüldüğü gibi kuyruğun yüzey ile temas edeceği noktaya teker takılmıştır.



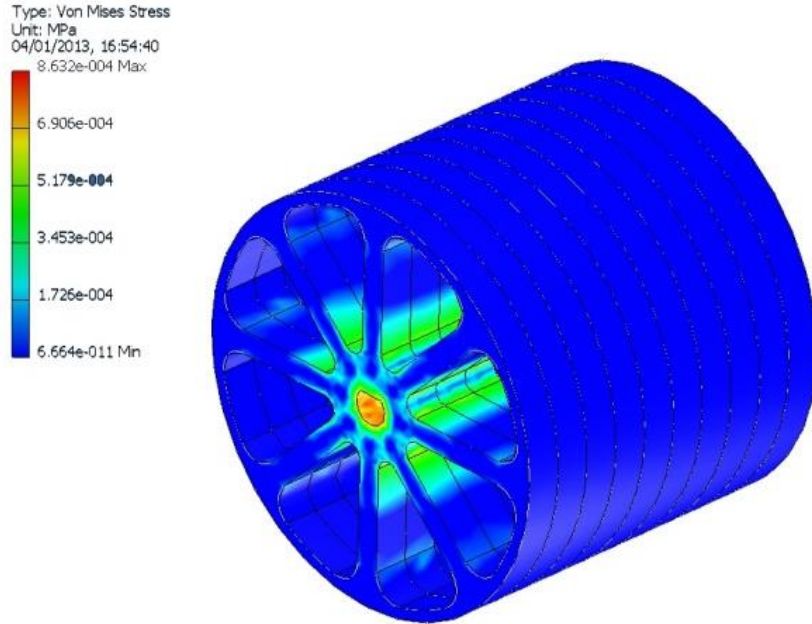
Şekil 3.34. Kuyruk Tekerleği

3.2.15. Teker Tasarımı

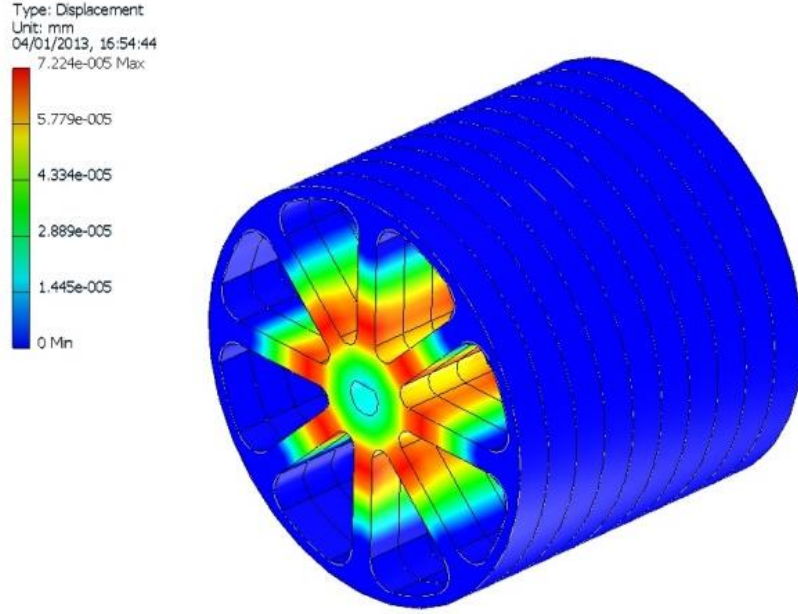
Teker tasarımı CAD modellemelerinin yanı sıra FEM analizleri yardımıyla mümkün olduğunca ağırlık tasarrufu yapılarak ve tekrar eden analizlerle son tasarımı yapılmış ve üretilmiştir. Teker ve elastomer arasına yerleştirilecek yumuşak doku Teker yan yüzeyine ve elastomerlere yapıştırılarak yapı tamamlanacaktır.



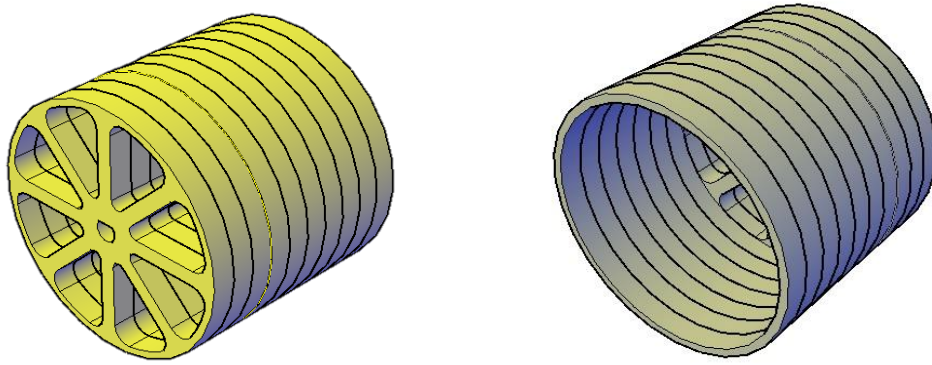
Şekil 3.35. Teker ve Kuyruk Laser Kesim için CAD çizimi



Şekil 3.36. 1000 Nmm Tork Altında Sonlu Elemanlar Analizi (Von Misses Stress)



Şekil 3.37. 1000 Nmm Tork Altında Sonlu Elemanlar Analizi (Deplasman)



Şekil 3.38. Tekerlerin İzometrik Görüntüsü

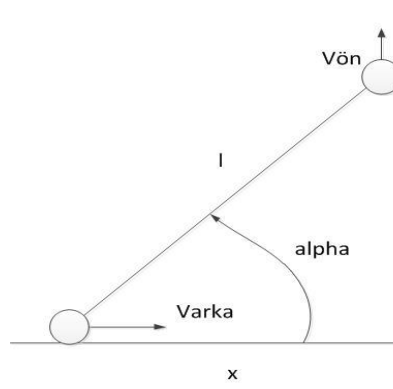
Tekerler 3mm akrilik plakan kesilen halkaların birleştirilip yapıştırılmasıyla üretilmiştir.

	Hacim(cm ³)	Yoğunluk(gr/cm ³)	Ağırlık(gr)	Adet	Toplam(gr)
Teker	5.45	1.15	6.26	4	25.07

Çizelge 3.4. Tekerlerin Teknik Özellikleri

Kuvvet aktarımı II. tasarımda Tekerlerin dış tarafına bağlanmış lastik kayışlar yardımıyla sağlanmaktadır. Ancak millerin sabitlenmesi, uygun boyutlarda ve yüksek tork aktarabilecek kayış kasnak sisteminin tasarım ve üretiminin zorluğu, ayrıca sisteme getireceği ekstra ağırlık motor ağırlıklarıyla karşılaştırıldığında arka tekerlerin de motor tahrikli olarak sürülmesine karar verilmiştir.

Kuvvet aktarımı tekerlerin içine yerleştirilmiş 1:1000 dişli kutusu oranlı 4 adet DC motor ile sağlanmaktadır. Kullanılacak sünger tekerler düzlem geçişleri sırasında oluşan devir farkının sınırlı kaymalara izin vererek tekerler arası devir farkı oluşması sağlayacaktır (Şekil 3.39.).



Şekil 3.39. Tekerler Arası Hız Farkı

Şekil 16'da zeminden dikey yüzeye geçen robot şematiği verilmiştir. Bu geçiş sırasında ön ve tekerlerde meydana gelmesi gereken hızlar aşağıda hesaplanmıştır;

$$L = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.25)$$

$$\frac{d_y}{d_x} \approx \frac{V_y}{V_x} = \frac{-x}{\sqrt{L^2 - x^2}} \quad (3.26)$$

Yukarıda verilen denklemden anlaşılacağı gibi hızlar oranı non-lineerdir. Tırmanan robotun dönebilmesi için sağda, solda, önde ve arkada olmak üzere dört tane motoru olacaktır, Sağ modüldeki motorlar ile sağ tekerlerin sürülmesi planlanmaktadır. Ancak yukarıdaki denklemden verildiği gibi bu hızlar yüzey geçişleri esnasında farklılık gösterebilir. Dolayısı ile iki teker arasındaki hız farklı süngerlerin esnek yapısı ile kompanse edilerek güvenli bir düzlem geçişi sağlanması planlanmaktadır. Tırmanan robotun otomobillerdeki gibi bir dönüş mekanizması yerine (ackerman) tanklardaki gibi (differential steering) hız farklarını kullanarak dönüşü gerçekleştirecek olmasının sebebi ackerman sisteminde tekerlerin daha fazla kesme kuvvetlerine maruz kalma ihtimalidir.

3.2.16. Tekerlerin Üretimi

Tekerler 3 mm'lik akrilik plakadan 36 mm genişliğinde olacak şekilde 7 adet halka 3 adet dairesel plakadan birbirine yapıştırılmak suretiyle meydana getirilmiştir

(Bkz. Şekil 3.32). Tekerler tutunma ihtiyacına göre istenilen ölçülere göre üretilebilmektedir. Kesim işlemi lazer tezgahı kullanılarak gerçekleştirilmiş ayrıca kullanılacak motorların mil ölçülerine göre mil yatağı da her bir teker için kesilen 3 adet dairesel plakaya işlenmiştir.



Şekil 3.40. Teker Yapıştırma Kalıbı



Şekil 3.41. Üretilmiş Teker

3.2.17. Süngerlerin Üretimi

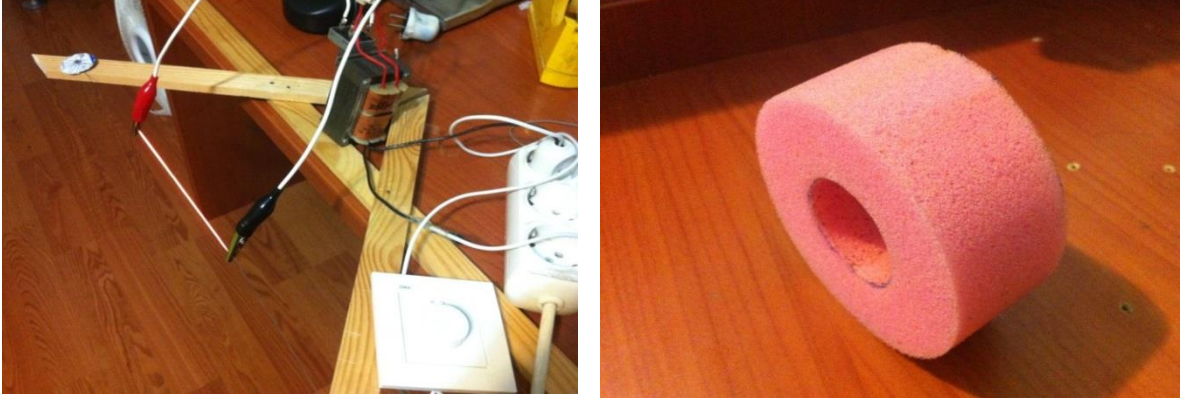
Süngerlerin üretimi için Hot Wire (sıcak tel) ile sünger kesim yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede istenilen çaptaki teker profilinin süngerlerin dış yüzeyine sabitlenip kılavuz olarak kullanılarak düzgün bir silindirik yapı elde edilmiştir.

Süngerlerin iç çapı tekerlerin kaymasını önleyecek ancak süngerlerin deformasyonun minimize edecek şekilde dar olarak kesilmiştir.

220 voltu 12 volta düşüren 50 watt gücünde transformatör kullanılmıştır. Redresör ile AC-DC dönüşümü gerçekleştirilmiş ve potansiyometre yardımıyla sıcaklık süngeri yakmadan kesim yapılabilecek değerde sabitlenmiştir. Ayrıca halat

ısındıktan sonra uzamadan dolayı gerginliğinin kaybolmasını engellemek için elle çevrilebilen bir vida sistemi daha çerçeveye monte edilmiştir.

Süngerlerin iç çapı ise istenilen şablon süngerler üzerine çizildikten sonra havaya yardımıyla eritilerek oluşturulmuştur. Uygun metal veya cam kalıplar oluşturularak iç çapın hot wire yöntemiyle kesilmesi suretiyle daha düzgün bir yapı elde etmek mümkündür. Ancak teker çapları ve kullanılan süngerlerin sertlikleri değişken olabildiğinden bu yöntem tercih edilmemiştir.



Şekil 3.42. Hot Wire Düzeneği Ve Hot Wire Düzeneği İle Kesilmiş Sünger Tekerleği

	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ağırlık (gr)	Adet	Toplam (gr)
Sünger	148.27	0.017	2.52	4	10.08

Çizelge 3.5. Sünger Teknik Özellikleri

Tırmanan robotu oluşturan lazer tezgahı ve hot wire düzeneği ile üretilmiş bileşenlerin teknik verileri aşağıdaki Çizelge görülebilir.

	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ağırlık (gr)	Adet	Ara Toplam (gr)
Teker	5.45	1.15	6.26	4	25.04
Şase	16.35	1.15	18.80	2	37.60
Kuyruk	3.85	1.15	4.42	2	8.84
Sünger	148.27	0.017	2.52	4	10.08
Toplam Ağırlık (gr)					81.56

Çizelge 3.6. Tırmanan Robot Bileşenlerinin Teknik Özellikleri

4. TIRMANAN ROBOT MEKANİK, ELEKTRONİK VE YAZILIM ENTEGRASYONU

Tırmanan robotların kullanılacağı yerler itibariyle kablolu bir iletişim ve kontrol kullanım alanlarını büyük ölçüde kısıtlayacaktır. Bu nedenle tırmanan robotların kablosuz olarak kontrol edilebilmesi tırmanma güvenliğinin anlık olarak gözlemlenebilmesi için üzerindeki dahili batarya ile ihtiyaç duyulan enerji sağlanması gerekmektedir.

Üretilen robotta kullanılacak ekipmanlar;

- Ana Kart,
- Kablosuz iletişim kartı,
- Motor Sürücüsü
- Eğim sensörü,
- Yakınlık sensörleri.

Tırmanan robotun, kablosuz(wireless) kontrolünü gerçekleştirmek, sensörlerden gelen verileri okumak, kullanılan bataryanın doluluk oranını takip etmek için çalışmalar yapılmış ve gerekli yazılımsal ve donanımsal kurulumu gerçekleştirilmiştir.

Yazılım ve donanım arasında iletişim Labview programı yardımıyla gerçekleştirilmiş ve kullanıcı arayüzü oluşturulmuştur. Kablosuz iletişim için Xbee modüller X-CTU yazılımıyla programlanmıştır.

4.1. Sensörler ve İşlevleri

Tırmanan robotun istenilen görevleri yerine getirebilmesi ve tırmanma parametrelerinin kablosuz ve gerçek zamanlı olarak izlenebilmesi için çeşitli sensörler ve bu sensörlerden gelen verilere göre robot mekanizmalarını harekete geçiren algoritmalara ihtiyacı vardır. Bu bölümde kullanılan sensörler ve işlevleri, tırmanma güvenliği izleme ara yüzü ve donanımları, robotun yön, hız vb. parametrelerinin izlenebilmesi için kurulan kullanıcı ara yüzünden ve çalışma prensiplerine değinilmiştir.

4.1.1. Kızılötesi Yakınlık Sensörü

Robotun her bir tekerleğinin iç tarafında şasenin alt kısmına tırmanma yüzeyini görecek şekilde yerleştirilerek, tırmanma güvenliği, aktif kuyruk kontrolü ve düzlemler arası geçişler algılamada ve tırmanma parametrelerini sensörlerden gelen verilere göre hazırlanması sağlanacaktır. İç düzlemler arası geçişlerin tespit edilmesinde ve engel tanıma/kaçınma sisteminde kullanılacaktır.

Kızılötesi Yakınlık Sensörleri ve Teknik Özellikleri

	Çalışma Voltajı (V)	Çalışma Aralığı (mm)	Çözünürlük (Bit)	Boyutlar (mm)	Ağırlık (gr)
VCNL4000	2.5-3.6	0-100	16	3.95x3.95x0.75	1
QTR-1A	5	0-25	8	1.26x0.75x0.75	1

Çizelge 4.1. Yakınlık Sensörü Teknik Özellikleri

Bu sayede robota montajı gerçekleştirilen yakınlık sensörü ile yüzey-şase arasındaki uzaklık gerçek zamanlı olarak hassas bir şekilde ölçülmektedir.

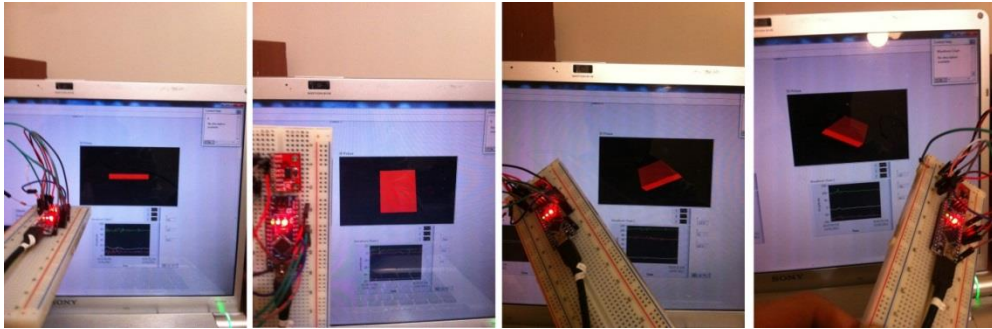
4.1.2. Eğim Ölçer-İvme Sensörü

Robotun tırmandığı yüzeyin yerçekimini ivmesinin yönüne göre açısının ölçülmesi ile belirli derecelere kadar aktif kuyruk yerden kaldırılacaktır. Böylelikle enerjiden tasarruf edilmiş olacaktır. Ayrıca uzak operasyonlar için kullanıcıya yüzeyin açısı ve robotun uzaydaki pozisyonu hakkında üç boyutlu olarak görsel bilgi gönderilmiş olacaktır.

Eğim Ölçer-İvme Sensörü Teknik Özellikleri

	Çalışma Voltajı (V)	Çalışma Aralığı (mm)	Boyutlar (mm)	Ağırlık (gr)
ADXL345	2.5-3.6	±16g@4mg/LSB	3.95x3.95x0.75	1

Çizelge 4.2. İvme Sensörü Teknik Özellikleri



Şekil 4.1. İvme Sensörü Kullanıcı Arayüzü Üç Boyutlu Uzay Pozisyon Görüntüsü

4.2. Geliştirme Kartları Teknik Özellikleri ve Gereken Pin Sayıları

Şase tasarımı-II Arduino Uno boarduna göre tasarlanmıştır. Arduino Uno board üzerinde 6 adet analog pin, istenildiği takdirde 6 adet PWM(Pulse Width Modulation) çıkışı olmak üzere 14 adet digital pin bulunmaktadır.

Board Tipi	Analog Pin	Digital Pin	PWM
Arduino Uno	6 (I2C dahil)	14 (PWM dahil)	6
Arduino Mega	16 (I2C dahil)	54 (PWM dahil)	14
Arduino Nano	8 (I2C dahil)	14 (PWM dahil)	6

Çizelge 4.3. Boardların Pin Sayıları

Kullanılacak Sensör ve Donanımlar, Gereken Pin Sayıları

	Adet	Analog	Digital
Motor Shield	1	-	-
Xbee Shield	1	-	-
Xbee Anten	2	-	-
Xbee USB Shield	1	-	-
Motor Yön	2	-	2
Motor Kontrol	4	-	4
Yakınlık Sensörü	4	4	-
Batarya Doluluk	1	1	-
Üç eksenli Eğim Sensörü	1	2 (I2C)	-
Toplam		7	6

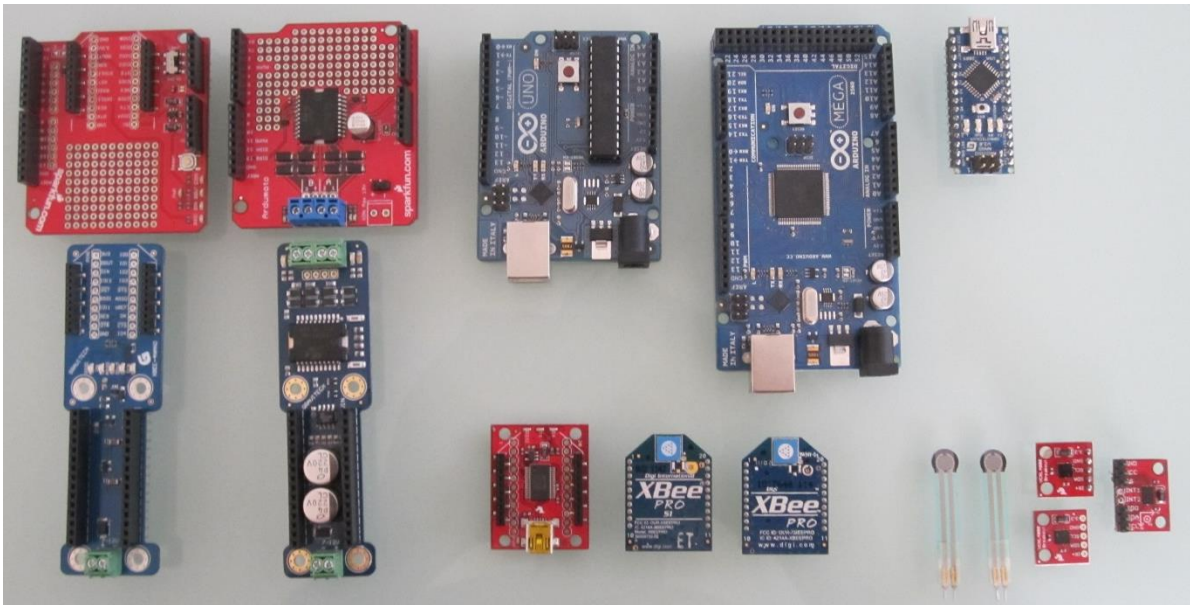
Çizelge 4.4. Kullanılacak Sensör ve Donanımlar ve Pin Gereksinimleri

Board Tipi	Boy (mm)	En (mm)	Ağırlık (gr)
Arduino Uno	75	53	26
Xbee Shield	59.5	53	14
Motor Shield	59.5	53	18
Toplam Ağırlık (gr)			58
Arduino Mega	108	53	36
Xbee Shield	59.5	53	12
Motor Shield	59.5	53	18

		Toplam Ağırlık (gr)	66
Arduino Nano	43.2	17.6	6
Xbee Shield	94	28	14
Motor Shield	94	26	17
		Toplam Ağırlık (gr)	47

Çizelge 4.5. Boyutsal Karşılaştırma

Çizelge 4.4.'de belirtildiği gibi ihtiyaç duyulan analog pin sayısı 6'dır. Arduino Uno göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Ancak Uno boardunun boyutları, ağırlığı (Bkz.Çizelge 4.5.) ve analog pin sayısının az oluşu göz önünde bulundurularak tırmanma güvenliğini artırmak ve kullanılabilir pin sayısını artırmak amacıyla Arduino Nano Board'a geçilmiştir.



Şekil 4.2. Kullanılan Sensör ve Donanımlar Soldan-Sağa-Yukarıdan-Aşağıya: Arduino Uno Xbee Shield, Arduino Uno Motor Drive, Arduino Uno, Arduino Mega, Arduino Nano, Nano Xbee Shield, Nano Motor Drive, Xbee USB Shield, 2 Adet Xbee, 2 adet Kuvvet Sensörü, 2 Adet Yakınlık Sensörü, İvme Sensörü

4.3. Kullanılan Yardımcı Donanımlar

Motor Shield

Motorların hız ve yönlerinin kontrol edilmesinde kullanılmaktadır.

Xbee Anten

Kablosuz iletişim sağlanması için anten.

Xbee Shield

Xbee anten ile arduino arasında iletişimin sağlanmasında kullanılmaktadır.

Xbee USB Shield

Xbee antenlerinin programlanmasında ve bilgisayar tarafında Xbee anten ile bilgisayarın USB üzerinden iletişimin sağlanmasında kullanılmaktadır.

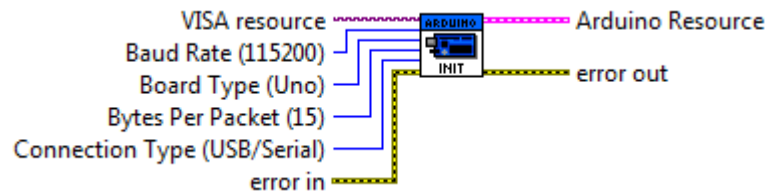
4.4. Labview Arayüzü

Labview tırmanan robotun kontrolü ve verilerin okunması için kullanılmaktadır. Labview programının seçilmesinin nedeni grafiksel programa dili ile programlama için harcanan süreyi minimuma indirmesi, kullanım kolaylığı ile herkesin kontrol edebileceği anlaşılır ve görsel bir arayüz sunması, arzu edilen değişikliklerin hızla yapılabilmesi, yeni donanımların eklenmesi veya mevcut donanımların çıkarılması gibi zaman alacak uygulamaların hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlamasıdır.

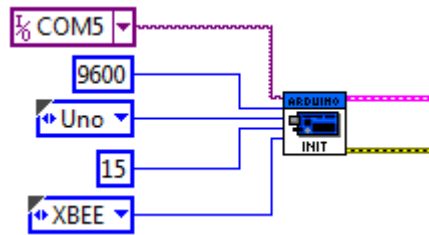
Labview Arduino arayüzünün çalışabilmesi için

C:\Program Files (x86)\National Instruments\LabVIEW 2011\vi.lib\LabVIEW Interface for Arduino\Firmware\LVIFA_Base.pde dosyasının Arduino yazılımının File>Open yolu izlenerek açılıp kullanılacak board ve iletişim portu seçilerek yüklenmiştir.

4.4.1. Arduino Initialization Görsel Arayüzü



Şekil 4.3. Arduino Başlatma VI'ı



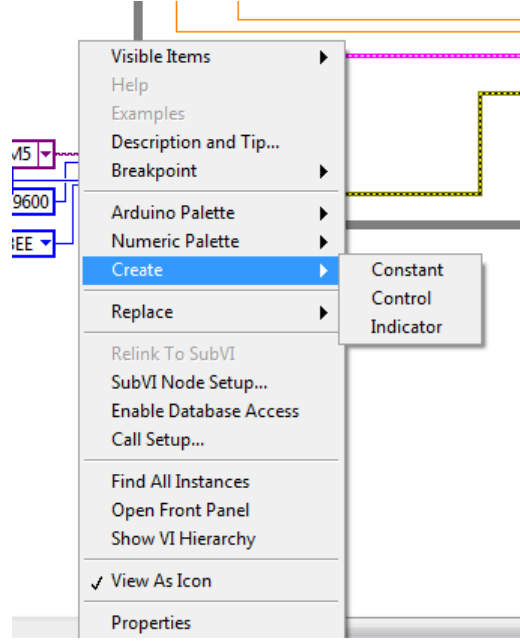
Şekil 4.4. Tırmanan Robotta kullanılan Arduino Başlatma Görsel Arayüzü Konfigürasyonu

Labview programında kullanılan VI'ların bağlantı noktalarında Create komutu seçildiğinde karşımıza 3 seçenek çıkmaktadır.

Constant: Arduino başlatma VI'ı için bağlantı noktası Xbee seçilmiştir.

Control: Bir değişkenin kontrolünün sağlanması istendiğinde kullanılır.

Indicator: Örneğin bir sensörden okunan değerlerin bir göstergede gösterilmesi istendiğinde kullanılır.



Şekil 4.5. Create Komutu Seçenekleri

VISA Resource (The Virtual Instrument Software Architecture): VISA, Seri, Ethernet, USB vb. ara yüzleri kullanan bir yapılandırma, programlama ve sorun giderme standartıdır. Labview gibi grafiksel programlama yazılımları ile donanım arasında ihtiyaç duyulan ara yüzü sağlamaktadır.

VISA resource ise veri alışverişinin yapılacağı portu belirlemede kullanılır (COM4, COM5, vb).

Baud Rate: Verilen bağlantı noktasının veri akış hızını belirler. Arduino Uno için 9600 olarak belirlenmiştir.

Board Type: Kullanılan Arduino Board tipini belirler (Mega, Uno, vb.).

Bytes Per Packet: Veri akışında kullanılacak paketlerin boyutlarını belirler. Arduino Uno için bu değer 15 byte olarak belirlenmiştir.

Connection Type: Bağlantı noktasının hangi arayüz ile çalıştığını belirlemede kullanılır (USB/Serial, Bluetooth, XBee).

Error in/out: Hataların ve hata kodlarının gösterilmesi için kullanılır.

4.4.2. Arduino Analog Read Görsel Arayüzü

Arduino Analog Read, analog pinlerden okunan değerleri 0-5Volt arası voltaj değeri olarak gösteren VI'dır.



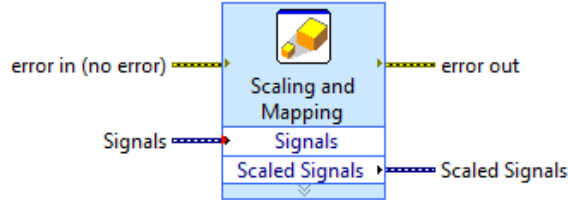
Şekil 4.6. Arduino Analog Read VI'ı



Şekil 4.7. 1 Numaralı Analog Pinden Sinyal Okuma

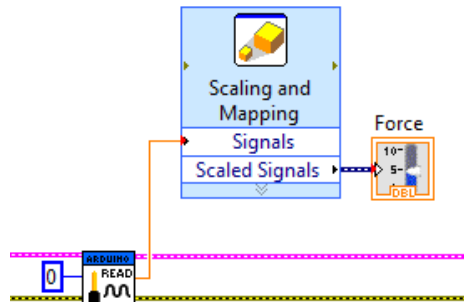
4.4.3. Scaling And Mapping Görsel Arayüzü

Okunan sinyalleri istenilen genlik değerlerine ölçeklendirme ve eşleştirmede kullanılır.

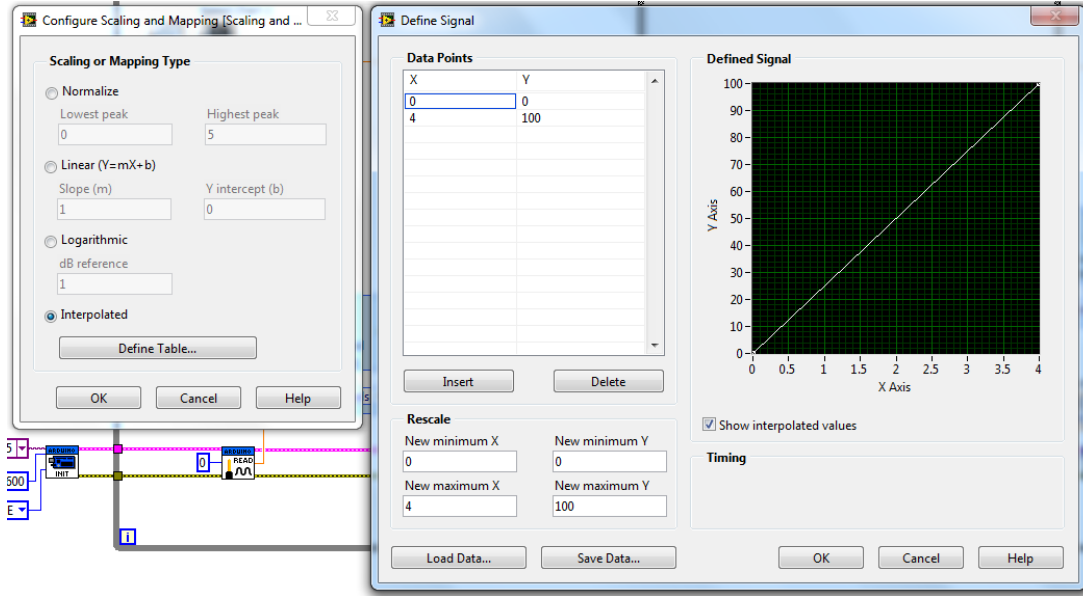


Şekil 4.8. Arduino Scaling And Mapping Görsel Arayüzü

Analog input '0'a bağlı kuvvet sensöründen okunan 0-4Volt arası voltaj değerleri ölçeklendirilerek 0-100 arası tutunma kuvveti göstergesi olarak kullanılır.



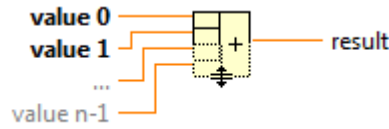
Şekil 4.9. Arduino Scaling And Mapping Görsel Arayüz Konfigürasyonu



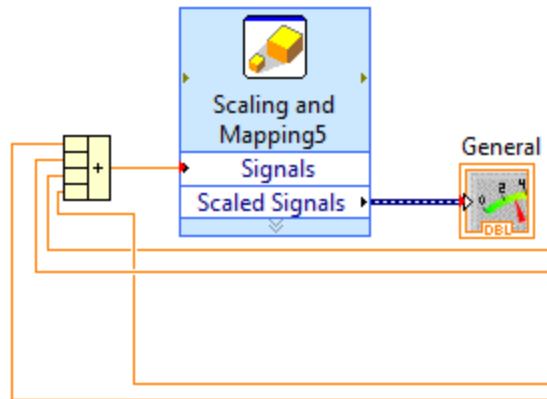
Şekil 4.10. Arduino Scaling And Mapping Görsel Arayüz Ayarları

4.4.4. Compound Arithmetic Görsel Arayüzü

Sensörler vb. bileşenlerden okunan değerlerin istenilen matematiksel işleme (toplama, çarpma vb.) tabi tutulduktan sonra sonuçların yazılmasını sağlar. Tırmanan robotta 4 adet yakınlık sensöründen gelen değerlerinin toplamının bulunmasında ve bu genel değerın Scaling And Mapping görsel arayüzü ve gösterge yardımıyla ortalama tırmanma güvenliği olarak gösterilmesinde kullanılmaktadır (Bkz Şekil 15).



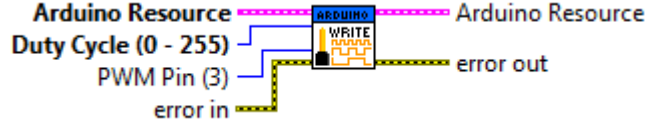
Şekil 4.11. Arduino Scaling And Mapping Görsel Arayüz Ayarları



Şekil 4.12. Genel Tırmanma Güvenliği Göstergesi Blok Diagram Konfigürasyonu

4.4.5. Arduino PWM Write Görsel Arayüzü

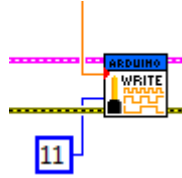
Pulse Width Modulation(PWM) ile motorların sürülmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 4.13. Arduino PWM Write Görsel Arayüzü

Ardunio'nun kullanılmak istenilen PWM pini seçilir. Motorların istenilen hızda çalışması için Duty Cycle (0-255 bit) değişkeni kullanılmaktadır. Tırmanan robotun klavyeden yön tuşları sayesinde kademeli olarak kontrolü sağlanmıştır. Duty Cycle klavyeden gelen komutlarla kontrol edilmektedir.

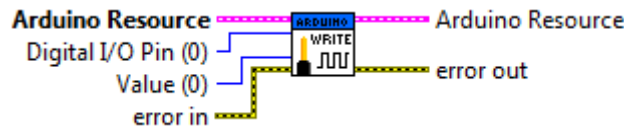
Arduino 11 numaralı PWM aracılığıyla klavyeden sinyal ile motorun kontrolü sağlanmaktadır.



Şekil 4.14. Arduino PWM Write Görsel Arayüz Konfigürasyonu

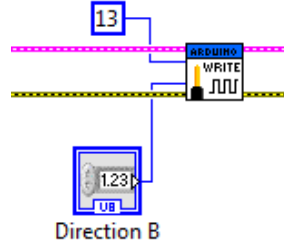
4.4.6. Arduino Digital Write Görsel Arayüzü

Belirlenen dijital pine istenilen değerin yazılmasında kullanılır. Örneğin Arduino Uno için motorların 'directional control' (yön kontrolü) 12 ve/veya 13 numaralı pinlerden sağlanmaktadır.

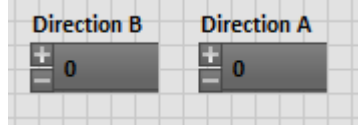


Şekil 4.15. Arduino Digital Write Görsel Arayüzü

Kuyruk motorlarının yön kontrolü dijital 13 nolu pin üzerinden kontrol edilmektedir. Yön kontrolü ön panelden (Front Panel) yapılmaktadır.0 değeri bir yön ve 1 değeri diğer yön için kullanılmaktadır.



Şekil 4.16. Arduino Digital Write Görsel Arayüz Konfigürasyonu

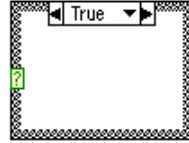


Şekil 4.17. Arduino Digital Write Görsel Arayüz Konfigürasyonu

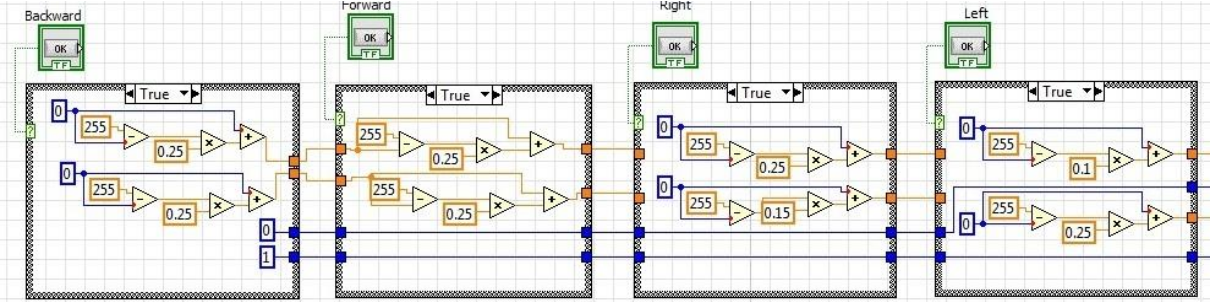
4.4.7. Case Structure

Tırmanan robotun motorlarının, sağ, sol, ileri gibi manevraları yaparken motorların hız kontrolünde ve kuyruk motorlarının kontrolünde istenilen durumların oluşturulmasında kullanılmaktadır.

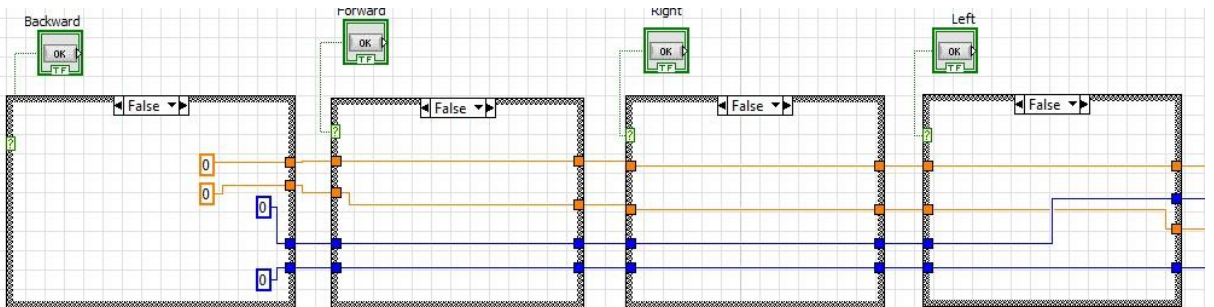
Case Structure



Şekil 4.18. Case Structure



Şekil 4.19. Yön kontrolü Case Structure=True



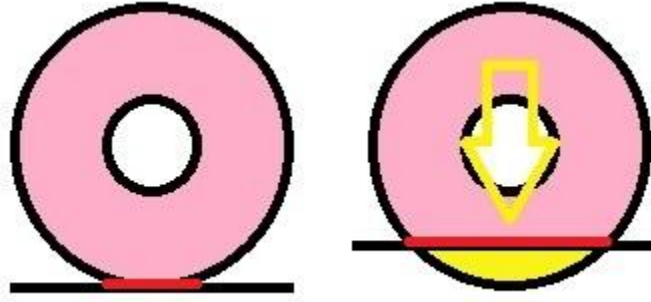
Şekil 4.20. Yön Kontrolü Case Structure=False

4.5. Tırmanma Güvenliği

Robota montajı gerçekleştirilen yakınlık sensörü ile yüzey-şase arasındaki uzaklık gerçek zamanlı olarak bir şekilde ölçülmektedir. İyi tutunma anında tekerlerdeki süngerlerin deforme olması ile robotun şasesi yüzeye yakınlışacak tutunma alanı artacak düşük tutunma anında bu deformasyon azalarak robot şasesi yüzeyden uzaklaşacaktır.

Yakınlık sensörlerinin tırmanma yüzeyine olan mesafesi sensörlerin çalışma aralığı dışında olmamalıdır. Bu nedenle sensörlerin çalışma aralığı dikkate alınarak montajı gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca yüzey geçişlerinde ve tırmanma güvenliğinin düştüğü durumlar yakınlık sensöründen gelen değerlere göre belirlenerek aktif kuyruk aksiyonları belirlenebilmektedir.

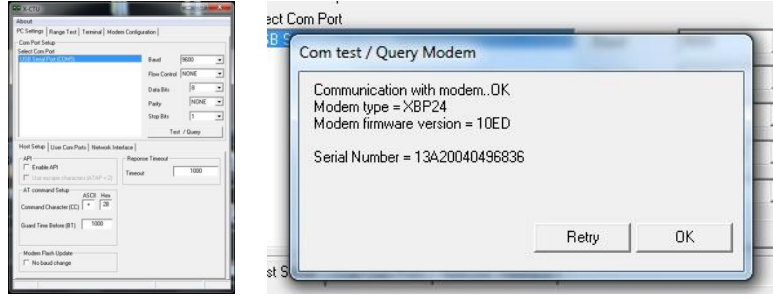


Şekil 4.21. Yapışma Kuvvetinden (Sarı Ok) Dolayı Tekerlerde Kullanılan Süngerlerin Deformasyonu (Sarı Bölge) ve Bu Sayede Yapışma Yüzeyinin Genişlemesi (Kırmızı Bölge)

4.6. Kablosuz İletişim

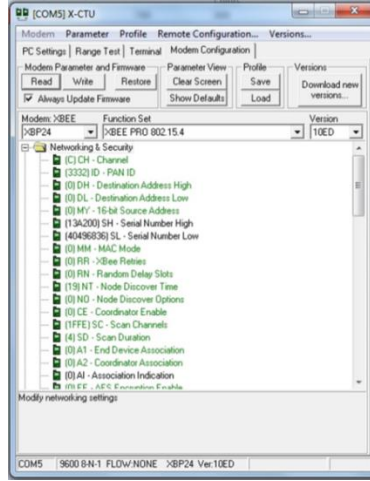
4.6.1. Xbee Anten

Kablosuz iletişimin sağlanması için kullanılacak Xbee antenlerin iletişim kanallarının ve veri alışveriş oranlarının dahili mikroçip üzerine yazılmış olması gerekmektedir. Bu ayarlar üretici firmanın yayınladığı X-CTU isimli program ile yapılmaktadır. Bunun için Xbee anteninin Xbee USB Shield üzerinden bir USB portuna bağlanmıştır. Program açıldığında USB portuna ile iletişim kurulduğu bağlantı kurulmaktadır (Bkz.Şekil 4.22.). Test/Query butonuna basarak veri alışverişi test edilir.



Şekil 4.22. Xbee Anten İletişim Test Ekranı

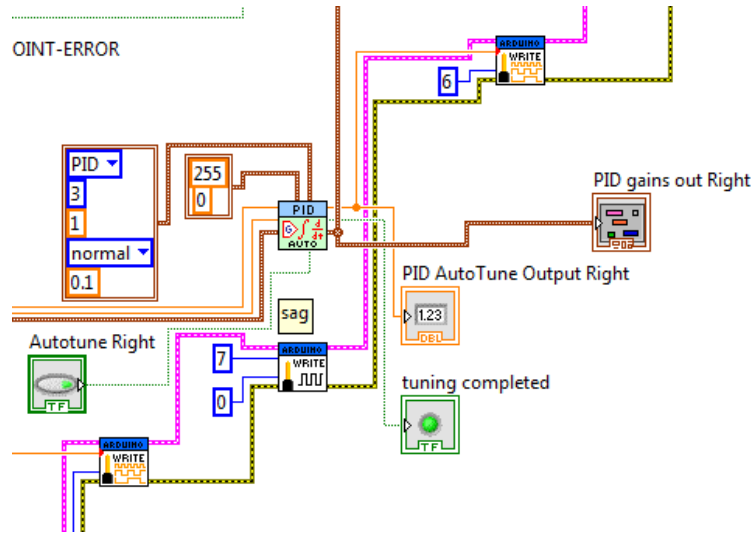
Daha sonra Modem Configuration Sekmesi açılarak Read komutu ile modem ayarlarının yapılabilmesi için Xbee anten ile iletişim kurulur. İletişimin gerçekleşebilmesi için kullanılacak iki antenin de aynı iletişim kanalını kullanması gerekmektedir. Channel ve Pan ID ayarları kullanılacak iki anten için de aynı olmalıdır (Bkz. Şekil 4.23.).



Şekil 4.23. Xbee Anten Modem Configuration Sekmesi

4.7. Aktif Kuyruk Kontrolü

Tasarımlanan tırmanan robotun rocker-boogie mekanizmasının sağladığı avantajları kullanabilmesi için sağ ve solda olmak üzere iki adet kuyruk görev yapmaktadır. Kuyrukların kontrolünde oransal-integral-türevsel denetleyici kontrol döngüsü yöntemi kullanılmıştır. PID parametrelerinin tespiti Labview'de bulunan PID Ayar Sihirbazından Ziegler and Nichols' metodu kullanılarak yapılmıştır. Bu parametreler tırmanan robotta kullanılan elastomerlerin fiziksel özelliklerine, tırmanma yüzeyine, tekerlerde kullanılan süngerlerin sertliklerine bağlı olarak değişecektir. Bu nedenle PID kontrolcüsünün parametreleri yukarıda belirtilen değişkenler göz önünde bulundurularak güncellenmelidir.



Şekil 4.24. PID Kontrolcü Görüntüsü

PID kontrolcüsü robotun her bir modülünün ön(Front) ve arka(Rear) tekerlerinin yanına yerleştirilmiş sensörlerden gelen verilerden belirlenmiş fark (setpoint) değerini hata(error) hesaplayarak çalışmaktadır.

$$\text{Hata} = (|\text{Ön Sensör Değeri} - \text{Arka Sensör Değeri}|) - \text{Belirlenmiş Fark} \quad (4.1)$$

PID kontrolcüsü tırmanan robotun her bir tekerleğinin yayına şasenin altına tırmanma yüzeyine bakacak şekilde yerleştirilmiş yakınlık sensöründen gelen verileri değerlendirerek bir hata (error) hesaplamaktadır. Bu hata belirlenmiş olan K_c , T_i , T_d değerleriyle sırasıyla kontrolcü katsayısı, integral süresi (dk), tepki süresi (dk) çarpılarak kuyruk motorlarını sürülmesi için bir çıktı (output) oluşturulmasına kullanılmaktadır.

$$G_{\text{controller}}(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.3)$$

PID ayar sihirbazı sistemin tepki süresini τ , ve zaman sabitini T_p , tespit ederek Ziegler and Nichols' metodu kullanarak aşağıdaki tabloda verilen katsayılar ile çarpılması sonucu PID değerleri tespit edilmektedir.

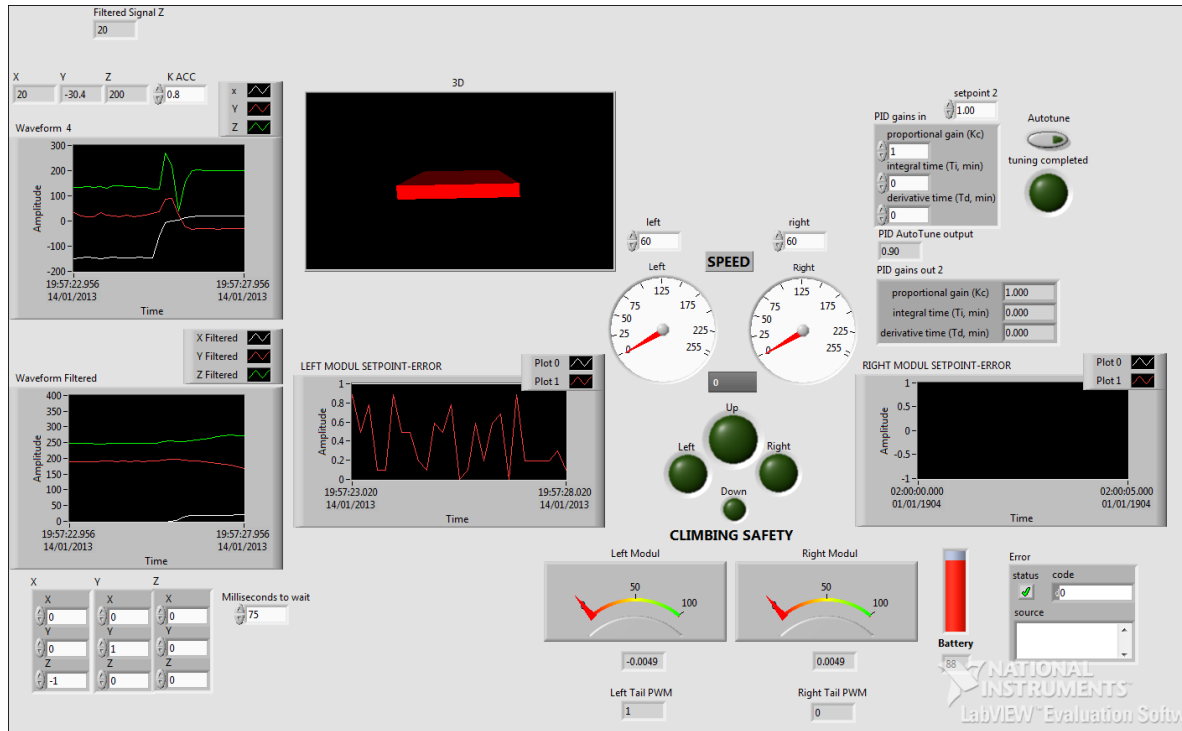
	K_c	T_i	T_d
PID	$1.1 T_p / \tau$	2.0τ	0.5τ
PID Değerleri	46.92377	0.033992	0.008158

Çizelge 4.6. PID Katsayı ve Değerleri

4.8. Labview Kullanıcı Arayüzü

Tırmanan robotun kontrolü ve tırmanma parametrelerinin izlenebilmesi için kullanıcı ara yüzü oluşturulmuştur. Tırmanma güvenliği, tırmanma hızı, aktif kuyruk ile ilgili PID kontrolcüsünün Set Point ve Error parametrelerinin değişimi grafiksel olarak izlenebilmektedir. Ayrıca kullanılan polimer bataryanın doluluk oranı takip edilmektedir.

Tırmanan robotun ileri, sağa, sola kontrolü kullanılan bilgisayarın yön tuşları ile kontrol edilmekte aynı zamanda atanmış butonlarla da gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 4.25. Labview Kullanıcı Arayüzü

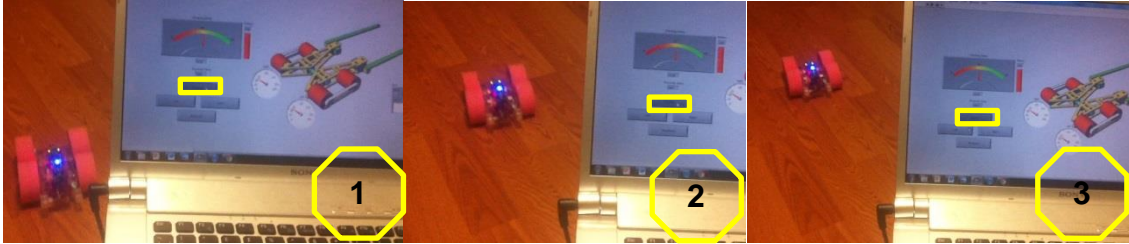
5. TIRMANAN ROBOT TESTLERİ

5.1. Kablosuz İletişim ve Kontrol Testleri

X-CTU programı ile ayarları yapılan Xbee modülleri aracılığıyla kurulan bağlantı test edilmiştir. Tırmanan robotun kablosuz olarak sensör verilerini gönderme ve alma testleri, yön kontrolleri Labview kullanıcı arayüzüne yerleştirilmiş butonlarla sağlanmaktadır. Kullanım kolaylığı açısından daha sonra bu kontroller klavye tuşlarına aktarılmıştır.

5.2. İleri Gidiş Kontrolü

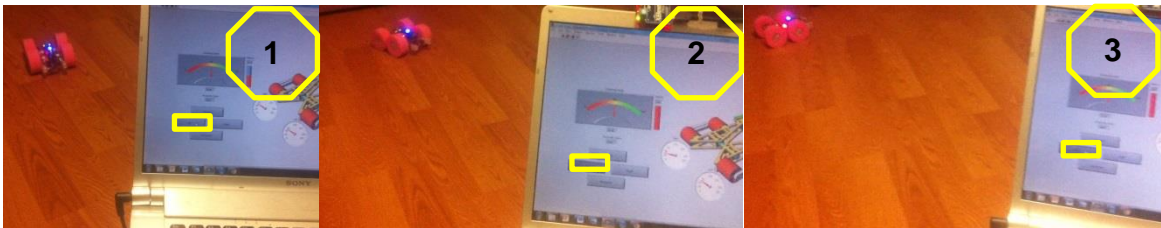
Labview'in kullanıcı arayüzüne yerleştirilen ve motorlara giden PWM sinyalini kontrol eden ileri tırmanma butonu test edilmiştir. Yapılan testlerde robotun tam olarak düz gitmesi için sağ ve sol modüllere gönderilen PWM sinyalleri sol modüldeki motorlar için 100 (8 bit sinyal) sağ modüldeki motorlar için 110 (8 bit sinyal) olarak ayarlanmıştır.



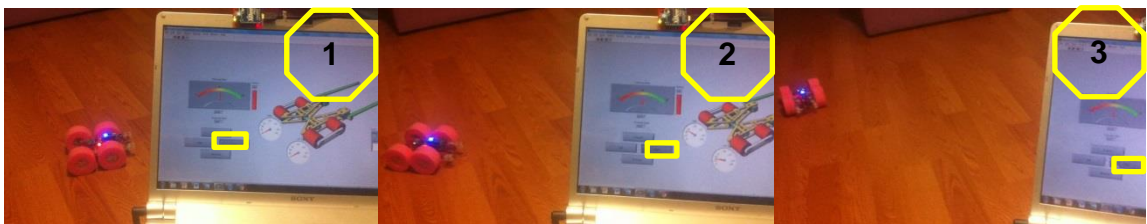
Şekil 5.1. İleri Gidiş Kontrolü(Sarı Çerçeve İçinde)

5.3. Sağ-Sola Dönüş Kontrolleri

Tırmanma esnasına gerektiğinde sağa sola dönüşler kullanıcı arayüzüne yerleştirilen sağa dönüş, sola dönüş butonlarıyla sağlanmaktadır. Sola veya sağa dönüş komutu verildiğinde sağ ve sol motorlara farklı PWM sinyalleri gitmektedir. Böylece robotun manevra yapması sağlanmıştır. Yapılan testlerde sağ, sola dönüş açıları ölçülmüş ve sola dönüşte sağ modüle 100 (8 bit sinyal), sol modüle 75 (8 bit sinyal), sağa dönüşte sol modüle 100 (8 bit sinyal), sağ modüle 75 (8 bit sinyal), PWM sinyali gönderilerek hedeflenen 100 cm'den küçük dönüş yarıçapı elde edilmiştir.



Şekil 5.2. Sola Dönüş Kontrolü(Sarı Çerçeve İçinde)



Şekil 5.3. Sağa Dönüş Kontrolü(Sarı Çerçeve İçinde)

5.4. Tırmanma Güvenliği Sistemi Çalışma Testleri

Tırmanma güvenliği sistemi çalışma testleri yapılarak her modüle biri önde biri arkada olmak üzere montajı yapılan yakınlık sensörlerinden gelen hata (error) değeri 0 Volt değeri için 100, +5 Volt değeri için 0 olarak ayarlanarak aradaki değerler kalibre edilerek her bir modül için ayrı ayrı olacak şekilde kullanıcı arayüzünde gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Tırmanma güvenliği Anlık Gösterimi

5.5. PID Kuyruk Kontrolü Testleri

Labview otomatik PID Ayar Sihirbazı ile PID parametreleri tespit edildikten sonra kuyrukların basma kuvveti, kuvvet analizlerinden elde edilen veriler göz önünde bulundurularak kalibre edilmiştir. Çalışma testleri yapıldıktan sonra tırmanma testlerine geçilmiştir.

5.6. Tırmanma Testleri

Yapılan tırmanma testlerinde robot bütün sistemleri aktif ve çalışır haldeyken yapılmıştır. Kullanılan bileşenler ve ekipmanların ağırlıkları aşağıdaki çizelgede ayrıntılı olarak verilmiştir. Seçilen yüksek ağırlıklı batarya ile robotun yük taşıma kabiliyeti de test edilmiştir. 54 gram ağırlığındaki yüksek kapasiteli batarya ile ağırlık 278.76 gr ile tırmanma testleri yapılmıştır. Bu batarya ile dahili güç kaynağı ile dik yüzeylerde hedeflenen 10 dakika çalışma kapasitesi yaklaşık 30 dakika olarak test edilmiştir.

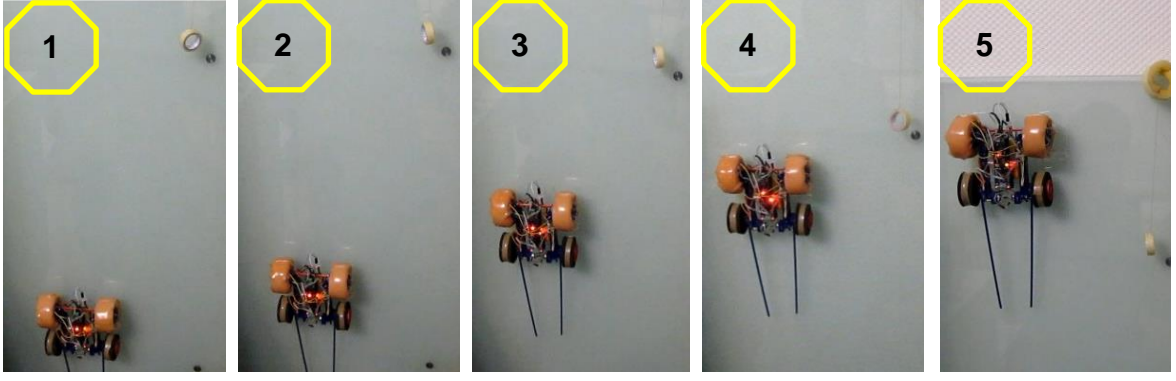
Tırmanan Robot Bileşen ve Ekipman Ağırlıkları

Bileşen/Ekipman	Adet	Ağırlık(gr)	Ara Toplam(gr)
Şase	2	18.80	37.60
Teker	4	6.26	25.04
Sünger	4	2.52	10.08
Elastomer	4	10	40
Kuyruk	2	4.42	8.84
Arduino Nano	1	6	6
Xbee Shield	1	14	14
Motor Shield	1	17	17
İvme Sensörü	1	1	1
Yakınlık Sensörü	4	1	4
Li-Po Batarya	1	54	54
Teker Motorları	4	10.48	41.92
Kuyruk Motorları	2	9.64	19.28
Toplam Ağırlık(gr)			278.76

Çizelge 5.1. Tırmanan Robot Bileşen ve Ekipman Ağırlıkları

5.6.1. Dik Yüzeyde Tırmanma Testi

Dik yüzeyde cam yüzeyde tırmanan robotun bütün sistemleri üzerinde ve aktif olarak çalışırken tırmanma testleri gerçekleştirilmiştir. Ortalama 5 cm/s hız ile 135 cm boyundaki cam yüzeye toplam 278 gr ağırlık ile tırmanma testi tamamlanmıştır. Test boyunca PID kontrolcüsünün gönderdiği kuyruk basma değeri 5 voltta ~100 PWM olarak gözlenmiştir.



Şekil 5.5. Cam Yüzeye Tırmanma

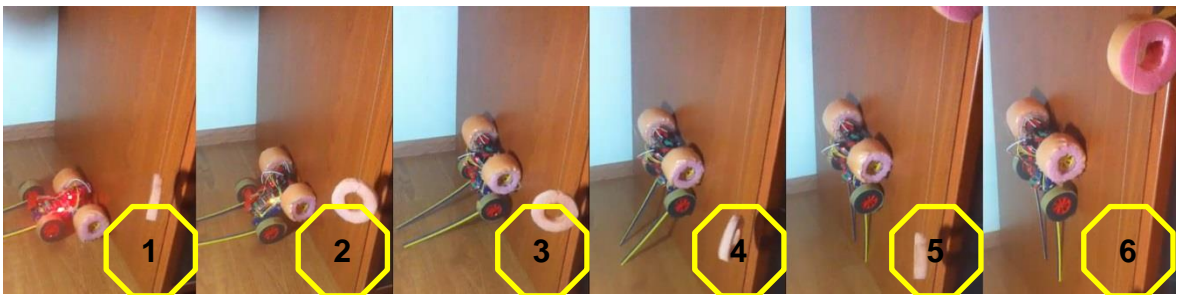
5.6.2. İç ve Dış Düzlemler Arası Geçiş ve Tırmanma Testi

Tırmanan robotların verilen görevlerini yerine getirebilmesi için düzlem geçişleri yapabilmesi en önemli performans kriterlerinden biridir. Yerden dik yüzeye geçiş yapılan testlerde 6 ± 1 saniyede tamamlanmış ve robot dik yüzeyde ortalama 5 cm/s hız ile tırmanmaya devam etmiştir.

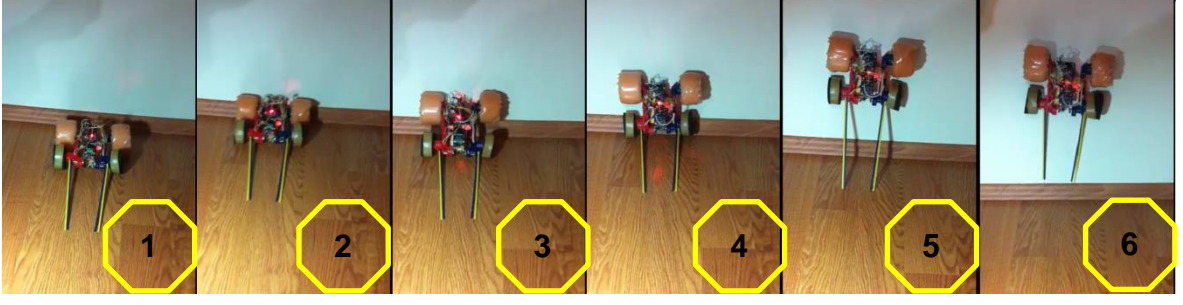
Ahşap, cam, beton yüzeyler arası iç ve dış düzlem geçişleri 5 cm/s hız ile yapılmış iç düzlemler arası geçiş 6 saniye civarında dış düzlemler arası geçiş yaklaşık 4 saniye civarında tamamlanmıştır.



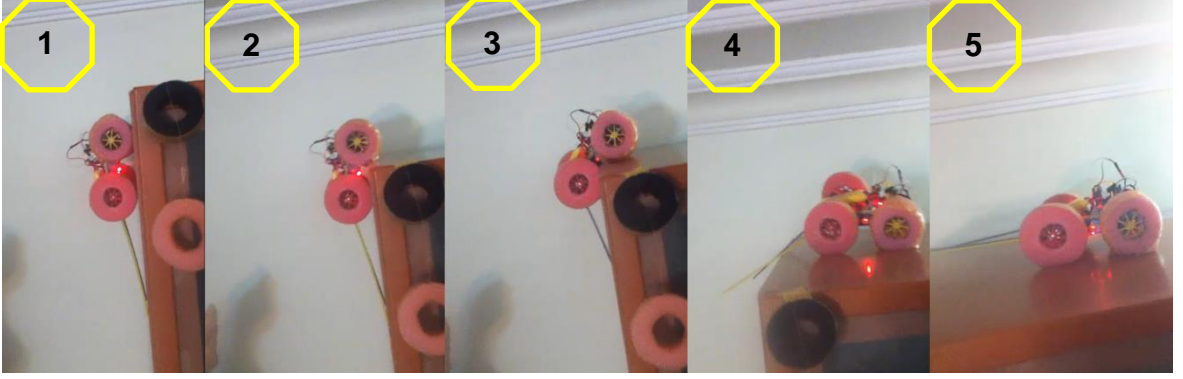
Şekil 5.6. Cam İç Düzlemler Arası Geçiş



Şekil 5.7. Ahşap İç Düzlemler Arası Geçiş



Şekil 5.8. Ahşap Yüzey Boyalı Duvar Arası Düzlem Geçişi



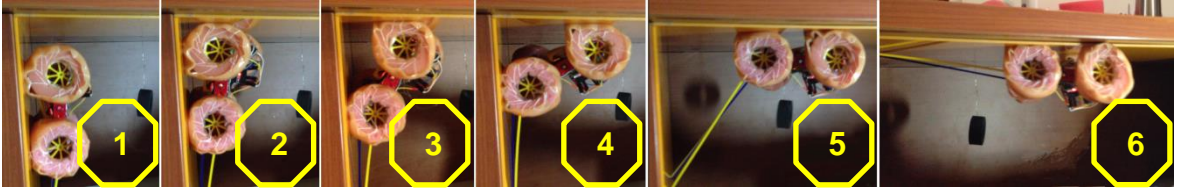
Şekil 5.9. Ahşap Dış Düzlemler Arası Geçiş

5.6.3. Dik Yüzeylerde Bekleme Testi

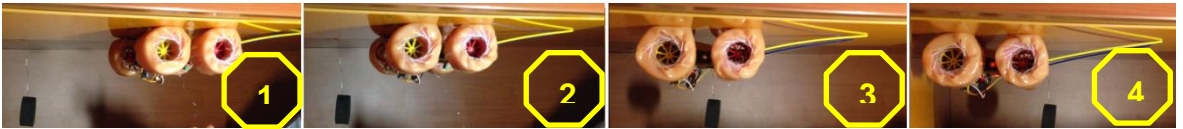
Dik yüzeylerde hareketsiz olarak bekleme süresi 278.76 gr toplam ağırlık ile 2 dakika olarak ölçülmüştür. 2 dakika sonunda robot tekrar kısa bir süreliğine hareket ettirilerek tutunma kazanımı sağlanıp tekrar benzer süreler hareketsiz beklemesi sağlanabilir.

5.6.4. Dik Yüzeyden Ters Yüze Geçiş ve Ters Yüzeyde Tırmanma

Dik yüzeyden ters yüzeye geçiş ve ters yüzeyde tırmanma testleri akrilik yüzeyde ortalama 4cm/s hız ile ve 278.76 gr toplam ağırlık ile tamamlanmıştır.



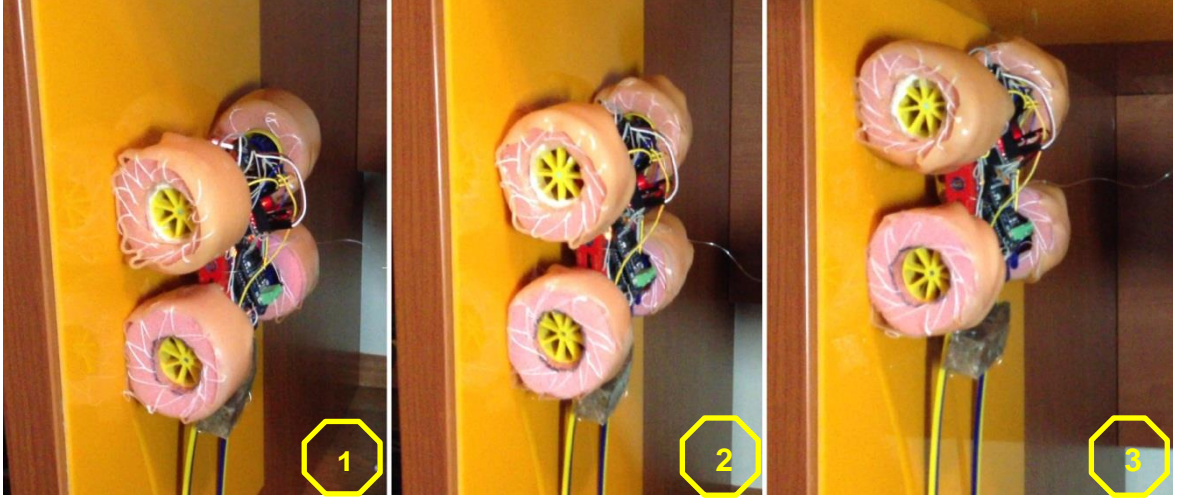
Şekil 5.10. Akrilik Yüzeyde Dik Düzlemde Tavana Geçiş



Şekil 5.11 Akrilik Yüzeyde Ters Tırmanma

5.6.5. Yük Taşıma Testleri

Dik yüzeylerde robotun 278.76 gramlık ağırlığına ek olarak arka kısma bağlanmış olan 280 gramlık ağırlık ile akrilik dik yüzeye tırmanma gerçekleştirilmiştir. Tırmanma süresince ortalama hız 4cm/s olarak ölçülmüştür.



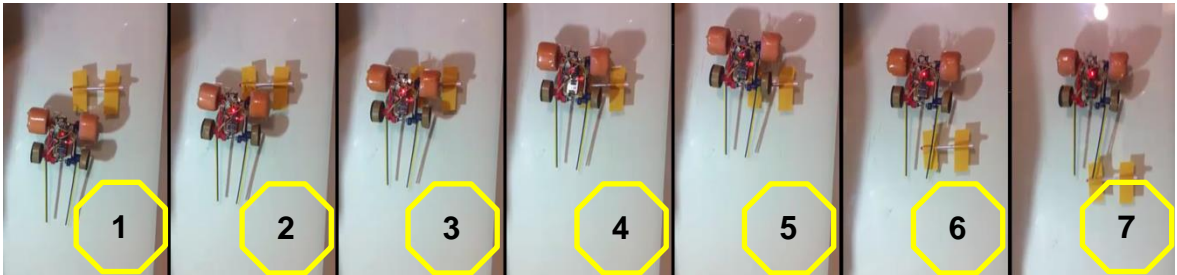
Şekil 5.12. 269 Gr Ağırlık ile Tırmanma

5.6.6. Ters Yüzeylerde Bekleme Testi

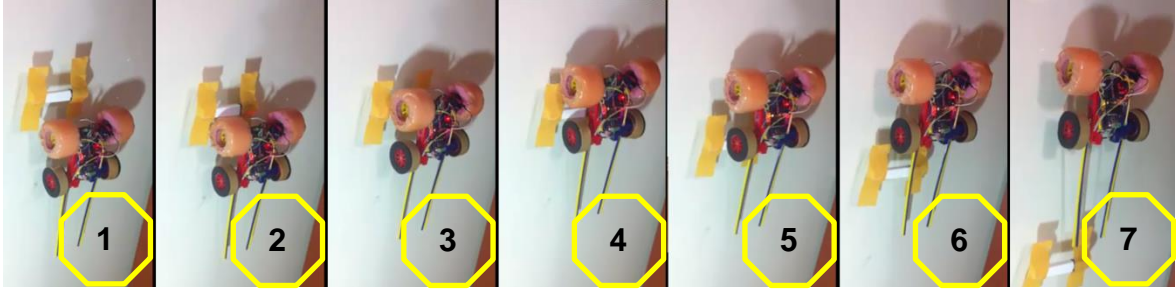
Ters yüzeylerde bekleme süresi 278.76 gr toplam ağırlık ile 10 saniye olarak ölçülmüştür.

5.6.7. Engel Aşma Testleri

Tırmanma yüzeyinde karşılaşılabilecek engel ve engebelerden geçiş tırmanan robotun verilen görevleri yerine getirebilmesi açısından önemli bir faktördür. Bu nedenle tırmanma yüzeyine yerleştirilen 10 mm çapında silindirik ve 12x23 cm ebatlarında dikdörtgensel kesite sahip engellerden geçiş testleri yapılmıştır.



Şekil 5.13. 10 mm Çapında Silindirik Engelden Geçiş



Şekil 5.14. 12x23 mm Ebatlarında Dikdörtgensel Kesite Sahip Engellerden Geçiş

5.7. Sonuçlar ve Öneriler

5.7.1. Sonuçlar

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda elastomer yapılar kullanan tekerli tırmanan robotların uygulanabilirliği kanıtlanmış ve tırmanan robotlarda önemli başarı kriterlerinden biri olan düzlemler arası geçiş dik ve ters yüzeyde bekleme testleri hedeflenen değerlere yakın ve başarılı bir şekilde sonuçlanmıştır.

Güç tüketimi 4 adet tekerlek motoru ve 2 adet kuyruk motoru kullanılmasından dolayı tahmin edilen değerlerin üstünde çıkmıştır.

Yapılan tırmanma testlerinde ortalama hız 0.45 L/s olarak ölçülmüştür, hedeflenen değere yakın olduğundan başarılı olarak kabul edilmiştir.

Cam, metal, akrilik ahşap birçok diz yüzeye tırmanma, iç ve dış düzlemler arası geçişler başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Harici bir güç kaynağına bağımlı olmadan 10 dakika ve üzeri bir çalışma süresi hedeflenmiş ve yapılan hesaplamalarda ve testlerde bu süre 30 dakika olarak ölçülmüştür.

Tırmanma yüzeyinde karşılaşılabilecek çeşitli engeller ve engebeleri simüle etmek için yerleştirilen 10-20 mm çapında dairesel ve 12x23 mm dikdörtgensel kesite sahip engeller üzerinden geçiş testleri başarılıdır.

Kriterler	Hedefler	Sonuçlar
Hız	0.5 L/s	0.45 L/s
Dönüş Yarıçapı	100 cm	95 cm
Güç Tüketimi (90° Tırmanma)	3 Watt	4 Watt

Dik Yüzeylerde Bekleme	2 Dakika	Başarılı
Ters Yüzeylerde Bekleme	10 Saniye	Başarılı
Yük Taşıma	Kendi Ağırlığı Kadar (280 gram)	Başarılı
İç Düzlemler Arası Geçiş	Evet	Başarılı
Dış Düzlemler Arası Geçiş	Evet	Başarılı
Ters Yüzeyde Tırmanma	Evet	Başarılı
Boyalı Duvara Tırmanma	Evet	Başarılı
Ahşap Yüzeye Tırmanma	Evet	Başarılı
Metal Yüzeye Tırmanma	Evet	Başarılı
Tırmanma Yüzeyindeki Engellerin Geçilmesi	Evet	Başarılı
Cm, mm, μ mertebelerinde hiyerarşik esneklikler	Evet	Başarılı
Çalışma Süresi	10 Dakika ve Üzeri	30 Dakika

Çizelge 5.2. Başarı Kriterleri ve Test Sonuçları

Bu tez kapsamında tasarlanan tırmanan robot literatürde yer alan diğer elastomer tabanlı robotlar ile performans kriterleri bakımından karşılaştırıldığında, stabil olarak tırmanma gerçekleştirmesi, yüksek yük taşıma kapasitesi, bir çok farklı yüzeyde tırmanma yüzeyinde tırmanma gerçekleştirmesi hiyerarşik esneklikler sayesinde tırmanma yüzeyindeki düzensizlikleri uyum sağlayarak yüksek tırmanma güvenliğine sahip olması ve düzlem geçiş yetenekleri bakımında üstün özellikler sergilemiştir.

5.7.2. Öneriler

Testlerde karşılaşılan en önemli sorunlardan biri elastomerlerin kullanılan sünger yapılara sabitlenmesidir. Yapılan testlerde en iyi sonuç süngerlerin yan yüzeyine dikilmesi suretiyle elde edilmiştir. Bu nedenle ileriki çalışmalarda bu konuda hem elastomerlerin esnemesine izin verecek hem de süngerlerde kaymasını ve katlanmasını engelleyecek şekilde sabitlenmesini sağlayacak daha verimli yapılar oluşturulması tavsiye edilir. Şase tasarımı imalat kısıtlamalarından dolayı iki

eksenli lazer tezgahında üretilip montajı yapılacak şekilde yapılmıştır. İleri çalışmalarda üç boyutlu yazıcı (3D Printer) vb. teknolojilerle üretim yapılarak daha kompakt yapılar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Unver, O. and Sitti, M. "A Miniature Ceiling Walking Robot with Flat Tacky Elastomeric Footpads," Department of Mechanical Engineering Carnegie Mellon University 422 Scaife Hall, 5000 Forbes Avenue Pittsburgh, PA 15213, **2009**
- [2] Unver, O. and Sitti, M, P. Murphy, M. "Geckobot and Waalbot: Small-Scale Wall Climbing Robots," Department of Mechanical Engineering Carnegie Mellon University Pittsburgh, PA, USA **2005**
- [3] Unver, O. "Design and Optimization of Miniature Climbing Robots using Flat Dry Elastomer Adhesives," Carnegie Mellon University 422 Scaife Hall, 5000 Forbes Avenue Pittsburgh, PA 15213 **2009**
- [4] Unver, O. and Sitti, M. "Tankbot: A Palm-size, Tank-like Climbing Robot using Soft Elastomer Adhesive Treads," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 29 no. 14: 1761-1777, September, **2010**
- [5] O. Unver, M. Sitti, A. Uneri, A. Aydemir "Geckobot: A Gecko Inspired Climbing Robot Using Elastomer Adhesives," IEEE ICRA, (May 2006).
- [6] K. Kendall ICI Corporate Laboratory. "Thin-film peeling - the elastic term," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 8, **1975**
- [7] Sangbae Kim, Matthew Spenko, Salomon Trujillo, Barrett Heyneman, Virgilio Mattoli, Mark R. Cutkosky. "Whole body adhesion: hierarchical, directional and distributed control of adhesive forces for a climbing robot," Center for Design Research Stanford University Stanford, CA 94305-2232, USA **2007**
- [8] O. Unver, M. Sitti. "Tankbot: 'A Miniature, Peeling Based Climber On Rough and Smooth Surfaces," Carnegie Mellon University 422 Scaife Hall, 5000 Forbes Avenue Pittsburgh, PA 15213, **2009**
- [9] M. Spenko, M. Cutkosky, C. Majidi, R. Fearing, R. Groff, K. Autumn. "Foot design and integration for bioinspired climbing robots," *Proc. SPIE*, Vol. 6230, 623019, **2006**
- [10] Michael P. Murphy, William Tso, Michael Tanzini, Metin Sitti. "Waalbot: An Agile Small-Scale Wall Climbing Robot Utilizing Pressure Sensitive Adhesives," Department of Mechanical Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15213, **2006**
- [11] Michael P Murphy, Casey Kute, Yigit Mengüç and Metin Sitti. "Waalbot II: Adhesion Recovery and Improved Performance of a Climbing Robot using Fibrillar Adhesives," *The International Journal of Robotics Research*, **2010**.
- [12] Kathryn A. Daltorio, Andrew D. Horchler, Stanislav Gorb, Roy E. Ritzmann, Roger D. Quinn. "A Small Wall-Walking Robot with Compliant Adhesive Feet," Department of Biology, Case Western Reserve University, 10900 Euclid Avenue, Cleveland, Ohio 44106, USA, **2005**

- [13] Kathryn A. Daltorio, Timothy C. Witushynsky, Gregory D. Wile, Luther R. Palmer, Anas Ab Malek, Mohd Rasyid Ahmad, Lori Southard, Stanislav N. Gorb, Roy. "A Body Joint Improves Vertical to Horizontal Transitions of a Wall-Climbing Robot," 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA, May 19-23, **2008**.
- [14] B.L. Luk, A.A. Collie, D.S. Cooke, and S. Chen. "Walking and climbing service robots for safety inspection of nuclear reactor pressure vessels," Asia Pacific Conference on Risk Management and Safety, **2005**
- [15] J. Shang, T. Sattar, S. Chen, and B. Bridge. "Design of a climbing robot for inspecting aircraft wings and fuselage," *Industrial Robot: An International Journal*, 34:495–502, **2007**
- [16] R.L. Tummala, R Mukherjee, N. Xi, D. Aslam, H. Dulimarta, J. Xiao, M. Minor, and G. Dangi. "Climbing the walls," IEEE robotics & automation magazine, 9:10–19, Dec. **2002**
- [17] J. Xiao, A. Sadegh, M. Elliott, A. Calle, A. Persad, and H. M. Chiu. "Design of mobile robots with wall climbing capability," Proc. of *IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 438–443, July 24-28, **2005**
- [18] H. Zhang, J. Zhang, G. Zong, W. Wang, and R. Liu. "Sky cleaner 3: A real pneumatic climbing robot for glass-wall cleaning," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pages 2–12, **2006**
- [19] T. Zhu, R. Liu, X. D. Wang, and K. Wang. "Principle and application of vibrating suction method," Proc. of the *IEEE Robotics and Biomimetics Conference*, pages 491–495, **2006**
- [20] D. Longo and G. Muscato. "The alicia3 climbing robot: A three-module robot for automatic wall inspection," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pages 2–10, **2006**
- [21] L.P. Kalra, J. Gu, and M. Meng. "A wall climbing robot for oil tank inspection," Proceedings of the 2006 *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pages 1523–1528, **2006**
- [22] F. Tache, F. Pomerleau, W. Fischer, G. Caprari, F. Mondada, R. Moser, and R. Siegwart "MagneBike: Compact Magnetic Wheeled Robot for Power Plant Inspection," *1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry* October, 5-7, **2010**
- [23] F. Tache, W. Fischer, R. Moser, F. Mondada, and R. Siegwart. "Adapted magnetic wheel unit for compact robots inspecting complex shaped pipe structures," *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 1–6, **2007**
- [24] A.T. Asbeck, S. Kim, M.R. Cutkosky, W.R. Provancher, and M. Lanzetta. "Scaling hard vertical surfaces with compliant microspine arrays," *The International Journal of Robotics Research*, 25:1165–1179, **2006**

- [25] T. Bretl. "Motion planning of multi-limbed robots subject to equilibrium constraints: The free-climbing robot problem," *The International Journal of Robotics Research*, 25:317–342, **2006**
- [26] M.J. Spenko, G.C. Haynes, J.A. Sanders, M.R. Cutkosky, A.A. Rizzi, R.J. Full, and D.E. Koditschek. "Biologically inspired climbing with hexapedal robot," *Journal of Field Robotics*", 25:223–242, **2008**
- [27] H. Prahlad, R. Pelrine, S. Stanford, J. Marlow, and R. Kornbluh. "Electroadhesive robotswall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3028–3033, **2008**
- [28] E. Ritzmann, Roger D. Quinn. A Body Joint Improves Vertical to Horizontal Transitions of a Wall-Climbing Robot 2008 *IEEE International Conference on Robotics and Automation* Pasadena, CA, USA, May 19-23, **2008**
- [29] Prof. Dr. habil. Jörg Roth, www.wireless-earth.org University of Applied Sciences Nuremberg Keßlerplatz 12 D 90489 Nuremberg Germany Şubat, **2012**

EK-1 AĞIRLIK/TUTUNMA-BOY GRAFİĞİ MATLAB KODU

```
clc
clear all
global w d g
%Robot Boyutlandırmasında kullanılan terimler ve açıklamaları
P=10000; %tutunma basıncı 10kPA olarak alınmıştır.
%Msn=0.75*pi*R^2*L2*20 sünger ağırlığı
%Mv10=2*pi*R*0.001*L2*1.13*10^3 Vytaflex ağırlığı
%Mts=2*pi*0.5*R*L2*0.001*d teker şasi ağırlığı
w=1.15; %teker açısız hızı rad/sn
d=1180; %yoğunluk 1180 kg/m^3
dv=1.18*10^-3; %dv Vytaflex kalınlığı
Ev=110*10^3; %Ev Vytaflex elastik modülü
Rv=70; % Adhesive energy
E=3.2*10^9; %elastik modülü
g=9.81; %yer çekimi ivmesi m/s
Mc=0.075; %Mc Sabit Robot Ağırlığı
Tm=0; %initial value
for k=1:1:1000
    L4=(0.00049*k); %L4 şasi boyu
    R=L4/2.3; %R teker çapı
    L1=1.1*R; %L1 teker yapışma yüzeyi boyu
    L3=L1; %L3 şasi eni
    L2=L1; %L2 teker yapışma yüzeyi eni
    L5=(14.4*P*L1^2*L2*L4/((L3)*E))^(1/3); %L5 şasi kalınlığı
    L6=L4; %L6 kuyruk boyu
    L7=L5; %L7 kuyruk eni
    L8=L5; %L8 kuyruk kalınlığı
    b=(1-cos(55*pi/180))*L2*2*dv*Ev;
    c=Rv*L2^2*dv*Ev;
    Fadh=2*((-b+sqrt(b^2+4*c))/2); %Fadh yapışma kuvveti
    Tm=0.93*R*Fadh; %Tm Motor torku
    Pm=Tm*w;
    Mm=0.00013*Pm^2+0.00366*Pm+0.00744; %Mm Kullanılacak olan motorun
    ağırlığı
    Mp=0.0063382*Pm^2-0.0024266*Pm+0.010647; %Mp Pil Denklemi

    Mt=(0.75*pi*R^2*L2*20)+(2*pi*R*0.001*L2*1.13*10^3)+(2*pi*0.5*R*L2*0.001*d
); %Mt Teker ağırlığı
    Ms=L3*L4*L5*d; %Ms Şasi ağırlığı
    Mk=L6*L7*L8*d; %Mk Kuyruk ağırlığı
    Mr=Mc+Ms+3*Mm+2*Mt+Mk+Mp; %Mr Robotun Toplam Ağırlığı
    Mg=Mr*g;
    FadhM=Fadh/Mg;
    Cap=(Fadh-Mg)/g;
    subplot(2,1,1),plot(L4,FadhM);
    hold on
    grid on
    subplot(2,1,2),plot(L4,Cap);
    axis([0 0.5 -2 2]) % eksen limitleri
    hold on
    grid on
end
```

EK-2 ÖN ARKA TEKERLERİN KUVVET DAĞILIMI MATLAB KODU

```
clc
clear all
global m g x
m=0.12283; % mass of robot
l1=0.052; % front wheel distance from center of gravity
l2=0.038; % rear wheel distance from center of gravity
l3=0.140; % tail length
g=9.81; % gravity
hcg=0.017; % center of gravity height
x=0; % slope angle
Ft=0.5; % guessed tail force
for x=0:0.1:360
    x
    Ff=(m*g*cos(x*pi/180)*l2-m*g*sin(x*pi/180)*hcg)/(l1+l2); % Normal
force on front wheel
    Fr=(m*g*cos(x*pi/180)*l1+m*g*sin(x*pi/180)*hcg)/(l1+l2); % Normal
force on rear wheel
    Fz=0; % zero force
    plot(x,Ff,'-k');
    hold on
    grid on
    title('Slope versus Force')
    xlabel('Slope (degree)')
    ylabel('Force (N)')
    plot(x,Fr,'-b');
    plot(x,Fz,'-r');
    Ff=0;
    Fr=0;
end
```

EK-3 '0.5' N KUYRUK BASMA KUVVETİ İLE ÖN ARKA TEKERLERİN KUVVET DAĞILIMI MATLAB KODU

```
clc
clear all
global m g x
m=0.12283; % mass of robot
l1=0.052; % front wheel distance from center of gravity
l2=0.038; % rear wheel distance from center of gravity
l3=0.140; % tail lenght
g=9.81; % gravity
hcg=0.017; % center of gravity height
x=0; % slope angle
Ft=0.0; % guessed tail force(0 for no tail preload)
for x=0:0.1:360
    x
    Ff=(m*g*cos(x*pi/180)*l2-m*g*sin(x*pi/180)*hcg)/(l1+l2); % Normal
force on front wheel
    Fr=(m*g*cos(x*pi/180)*l1+m*g*sin(x*pi/180)*hcg)/(l1+l2); % Normal
force on rear wheel
    Fft=Ft*(l3/(l1+l2+0.012)); % Front wheel normal force due to tail
push down
    Frt=-Fft-Ft; % Rear wheel normal force due to tail push down
    Fz=0; % zero force
    plot(x,Ff+Fft,'--k')
    title('Slope versus Tail and Normal Force')
    xlabel('Slope(degree)')
    ylabel('Tail+Normal Force(N)')
    hold all
    grid on
    plot(x,Fr+Frt,'--b')
    plot(x,Fz,'-r')
    plot(x,Ft,'-y')
    Ff=0;
    Fr=0;
    Fft=0;
    Ffr=0;
End
```

EK-4 ELASTOMER AYRILMA KUVVETİ-AÇISI ANALİZİ MATLAB KODU

```
clc
clear all
global E R
dr=1.18*10^-3; % rear wheel thickness of v10
df=1.18*10^-3; % front wheel thickness of v10
wr=21.62*10^-3; % rear wheel with of v10
wf=35*10^-3; % front wheel with of v10
E=110*10^3; % young's modulus
R=70; % Adhesive energy
a=1; % coefficient of F^2
for i=0:0.1:180
    i
    br=(1-cos(i*pi/180))*wr*2*dr*E; % coefficient of F
    bf=(1-cos(i*pi/180))*wf*2*df*E; % coefficient of F
    cr=R*wr^2*2*dr*E; % residual part of equation
    cf=R*wf^2*2*df*E; % residual part of equation
    X1r=(-br+sqrt(br^2+4*a*cr))/2; % Normal of Peeling Force for rear
wheel
    FP1r=X1r*sin(i*pi/180); %F peeling force for rear wheel according to
peeling angle
    X1f=(-bf+sqrt(bf^2+4*a*cf))/2; % Normal of Peeling Force for front
wheel
    FP1f=X1f*sin(i*pi/180); %F peeling force for front wheel according to
peeling angle
    plot(i,X1r,'-r') % peeling angle versus Normal Force for rear wheel
    plot(i,FP1r,'*r') % peeling angle versus Peeling force for rear wheel
    hold on
    grid on
    plot(i,X1f,'-k') % peeling angle versus Normal Force for front wheel
    plot(i,FP1f,'*k') % peeling angle versus Peeling force for front
wheel
    title('Peeling Angle versus Peeling Force ')
    xlabel('Peeling angle')
    ylabel('Peeling and Normal PeelingForce')
end
```

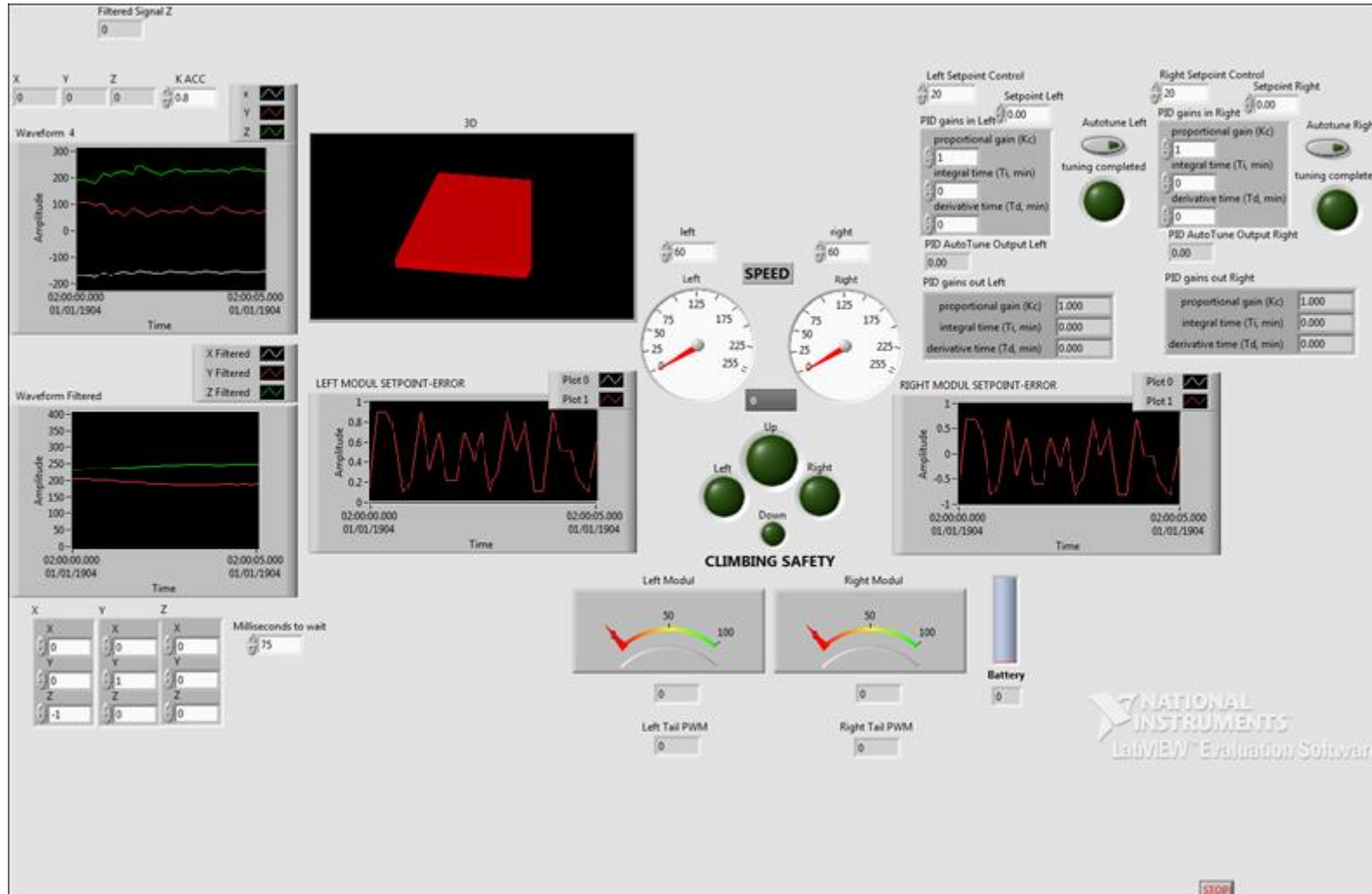

EK-5 ROBOT VE ELASTOMERE ETKİYEN KUVVETLERİN ANALİZİ MATLAB KODU

```
clc
clear all
global m g x
m=0.140; % mass of robot
l1=0.020; % front wheel distance from center of gravity
l2=0.035; % rear wheel distance from center of gravity
l3=0.140; % tail lenght
g=9.81; % gravity
hcg=0.035; % center of gravity height
x=0; % slope angle
Ft=0.35; % guessed tail force
dr=1.18*10^-3; % rear wheel thickness of v10
df=1.18*10^-3; % front wheel thickness of v10
wr=45*10^-3; % rear wheel with of v10
wf=50*10^-3; % front wheel with of v10
E=110*10^3; % young's modulus
R=70; % Ahesive energy
a=1; % coefficient of F^2

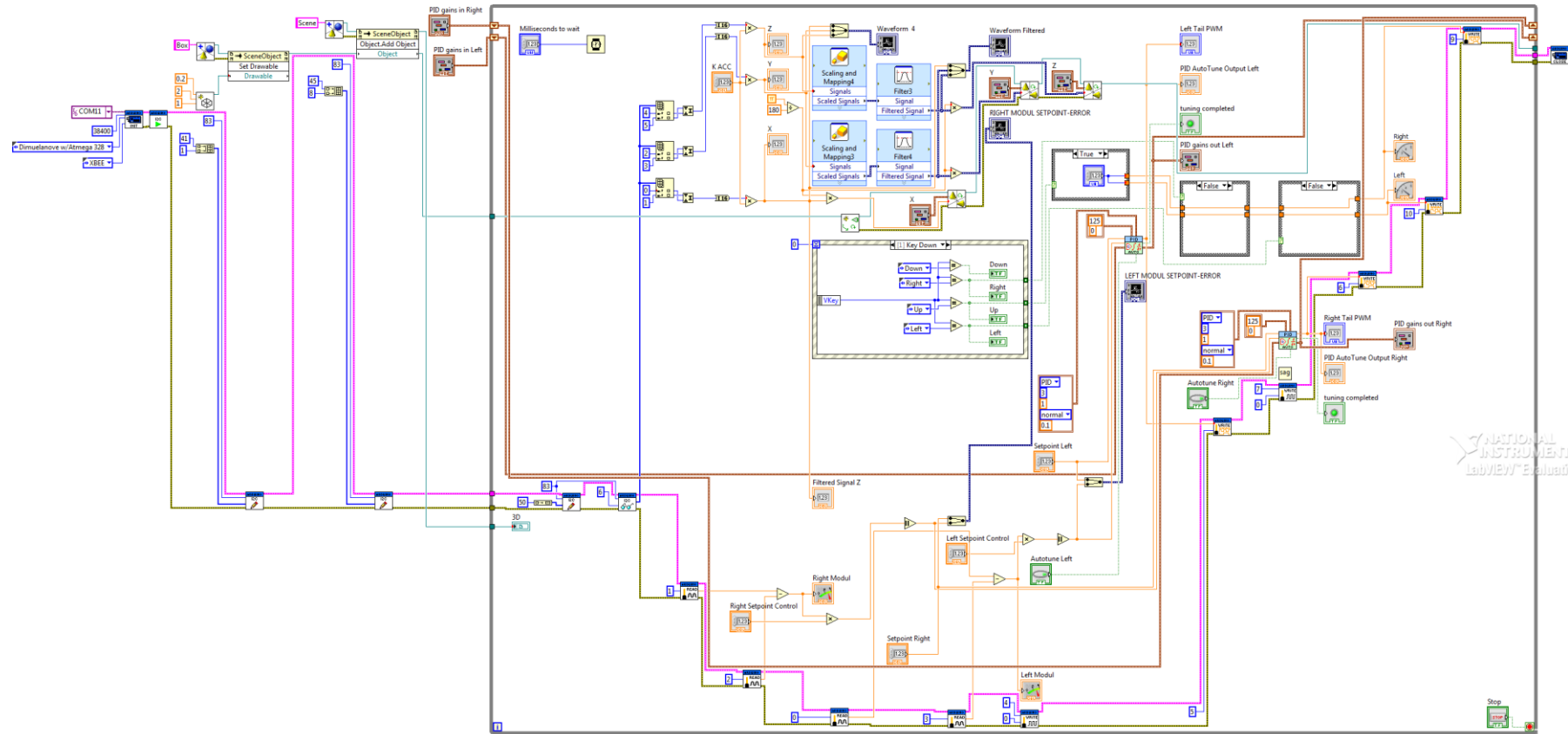
for x=0:0.5:360
    x
    Ff=(m*g*cos(x*pi/180)*l2-m*g*sin(x*pi/180)*hcg)/(l1+l2); % Normal
force on front wheel
    Fr=(m*g*cos(x*pi/180)*l1+m*g*sin(x*pi/180)*hcg)/(l1+l2); % Normal
force on rear wheel
    Fft=Ft*(l3/(l1+l2+0.012)); % Front wheel normal force due to tail
push down
    Frt=-Fft-Ft; % Rear wheel normal force due to tail push down
    Fz=0; % zero force
    br=(1-cos(x*pi/180))*wr^2*dr*E; % coefficient of F
    bf=(1-cos(x*pi/180))*wf^2*df*E; % coefficient of F
    cr=R*wr^2*dr*E; % residual part of equation
    cf=R*wf^2*df*E; % residual part of equation
    X1r=(-br+sqrt(br^2+4*a*cr))/2; % Normal of Peeling Force for rear
wheel
    FP1r=X1r*sin(50*pi/180); %F peeling force for rear wheel according to
pealing angle
    X1f=(-bf+sqrt(bf^2+4*a*cf))/2; % Normal of Peeling Force for front
wheel
    FP1f=X1f*sin(50*pi/180); %F peeling force for front wheel according
to pealing angle
    Fmf=FP1r*0.035/(l1+l2); % Effect of rear motor torq on front wheel
    Fmr=FP1f*0.035/(l1+l2); % Effect of front motor torq on rear wheel
    FF=Fft+FP1f-Fmf+Ff;
    FR=Frt+FP1r+Fmr+Fr;

    plot(x,FF,'-k')
    plot(x,FR,'-r')
    hold on
    grid on
    Ff=0;
    Fr=0;
    Fft=0;
    Ffr=0;
end
```

EK-6 TIRMANAN ROBOT LABVIEW ÖN PANEL GÖRÜNTÜSÜ



EK-7 TIRMANAN ROBOT LABVIEW BLOK DIAGRAM GÖRÜNTÜSÜ



NATIONAL
INSTRUMENT
LABVIEW® Platform

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Ahmet Çalış
Doğum Yeri : Ankara
Medeni Hali : Bekar
E-Posta : calisahmet@gmail.com
Adresi : Cevizlidere Mah. 1219. Sokak 7/10 Çankaya Ankara

Eğitim

Lise: 2000-2003 Sokullu Mehmet Paşa Lisesi
Lisans: 2003-2008
Makine Mühendisliği Bölümü
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Yabancı Dil Ve Düzeyi

İngilizce
ielts 6.5, Toeic 825 Sertifika

İş Deneyimi

2011-Halen Ae Ndt Danışmanlık Mühendislik Dış Ticaret Limited Şirketi, Genel Müdür Ve Şirket Kurucusu,
2009-Yaz Anadolu Kayak İşletmeleri Ve Turizm Ticaret Ltd. Şti. Halat Muayene Koordinatörü
2007-Yaz Nace Makina San. Ve Tic. Ltd. Şti, Stajyer
2007-Yaz Aday Döküm Makina San. Ve Tic. Ltd. Şti, Stajyer
2006-Yaz Makina Kimya Fişek Fabrikası, Stajyer

Deneyim Alanları

Mekatronik Sistem Tasarımı Ve Optimizasyonu
Test Cihazları İçin Platform Tasarımı Ve Üretimi
Elektromanyetik Halat Muayene Uzmanı
Mekatronik Sistemleri İçin Sensör Seçimi Ve Kontrolü

Tezden Üretilmiş Projeler Ve Bütçesi

Mikro-Fiber Yapılar İle Birçok Farklı Yüzeyle Tırmanabilen Enerji-Verimli Gözlem, İnceleme Ve İstihbarat Robot Tasarımı Ve Üretimi” 110E186 No’lu TÜBİTAK Projesi, Bütçesi 171.020 TL