



**FERROMANYETİK YÜZEYLERE TIRMALANABİLEN  
ROBOT TASARIMI**

**DESIGN OF FERROMAGNETIC SURFACE CLIMBING  
ROBOT**

**ÖMER BARIŞKAN YASAN**

**DR. ÖZGÜR ÜNVER**  
**Tez Danışmanı**

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

**2013**

**ÖMER BARIŞKAN YASAN**'ın hazırladığı “**Ferromanyetik Yüzeyle Tırmanabilen Robot Tasarımı**” adlı çalışma aşağıdaki juri tarafından **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Bora Yıldırım

Başkan:

.....

Dr. Özgür Ünver

Danışman:

.....

Yrd. Doç. Dr. Teyfik Demir

Üye:

.....

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

Prof.Dr.Fatma Sevin DÜZ  
Fen Bilimleri Enstitüsü 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 üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

27/08/2013

ÖMER BARIŞKAN YASAN

## ÖZET

# FERROMANYETİK YÜZEYLERE TIRMANABİLEN ROBOT TASARIMI

**Ömer Barışkan YASAN**

**Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Dr. Özgür Ünver**

**Ağustos 2013, 83 sayfa**

Tırmanan robotlara ihtiyaç günümüzde giderek artmaktadır. Nükleer depolama tankları, rüzgâr tirbünü direkleri, silolar vb. yüksek yapıların yüzeylerinde gerçekleştirilecek her türlü bakım ve onarım, muayene, gözetim gibi işlemlerin gerektirdiği iskele kurulumu, güvenlik ekipmanlarının sağlanması, sigorta masrafları gibi birçok güvenlik önlemi yüksek maliyetlidir ve bu işlemlerde insan faktörünün yer alması can kayıplarına yol açmaktadır.

Bu bağlamda duvar tırmanıcı robotlar, düşük operasyon maliyeti, hızlı operasyon olanağı, herhangi bir ön hazırlık gerektirmeden tüm işlemleri gerçekleştirebilmesi ve en önemlisi can kayıplarını en aza indirmesi sebebi ile bu tip işlemler için çok gerekli bir ekipman haline gelmektedirler.

Günümüzde çeşitli yapışma yöntemleriyle duvarlara tırmanabilen birçok robot tasarlanmış ve üretilmiş ancak şimdiye kadar yapılan tüm çalışmalara rağmen

yeterince esnek ve kablolardan bağımsız, diğere bir deyişle özgür hareket kabiliyeti yeterince iyi olan herhangi bir robot geliştirilememiştir.

Bu tezde; ferromanyetik yüzeylere tırmanabilen, hareketi için gerekli enerjiyi kendi bünyesindeki batarya yardımı ile sağlayan, kontrolünü kablosuz bir cihaz vasıtasıyla sağlayabilen ve karşılaşılan santimetre mertebesindeki engelleri esnekliği sayesinde aşabilen bir robot tasarımı ve prototip üretimi yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tırmanan robot, manyetik, mıknatıslı palet, duvar tırmanan robot

Danışman: Dr. Özgür Ünver, Hacettepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

## **ABSTRACT**

### **DESIGN OF FERROMAGNETIC SURFACE CLIMBING ROBOT**

**Ömer Barışkan Yasan**

**Master, Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Dr. Özgür Ünver**

**August 2013, 83 pages**

Demand for the climbing robots is gradually increasing recently. Many security measures such as installation of scaffold which is necessary for all types of surveillance, inspection, maintenance and repair operations carried out on the surfaces of high buildings such as silos, nuclear storage tanks, wind turbine poles etc., the provision of safety equipment and insurance expenses have high costs. Furthermore, human employment in such dangerous operations brings danger for human.

Thus, wall climbing robots became necessity, considering; they lower operating cost, speeding up the operation, carry out the processes without any preliminary operation and more importantly, minimize the danger of human life.

Recently, many robots which can climb the walls with various adhesion methods are designed and manufactured. However, despite all the work carried

out, a robot which is sufficiently flexible, tetherless, in other words, good enough for free mobility has not been developed yet.

Within this thesis, a robot is designed and prototyped which has the capability to climb ferromagnetic surfaces tetherless, can be controlled wirelessly and flexible enough to overcome the encountered obstacles in the range of couple of centimeters.

**Keywords:** Wall climber, magnetic, wall climbing, robot, tracked,

Advisor: Dr. Özgür ÜNVER, Hacettepe University, Department of Mechanical Engineering



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince ilgisini ve bilgisini, özveri ve sabırla aktarmaya çalışan, tez süresince karşılaşılan her sorunda yol gösterici olan ve her zaman yapıcı tavırlarıyla bana destek olan tez danışmanım Dr.Özgür Ünver'e teşekkür ederim.

Ayrıca başta Sayın Doç. Dr. Bora Yıldırım olmak üzere, yüksek lisans eğitimim süresince üzerimde emeği geçen Hacettepe Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ndeki bütün akademisyenlere teşekkür ederim. Aynı zamanda, tez komitesinde jüri üyeliğinde bulunan Sayın Yrd. Doç Dr. Teyfik Demir'e tezime gösterdiği ilgi için çok teşekkür ederim.

Robot kontrolünde yanımda bulunan ve yazılım konusunda yardımını esirgemeyen Saner Karakuş'a teşekkür ederim. Yüksek lisansım süresince çalıştığım Hacettepe Makine Mühendisliği bölümündeki Senstech Laboratuvarındaki çalışma arkadaşlarım olan Cüneyt, Morteza, Behrang, Ergül, Zeynep, Çağrı, Sezgin, Kaan ve Ali Emre'ye göstermiş oldukları yardımları ve dostlukları için çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen anneme, babama ve kardeşim Samed'e çok teşekkür ederim. Yüksek lisansım süresince maddi ve manevi desteklerini her zaman hissettiren dostum Burak İzgi ve Zeynep Erkan'a teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ÇİZELGELER .....	ix
ŞEKİLLER.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Problem Tanımı.....	1
1.2. Motivasyon.....	1
1.3. Tezin Amacı .....	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	3
2.1. Duvar Tırmanıcı Bir Robotun Nitelikleri .....	3
2.2. Literatürde Duvar Tırmanıcı Robotlar .....	3
2.2.1. Hareket Mekanizmalarına Göre Duvar Tırmanıcı Robotlar .....	4
2.2.1.1. Bacaklı Duvar Tırmanıcı Robotlar .....	4
2.2.1.2. Tekerlekli Duvar Tırmanıcı Robotlar.....	7
2.2.1.3. Paletli Duvar Tırmanıcı Robotlar .....	11
2.2.1.4. Ötelemeli Duvar Tırmanan Robot.....	13
2.2.1.5. Halat Tahrikli Duvar Tırmanıcı Robotlar .....	15
2.2.1.6. Bileşik (hibrid) Tür Duvar Tırmanıcı Robotlar .....	16
2.2.2. Yapışma Mekanizmasına Göre Duvar Tırmanıcı Robotlar .....	18
2.2.2.1. Vakumlu Duvar Tırmanıcı Robotlar .....	18
2.2.2.2. Manyetik Duvar Tırmanıcı Robotlar.....	23
2.2.2.3. Kavramalı Duvar Tırmanıcı Robotlar .....	26
2.2.2.4. Biyomimetik Duvar Tırmanıcı Robotlar.....	27
2.2.2.5. Ray Kılavuzlu Duvar Tırmanıcı Robotlar .....	29
2.3. Hareket ve Yapışma Mekanizması Seçimi .....	32
3. TASARIM.....	35
3.1. Yapışma Mekanizması Tasarımı.....	35

3.1.1. Mıknatıs Seçimi.....	35
3.1.2. Mıknatıs Testleri.....	38
3.1.2.1. Mıknatıs Çekme Kuvveti Testi.....	38
Teorik Çekme Kuvveti ve Akı Yoğunluğu .....	38
Mıknatıs Çekme Kuvveti Testi.....	39
3.1.2.2. Mıknatıs Kayma Kuvveti Testi .....	42
3.1.2.3. Mıknatıs Ayrılma Testi.....	47
3.2. Süspansiyon Tasarımı.....	50
3.2.1. Süspansiyon Seçimi .....	50
3.2.2. Rocker-Bogie Tasarımı .....	51
3.2.2.1. Rocker-Bogie Hesaplamaları .....	52
3.3. Palet Üretimi.....	54
3.3.1. Palet Üretimi.....	54
3.4. Ana Gövde Tasarımı .....	57
3.4.1. Ana Gövde Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Esaslar .....	57
3.4.2. Ana Gövde Bileşenleri veTasarımı .....	58
3.4.2.1. Gerdirme Tasarımı .....	59
Gerdirmenin Robota Uygulanması .....	61
3.4.2.2. Motor Yataklaması Tasarımı .....	62
3.4.2.3. Gövde Tasarımı .....	63
3.5. Serbest Cisim Diyagramı ve Kuvvet Analizi .....	64
3.5.1. Mıknatıs.....	64
3.5.2. Kuvvet Analizi.....	66
3.5.2.1. Kuvvet Analizi Sonuçları.....	72
3.6. Kontrol Sistemi ve Batarya .....	73
<b>4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>74</b>
4.1. Literatüre Yapılan Katkının Özeti .....	74
4.2. Tırmanan Robot Modeli ve Testleri .....	74
4.2.1.Mıknatıs Testleri.....	74
4.2.2. Robot Testleri.....	75
4.2.3. Test Sonuçları ve Tartışma .....	75
4.3. İleriki Çalışmalar.....	76
KAYNAKLAR.....	78

ÖZGEÇMİŞ.....	83
---------------	----

## ÇİZELGELER

Tablo 2.1 Vakumlu duvar tırmanıcı robot ağırlığı ve ölçüleri [28] .....	23
Tablo 2.2 Literatürdeki robotlar, hareket ve yapışma mekanizmaları .....	31
Tablo 2.3 Hareket mekanizması seçimi .....	33
Tablo 2.4 Yapışma mekanizması seçimi .....	34
Tablo 3.1 Neodmiyum mıknatıs sınıfları ve özellikleri .....	37
Tablo 3.2 test düzeneğinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.....	41
Tablo 3.3 Literatür ve labaratuvar test verilerinin karşılaştırılması .....	42
Tablo 3.4 Rocker bogie ve normal süspansiyonun karşılaştırılması.....	51

## ŞEKİLLER

Şekil 2.1 RAMR-1 tırmanma esnasında [3] .....	5
Şekil 2.2 .....	6
Şekil 2.3 .....	7
Şekil 2.4 Alicia 1 ve 2 robotları .....	8
Şekil 2.5 Üç tekerlekli duvar tırmanan robot.....	9
Şekil 2.6 Cam yüzeyler üzerinde çalışan WallWalker robotu .....	9
Şekil 2.7 Ana robot.....	10
Şekil 2.8 Yardımcı robot.....	11
Şekil 2.9 Çalışma prensibi.....	11
Şekil 2.10 Chainbot II .....	12
Şekil 2.11 TRIPILLAR robotu ve tırmanma karakteristiği .....	12
Şekil 2.12 GEKKO III ve alt görünümü .....	13
Şekil 2.13 Sırasıyla Sky Cleaner 1,2 ve 3 .....	14
Şekil 2.14 Sky Cleaner 3 öteleme mekanizması .....	14
Şekil 2.15 Kuşlama robotu .....	14
Şekil 2.16 Halat tahrikli duvar tırmanıcı robot.....	15
Şekil 2.17 Taisei Corporation (solda) ve Kajima Construction (sağda) şirketlerinin geliştirdiği robotlar .....	16
Şekil 2.18 SIRIUSc ve vinç sistemi .....	16
Şekil 2.19 Alicia 3 engel aşarken .....	17
Şekil 2.20 Venturi Prensibi .....	19
Şekil 2.21 ROMA-II ve vakum vantuzları.....	19
Şekil 2.22 DEXTER (solda) ve pasif vantuz (sağda).....	20
Şekil 2.23 TITO(solda) ve TITO'da kullanılan endüstriyel fan .....	21
Şekil 2.24 Hareket mekanizması.....	22
Şekil 2.25 Yapışma mekanizması .....	22
Şekil 2.26 Yardımcı robot.....	23
Şekil 2.27 Petrol tankları için geliştirilmiş olan gözetim robotu .....	24
Şekil 2.28 Manyetik tekerli duvar tırmanıcı robot (solda) ve tekerlek yapısı (sağda).....	24
Şekil 2.29 Genel görünüm.....	25

Şekil 2.30 Çalışma prensibi.....	26
Şekil 2.31 ROMA I duvar tırmanıcı robot.....	26
Şekil 2.32 Geko kertenkelenin ayak yapısı .....	27
Şekil 2.33 Stickybot (solda) ve polimer tutucular (sağda).....	28
Şekil 2.34 Tankbot .....	28
Şekil 2.35 Spinybot ve minyatür iğneler .....	29
Şekil 2.36 Wall cleaning robot.....	30
Şekil 3.1 Dikdörtgen prizması mıknatıslar için akı yoğunluğu .....	38
Şekil 3.2 Silindirik mıknatıslar için akı yoğunluğu .....	39
Şekil 3.3 Çekme kuvveti test düzeneği.....	40
Şekil 3.4 Çekme testi verileri, teorik çekme kuvveti ve literatür çekme testi karşılaştırılması .....	41
Şekil 3.5 Kayma kuvveti ve sürtünme katsayısı .....	43
Şekil 3.6 Kayma kuvveti test düzeneği.....	45
Şekil 3.7 Kaplamasız mıknatıs (solda) ve kaplamalı mıknatıs (sağda) kayma kuvveti grafikleri .....	45
Şekil 3.8 Ayrılma Test Düzeneği .....	47
Şekil 3.9 Ayrılma kuvveti test verileri.....	49
Şekil 3.10 Rocker Bogie süspansiyonu için bir örnek.....	50
Şekil 3.11 Normal süspansiyon elemanları .....	51
Şekil 3.12 Rocker-bogie hesaplamaları.....	52
Şekil 3.13 Rocker bogie uzuv boyutları grafiği .....	53
Şekil 3.14 .....	55
Şekil 3.15 Vytaflex@10 ve Vytaflex@20 hibrid dökümü.....	55
Şekil 3.16 Üretilen palet .....	57
Şekil 3.17 Robot mekanik tasarımı izometrik görünüş .....	58
Şekil 3.18 Robot mekanik tasarımı soldan görünüş .....	59
Şekil 3.19 Robot mekanik tasarımı üstten görünüş .....	59
Şekil 3.20 Palet gerdirme tasarımı .....	60
Şekil 3.21 Gerdirme yerleşimi için tekerleklerin birbirlerine en yakın olduğu pozisyonlar.....	61
Şekil 3.22 Gerdirmenin robota uygulanması .....	61
Şekil 3.23 Motor yerleşimi için tahrik dişlisi ve ön tekerin birbirine en yakın olduğu pozisyon .....	62

Şekil 3.24 Motorun gövdeye uygulanması .....	63
Şekil 3.25 Ana gövde parçalı yapısı .....	63
Şekil 3.26 Çekme kuvveti açısına bağlı gerekli ayrılma kuvveti .....	65
Şekil 3.27 Kuvvet açısına bağlı ayrılma(çekme) kuvveti grafiği .....	66
Şekil 3.28 Kuvvet noktaları.....	67
Şekil 3.29 tahrik dişlisi palet çekme açısı .....	67
Şekil 3.30 B,C ve D noktalarına bağlı kuvvet analizi için ölçüler .....	68
Şekil 3.31 Mıknatısın ayrılması sırasında tekerle arasında oluşan boşluk .....	69
Şekil 3.32 $\lambda$ açısına göre $T_2$ ve $F$ kuvvetlerinin değişimi.....	70
Şekil 3.33 E,F ve G noktalarına bağlı kuvvet analizi için ölçüler .....	70
Şekil 3.34 H noktasında oluşan kuvvetler için palet çekme açısı .....	71
Şekil 3.35 Moment için ölçüler.....	72



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$B_r$	:Artık Manyetizasyon
$B_x$	:Manyetik akı yoğunluğu
$F_{tm}$	:Teorik manyetik kuvvet
$F_{ayrılma}$	:Mıknatıs ayrılma kuvveti
$r_1$	:Bogie büyük tekeri yarıçapı
$r_2$	:Bogie küçük tekeri yarıçapı
$\alpha$	:Bogie kolunun yüzeye yaptığı açı
$\beta$	:Ana gövdenin yüzeye yaptığı açı
$L$	:İki bogie arasındaki mesafe
$\Phi$	:Palet çekme açısı
$F_{mıknatıs}$	:Mıknatısın dik ekseninde uyguladığı kuvvet
$P$	:Palet çekme kuvveti açısına bağlı mıknatıs ayrılma kuvveti
$l$	:Palet çekme kuvvetinin mıknatısa uygulandığı uzaklık
$T_1$	:Tarik dişlisi etkisi altında kalan bölgede palet gerginliği
$T_2$	:Tahrik dişlisinden önce palet gerginliği
$F_{Ax}$	:A noktasında oluşan x yönündeki kuvvet
$F_{Ay}$	:A noktasında oluşan Y yönündeki kuvvet
$F_{Bx}$	:B noktasında oluşan x yönündeki kuvvet
$F_{By}$	:B noktasında oluşan y yönündeki kuvvet

$F_{Cx}$	:C noktasında oluşan x yönündeki kuvvet
$F_{Cy}$	:C noktasında oluşan y yönündeki kuvvet
$F_{Dx}$	:D noktasında oluşan x yönündeki kuvvet
$F_{Dy}$	:D noktasında oluşan y yönündeki kuvvet
$F_{Ex}$	:E noktasında oluşan x yönündeki kuvvet
$F_{Ey}$	:E noktasında oluşan y yönündeki kuvvet
$F_{Fx}$	:F noktasında oluşan x yönündeki kuvvet
$F_{Fy}$	:F noktasında oluşan y yönündeki kuvvet
$F_{Gx}$	:G noktasında oluşan x yönündeki kuvvet
$F_{Gy}$	:G noktasında oluşan y yönündeki kuvvet
$F_{Hx}$	:H noktasında oluşan x yönündeki kuvvet
$F_{Hy}$	:H noktasında oluşan y yönündeki kuvvet
$\lambda$	:Mıknatısın ayrılması sırasında teker ile palet arasında kalan boşluk açısı

### **Kısaltmalar**

-

# 1. GİRİŞ

Robotlar yıllardır insan hayatını kolaylaştırmak ve insanı tehlikeli ve ulaşılması güç ortamlarda desteklemek amacıyla tasarlanıp üretilmiş, bir operatör veya içerisinde barındırdığı bir bilgisayar programı yardımı ile işlevini yerine getirebilen mekatronik sistemlerdir.

Günümüzde endüstride, inşaat sektöründe ve askeri uygulamalar gibi birçok alanda meydana gelen gelişmeler insan hayatı için tehlikeli olabilecek uygulamaların sayısının gün geçtikçe artması anlamına gelmekte ve bu da robotların kullanımını yüksek düzeyde gerekli hale getirmektedir.

## 1.1 Problem Tanımı

Endüstride, özellikle yüksek ve ulaşılması güç bölgelerde yapılacak uygulamalar çoğu zaman insan faktörü ile ulaşılması imkânsız durumlar arz etmekte ulaşılsa bile yüksek maliyetleri ve yaşam tehlikesini de beraberinde getirmektedir. Bu tür tırmanıcı robotların gerekliliğine ve bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmasına vesile olmuştur.

Yüksek binalarda temizlik veya gözetim, nükleer veya petrol depolama tanklarında gözetim, muayene ve onarım, petrokimyasal uygulamalar, gemi bakımı ve kaynak işlemleri gibi yüksek bölgelerde yapılacak çalışmaların çok zahmetli ve maliyetli olması ve en önemlisi insan hayatını tehlikeye düşürebilecek durumlara sebebiyet vermesi tırmanıcı robotları endüstride birer kurtarıcı pozisyonuna getirmektedir.

## 1.2 Motivasyon

Günümüzde insan hayatının en önemli değer olduğu göz önünde bulundurulursa, insan hayatının tehlikeye düşebileceği riskli durumlarda insanın yerini alabilecek ve bu gibi tehlikeli durumları ortadan kaldıracak bir mekatronik sistem tasarımı ve üretimi yüksek mertebede gerekli hale gelmiştir. Bu tezin motivasyonu; bu gibi görevlerde kullanılacak bir tırmanan robot vasıtasıyla insan hayatının tehlikeye düşürebilecek bu gibi durumları bertaraf etmek ve güvenli bir çalışma ortamının yanı sıra bu tür uygulamalarda maliyeti mümkün olduğunca düşürmektir.

### 1.3 Tezin Amacı

Bu tezin amacı; ferromanyetik yüzeyler üzerinde her türlü açı ve eğimde çalışabilen, ana bilgisayardan kablosuz olarak yönlendirilen, kablosuz kamera destekli, uygulama için gerekebilecek algılayıcıları taşımak için 0,5 kg'a kadar yük taşıyabilme kapasiteli bir tırmanan robot geliştirmektir. Bunların yanında 20 mm büyüklüğe kadar olan engelleri aşabilen ve 15 dakikalık bir süre boyunca durmadan gözetim ve muayene işlemlerini gerçekleştirebilecek nitelikte kablosuz bir robot tasarlamaktır.

Yapılacak olan robot insan gücü ile ulaşılması zor olan bölgelerde gözetim ve muayene işlemlerinin tehlikesiz ve düşük maliyetli bir şekilde uygulanabilmesini mümkün kılacaktır.

Geliştirilecek robotun özellikleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Perçin ve somun gibi 2 cm yüksekliğe kadar engelleri aşabilen
- Her eğimde ve açıda çalışabilen
- Dönme yarıçapı robot uzunluğu mertebesinde olan ve ilerleme hızı en az dakikada boyunun 5 katı olan
- Tüm ferromanyetik yüzeylerde hareketini sağlayabilecek hareket mekanizmasına sahip olan
- Toplam robot ağırlığı 1 kg. 'dan az olan
- Çalışma yüzeyleri göz önüne alındığında en pürüzlü yüzey korozyona uğramış metal gövdelerdir. Bu sebeple korozyona uğramış ferromanyetik yüzeylere güvenli bir şekilde tırmanabilmesi gerekmektedir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Duvar tırmanıcı robotlar literatürde son yıllarda artan bir ivme ile karşımıza çıkmaktadır. Genel kullanım için tasarlanıp üretilen robotların yanı sıra tek bir özel amaç için tasarlanmış birçok mekanik sisteme rastlanmaktadır.

### 2.1 Duvar Tırmanıcı Bir Robotun Nitelikleri

Tırmanıcı robotlar; duvar, tavan, çatı gibi iki ve üç boyutlu ve herhangi bir açıda yerleştirilmiş çeşitli geometrik yapı ve yüzeylerde hareket edebilen bir robot türü olarak tanımlanabilir.

Duvar tırmanıcı robotlar yer çekimine karşı koyma ve engel aşma potansiyellerinin yüksek olması gibi gerekliliklerden ötürü çeşitli özellikleri bünyelerinde barındırmak zorundadırlar. Bunlar kısaca şu şekilde tanımlanabilir;

- Duvarda tutunmak için gerekli kuvveti minimize etmek,
- Yükleme kapasitesini ve enerji verimliliğini artırabilmek amacı ile robot ağırlığını asgari düzeyde tutmak,
- Çeşitli ortam şartlarında değişik geometri ve malzemelere sahip yüzeylerde rahatlıkla hareket edebilmek için standart boyutlarda üretilen somun, perçin, vb gibi yapıların üzerinden aşmak ve bu engel aşma sürecinde güvenli tutunmayı sağlamak
- Kullanılacak uygulamaya göre robot istihap haddini veya tutunma güvenlik katsayısını azami düzeye çekmek.

### 2.2 Literatürde Duvar Tırmanıcı Robotlar

Bu tez kapsamında duvar tırmanıcı robotlar hareket ve yapışma mekanizmaları olmak üzere iki ana bölümde incelenecektir. Bu mekanizmalar aşağıda alt başlıklar halinde verilmiştir.

Hareket mekanizmasına göre;

- Bacaklı

- Tekerlekli
- Paletli
- Ötelemeli
- Halat tahrikli
- Bileşik (hibrid)

Yapışma mekanizmasına göre;

- Vakumlu
- Manyetik
- Kavramalı
- Ray kılavuzlu
- Biyomimetik

[1]

### **2.2.1 Hareket Mekanizmalarına Göre Duvar Tırmanıcı Robotlar**

- Bacaklı
- Tekerlekli
- Paletli
- Ötelemeli
- Halat tahrikli
- Bileşik (hibrid)

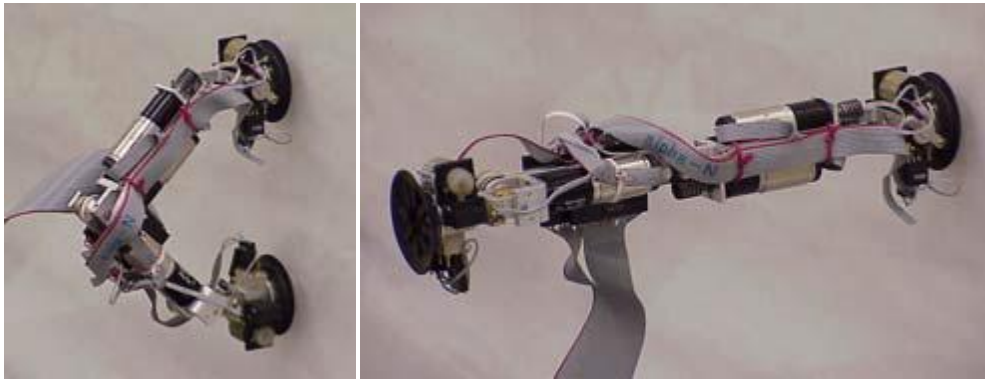
#### **2.2.1.1 Bacaklı Duvar Tırmanıcı Robotlar**

Bacaklı duvar tırmanıcı robotlar, 2 ile 8 arasında bacak sayısına sahip ve her bacağın sonunda yapışmayı sağlayacak olan vakum odası, mekanik kavrama

veya manyetik bir cihaza sahiptir. Tüm bu bağlı olan cihazlar hareket sırasında robotun duvara yüksek kuvvetlerle bağlanmasını sağlar.

Bacaklı duvar tırmanan robotlar genellikle yüksek serbestlik derecesine sahip olup, iyi bir yapışma mekanizması ile beraber çok pürüzlü yüzeyler üzerinde rahatlıkla hareket edebilir, aynı zamanda da çok iyi engel aşabilirler.

Tüm bu iyi özelliklerin yanında dezavantajları ise harmonik yürüyüş kontrolünü sağlamak için çok karmaşık bir kontrol sistemine sahip olmaları ve dolayısı ile hareketlerin ve tırmanmanın çok yavaş olmasıdır [2].



Şekil 2.1 RAMR-1 tırmanma esnasında [3]

Bacaklı robotlarda duvara tutunan bacak sayısındaki artış, tutunma kuvvetini, yük taşıma kapasitesini ve güvenliği artırıcı yönde bir rol oynamaktadır. Ancak bacak sayısındaki artış karmaşık bir hareket kontrol sistemine olan ihtiyacı ortaya çıkardığı gibi sistem ilerleme hızını da düşürmektedir.

Şekil 2.1’de görülen ve iki bacaklı bir sistem olan RAMR 1 dört mafsal, beş ayrı uzuv ve bacakların sonunda vakumlu birer yapışma mekanizmasına sahiptir. Robot boyutları  $45 \times 45 \times 248 \text{ mm}^3$  ve ağırlığı ise 335 gr. seviyesindedir. Duvarda yürüme esnasında bir bacak kendini duvara sabitlerken, diğer bacak duvar ile bağlantısını keser. Ardından mekanizma duvara sabit olan bacağın üzerinde dönerek bir üst seviyeye yapışıp kendini sabitler ve diğer bacağın duvarla bağlantısını kesip harekete aynı şekilde devam etmesini sağlar [3].

Daha yüksek taşıma kapasitesi ihtiyacı 4 bacaklı robotların ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Şekil 2.2’de görülen NINJA-I ve NINJA-II, Tokyo Teknoloji

Enstitüsü tarafından dış cephe denetimi ve yüksek bina ve köprülerin bakımı için geliştirilmiştir [4] [5].



Şekil 2.2 NINJA-I (solda) ve NINJA-II (sağda) [4] [5]

İki robot da yüzey üzerinde hareketi sağlayabilmek amaçlı 3 boyutlu paralel bağlantı elemanlarına sahiptirler. Bu mekanizmada robot, üç bacağını duvara sabitlemiş durumda iken, dördüncü bacak ileri-geri veya sağa-sola hareket edip yüzeye kendini sabitleirken diğer bacaklardan birisi aynı işlemi yapmak üzere yüzeyden ayrılır ve hareketi devam ettirir. Bu şekilde robot sürekli olarak 3 noktadan bağlı kalarak tutunma kabiliyetini artırmaktadır.

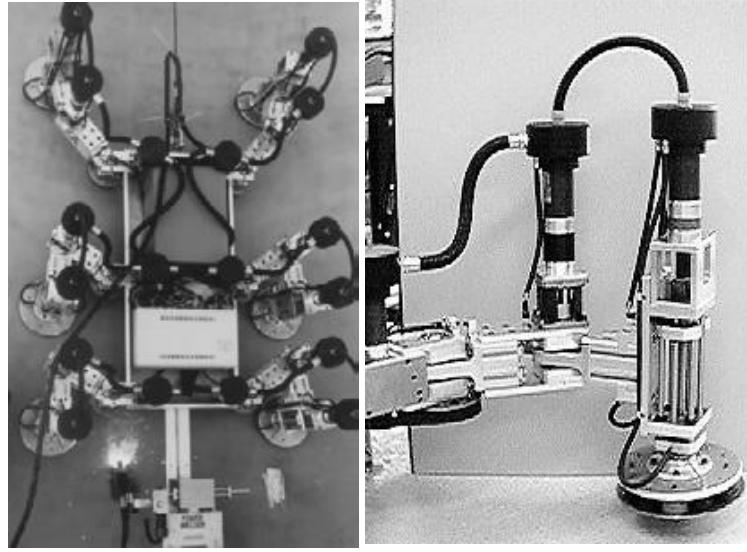
Robotun dik yönde itme kuvveti 1400 N, boyutları, 500x1800x400 mm ve ağırlığı ise 45 kg.'dır. Çıkabildiği maksimum hız ise 0,16 m/sn.dir.

Daha yüksek taşıma kapasiteli robotlara duyulan ihtiyaçla beraber 6-8 bacaklı tırmanan robotlar, geliştirilmeye başlanmıştır. Bunun ihtiyaçtan dolayı olarak üretilen REST 1 tırmanan robotu denetim, temizlik ve gemilerde kaynak işlemlerini yapabilmesi amaçlı geliştirilmiştir.

Şekil 2.3'de görülen robot üzerindeki bacaklar elektromanyetik birer tutucu ile donatılmış ve ferromanyetik yüzeylerde güvenli bir tutunma sağlamıştır. Bununla beraber robot ağırlığı 250 kg. a çıkmış ve 8 serbestlik derecesinin aynı



anda kontrol edilmesi gerekliliğinden dolayı çok karmaşık bir kontrol algoritmasını da beraberinde getirmiştir.



Şekil 2.3 REST 1 (solda) ve elektromanyetik tutucu (sağda)

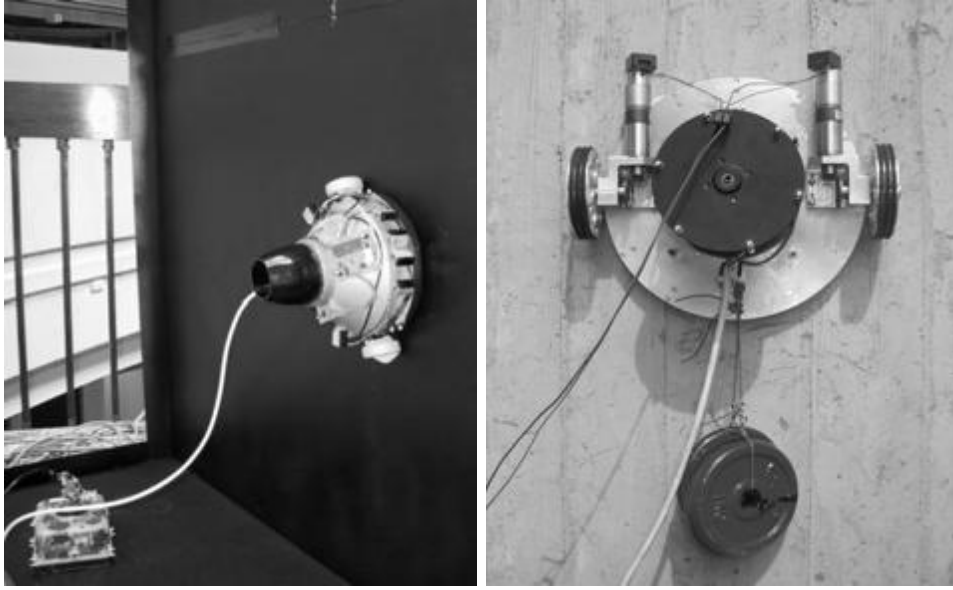
Daha karmaşık bir yapısı olmasına karşın bir kısım tutucu yerde sabitken diğerlerinin yüzeyden ayrılarak hareket etmesi ve sırasıyla diğer kolların aynı işlemleri gerçekleştirmesi ile hareketin sağlanması sebebi ile hareket karakteristiği açısından NINJA I-II robotları ile benzer özellik göstermektedir. Ancak taşıma kapasitesinin daha fazla olması en büyük artısıdır [6].

### 2.2.1.2 Tekerlekli Duvar Tırmanıcı Robotlar

Tekerlekli duvar tırmanıcı robotlar dik yüzeyler ve ters yüzeylerde (tavan) tekerlekleri yardımı ile hareket etmekte ve yüzeye vakum veya manyetik kuvvetlerle tutunmaktadır. Sürekli hareketlerinden dolayı hızları saniyede gövde uzunlukları mertebesine kadar çıkabilmektedir.

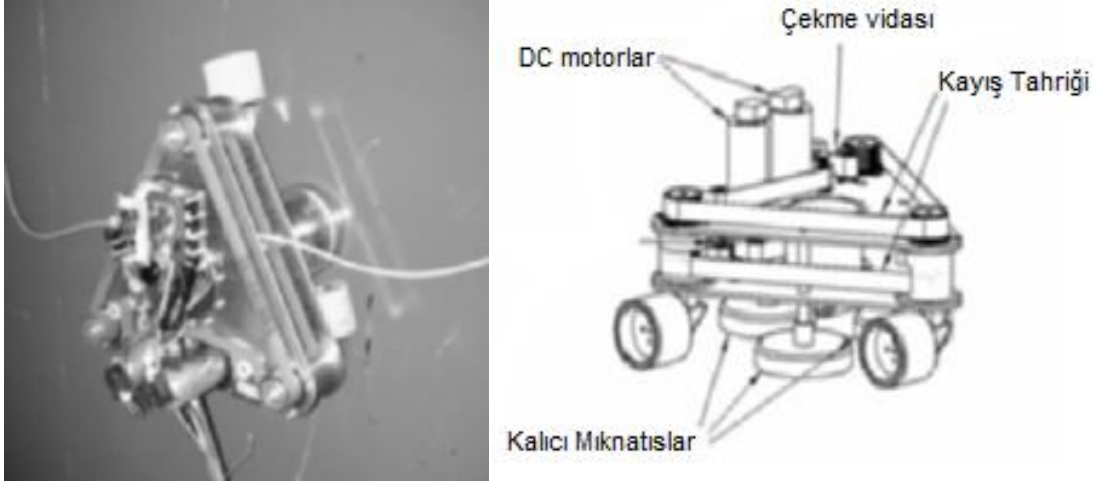
Vakum kullanılarak yapışma sağlayan tekerlekli robotların bazıları robot gövdesi ile tırmanma yüzeyi arasında bir hava katmanı oluşturmaktadır. Burada oluşturulan vakum odası sınırlarından sürekli hava çekilerek iç basıncın düşürülmesi sağlanmaktadır.. Bu sayede yüzeyden ayrılma olmaksızın tekerler ile sürekli hareket sağlanabilmektedir [7]. Bu tür sistemlerde sızdırmazlığı sağlayacak olan malzemenin yüzeye çok düşük bir sürtünme katsayısı temas

etmesi gerekmektedir. Aksi takdirde hem hareketi sağlamak için gerekli olan kuvvetler artacak hem de engel aşma kabiliyeti olumsuz etkilenecektir.



Şekil 2.4 Alicia 1 ve 2 robotları

Şekil 2.4'de görülen Alicia1 ve 2 robotları petro-kimyasal tankların dik yüzeyleri üzerinde inceleme işlemleri yapmak için tasarlanmıştır. Robot yüzeye tutunma için bir vakum odası, hareketi ve manevrayı sağlamak için iki adet tekerlek tahrik sistemi ve vakum pompasından oluşmuştur. Normal hızlarda 1 cm.ye kadar engelleri aşabilmektedir. Sistem sınırlarından küçümsenemeyecek derecede bir hava akışı olmakta ve bu sebeple vakum pompasında yüksek bir akış kapasitesi bulunmaktadır. Alicia 2 robotu 30 cm çapına sahiptir ve bu çapın büyüklüğü hava akışını dengelemek için tasarlanmıştır. Bunların yanında 4 kg.lık kütlesi ve bu kütleyle ek olarak 10 kg taşıma kapasitesine sahiptir [8].



Şekil 2.5 Üç tekerlekli duvar tırmanan robot

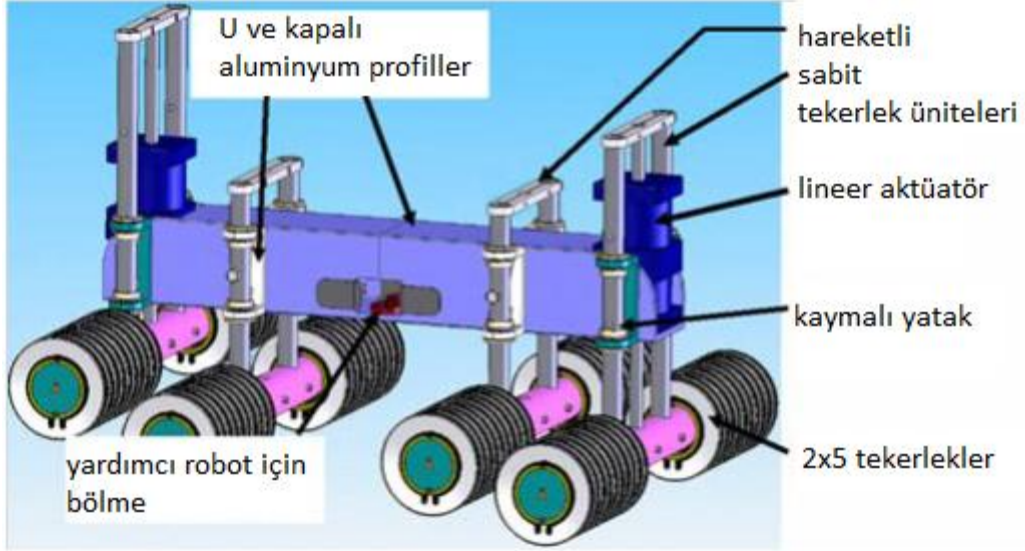
Şekil 2.5'de görülen 3 tekerli robot gemi gövdeleri gibi ferromanyetik yüzeylerde kaynak ve denetim işlemlerinin yapılabilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Bu robotta senkronize çalışan 3 teker kendi eksenleri etrafında dönebilmektedir. Böylece, robotun gövdesi sabitken teker eksenlerinin dönmesi ile robot istediği yöne hareket etmeye başlamaktadır. Alicia 1 ve 2'de yapışma için gerekli olan kuvvet vakum ile sağlanırken gemi yüzeyinde böyle büyük bir güç sarfiyatına gerek yoktur. Bu sebeple robot en alt kısmına yerleştirilmiş 3 adet kalıcı mıknatıs ile yapışmayı sağlamaktadır. Çoklu lazer ışını ve kamera sayesinde kaynak bölgelerinde oluşan çıkıntılar ve oluklar fark edilebilmektedir [9].



Şekil 2.6 Cam yüzeyler üzerinde çalışan WallWalker robotu

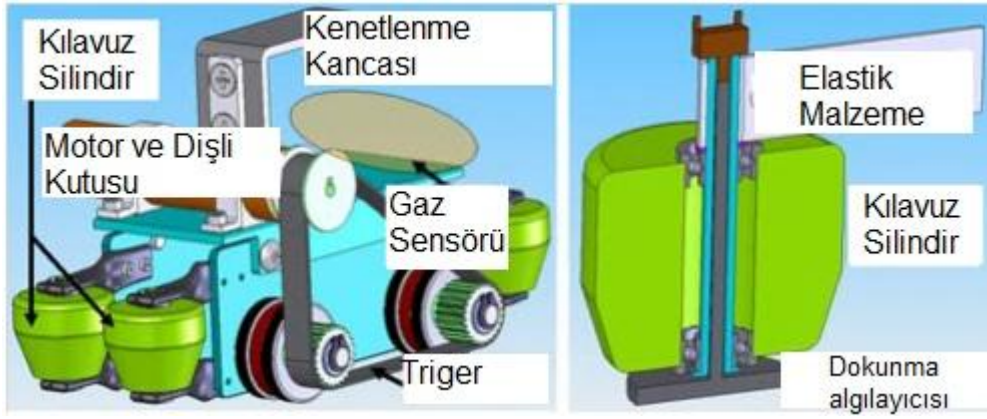
Şekil 2.6'da görülen WallWalker duvar tırmanan robotu iki adet tahrik tekerleği ve vakum temelli ıslak yapışma prensibi ile çalışmaktadır. Çalışma hızını

istediği gibi ayarlayabilen bu robot üzerine yerleştirilmiş temizleme ekipmanları ile cam yzeyleri temizleyebilmektedir. Cam temizleme için kullanılan sıvı aynı zamanda robotun sızdırmazlığını ve yzey üzerinde rahat hareket edebilmesi için düşük sürtünmeli yzeyi oluşturmaktadır [10].

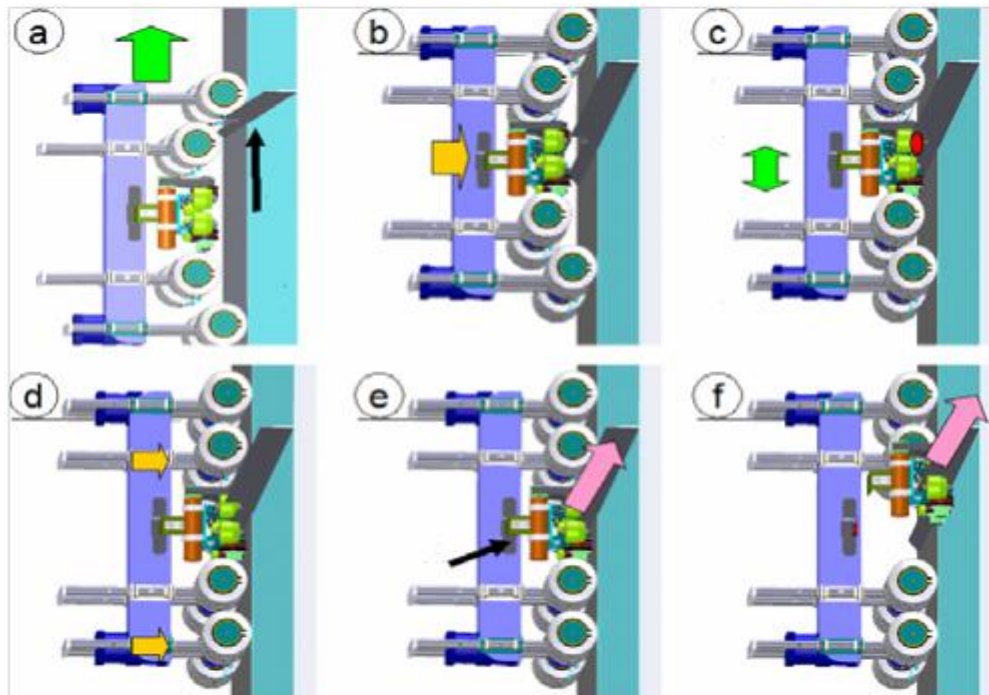


şekil 2.7 Ana robot

Gemilerin gaz tanklarının i yzey denetimi için geliştirilen robot kaynak bölgelerinde oluşabilecek hataların önceden saptanabilmesini sağlamaktadır. Ana robot ve yardımcı robot olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Ana robot ve yardımcı robot olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Ana robot, üzerinde yardımcı robotu taşıyabilecek bir ünite barındırmakta, dikey ve yatay olmak üzere her yönde hareket edebilmekte ve 8 adet tekerin yukarı ve aşağı doğru birkaç servomotor yardımı ile hareket edebilmesi sonucu engelleri geçebilmektedir. Yardımcı robot ise sadece kaynak bölgeleri üzerinde yatay hareket sağlamakta ve kaynak bölgelerini ray kılavuzu gibi kullanmaktadır.



Şekil 2.8 Yardımcı robot



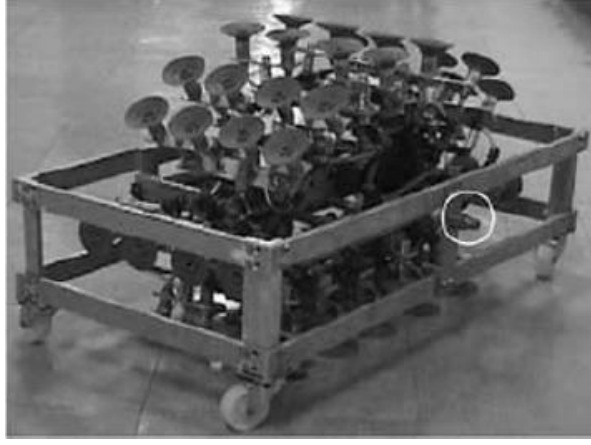
Şekil 2.9 Çalışma prensibi

Robotun iki ayrı bölümden oluşmasının en önemli sebebi yaklaşık 10 kg ağırlığında olan ana robotun tank üzerindeki sac kalınlığının düştüğü bölgelere zarar veriyor olmasıdır. Bu nedenle bu bölgelerde ağırlığı daha düşük olan yardımcı robotun kullanılması gerekmektedir [11].

### 2.2.1.3 Paletli Duvar Tırmanıcı Robotlar

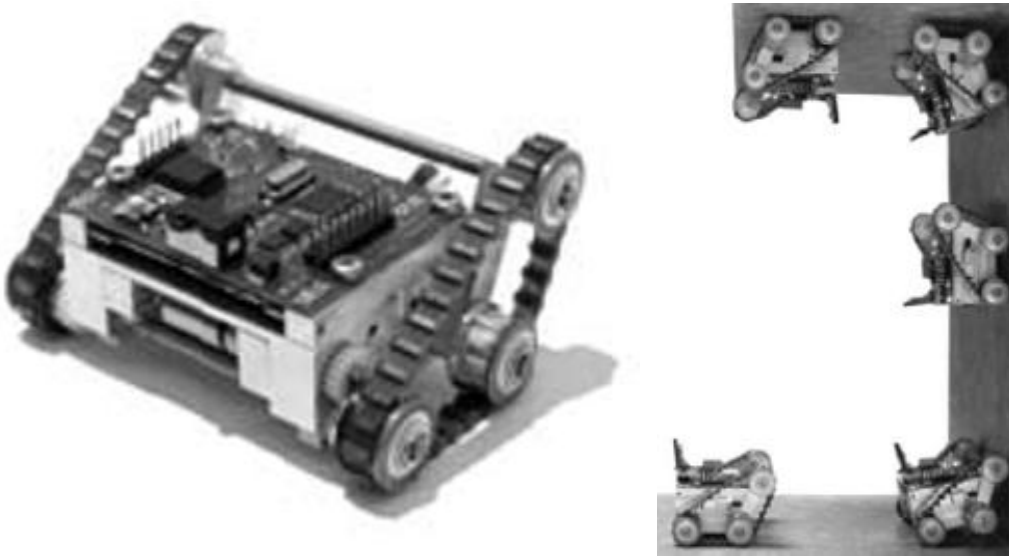
Paletli duvar tırmanıcı robotlar tekerlekli robotlarla kendi eksenleri etrafında dönebilmeleriyle benzer özellik göstermektedirler. Ancak tekerlekli robotlara ek olarak paletlilerde daha iyi bir engel aşma kabiliyetinin yanı sıra palet üzerine

yerleştirilmiş yapışma mekanizmalarıyla da daha fazla tutunma alanı bulunmaktadır.



Şekil 2.10 Chainbot II

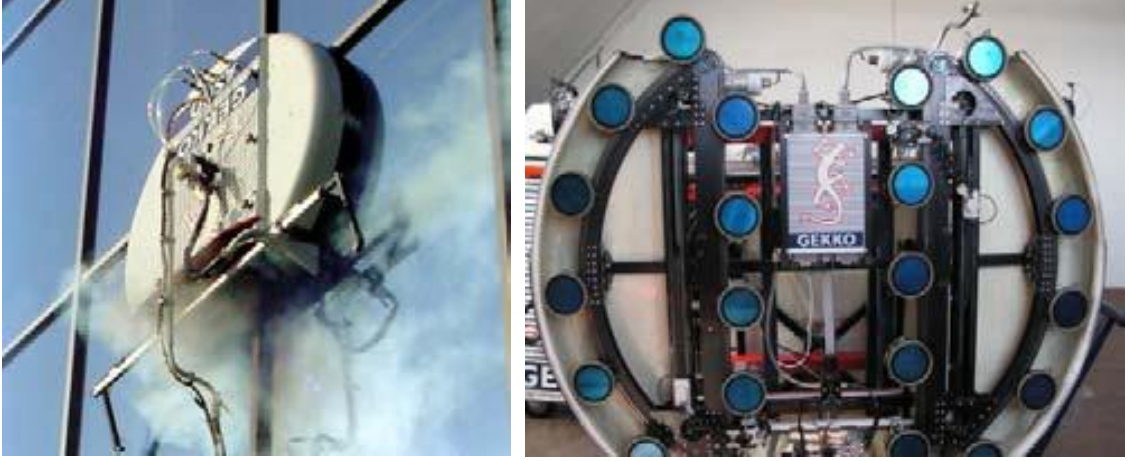
Şekil 2.10'da görülen zincirli bir palet mekanizmasına sahip olan Chainbot II, palet üzerine yerleştirilmiş olan 52 adet vantuz ile yapışmayı sağlamaktadır. Vantuzlar selenoid valfler yardımı ile kontrol edilmekte ve sadece yüzeye teması olan vantuzlar üzerinde vakum basıncı oluşturularak enerji kayıpları düşürülmektedir. 6 mm yüksekliğe kadar olan engelleri aşabilen robot sınırlı manevra kabiliyetini esnek zincirleri sayesinde gerçekleştirebilmektedir. Dakikada 10 mm hıza ulaşabilen 22 kg.lık kütlesine ek olarak 25 kg. taşıma kapasitesine de sahiptir [12].



Şekil 2.11 TRIPILLAR robotu ve tırmanma karakteristiği



Şekil 2.11'de görülen minyatür bir duvar tırmanıcı robot olan TRIPILLAR 96x46x64 mm<sup>3</sup> lük bir boyuta sahip olup, manyetik paletler yardımı ile hem tutunmayı he de hareketi sağlamaktadır. Yapışma kuvvetini sağlayan mıknatıslar palet ile beraber dökülerek üretilmiş ve bağlantı elemanına olan ihtiyaç ortadan kaldırılmıştır [13].



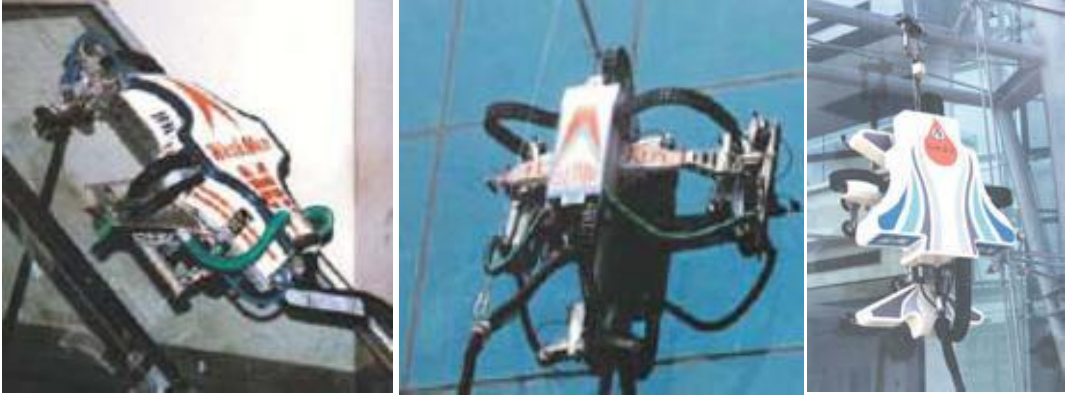
Şekil 2.12 GEKKO III ve alt görünümü

Bir Alman şirketi olan ARGECO tarafından geliştirilen ve şekil 2.12'de görülen GEKKO III, iki adet düzlemsel palet ile hareketini sağlamakta ve üzerinde bulunan vakum odalarıyla cam yüzeylere yapışmaktadır. Asıl amacı temizlik olan robot saatte 240m<sup>2</sup>alılık bir cam alanı herhangi bir leke veya nemli yüzey bırakmadan temizleyebilmektedir [14].

#### 2.2.1.4 Ötelemeli Duvar Tırmanan Robot

En basit hareket yönteminden birisi olan ötelemeli tahrik aslında bir koordinat sistemidir ve robotu iki ayrı eksende hareket ettirerek istenilen koordinatlara gelmesini sağlar. Bacaklı tür duvar tırmanıcılarda olduğu gibi robotun bir bölümü yüzeye tutunurkendiger kısımhareket etmektedir. Bu sistemin en önemli dezavantajları, büyük boyutları ve devamlı olmayan yavaş hareket kabiliyetidir.

Sky Cleaner 1,2 ve 3 koordinat sistemi ile çalışan ötelemeli robotlardır. Bu robotlar cam yüzeylerde temizlik amaçlı üretilmiştir. Vakumlu tutuculara sahip olan robot hareket için pinomatik silindirler kullanmaktadır. Öteleme hareketiyle XY koordinat düzleminde her iki yönde de hareket edebilmekte ve istenen koordinata hareketi bu şekilde sağlamaktadır.



Şekil 2.13 Sırasıyla Sky Cleaner 1,2 ve 3



Şekil 2.14 Sky Cleaner 3 öteleme mekanizması

Enerji sarfiyatının çok olması ve gerekli temizlik ekipmanlarının ağırlığı sebebi ile bir destek aracına ihtiyaç duymakta ve gerekli olan temizlik malzemelerini ve gücü dışarıdan bir kablo ve hortum vasıtasıyla sağlamaktadır [15].



Şekil 2.15 Kumlama robotu



Gemilerde kumlama işlemlerinin yapılması için geliştirilen bir başka robot kayan iki adet platform ile hareketini sağlamakta ve üzerindeki kalıcı mıknatıslar yardımı ile yüzeye tutunmaktadır (Şekil 2.15). Ortada bulunan modül ve bu modül üzerinde hareket edebilen kumlama ekipmanı sayesinde robot sabit konumda iken hem yukarı aşağı hem de sağa sola hareket ederek o bölgedeki kumlama işlemlerini gerçekleştirmektedir. Bunun yanında gerekli hareketin sağlanması için de kullanılan orta parça, kalıcı mıknatıslarla yüzeye yapışıp robotun kendini bir üst veya bir alt seviyeye çekmesini sağlar [16].

### 2.2.1.5 Halat Tahrikli Duvar Tırmanıcı Robotlar

Kablo veya halat yardımı ile hem dikey hem de yatay yönde hareketini kontrol edebilen robotlardır. Makara vasıtasıyla halat üzerinde hareket edebilen bu robotlaryüksek binalarda cam veya duvar temizliği işlemlerinde kullanılmaktadır.



Şekil 2.16 Halat tahrikli duvar tırmanıcı robot

Şekil 2.16'da verilen robotun kendi üzerinde herhangi bir hareket mekanizması bulunmamakta ve hareketini çatıya sabitlenmiş bir vinç taraması ile sağlamaktadır. Çalışma sırasında duvar ile bağlantısının kesilmemesi için vantuzlu bir vakum sistemi kullanılmaktadır. Yüzey üzerinde karşılaşılabilecek engellerin saptanması için ise 4 adet foto-elektronik algılayıcı kullanılmıştır [17].



Şekil 2.17 Taisei Corporation (solda) ve Kajima Construction (sağda) şirketlerinin geliştirdiği robotlar

Japonya'da kablo tahrikli birçok robot geliştirilmiştir. Ancak bunlardan piyasaya sunulmuş duvar boyama ve gözetim işlemleri yapabilen sadece iki adet robot bulunmaktadır. Taisei ve Kajima şirketlerinin geliştirdiği bu robotlar dikdörtgen prizması benzeri birer gövde yapısına sahip olup XY düzleminde bina üzerine yerleştirilmiş bir mobil vinç yardımı ile hareket edebilmektedir [18].

#### 2.2.1.6 Bileşik (hibrid) Tür Duvar Tırmanıcı Robotlar

Bileşik tür duvar tırmanıcı robotlar en az iki farklı hareket mekanizmasını üzerinde bulundurmaktadırlar. Bu tip hareket mekanizmasının tercih edilmesinin en büyük nedeni; bir hareket mekanizmasında var olan eksikliğin diğer bir hareket mekanizması ile giderilmek istenmesidir. Böylece, hem hızlı hem de engel aşma kabiliyeti iyi olan bir robot geliştirilmesine olanak sağlanmaktadır.



Şekil 2.18 SIRIUSc ve vinç sistemi

Bir otomatik dış cephe temizlik robotu olan SIRIUSc yüksek binalarda kullanım için geliştirilmiştir. Çatıda bulunan kablo tahrikli bir vinç ile desteklenmiş olan robot, yine bu vinç vasıtasıyla kendisini yukarı aşağı ve sağa sola hareket ettirebilmektedir (Şekil 2.18). Bu halat sistemi robotun ilk hareket mekanizmasını oluşturmaktadır. İkincil hareket mekanizması olarak da '2 gelişmiş kayma modülü' olarak adlandırılan iki çift lineer hareket modülünden oluşmaktadır. Bu modül robotun duvar ile bağlantısında, aradaki mesafeyi sabit tutmakta ve üzerindeki vakum odasıyla duvar ile sürekli bir bağlantı oluşturmaktadır. Bu modüller robotu hem aşağı ve yukarı hem de sağa ve sola hareket ettirebilme yeteneğine sahiptir. Birincil hareket mekanizması uzun kabloları ve rijit olmayan yapısı sebebi ile robotu istenilen koordinatlara ancak belirli bir sapma ile ulaştırabilmektedir. Bu sebeple ikincil hareket mekanizmasına ihtiyaç duyulmuş ve lineer hareket modülü sayesinde istenilen noktaya daha az sapma ile ulaşması sağlanmıştır [19] [20].



Şekil 2.19 Alicia 3 engel aşarken

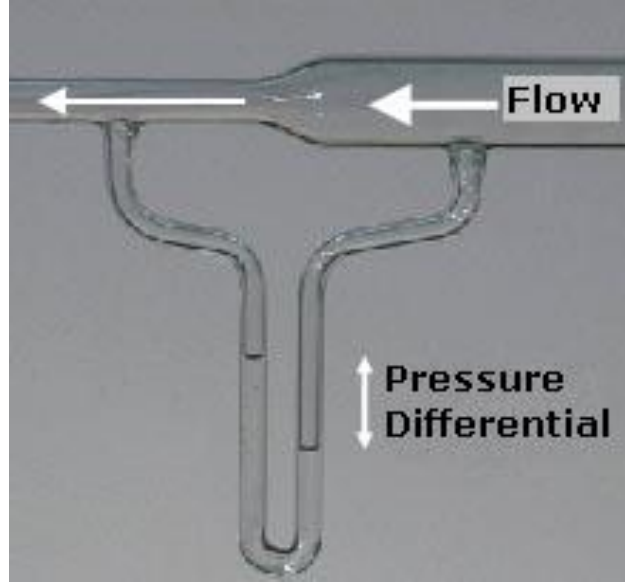
Alicia 1 ve 2 den sonra geliştirilen Alicia 3 robotu, tekerlek tahrikine ek olarak bacaklı bir hareket mekanizmasını da üzerinde bulundurmaktadır. Alicia 1 ve 2 de engel aşma kabiliyeti 1-2 cm civarında iken bu sistem ile engel aşma kabiliyeti 12 cm'e çıkarılmıştır. Sistem 3 adet Alicia 2 robotunun birbirlerine kollar yardımı ile bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Bu sistem engel ile karşılaştığında pinomatik bir sistem vasıtasıyla kollarını bacaklı bir robot gibi kullanarak engelleri aşabilmektedir (Şekil 2.19) [8] [21].

## 2.2.2 Yapışma Mekanizmasına Göre Duvar Tırmanıcı Robotlar

- Vakumlu
- Manyetik
- Kavramalı
- Ray kılavuzlu
- Biyomimetik

### 2.2.2.1 Vakumlu Duvar Tırmanıcı Robotlar

Pürüzlülüğün az olduğu cam ve seramik gibi yüzeylerde çok iyi bir yapışma kuvveti sağlaması sebebi ile çok sık kullanılan bir yapışma mekanizmasıdır. Ancak bu mekanizmanın en belirgin dezavantajı sızdırmazlık sistemindeki en ufak bir boşluğun robotun düşmesine sebep olmasıdır. Bu durum vakumlu duvar tırmanıcı robotların engel aşma kabiliyetlerini düşürmektedir. Dolayısıyla vakumlu duvar tırmanıcı robotlar engebeli, çatlak ve pürüzlü yüzeylerde çalışmamaktadır. Ancak birden çok vakum odasına sahip ve paletli hareket mekanizmasına sahip bir robot yüzeydeki düzensizlik ve çatlaklardan etkilenmeden hareket edebilmektedir [12]. Vakum sistemi literatürde Ventri Prensibi olarak bilinen ve akışkanın hızlı olduğu bölgede yavaş olduğu bölgeye göre basıncının daha düşük olması prensibini temel alır. Şekil 2.20' de görüldüğü gibi akışkanın girdiği bölgede kesitin büyük olması ve çıkıştaki kesitin daha küçük olması, sabit debide akışkanın hızının değişmesine sebep olmakta, bu da girişteki basıncın çıkıştakine göre daha büyük olmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.20 Venturi Prensibi

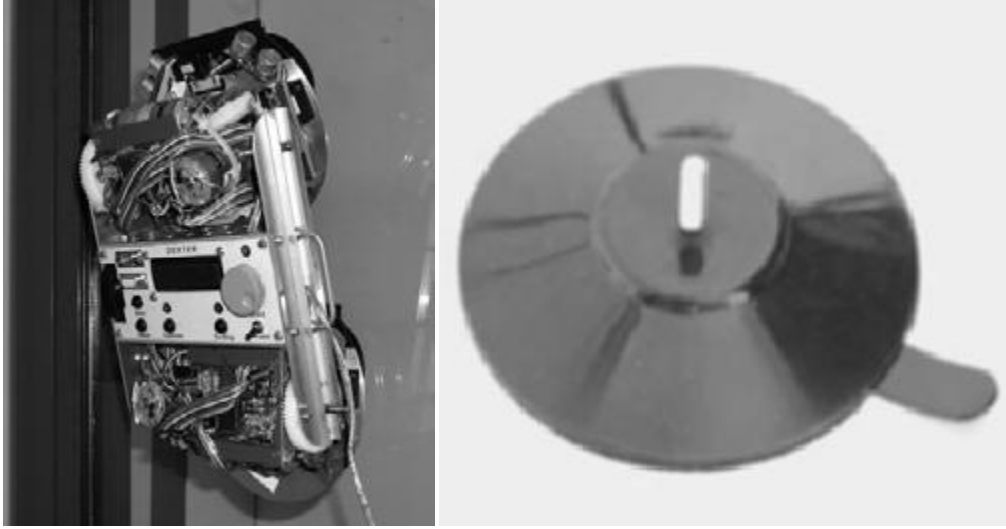
Üç boyutlu karmaşık yüzeylerde hareket edebilmek için tasarlanmış olan ROMA-II duvar tırmanıcı robot, 4 serbestlik dereceli ve bacaklı tür hareket mekanizmasına sahiptir. Toplamda iki adet bacağı olan robot bacakların altına yerleştirilmiş vakumlu tutucular sayesinde duvara tutunmaktadır.



Şekil 2.21 ROMA-II ve vakum vantuzları

100 kg'lık bir kuvvet uygulayabilen vakum sistemi gerçekte 20 kg'lık bir ağırlığı desteklemektedir. Tutunma mekanizması iki adet ayak ve bu ayaklar üzerine yerleştirilmiş olan 10 adet vantuzdan oluşmaktadır. Bu vantuzlar bir vakum pompası ile desteklenmektedir. Vantuz sayısının bu denli çok olması sistemin bir engelleme noktasına geldiğinde herhangi bir vantuzun sızdırmazlığını yitirmesi

durumunda diğerk vantuzların işlevlerine devam ederek güvenli tırmanmanın sağlanması amaçlıdır. Hareket sırasında ayakların birinin yüzeyden ayrılıp, hareketini tamamlayıp tekrar yapışması uzun zaman almaktadır ve bu sebeple robotun hızı 1,5 m/dakika'nın üzerine çıkamamaktadır [22] [23] [24].



Şekil 2.22 DEXTER (solda) ve pasif vantuz (sağda)

DEXTER ismi ile literatürde yerini alan bir başka robot ise pasif vantuzlarla yapışmasını sağlamaktadır (Şekil 2.22). Aktif ile pasif vantuz arasındaki fark; aktif vantuzun bir vakum pompası kullanması pasif vantuzun ise mekanik bastırma ile tutunmayı sağlamasıdır. Ancak bu sistem sadece cam yüzeyler gibi çok düşük pürüzlülüğe sahip yüzeylerde çalışabilmektedir.  $36,5 \times 22 \times 13 \text{ cm}^3$  'lük küçük boyutları her ne kadar bir avantaj gibi görünse de pürüzlü ve kirli yüzeylerde çalışamaması sebebi ile genel kullanım için uygun değildir [25] [26].



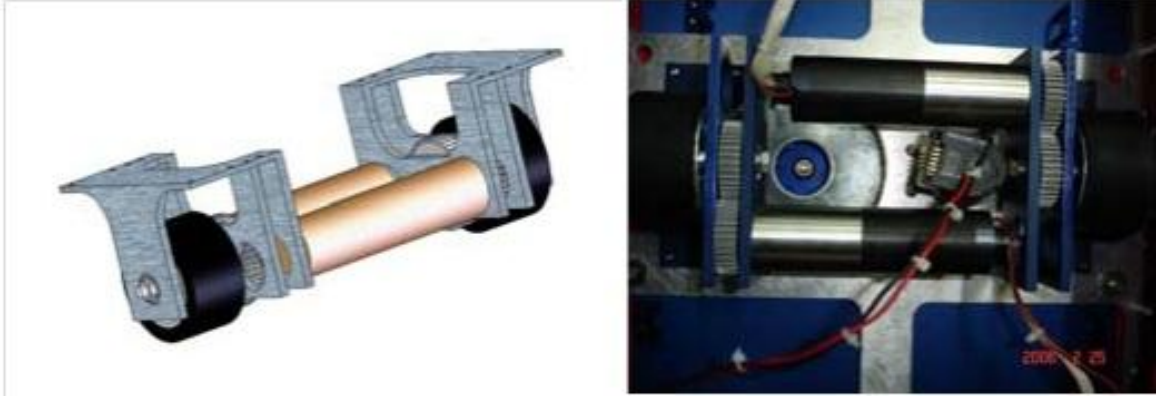
Şekil 2.23 TITO(solda) ve TITO'da kullanılan endüstriyel fan

Yapışma mekanizmasında bir pervane kullanarak duvar ve robot arasında vakum basıncı oluşturarak çalışan bir robot olan TITO dış yüzeyde yukarı ve aşağı hareket için binanın tepesine yerleştirilmiş olan bir vinç kullanmaktadır. Bu vinç yardımı ile basit sarkaç şeklinde hareket ederek istenilen bütün koordinatlara ulaşabilmektedir. Üzerine yerleştirilmiş olan endüstriyel fan ile kendisini yüzeye doğru itmekte ve enerjisini dışarıdan bir kablo ile almaktadır. Robot 12 saatte 10000  $m^2$ 'lik bir alanı temizleyebilme kapasitesine sahiptir [27].

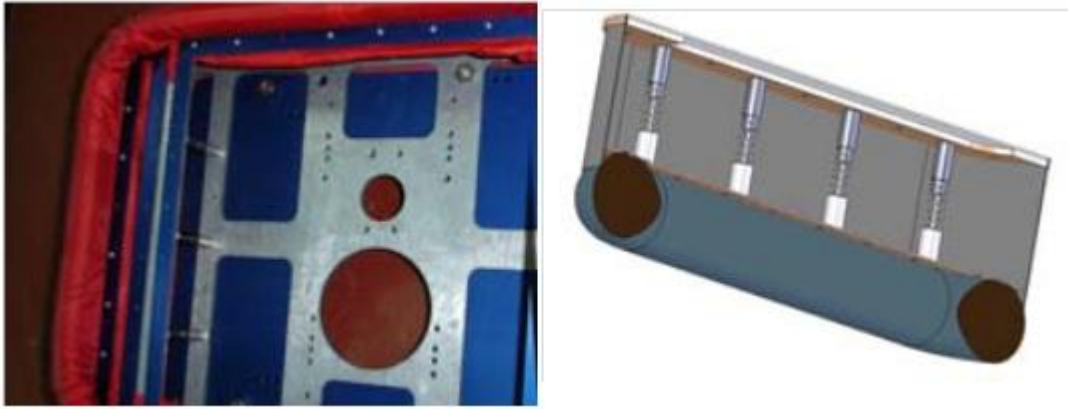
Wu ve Li'nin 2006 yılında ürettiği duvar tırmanıcı robot literatürde sıkça görülen ana ve yardımcı robot şeklinde tasarlanmıştır. Ana robot üzerinde iki adet 1:3 aktarma oranında redüktör ile beraber iki adet tekerlekten oluşan bir hareket mekanizması ve yapışma için vakum kullanılmıştır. Yapışma mekanizmasında sızdırmazlığı sağlamak amacı ile bir dizi yay ve bu yaylar üzerine yumuşak bir tekstil malzeme kullanılmıştır. Burada kullanılan yaylar yüzey üzerindeki dengesizliklere ve dalgalanmalara uyum sağlamak amaçlı koyulmuştur. Yüzeyle temas bölgesinde kullanılan tekstil malzeme de yumuşak yapısı sayesinde yüzeyle sürekli temas halinde kalarak hava kaçaklarını en aza indirmeyi



sağlamaktadır. Tekstil malzeme kullanımındaki ikinci etken ise sürtünme kuvvetini düşürmektir.



Şekil 2.24 Hareket mekanizması



Şekil 2.25 Yapışma mekanizması

Robotun ikinci bölümünü engel aşma kabiliyeti yüksek olan yardımcı robot oluşturmaktadır. Bu robot üzerine yerleştirilmiş iki adet vakum odası ve kendi üzerinde bir robot kol şeklinde tasarlanmıştır.





Şekil 2.26 Yardımcı robot

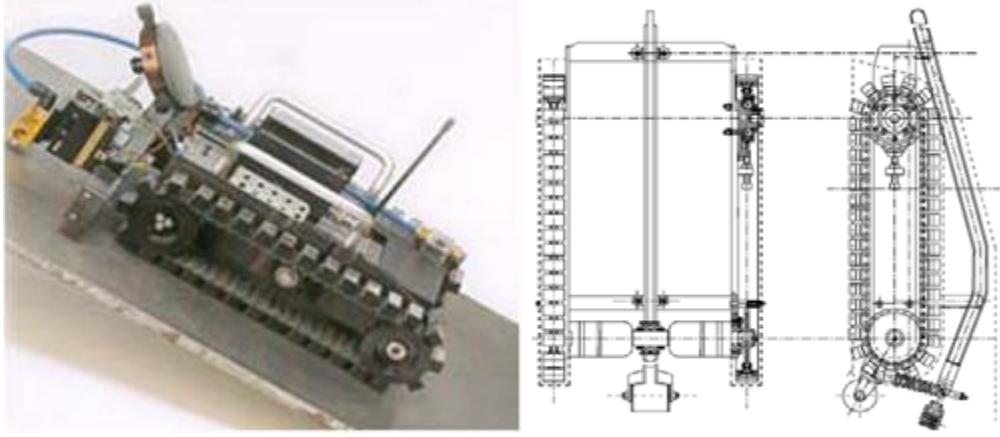
Robot ağırlıkları ve boyutlarıyla ilgili

	<b>Ana robot</b>	<b>Yardımcı robot</b>
<b>Ağırlık</b>	8.3 kg	0.7kg
<b>Ölçüler</b>	450x650x170 mm	320x50x45 mm

Tablo 2.1 Vakumlu duvar tırmanıcı robot ağırlığı ve ölçüleri [28]

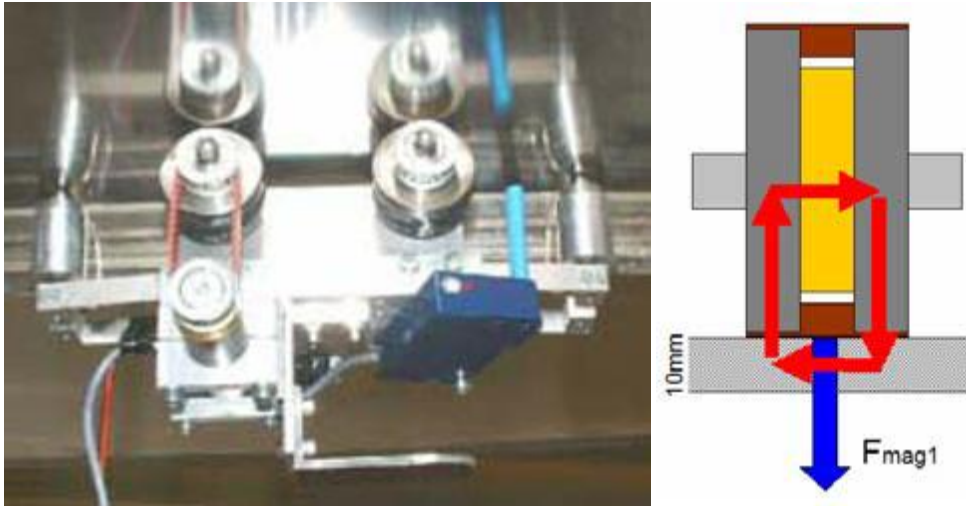
### 2.2.2.2 Manyetik Duvar Tırmanıcı Robotlar

Manyetik yapışma mekanizması içeren robotlarda genelde iki ayrı mıknatıslama tipi görülmektedir. Bunlardan birisi sürekli manyetizma sağlayan kalıcı mıknatıslar, bir diğeri ise üzerinden geçen akım vasıtasıyla bir manyetik alan oluşturarak çalışan elektro mıknatıslardır. Sadece ferromanyetik yüzeylerde çalışabilmesi bir dezavantaj gibi görünse de amaca uygun tasarımlarda diğeri yapışma mekanizma türlerine göre, hem daha iyi yapışma, hem de daha hızlı hareket kabiliyeti sağlamaktadır. Bu avantajların yanı sıra kalıcı mıknatısların kullanıldığı robotlarda robot hareket halinde değilken yapışma için ekstra bir enerji ihtiyacı olmaması da manyetik robotlarda önemli bir avantaj sağlamaktadır. Uygulanacağı yere göre tekerlekli veya paletli olarak tasarlan bu robotlar petrol depolama tankları, rüzgâr türbinleri, nükleer depolama tankları gibi ferromanyetik her tür yüzeyde kullanılabilir.



Şekil 2.27 Petrol tankları için geliştirilmiş olan gözetim robotu [29]

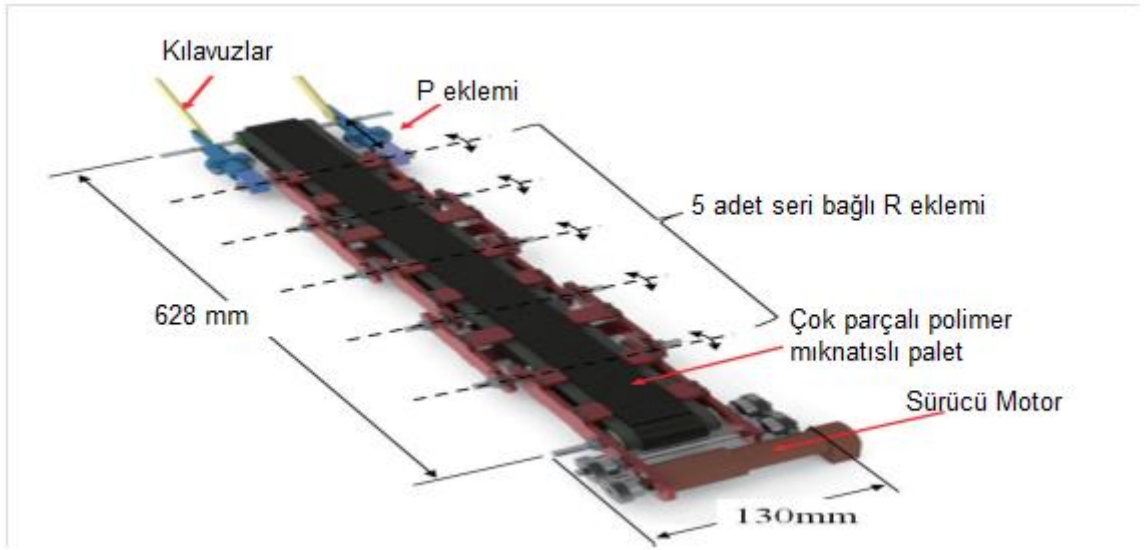
Yukarıdaki şekilde gösterilen ve petrol tanklarında tahribatsız malzeme muayenesi için üretilmiş olan bir duvar tırmanıcı robot yapışma mekanizmasında kalıcı paletler üzerine entegre edilen mıknatıslar kullanmıştır. Böylece robot kontrolü kolaylaşmış ve daha hızlı bir hareket karakteristiğine sahip olması sağlanmıştır. Robot her bir palet zinciri birer tahrik dişlisi ile hareket ettirilmekte ve paletler üzerinde parçalı bir biçimde yerleştirilmiş olan mıknatıslar ile de tutunmayı sağlamaktadır (Şekil 2.27). Robot, hareketi sırasında sürekli olarak duvarla temasta olan mıknatısları sayesinde duvarda güvenli bir şekilde ilerleyebilmekte ve 30 kg'a kadar da yük taşıyabilmektedir [29].



Şekil 2.28 Manyetik tekerli duvar tırmanıcı robot (solda) ve tekerlek yapısı (sağda)

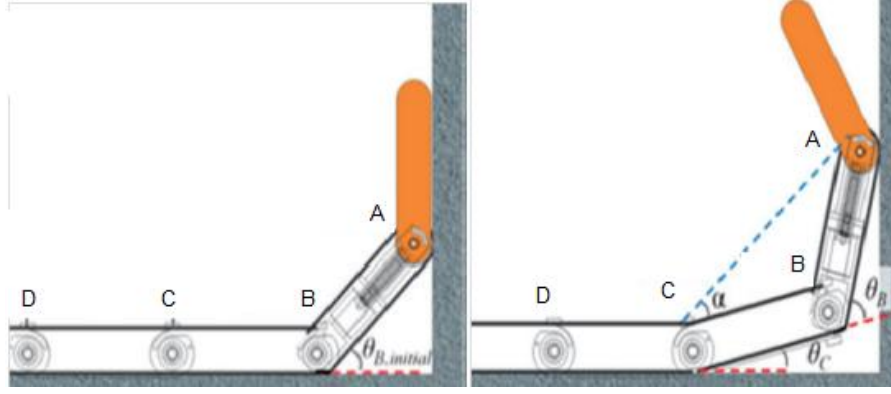
Zurich’de bulunan, İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü, ince duvarlı gaz tanklarında çalışması için gezici duvar tırmanan robot geliştirmiştir. Yapışma mekanizmasında manyetik tekerler kullanılmıştır. Bu tekerler ortada silindirik bir mıknatıs ile bu mıknatısın iki tarafında bu silindirik mıknatıs çapından biraz daha büyük birer metal silindirden oluşmaktadır. Bununla beraber bu tekerlerin en dışı sürtünmenin artırılması amacıyla kauçuk ile kaplanmıştır. Ayrıca, robot üzerinde engellerin aşılması için bir çift lineer itici bulunmaktadır [11].

Lee, Seo ve Lee’nin 2011 yılında üretmiş olduğu robot özellikle ferromanyetik bölgelerde etkin bir şekilde çalışabilmesi için tasarlanmıştır. Yapışma mekanizması kalıcı mıknatıslar kullanmaktadır. Robot altı ayrı bölüm şeklinde tasarlanmış ve bu sayede engel aşma kabiliyetinin artırılması planlanmıştır. Bu bölümler birbirlerine esnek bağlantılarla bağlanmış olup yüzey geçişlerinde esneyebilmektedir. Paletli hareket mekanizması üzerine konuşlandırılmış parçalı polimer, mıknatıslarla beraber hareket ve yapışma mekanizmasının aynı parça üzerinde olmasını sağlamıştır.



Şekil 2.29 Genel görünüm

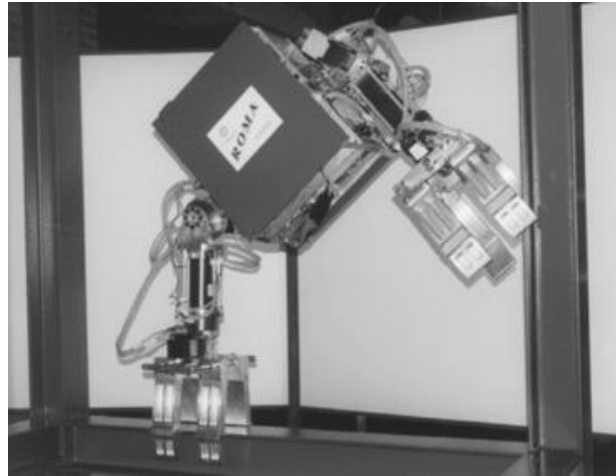
Ayrıca ön tarafa yerleştirilmiş 45 derecelik açı yapan bir kılavuz robotun engel aşma kısmında ilk bölümün yerden ayrılarak duvara yapışabilmesini sağlamaktadır [30].



Şekil 2.30 Çalışma prensibi

### 2.2.2.3 Kavramalı Duvar Tırmanıcı Robotlar

Kavramalı tür robotlar 3 boyutlu hareket yapacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tür robotlar kolonlar, kirişler, borular ve doğal ortamda bulunabilecek çıkıntılara tutunarak yerçekimine karşı koyabilmektedirler. Ancak bu tutunma beraberinde çok iyi bir tutunma mekanizmasını ve bu mekanizmayı kontrol edebilecek bir işlemci ve yazılım ihtiyacını da beraberinde getirmektedir.



Şekil 2.31 ROMA I duvar tırmanıcı robot

Üç boyutlu yüzeylerde kirişler ve kolonlara tutunarak hareketini sağlayan ROMA I robotu iki adet tutucu kol ile çelik yapı binalara tırmanmaktadır (Şekil 2.31). Bu kollar, 8 adet serbestlik derecesi ile kirişleri kavrayabilmektedir. Enerji ihtiyacını üzerinde bulunan bataryalardan sağlamaktadır. 75 kg. ağırlığa sahip bu robot maksimum 1m/dk. hıza çıkabilmektedir [22] [31] [24].

#### 2.2.2.4 Biyomimetik Duvar Tırmanıcı Robotlar

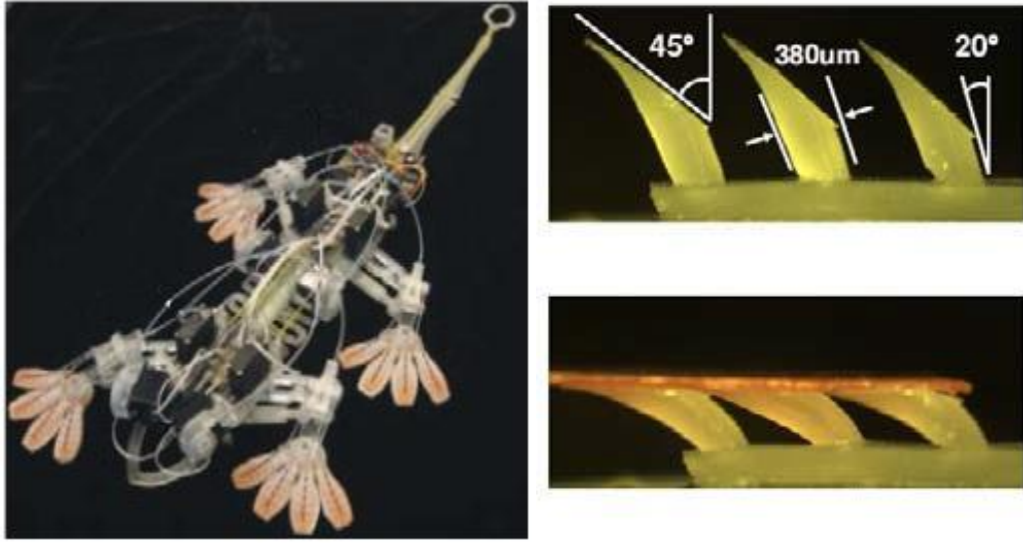
Son zamanlarda araştırmacıların büyük çoğunluğu geko türü kertenkelelerin duvara tutunma kabiliyetlerine odaklanmış durumdadır. Bu kertenkeleler sahip oldukları mikroskobik boyutlardaki tüyler ile van der Waals kuvvetlerinin sağladığı kuru yapışma mekanizması sayesinde duvara tutunurlar. Kuru yapışma temel olarak moleküler kuvvetlere bağlı olduğundan, geko'lar kuru veya ıslak, pürüzlü veya pürüzsüz hemen hemen her yüzeye tutunabilmektedirler. Son on yılda, bir grup tırmanan robot araştırmacısı mikro-nano fiber üretim teknikleri ile biyomimetik yapışma yöntemlerini araştırmaktadırlar. Kalıcı manyetik yapışma mekanizmalarına benzer olarak, biyomimetik yapışma kullanan robotlar da yüzeye tırmanmak için enerji ya da basınç farkına ihtiyaç duymamaktadırlar. Fakat bu robotlar düşük taşıma kapasitesi ve tozlu yüzeylere karşı hassasiyet gibi bazı dezavantajlara sahipler.



Şekil 2.32 Geko kertenkelenin ayak yapısı

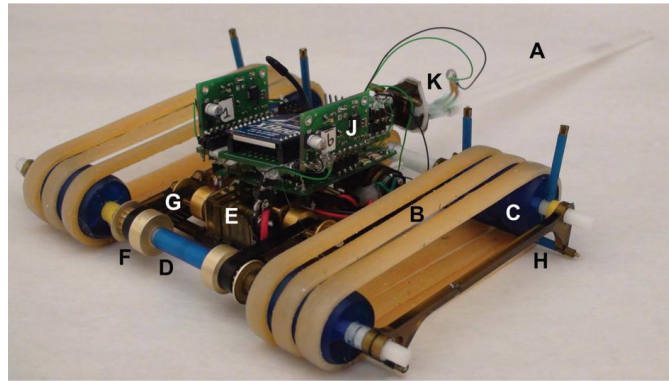
Stickybot, 4 cm/sn hızla cam, plastik ve seramik gibi pürüzsüz dik yüzeylere tırmanabilmektedir. Stickybot'un ayakları yapışkan kuvvetler oluşturan bir dizi mikron düzeyinde eğimli polimer fiberler ile kaplıdır. Geko'ların kullandığı gibi yöne bağlı yapışkan yapılarda, ayaklar uçtan ayak bileklerine doğru çekildiğinde kendiliğinden yüzeye yapışmakta ve ters yönde çekildiğinde serbest kalmaktadır (Şekil 2.33). Ancak yapışkan ayakların tırmanışlardan sonra yeterli

performansı sürdürülebilmeleri için periyodik olarak temizlenmeleri gerekmektedir [32] [33] [34] [35].



Şekil 2.33 Stickybot (solda) ve polimer tutucular (sağda)

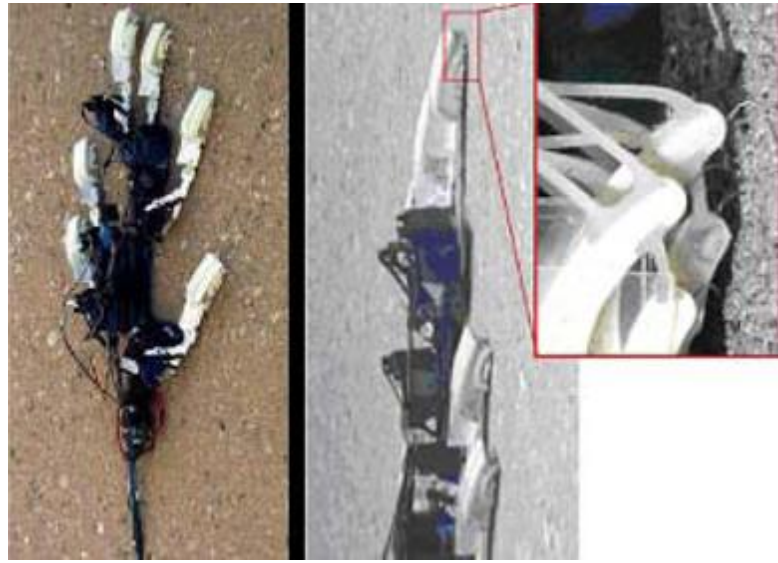
Geko'ların ayaklarından esinlenilerek tasarlanmış yapışma mekanizmasına sahip bir başka robot da, sentetik kuru adezyon mekanizması kullanan Tankbot'dur (Şekil 2.34). Dik yüzeylerde titreşimsiz ve sürekli bir hareketin yanı sıra, pürüzlü ve pürüzsüz yüzeylerde rahat hareket edebilen, engel aşma kabiliyeti yüksek ve aynı zamanda yüksek taşıma kapasitesine sahip olması için tasarlanmıştır. 115 gr. ağırlığa sahip olan tankbot 300 gr. taşıma kapasitesi, 16 mm engel aşma kabiliyeti ve 80 cm dönme çapına sahiptir. 0-360° arasındaki bütün eğimlerde çalışabilen robot, 5 dakika operasyon süresine sahiptir. [36]



Şekil 2.34 Tankbot



400 gr'lık bir robot olan Spinybot tuğla, kumtaşı ve sıvadan oluşmuş pürüzlü yüzeylere tırmanabilir. Kullandığı bir dizi minyatür iğneler ile pürüzlü yüzeylere tutunabilmektedir (Şekil 2.35). Bu mekanizma, tırmanma yeteneği olan böcekler ve örümceklerden ilham alınarak tasarlanmıştır. Spinybot'un ayakları her parmak için iki eklem içeren on adet düzlemsel parmak mekanizmasından oluşur. Her eklem bağlantısı için maksimum kuvvet 1-2 N civarında olup, her parmak mekanizması diğer parmaklardan bağımsız olarak esneyerek ve yön değiştirerek yüzey pürüzlerinden dolayı oluşan karşı yüklerin eklemler tarafından düzgün bir şekilde paylaşılmasını sağlar [37] [38].

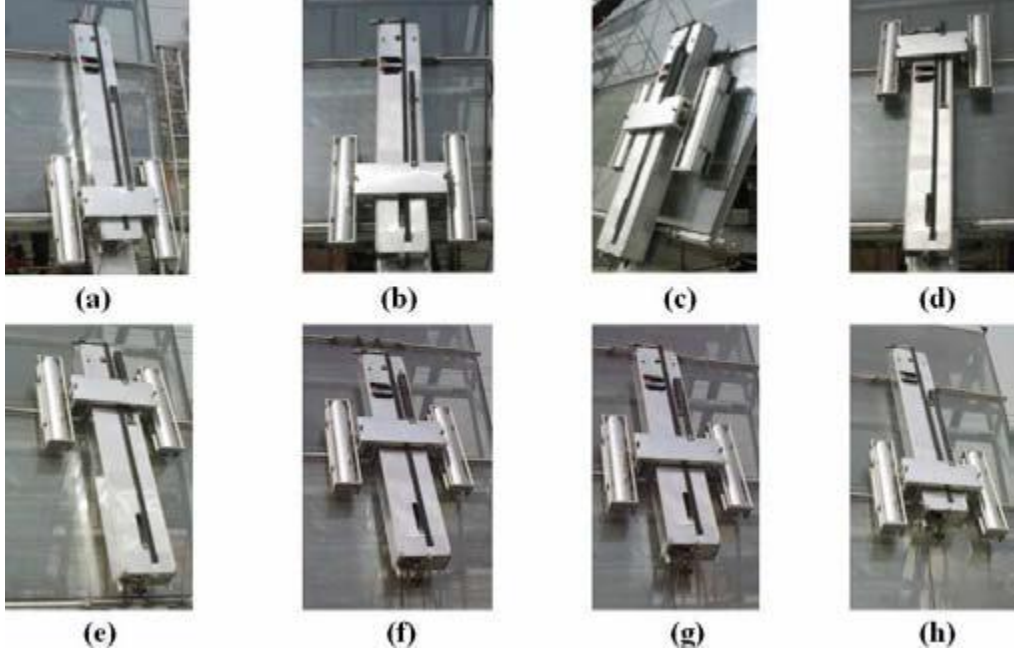


Şekil 2.35 Spinybot ve minyatür iğneler

#### 2.2.2.5 Ray Kılavuzlu Duvar Tırmanıcı Robotlar

Binaların yapım aşamasında, tırmanan robotlar için bir adezyon kuvvet mekanizmasının tasarımı için temel bir yapı önceden yerleştirilebilir. Bu yöntemi temsil eden metotlardan birisi bina yüzeyine robotu üzerinde ilerletmek için ray döşemektir. Robotun üzerinde ilerlemesi için yerleştirilen raylardan aynı zamanda robotun yüzeyi kavraması için de istifade edilir.

Çin Ulusal Tiyatrosu binasında bulunan kompleks dış yüzeylerin temizliği için bir robot geliştirilmiştir. Dik yüzeylere tırmanabilen robot, aynı zamanda da temizlik işlemini sağlayabilmektedir (Şekil 2.36). Tırmanma için duvara önceden yerleştirilmiş olan ray kılavuzunu kullanmakta ve yatay hareketini de bina yüzeyinde bulunan yatay katmanlar üzerinde hareket ederek sağlamaktadır.



Şekil 2.36 Wall cleaning robot

Üzerinde bulunan hareket, tırmanma, temizlik mekanizmaları ile 100 kg. ağırlığa ulaşmaktadır. Robotun boyutları, 3x1,5x0,4 m.dir [39] [40].

Tüm bu duvar tırmanıcının yanında literatürde daha birçok duvar tırmanıcı robota rastlanmaktadır. Genel olarak kullanım alanlarıve çalışma mekanizmalarını açıklayan çalışma Tablo 2.2'de verilmiştir.



Çalışma alanı	Robot Adı	Üretici	Ülke	Uygulama	Hareket	Yapışma
Yapı Endüstrisi	ROMA 1 ve 2	University Carlos III of Madrid	İspanya	Muayene	Bacaklı	Kavramalı
	ROBIN	Vanderbilt University	ABD	Muayene	Bacaklı	Vakumlu
	CROMSCI	University of Kaiserslautern	Almanya	Muayene	Tekerlekli	Vakumlu
	Alicia I, II	Università degli Studi di Catania	İtalya	Muayene	Tekerlekli	Vakumlu
	WallWalker	Kawagwa University	Japonya	Duvar temizleme	Tekerlekli	Vakumlu
	SIRIUSc	FIFOA	Almanya	Duvar temizleme	Bileşik	Vakumlu
	Sky Cleaner I, II, III	University of Hamburg	Almanya	Duvar temizleme	Koordinat	Vakumlu
	TITO	IAI/CSIC	İspanya	Duvar temizleme	Halat tahrikli	Vakumlu
	CAFÉ	DISAM	İspanya	Duvar temizleme	Halat tahrikli	-
	NINJA I, II	Tokyo Institute of Technology	Japonya	Muayene	Bacaklı	Vakumlu
	GEKKO III	ARECO	Almanya	Duvar temizleme	Paletli	Vakumlu
	Exterior Wall Painting Robot	Taisci	Japonya	Boyama	Halat tahrikli	Ray kılavuzlu
Altyapı	Bigfoot	Portech	Almanya	Teşhis	Tekerlekli	Vakumlu
	SM2	Carnegie Mellon University	ABD	Muayene	Bacaklı	Kavramalı
	RAMR I	Michigan State University	ABD	Keşif	Bacaklı	Vakumlu
	Roboclimber	University of Genova	İtalya	Kayalık duvarların güçlendirilmesi	Bileşik	-
Petrokimyasal tesisler	MRWALLSPECT II	Sungkyunkwan University	Kore	Muayene	Koordinat	Vakumlu
	MRWALLSPECT III	Sungkyunkwan University	Kore	Muayene	Bacaklı	Vakumlu
	RONCEN I, II, III	University of Navarra	İspanya	Muayene	Koordinat	Vakumlu
	WCR	Shanghai Jiao Tong University	Çin	Bakım	Paletli	Manyetik
	WCR	Dalhousie University	Kanada	Muayene	Paletli	Manyetik
	SÜRFY	Università degli Studi di Catania	İtalya	Teşhis	Koordinat	Vakumlu
	TRIPILLAR	EPFL-LSRO	Fransa	Muayene	Tekerlekli	Manyetik
Nükleer Santraller	Robug IIs	City University of Hong Kong	Çin	Bakım	Bacaklı	Vakumlu
Gemi İnşaatı	RRX	Seoul National University	Kore	Kaynak	Koordinat	Ray kılavuzlu
	REST 1,2	CSIC	İspanya	Kaynak	Bacaklı	Manyetik
	Climbing Robot for Grit Blasting	University of Coruña	İspanya	Temizlik	Koordinat	Manyetik
	NDT robot	London South Bank University	İngiltere	Muayene	Tekerlekli	Manyetik
	Modular Climbing Robot	Universidad de Vigo	İspanya	Muayene	Tekerlekli	Manyetik
Uçaklar	MACS	California Institute of Technology	ABD	Muayene	Koordinat	Vakumlu
Hizmet sektörü	MATS	Universidad Carlos III de Madrid	İspanya	İnsan bakımı	Bacaklı	Kavramalı
	Magnebot	MIT	ABD	Malzeme Taşıma	Tekerlekli	Manyetik
	Hand-Bot	EPFL-LSRO	Fransa	Nesne düzenleme	Bacaklı	Kavramalı

Tablo 2.2 Literatürdeki robotlar, hareket ve yapışma mekanizmaları

Tüm bu incelemeler sonucunda literatürdeki bir çok robotun en büyük eksikliğinin yeterli esneklik kabiliyetlerinin olmaması nedeni ile engebeli veya engelli yüzeylerde başarısız olduğu ortaya çıkmıştır. İkinci bir dezavantaj ise yine bir çok robotun çok büyük yapılarından ve yüksek enerji sarfiyatlarından

dolayı enerjilerini kablolar yardımı ile dış kaynaktan almalarıdır. Böylece hareketleri bağımlı hale gelmektedir.

### **2.3 Hareket ve Yapışma Mekanizması Seçimi**

Bu proje kapsamında tasarlanacak olan robot; aşağıda verilen ve günümüzde tırmanan robotların en sık kullanıldığı yüzeylere tırmanabilecek şekilde tasarlanacaktır. Bu tasarımdaki öncelik hareket ve yapışma mekanizması olacaktır.

- Silolar (ferromanyetik)
- Nükleer depolama tankları
- Petrokimyasal depolama tankları
- Her tür ferromanyetik tank
- Gemi gövdeleri
- Rüzgâr tribünü direkleri

Duvar tırmanıcı robotlarda hareket mekanizması genel olarak bacaklı, tekerlek tahrikli, paletli, koordinat tabanlı hareket, halat tahrikli ve bileşik tür olmak üzere 7 ayrı şekilde karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla bu bölümde bizim belirlediğimiz yüzeylerde en verimli biçimde çalışabilecek sistemleri seçmek çok önemli bir adımı oluşturmaktadır.

Aşağıda verilen tablonun üst ekseni; genellikle tırmanan robotlarda tasarım kriterleri olan parametreleri, sol ekseni ise hareket mekanizmalarını içermektedir. Tasarım kriteri olan parametrelerin önem derecesi ve hareket mekanizmalarının karşılaştırılması bugüne kadar gerçekleştirilen literatür taraması sonucunda tırmanan robotlar alanında elde edilen subjektif izlenimler sonucunda oluşturulmuştur.

	Mekanizma basitliği	Hız	Manevra kabiliyeti	Yüzey geçişleri	Kontrol kolaylığı	Engel geçiş kabiliyeti	Özgür hareket yeteneği	Enerji verimliliği	Çevre şartlarına uyum	TOPLAM
<b>Tasarım kriteri önem derecesi</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	
<b>Bacaklı</b>	-1	-1	0	1	-1	+1	+1	0	-1	<b>-4</b>
<b>Tekerlekli</b>	+1	0	0	0	0	-1	0	0	0	<b>-1</b>
<b>Paletli</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
<b>Ötelemeli</b>	-1	-1	+1	0	-1	-1	0	0	0	<b>-10</b>
<b>Halat tahrikli</b>	-1	+1	0	0	-1	0	-1	0	0	<b>-5</b>

Tablo 2.3 Hareket mekanizması seçimi

Hareket mekanizması değerlendirmesinde en iyi sistemin paletli hareket mekanizması olduğu görülmektedir. Dolayısıyla önceden belirlenen kıstaslar dâhilinde en iyi iki sistemin tekerlekli ve paletli olduğu belirlenir. Ancak mıknaatısların yerleştirilmesi ve yüzeyle bağlantının artırılması gerekliliği de göz önünde bulundurulduğunda paletli hareket mekanizması bir adım öne çıkar. Bu sonuçlar göz önüne alınırsa tekerlekli, paletli veya her iki sistemi de içerisinde barındırabilecek hibrid bir sistem oluşturmaya yönelik çalışmalar yapılmalıdır.

İkinci aşamada yapışma mekanizması seçimi yapılmalıdır. Duvar tırmanıcı robotlarda yapışma mekanizması genel olarak; vakumlu, manyetik, kavramalı, ray kılavuzlu ve biyomimetik olmak üzere beş ayrı kategoride incelenmektedir. Dolayısıyla bu bölümde de belirlenen yüzeylerde en iyi yapışmayı

sağlayabilecek ve en az enerji tüketecek sistemleri seçmek çok önemli bir kistas halini almaktadır.

Tüm bu kistaslar dâhilinde yapılan puanlandırma Tablo 2.4'de görülmektedir.

	YÜZEY		Enerji verimliliği	Çevre şartlarına uyum	Mekanizma basitliği	Kontrol kolaylığı	Özgür hareket yeteneği	TOPLAM
	Düşük pürüzlü	Yüksek pürüzlü						
<b>PUAN</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	
<b>Vakumlu</b>	0	-1	-1	-1	-1	0	0	<b>-17</b>
<b>Manyetik</b>	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
<b>Kavramalı</b>	-1	+1	0	0	-1	-1	0	<b>-5</b>
<b>Ray Kılavuzlu</b>	0	0	0	+1	-1	0	-1	<b>-4</b>
<b>Biyomimetik</b>	0	0	+1	-1	0	0	-1	<b>-4</b>

Tablo 2.4 Yapışma mekanizması seçimi

Seçim kistasları ve ferromanyetik yüzeylerde hareket göz önünde bulundurularak yapılan puanlandırma neticesinde, manyetik türün en yüksek puanı aldığı görülmektedir.

## 3. TASARIM

### 3.1 Yapışma Mekanizması Tasarımı

Tablo 2.4'de yapılan puanlandırma neticesinde manyetik tür yapışma mekanizması, bu tezde istenilen yüzeylere tırmanabilme performansı açısından en uygun yapışma mekanizması olarak ortaya çıkmıştır. Bu sebeple gerekli yapışmayı sağlayabilecek mıknatısların seçimi ve bu mıknatısların robot üzerine nasıl yerleştirileceği robotun yapışma performansı açısından önemlidir.

#### 3.1.1 Mıknatıs Seçimi

Ferromanyetik yüzeylere tırmanabilen robotların küçük engelleri aşabilmeleri için mekanizma tasarımının mümkün olduğunca esnek olması gerekmektedir. Bu yüzden çok büyük alana sahip mıknatıslar kullanılmamalıdır. Bunun yanında, çok küçük mıknatıslar ise; tırmanma yüzeyinde meydana gelen kuvvetleri lokal olarak taşıyamayabilirler (ilk mıknatısın yenilmesi ile mıknatıslar zincirleme olarak yüzeyden ayrılacaklardır), bu yüzden çok küçük boyutlardaki mıknatıslar da kullanılmamalıdır.

İkinci bir kıstas ise özgür hareketin sağlanabilmesi için azami enerji harcama gereksinimi, dolayısı ile ağırlığın minimize edilmesi ihtiyacıdır.

Mıknatıs seçimi aşağıdaki parametler gözönüne alınarak gerçekleştirilecektir;

- Yapışma kuvveti
- Boyutlar
- Esneklik
- Tedarik
- Maliyet

Bu niteliklere uygun bir mıknatıs seçimi robotun hem yapışma kabiliyetini artırır hem de engel aşma durumundaki hareket karakteristiğini belirler. Bu bağlamda, Neodmiyum mıknatısların yüksek yapışma kuvvetleri, küçük boyutlarda

üretilebilmeleri ve piyasadan tedariklerinin kolay ve ucuz olmaları sebeplerinden ötürü, uygun bir alternatif haline gelmektedir.

Minimum Değerler							
Mıknatıs		Br		Hcj(Hci)		(BH)max	
		mT	G	kA/m	mT	G	kA/m
N27		1,03	10,3	955	12	119	25
N30		1,08	10,8	955	12	223	28
N33		1,13	11,3	955	12	247	31
N35		1,17	11,7	955	12	263	33
N38		1,22	12,2	955	12	287	36
N40		1,25	12,5	955	12	302	38
N42		1,28	12,8	955	12	318	40
N45		1,32	13,2	955	12	342	43
N48		1,38	13,8	955	12	366	46
N50		1,4	14	876	11	382	48
N52		1,43	14,3	876	11	398	50
N30	M	1,08	10,8	1,115	14	223	28
N33	M	1,13	11,3	1,115	14	247	31
N35	M	1,17	11,7	1,115	14	263	33
N38	M	1,22	12,2	1,115	14	286	36
N40	M	1,25	12,5	1,115	14	302	38
N42	M	1,28	12,8	1,115	14	318	40
N45	M	1,32	13,2	1,115	14	342	43
N48	M	1,38	13,8	1,115	14	366	46
N50	M	1,4	14	1,115	14	382	48
N30	H	1,08	10,8	1,355	17	223	28
N33	H	1,13	11,3	1,355	17	247	31
N35	H	1,17	11,7	1,355	17	263	33
N38	H	1,22	12,2	1,355	17	286	36
N40	H	1,25	12,5	1,355	17	302	38
N42	H	1,28	12,8	1,355	17	318	40
N45	H	1,32	13,2	1,355	17	342	43
N48	H	1,37	13,7	1,355	17	366	46
N30	SH	1,08	10,8	1,59	20	223	28
N33	SH	1,13	11,3	1,59	20	247	31
N35	SH	1,17	11,7	1,59	20	263	33

Minimum Değerler							
Mıknatıs		Br		Hcj(Hci)		(BH)max	
		mT	G	kA/m	mT	G	kA/m
N38	SH	1,22	12,2	1,59	20	286	36
N40	SH	1,25	12,5	1,59	20	302	38
N42	SH	1,28	12,8	1,59	20	318	40
N45	SH	1,32	13,2	1,59	20	342	43
N28	UH	1,02	10,2	1,99	25	207	26
N30	UH	1,08	10,8	1,99	25	223	28
N33	UH	1,13	11,3	1,99	25	247	31
N35	UH	1,18	11,8	1,99	25	263	33
N38	UH	1,22	12,2	1,99	25	287	36
N40	UH	1,25	12,5	1,99	25	302	38
N28	EH	1,04	10,4	2,385	30	207	26
N30	EH	1,08	10,8	2,385	30	223	28
N33	EH	1,14	11,4	2,385	30	247	31
N35	EH	1,17	11,7	2,385	30	263	33
N38	EH	1,22	12,2	2,385	30	287	36
N33	VH / AH	1,13	11,3	2,706	34	239	30

Tablo 3.1 Neodmiyum mıknatıs sınıfları ve özellikleri (Br: Artık manyetizasyon, (BH)max: Manyetik enerji yoğunluğu, Hcj(Hci): Demanyetizasyon direnci)

Mıknatısların çekme kuvveti(BH)max ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu sebeple (BH)max değeri en yüksek olan mıknatıslar tercih edilmelidir. Tablo 3.1 incelendiğinde sırasıyla N42, N45, N48 ve N50 sınıfı neodmiyum mıknatısların en yüksek değerleri vermektedir. Burada N45, N48 ve N50 sınıfının daha yüksek manyetik enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen büyük boyutları ve tedarikindeki zorluklar sebepleri ile daha küçük boyutlarda üretilen ve tedarigi çok daha kolay olan N42 sınıfı mıknatıs tipi bu tez kapsamında en uygun alternatif olarak değerlendirilmiştir.

Mıknatısların çekme kuvveti manyetik enerji yoğunluğuna, tutunan yüzeyin alanına, mıknatısın yüzeyden uzaklığına ve mıknatısın boyutlarına bağlı bir

büyüküktür. Bu nedenle robotun yüzeye en iyi şekilde tutunması için mümkün olan en yüksek yüzey genişliğine sahip olması, aynı zamanda ağırlığın duvar tırmanma esnasında önemli bir parametre olması nedeniyle de kalınlığının mümkün olduğunca düşük olması gerekmektedir. Bu sebeple yapılan piyasa araştırması sonucunda yüzey alanı-kalınlık oranı en yüksek olan 10x10x1 mm boyutlarında N42 sınıfı mıknatıslar duvar tırmanıcı robot için tercih edilmiştir.

### 3.1.2 Mıknatıs Testleri

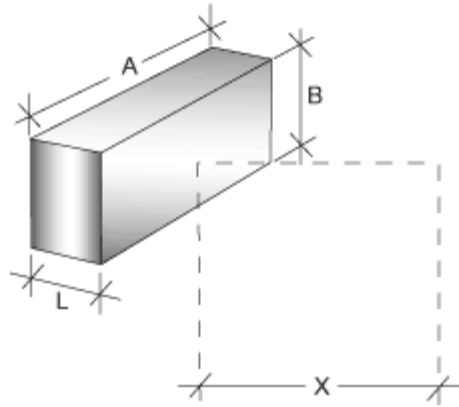
Mıknatıs performansının robotun tırmanma performansına etkisi çok büyüktür, bu sebeple seçimi gerçekleştirilen mıknatıs tipinin karakterize edilmesi gerekmektedir.

#### 3.1.2.1 Mıknatıs Çekme Kuvveti Testi

##### Teorik Çekme Kuvveti ve Akı Yoğunluğu

Mıknatısların teorik olarak manyetik kutup bölgesinden 'x' uzaklığına bağlı olarak makul bir manyetik akı yoğunluğu ve çekme kuvveti hesaplarını yapmak mümkündür. Bu hesaplama aşağıdaki denklemler yardımı ile yapılabilir.

Dikdörtgen malzeme için akı yoğunluğu;

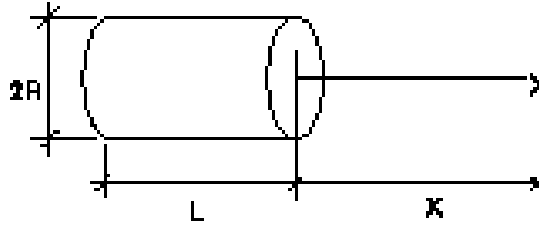


Şekil 3.1 Dikdörtgen prizması mıknatıslar için akı yoğunluğu

$$B_x = \frac{B_r}{\pi} \left( \tan^{-1} \frac{AB}{2x\sqrt{4x^2 + A^2 + B^2}} - \tan^{-1} \frac{AB}{2(L+x)\sqrt{4(L+x)^2 + A^2 + B^2}} \right) \quad (3.1)$$



Silindirik malzeme için akı yoğunluğu;



Şekil 3.2 Silindirik mıknatıslar için akı yoğunluğu

$$B_x = \frac{B_r}{\pi} \left( \frac{L + x}{\sqrt{L^2 + (L + x)^2}} - \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right) \quad (3.2)$$

Çekme Kuvveti;

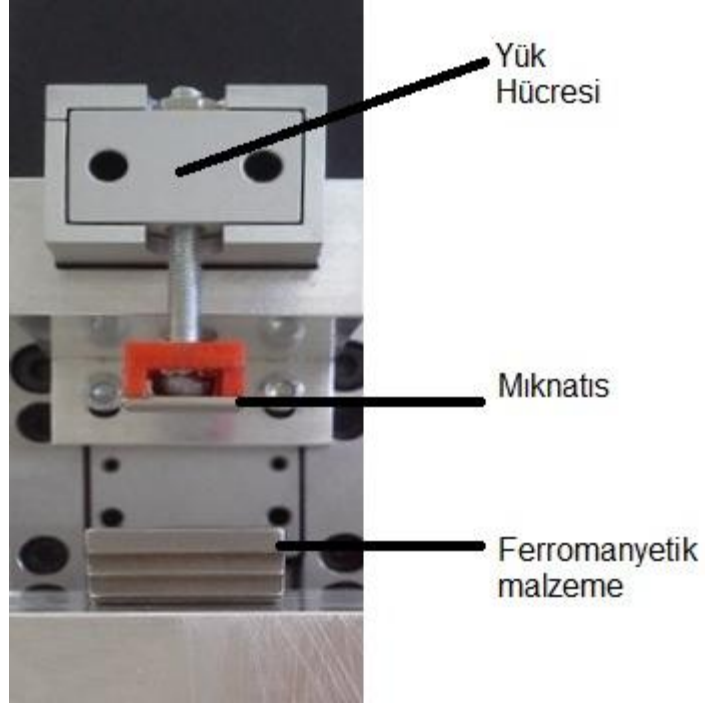
$$F_{tm} = 0.577B^2A \quad (3.3)$$

### Mıknatıs Çekme Kuvveti Testi

Çekme kuvveti testi robotun yüzey ile arasında oluşacak yapışma kuvvetlerinin öngörülmesi ve tasarımın bu öngörüye göre yapılmasını sağlamak için gereklidir.

Mıknatıslar yapıştıkları yüzey ile aralarında bir bağlantı kuvveti oluştururlar. Bu bağlantı kuvveti yüzey ile mıknatıs arasındaki uzaklık büyüdükçe doğrusal olmayan şekilde azalmaya başlar. Bu özellik yüzey üzerinde bulunabilecek değişik kalınlıklardaki boya, pas vb. aralayıcı malzemeler sebebi ile yüzeye yapışma kuvvetini azaltmakta ve dolayısıyla kullanılması gereken mıknatıs sayısını artırmaktadır. Bu durumu tasarım aşamasında öngörmek ve tasarımı bu verilere dayanarak gerçekleştirmek gerekmektedir.

Bu sebeple mıknatısın yüzeyden olan uzaklığının yapışma kuvvetine olan etkisi laboratuvar ortamlarında gerçekleştirilecek testlerle karakterize edilmelidir.



Şekil 3.3 Çekme kuvveti test düzeneği

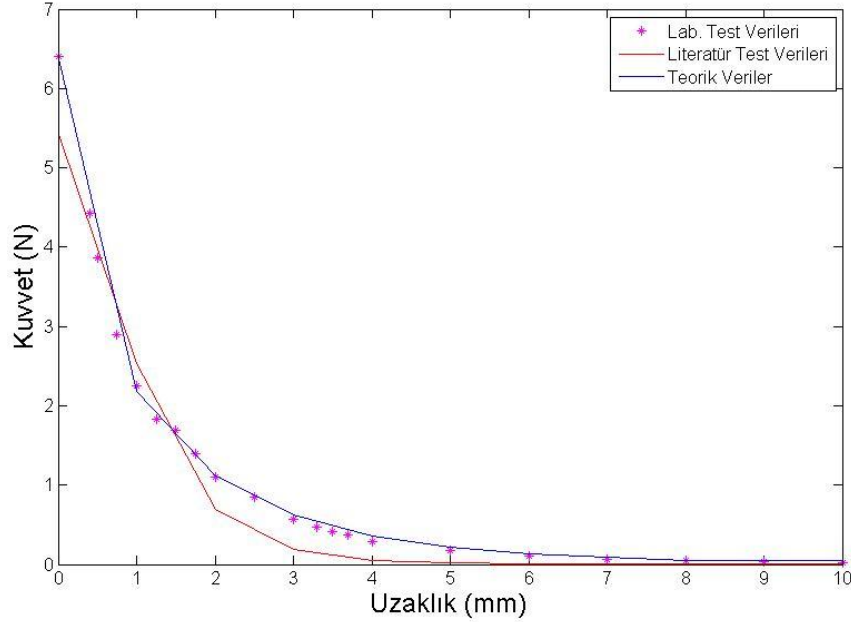
Test düzeneği Şekil 3.3 'de görülen bir vida yardımı ile düzeneğe bağlanan bir mıknatıs, mıknatısın alt tarafına yerleştirilmiş ferromanyetik bir malzeme ve mıknatıs kuvvetlerini ölçen 500 gr.lık bir yük hücresinden oluşmaktadır.

Test düzeneği, mıknatıs ve vida gibi elemanların ağırlıkları bu elemanlar sisteme yerleştirildikten sonra kalibre edilerek sıfıra indirgenmiştir. Bunun yanında çekme işleminde aparat olarak kullanılan akrilik bağlantı elemanı 69 Mpa çekme dayanımı ile mıknatısa bağlı olduğu alan da göz önünde bulundurulduğunda 2790 N değerinde bir çekme kuvvetine karşı koyabilecek kapasitededir. Bu aparatın yapıştırıldığı yapıştırıcı ise 24.5 Mpa çekme dayanımına karşı koyabilmekte ve bu da yapıştırılan yüzeyin büyüklüğü göz önüne alındığında 980 N değerinde bir kuvvete karşı koyabilmektedir. Mıknatısın çekebileceği maksimum çekme kuvvetinin 6.5 N olması sebebi yapıştırıcının çekme kuvvetinin sadece %0.66'sı kadardır. Bu sebeple hem akrilik malzemenin hem de yapıştırıcının rijit olduğu kabul edilebilir.

	Çekme dayanımı	En küçük alan	Çekme kuvveti
Akrilik	69 Mpa	40 mm <sup>2</sup>	2760 N
Yapıştırıcı	24.5 Mpa	40 mm <sup>2</sup>	980 N
Mıknatıs	0.065 Mpa	100 mm <sup>2</sup>	6.5 N

Tablo 3.2 test düzeneğinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Test, denklem 3.1'de görüldüğü üzere mıknatısı 10 mm uzaklıktan, mıknatıs 1mm/dak. quastatik hız ile ferromanyetik malzemenin yüzeyine değinceye kadar yaklaştırılmasını esas almaktadır. Bu yaklaşım sırasında kuvvet sürekli artar ve her 0,2 mm de bir değer okunur. Neticesinde teorik verilerle test verilerinin karşılaştırıldığı bir grafik elde edilir. Buna ek olarak testin doğruluğu, teorik verilerle literatürdeki testler arasındaki farkların ölçülmesi amacı ile çıkan değerlerin karşılaştırıldığı bir grafik çizilir.



Şekil 3.4 Çekme testi verileri, teorik çekme kuvveti ve literatür çekme testi karşılaştırılması

Uzaklık	Teorik veriler (mN)	Labratuar test verileri (mN)	Teorik veriler & Lab. Test Verileri % farkı
10	0.5	23.26	%97,85
9	0.9	32.48	%97.22
8	1.7	46.45	%96.34
7	3.6	68.62	%94.75
6	8	105.96	%92.44
5	19.8	171.12	%88.42
4	56.1	291.97	%80.78
3	184.3	574.32	%67.90
2	690.9	1095.68	%36.94
1	2530.7	2255.14	%10.88
0	5437.6	6400	%15,03

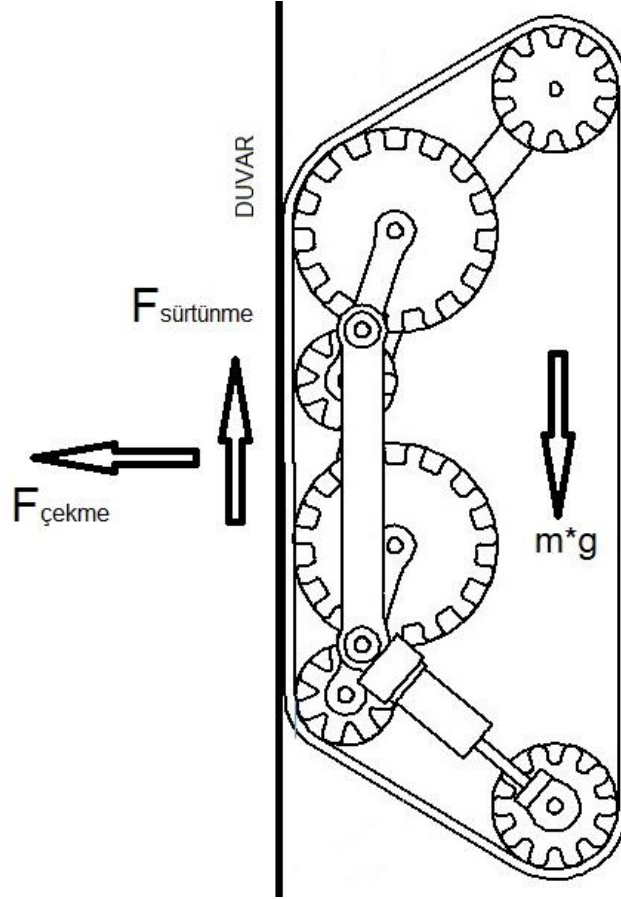
Tablo 3.3 Literatür ve labaratuar test verilerinin karşılaştırılması

Elde edilen test sonuçları neticesinde ortaya çıkan grafik (Şekil 3.4) test verileri ve literatür testlerinin arasındaki farkları göstermekte ve yine grafiğe göre test verileri hem teorik hem de literatürdeki test değerlerine çok yakın değerler ortaya koymaktadır. Teorik değerlerde mükemmel ortam şartlarına göre bir hesaplama yapılmış olması ve test aşamasında bu ortam şartlarına erişilememesi sebebi ile sonuçlar doğru kabul edilebilir niteliktedir.

### 3.1.2.2 Mıknatıs Kayma Kuvveti Testi

Duvara tırmanan robotlar tırmanma sırasında yerçekiminin etkisi ile tırmandığı yüzeye paralel bir kayma kuvvetinin etkisi altında kalır. Sürtünme katsayısının yeterli olmadığı durumlarda yüzeyden kayar ve tırmanma başarısızlıkla sonuçlanmış olur. Bu sebeple kayma testi gerçekleştirilmelidir. Mıknatısın çekme kuvveti eksenine dik yönde uygulanan kuvvetlerde mıknatısın yüzeyde kayma yönünde tutunabilme kabiliyetinin ölçülmesini hedefler.

Genellikle iki metal yüzeyin birbirine temas ettiği göz önünde bulundurulursa sürtünme katsayısına bağlı olarak kayma direncinin de düşük olması beklenir. Dolayısıyla mıknatısın en kritik noktası kayma direncinin oluşacağı robotun dik yüzeylere tırmanacağı durumdur. Bu sebeple kayma testi, duvar tırmanan robot tasarımında mıknatıs sayısı ve boyutlarını belirlemede çok önemli bir etkidir.



Şekil 3.5 Kayma kuvveti ve sürtünme katsayısı

$$F_{\text{sürtünme}} = F_{\text{çekme}} \mu = mg \quad (3.4)$$

(3.4) denkleminde anlaşılabileceği gibi robotun 90°'lik dik yüzeylere tırmanması sırasında duvarda kaymadan durabilmesi ve hareket sırasında yerçekimine karşı koyabilmesini sağlayan kuvvet  $F_{\text{sürtünme}}$  kuvveti olmaktadır. Sürtünme kuvveti de direkt olarak sürtünme katsayısı  $\mu$  ve  $F_{\text{çekme}}$ 'ye bağlıdır.

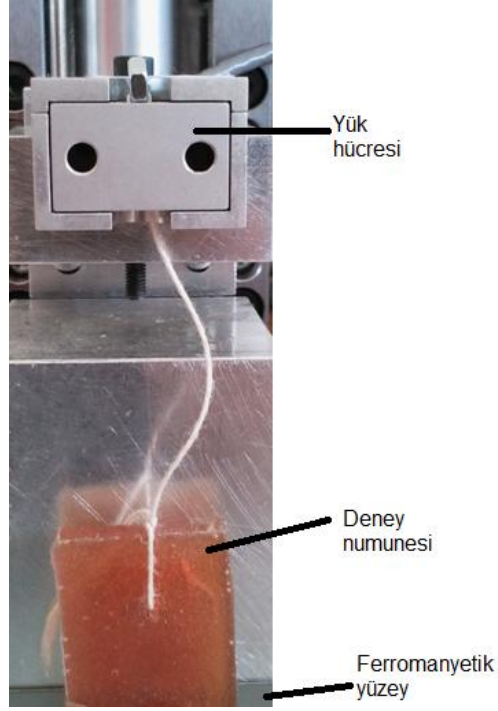
Metal metal sürtünmesinin düşük olması sebebi ile mıknatıs üzerine kaplama denemeleri yapılır ve kaplamasız bir başka numune ile karşılaştırılır.

Mıknatıs önce kendi yüzeyi direkt temas edecek şekilde, daha sonra da ince bir film tabakası şeklinde üretilmiş, elastik ve sürtünme katsayısı yüksek olan Vytaflex@10 malzemesi ile 1 mm kalınlığında kaplanarak test edilir.

Test düzeneği üç ayrı bölümden oluşmaktadır. Bunlar; 500 gr kapasitede bir yük hücresine sahip çekme cihazı, çekme cihazına yerleştirilmiş ferromanyetik bir malzeme, paletin üretildiği Vytaflex@10 malzemesi, üzerine gömülmüş bir adet N42 sınıfı neodimium mıknatıs ve mıknatıstan oluşan bir çekme numunesi şeklinde sıralanabilir.

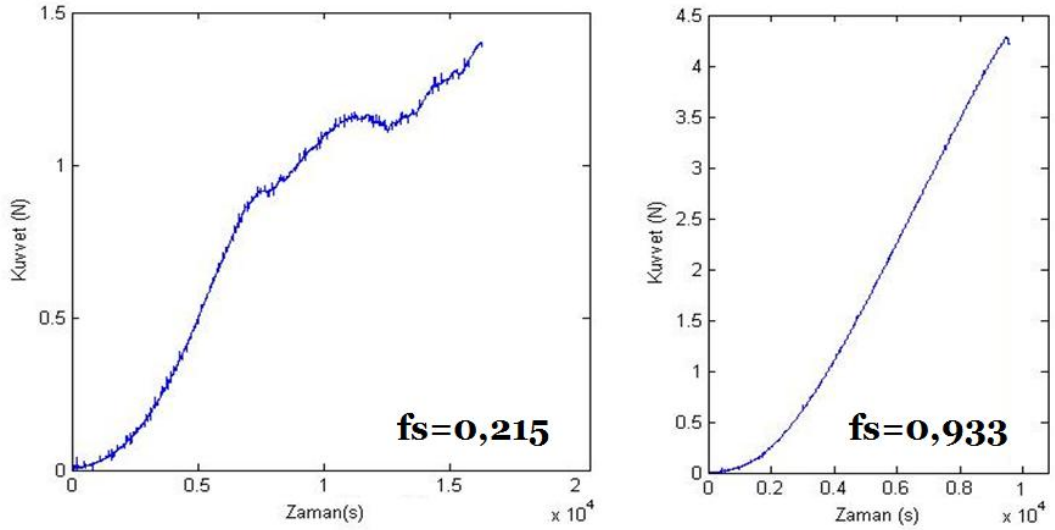
Test sırasında palet için kullanılan Vytaflex@20 malzemesi için bir deney numunesi hazırlanmış ve bir ip yardımı ile kayma kuvveti numuneye uygulanmıştır. İpler bağlandığı noktalarda lokal gerilmeler ile eksende olabilecek mm ve altı sapmalardan dolayı sisteme çok az miktarda moment uygulamaktadırlar, bunlara ek olarak zemin üzerinden etkiyen kuvvetler, malzemenin kalınlığı oranınca zemine yine bir moment uygulamakta ancak bu miktar da yine çok küçük olduğu için ihmal edilmektedir.

Test, ferromanyetik yüzeyin çekme eksenin dik olarak yerleştirilip üstüne mıknatıs için üretilen numunenin yapıştırılması ve bu numunenin kayma ekseninde bir yük hücresi yardımı ile sabit hızla çekilmesi ile yapılır. Bu test aşamasında mıknatıs statik sürtünme kuvvetinin yenilmesine kadar hiç hareket etmeyecek ve harekete başlamadan hemen öncekayma kuvveti en yüksek sınıra ulaşacaktır.



Şekil 3.6 Kayma kuvveti test düzeneği

Sonuç olarak test numunesi hem kaplamalı hem de kaplamasız kayma yönünde çekilerek elde edilen test sonuçları karşılaştırılır.



Şekil 3.7 Kaplamasız mıknatıs (solda) ve kaplamalı mıknatıs (sağda) kayma kuvveti grafikleri

Yapılan testler neticesinde statik durumda vytaflex@10 malzemesinin mıknatısın kayma kuvvetini 3 kat artırdığı görülür. Bu da dik duvarlara

tırmanırken daha küçük bir robot tasarımı ve daha az mıknatıs kullanımına olanak sağlamaktadır.

Mıknatısın uzaklığa bağlı çekme kuvveti testine ait grafik Şekil 3.4'de görülebilir. Buradan alınan test verilerine göre yapılan bir eğri uydurma yöntemi yardımı ile çekme kuvvetinin uzaklığa bağlı değişimini veren bir denklem çıkarılır (3.5).

$$F_{\text{çekme}} = 3,432e^{-2,105x} + 2,968e^{-0,5208x} \quad (3.5)$$

Bu denkleme göre 0,5 mm kalınlığında uygulanan kaplama sonrasında yapılan hesaplama göre;

$$x = 0,5 \text{ mm} \quad (3.6)$$

$$F_{\text{çekme(kaplamalı)}} = 3,432e^{-2,105 \cdot 0,5} + 2,968e^{-0,5208 \cdot 0,5} = 3,48 \text{ N} \quad (3.7)$$

$$F_{\text{çekme(kaplamasız)}} = 3,432e^{-2,105 \cdot 0} + 2,968e^{-0,5208 \cdot 0} = 6,4 \text{ N}$$

$$F_{\text{kayma(kaplamalı)}} = 4,2 \text{ N} \quad (3.8)$$

$$F_{\text{kayma(kaplamasız)}} = 1,4 \text{ N} \quad (3.9)$$

Kayma kuvvetindeki olumlu değişim (3.6) ve(3.7) denklemlerinde görüldüğü gibi dik yöndeki çekme kuvvetine olumsuz bir etki oluşturmakta ve bu da çekme kuvvetini %45 oranında düşürmektedir. Sürtünme katsayısındaki değişim Şekil 3.7'de görülmektedir. Ancak bu düşüş robotun 180° açıda hareketi sırasında robotun ağırlığına herhangi bir etki yaratmamakta aksine 90° açıda hareketi sırasında kayma kuvveti ve çekme kuvveti dengelendiğinden olumlu bir etki yaratmaktadır. Çekme kuvvetindeki düşüş özellikle mıknatısın ayrılma kuvvetini doğrudan etkilemekte bu da motorun enerji sarfiyatını azaltmaktadır.

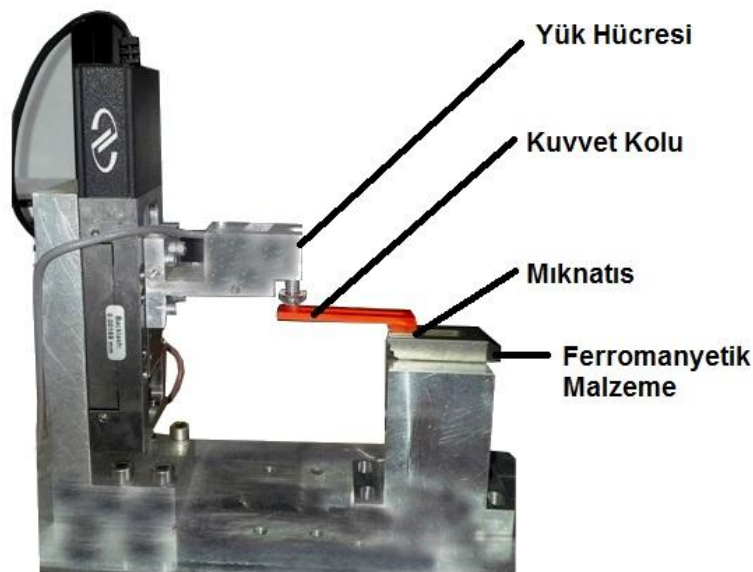
Burada kayma ve çekme kuvvetlerinin dengelenmesi yani çekme kuvvetinin kayma kuvvetine eşit olduğu nokta optimum sonucu verecektir. Bu amaçla bu iki kuvvetin mümkün mertebede eşit veya birbirine çok yakın değerlerde olması istenir. 0,5 mm değerinin altındaki kalınlıklarda bir kaplama yapılması imkânlar dâhilinde olmadığından olabilecek minimum kalınlıkta bir kaplama yapılır.



### 3.1.2.3 Mıknatıs Ayrılma Testi

Manyetik çekim kuvvetlerini kullanan bir tırmanan robot tasarlarken en önemli kısıtlardan birisi manyetik malzemenin yüzeylere ne kadar kuvvet uygulayabildiği ve bu kuvvetin pratikte ne kadarlık bir ağırlık taşıdığıdır. Bu tasarımda sadece yapışma mekanizmasının tasarımında yeterli bir veri olabilmekte ancak hareket mekanizması tasarlanırken manyetik malzemenin yapışma kuvveti kadar ayrılma direnci de büyük önem arz etmektedir. Burada paletli sistemin üzerine yerleştirilen mıknatısların yüzeyden ayrılırken oluşturduğu direnç doğrudan motor üzerinde bir etki yaratmaktadır. Dolayısıyla motor torkunun ayrılma direncinden büyük tutulması gerekmektedir. Bu gereklilik daha büyük bir motor ve daha ağır bir mekanizmayı da beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla mıknatıslar yüzeyden minimum ayrılma direnci ile ayrılmalı ancak tırmanma sırasında maksimum yapışma kuvvetini oluşturmalıdır.

Tüm bu gereklilikler dâhilinde bir test düzeneği hazırlanır ve bu düzeneğe ile mıknatısa belirli uzaklıklarda kuvvetler uygulanarak (moment) yüzeyden ayrılma kuvvetleri bulunabilir. Buradaki asıl amaç mıknatısın bir kuvvet koluyla mı yoksa tek başına mı palet içerisine yerleştirilmesi gerektiğinin anlaşılmasıdır. Çünkü rijit bir kuvvet kolu yardımı ile azaltılabilen ayrılma kuvveti aynı zamanda palette esneklik kaybına yol açar ve bu da engel aşma kabiliyetini olumsuz etkiler.



Şekil 3.8 Ayrılma Test Düzeneği

Hazırlanan test düzeneği; mıknatıs üzerine bağlanan bir akrilik malzeme (kuvvet kolu), mıknatısın üzerine yapışacağı ferromanyetik bir malzeme ve 500 gr. kapasiteli bir yük hücresinden oluşmaktadır. Mıknatıs üzerine akrilik malzemeden yapılmış kolun yapıştırılması 'Devcon Plastic Welder' adında, mıknatısın çekme kuvvetinden çok daha yüksek çekme dayanımına sahip bir yapıştırıcı ile sağlanır. Yapıştırıcıya ait özellikler aşağıda verilmiştir.

- Sert plastik, stiren, PVC, akrilik, seramik, beton, fiberglas, metal, ahşap, vinili yapıştırabilir
- Çekme Mukavemeti:  $245 \text{ kg/cm}^2$  (24.5 Mpa) dir
- Sıcaklık Aralığı:  $-5^\circ\text{C}$  ile  $95^\circ\text{C}$  aralığında
- Yoğunluğu:  $1.185 \text{ gr/cm}^3$
- Kullanılan aparatın ağırlığı: 1.17 gr.

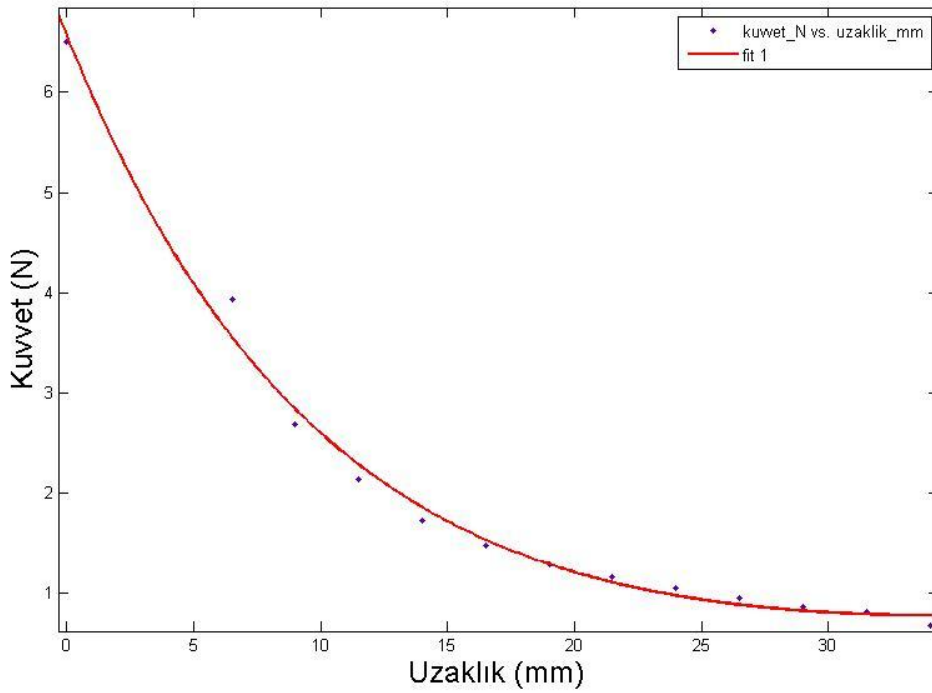
Testlerde aparatların yapıldığı malzeme olan akriliğin mekanik özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Çekme dayanımı: 69 Mpa
- Eğilme dayanımı: 114 Mpa
- Basma dayanımı: 124 Mpa
- Kayma dayanımı: 62 Mpa
- Sertlik: Rockwell M-94

Hem yapıştırıcı hem de akrilik malzemenin mekanik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda yapıştırıcı tablo 3.2' de görüldüğü gibi mıknatısın çekme kuvvetinin 150 katı civarında bir değer vermekte ve bu da test için kabul edilebilir bir güvenlik faktörünü beraberinde getirmektedir. Akrilik malzemenin de hem çekme hem eğilme dayanımı yapıştırıcınının 2.8 katı olmakta ve bu da aynı

şekilde rijit kabul edilebilir. Akrilik malzemenin ağırlığı sebebi ile etki eden kuvvet ise 0,011 N civarında olup ağırlığı ihmal edilebilir.

Test 40 mm uzaklık ile başlayarak en son mıknatısın çekme kuvveti merkezine kadar uygulanan basma kuvvetleri ölçülerek yapılır. Bu basma kuvvetlerinin en yüksek olduğu değerler okunarak bir grafik elde edilir. Bu şekilde çeşitli uzaklıklar için gerekli ayrılma kuvvetleri saptanabilir.



Şekil 3.9 Ayrılma kuvveti test verileri

Sonuç olarak manyetik malzemenin uzaklığa bağlı yüzeyden ayrılma direncinin doğrusal olmayan bir yapıda olduğu bulunmuş olur. Mıknatıs merkezine 15 mm uzaklığa kadar çok büyük artışlar gözlemlenmezken 15 mm'nin altındaki uzaklıklarda ciddi artışlar olmaktadır.

Bu grafik yardımı ile mıknatıs üzerine yerleştirilebilecek kuvvet kolu boyutları ve bu boyutlarda ne kadarlık bir ayrılma kuvvetinin oluşacağını hesaplayan bir eğriden denklem çıkarılır.

$$F_{ayrılma} = 5,949e^{(-0,1107x)} + 0,6323e^{(-0,003273)} \quad (3.10)$$

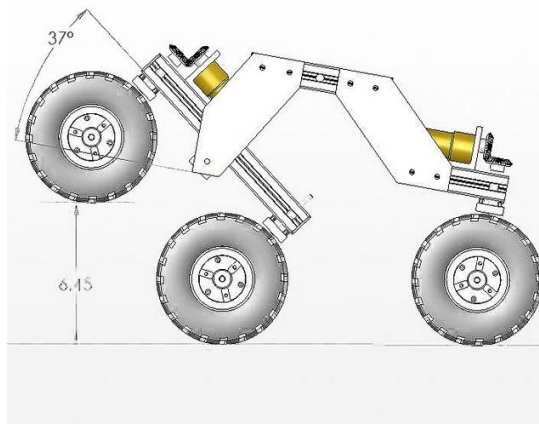
## 3.2 Süspansiyon Tasarımı

### 3.2.1 Süspansiyon Seçimi

Süspansiyon tasarımı robotun engel aşma kabiliyeti ve titreşimlerin azaltılması için önemlidir. Süspansiyon sisteminin amacı engebelerden kaynaklı darbelerin mümkün olduğunca sönmelenmesini sağlamaktır. Aksi takdirde, robot rijit bir yapıda olur ve önüne çıkan çok küçük bir düzensizlikte dahi yüzeyden ayrılıp tırmanma kabiliyetini yitirebilir.

Bu tip araçlarda kullanılan yaylı veya amortisörlü süspansiyon tasarımları bir engelle karşılaştığındasıkıştırma oranına bağlı olarak bir miktar ters kuvvet oluşturmakta ve bu durum da robotu yüzeyden ayırmaya yönelik bir etken olmaktadır. Bu sebeple süspansiyon tasarımında mümkün olduğunca birbirinden bağımsız hareket edebilen ve engel aşma sırasında ters kuvvet uygulamayacak bir sistem tasarımını gerektirmektedir.

Literatürde bu şartları sağlayan ve robota uygulanabilecek iki adet süspansiyon şekli bulunmuştur. Bu sistemlerde işlem yapan robotlarda sıklıkla kullanılan amortisör ve yay gibi elemanları üzerinde barındıran bir sistemdir. Bir diğeri ise genellikle uzay araçlarında kullanılan ve amortisör, yay vb. gibi herhangi bir süspansiyon elemanına ihtiyaç duymayan Rocker-Bogie sistemidir.



Şekil 3.10 Rocker Bogie süspansiyonu için bir örnek



Şekil 3.11 Normal süspansiyon elemanları

	Engel aşma kabiliyeti	Ters kuvvet oluşumunu	Mekanizma basitliği	Kontrol kolaylığı	Esneklik	Toplam
<b>Normal Süspansiyon</b>	0	0	0	1	0	1
<b>Rocker-Bogie</b>	1	1	1	0	1	4

Tablo 3.4 Rocker bogie ve normal süspansiyonun karşılaştırılması

Tablo 3.4’de yapılan karşılaştırma neticesinde bu tez kapsamında Rocker-Bogie sisteminin duvar tırmanan robot için iyi bir alternatif olduğu düşünülmüştür.

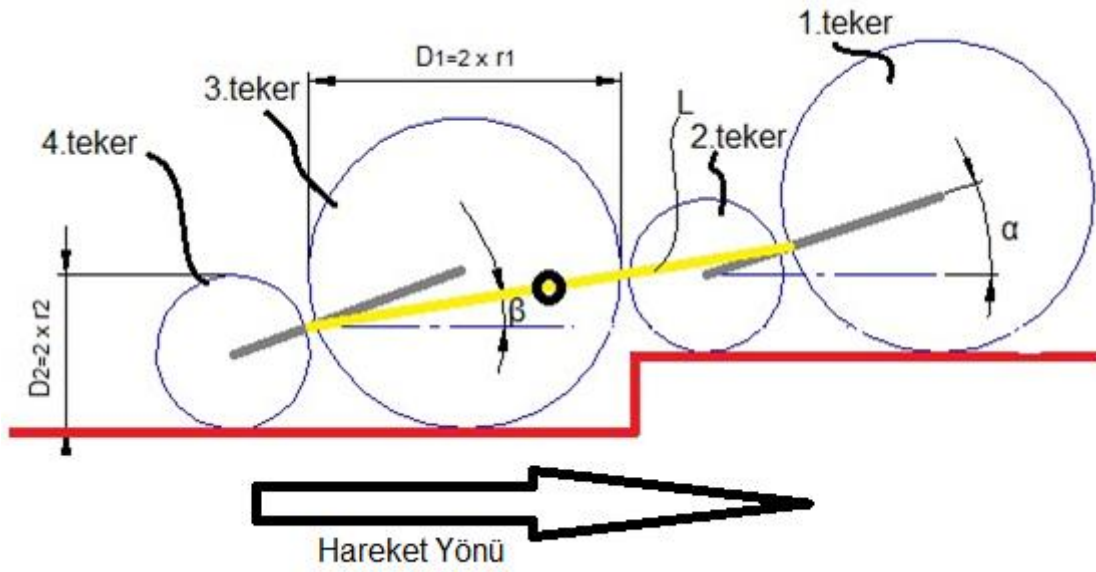
### 3.2.2 Rocker-Bogie Tasarımı

Bu tez kapsamında geliştirilecek olan robot operasyon sırasında, vida başı, somun, perçin vb. 1-2 cm boyutlardaki engelleri aşabilmelidir. Bu engel boyutlarını aşabilecek Rocker-Bogie sistemi tasarımı yapılması gereklidir. Tasarımda iki önemli kistas mevcuttur. İlki; ön kısımda yer alan bogie'nin

engelin üzerine çıktığında arkadan gelen bogie kolundan daha küçük bir açı yapması gerekmektedir. Aksi takdirde 3. teker engele geldiğinde ana gövde 4. tekerin havaya kalkmasına sebep olacaktır (Şekil 3.12).

İkincisi ise; engel aşımı sırasında karşılaşılan engelin manyetik yüzeyden ayrılmasını engellemek amacı ile engeli kavrayıp geçmesi gerekmektedir. Bu sebeple tekerler birbirlerine mümkün olduğunca yakın olmalıdır.

### 3.2.2.1 Rocker-Bogie Hesaplamaları



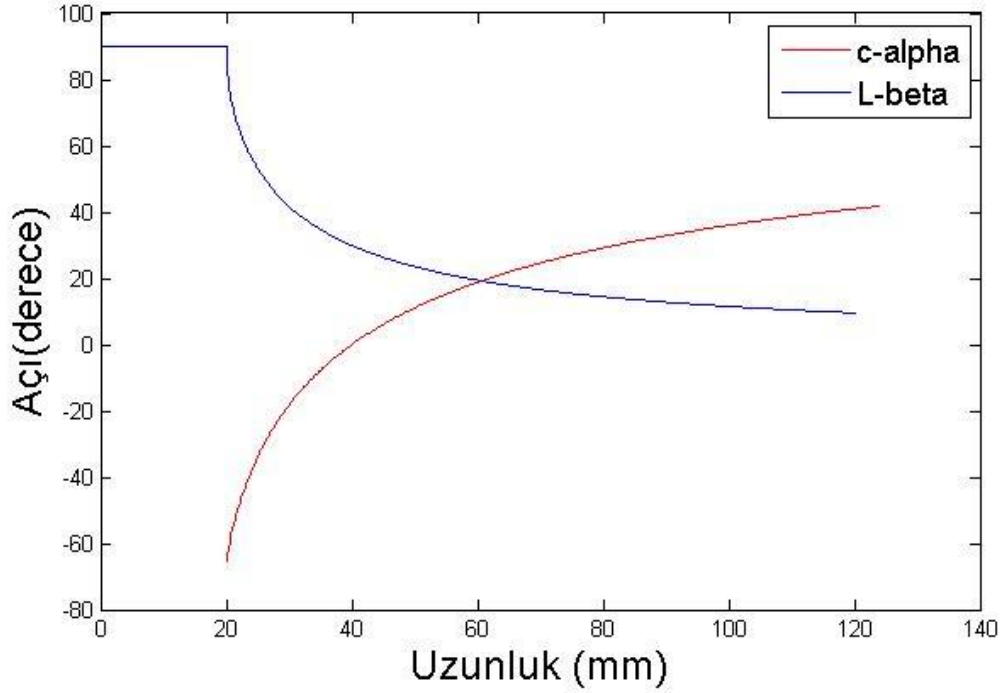
Şekil 3.12 Rocker-bogie hesaplamaları

$$\alpha = \arcsin((r_1 - r_2) / (r_1 + r_2 + 1)) \quad (3.11)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{20}{L}\right) \quad (3.12)$$

Şekil 3.12 'de görüldüğü üzere  $\alpha < \beta$  olduğu durumda ortada görünen sarı kol üzerinde etki eden kuvvet sebebi ile 'y' yönünde bir kuvvet oluşur ve bu da 4. tekerin yukarı kalkmasına ve yüzeyden ayrılmasına sebep olur. Bu sebeple Denklem (3.11) ve (3.12)'de verilen  $\alpha$  ve  $\beta$  değerleri arasında  $\alpha > \beta$  bağıntısı olmalıdır. Bu koşulları yerine getirebilecek sistemin tasarımı için bir Matlab kodu yazılmıştır.

Yapılan hesaplamada bazı değerlerin sisteme önceden girilmesi gerekmektedir. Bu kısımda da tasarım sınırlarına bağlı olarak bir tekerin ve tekerleri birbirine en yakın hale getirecek sistem göz önüne alınarak belli değerler verilmelidir. Hesaplamada tekerler arası 1 mm mesafe kalacak ve küçük tekerin ( $r_2$ ) yarıçapının 10mm nin altına inemeyeceği bir durum için diğer uzun boyutları hesaplanmıştır.



Şekil 3.13 Rocker bogie uzuv boyutları grafiği

Şekil 3.13'de görüldüğü gibi iki grafiğin birbiriyle kesiştiği nokta sistemin tekerlerinin birbirine en yakın olabileceği ve sistemin en küçük boyutlarda çalışabileceği ölçüleri verdiği durumdur. Bu noktadan sonraki herhangi bir değerde sistem düzgün çalışır. Robot boyutlarını minimize etmek ağırlık açısından büyük bir avantaj sağlayacağı için sistemin optimize olduğu noktanın tasarım için kullanılması uygun olacaktır.

Yapılan hesaplama sonuçlarına göre;

$$r_1 = 10 \text{ mm} \quad (3.13)$$

$$r_2 = 20,3 \text{ mm} \quad (3.14)$$

$$L = 61.6 \text{ mm} \quad (3.15)$$

Sonuçları elde edilir ve bu sonuçlar neticesinde süspansiyon sistemi tasarlanarak robot üzerine montajı sağlanır.

### **3.3 Palet Üretimi**

Palet robotun hareketini ve yüzeyle bağlantısını sağlayan tek elemandır. Aynı zamanda paletin esnekliği robotun engel aşma kabiliyetini doğrudan etkileyen bir etkidir. Bu sebeple palet mümkün olduğunca esnek ve mıknatısların montajına uygun olmalıdır. Bunların yanında paletin tekerler ve dişlilerin üzerinde kalabilmesini sağlayacak tasarım yapılmalıdır.

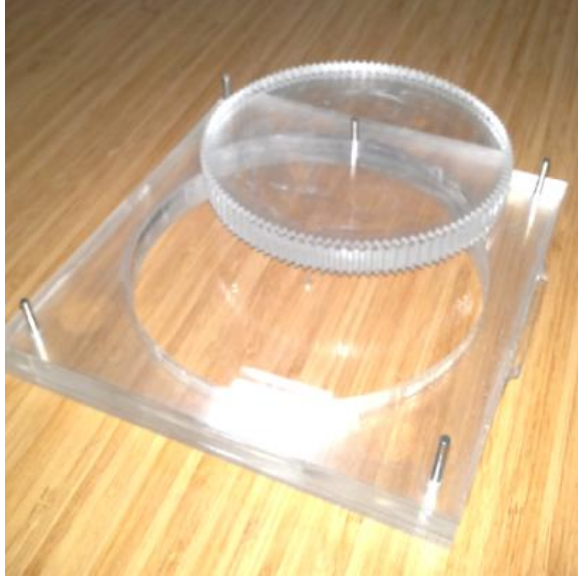
#### **3.3.1 Palet Üretimi**

Palet üretimi için sertlikleri çok düşük olan Vytaflex-10 (shore sertliği A10) ve Vytaflex@20 (shore sertliği A20) malzemeleri denenmiştir.

Dökülen paletlerde triger dişlisinde T5 standardı uygulanmıştır. Bunların yanında Vytaflex@10 ve Vytaflex@20 malzemesinin boyundaki değişimleri önlemek ve mıknatısları palet içerisinde sabit tutabilmek için tekstil bir malzeme kalıp içerisine yerleştirildikten sonra döküm yapılmıştır. Döküm yapılan kalıp Şekil 3.14'de görülmektedir.

Temin edileen bu iki malzemenin palet için uygulanabilirliği ve esneklik kabiliyeti açısından testleri 2 ayrı şekilde yapılmıştır. Öncelikle yalnız Vytaflex@20 ile döküm yapılmış ancak malzemenin yeterince esnek olmaması ve mıknatısların palete gömülmesi gibi işlemlerden ötürü döküm sırasında 7 mm kalınlığın altında bir üretime olanak veremez. Bu sebeple paletin esnekliği bir miktar daha düşer. Tüm bu sebeplerden, bu malzemenin robot için yeterli çalışma imkânlarını sağlayamadığı görülür.





Şekil 3.14  
Palet Üretim kalıbı

Ardından iki malzemenin bir arada olduğu bir döküm denemesi yapılmıştır. Bu denemede orta kısımda esneklik kabiliyeti Vytaflex@20'ye göre daha iyi olan Vytaflex@10 malzemesi orta kısma, daha sert ve daha az esnek olan Vytaflex@20 malzemesi ise kenarlara dökülmüştür. Buradaki amaç; yanların rijitliğinin, toplam sistemi de rijitleştireceği ve paletin dışına çıkmayacak minimum sertliği sağlamaya çalışarak maksimum esneklik sağlamaktır.



Şekil 3.15 Vytaflex@10 ve Vytaflex@20 hibrid dökümü

Tüm bu işlemler neticesinde Şekil 3.15'de görülen palet üretilmiş ancak malzeme yumuşaklığı ve dış boyutlarının mukavim olamaması sebebi ile motora bağlı olan triger dişlisi motor torkunu palete iletememiştir. Aynı zamanda kenarlarda oluşturulan yükseltiye rağmen palet tekerlerden kurtulmuştur.

Daha sonra piyasada satılan robot kitleri için tasarlanmış olan bir paletlerin denenmesine karar verilmiştir. Bu paletler temin edilerek vytaflex@10 malzemesi ile kaplanmış ve mıknatıslar palete gömülmüştür (Şekil 3.16).

Palet üretimi sırasıyla aşağıdaki işlemleri içerir.

- Hazır alınan paletin uygun boyutlarda kesilmesi,
- Mıknatısların hazır alınan palet üzerine uygulanabilmesi ve mıknatısların arasındaki mesafenin eşit dağıtılması için tekstil bir malzemenin kullanılarak mıknatısların tekstil malzeme üzerine belirli aralıklarla yapıştırılması,
- Mıknatıslar ve tekstil malzemenin oluşturduğu yapının palet üzerinde birleştirilmesi,
- Paletler üzerinde tam birleşmenin sağlanması ve mıknatıs yüzeylerinin kaplanması amacı ile vytaflex@10 ile kaplama yapılması

Bu işlemler neticesinde elde edilen paletler kullanıma hazır hale gelmekte ve robota montajlanmaktadır.



Şekil 3.16 Üretilen palet

Üretim neticesinde ortaya çıkan palet stabil bir hareketin yanı sıra paletin kayma ve tekerleklerden kurtulma sorununu da engellemiş, ancak mıknatısların rijit yapısı nedeniyle esneklik kabiliyeti azalmış ve engel aşma esnasında bir dezavantaj oluşturmuştur.

### 3.4 Ana Gövde Tasarımı

#### 3.4.1 Ana Gövde Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Esaslar

Bütün bileşenlerin bir tasarım üzerinde toplanmasını sağlayan ana gövde elektronik bileşenleri, bataryayı ve motorları üzerinde barındırdığı gibi aynı zamanda da palet, teker ve boogie gibi elemanları yataklamaktadır.

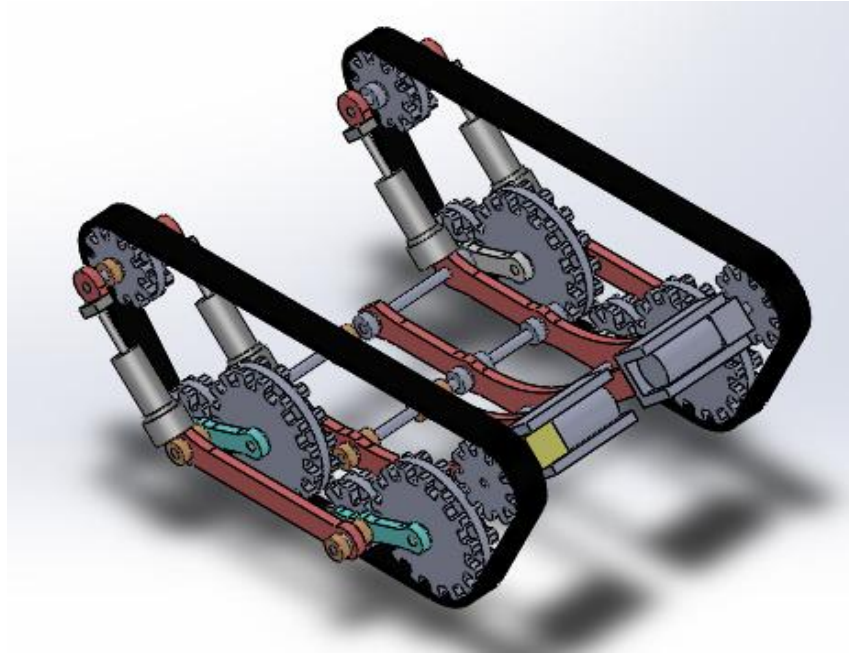
Ana gövde tasarımında öne çıkan önemli parametreler aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Engel aşma sırasında robot rijit bir yapıya sahipse engel üzerine çıkıldığında robotun tamamı yüzeyden ayrılır ve bu sebeple yapışma kabiliyetini kaybeder. Bu sebeple robot esnek bir yapıda olmalı ve Rocker-Bogie sisteminin esnekliğine herhangi bir engel teşkil etmemelidir.

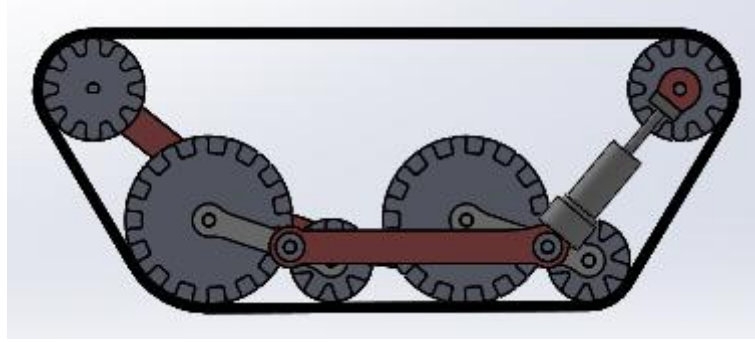
- Robot tırmanış sırasında yerçekimine karşı bir iş yapar ve bu işin büyüklüğü ağırlıkla doğru orantılı olarak artar. Asgari düzeyde enerji sarfiyatı için robot asgari ağırlıkta olacak şekilde tasarlanmalıdır.
- Robotun sürekli yüzeyde kalması için mümkün olduğunca parçalı (eklemlı) bir yapıya sahip olmalıdır. Bu şekilde robot engel aşma sırasında bir nokta engelin üzerinde iken diğer bölümler (eklemler) yüzey ile temasını sürdürür.

### 3.4.2 Ana Gövde Bileşenleri ve Tasarımı

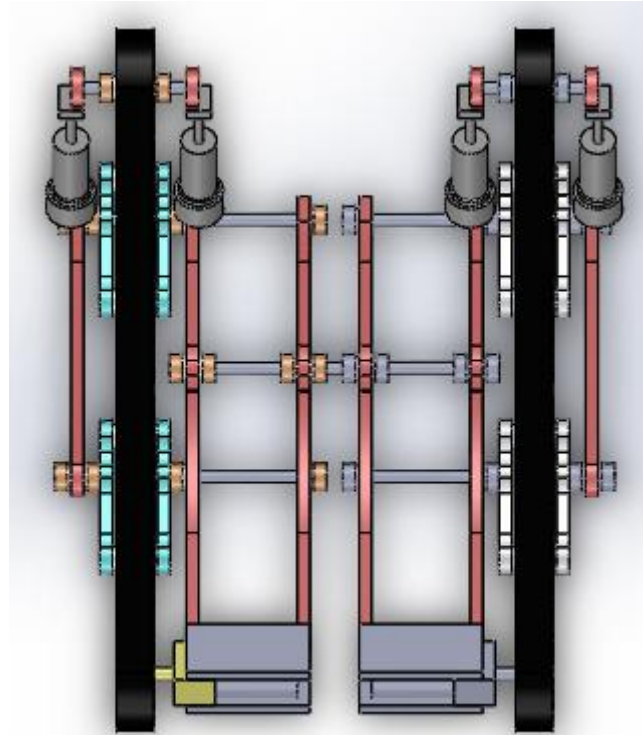
Tasarım esasları göz önünde bulundurularak bir ana gövde oluşturmuştur. Bununla beraber paletin sisteme yerleştirilmesi ve engel aşma sırasında palette gerçekleşecek olan boy değişikliklerini tolere edebilmesi amacı ile bir gerdirme mekanizması, motorların üzerine yerleştirilmesini sağlamak amacı ile DC motorlar için birer yataklama ve Rocker-Bogie sisteminin ana gövdeye bağlantısı için yataklamalara ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 3.17 Robot mekanik tasarımı izometrik görünüş



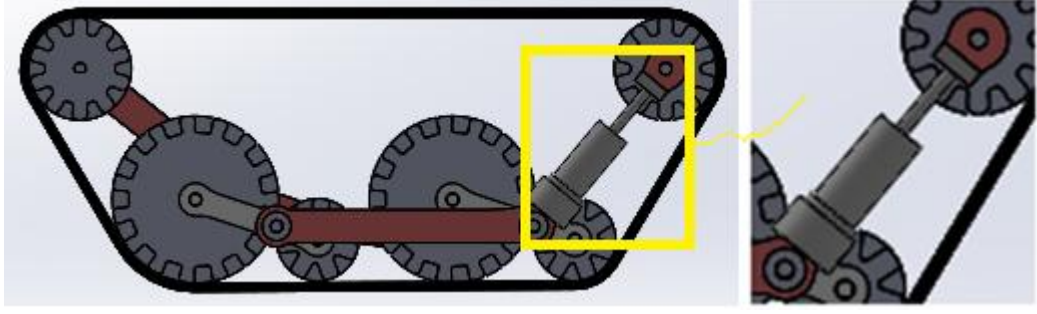
Şekil 3.18 Robot mekanik tasarımı soldan görünüş



Şekil 3.19 Robot mekanik tasarımı üstten görünüş

#### 3.4.2.1 Gerdirme Tasarımı

Gerdirme, robotun hareketi sırasında oluşabilecek palet boyu değişikliklerine robotun uyum sağlayabilmesi ve paletin gerginliğinin sabit veya sabite yakın bir değerde tutulabilmesi amacı ile tasarımda gerekli bir bileşendir. Engel aşma sırasında Rocker-Bogie tekerlerinin yukarı aşağı hareketi sonucunda paletin de tekerlerle beraber hareketi sağlanmalıdır. Aynı zamanda paletin sistem üzerine montajı sırasında da bu kısım sayesinde montajda kolaylık sağlanır.

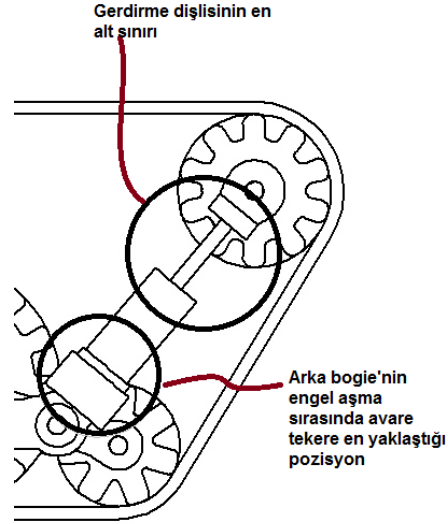


Şekil 3.20 Palet gerdirme tasarımı

Robot 20 mm boyutunda bir engel üzerinden geçerken paletin bir miktar uzaması gerekmektedir. Gerdirme tasarımı yapılırken Rocker-Bogie tekerlerinin hareketi sonucunda gerekli palet boyutları değişiklikleri göz önünde bulundurulur. Bu da robotun düz bir zemindeyken ki konumu referans alınarak tekerlerin konumuna göre gerekli olabilecek maksimum ve minimum palet boyları hesaplanır. Bu hesaplama sonucunda oluşabilecek boy değişiklikleri -3 ila +10 mm arasındadır. Bu işlemin ardından piyasada RC model araçlar için kullanılan bir hsp-58032 amortisör-yay sistemi bulunmuş ve robot üzerine yerleştirilmiştir.

Gerdirme sisteme yerleştirilirken belli başlı kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlar;

- Mıknatısın yüzeyden ayrılması için gereken kuvvet, çekme açısı  $90^\circ$ 'ye yaklaştıkça azalmaktadır. Dolayısıyla paletin açısı mümkün olduğunca dik olmalı ve ayrılma için gerekli kuvvet azaltılmalıdır.
- Yerleştirilen gerdirme üst ucunda bir adet avare teker ile destekleneceği için bu kısma yakın olan bogie çiftinin hareketi sırasında herhangi bir şekilde avare tekere değmemesi gerekmektedir.



Şekil 3.21 Gerdirme yerleşimi için tekerleklerin birbirlerine en yakın olduğu pozisyonlar

- Gerdirmenin ucundan etki edecek palet kuvvetleri mümkün olduğunca yerleştirme eksenine dik açı yapmalı ve bu sayede gerdirme üzerindeki moment azaltılmalıdır.

Bu kıstaslar yardımı ile gerdirme tasarımıdaki yerini alır.

### Gerdirmenin Robota Uygulanması



Şekil 3.22 Gerdirmenin robota uygulanması

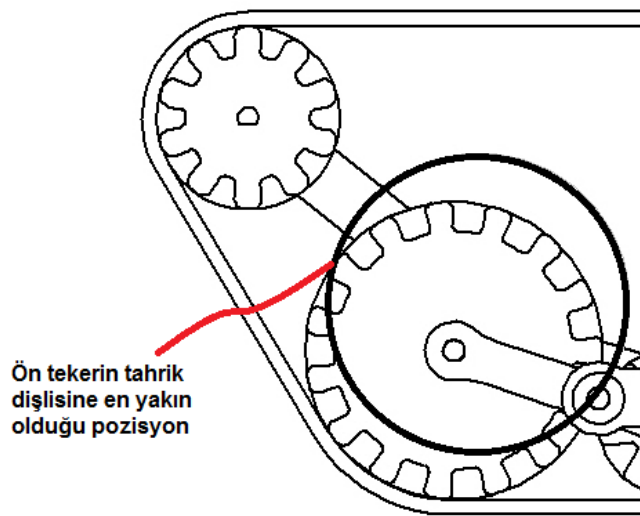


Üretimde akrilik malzeme üzerine herhangi bir bağlantı elemanı uygulanamayacağı için prototip üretimde bir yapıştırıcı vasıtasıyla sistem ana gövdeye montajlanmıştır. Açıların tasarım kriterlerinde olması amacıyla montaj için bir kalıp hazırlanır ve bu kalıp üzerine elemanlar yerleştirildikten sonra yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

### 3.4.2.2 Motor Yataklaması Tasarımı

Motorların yerleştirilmesi işlemi gerdirme tasarımı bahsi geçen gereksinimlerle benzer özellikler göstermektedir. Bunlar şöyle sıralanabilir;

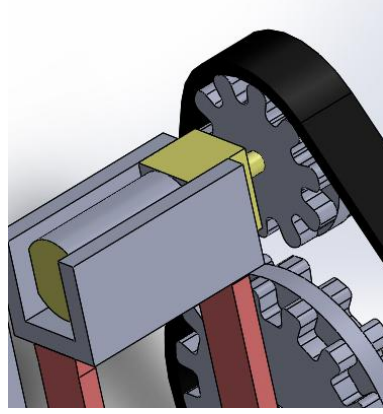
- Motor tahrik dişlisi gerdirmeye bağlı olan avare dişli ile aynı seviyede olmalıdır. Bu şekilde tahrik dişlisinin sağladığı çekme kuvveti robotun duvara tırmanma sırasında ağırlığı sebebi ile oluşan kuvveti dengeleyici bir rol oynamalıdır. Aksi takdirde, açılı bir yerleşim söz konusu olursa çekme kuvvetinin bir kısmı ağırlığı dengelemek yerine yüzeye doğru bir kuvvet oluşturacak ve verimliliği azaltacaktır.
- Ön kısımda yer alan bogie'nin teker hareketi sırasında tahrik dişlisinin dönüşünü engellememesi için tahrik dişlisinin pozisyonu bogie'nin tekerinden gerekli düzeyde uzakta tutulmalıdır.



Şekil 3.23 Motor yerleşimi için tahrik dişlisi ve ön tekerin birbirine en yakın olduğu pozisyon



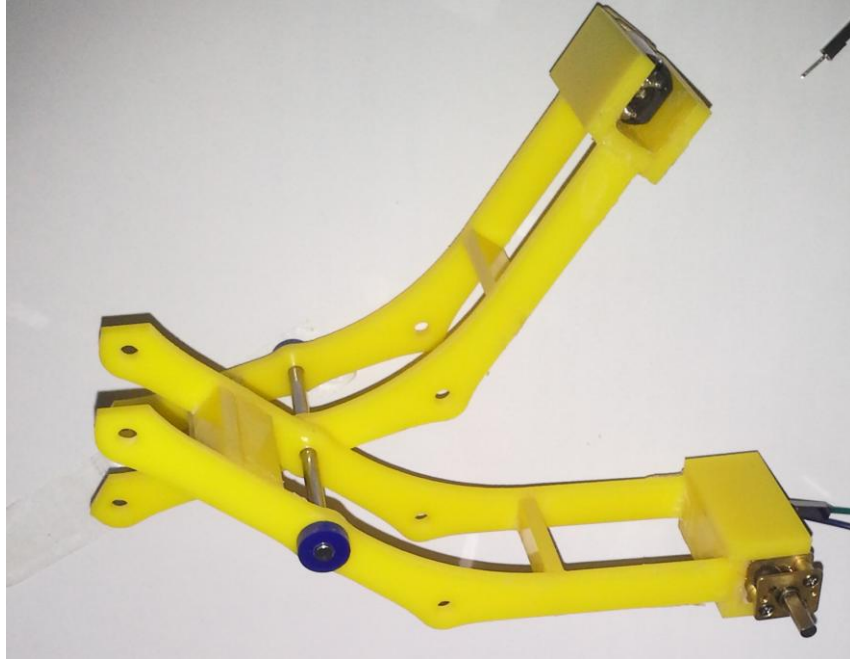
Belirlenen kıstaslar dâhilinde motorun yeri belirlenmiş ve ana gövde üzerinde konumlandırılmıştır. Bu konumlandırma sonucunda bütün parçaların ana gövdedeki yeri belirlenmiş olur.



Şekil 3.24 Motorun gövdeye uygulanması

### 3.4.2.3 Gövde Tasarımı

Robot gövdesi tasarımı engel aşma gerekliliğinden dolayı çok parçalı (eklemlili) olacak şekilde tasarlanmalıdır. Böylece bir palet engelden geçerken diğer palet bu kuvvetlerden etkilenmeyecektir.



Şekil 3.25 Ana gövde parçalı yapısı

Tasarımda robot iki parçaya bölünmüştür ve bu parçalar bir mil yardımı ile robotun yapışma yüzeyinin tam orta noktasına gelecek şekilde bağlanmıştır. Bu sayede robot, tripod 3 boyutlu yüeylerde tripod özelliği göstererek engebelere ve eğikliklere uyum sağlayabilmektedir.

### **3.5 Serbest Cisim Diyagramı ve Kuvvet Analizi**

Bir robot hareketi sırasında robotun bütün uzuvları çeşitli kuvvetlere maruz kalır ve bu kuvvetler birbirlerini tetikleyerek bağlı oldukları uzuvlarda kuvvetler oluşturur. Bu kuvvetlerin önceden belirlenmesi, motor seçimi, geometride yapılması gereken değişiklikler ve oluşabilecek hataların tespitinde yol göstericidir.

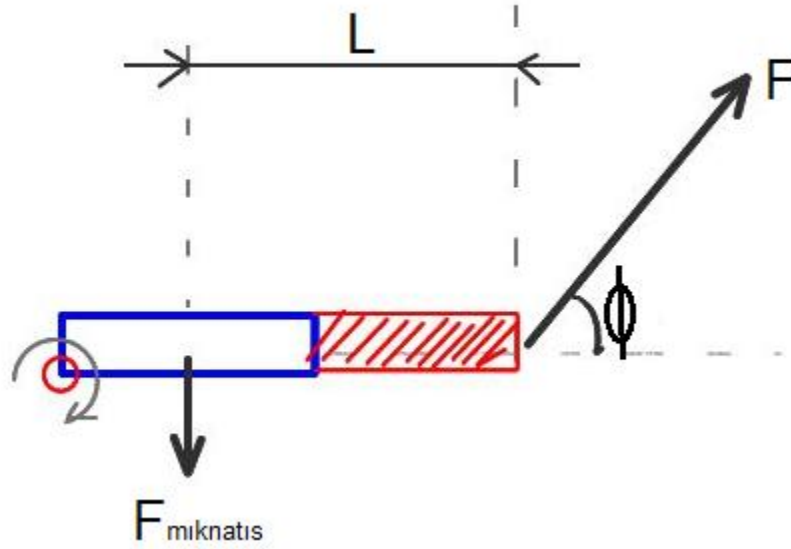
Bu işlem yapılırken robotun en küçük uzvundan en büyüğüne kadar oluşan kuvvet etkileşimleri göz önünde bulundurulmalı ve bütün bağlantı noktalarındaki kuvvetler tek tek hesaplanmalıdır.

#### **3.5.1 Mıknatıs**

Mıknatıs robotun ferromanyetik yüzeylere yapışmasını sağlayan yapışma mekanizmasının önemli bir elemanıdır. Mıknatısın teker etrafında dönmeye çalışırken palet üzerinde oluşturduğu gerdirme kuvvetleri, sistemi besleyen ilk kuvvetin oluştuğu yerdir.

Mıknatıs arka teker etrafından dönerken kuvvetin oluştuğu phi açısı '0' derece değerinden 90 derece ye kadar bir değişimle hareket eder ve ayrılma için gerekli olan kuvvet açısına geldiğinde yüzeyden ayrılır. Mıknatısa eklenen bir kuvvet kolu, ayrılma sırasına oluşan kuvvetleri azaltır ve yüzeyden ayrılmayı kolaylaştırır. Bu sebeple eklenmesi gerekli olabilecek kuvvet kolunun boyutlarına göre bir test yapılmıştır.

Şekil 3.26'de mavi renk ile çizilmiş olan kısım mıknatısı, kırmızı taralı kısım ile mıknatısın yanına yerleştirilen kuvvet kolunu temsil etmektedir.

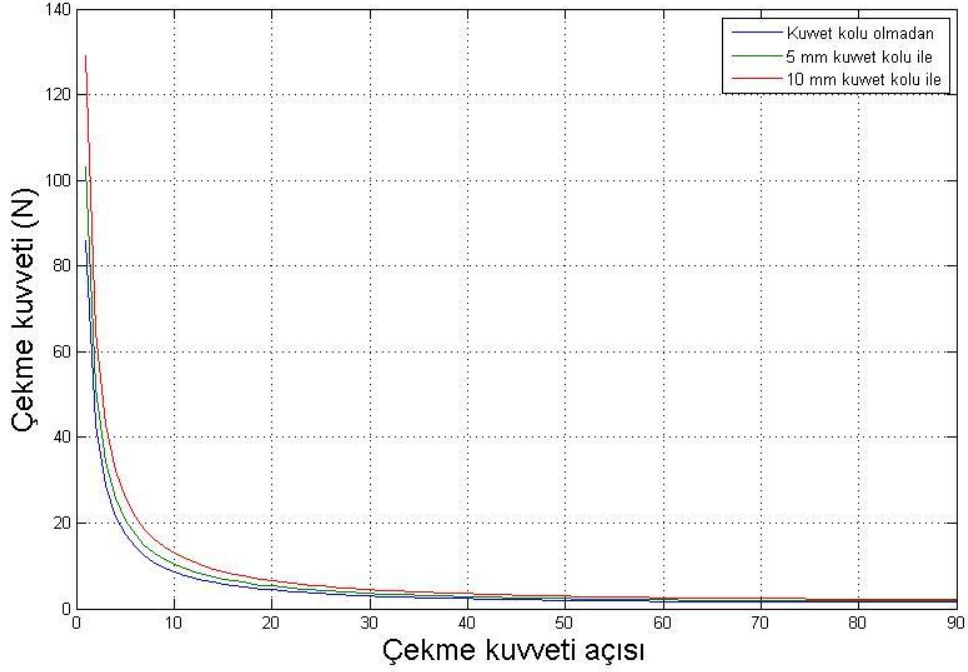


Şekil 3.26 Çekme kuvveti açısına bağlı gerekli ayrılma kuvveti

Mıknatısın çekme kuvveti daha önce mıknatıs ayrılma kuvveti ve uzaklığa bağlı çekme kuvveti testlerinden elde edilen grafikler aracılığı ile hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar neticesinde elde edilen değerler ve sistem göz önünde bulundurulduğunda ayrılma için gerekli kuvvet hesabı aşağıdaki denklem yardımı ile bulunur.

$$P = \frac{F_{mıknatıs} * 5}{(l + 5) * \sin\phi} \quad (3.16)$$

Şekil 3.26'de görülen uzunluklar ve açılar temel alınarak (3.16) denklemini oluşturulmuştur. Bu denklem kullanılarak  $\phi$  açısındaki değişime ve çeşitli uzunluklarda kuvvet kolu boyutlarına göre bir grafik oluşturulur. Bu grafikte  $\phi$  açısının  $0-90^\circ$  arasında değişmesiyle kopma için gerekli olan kuvvetleri göstermektedir.



Şekil 3.27 Kuvvet açısına bağlı ayrılma(çekme) kuvveti grafiği

Daha önce gerdirme tasarımı yapılırken dikkat edilen hususlar ve çizimler sonucunda ortaya çıkan ölçüler neticesinde,  $\phi = 58,51^\circ$  olacak şekilde seçilmiştir. Bu değer mıknatısın ayrılması sırasında kuvvetin etki ettiği açıyı vermektedir. Bu değerde kuvvet kolu uygulanan bir mıknatıs, kuvvet kolu uygulanmamış bir mıknatısa göre %33'lük bir kuvvet düşüşüne sebep olmaktadır. Sadece mıknatıs ayrılma kuvveti göz önünde bulundurularak hesaplanan bu kuvvet düşüşü, robotun toplam ağırlığı da hesap edildiğinde %8 mertebesinde bir iyileşme oluşturmaktadır.

Sonuç olarak kuvvet kolunun sisteme yaptığı katkı 0,78 N değerinde olurken, sistemin esnekliğinde görülen azalma da göz önünde bulundurulduğunda mıknatısa eklenecek bir kuvvet kolunun sistemi olumsuz etkileyeceği kanaatine varılır. Bu sebeple mıknatısların tek başlarına sistemde yer almasının daha uygun olacağı düşünülmüştür.

### 3.5.2 Kuvvet Analizi

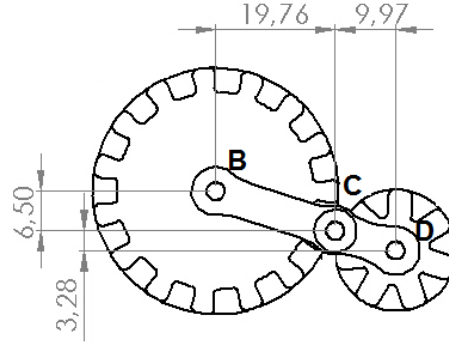
Mıknatıs ile ilgili yapılan incelemelerden sonra bütün uzuvların palettteki gerilme kuvvetlerine bağlı olarak  $T_1$  ve  $T_2$  cinsinden değerleri bulunup bütün parçaların



$$F_{Ax} = T_2 + T_1 * \cos (59,61) \quad (3.17)$$

$$F_{Ay} = -T_1 * \sin (59,61) \quad (3.18)$$

(3.17) ve (3.18) denklemlerinde görülen açılar daha önce tasarım hususunda belirtilmiş olan motor yerleşimi ve gerdirme yerleşimi ile ilgili yapılan çizimler ve hesaplamalar sonucu ortaya çıkan değerlerdir. B, C ve D noktasında oluşan kuvvetler B noktasından etki eden palet kuvvetlerine bağlıdır ve ana gövdenin C noktasında oluşturduğu tepki kuvvetlerine eşit olmalıdır. Burada D noktasında x yönünde herhangi bir kuvvet olmaması nedeni ile bu yöndeki kuvveti '0' olacaktır.



Şekil 3.30 B,C ve D noktalarına bağlı kuvvet analizi için ölçüler

$$F_{Bx} = T_1 - T_1 * \cos (59,61) \quad (3.19)$$

$$F_{By} = T_1 * \sin (59,61) \quad (3.20)$$

$$F_{Dx} = 0 \quad (3.21)$$

$$F_{Dy} = \frac{F_{By} * 19,76 + F_{Bx} * 6,5}{9,97} \quad (3.22)$$

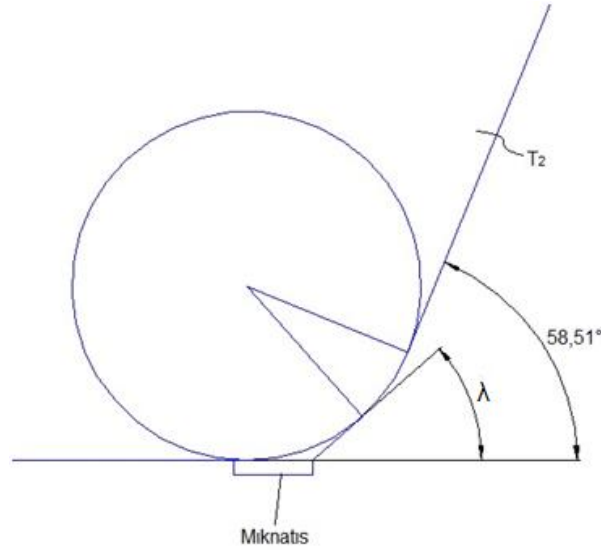
$$F_{Cx} = F_{Bx} \quad (3.23)$$

$$F_{Cy} = F_{By} + F_{Dy} \quad (3.24)$$

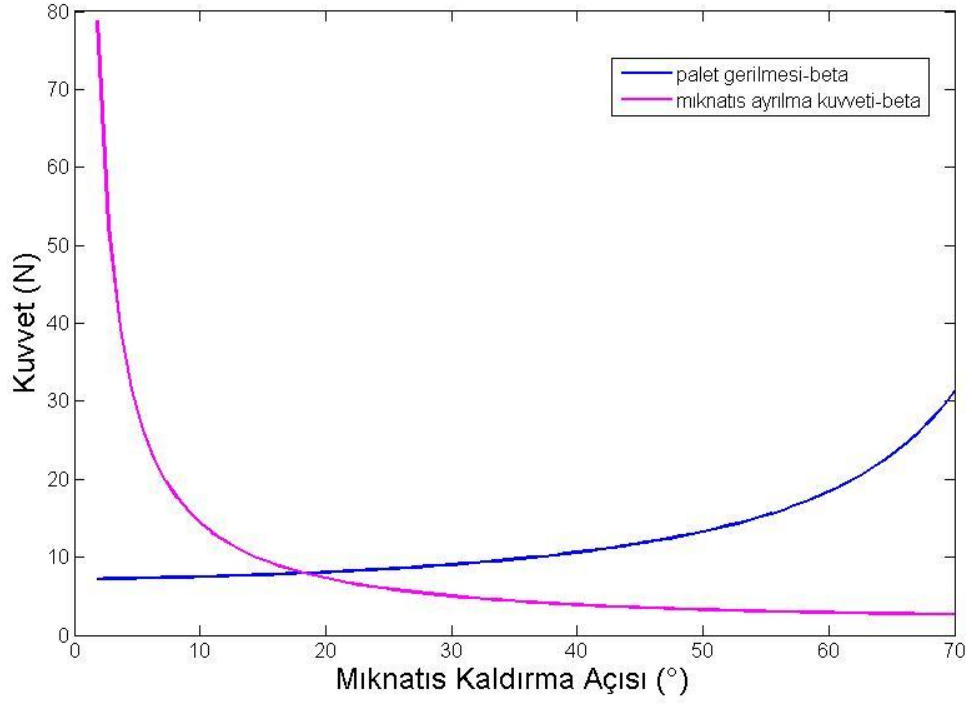
Hesaplanan kuvvetler paletin teker yüzeyine yapışması sonucu sadece palettaki gerilme kuvvetleri olan iki bilinmeyene bağlıdır. Ancak Şekil 3.28'de görüldüğü

gibi G noktasına bağlı olan tekerde mıknatısın ayrılması sırasında palet tekeri olması gerektiği gibi tam olarak sarmaz ve teker arasında bir boşluk oluşur ve bu boşluk neticesinde palet tekere tamamen değil, mıknatıs yüzeyden ayrılana kadar sadece bir yay boyunca etki eder.

Burada oluşacak olan  $\lambda$  açısındaki değişime bağlı olarak  $T_2$  kuvveti hesaplanır ve bu kuvvet mıknatısın ayrılma kuvvetine eşit olmadan hemen önce maksimum değerine çıkar. Bu değer mıknatısın o andaki  $\lambda$  derecesinde ayrılması için gerekli kuvvetinin paletteki çekme kuvvetine eşit olduğu yerdir. Bu nokta için gerekli tork ve kuvvetler bu şekilde hesaplanır. Dolayısıyla G noktasına bağlı olan noktalarda oluşan kuvvetler bulunabilir.

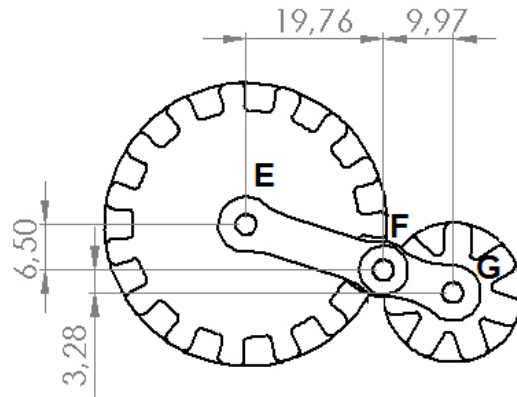


Şekil 3.31 Mıknatısın ayrılması sırasında tekerle arasında oluşan boşluk



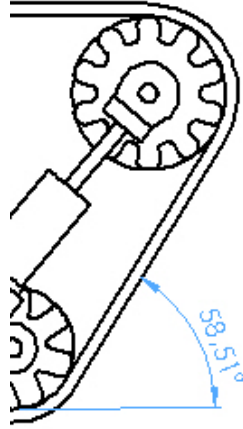
Şekil 3.32  $\lambda$  açısına göre  $T_2$  ve F kuvvetlerinin değişimi

Şekil 3.32'deki grafikte  $\lambda$  açısına göre  $T_2$  ve F kuvvetlerinin değişimini görebiliriz. Bu iki değişkenin kesiştiği noktada mıknatıs yüzeyden ayrılır. Dolayısıyla grafiklerin kesiştiği nokta  $T_2$  gerilme kuvvetinin maksimum değerine ulaştığı yerdir. Burada mıknatısın yüzeyden ayrılmadan hemen önceki denge konumu oluşmaktadır.



Şekil 3.33 E,F ve G noktalarına bağlı kuvvet analizi için ölçüler





Şekil 3.34 H noktasında oluşan kuvvetler için palet çekme açısı

$$F_{M\text{knatis}} = 2,5 * \sin(\lambda) \quad (3.25)$$

$$F_{Gx} = T_2 * \cos(58,51) - T_2 * \cos(\lambda) \quad (3.26)$$

$$F_{Gy} = T_2 * \sin(58,51) - T_2 * \sin(\lambda) \quad (3.27)$$

$$F_{Ex} = 0 \quad (3.28)$$

$$F_{Ey} = \frac{F_{Gx} * 3,28 + F_{Gy} * 9,97}{19,76} \quad (3.29)$$

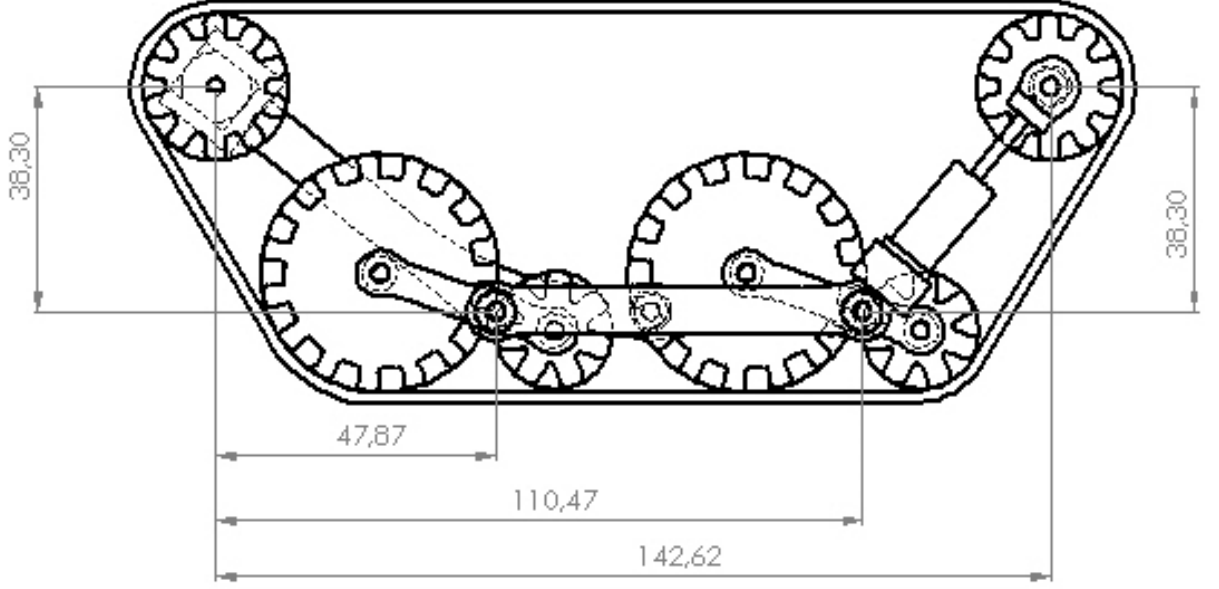
$$F_{Fx} = F_{Gx} \quad (3.30)$$

$$F_{Fy} = F_{Gy} + F_{Ey} \quad (3.31)$$

$$F_{Hx} = -T_2 * \cos(58,51) - T_2 \quad (3.32)$$

$$F_{Hy} = -T_2 * \sin(58,51) \quad (3.33)$$

Tüm bu kuvvetlerin hesabının ardından Şekil 3.28'de görülen A noktasına göre moment alınır ve bu moment yine A noktasına bağlı olan motor torkuna eşit olacak şekilde hesaplanır.



Şekil 3.35 Moment için ölçüler

$$F_{Cy} * 47,87 + F_{Cx} * 38,3 + F_{Fy}110,47 + F_{Fx} * 38,3 + F_{Hy}142,62 + mgx * 20 + tork = 0 \quad (3.28)$$

Bir döngü vasıtasıyla  $\lambda$  ve  $T_2$  değerleri eşit olana kadar sürekli  $\lambda$  derecesini değiştirerek diğer uzuvlarda etki eden kuvvetler ve motor torku hesaplanır. Bu hesaplar neticesinde aşağıdaki kuvvet ve torklar elde edilir.

### 3.5.2.1 Kuvvet Analizi Sonuçları

$$\lambda = 18,32^\circ \quad (3.29)$$

$$F_{Mıknatıs} = 7,95 \text{ N} \quad (3.30)$$

$$T_2 = 7,95 \text{ N} \quad (3.31)$$

$$Tork = 0,096 \text{ Nm} \quad (3.32)$$

Bu değerler neticesinde  $\beta$ 'nin  $18,32^\circ$  olduğu anda mıknatısın yüzeyden ayrılacağı anlaşılmaktadır.

### 3.6 Kontrol Sistemi ve Batarya

Literatür araştırmasından elde edilen sonuçlarda hemen hemen her robotun hem kontrol hem de enerji ihtiyacı için dışarıdan bir enerji girişine ihtiyacı olduğu ortaya çıkmıştır. Bu da robotun belirli bir menzilin üzerine çıkamamasına ve hareketinin bir destek merkezi ile desteklenmesini gerektirmektedir. Bu eksikliklerin giderilmesi için dışarıdan herhangi bir enerji girişine veya kontrol için herhangi bir kablo vb. bir elemana ihtiyaç duymadan hareket edebilecek bir robot tasarımı literatürde bir yenilik olur.

Robotun elektronik donanımı için kontrolü ve programlanması açık kaynak kodlarından dolayı kolay olan bir Arduino baskı devresi, motor kontrolü için Ardumoto ve kablosuz iletişim için de Xbee kartı kullanılmıştır.

Enerji ihtiyacı için ise Arduino kartların azami 6 voltla beslenmesi gereksinimi ve motorların 6 volt civarında çalışmalarından dolayı bu değere en yakın olan 7,4V, 2 hücreli bir Lityum-Polimer batarya kullanılır. Lityum-Polimer bataryaların enerji yoğunluğu (W/kg) yüksektir ve dolayısı ile tırmanan robotlar için yüksek maliyetlerine rağmen tercih sebebidir.

## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 4.1 Literatüre Yapılan Katkının Özeti

Bu tezde yapılan çalışmalarla literatüre yapılan katkılar aşağıda özetlenmiştir.

- Literatürde var olan robotlar genelde rijit yapılar olurken bu tez kapsamında gerçekleştirilen robot esnek bir yapıya sahiptir, bu esneklik gövdenin iki parçalı olması, rocker-boogie sistemi ve paletin kendi esnekliği olmak üzere 3 farklı boyutta gerçekleşmektedir. Bu sayede yüzeyde olabilecek perçin, vida, somun, kaynak ve bağlantı noktalarının üzerinden yapışma sorunu yaşamadan aşabilecektir.
- Kablosuz iletişim ve onboard batarya yapısı ile tamamen dış dünya ile olan bağlantısı kablosuz hale getirilmiş böylece hareket kısıtları ortadan kaldırılmıştır.

### 4.2 Tırmanan Robot Modeli ve Testleri

#### 4.2.1 Mıknatıs Testleri

Mıknatıslar üç ayrı aşamada test edilmiştir. Bunlar sırasıyla çekme kuvveti testi, kayma kuvveti testi ve ayrılma kuvveti testidir.

Çekme kuvveti testinde amaç literatürdeki ve teorik denklemlerdeki değerlerin uygulamadaki değerlerle arasındaki farkların ölçülmesine ve bu ölçümler neticesinde tasarımın şekillenmesini sağlamaktır. Bu amaçla farklı uzaklıklardan ferromanyetik bir malzemeye yaklaştırılan mıknatıstan bir çekme cihazı yardımı ile değerler okunmuştur.

Sonuç olarak çekme kuvveti testlerinin ardından teorik hesaplamalarla maksimum 0,5 N sapma olmuştur. Bu da uygulamada ideal ortam şartlarının ve mükemmel üretimin gerçekleştirilememesinden kaynaklanmaktadır.

Kayma kuvveti testi ise mıknatıs kuvvetlerinin, robotun yüzeye yapışması sırasında yerçekiminin oluşturacağı kuvvetlerin robotun yüzey boyunca kaymasına neden olup olmayacağını önceden kestirilmesini amaçlamaktadır.

Kaplamalı ve kaplamasız olmak üzere iki ayrı deney numunesi ile yapılan testler neticesinde kaplamasız numunenin 1,4 N, kaplamalı numunenin ise 4,2 N değerlerinde kayma kuvvetine yenik düştüğünü görmekteyiz.

Sonuç olarak kaplamalı numune 3 kat daha fazla kayma kuvvetine direnç göstermekte ve palet üretiminde yerini almaktadır.

Ayrılma kuvveti testinde ise robotun hareketi sırasında mıknatısın yüzeyden ayrılması için gerekli kuvvetlerin öngörülerek motor seçiminin yapılması ve mıknatıs ayrılma kuvvetinin mümkün olduğunca düşürülmesi hedeflenmiştir.

Sonuç olarak mıknatısın çeşitli uzaklıklarda uygulanan kuvvetlere tepkisi ölçülmüş ve bu ölçüm neticesinde paletlerin üzerinde kullanılacak maksimum boyutlardaki (15mm) kuvvet kolu temel alındığında normale (5mm) göre 1,6 N mertebesinde bir kuvvet farkı doğurmuştur. Bu farklılık paletin esneklik kayıpları göz önüne alındığında kuvvet kolunu gereksiz kılmıştır.

#### **4.2.2 Robot Testleri**

Robot hız testi ve engel aşma testi olmak üzere iki ayrı testten geçmiştir.

Eğimin 0° olduğu yüzeyde yapılan testte robot 35mm/s hıza ulaşmıştır.

Eğimin 90° olduğu yüzeyde yapılan testte robot 20 mm/s hıza ulaşmıştır ve başlangıçta hedeflenen hızı tam olarak karşılamıştır.

Son olarak engel aşma testine tabi tutulan robot, küçük boyutları ve bu boyutlarda kullanılan paletin yeterli esnekliği sağlayamamış olmasından ötürü engeli aşamamış ve bu testten başarısız olmuştur. Ancak robot engellerle karşılaştığında düşmemiştir. Daha küçük engellerde ise robot başarılı olmuştur.

#### **4.2.3 Test Sonuçları ve Tartışma**

Mıknatıs testleri sonucunda başarılı bir tasarım ortaya çıkmış ancak mıknatısların rijit yapısı sebebi ile paletin esneklik kabiliyetinde bir dezavantaj oluşmuştur. Burada oluşan esneklik kaybı öncelikle çok daha esnek bir palet üretimi ile giderilebilir. Buna ek olarak Rocker-Bogie sistemi daha çok parçalı bir yapıda tasarlanabilir.

Robotun hızı ile ilgili yapılan testlerde başlangıçta amaçlanan dakikada boyunun 5 katı hıza ulaşılmış ve başarılı bir sonuç elde edilmiştir.

Engel aşma kabiliyetinde yaşanan problemler ise birkaç değişik şekilde giderilebilir. Bunlar;

- Üretimde aynı palet kullanılıp, robotun boyutlarını büyüterek, daha iyi bir esneklik sağlamak
- Rocker-Bogie sisteminin hareket kabiliyeti artırılıp daha esnek bir palet kullanmak
- Paletin iki ucunda bulunan tahrik dişlisi ve avare dişli dışında ortada tamamen boşluklu bir yapı sağlamak

Şeklinde sıralanabilir.

Bu düzeltmeler endüstriyel robot tasarımı yapılırken dikkate alınacaktır. Bu uygulama sonrasında güvenli bir şekilde tırmanabilen ve bu tırmanış sırasında gözetim, denetim ve muayene gibi operasyonları gerçekleştirebilecek endüstriyel bir robot üretilecektir.

#### **4.3 İleriki Çalışmalar**

- Prototip üretimde kullanılan akrilik malzeme endüstriyel operasyonlarda yeterli mukavemeti sağlayamamaktadır. Bu sebeple robot alüminyum malzemedен üretilecektir.
- Prototip üretim neticesinde ortaya çıkan robot gözetim ve muayene gibi işlemler için gerekli olabilecek sensor, kamera, vb. teçhizatları üzerinde barındırabilecek boyutlardan daha küçük bir yapıda olması sebebi ile daha büyük bir robot tasarımı ve buna bağlı olarak daha güçlü motorlar ile desteklenecektir
- Prototip üzerinde var olmayan ancak endüstriyel üretimde uygulanacak olan kamera entegrasyonu ile görsel yüzey incelemesi de sağlanacaktır.
- Muayene amacı ile çeşitli algılayıcıların entegrasyonu ile amaca hizmet edebilecek, ekstra yük taşımaya uygun robot üretimi yapılacaktır.

- Rocker-Bogie süspansiyon sistemi yerine uzun ve esnek davranabilen bir alt palet tasarımı yapılacak ve bu sayede engel aşma kabiliyeti artırılabacaktır.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] B. Chu, K. Jung, C.-S. Han ve D. Hong, 'A Survey of Climbing Robots: Locomotion and Adhesion, *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING* Vol. 11, No. 4, 633-647, **2010**.
- [2] Z. Y. Qian, Y. Z. Zhao, Z. Fu ve Q. X. Cao, Robot Prototype with Dual Suction Cups, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 30 No.1-2, 147-155, **2006**.
- [3] M. Minor, H. Dulimarta, G. Danghi ve R. Mukherjee, Design, Implementation, and Evaluation of an Under-actuated Miniature Biped Climbing Robot, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, **2000**.
- [4] S. Hirose ve K. Arikawa, Coupled and Decoupled Actuation of Robotic Mechanisms, *International Conference on Robotics and Automation*, **2000**.
- [5] S. Hirose, A. Nagakubo ve R. Toyama, Machine That Can Walk and Climb on Floors, Walls and Ceilings, *International Conference on Advances in Robotics*, Pisa, **1991**.
- [6] M. Armada, M. Prieto, T. Akinfiyev, R. Fernandez, P. Gonzalez, E. Garcia, H. Montes, S. Nabulsi, R. Ponticelli, J. Sarria, J. Estremera, S. Ros, J. Grieco ve G. Fernandez, On the Design and Development of Climbing and Walking Robots for the Maritime Industries, *Maritime Research* Vol.2, No. 1, 9-32, **2005**.
- [7] M. F. Silva ve J. A. T. Machado, New Technologies for Climbing Robots Adhesion to Surfaces, *Computational Cybernetics*, Stara Lesna, **2008**.
- [8] D. Longo ve G. Muscato, A Modular Approach for the Design of the Alicia3 Climbing Robot for Industrial Inspection, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol.,148-158, **2004**.
- [9] J. Sanchez, F. Vazquez ve E. Paz, Machine Vision Guidance System for a Modular Climbing Robot Used in Shipbuilding, *9th International Conference on Climbing and Walking Robots*, Pontevedra, **2006**.
- [10] T. Miyake, H. Ishihara ve T. Tomino, Vacuum-Based Wet Adhesion System for Wall Climbing Robots-Lubricating Action and Seal Action by the Liquid, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, **2008**.
- [11] W. Fischer, F. Tache ve R. Siegwart, Inspection System for Very Thin and Fragile Surfaces, Based on a Pair of Wall Climbing Robots with Magnetic Wheels, *IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems*, **2007**.
- [12] J. Zhu, D. Sun ve S. K. Tso, Development of a Tracked Climbing Robot, *Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 35, No. 4, pp. 427-444, **2002**.
- [13] EPFL, TRIPILLAR, Available: [http://mobots.epfl.ch/..](http://mobots.epfl.ch/)



- [14] ARGECO Ltd., Clean Ant Profi, Available: <http://www.argeco-dubai.com/ger/products.php>.
- [15] H. Zhang, J. Zhang, W. Wang, R. Liu ve G. Zong, A Series of Pneumatic Glass-Wall Cleaning Robots for High-Rise Buildings, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 34, No. 2, 150-160, **2007**.
- [16] A. Faina, D. Souto, A. Deibe, F. Lopez-Pena ve R. J. Duro, Development of a Climbing Robot for Grit Blasting Operations in Shipyards, *International Conference on Robotics and Automation*, **2009**.
- [17] Z. Y. Qian, Y. Z. Zhao, Z. Fu ve Q. X. Cao, Fluid Model of Sliding Suction Cup of Wall-Climbing Robots, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 3, No. 3, 275-284, **2006**.
- [18] A. Warszawski, Industrialized and Automated Building Systems-A Managerial Approach, 2nd edition, Taylor&Francis, **1999**.
- [19] N. Elkmann, T. Felsch, M. Sack, T. Boehme, J. Hortig ve J. Saenz, Modular Climbing Robot for Service Sector Applications, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol.26, No. 6, 460-465, **1999**.
- [20] N. Elkmann, D. Kunst, T. Krueger, M. Lucke, T. Bohme, T. Felsch ve T. Sturze, SIRIUSc: Facade Cleaning Robot for a High-Rise Building in Munich, Germany, *7th International Conference Climbing and Walking Robots*, **2004**.
- [21] D. Longo, G. Muscato ve S. Sessa, Simulation and Locomotion Control for the Alicia3 Climbing Robot, *the 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, **2005**.
- [22] C. Balaguer, A. Gimenez ve M. Abderrahim, ROMA Robots for Inspection of Steel Based Infrastructures, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 29, No. 3, 246-251, **2002**.
- [23] J. C. Resino, A. Jardon, A. Gimenez ve C. Balaguer, Analysis of the Direct and Inverse Kinematics of ROMA II Robot, *9th International Conference on Climbing and Walking Robots*, **2006**.
- [24] C. Balaguer, A. Gimenez ve A. Jardon, Climbing Robots' Mobility for Inspection and Maintenance of 3D Complex Environments, *Autonomous Robots*, Vol. 18, No. 2, 157-169, **2005**.
- [25] W. Brockmann, Concept for Energy-autarkic, Autonomous Climbing Robots, *9th International Conference on Climbing and Walking Robots*, **2006**.
- [26] A. Kochan, CLAWAR Highlights Research Progress on Climbing and Walking Robots, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 32, No. 2, 112-119, **2005**.
- [27] T. Akinfiyev, M. Armada ve S. Nabulsi, Climbing Cleaning Robot for Vertical Surfaces, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 36, No. 4, pp. 352-357, **2009**.

- [28] S. Wu, M. Li ve S. X. a. Y. Li, A Wireless Distributed Wall Climbing Robotic System for Reconnaissance Purpose, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Luoyang, China, **2006**.
- [29] W. Shen, J. Gu ve Y. Shen, Permanent Magnetic System Design for the Wall-climbing Robot, *International Conference on Mechatronics and Automation*, **2005**.
- [30] G. Lee, K. Seo, S. Lee, J. Park, H. Kim, J. Kim ve T. Seo, Compliant Track-Wheeled Climbing Robot with Transitioning Ability and High-Payload Capacity, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Phuket, Thailand, **2011**.
- [31] C. Balaguer, A. Gimenez, J. M. Pastor, V. M. Padron ve M. Abderrahim, A Climbing Autonomous Robot for Inspection Applications in 3D Complex Environments, *Robotica*, Vol. 18, No. 3, 287-297, **2000**.
- [32] D. Santos, S. Kim, M. Spenko, A. Parness ve M. Cutkosky, Directional Adhesive Structures for Controlled Climbing on Smooth Vertical Surfaces, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **2007**.
- [33] D. Santos, B. Heyneman, S. Kim, N. Esparza ve M. Cutkosky, Gecko-inspired Climbing Behaviors on Vertical and Overhanging Surfaces, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **2008**.
- [34] S. Kim, M. Spenko, S. H. B. Trujillo, D. Santos ve M. R. Cutkosky, Smooth Vertical Surface Climbing with Directional Adhesion, *IEEE Transactions on Robotics* Vol. 24 No. 1, 65-74, **2008**.
- [35] K.-J. Cho, J.-S. Koh, S. Kim, W.-S. Chu, Y. Hong ve S.-H. Ahn, Review of Manufacturing Processes for Soft Biomimetic Robots, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 10, No.3, 171-181, **2009**.
- [36] O. Unver ve M. Sitti, Tankbot: A Palm-size, Tank-like Climbing Robot using Soft Elastomer Adhesive Treads, *The International Journal of Robotics Research*, 1761-1777, **2010**.
- [37] A. T. Asbeck, S. Kim, A. McClung, A. Parness ve M. R. Cutkosky, Climbing Walls with Microspines, *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, **2006**.
- [38] S. Kim, A. T. Asbeck, M. R. Cutkosky ve W. R. Provancher, Spinybot II: Climbing Hard Walls with Compliant Microspines, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **2005**.
- [39] H. Zhang, W. Wang, R. Liu, J. Zhang ve G. Zong, Locomotion Realization of an Autonomous Climbing Robot for Elliptic Half-Shell Cleaning, *Conference on Industrial Electronics and Applications*, **2007**.
- [40] H. Zhang, J. Zhang ve G. Zong, Realization of a Service Climbing Robot for Glass-Wall Cleaning, *International Conference on Robotics and Biomimetics*, **2004**.
- [41] Y. Zhang ve A. Nishi, Low-pressure air motor for wall-climbing robot

- actuation, *Mechatronics* 13, 377–392, **2003**.
- [42] Z. Yanzheng ve W. Y. et, The Study and Development of the Omnidirectional Vehicle Applied in the Wall Climbing Robot, *Robot Vol.17*, 102-107, 1995.
- [43] W. Yan, L. Shuliang, X. Dianguo, Z. Yanzheng, S. Hao ve G. Xueshan, Development & Application of Wall-Climbing Robots, *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Michigan, **1999**.
- [44] Z. Xu ve P. Ma, A wall-climbing robot for labelling scale of oil tank's volume, *Robotica*, Vol. 20, No. 2, 209-212, **2002**.
- [45] D. Xu, X. Gao, X. Wu, N. Fan, K. Li ve K. Kikuchi, Suction Ability Analyses of a Novel Wall Climbing Robot, *International Conference on Robotics and Biomimetics*, Kunming, China, **2006**.
- [46] Z.-y. Qian, Y.-z. Zhao ve Z. Fu, Development of Wall-climbing Robots with Sliding Suction Cups, *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, **2006**.
- [47] S. Panich, Development of a Wall Climbing Robot, *Journal of Computer Science* 6 (10), 1156-1159, **2010**.
- [48] A. Nishi ve H. Miyagi, A Wall Climbing Robot Using Propulsive Force of Propeller, *JSME International Journal Series C: Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing*, 366-367, **1993**.
- [49] S. Kitai, K. Tsuru ve S. Hirose, The Proposal of Swarm Type Wall Climbing Robot System "Anchor Climber", *Intelligent Robot and Systems*, Tokyo, Japan, **2005**.
- [50] A. D. Kathryn, D. H. Andrew, G. Stanislav, E. R. Roy ve D. Q. Roger, A Small Wall-Walking Robot with Compliant, Adhesive Feet, *IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems*, **2005**.
- [51] L. P. Kalra, J. Gu ve M. Meng, A Wall Climbing Robot for Oil Tank Inspection, *International Conference on Robotics and Biomimetics*, Kunming, China, **2006**.
- [52] L. Domenico ve M. Giovanni, The Alicia Climbing Robot, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 42-50, **2006**.
- [53] C. Hillenbrand, D. Schmidt ve K. Berns, Development of a Sealing System For A Climbing Robot With Negative Pressure Adhesion, *Advances in Climbing and Walking Robots* 115-124, **2007**.
- [54] A. D. Kathryn, D. H. Andrew, G. Stanislav, E. R. Roy ve D. Q. Roger, A Small Wall Walking Robot with Compliant, Adhesive Feet, *IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems*, **2005**.
- [55] K&J Magnetics, Inc.,  
<http://www.kjmagnetics.com/calculator.asp?calcType=block>.
- [56] H. Zhang, J. Zhang, R. Liu, W. Wang ve G. Zong, Pneumatic Climbing

Robots for Glass Wall Cleaning, *6th International Conference on Climbing and Walking Robots*, **2004**.

- [57] H. Zhang, J. Zhang ve G. Zong, Realization of a Service Climbing Robot for Glass Wall Cleaning, *International Conference on Robotics and Biomimetics*, **2004**.
- [58] H. Zhang, J. Zhang ve G. Zong, Requirements of Glass Cleaning and Development of Climbing Robot Systems, *International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation*, **2004**.
- [59] Z. Y. Qian, Y. Z. Zhao, Z. Fu ve Q. X. Cao, Design and Realization of a Non-Actuated Glass-Curtain Wall-Cleaning Robot Prototype with Dual Suction Cups, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 30, No. 1-2, 147-155, **2006**.
- [60] O. Unver, A. Uneri, A. Aydemir ve M. Sitti, Geckobot: A Gecko Inspired Climbing Robot Using Elastomer Adhesives, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **2007**.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı :Ömer Barışkan Yasan  
Doğum Yeri :Altındağ  
Medeni hali :Bekar  
E-posta :omeryasan@gmail.com  
Adresi :Pınarbaşı mah. Başbuğ sok. 4/4 Keçiören/ANKARA

### Eğitim

Lise :Pursaklar Anadolu Lisesi-Fen Bilimleri  
Lisans :Erciyes Üniversitesi-Makine Mühendisliği  
Yüksek Lisans : -  
Doktora : -

### Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce (iyi)

### İş Deneyimi

### Deneyim Alanları

### Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

### Tezden Üretilmiş Yayınlar

### Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar