

**SEKİZ BACAĞLI MOBİL ROBOTUN MEKANİK
TASARIMI, MODELLENMESİ VE LOKOMASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Müh. Cengiz Mete UZUNDERE
518041007

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2007

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Hakan TEMELTAŞ
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Ata MUĞAN
Doç.Dr. Metin GÖKAŞAN

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında hiçbir zaman yardımını esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca tez çalışmamın çeşitli bölümlerinde bana yardımcı olan hocalarım Doç. Dr. Ata MUĞAN ve Dr. Murat YEŞİLOĞLU'na, tezin elektriksel tasarımını yapan arkadaşım R. Barkan UĞURLU'ya ve deneyimlerini benimle paylaşan Mak. Yük. Müh. Ergin YÜKSEL'e de teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2007

Cengiz Mete UZUNDERE

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. SEKİZ BACAĞLI MOBİL ROBOTUN MEKANİK TASARIMI	6
2.1. Tasarım Fikirleri	6
2.2. Bacakların ve Vagonların Seçimi	9
2.3. Vagon Tasarımı	11
2.4. Bacak Tasarımı	14
2.5. Yapı Analizleri	22
3. MOBİL ROBOT KİNEMATİĞİ	36
3.1. Denavit - Hartenberg Dönüşümleri	39
4. ELEKTRİKSEL TASARIM	50
4.1. Ön Tasarım Prosesi ve Mantıksal Katmanlar	51
5. LOKOMASYON	58
5.1. Bacak Yapısı	59
5.2. Hareket Biçimleri	60
5.3. Yürüyüş Düzeninin Biyomimetrik Karşılaştırılması	63
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
6.1. Sonuçlar	65
6.2. Öneriler	66
KAYNAKLAR	67
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	69

KISALTMALAR

SDR	: Sony Dream Robots
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
CAD	: Computer Aided Design
PCB	: Printed Circuit Board
CAN	: Controller Area Network
DC	: Direct Current
AC	: Alternative Current
DSP	: Digital Signal Processor

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : Sonsuz vida ve çarkı hesaplarında kullanılan formüller	19
Tablo 2.2 : Al 7075 mekanik özellikleri	26
Tablo 2.3 : Vagon ve eklem parçalarının kütleleri.....	26
Tablo 2.4 : Kullanılan motorların özellikleri.....	28
Tablo 3.1 : Tek bacak için DH tablosu.....	47

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1	: Atilla II.....	1
Şekil 1.2	: ASIMO ve P3.....	2
Şekil 1.3	: Sony QRIO.....	2
Şekil 1.4	: Omron Necoro Cat.....	3
Şekil 1.5	: 2 – parçalı robot, bükülmüş durum.....	4
Şekil 2.1	: Yürüyen canlılardaki bazı ayak dağılımları.....	6
Şekil 2.2	: Akrep.....	7
Şekil 2.3	: Sekiz bacaklı mobil robot.....	9
Şekil 2.4	: Vagon yapısı.....	9
Şekil 2.5	: İstavroz mafsalsal (universal joint) yapısı.....	10
Şekil 2.6	: Bacak hareket eksenleri.....	10
Şekil 2.7	: Simetrik gövde yapısı.....	11
Şekil 2.8	: Vagon boyutları.....	12
Şekil 2.9	: Tasarımı yapılmış vagon örnekleri.....	13
Şekil 2.10	: İğneli – eksenel bilyalı rulman.....	15
Şekil 2.11	: Omuz eklemi.....	15
Şekil 2.12	: Birinci omuz eklemi montaj şekli.....	16
Şekil 2.13	: Omuz eklemi montaj şekli.....	17
Şekil 2.14	: Dirsek eklemi motoru montajı.....	17
Şekil 2.15	: Sonsuz vida ve çarkı.....	18
Şekil 2.16	: Sonsuz vida ve çarkı değişkenleri.....	18
Şekil 2.17	: Sonsuz vida.....	20
Şekil 2.18	: Sonsuz vida yatağı.....	20
Şekil 2.19	: Son kol tasarımı.....	21
Şekil 2.20	: Son kol yataklama şekli.....	21
Şekil 2.21	: Bacak yapısı.....	22
Şekil 2.22	: 2. omuz eklemi motoru için moment kolu.....	29
Şekil 2.23	: Dirsek eklemi motoru için moment kolu.....	30
Şekil 2.24	: Vagonun gerilme analizi sonuçları.....	31
Şekil 2.25	: 1. omuz eklemi mili gerilme analizi sonuçları.....	31
Şekil 2.26	: 2. omuz eklemi mili gerilme analizi sonuçları.....	32
Şekil 2.27	: 2. omuz eklemi alt ve üst parçaları gerilme analizi sonuçları.....	33
Şekil 2.28	: Dirsek eklemi motor yatağı gerilme analizi sonuçları.....	33
Şekil 2.29	: Sonsuz vida yatağı gerilme analizi sonuçları.....	34
Şekil 2.30	: Son kol gerilme analizi sonuçları.....	34
Şekil 2.31	: Kapağın gerilme analizi sonuçları.....	35
Şekil 3.1	: Dirsek manipülatör eksen takımları.....	37
Şekil 3.2	: DH1 ve DH2 varsayımlarını sağlayan koordinat sistemleri.....	41
Şekil 3.3	: α_i ve θ_i açıları için pozitif yönler.....	43

Şekil 3.4	: Denavit – Hartenbeg eksen takımı yerleşimleri.....	44
Şekil 3.5	: Takım eksen takımı yerleşimi.....	45
Şekil 3.6	: Kinematik eksen takımı yerleşimleri.....	47
Şekil 3.7	: Öteleme vektörü.....	48
Şekil 4.1	: Mantıksal donanım katmanları.....	50
Şekil 4.2	: Mantıksal katman – 1.....	52
Şekil 4.3	: Mantıksal katman – 2.....	54
Şekil 4.4	: Mantıksal katman – 3.....	56
Şekil 5.1	: Bacak yapısı.....	59
Şekil 5.2	: Gerçek bir akrebin yürüyüş biçimi.....	60
Şekil 5.3	: Hareket düzeni.....	61
Şekil 5.4	: Sinüzoidal yürüyüş fonksiyonu.....	62
Şekil 5.5	: Akrep yürüyüşü – 2.....	63
Şekil 5.6	: Akrep yürüyüşü – 3.....	64

SEMBOL LİSTESİ

M	: Moment
θ_i	: Eklem açısı
d_i	: Link ofseti
a_i	: Link uzunluğu
α_i	: Link açısı

ÖZET

SEKİZ BACAĞLI MOBİL ROBOTUN MEKANİK TASARIMI, MODELLENMESİ VE LOKOMASYONU

Bu tez çalışmasında sekiz bacaklı yürüyen bir mobil robotun mekanik tasarımının yapılması amaçlanmaktadır. Bu amaçla kapsamlı bir literatür araştırması yapıldıktan sonra gerekli fikirler edinilmiş ve mekanik tasarım aşamasına geçilmiştir. Tasarlanacak mobil robotun çok bozuk zeminlerde kullanılacağı göz önünde bulundurularak bir tasarım yapılmıştır. Tasarım sırasında doğadaki canlılar incelenmiştir. İncelenen canlılar doğada yaşayan tüm canlıların %75'ini oluşturan eklem bacaklılar sınıfına ait canlılardır. Bu sayede tasarım biyomimetrik bir yaklaşımla biçimlendirilmiştir. Mekanik tasarım sırasında robotun sonraki versiyonları da göz önünde bulundurulmaya çalışılmıştır. Bu sayede daha kullanışlı ve oldukça sağlam bir mekanik alt yapı oluşturulmuştur. Tasarlanan vagon ve bacak yapısının çeşitli çalışma koşullarında hasar görüp görmeyeceğini anlayabilmek için bacak ve vagonu oluşturan tüm parçalara sonlu elemanlar analizi yöntemiyle gerilme analizleri yapılmıştır.

Modelleme kısmında tasarım kinematik açıdan ele alınmış ve tek bir bacak için lineer transformasyon matrisi çıkarılmıştır.

Lokomasyon bölümünde öncelikle yaşayan canlı bir akrebin yürüyüş biçimi biomimetrik bir açıdan analiz edilerek bu yürüyüş biçiminin tasarladığımız mekanizmaya uygun olup olmadığı sorusunun cevabı aranmıştır.

Son olarak ise ekler kısmında tasarlanan mekanizmanın üretilebilmesi için gerekli imalat ve montaj resimleri hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tasarım, Bacaklı Mekanizmalar, Mobil Robotlar

Bilim Kodu: 0

ABSTRACT

MECHANICAL DESIGN, MODELLING AND LOCOMOTION OF EIGHT LEGS MOBILE ROBOT

In this study, we intend to design an eight legs mobile robot. For this purpose, after the detailed literature search, get the necessary ideas and started to design an eight legs mobile robot. Having configured such mechanical frame, it is our purpose that this mobile robot may be used in exploration. For instance, in pipelines there might be leakages or little cracks. Reconfiguring the sensor data on the robot, it is able find the leakage coordinates or crack. At the design stages we examined the natural creatures. Especially Arthropoda, which are one of the biggest phylum. So we get biomimetric point of view to our design. During the design of the mechanical frame and legs structure we tried to consider the next versions of the mobile robot. In this way achieved very strong and more useful mechanism. After the design of wagon and legs, we made stress analysis using the Finite Elements Methods to each component.

At the modeling stage, mechanism examined cinematically and achieved linear transform matrix for one leg.

At the locomotion stage, firstly, a living scorpion's walking sequences are examined from a biomimetric point of view. After that, we controlled our mechanism to achieved this walking sequences.

Finally, we prepared manufacture and assembly drawing to manufactured of mobile robot and gave them at the appendix.

Keywords: Design, Legged Mechanism, Mobile Robots

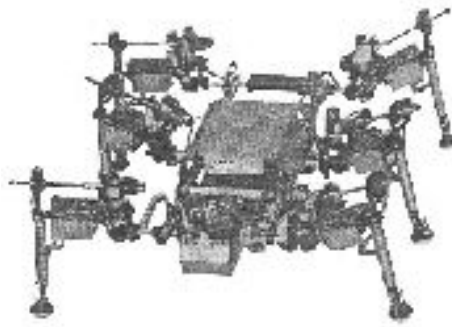
Science Code : 0

1. GİRİŞ

Eklem bacaklılar; böcekler, örümcekler ve kabuklular gibi çok sayıda omurgasız canlıyı içine alan yeryüzündeki en kalabalık şubelerden biridir. Bu şubedeki organizmaların genel özellikleri sert, bölünmüş bir dış kabuğa ve olumsuz koşullarda hayatta kalmalarını sağlayacak eklemli bacaklara sahip olmalarıdır.

Robotik alanında günümüze kadar oldukça önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Genel olarak en önemli gelişmeyi doğadan esinlenme yani biyomimetri olarak kabul edebiliriz. Örneğin dünya üzerinde böceklerden insana kadar birçok yaratık yaşamaktadır. Özellikle böcek benzeri çok bacaklı yapılar çok bozuk yüzeylerde bile oldukça hızlı hareket edebilmektedir. Bu tür canlılardan esinlenilerek yapılmış çok bacaklı robotlar çok kötü şartlarda bile hızlı ve sağlam şekilde hareket edebilmektedir.

Son yıllardaki robotik tarihine bakarsak bazı yapı taşları dikkatimizi çekecektir. Bu yapı taşları aşağıda kronolojik sıra ile verilmiştir.



Şekil 1.1: Atilla II

Şekil 1.1’de görülen Atilla II 6 bacaklı bir robottur. Literatürde altı bacaklı robotlara hegzapod da denmektedir. Resimden de görüldüğü gibi Atilla II 1989 yılında yapılmış olmasına karşın oldukça gelişmiş bir bacak mekanizmasına sahiptir.



Şekil 1.2: ASIMO ve P3

Yukarıdaki şekilde, Şekil 1.2, Honda firmasının geliştirmiş olduğu ASIMO isimli insansı robot görülmektedir. Honda P3'ü 1997 yılında geliştirmiştir. Honda'nın bu konudaki ikinci önemli adımı ise ASIMO'dur. P3 ilk tamamen bağımsız 2 bacaklı insansı yürüyen robottur.



Şekil 1.3: Sony QRIO

Şekil 1.3'de Sony firmasına ait QRIO isimli insansı robot görülmektedir. 2001 yılında Sony Robodex'te insansı robotlarını, Sony Rüya Robotları (SDR), görücüye çıkarmıştır. SDR 10 farklı yüzü tanıyabilmekte, duygularını konuşma ve vücut lisani ile belirtebilmektedir.



Şekil 1.4: Omron Necoro Cat

Şekil 1.4’te OMRON firmasına ait Necoro isimli kedi görülmektedir. OMRON yapay zekaya sahip bu kediye ilk kez 2002 yılında halka duyurmuştur. Necoro oldukça karmaşık bir yapay zekaya sahip olmasının yanında gerçek bir kedinin bakışlarını ve jestlerini taklit edebilmektedir.

Literatürü incelediğimizde oldukça fazla sayıda paletli robot, Xiao’nunkine benzer [1], yapılmış olduğunu görürüz. Fakat paletli robotlar engelleri aşmada veya bozuk arazide belirlenmiş yörüngeyi takip etmede çok başarılı değillerdir. Paletli robotların bu dezavantajlardan dolayı bacaklı robotlar keşif görevlerinde daha başarılıdır.

Bizim tasarlamış olduğumuz sistem farklı disiplinlerden birçok özelliği barındırmaktadır. Bu çalışma kapsamlı bir literatür araştırmasının ardından son şeklini almıştır. Sekiz bacaklı mekanizmamız tasarlanırken yapılmış diğer 8 bacaklı robot çalışmaları, [2],[3],[4],[5],[6] ve [7], bize oldukça fayda sağlamıştır.

Çalışmamızda iki vagondan oluşan sekiz bacaklı bir mekanizma tasarlanması uygun görülmüştür. Böyle bir mekanik tasarım yapılmasındaki ana amaç robotun keşif görevlerinde kullanılabilmesidir. Bu sebeple tasarımda ana fikir olarak hareket esnekliğini seçilmiştir. Bu sayede robotumuz örneğin hasarlı bir boru hattındaki hasarın yerini belirlemek için amacı ile kullanılabilir.

Robotumuz insanların girip çalışamayacağı bazı özel alanlarda da kullanılabilir. Örneğin deprem gibi bir felaket sonrası hasar görmüş yapılarda canlı arama ve tespit etme çalışmalarında oldukça faydalı bir şekilde kullanılabilir.

Çalışmamızda bacak mekanizması kullanmamızın ana sebebi özellikle çok bozuk zeminlerde bacağın sağladığı manevra esnekliğinin tekerleklerle karşı oldukça üstün olmasıdır. Tekerlekli mekanizmalar bu tür zeminler için uygun değildirler. Hareket etmek için doğada en yaygın mekanizma bacak yapısıdır. Üstelik bacak yapısı yere saplanma olasılığı en düşük yapıdır. Oysaki tekerlekli yapılar modellenirken zemin dinamiği mutlaka modele eklenmelidir. Bacaklı mekanizmaların en önemli özelliklerinden biri çok bozuk zeminlerde dahi bacaktaki eklem açıları değiştirilerek oldukça düzgün hareketlerin elde edilebilir olmasıdır.



Şekil 1.5: 2 – Parçalı robot, bükülmüş durum[6]

Bacak mekanizmasına sahip bir mobil robot tasarlamamızdaki amaç, mobil robotumuza şekil 1.5’te görülene benzer bir esneklik kazandırabilmektir. Böylece;

- Boru hatlarındaki hasarları arama ve tespit etmede kullanılabilir
- Felaketler sonrasında arama görevinde kullanılabilir

Bu gerçekler göz önüne alındığında tasarladığımız robottan başarılı sonuçlar elde etmeyi beklemekteyiz.

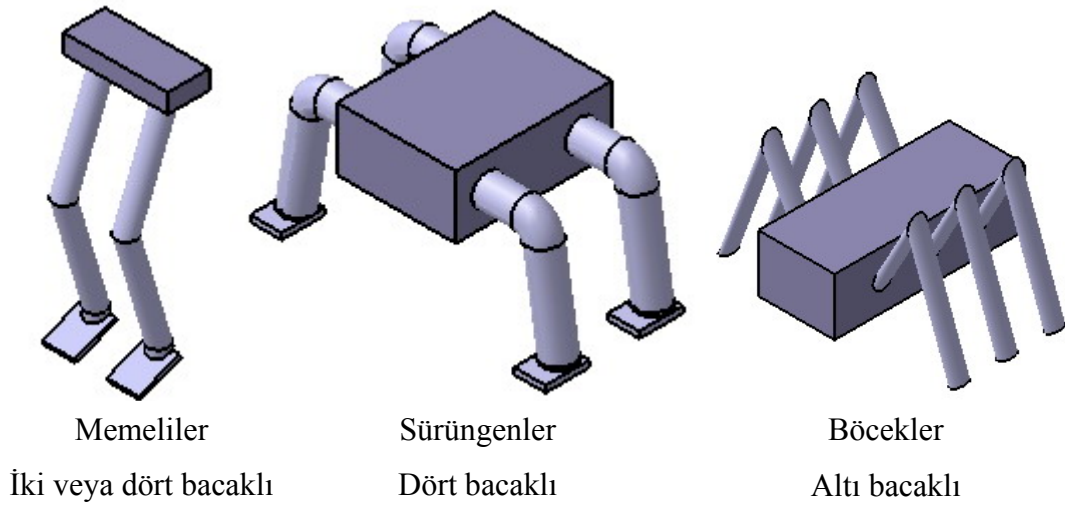
Tezin ilk bölümünde çalışmamızın önemi üzerinde durulmuş ve neden bu konunun seçildiği açıklanmıştır. Tezin ikinci bölümünde ise 8 bacaklı robotumuzun mekanik tasarımı açıklanmıştır. Üçüncü bölümde robotumuzun kinematik analizleri yapılmış ve tek bacak için kinematik model çıkarılmıştır. Dördüncü bölümde mobil robotun kontrolü için gerekli olan katman yapıları açıklanmıştır. Beşinci bölümde sekiz bacaklı robot için yürüyüş planlaması üzerinde çalışılmıştır. Bu bölümde

biyomimetrik yaklaşım ile gerçek bir akrebin yürüyüş sırasını matematiksel olarak açıklanmaya çalışılmıştır. Son olarak ise sonuç bölümü ele alınmaktadır.

2. SEKİZ BACAKLI MOBİL ROBOTUN MEKANİK TASARIMI

2.1 Tasarım Fikirleri

Otonom yani insan kontrolü olmadan kendi kendine hareket edebilen araçlara mobil robot denmektedir. Bir mobil robot kendisini bulunduğu ortamdan bir sınıra bağlı olmaksızın hareket ettirebilme yeteneğine ancak üzerindeki yer değiştirme mekanizmaları sayesinde sahip olmaktadır. Fakat bu hareketi sağlamanın birçok farklı yolu vardır. Mobil robot konusu incelendiğinde yürüyen, zıplayan, koşan, kayan, yüzen, uçan hatta yuvarlanan yapıları görmek mümkündür [8]. Bu hareket mekanizmalarının birçoğu biyolojik kopyasından esinlenerek yapılmıştır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: Yürüyen canlılardaki bazı ayak dağılımları

Sürüngen ve böceklerin sahip olduğu ayak dağılımları zor koşullardaki yer değiştirme çözümleri etkili kaynak oluşumunu sağlamıştır. Hayvanlar aleminin en geniş şubesi olan eklem bacaklılar yeryüzünde bilinen canlı türlerinin yaklaşık olarak %75'ini kapsamaktadır [9]. Eklem bacaklıların yaşam başarısının bu denli yüksek olmasının sebeplerini şu şekilde özetleyebiliriz;

- **Dış iskelet bulunması:** Kitin yapıdaki dış iskelet savunmada, dış etkenlerden korunmada ve su kaybını engellemede önemli bir avantaj sağlamaktadır.
- **Eklemliler:** Üyelerin eklemli oluşu sayesinde daha rahat hareket edebilme yeteneği kazanmışlardır.
- **Trake sistemi:** Vücut yüzeylerinden doğrudan hücrelere açılan trakeler sayesinde O₂ doğrudan gerekli yere iletilir ve enerji en etkin biçimde kullanılır.
- **Duyu organları:** Bu özellik kara yaşamında en büyük avantajı sağlar.
- **Çok gelişmiş davranış modelleri:** Savunma, saklanma, avlanma, eşleşme ve koloni yaşamı gibi birçok koşulda, büyük çeşitlilik gösteren ve oldukça başarılı stratejiler görülür.
- **Metamorfоз:** Beslenme ve barınmada tür içi rekabeti önler.

Eklem bacaklılar (arthropoda) şubesinin örümcekgiller sınıfı (arachnida) ortalama 60.000'in üzerinde tür ile oldukça kalabalık bir gruptur. Sınıfa dahil olan canlıların büyük çoğunluğu karasal yaşama uyum sağlamıştır. Sınıfın bir grubunu oluşturan akrepler, karasal hayata geçen ilk hayvan gruplarından ve bilinen en eski karasal eklem bacaklılardır [9]. Akrepler geceleri aktif olan ince ve uzun vücutlu canlılardır (Şekil 2.2).

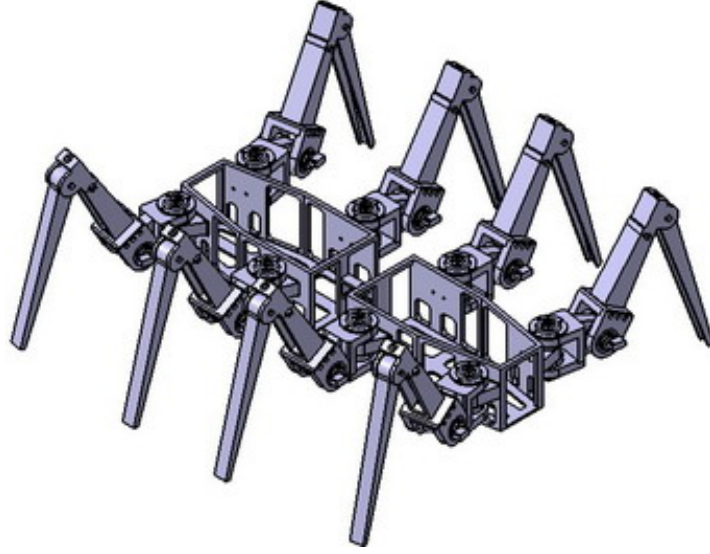


Şekil 2.2: Akrep

Örümcekgiller sınıfının bir grubu olan akreplerin neden bu kadar baskın bir grup olduğunu anlayabilmemiz için akreplerin özelliklerini şöyle özetleyebiliriz [10].

- **Zehirleri:** Akrelerin bazen insanı bile öldürecek derecede olan kuvvetli zehirleri vücutlarının arka tarafında bulunan mızrakları vasıtasıyla düşmanlara aktarılmaktadır.
- **Güçlü zırh:** Vücudunu bir zırh gibi saran kabuğu, onu yalnız düşmanlarından değil, radyasyondan bile koruyacak kadar dirençlidir. İnsan vücudunun radyasyona direnci 600 rads dolayındadır. Oysa akrelerde bu direnç 40 – 150 bin rads'a kadar yükselebilmektedir.
- **Beyin:** Başından kuyruğuna kadar uzanan 15 sinir düğümünden oluşan bir beyin yapısına sahiptir. Beyinin bu yapısı hayvanın süratli karar alma, refleks ve gerekli emirlerin organlara ulaştırılması için büyük bir avantaj sağlar.
- **Ciğerler:** Karınlarında sekiz adet nefes deliği bulunur. Bunlardan sadece biri açık olsa bile hiç zorlanmadan nefes almaya devam eder. Güçlü ciğerleri sayesinde iki gün suyun altında rahatlıkla kalabilir.
- **Ayaklar:** Ayaklarındaki alıcılar hayvanın her türlü hareketi, sesi ve titreşimi algılamasını sağlamaktadır. Bu alıcılar o kadar hassastır ki, akrep, yakınındaki bir canlının kumda neden olduğu titreşimleri, saniyenin 1/1000'i kadar bir sürede algılayabilir.
- **Kıskaçlar:** Akrebin kıskaçlarının görevi, kurbanlarını iğnesiyle sokmadan önce etkisiz hale getirmektir. Ayrıca kıskaçlar vasıtasıyla kumu kazıp yeraltına gizlenebilirler.
- **Karın bölgesi:** Dişi akrebin karnı tarak adı verilen çok duyarlı organlarla kaplıdır. Bunlarla toprağın sertlik düzeyini tespit eder ve yumurtaları bırakmak için en uygun yeri belirler.

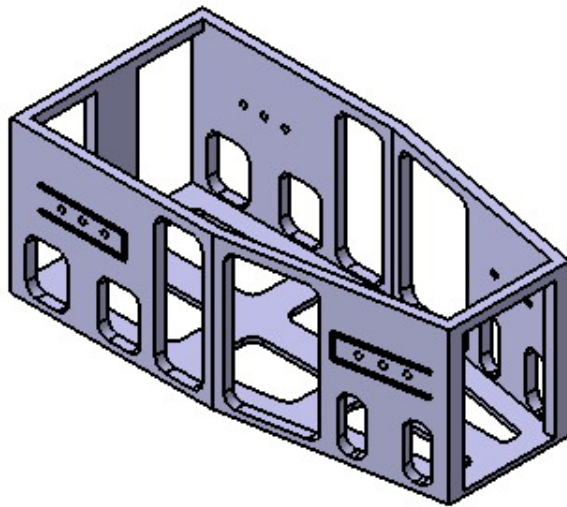
Akrelerin zor koşullarda hayatta kalma konusunda bu kadar başarılı olmasından yola çıkarak çok bozuk zeminlerde bile hareket yeteneğine sahip olmasını istediğimiz mobil robotumuz akrelerden esinlenerek tasarlanmıştır. Mobil robotumuz tıpkı akrelerdeki gibi uzun ince bir gövde yapısına ve toplam sekiz bacağına sahiptir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3: Sekiz bacaklı mobil robot

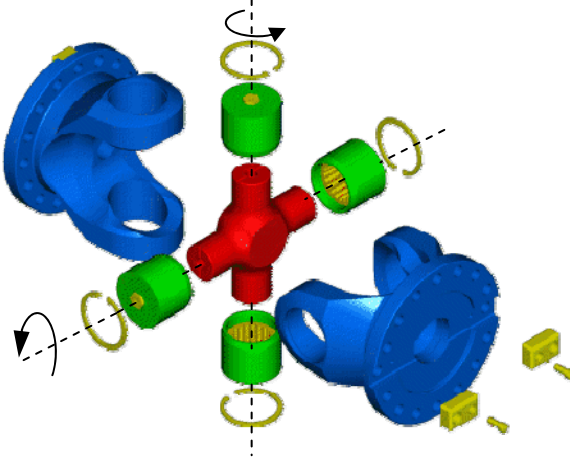
2.2 Bacakların ve Vagonların Seçimi

Mobil robotumuzun tasarımına başlarken akreplerden esinlendiğimizden Bölüm 2.1’de bahsedildi. Fakat robotumuz mekanik bir tasarım olacağından bu mekanizmanın bazı özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu özelliklere ise bu robot tasarımını yapmamızdaki amaçlarımız doğrultusunda karar verilmektedir. Bu özelliklerin en belirginini yüksek hareket kabiliyetidir. Bu amaçla mobil robotumuzun gövde yapısı tasarlanırken, akreplerdeki tek parça gövdenin aksine, gövdenin 2 eş vagondan oluşmasına karar verilmiştir (Şekil 2.4).



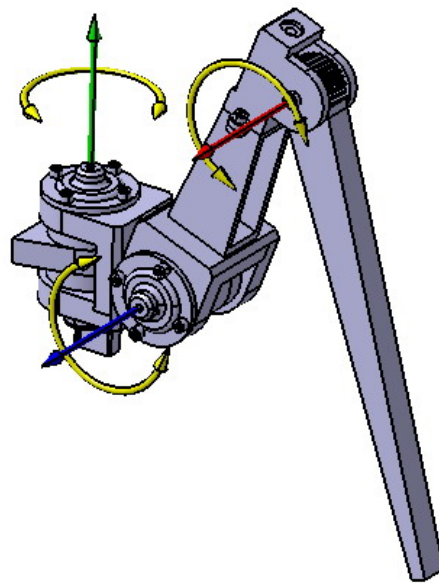
Şekil 2.4: Vagon Yapısı

Bu vagonlar, dar ve hareketleri kısıtlayan alanlarda mobil robotumuza yüksek hareket kabiliyeti kazandırmak amacıyla, birbirlerine 2 eksende hareket serbestliği sağlayan istavroz mafsalsal ile bağlanmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: İstavroz mafsalsal (Universal Joint) yapısı

Mobil robotumuzun gerekli hareket kabiliyetine sahip olabilmesi aslında vagonlardan daha çok bacakların yapısına bağlıdır. Vagonların arasına koyduğumuz istavroz mafsalsal sadece biraz daha esnek bir gövde yapısına sahip olmamızı sağlamaktadır. Mobil robotumuzun bacak yapısı tasarlanırken bacaklarımız 3 serbestlik derecesine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Vagonlar üzerindeki toplam sekiz bacak birbirinin aynısıdır (Şekil 2.6).

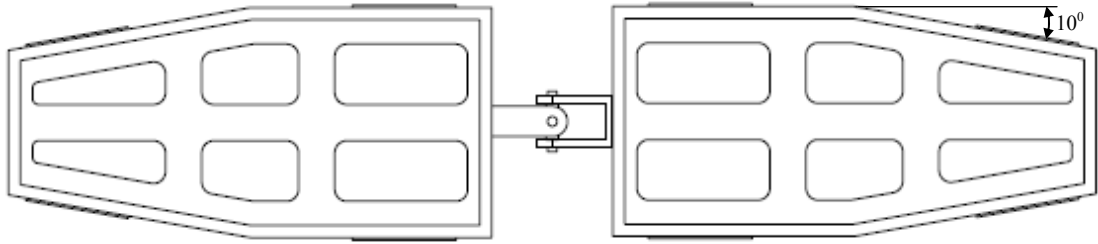


Şekil 2.6: Bacak hareket eksenleri

2.3 Vagon Tasarımı

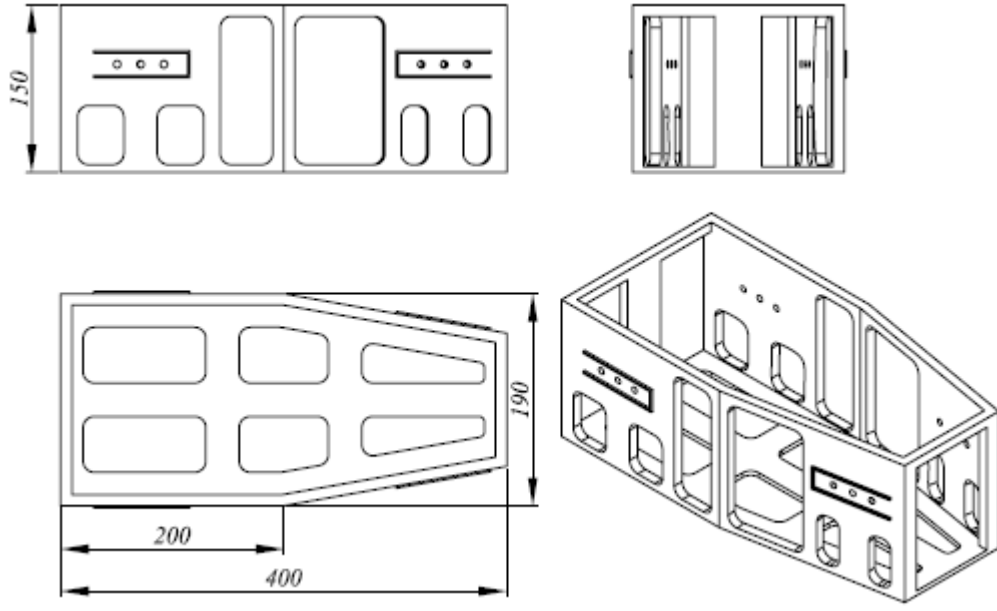
Mobil robotumuzun tasarlanma amacı olan çok bozuk zeminlerde, boru hatlarında hareket edebilme yeteneğine sahip olması fikri doğrultusunda bacakların ana taşıyıcısı olan vagon yapısı önem kazanmaktadır. Mobil robotumuzun ileride çok farklı görev ve amaçlarla kullanılabileceği göz önünde bulundurulursa vagon yapısı güçlü aynı zamanda hafif olmalıdır.

Mobil robotumuzun asıl çalışma sahasının laboratuvar dışı ortamlar olmasından dolayı gövde yapısının mobil robotun devrilmesine engel olabilecek bir yapıda olması gerekmektedir. Bu dengeyi sağlayabilmek amacı ile ön iki bacağın bağlandığı bölgelerin 10 derece açılı durmasına karar verilmiştir. Böylece birbirinin aynı olan iki vagonumuzun birbirine ters bağlanması ile mobil robotumuzda ön veya arka kavramlarının ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: Simetrik gövde yapısı

Statik ve dinamik haller göz önüne alındığında vagon yapımızda bacakların montaj edileceği noktalar, bacakların toplam vagon ağırlığının yaklaşık olarak dörtte birini taşıyacağı konumlarda seçilmiştir. Statik durumda bacakların link uzunlukları maksimum momenti yaratacak şekilde durduğunda taşıyıcı gövdemiz olan vagon yapımızın zarar görmemesi için kesitlerin mümkün olduğu kadar büyük olması istenmektedir. Fakat kesitlerdeki bu büyüklük sebebiyle ağırlıkta istenmeyen bir artış oluşmaktadır. İstenmeyen ağırlıkları azaltmak için vagonumuz üzerine mukavemeti çok fazla etkilemeyecek şekilde boşaltmalar yapılmıştır. Bu boşaltmaların yapılmasındaki bir diğer amaçta elektronik donanımın soğutulması için gerekli olan hava akımını sağlayabilmektir (Şekil 2.8).

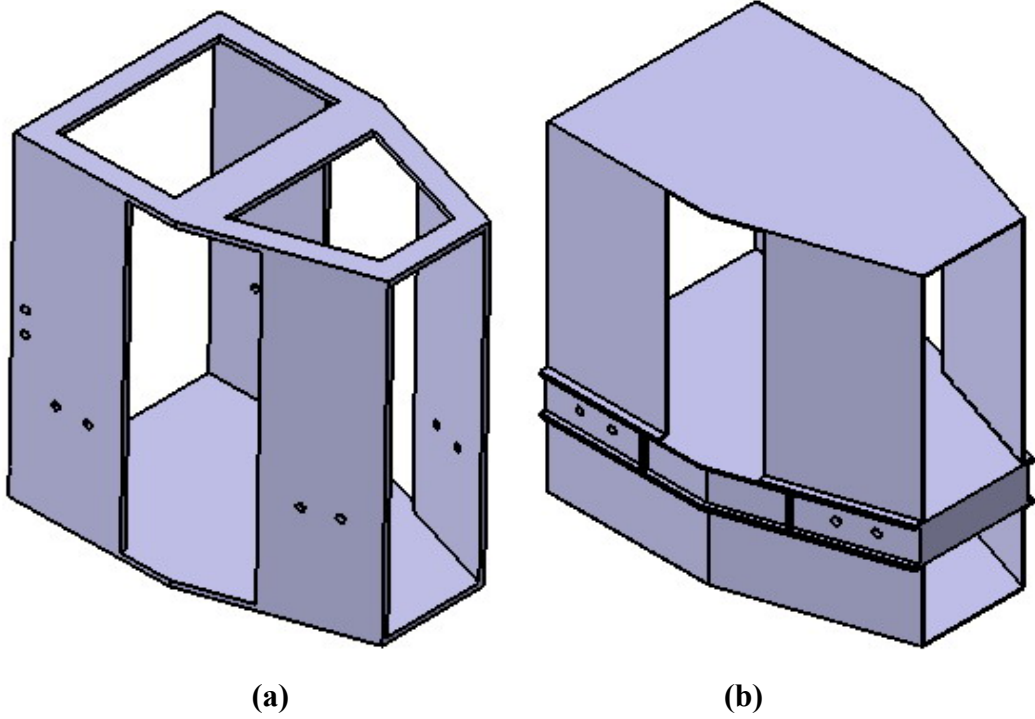


Şekil 2.8: Vagon boyutları

Vagon tasarımı sırasında vagonda kullanılacak malzemenin olabildiğince hafif ve yüksek mukavemetli olması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca mobil robotumuzun çok değişken koşullarda ve şartlarda çalışacağını göz önüne alırsak kullanacağımız malzemenin korozyona karşı oldukça dirençli olması gerekmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda vagon malzemesi olarak Al – 7075 serisi sert alüminyum kullanılabilmektedir. Bu alaşımlı alüminyum genel olarak uçak – uzay sanayinde kullanılmaktadır. Robotik uygulamalarda da fazlaca tercih edilen bir malzemedir ve standart takım tezgahlarında standart soğutucu sıvılarla iyi bir işlenebilirliğe sahiptir.

Alüminyum kaynağının oldukça zor olması, kaynaklı imalat sırasında parçalarda çarpılmalar oluşabileceği ve kaynak sonrası ısı tesiri adında kalmış bölgede malzeme yapısı değişeceği için kaynaklı bağlantılarla üretim yapılmamasına karar verilmiştir. Vagon yapısı yürüme anında çeşitli noktalardan eğilmeye maruz kalacaktır. Cıvata veya perçinli bir bağlantı yapılabilmesi için gerekli montaj deliklerinin kesitlerde azalmaya sebep olması sonucu bu noktalarda gerilme birikimleri meydana gelecektir. Bu sebeple ilk vagon tasarımdan vagon yapısının son haline kadar talaşlı imalata uygun tasarımlar üzerinde durulmuştur ve vagon yapısının imali sırasında dolu kütükten işlenmesi kararlaştırılmıştır.

Tasarımı yapılacak vagonun bacaklar için taşıyıcı bir gövde olmasının yanı sıra elektronik donanım içinde hem taşıyıcı hem de koruyucu bir yapıda olması gerekmektedir. İlk tasarladığımız vagon yapısı (Şekil 2.9a) bu görevleri başarıyla yerine getirebilecek bir yapı olmakla beraber bacaklardan gelecek eğilme momentlerini karşılayabilecek bir yapıya sahip değildir. Bu eğilme momentlerine karşı yeterince sağlam bir yapı elde edebilmek amacıyla şekil 2.9b’de görülen vagon tasarlanmıştır. Fakat bu tasarım diğerine göre oldukça ağır olmasının yanı sıra elektronik donanımı koruyacak kaporta benzeri gövde parçaları sebebiyle oldukça hantal görünmektedir.



Şekil 2.9: Tasarımı yapılmış vagon örnekleri

Şekil 2.8’de görülen vagon tasarımı tüm bu problemlere karşı başarıyla cevap verebilmektedir. Resimlerden de anlaşılabileceği gibi vagon uzunluğu biraz arttırılmış eni ise bir miktar kısaltılmıştır. Bu sayede bacaklar arası mesafe arttırılmış ve hareket serbestliği sağlanmıştır. Bacaklar arası mesafenin artmış olması ayrıca mekanizmanın daha dengeli olmasını sağlamaktadır.

Vagon yapısının şekil 2.8’de görülen yapı olarak seçilmesi ile elektronik donanım için daha geniş bir hacim elde edilmektedir.

2.4 Bacak Tasarımı

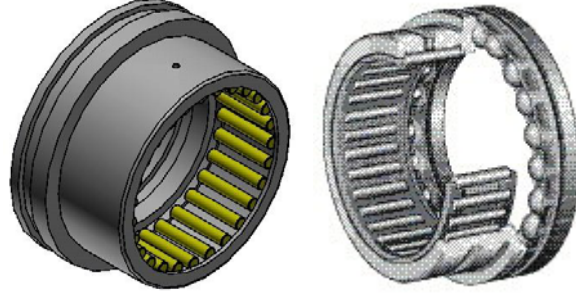
Mobil robota gereken hareket serbestliğini kazandırabilmek adına bacak tasarımı oldukça önemlidir. Bacak tasarımı sırasında ilk olarak bacağın kaç serbestlik derecesine sahip olması gerektiği sorusunun cevaplanması gerekmektedir. Bu soruyu cevaplamak amacı ile doğadaki örneklerden yola çıkılmış ve bacağın üç serbestlik derecesine sahip olması gerektiğine karar verilmiştir.

Mobil robotun çok amaçlı kullanılabilmesi için bacak yapısının oldukça sağlam olması gerekmektedir. Ayrıca mobil robotumuz laboratuvar dışı ortamlar için tasarlandığından eklemleri tahrik edecek motorların dışarıda olmaması gerekmektedir. Bu sebeple bacaklarda bulunan 3 motorunda olabildiğince bacak eklem parçalarının içine yerleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede hem oldukça estetik bir görüntü elde edilmiş hem de motorlar dış etkenlerden korunmuş olmaktadır.

Bacak tasarımı sırasında motorların eklemlerin içine yerleştirileceği göz önüne alınarak eklem boyutlandırılması, yatak seçimi gibi konular için bir başlangıç noktası teşkil etmesi amacıyla tasarımın ilk aşamasında bir motor seçilmiştir. Daha sonra yapılan hesaplarla bu motorların uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Bacak eklemlerinin tasarımındaki en önemli konu motorların eklem içine nasıl yerleştirilmesi gerektiği konusudur. Birçok yürüyen robot örneğinde motor direkt olarak mekanik yüke maruz bırakılmakta yani bir nevi taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. Fakat kullanılan motorların taşıyabilecekleri mekanik yük açısından belirli limitleri olması sebebiyle bu yöntem sakınca yaratmaktadır. Üstelik bu yöntem kullanılarak tasarımı yapılmış mobil robotlar nispeten daha küçük boyutlu ve daha hafif mobil robotlardır. Bizim yaklaşımımızda ise motor, içi boşaltılmış bir milin içine yerleştirilmiş ve milin üzerine rulmanlar geçirilmiştir. Bu sayede motora gelecek mekanik yüklerin bu rulmanlar tarafından karşılanmasını sağlanmaktadır. Bacakların sürekli olarak hareket edeceği ve rulmanların hem eksenel hem de radyal yönde sürekli değişen kuvvetlere maruz kalacağı göz önüne alınarak eklemlerde kullanılan rulmanlar hem eksenel hem de radyal yönde oldukça büyük kuvvetleri

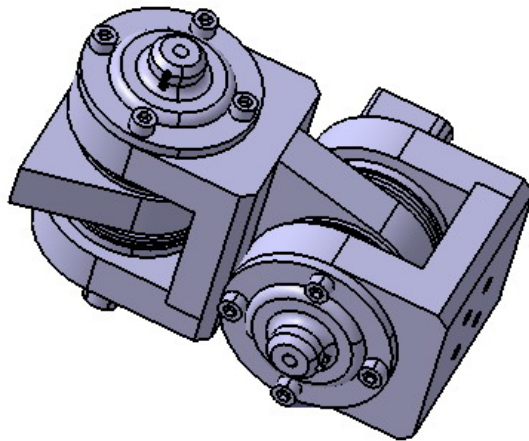
karşılayabilecek rulmanlar olarak seçilmiştir (Şekil 2.10). Eksenel yöndeki kuvvetleri bilyalar, radyal yöndeki yükleri ise iğne makaralar taşımaktadır.



Şekil 2.10: İğneli – eksenel bilyalı rulman

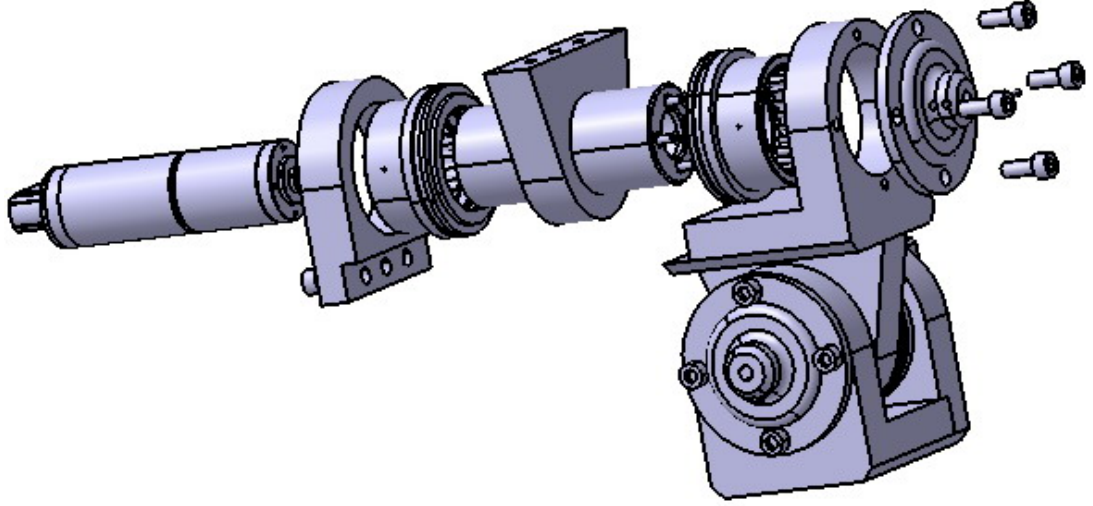
İğneli – eksenel bilyalı yataklar, bir iğneli yatakla 511 serisinden bir eksenel bilyalı yataktan oluşur ve radyal yüklerle beraber bir yönde büyük eksenel yükleri de taşıyabilirler. Çift kullanılmaları halinde her iki yönde etkiyen eksenel yükler içinde uygundurlar [11].

Mobil robotumuzun sahip olacağı bacak için eklem tasarım aşamasında ilk iki eklem mümkün olduğunca birbirine yakın olması hedeflenmiştir. Bu sayede aynı ekleme 2 serbestlik derecesi elde edilebilmektedir. Böyle bir yapı elde edebilmek amacıyla birbirinin neredeyse aynısı parçalar tasarlanmış ve bunların birbirlerine 90⁰ derece açılı durması sağlanmıştır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: Omuz eklemi

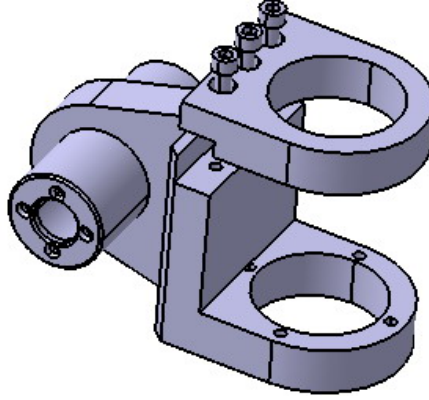
Tasarımda daha öncede bahsettiğimiz gibi motor bir milin içine yerleştirilmiştir ve ekleme gelen yüklerin karşılanması için iğneli – aksenel rulman kullanılmıştır. Bu sebepler omuz eklemimizin hacim olarak büyümesine sebep olmaktadır. Buna rağmen omuz eklemi oldukça ergonomik bir yapıya sahiptir. Şekil 2.12’den de anlaşılacağı gibi eklem montaj şeklide oldukça basitleştirilmiştir.



Şekil 2.12: Birinci omuz eklemi montaj şekli

Motorun bir eklem parçası içine yerleştirilmesi konstrüksiyon açısından çözülmesi gereken önemli bir problemi de beraberinde getirmektedir. Motor dış yüzeyinin taşıyıcı olarak kullanıldığı konstrüksiyonlarda motor veya redüktör mili doğrudan ekleme montaj edilmektedir. Oysaki bizim konstrüksiyonumuzda motor bir milin içine yerleştirilmekte ve bu milin uç kısmındaki flanşa cıvatalarla bağlanmaktadır. Daha sonra ise motor mili eklem diğer kısmına cıvatalarla montajı yapılmış bir aktarma parçasına tespit cıvataları (setuskur) yardımıyla monte edilmektedir. Böylece motor momenti redüktörden çıktıktan sonra doğrudan omuz eklemine aktarılmaktadır. Motorun içine yerleştirildiği eklem parçası üzerine iğneli – aksenel rulmanlarımız takılmaktadır. Bu rulmanların çift kullanılması sayesinde iki yönden de gelebilecek olan aksenel yükler taşınabilmektedir. Montaj kolaylığı sağlaması açısından şekil 2.13’teki parçanın alt kısmı cıvata bağlantılı olarak tasarlanmıştır. Bu sayede rulmanlar oldukça rahat bir şekilde yerlerine oturtulabilmektedir. İkinci omuz eklemi birkaç montaj deliği haricinde birinci omuz eklemine aynısıdır.

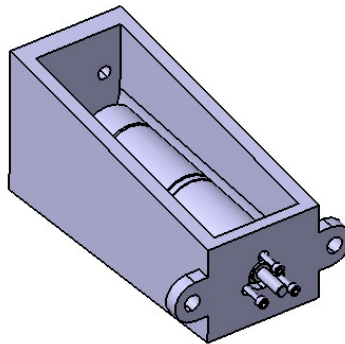
Omuz eklemlerinin imali sırasında kullanılacak malzeme olarak Al7075 serisi alüminyum seçilmiştir.



Şekil 2.13: Omuz eklemi montaj şekli

Mobil robotumuzun bacağının diğer eklemi ise dirsek benzeri bir yapıya sahiptir. Böyle bir bacak yapısı tercih ederek mobil robotumuzun farklı bacak açıklıklarına sahipken yerden yüksekliğinin değişmemesi sağlanabilmektedir. Bu özelliği sayesinde özellikle boru hatlarında kullanım sırasında oldukça yüksek bir hareket kabiliyeti elde edilebilecektir.

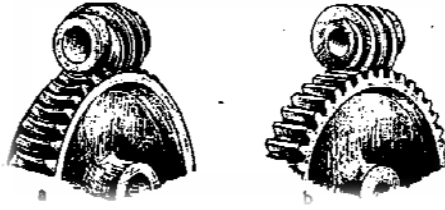
Dirsek eklemi tasarımında omuz eklemine benzer şekilde motorun linklerin içine yerleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla bir motor seçilmiş ve dirsek eklemi oluşturan ilk parçanın içi motor boyutuna uygun olacak şekilde boşaltılarak ve motorumuz içine yerleştirilmiştir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14: Dirsek eklemi motoru montajı

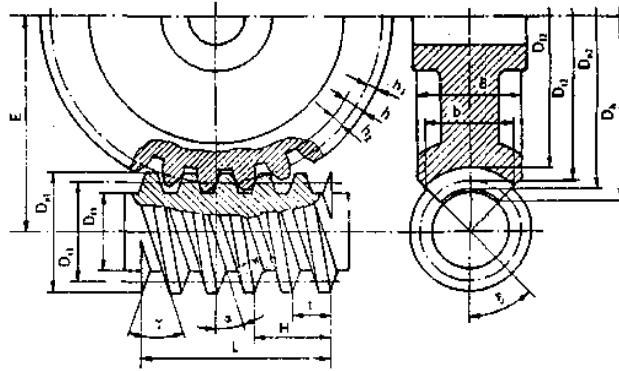
Dirsek eklemine motorun dış etkenlerden korunması amacıyla link içine yerleştirilmesi sonucu motor hareketini 90^0 çevirme gerekliliği oluşmaktadır. Bu

sorunun üstesinden sonsuz vida ve çark mekanizması kullanılarak gelinmektedir. Sonsuz vida ve çark sistemi, eksenleri 90° açı yapan ve kesişmeyen millerde kullanılır. Sonsuz vida bir trapez vidadır, iletilen gücün büyüklüğüne ve iletme oranına göre tek ağızlı, iki, üç ve dört ağızlı olarak yapılır. Sonsuz vida çarkının çevresi düz (Şekil 2.15 b) veya sonsuz vidayı kavrayacak şekilde kavisli olarak yapılır (Şekil 2.15 a). Sonsuz vida çarkı, sonsuz vidayı bir somun gibi kavradığına göre her ikisinin de helis yönleri aynıdır. Vidanın yükselim açısı, çarkın helis açısına eşittir. Sonsuz vidalar da diğer vidalar gibidir. Tek farkı adımının modül cinsinden olmasıdır.



Şekil 2.15: Sonsuz vida ve çarkı

Sonsuz vida ve çarkı, yüksek devir düşürülerek, yükün ağır ve hız oranının küçük olduğu yerlerde kullanılır. Az bir kuvvetle çok iş görürler. Divizörlerde, kaldırma araçlarında, otomobillerde, elektrikli süpürgelerde v.b. yerlerde kullanılırlar.



Şekil 2.16: Sonsuz vida ve çarkı değişkenleri

Sonsuz vida çarkının diş sayısı 40 olduğu zaman, tek ağızlı sonsuz vida kullanılır. 40 – 50 dişli olduğu zaman çift ağızlı sonsuz vida ve diğer diş sayıları için de çok ağızlı sonsuz vida kullanılır.

Tablo 2.1: Sonsuz vida ve çarkı hesaplarında kullanılan formüller

İsim	İşaret	Sonsuz Dişli	İşaret	Sonsuz Vida
Modül	m	t/π	m	t/π
Adım	t	$m.\pi$	t	$m.\pi$
Helis adımı			H	$D_{t1}.\pi.Cotg\beta$
Ağız sayısı			G	H/t
Bölüm dairesi çapı	D_{t2}	$m.Z$	D_{t1}	$H/\pi.Cotg\beta$ $H = t.G$
Diş üstü çapı	D_{a2}	$D_{t2} + 2.m$	D_{a1}	$D_{t1} + 2.m.Sin\beta$
Pah açısı	δ	$\tan \delta = 2.a.t/[D_{t1} + 1,2.t]$		
Dişil genişliği	B			
Eksenler arası	E	$(D_{t1} + D_{t2})/2$	E	$(D_{t1} + D_{t2})/2$
Vida profil açısı			γ	Yaklaşık 30^0

Eklem boyutlarını çok fazla büyütmemek için sonsuz vida tasarımında modül olarak 1,5 seçilmiştir. Gerekli hesaplar aşağıda verilmiştir.

Sonsuz vida için;

$$m = 1,5$$

$$D_{t1} = 18$$

$$D_{a1} = D_{t1} + 2.m = 21$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{m}{D_{t1}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1,5}{18}\right) = 4,7636^0$$

Çark için;

$$m = 1,5$$

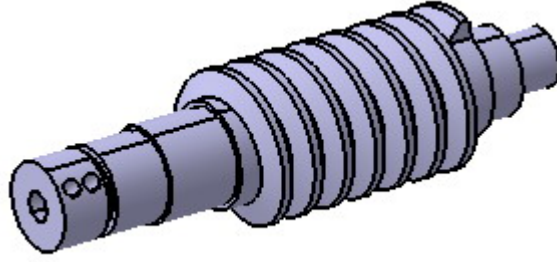
$$z = 30$$

$$\beta = 4,7636^0$$

$$D_{t2} = \left(\frac{m}{\cos \beta}\right).Z = \left(\frac{1,5}{\cos 4,7636}\right).30 \cong 45,16$$

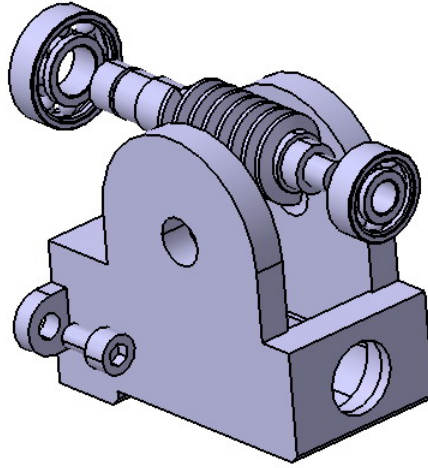
$$D_{a2} = D_{t2} + 2.m = 48,16$$

Tasarladığımız sonsuz vida aşağıda şekil 2.17’de görülmektedir.



Şekil 2.17: Sonsuz Vida

Sonsuz vida kullanılması yukarda anlatılan faydalarının yanı sıra montaj esnasında karşılaşılabilecek bazı konstrüksiyon problemlerini de beraberinde getirmektedir. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek amacıyla sonsuz vidanın yataklanacağı dirsek parçası (Şekil 2.18) şekil 2.14’te gösterilen parçadan ayrı olarak tasarlanmıştır.



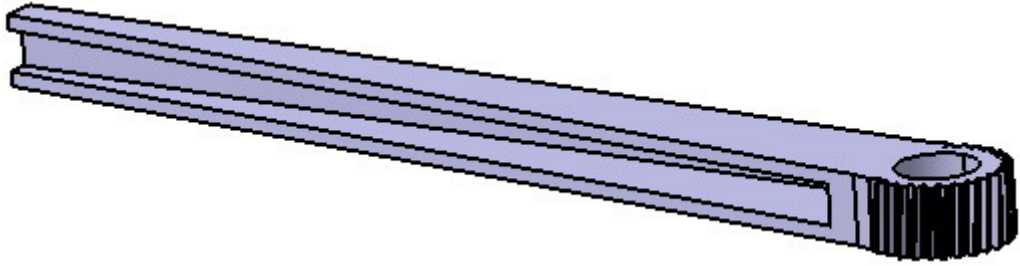
Şekil 2.18: Sonsuz vida yatağı

Sonsuz vida iki taraftan rulmanlarla yataklanmıştır. Bu yataklamadaki amaç tıpkı omuz eklemlerinde olduğu gibi motora herhangi bir mekanik yükün etkimesini önlemektir.

Şekil 2.14 ve şekil 2.18’de görülen parçaların birbirlerine montajları cıvatalarla yapılmaktadır. Bu montaj yapıldıktan sonra ise sonsuz vida motor miline tespit cıvataları ile sabitlenmektedir.

Dirsek eklemi tasarımı yapılırken şekil 2.14’te gösterilen motor yatağı ve şekil 2.18’de gösterilen sonsuz vida yatağının imali sırasında malzeme olarak Al7075 alüminyumun kullanılmasına karar verilmiştir.

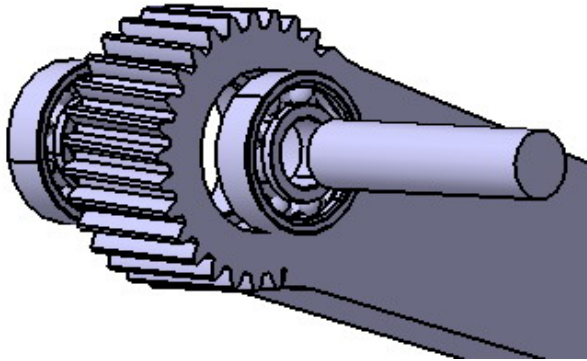
Dirsek ekleminin son parçası aynı zamanda mobil robotumuzun yerle temasını sağlamaktadır. Bu parçanın tahriki sonsuz vida tarafından yapılacağından parça üzerinde sonsuz vida çarkı bulunması gerekmektedir. Bu amaçla yaptığımız tasarım şekil 2.19’da görülmektedir.



Şekil 2.19: Son kol tasarımı

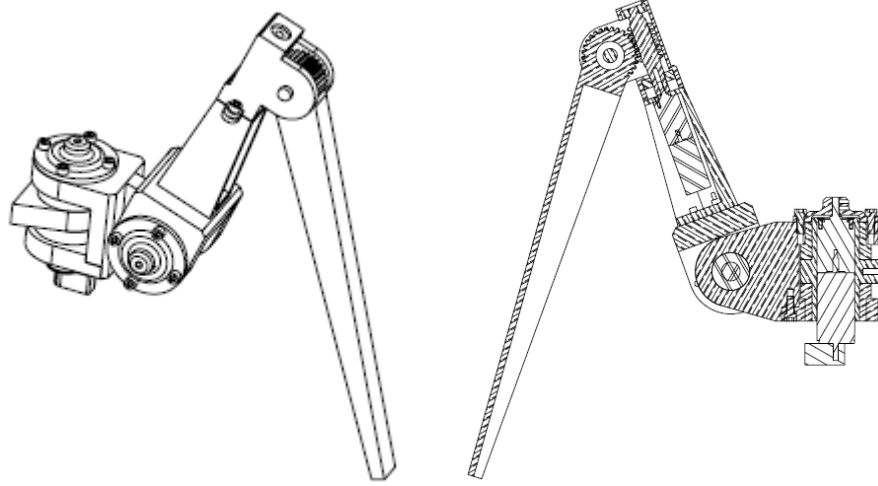
Şekil 2.19’den da görüldüğü gibi parçamız üzerinde bir kanal bulunmaktadır. Tasarım sırasında bizi oldukça zorlayan ağırlıkları azaltmak ve yürüme esnasında yerden gelen tepki kuvvetini ölçmek için kullanılacak olan kuvvet sensörünün bu bölgeye yerleştirilmesi amaçlanmaktadır.

Son kolun dişli kısmının ortasında rulman yatakları bulunmaktadır. Bu sayede son kol ile sonsuz vida yatağı arasındaki bağlantıyı sağlayan pim ve segman bağlantılarına gelecek yüklerin bu rulmanlar tarafından taşınması sağlanmaktadır (Şekil 2.20).



Şekil 2.20: Son kol yataklama şekli

Bacak mekanizmasının diğ er parçalarında olduğu gibi son kolun da Al7075 serisi al uminyumdan imal edilmesine karar verilmiştir. Bu sayede oldukça dayanıklı aynı zamanda da hafif bir bacak mekanizması elde edilmektedir (şekil 2.21).



şekil 2.21: Bacak yapısı

Tasarım yapılmış tüm parçaların imalat resimleri ve montaj resimleri Ek A'da verilmiştir.

2.5 Yapı Analizleri

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) mühendislerin karşılaştığı karmaşık ve zor fiziksel problemleri kabul edilebilir bir yaklaşıklıkla çözebilen sayısal bir çözüm yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi fizik ve mühendislikte karşılaşılan birçok problemin çözümünde kullanılan en yaygın ve etkin sayısal yöntemlerden biridir. Sonlu elemanlar metodu matematikçilerden ziyade daha çok mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Metot ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır. Günümüzde ise dayanım, akışkan, titreşim ve dinamik analiz hesaplarında da kullanılmaktadır [12].

SEA bilimsel ve teknolojik problemlerin sayısal çözümlenmesinde en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. SEA'in boyutlarının büyüklüğünü göstermek için, bunun hem matematiksel analiz, hem diferansiyel denklemler, hem sayısal

yöntemler, hem bilgisayar bilimleri, hem de ayrıca çeşitli mühendislik bilimleri dallarıyla iç içe olduğunu söylemek yeterlidir [12]. Sonlu elemanlar yönteminin statik analiz, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, elektromanyetik analiz ve akustik gibi pek çok fiziksel olayın çözümünde uygulama alanı bulması ve bilgisayara uygulanması kolay bir algoritmaya dayanması problem çözümünde yaygın olarak kullanılmasına neden olmuştur. Sonlu elemanlar ile hesap yönteminin avantajlarını ve dezavantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz;

- a) Sonlu elemanlar, boyutları ve şekillerinin esnekliği nedeniyle, verilen bir cismi temsil edebilir, hatta karmaşık şekilli bir cisimde daha güvenilir olabilir.
- b) Çok bağlantılı bölgeler (yani bir veya çok delikli cisimler) veya köşeleri olan bölgeler zorluk çekilmeksizin incelenebilir.
- c) Değişik malzeme veya geometrik özellikleri bulunan problemler ek bir zorluk göstermez. Geometri ve malzemenin yapısındaki bozukluklar, değişken özellikler (zamana bağlı), malzeme özellikleri kolaylıkla göz önüne alınabilir.
- d) Sebep – sonuç bağıntılarına ait problemler tümel direngenlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş "kuvvetler" ve "yer değiştirmeler" cinsinden formüle edilebilir. Sonlu eleman metodunun bu özelliği problemin anlaşılmasını ve çözülmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir.
- e) Sınır şartları kolayca uygulanır.
- f) Sonlu eleman metodunun çok yönlülük ve esnekliği karmaşık yapılarda, sürekli ortam, alan ve diğer problemlerde sebep sonuç ilişkilerini hesaplamak için çok etkin bir şekilde kullanılabilir. Analitik ve deneysel metotlardan daha hassas sonuç verir.

Yöntemin dezavantajları ise;

- a) Programların maliyetleri çok yüksektir.
- b) Programlar patentlidir. Bu sebepten dolayı kullanılan programlar lisanslı olmalıdır.
- c) Her kullanıcının bir girişi vardır. Bu programlar sık sık yenilenmelidir.

- d) Programların kullanılabilmesi için iyi bir donanıma sahip olmak gerekir. Bu sebeple PC'nin maliyeti de artar.

Sonlu elemanlar analizinde hesaplama basamakları yöntemin temelini oluşturmaktadır. Bu basamakları sıralayacak olursak [12];

- a) Sürekliliği kesikleştirme: Çözüm bölgesini sonlu elemanlara bölme aşamasıdır.
- b) İnterpolasyon fonksiyonlarını seçmek: İnterpolasyon fonksiyonları, eleman boyunca alan değişkenlerini interpolate etmek için kullanılmaktadır. Genelde, polinomlar interpolasyon fonksiyonları olarak seçilmektedir. Polinomun derecesi, elemana atanmış düğüm sayısına bağlıdır.
- c) Eleman özelliklerini bulmak: Sonlu elemanlar için matris denklemi bilinmeyen fonksiyonun düğüm değerlerini diğer parametrelere bağlayacak şekilde oluşturulmalıdır. Bunun için farklı yaklaşımlar kullanılabilir: En uygunları, varyasyonel yaklaşım ve Galerkin metodudur.
- d) Eleman denklemlerini bir araya getirmek: Tüm çözüm bölgesi için global denklem sistemini bulmak için tüm elemanlara ait eşitlikler bir araya getirilmelidir. Diğer bir deyişle, kesiklilik için kullanılan tüm elemanlara ait lokal eleman eşitlikleri birleştirilmelidir. Çözüm öncesinde, sınır koşulları empoze edilmelidir.
- e) Global denklem sistemini çözmek: Sonlu eleman global denklem sistemi tipik olarak sparse, simetrik ve pozitif tanımlıdır. Çözüm için direkt ve iterative metotlar kullanılabilir. Göz önüne alınan fonksiyonun düğümsel değerleri çözümün sonucu olarak oluşturulmaktadır.
- f) Ek sonuçları hesaplamak: Birçok durumda ek parametreleri hesaplamaya da ihtiyaç duyarız. Örneğin yer değiştirme ile birlikte, mekanik problemlerinde zor ve zorlanma; ki bu yer değiştirme, global denklem sisteminin çözümünden sonra elde edilmektedir.

SEY'de sistemi tanımlayan bölge, "element" olarak adlandırılan basit geometrik şekillere parçalanmaktadır. Elementlere eleman da denmektedir. Bu elementlerin özellikleri, "düğüm" olarak adlandırılan özel noktalardaki bilinmeyen değerler cinsinden ifade edilir. Sınır koşullarını da içerecek şekilde, elementlerin

Katı Modelleme (solid modelling) en üst düzey modelleme tekniğidir. Gerçek anlamda cismin iç ve dış geometrisinin tanımı yapılmış olur. Tel çerçeve veya yüzey modelleme yöntemlerinin zayıf kaldığı birçok nokta bu yöntemde giderilmiştir. Katı modelleme sonucu elde edilen görüntü tel çerçeve veya yüzey modelleme görüntülerin gizli çizgilerinin kaldırılması ile elde edilen görüntüye benzer. Katı modellemenin esas özelliği görüntünün ötesinde cismin iç ve dış geometrisinin bilgi kütüğü şeklinde bilgisayara geçmiş olmasıdır. Böylece ağırlık, moment gibi parametreler hesaplanabilir veya kesitler alınarak cismin iç geometrik formu incelenebilir. Tüm bu işlemlerde kullanıcının müdahalesi ve çabası minimumdur. Cisimlerin yüzeylerindeki renkler, geçirgenlik ışık yoğunluğu ve gölgeleme yapılabilir. Cisimlerin katı modellemesi için CAD programları iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler; bazı geometrik pirimitivlerin boolean mantığına göre birleştirilmesi veya çıkarılması ile yüzey sınırlarının belirlenmesi veya bu sınırlar boyunca iki boyutlu yüzeyler taraması ile cismin tüm hacmi tanımlanmasıdır. Eksenel simetri olan bir parça dönme şeklinde bir tarama ile kolaylıkla tanımlanır. Karmaşık yüzeylerde tanımlanan eğriler boyunca yapılan tarama yüzeyi oluşturur. Tasarımı yapılacak cismin yapısına göre bu iki yöntemden birisi tercih edilir. Genelde cisimler silindir, dikdörtgen gibi parçalardan oluştuğu için pirimitiv kullanarak modelleme tercih edilmektedir. CAD ortamında hızlı bir veri iletişim ve işlem gücü istemi yöntemin dezavantajı olarak gösterilmektedir. Bir ürünü her açıdan görmek, o ürünün gerçek yapı ve şekli hakkında daha iyi fikir edinmek için bilgisayar ortamında ürünün gerçek ölçüleri ölçüt alınarak görüntüsünün oluşturulmasıdır. Bu sayede bir ürünün daha üretilmeden istenen şekil ve işlevi sağlayıp sağlamadığı kontrol edilebilmektedir ve bu sayede prototip üretme

maliyetleri azaltılmaktadır. Dayanım ve malzeme hesapları da yüksek maliyetli testlerle değil yazılım olarak yapılabileceğinden daha hızlı ve ucuz olmaktadır.

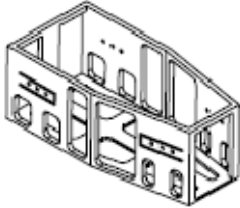
CATIA programı kullanılarak tasarımı yapılan mobil robotumuzun çeşitli görevler için kullanımı sırasında parçalarının gelecek yükler sonucu hasar görmemesi gerekmektedir. Bunu anlaya bilmek için mobil robotumuzu oluşturan parçaların CATIA P3V5R16 programının Analysis&Simulation modülünün Genarative Structural Analysis bölümü sayesinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizleri yapılmıştır. Parçalarımızın imalatı sırasında kullanacağımız Al 7075 serisi alüminyumun mekanik özellikleri aşağıda tablo 2.2’de verilmektedir.

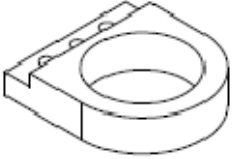
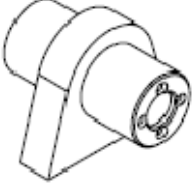
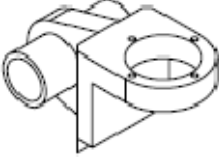
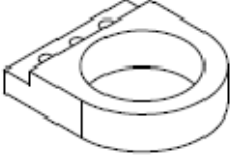
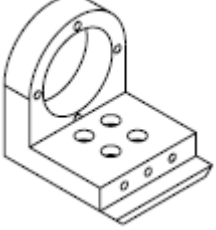
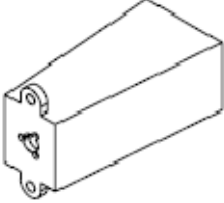
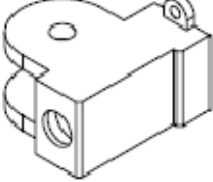
Tablo 2.2: Al 7075 Mekanik Özellikleri

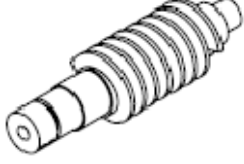
Birincil Alüminyum Alaşımı	Al 7075
Kimyasal Bileşimi	AL ZN MG CU 1.5
Gerilim Gücü (RM)	480 – 530 N/mm ²
Akma Dayanıklığı (Rp 0.2)	340 – 450 N/mm ²
Binel Sertlik HB	120 – 140
Spesifik Ağırlık (yoğunluk)	2800 kg/m ³
Isı İletkenliği	130 – 160 W/M* K
Elektrik İletkenliği	17 – 20 m/OHM-mm ²
Elastisite Modülü	72.000 N / mm ²

Statik yapı analizi yapmak için mobil robotumuzu oluşturan parçaların kütlelerinin yaklaşık olarak hesaplanması gerekmektedir. Böylece parçaların taşıyacağı yükler ve momentler hesaplanabilmektedir. Eklem parçalarımız ve vagonumuz CATIA programı kullanarak tasarlandığından aynı program yardımıyla parçalarımızın kütleleri rahatlıkla hesaplanabilmektedir. Tablo 2.3’te kütleler tablo halinde verilmiştir.

Tablo 2.3: Vagon ve eklem parçalarının kütleleri

	Vagon	2,85 kg
---	-------	---------

	1.Omuz eklemi alt parçası	0,144 kg
	1.Omuz eklemi mili	0,278 kg
	2.Omuz eklemi mili	0,685 kg
	2.Omuz eklemi alt parçası	0,144 kg
	2.Omuz eklemi üst parçası	0,392 kg
	Dirsek eklemi motor yatağı	0,288 kg
	Dirsek eklemi sonsuz vida yatağı	0,248 kg
	Kapak	0,066 kg

	Dirsek eklemi son kolu	0,405 kg
	Sonsuz vida	0,037 kg
	Rulman (608)	0,012 kg
	Rulman (6001)	0,022 kg
	Rulman (NKX 40)	0,220 kg

Mobil robotumuzun yaklaşık olarak ağırlığının hesaplanabilmesi için eklem parçalarının yanı sıra kullanılacak motor ve redüktörlerinde ağırlıklarının bilinmesi gerekmektedir. Motorların seçimi tasarıma başlanırken boyut ve moment ilişkisinden optimum fayda sağlanacak şekilde Maxon Motor katalogundan seçilmiştir. Seçilen motorlar ve teknik özellikleri aşağıda tablo 2.4'te verilmektedir. 1. ve 2. omuz eklemine aynı motor kullanıldığından toplam 2 farklı motor bulunmaktadır.

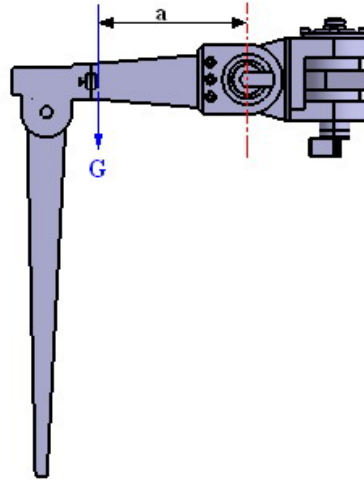
Tablo 2.4: Kullanılan motorların özellikleri

EC 32 (1. ve 2. Omuz eklemine)	Motor gücü: 80 W Nominal montaj: 24 V Moment: 0,355 Nm Ağırlık: 0,263 kg
EC 22 (Dirsek eklemine)	Motor gücü: 20 W Nominal montaj: 24 V Moment: 0,048 Nm Ağırlık: 0,085 kg

Motorların çıkış millerinden alınacak moment değerlerini arttırmak amacıyla motorlara uygun redüktörlerin seçilmesi gerekmektedir. Redüktör seçiminde

bacakların çok hızlı hareket etmeyeceğini varsayarak sadece moment değerini baz alarak bir seçim yapılmıştır. Bu redüktörler oldukça küçük boyutlarda olup güneş uydu dişli mekanizmasını kullanmaktadırlar. Seçilecek olan redüktör oranına göre moment 1 veya 5 kademede istenilen değere ulaştırılmaktadır. Seçilen redüktörlerin ağırlıkları EC 32 için (1/86 oranındaki redüktör) 0,194 kg EC22 için ise (1/84 oranındaki redüktör) 0,068 kg dır. Motorların ve redüktörlerin katalogları Ek B’de verilmiştir.

Seçilen motorların uygun olup olmadığı basit bir moment hesabıyla kontrol edilebilmektedir. Mobil robotun tasarlanan bu ilk versiyonunda bacak bir manipülatör gibi çok hızlı hareket etmeyeceğinden, ataletleri göz ardı ederek sadece motorun hareket ettirdiği link ağırlıklarını göz önüne alarak bir moment hesabı yapılabilir.



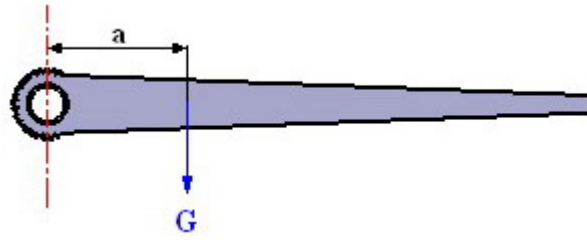
Şekil 2.22: 2. omuz eklemi motoru için moment kolu

Maksimum moment kolu Şekil 2.22’de görüldüğü gibi 2. omuz eklemi sıfır derece ile durduğunda olmaktadır. Bu konumda maksimum yük 2. omuz eklemi motoruna etkimektedir. Dolayısıyla en kötü durumda bu yükü karşılayabilecek bir motor hareket esnasında bacağı rahatlıkla hareket ettirebilecektir. Şekil 2.22’de gösterilen G ağırlığı yaklaşık olarak 2.0 kg civarındadır. Moment kolu a ise yaklaşık 160 mm olmaktadır. Bu durumda motora etkiyen momente M dersek;

$$M = G \times a = m \times g \times a = 2.0 \times 9.81 \times 0.160 = 3.14 \text{ N.m}$$

olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda M momenti motor redüktörü çıkış momenti olan 6 N.m'den küçük olduğundan, seçtiğimiz motor bacağı rahatlıkla hareket ettirebilecektir.

Dirsek eklemi için seçilen motorun uygun olup olmadığı yukarıdaki hesaba benzer bir hesap yapılarak bulunabilir. Tasarım sırasında dirsek eklemi motorunun sadece son kolu hareket ettireceği varsayıldığından, motorun sadece parçanın ağırlığının oluşturduğu momenti karşılaması gerekmektedir.



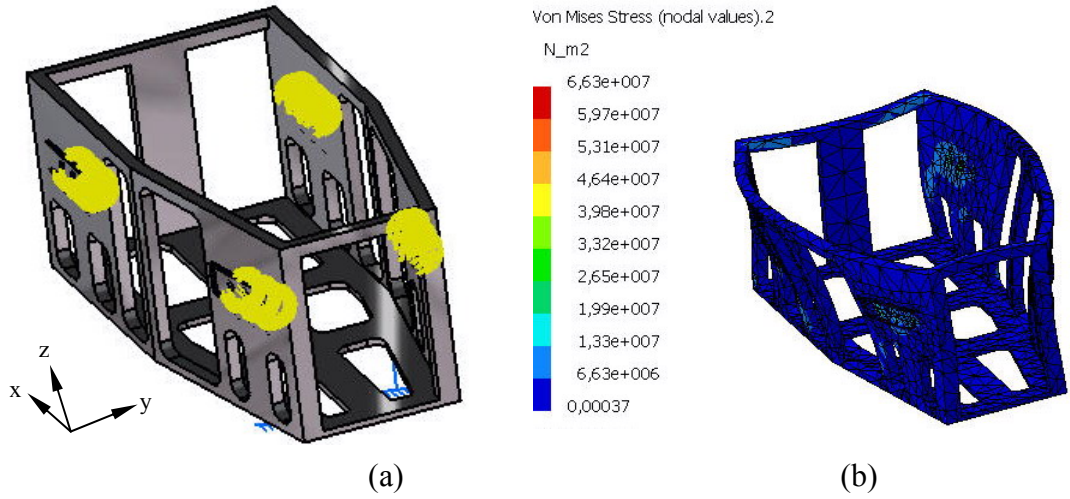
Şekil 2.23: Dirsek eklemi motoru için moment kolu

Maksimum moment kolu şekil 2.23'te görüldüğü gibi son kol motor eksenine paralel bir pozisyon aldığı anda oluşmaktadır. Bu durumda moment kolu a yaklaşık olarak 130 mm olmaktadır. Ağırlık ise Tablo 2.3'ten görüleceği gibi 0.405 kg'dır. Bu durumda motora gelen moment M ;

$$M = G \times a = m \times g \times a = 0.405 \times 9.81 \times 0.130 = 0.52 \text{ N.m}$$

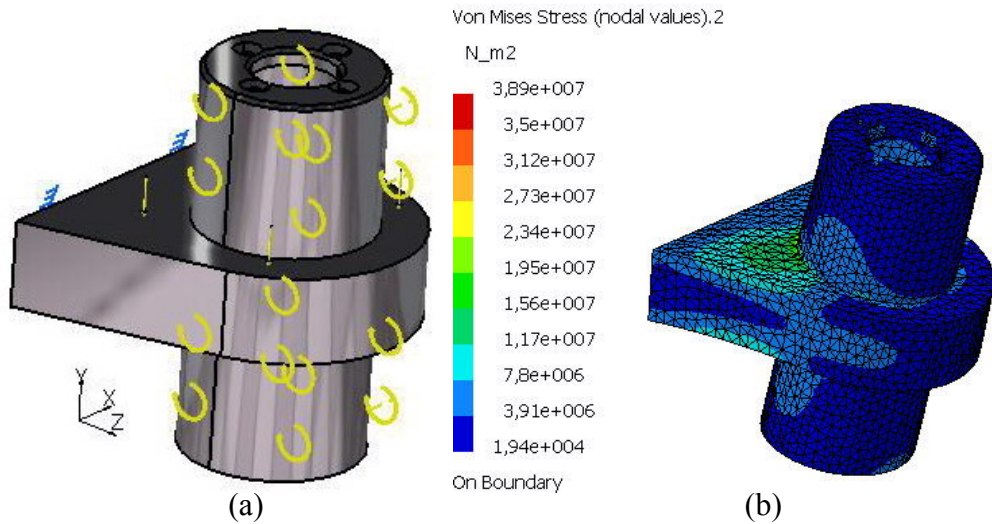
olarak hesaplanmaktadır. Bu değer redüktör çıkış momentimiz olan 2.0 N.m'den küçük olduğundan motor son kolu rahatlıkla hareket ettirebilecektir.

Yukarıda çıkarılan ağırlıkların toplanması sonucu bir vagonun yaklaşık ağırlığı olarak 20 kg olarak hesaplanmaktadır. Yani bir bacağa gelen yük 5 kg civarlarında olmaktadır. Yapılan tüm statik analizlerde parçalara 250 N kuvvet uygulanmıştır. Ayrıca parçaların sabit kısımları 250 N'luk kuvvetin maksimum moment yaratacağı şekilde seçilmiştir. Böylece dinamik durumlarda meydana gelebilecek ani kuvvet artışları sebebiyle mobil robotumuzda herhangi bir hasar meydana gelmemesi sağlanmaya çalışılmıştır.



Şekil 2.24: Vagonun gerilme analizi sonuçları

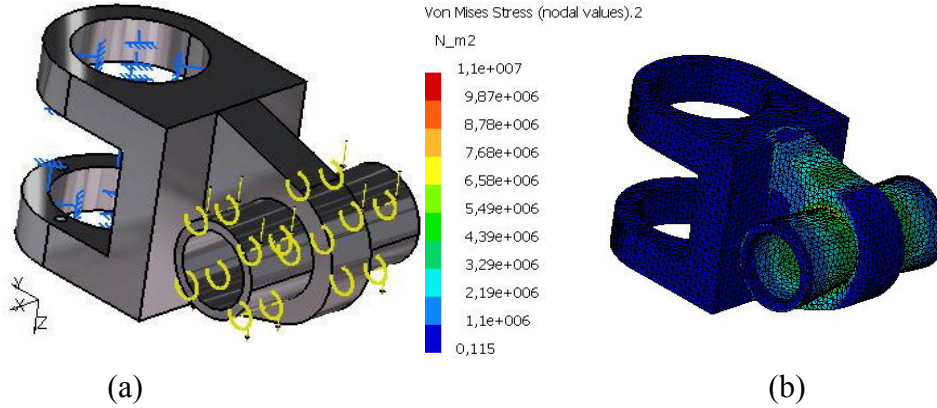
Vagon yapımız alt yüzeyinden sabitlenmiş ve bacakların bağlantı noktalarından z eksenine doğrultusunda 250N kuvvet ve x eksenine doğrultusunda 50 N.m moment uygulanmıştır (Şekil 2.24 a). Eleman tipi olarak üçgen eleman seçilmiştir. Von Mises gerilme analizi yapılmıştır. Vagonda oluşan maksimum gerilme 66,3 MPa olmaktadır (Şekil 2.24 b). Bu değer Al7075 serisi alüminyumun akma dayanımı olan 500 MPa'nın oldukça altında olması sebebiyle vagonumuzun bu yüklerde hasar görmeyeceğini söyleyebiliriz. Ayrıca vagondaki maksimum yer değiştirme miktarı 0,107 mm olmaktadır.



Şekil 2.25: 1. Omuz eklemi mili gerilme analizi sonuçları

1. omuz eklemi milinin montajının yapılabilmesi için açılmış cıvata deliklerinden sabitlenip rulman temas yüzeyine y eksenine doğrultusunda 250 N kuvvet

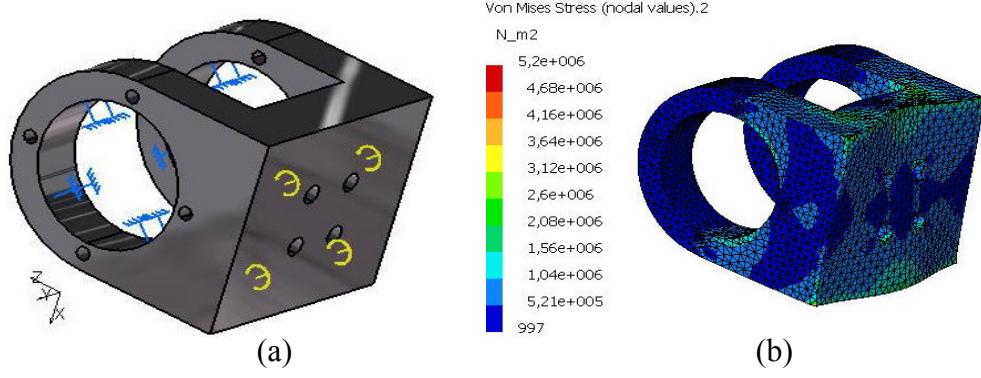
uygulanmıştır. Ayrıca bacağın yapısı göz önüne alınarak mil kısmına x ekseninde 50 N.m moment uygulanmıştır (Şekil 2.25 a). Bu yükler sonucunda parçamızda oluşan maksimum gerilme 38,9 MPa (Şekil 2.25 b), maksimum yer değiştirme 0,0401 mm olmaktadır. Malzeme olarak Al7075 seçildiğinden parçamızın bu yükler altında hiçbir hasar almayacağını söyleyebiliriz.



Şekil 2.26: 2. Omuz eklemi mili gerilme analizi sonuçları

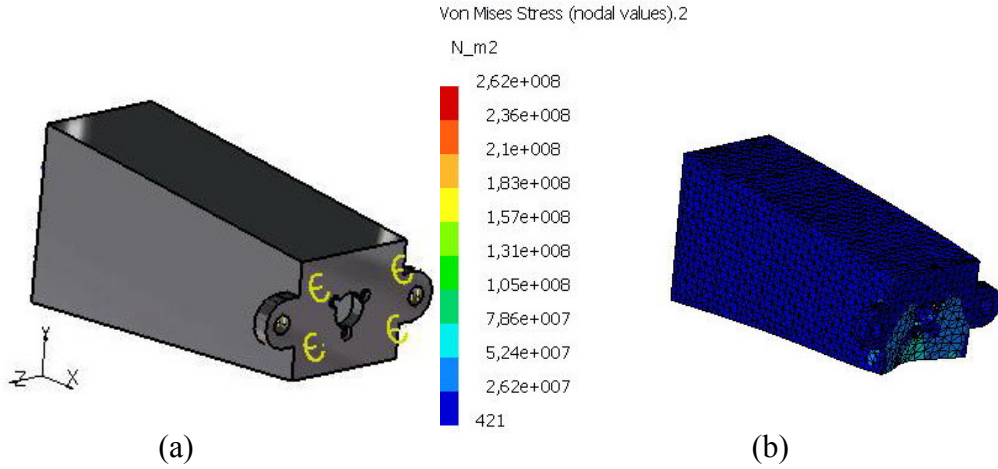
2. omuz eklemi mili ve 1. omuz eklemi alt parçası tasarım sırasında montaj kolaylığı sağlaması açısından ayrı olarak tasarlanmıştır. Analiz yapılırken bu iki parça yekpare gibi düşünülmüştür. Parçamız 1. omuz eklemi mili rulmanlarının oturduğu yüzeylerden sabitlenmiş (Şekil 2.26 a) ve 2. omuz eklemi mili dış yüzeyine z doğrultusunda 250 N kuvvet ile x ekseninde 50 N.m moment uygulanmıştır (Şekil 2.26 b). Uygulan yükler sonucu oluşan maksimum gerilme miktarı 11 MPa, oluşan maksimum yer değiştirme 0,005 mm olmaktadır. Bu gerilme miktarı malzememizin akma gerilmesi olan 500 MPa'nın oldukça altında kaldığından uygulanan yükler sonucu parçamızın hasar görmeyeceğini söyleyebiliriz.

2 omuz eklemi alt ve üst parçası tıpkı 2. omuz eklemi mili ve 1. omuz eklemi alt parçasında olduğu gibi montajın daha rahat yapılabilmesi için ayrı parçalar olarak tasarlanmıştır. Fakat analizleri tek parça olarak yapılmıştır. Parçamız 2. omuz eklemi rulmanlarının oturduğu yüzeylerden sabitlenmiştir (Şekil 2.27 a).



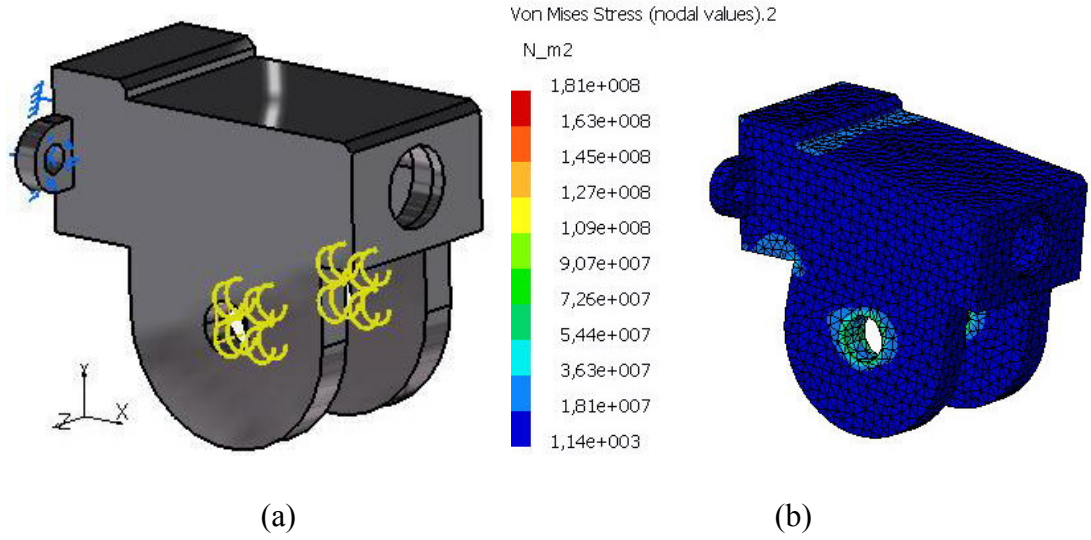
Şekil 2.27: 2. omuz eklemi üst ve alt parçası gerilme analizi sonuçları

Dirsek eklemi motor yatağı ile montajının yapılabilmesi için açılmış cıvata deliklerinden x eksenini doğrultusunda 250 N kuvvet ve y ekseninde 50 N.m moment uygulanmıştır (Şekil 2.27 b). Parçamızda oluşan maksimum gerilme 5,2 MPa, maksimum yer değiştirme ise 0,00163 mm olmuştur. Oluşan bu gerilme malzeme akma dayanımımızın oldukça altında olduğundan bu yükler altında parçamızın hasar görmeyeceğini söyleyebiliriz.



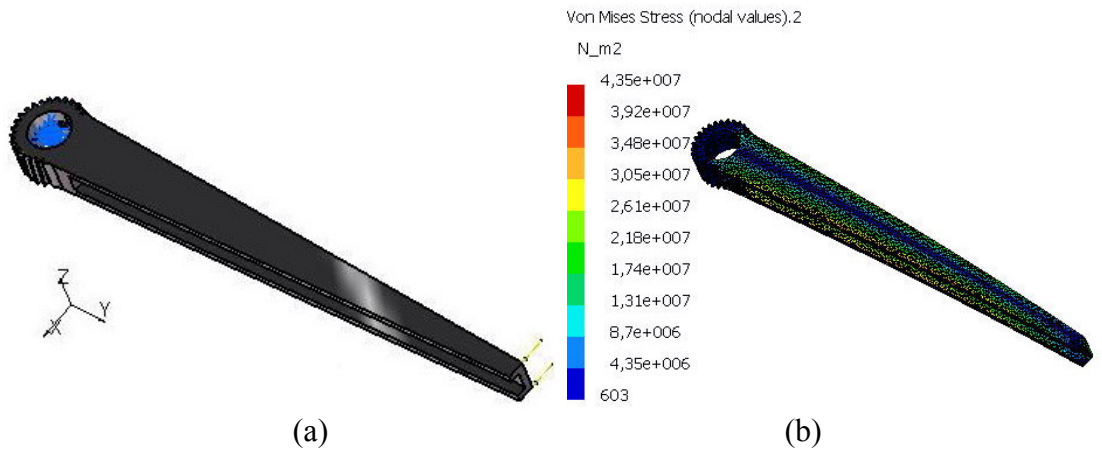
Şekil 2.28: Dirsek eklemi motor yatağı gerilme analizi

Dirsek eklemi motor yatağı 2. omuz eklemi üst parçasına bağlandığı cıvata deliklerinden ve temas yüzeyinden sabitlenip omuz eklemi sonsuz vida yatağı ile temas ettiği yüzeyden ve bağlantı deliklerinden y doğrultusunda 250 N kuvvet ve z ekseninde 50 N.m moment uygulanmıştır (Şekil 2.28 a). Uygulanan yükler sonucu parçamızda maksimum 262 MPa gerilme oluşmuştur (Şekil 2.28 b). Malzememizin akma gerilmesi değeri 500 MPa olduğundan bu gerilme parçamıza zarar vermeyecektir. Parçamızdaki maksimum yer değiştirme ise 0,0931 mm olmaktadır.



Şekil 2.29: Sonsuz vida yatağı gerilme analizi sonuçları

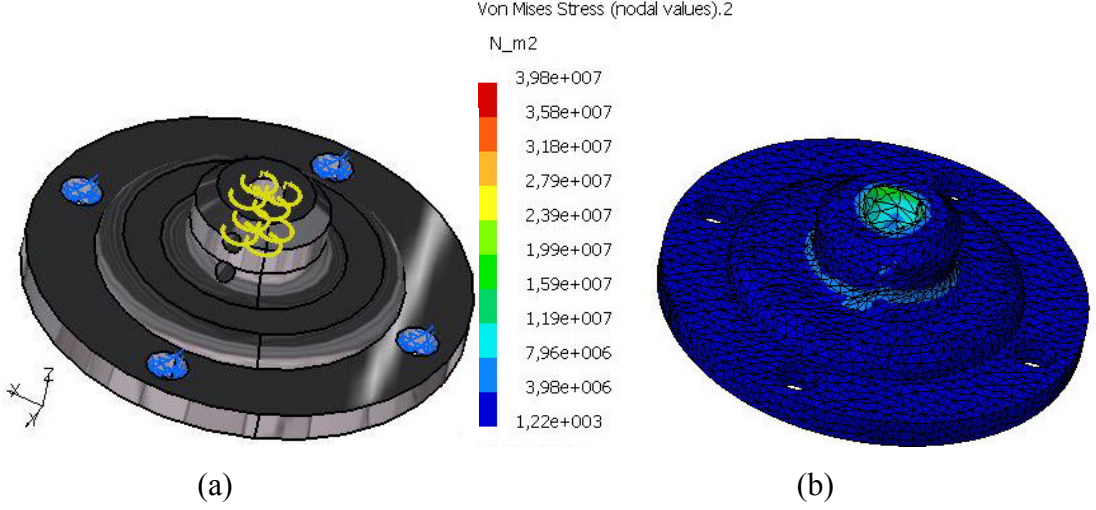
Dirsek eklemi sonsuz vida yatağı, dirsek eklemi motor yatağıyla montajı için açılmış deliklerden ve temas yüzeyinden sabitlenip dirsek eklemi son kolunun montajında kullanılan pim deliklerinden y doğrultusunda 250 N kuvvet ve z ekseninde 50 N.m moment uygulanmıştır (Şekil 2.29 a). Bu yükler sonucu parçamızda maksimum gerilme 181 MPa (Şekil 2.29 b), maksimum yer değiştirme ise 0,0552 mm olmaktadır. Bu gerilmeler sonucu Al 7075'ten imal edilmiş parçamız bir hasar görmeyecektir.



Şekil 2.30: Dirsek eklemi son kolu gerilme analizi sonuçları

Dirsek eklemi son kolu rulmanların takıldığı yüzeyden sabitlenmiş ve uç kısmına 250 N kuvvet uygulanmıştır (Şekil 2.30 a). Bu kuvvet sonucu parçamızda oluşan

maksimum gerilme 43,5 MPa olmaktadır (Şekil 2.30 b). Dirsek eklemi son kolu Al 7075'ten imal edileceği için bu gerilmenin parçamıza hiçbir hasar vermeyeceğini söyleyebiliriz. Parça üzerinde oluşan maksimum yer değiştirtme ise 1,72 mm olmaktadır.



Şekil 2.31: Kapağın gerilme analizi sonuçları

Motor redüktöründen alınan momentin eklemeye aktarılması amacıyla tasarlanan kapak montaj deliklerinden sabitlenmiş ve motor mili eksenine olan z ekseninde redüktörümüzden alabileceğimiz maksimum moment olan 6 N.m büyüklüğündeki moment uygulanmıştır (Şekil 2.31 a). Uygulanan moment sonucu kapakta oluşan maksimum gerilme 39,8 N.m olmaktadır (Şekil 2.31 b). Bu gerilme değeri kullandığımız malzeme olan Al 7075 serisi alüminyumun akma gerilmesi değeri göz önüne alındığında oldukça düşük bir seviyededir. Bu sayede parçamızda bir hasar oluşmayacağı söylenebilir. 6 N.m'lik moment sonucu kapaktaki maksimum yer değiştirtme ise 0,00115 mm olmaktadır.

3. MOBİL ROBOT KİNEMATİĞİ

Kinematikğin ilgilendiği konu hareketi, herhangi bir kuvvet veya moment etkisi olmadan açıklamaktır. Bu yüzden kinematik açıklama aslında geometrik bir açıklama olmaktadır. Kinematik düz kinematik ve ters kinematik olarak ikiye ayrılmaktadır. Düz kinematikte amaç eklem değişkenlerine verilen değerlere göre uç noktamızın pozisyon ve oryantasyon bilgisini elde edebilmektir. Ters kinematikte ise amaç uç noktamızın pozisyon ve oryantasyon bilgisine göre eklem değişkenlerinin değerlerinin belirlenmesidir [13].

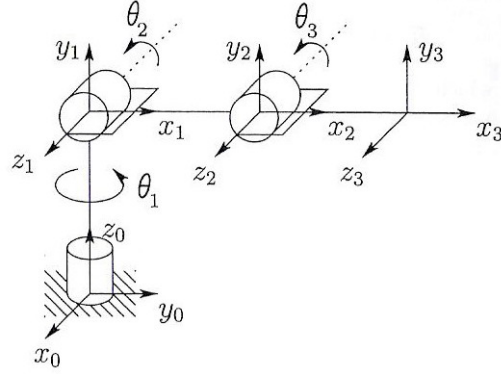
Robot manipulatörler aslında eklemler ile bağlanmış linklerden oluşmaktadır. Bu eklemler dairesel ve prizmatik eklemler gibi tek serbestlik dereceli eklemler olabileceği gibi küre veya soket eklemler gibi 2 veya 3 serbestlik derecesine sahip eklemlerde olabilmektedir.

n ekleme sahip bir robot kolunda, her eklemden 2 adet link olduğundan $n+1$ adet link bulunmaktadır. Bu sebeple eklemler 1'den n 'e kadar, linkler ise 0'dan n 'ye kadar temel noktadan (base) başlayarak numaralandırılır. Bu notasyona göre i numaralı eklem $i-1$ ve i numaralı linkleri bağlamaktadır. i numaralı eklem hareket ettirildiğinde ise i numaralı link hareket etmektedir. Bu sebeple 0 numaralı link yani ilk link sabit durumdadır ve eklem hareket ettiğinde hareket etmemektedir.

i . eklemlerle ilgili eklem değişkeni q_i ile gösterilmektedir. Dönebilen eklemlerde q_i dönme açısı, prizmatik eklemlerde ise q_i yer değiştirme olmaktadır [13].

$$q_i = \begin{cases} \theta_i & \text{eğer } i \text{ dönebilen eklemse} \\ d_i & \text{eğer } i \text{ prizmatik eklemse} \end{cases} \quad (3.1)$$

Kinematik analiz yapabilmek için bütün linklere eksen takımları atamak gerekmektedir. Bu eksen takımları linklerle beraber hareket etmektedir. Örneğin i linkine $o_i x_i y_i z_i$ eksen takımı atanırsa, bu robot kol hangi hareketi yaparsa yapsın i linki üzerindeki herhangi bir noktanın koordinatının i . eksen takımına göre sabit olması demektir. Robot temeline atanmış $o_0 x_0 y_0 z_0$ sabit bir eksen takımı olmaktadır. Şekil 3.1 dirsek manipülatöre eksen takımlarının nasıl atanacağını göstermektedir.



Şekil 3.1: Dirsek manipülatör ve eksen takımları

Şimdi A_i 'nin $o_i x_i y_i z_i$ eksen takımından $o_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ eksen takımına göre homojen dönüşüm matrisi olduğunu düşünelim. A_i matrisi sabit değildir ve değişkenleri robot parametrelerinin bir konfigürasyonu olduğundan değişmektedir. Bu noktada bütün eklemlerin tek serbestlik derecesine sahip olduğu kabulünü yapmamız gerekmektedir. Yani bütün eklemler ya dönebilen yada prizmatik eklemlerdir. Bu durumda A_i matrisi tek bir eklem değişkeninin, q_i 'nin, fonksiyonu olmaktadır. Bir başka deyişle;

$$A_i = A_i(q_i) \quad (3.2)$$

Homojen transformasyon matrisi, $o_j x_j y_j z_j$ 'nin $o_i x_i y_i z_i$ 'ye göre pozisyonunu ve oryantasyonunu ifade eder ve T_j^i olarak gösterilir. Bu matrise transformasyon matrisi de denmektedir.

$$T_j^i = \begin{cases} A_{i+1} A_{i+2} \dots A_{j-1} A_j & \text{eğer } i < j \\ I & \text{eğer } i = j \\ (T_i^j)^{-1} & \text{eğer } i > j \end{cases} \quad (3.3)$$

Manipülâtörün uç noktasının temel noktaya göre pozisyon ve oryantasyonunu 3x1 boyutundaki bir vektör olan o_n^0 ve 3x3 boyutlu bir matris olan rotasyon matrisi R_n^0 ile ifade edilmektedir. Bu ifadeleri kullanarak homojen transformasyon matrisini ifade edecek olursak;

$$H = \begin{bmatrix} R_n^0 & o_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

İfadesini elde ederiz. Bu ifadeyi kullanarak manipülâtörün uç noktasının sabit koordinat çerçevesine (frame) göre pozisyon ve oryantasyonu;

$$H = T_n^0 = A_1(q_1) \dots A_n(q_n) \quad (3.5)$$

Olmaktadır. Bu durumda her bir homojen transformasyon matrisi A_i aşağıdaki formu almaktadır.

$$A_i = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & o_i^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$i < j$ olduğu durumlarda ise;

$$T_j^i = A_{i+1} \dots A_j = \begin{bmatrix} R_j^i & o_j^i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

R_j^i matrisi $o_j x_j y_j z_j$ 'nin $o_i x_i y_i z_i$ 'ye göre oryantasyonunu ifade etmektedir ve A matrisinin dönmeyle ilgili olan kısmını ifade etmekte kullanılmaktadır.

$$R_j^i = R_{i+1}^i \dots R_j^{j-1} \quad (3.8)$$

o_j^i vektörü ise ötelemeyi ifade etmek için kullanılmaktadır.

$$o_j^i = o_{j-1}^i R_{j-1}^i o_j^{j-1} \quad (3.9)$$

Düz kinematik genel bir ifade ile $A_i(q_i)$ fonksiyonlarının hesaplanmasını ve istenilen linke bağlı olarak birbirleriyle çarpımını içermektedir. Bu durum her ne kadar basit gibi görünse de homojen transformasyon matrislerini çıkarmak için oldukça basitleştirilmiş Denavit – Hartenberg kurallarını kullanabiliriz.

3.1 Denavit – Hartenberg Dönüşümleri

Düz kinematikte problem bir robot manipülatörün uç noktasının pozisyon ve oryantasyonu ile ilgili eklem arasındaki ilişkiyi bulmaktır. Eklem değişkenleri dönebilen eklemler için iki link arasındaki açı, prizmatik veya kayabilen eklemlerde ise uzama miktarı olmaktadır.

Düz kinematik analizlerin yapılabilmesi için sistematik bir prosedürü olan kurallar yaratılmıştır. Bu kurallar olmadan örneğin iki linke sahip düzlemsel bir manipülatörün düz kinematik analizleri yapılabilir olsa bile, n linke sahip bir manipülatörün düz kinematik analizini yapmak oldukça zordur. Ayrıca bu kurallar sayesinde mühendislerin uluslararası alanda anlaşmasını sağlayacak ortak bir dil yaratılmış olmaktadır.

Robotik uygulamalarda en çok kullanılan kurallar Denavit – Hartenberg veya DH kurallarıdır. Bu kurallarda bütün homojen transformasyon matrisleri, A_i , 4 basit transformasyon matrisinin sonucu olarak ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}
 A_i &= Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,\alpha_i} Rot_{x,\alpha_i} \quad (3.10) \\
 &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Buradaki 4 değişken θ_i , α_i , a_i ve d_i link i ve eklem i 'nin parametreleridir. Denklem 3.10'da verilen bu 4 parametre a_i , α_i , d_i ve θ_i sırasıyla link uzunluğu, link açısı, link

ofseti ve eklem açısı olarak adlandırılmaktadır. Bu isimler farklı yönlerdeki iki eksen takımının geometrik ilişkilerinden çıkarılmaktadır. Bu isimlerin nasıl çıkarıldığı ilerleyen paragraflarda netleşecektir. A_i tek bir değişkene bağlı olduğu için, yukarıda verilen dört değişkenden üçü seçilen link için sabit olmaktadır, değişken dönebilen eklemlerde θ_i prizmatik eklemlerde ise d_i olmaktadır.

Daha önceden bildiğimiz gibi keyfi seçilmiş bir homojen transformasyon matrisini 6 değişkenle karakterize edilebilmekteydi. Bunlardan üçü matrisin 4. kolonunu belirlemek için geriye kalan üçü ise matrisin sol üst kısmındaki 3x3 dönme matrisindeki Euler açılarını belirlemek için kullanılmaktaydı. DH kuralları göz önüne alırsak sadece 4 değişken bulunmaktadır. Bu durum şöyle açıklanabilir; koordinat sistemi i link i 'ye rijit olarak tutturulurken koordinat ekseninin yerini seçmede oldukça serbest hareket edebiliriz. Örneğin, o_i orijinli koordinat sistemi link i 'nin fiziksel uç noktasına yerleştirilebilir. Gerçekte o_i 'nin fiziksel bir linkin üzerine yerleştirilmesine gerek yoktur, serbest uzayda bile bir linke rijit olarak tutturulabilir. Değişken sayısını 6'da 4'e indirmede orijin ve koordinat takımı seçimi oldukça önemlidir.

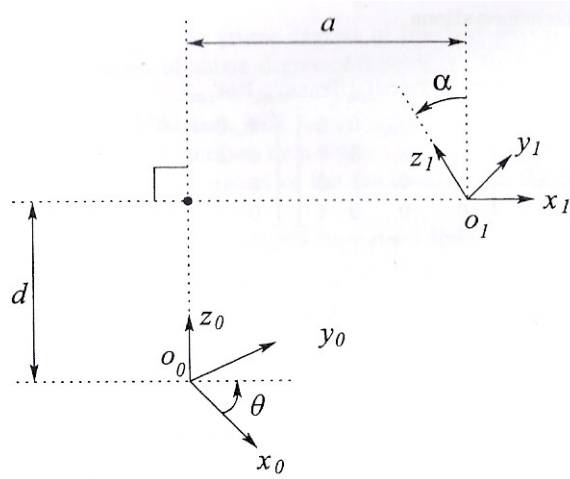
Rasgele seçilmiş bir homojen transformasyon matrisinin sadece 4 değişken kullanılarak ifade edilemeyeceği açıktır. Bu nedenle hangi homojen transformasyon matrislerinin denklem 3.10 ile ifade edilebileceğini anlamamız gerekmektedir. Elimizde 0. ve 1. olarak adlandırılmış iki adet orijinimiz olduğunu düşünelim ve bu orijinler arasında 1'den 0'a tek bir homojen transformasyon matrisi olan A 'nın bulunduğunu farz edelim. Bu durumda bu iki orijin aşağıdaki özellikleri sağlayacaktır.

(DH1) x_1 eksenini z_0 eksenine dik durumdadır.

(DH2) x_1 eksenini z_0 eksenini ile kesişmektedir.

Bu iki varsayım aşağıda şekil 3.2 ile gösterilmiştir. Öyleyse a, d, θ, α için bu koşulları sağlayan şöyle bir matris tanımlanabilir,

$$A = Rot_{z,\theta} Trans_{z,d} Trans_{x,a} Rot_{x,\alpha} \quad (3.11)$$



Şekil 3.2: DH1 ve DH2 varsayımlarını sağlayan koordinat sistemleri

θ ve α açı olduklarından 2π radyan boyunca tektirler. O halde A matrisi şu şekilde ifade edilebilir;

$$A = \begin{bmatrix} R_1^0 & o_0^1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Eğer DH1 varsayımı doğru ise x_1 eksen z_0 eksenine dik olmaktadır. Bu durumda $x_1 \cdot z_0 = 0$ 'dır. Bu kısıtlamayı $o_0 x_0 y_0 z_0$ 'a uyarak gösterirsek, dönme matrisi R_1^0 'ın ilk kolonu 0 eksen takımına göre x_1 birim vektörünün ifadesi olmaktadır. O halde;

$$\begin{aligned} 0 &= x_1^0 \cdot z_0^0 \\ &= [r_{11}, r_{21}, r_{31}] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = r_{31} \end{aligned}$$

$r_{31} = 0$ olduğuna göre, şimdi sadece θ ve α için aşağıdaki ifadeyi sağlayacak tek bir açı değeri olduğunu göstermemiz gerekmektedir.

$$R_1^0 = R_{x,\theta} R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta c\alpha & s\theta s\alpha \\ s\theta & c\theta c\alpha & -c\theta s\alpha \\ 0 & s\alpha & c\alpha \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Burada sahip olduğumuz tek bilgi $r_{31} = 0$ olduğudur. Fakat bu bilgi yeterlidir. R_1^0 'ın bütün satır ve sütunları birim uzunlukta olduğuna göre, r_{3l} 'in sıfıra eşit olması şunu göstermektedir;

$$\begin{aligned} r_{11}^2 + r_{21}^2 &= 1 \\ r_{32}^2 + r_{33}^2 &= 1 \end{aligned}$$

bu sebeple bu ifadeleri sağlayan tek θ ve α değerlerini şöyle gösterebiliriz;

$$(r_{11}, r_{21}) = (c_\theta, s_\theta) \text{ ve } (r_{33}, r_{32}) = (c_\alpha, s_\alpha)$$

θ ve α değerleri bir kez bulunduğunda denklem 3.13'te gösterilen dönme matrisi R_1^0 'nin geri kalan elemanlarını bulmak oldukça basittir.

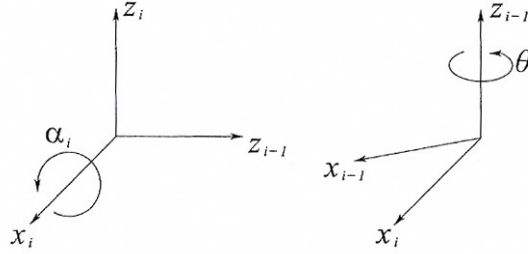
Diğer varsayımımız olan DH2'i ise o_0 ile o_1 arasındaki öteleme miktarını göstermektedir ve z_0 ile x_1 vektörlerinin lineer bir kombinasyonu şeklinde ifade edilebilir. O halde bu ifade $o_1 = o_0 + dz_0 + ax_1$ şeklinde yazılabilir. Bu ilişkiyi $o_0x_0y_0z_0$ koordinat ekseninde yazarsak;

$$\begin{aligned} o_1^0 &= o_0^0 + dz_0^0 + ax_1^0 \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + d \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + a \begin{bmatrix} c\theta \\ s\theta \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} ac\theta \\ as\theta \\ d \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Yukarıda elde edilen iki sonucu birleştirecek olursak denklem 3.10'u elde etmiş oluruz. Böylece DH1 ve DH2 kısıtlarını sağlayan homojen transformasyon matrisleri için 4 değişkenin yeterli olduğunu görmekteyiz.

Şimdi bütün homojen transformasyon matrislerinin yukarıda denklem 3.10 ile açıklanan DH1 ve DH2 şartlarını sağlayıp sağlamadığına bakmak amacıyla her değişkene fiziksel bir açıklama yapmamız gerekmektedir. a parametresi z_0 ve z_1

eksenleri arasındaki mesafeyi x_I eksenı boyunca vermektedir. α parametresi x_I eksenı normalı düzleminde z_0 ve z_I eksenleri arasındaki açıyı göstermektedir. α açısı için pozitif yön şekil 3.3'te de gösterildiği gibi sağ el kuralıyla bulunmaktadır.



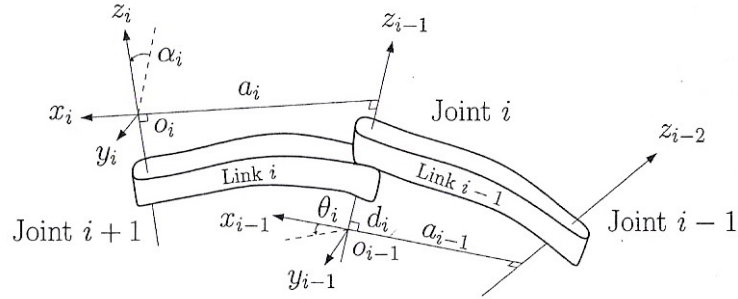
Şekil 3.3: α_i ve θ_i açıları için pozitif yönler

d parametresi z_0 eksenı boyunca o_0 orijininden x_I eksenı ile z_0 ekseninin kesişme noktası arasındaki mesafedir. Son olarak θ açısı z_0 eksenı normal düzleminde x_0 'dan x_I 'e olan açıdır. Bu fiziksel açıklamalar DH1 ve DH2 kısıtlarına göre eksen takımlarının atanma prosedürünün geliştirilmesinde oldukça fayda sağlayacaklardır [13].

DH prosedürünün ilk adımı olan z_i eksenı ataması tamamen isteğe göredir. Bu durumu denklem 3.13'ten ayrıntılı olarak açılacak olursak α_i ve θ_i uygun bir şekilde seçilirken, z_i için isteğe bağlı rasgele bir yönde elde edilebilir. Böylece, ilk adım olarak, $z_0, \dots, z_{n-1}$ eksenleri sezgisel olarak iyi bir şekilde yerleştirilir. Özellikle z_i eksenı $i+1$ eklemının hareket eksenı olacak şekilde yerleştirilir. Bu sayede z_0 1. eklem için, z_I 2. eklem için vs. hareket eksenı olmuş olur. Bu yerleştirmeler yapılırken iki durum göz önüne alınmalıdır. (i) eğer $i+1$ eklemi dönebilen bir eklemse z_i eklemının dönme eksenı olarak seçilir, (ii) eğer $i+1$ eklemi prizmatik bir eklemse z_i eksenı $i+1$ eklemının uzama doğrultusunda yerleştirilir.

z eksenleri bir kez yerleştirildiğinde, ana eksen takımını da belirlemiş oluruz. Ana eksen takımının orijini o_0 , z_0 eksen takımı üzerinde herhangi bir noktada seçilebilir. Daha sonra sağ el kuralına uygun şekilde x_0, y_0 eksen takımları seçilir böylece 0. Eksen takımımız yerleştirilmiş olur.

0. eksen takımı yerleştirildikten sonra, 1. eksen takımından başlayarak i . eksen takımını $i-1$. eksen takımını kullanarak yerleştiririz. Aşağıda gösterilen şekil 3.4 bu prosesin anlaşılmasına oldukça yardımcı olacaktır.



Şekil 3.4: Denavit – Hartenberg eksen takımı yerleşimleri

Eksen takımı i 'nin yerleşimini uygun bir şekilde tamamlamak için üç durumu göz önünde bulundurmanız gerekmektedir. (i) z_{i-1} eksenini ile z_i eksenini eş düzlemlidir, (ii) z_{i-1} eksenini ile z_i kesişmektedir, (iii) z_{i-1} eksenini ile z_i paraleldir. Durum (ii) ve durum (iii)'te z_{i-1} eksenini ile z_i eş düzlemlidir.

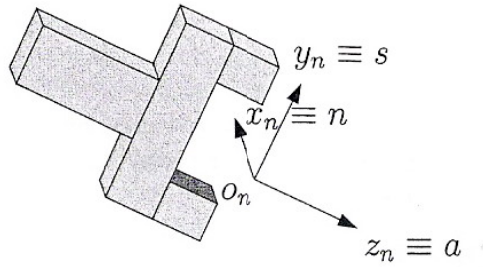
(i) z_{i-1} ve z_i 'nin eş düzlemlili olmadığı haller: Eğer z_{i-1} eksenini ile z_i eksenini eş düzlemlidir değilse, z_{i-1} ekseninden z_i eksenine en kısa tek bir çizgi vardır ve bu çizgi (normal) hem z_{i-1} eksenine hem de z_i eksenine diktir. Normal x_i ile tanımlanır ve z_i ile O_i orijininde kesişir. Bu yapı sayesinde DH1 ve DH2 şartları sağlanır ve O_{i-1} 'den O_i 'ye olan vektör z_{i-1} ile x_i 'nin lineer bir kombinasyonu olur. Eksen takımı i 'nin yerleştirilmesi işlemi sağ el kuralına göre y_i ekseninin atanması ile son bulur. DH1 ve DH2 varsayımları sağlandığından homojen transformasyon matrisi denklem 3.10 ile ifade edilen A_i olmaktadır.

(ii) z_{i-1} ve z_i 'nin paralel olduğu haller: Eğer z_{i-1} eksenini ile z_i eksenini paralelse z_{i-1} eksenini ile z_i eksenini arasında sonsuz sayıda normal vardır ve DH1 şartı x_i eksenini belirlemede yetersiz kalır. Bu durumda z_i eksenini üzerinde herhangi bir nokta O_i orijini olarak belirlenebilir. Orijini belirlemede en sık olarak denklemleri basitleştirecek bir nokta seçimi kullanılır. x_i eksenini O_i 'den z_{i-1} 'e uzanan normal doğrultusunda seçilir. O_i seçiminde en sık kullanılan yöntem O_{i-1} den geçen bir normali x_i olarak seçmektir. Böylece O_i bu normalle z_i ekseninin kesiştiği nokta olmaktadır. Bu durumda d_i sıfır

olmaktadır. x_i eksenini belirlendikten sonra y_i eksenini sağ el kuralı kullanılarak belirlenir. Bu durumda z_{i-1} eksenini ile z_i eksenini paralel olduğundan a_i sıfır olmaktadır.

(iii) z_{i-1} ve z_i 'nin kesiştiği haller: Bu hallerde x_i , z_{i-1} ve z_i 'nin oluşturduğu düzlem dik olarak seçilir. x_i 'nin pozitif yönü isteğe bağlı olarak seçilir. Bu durumlarda o_i için en doğal seçim orijini z_{i-1} ve z_i 'nin kesiştiği noktaya koymaktır. Gerçi z_i eksenini üzerindeki herhangi bir noktada orijin için yeterli olmaktadır. z_{i-1} ve z_i 'nin kesiştiği durumlarda a_i parametresi sıfır olmaktadır.

Geliştirilen bu prosedür n linke sahip bir robotta $0, \dots, n-1$ arası eksen takımı atamasında oldukça yararlıdır. Fakat prosedürü tamamlamak için n . eksen takımının da atanması gerekmektedir. Son eksen takımı olan $o_n x_n y_n z_n$ genellikle uç nokta (end effector) veya takım eksen takımı (tool frame) olarak bilinmektedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Takım eksen takımı yerleşimi

o_n orijini genellikle tutucunun parmakları arasına simetrik olarak yerleştirilir. x_n , y_n ve z_n eksenlerindeki birim vektörler sırasıyla n , s ve a ile gösterilir. Bu terminoloji şöyle ortaya çıkmaktadır; a yönü yaklaşım yönüdür, yani genel olarak tutucular herhangi bir objeye a doğrultusunda yaklaşırlar. Benzer şekilde s yönü parmakların kayma yönünü belirtmektedir. n yönü ise a ve s 'nin oluşturduğu düzlemin normalidir.

Birçok modern robotta en son eklem uç noktasının θ_n açısıyla dönmesini sağlamaktadır ve son iki eklem eksenini, z_{n-1} ve z_n , çakışmaktadır. Bu durumda, en son iki eksen takımı arasındaki transformasyon z_{n-1} eksenini doğrultusunda d_n kadar bir öteleme ve bunu takiben z_{n-1} eksenine göre θ_n kadar bir dönme olmaktadır.

Bütün durumlarda, eklem dönebilen veya prizmatik eklem olsa da a_i ve α_i değerleri bütün i değerleri için sabittir ve manipülatörün karakteristiğini yansıtmaktadır. Eğer i eklemi prizmatikse θ_i zaten sabit olduğundan eklem değişkeni d_i olmaktadır. Benzer şekilde eğer i eklemi dönebilen bir eklemse d_i zaten sabit olduğundan eklem değişkeni θ_i olmaktadır.

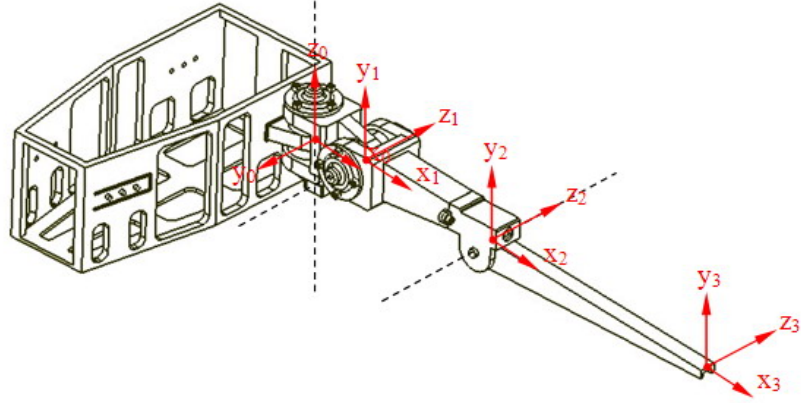
DH dönüşümü prosedürünü maddeler halinde verecek olursak [13];

1. Eklemleri isimlendir ve eklemlerin hareket eksenlerine $z_0, \dots, z_{n-1}$ eksenlerini yerleştir,
2. Ana eksen takımını yerleştir. Orijin z_0 eksenini üzerinde herhangi bir yerde olabilir. Daha sonra x_0 ve y_0 eksenlerini sağ el kuralına uygun olarak yerleştir. $i=1, \dots, n-1$ 'e kadar 3 – 5 arası adımları tekrarla.
3. Merkez o_i 'yi yerleştir. Eğer z_i eksenini ile z_{i-1} eksenini kesişiyorsa o_i 'yi bu noktaya yerleştir. Eğer z_i eksenini ile z_{i-1} eksenini paralelse o_i 'yi z_i üzerinde uygun bir yere yerleştir.
4. x_i eksenini z_{i-1} eksenini ile z_i eksenini arasındaki normal doğrultusunda o_i 'den geçecek şekilde yerleştir. Eğer z_i eksenini ile z_{i-1} eksenini kesişiyorsa ikisinin oluşturduğu düzleme dik olarak x_i eksenini yerleştir. Eğer z_i eksenini z_{i-1} eksenine paralelse bunların ortak normalleri boyunca o_i 'ye doğru x_i 'yi yerleştir.
5. y_i eksenlerini sağ el kuralına göre yerleştir.
6. Uç nokta eksen takımı $o_0x_0y_0z_0$ 'ı yerleştir. Eklem n dönebilen eklemse $z_n = a$ eksenini z_{n-1} eksenine paralel olacak şekilde yerleştir. Orijin o_n 'i z_n eksenini doğrultusunda rasgele yerleştir. Bu işlem için genellikle tutucunun orta noktası veya manipülatörün taşıdığı takımın uç noktası seçilmektedir. $y_n = s$ eksenini tutucunun kapanış yönünde yerleştir. $x_n = n$ eksenini $s \times a$ düzlemi normaline yerleştir. Eğer takım basit bir tutucu değilse x_n ve y_n eksenlerini sağ el kuralına göre yerleştir.
7. a_i, d_i, α_i ve θ_i parametrelerini kullanarak DH tablosunu oluştur.
 a_i = Orijin o_i den x_i ve z_{i-1} eksenlerinin kesişim noktasına x_i eksenini üzerindeki mesafedir.

$d_i = z_{i-1}$ eksenini doğrultusunda orijin o_{i-1} ile x_i ve z_{i-1} eksenleri kesişim noktası arasındaki mesafedir. Eğer eklem i prizmatik eklem ise d_i değişkendir.

$\alpha_i = x_i$ eksenine göre z_{i-1} ekseninden ve z_i eksenine olan açıdır.

$\theta_i = z_{i-1}$ eksenine göre x_{i-1} ekseninden ve x_i eksenine olan açıdır. Eğer eklem i dönebilen eklemse θ_i değişkendir.



Şekil 3.6: Kinematik eksen takımları yerleşimi

Yukarıdaki anlatılan DH prosedürlerine göre tek bacak için eksen takımlarının yerleşimi şekil 3.6'da görülmektedir. Şekildeki eksenlere göre DH tablomuzu oluşturacak olursak;

Tablo 3.1: Tek bacak için DH tablosu

Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	$-\pi/2$	0	θ_1^*
2	a_2	0	0	θ_2^*
3	a_3	0	0	θ_3^*

Oluşturduğumuz DH tablosundaki parametreler denklem 3.10'da elde edilen A_i matrisinde yerine konulacak olursa;

$$A_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & a_1 c\theta_1 \\ s\theta_1 & 0 & c\theta_1 & a_1 s\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & a_2 c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & a_2 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ ve}$$

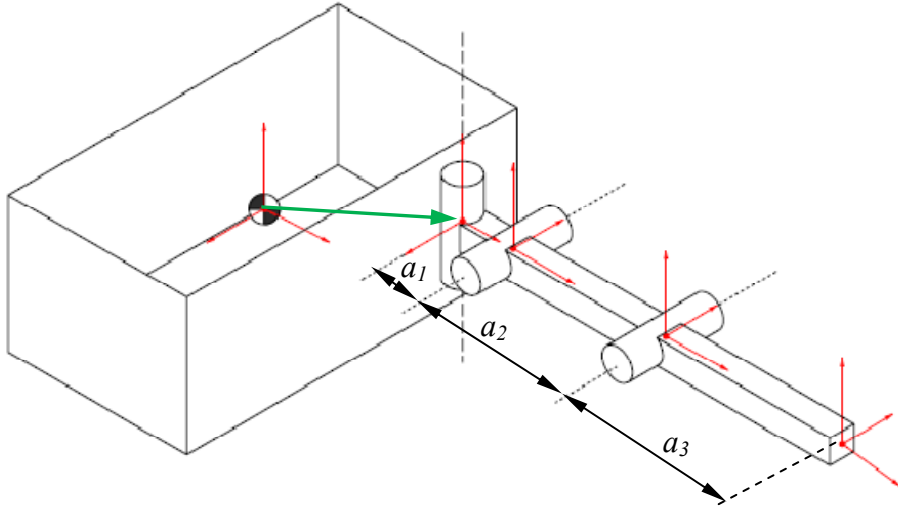
$$A_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & a_3c\theta_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & a_3s\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olarak elde edilmektedir. Bulunan rotasyon matrisleri kullanılarak rotasyon matrisimizi yazacak olursak;

$$R_3^0 = A_1 A_2 A_3$$

$$R_3^0 = \begin{bmatrix} c\theta_1c\theta_2c\theta_3 - c\theta_1s\theta_2s\theta_3 & -c\theta_1c\theta_2s\theta_3 - c\theta_1s\theta_2c\theta_3 & -s\theta_1 & a_3c\theta_1c\theta_2c\theta_3 - a_3c\theta_1s\theta_2s\theta_3 + a_2c\theta_1c\theta_2 + a_1c\theta_1 \\ s\theta_1c\theta_2c\theta_3 - s\theta_1s\theta_2s\theta_3 & -s\theta_1c\theta_2s\theta_3 - s\theta_1s\theta_2c\theta_3 & c\theta_1 & a_3s\theta_1c\theta_2c\theta_3 - a_3s\theta_1s\theta_2s\theta_3 + a_2s\theta_1c\theta_2 + a_1s\theta_1 \\ -s\theta_2c\theta_3 - c\theta_2s\theta_3 & -s\theta_2s\theta_3 - c\theta_2c\theta_3 & 0 & a_3s\theta_2c\theta_3 - a_3c\theta_2s\theta_3 - a_2c\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olarak elde edilir. Şekil 3.6'dan da görüldüğü gibi bu rotasyon matrisine bir öteleme matrisi ilave ederek ağırlık merkezine göre transformasyon matrisi bulmamız gerekmektedir. Elde edilecek transformasyon matrisi denklem 3.4'te ifade edilen formda olacaktır.



Şekil 3.7: Öteleme vektörü

Şekil 3.7’de gösterilen öteleme vektörü sayesinde yukarıda elde edilen R_3^0 matrisi vagon ağırlık merkezindeki global eksen takımı P ye taşınmaktadır. Bu durumda P vektörü 3x1 boyutlu bir vektör olmaktadır.

$$o_0^p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Vektörün elemanları olan x , y ve z şekil 3.6’da gösterilen o_0 ’ın o_p ’den mesafesini göstermektedir ve her bacak için değişik değerler almaktadır. Bu değerleri yerine koyacak olursak lineer transformasyon matrisi H ;

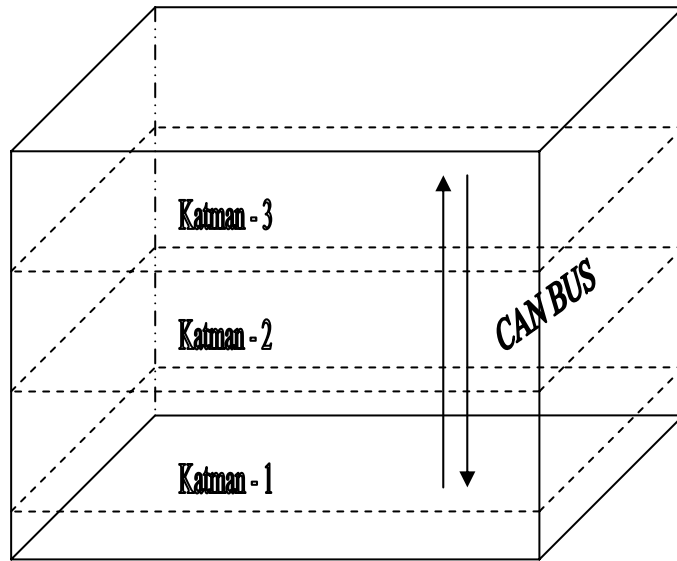
$$H = \begin{bmatrix} R_3^0 & o_0^p \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olarak bulunmaktadır.

4. ELEKTRİKSEL TASARIM

Bu bölümdeki ana amaç mobil robotumuza fiziksel bir donanım altyapısı oluşturmaktır. Bu amaçla yazılım uygulamaları ve kontrol stratejileri geliştirilmiştir. Ayrıca bu amaç doğrultusunda bütün elektronik devrelerin, örneğin fırçasız servo motor sürücüleri ve elektronik kontrolcüler gibi, baskılı devreleri (PCB) tasarlanmış, kullanılacak sensörler belirlenmiş, aktüatör tipleri seçilmiş, kontrol stratejileri geliştirilmiş ve özel yazılımlar tasarlanmıştır [14].

Bütün devreler tasarlanmadan ve gerekli elemanlar seçilmeden önce, bütün donanım yapısı ve bunların içindeki ilişkiler 3 blok diyagram şeklinde aşağıda gösterilmiştir. Bu blok diyagramları *mantıksal katmanlar (logical layers)* olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 4.1: Mantıksal donanım katmanları [14]

Her katman çok farklı görevleri yerine getirdiğinden tüm donanım yapısı üç katmanda toplanmıştır. Bu katmanların her ne kadar farklı görevler gerçekleştirse de, katmanların birbirleriyle uyumlu çalışması ve haberleşmeleri gerekmektedir.

3 katmanlı bir model kullanmamızdaki ana amaç hiyerarşik bir kontrol katmanı oluşturmaktır, ayrıca bu üç katman proses geliştirme boyunca oldukça faydalı olacaktır.

4.1 Ön – Tasarım Prosesi ve Mantıksal Katmanlar

Tasarım prosesimizin birçok kritik noktayı kapsaması gerekmektedir. Bu nedenle bütün bu kritik noktaların hepsinin ayrı olarak dikkatle gözden geçirilmesi gerekmektedir. Tezin bu bölümünde mantıksal katmanların fonksiyonları dizayn teknikleri ve fiziksel anlamları dikkate alınmadan açıklanacaktır [14].

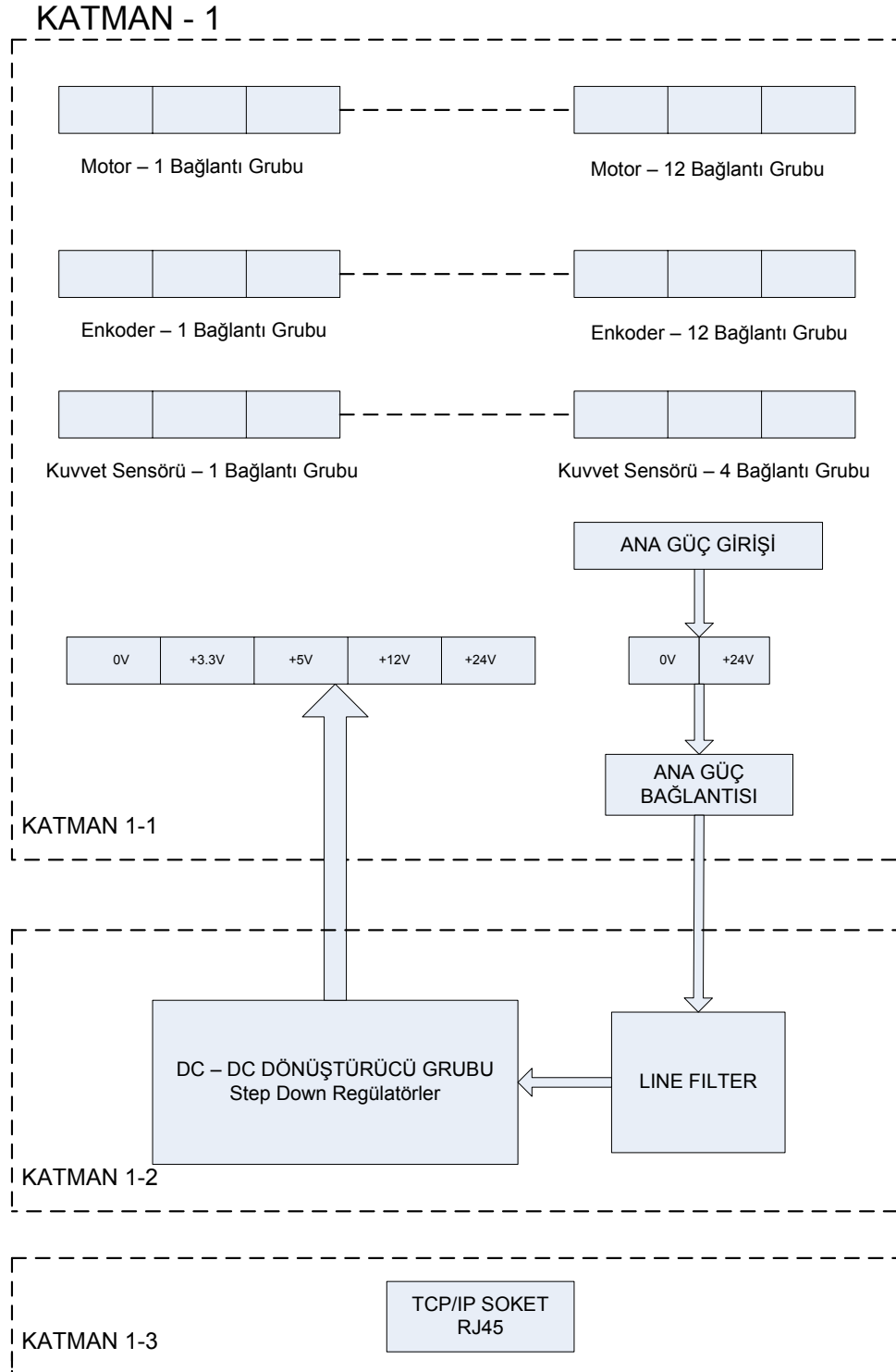
Şekil 4.2’de ilk katman gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bu katman aynı zamanda 3 tane alt katman içermektedir. Alt katman 1-1 bağlantı gruplarını, servo motorların sinyal ve güç pinlerini, enkoder sinyal ve güç pinlerini ve kuvvet sensörü güç ve kuvvet pinlerini içermektedir. Bu alt katmanda bütün sistemin gücü gereksinimi için gerekli dağılım yapılmaktadır. 24 Voltu düşürmek için buck regülatörler kullanılmaktadır. Katman 1-3’te ise sadece işlemcinin internete bağlanabilmesi için RJ45 soket ve bağlantı grubu bulunmaktadır.

Mobil robot tasarımında karşılaştığımız kritik problemlerden birisi baskılı devrelerin yerleşimi problemidir. Sistemimizin sahip olduğu 24 serbestlik derecesi için kullanılan 24 motorun her biri için fırçasız servo motor sürücüsü gerekmektedir. Bu problemi aşmak için bütün motor sürücüleri her vagonun ana PCB’si üzerine dik olarak yerleştirilmektedir. Bu ana PCB’lerin herbiri 12 adet dişli motor sürücü soketi ve voltaj düşürücü regülatör içermektedir.

Bütün bağlantı grupları ve pinleri ayrılması sayesinde bu elemanların rahatlıkla yerleştirilmesi sağlanmıştır. Toplam olarak 120 adet dış bağlantı sayesinde gerekli beslemeler ve veri alış verişi yapılabilmektedir.

Bütün kablolar ve bağlantı organizasyonu mekanik boyutlara bağlı olarak yapılmaktadır. Bu nedenle bazı kabloların planları mekanik tasarım sırasında yerleştirilecektir.

Prototip çalışmasında mobil robot batarya taşımayacaktır. Mobil robotun ilk versiyonunda bütün sistem dışarıdan bir kablo yardımıyla beslenecektir. Daha sonraki versiyonlarda ise bu katman aynı zamanda bataryaların şarj edilebilmesi için batarya – donanım arabirimini ve gerekli bağlantı elemanlarını da içerecektir.



Şekil 4.2: Mantıksal Katman – 1

Özetleyecek olursak Katman – 1 bütün sistemin elektriksel bağlantılarını içermekte ve besleme için güç dağılımını gerçekleştirmektedir [14].

Bütün sistemi düşünecek olursak Katman – 2 iki adet farklı kontrol katmanı içermesi sebebiyle tasarımın en kritik kısmını oluşturmaktadır. Orta ve düşük seviye kontrolcülerin tümü bu katmanda tasarlanmıştır. Bu sebeple bu katmanın kazançları temel davranışları etkilediği için oldukça önemlidir.

Katman – 2 şekil 4.3’te gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi; motor sürücüler, alt ve orta seviye kontrolcüler, kuvvet sensörleri ve diğer ilişkili tüm elemanlar Katman – 2’ye yerleştirilmiştir.

Her vagona 12 motor bulunmaktadır. Bütün servo motor sürücüler, fırçasız servo motorlar için gerekli olan gömülü, yazılım tabanlı kontrol uygulamaları tarafından sürülmektedir. Bütün sistem içinde bu kontrolcüler *eklem sürücüler* olarak adlandırılacaktır.

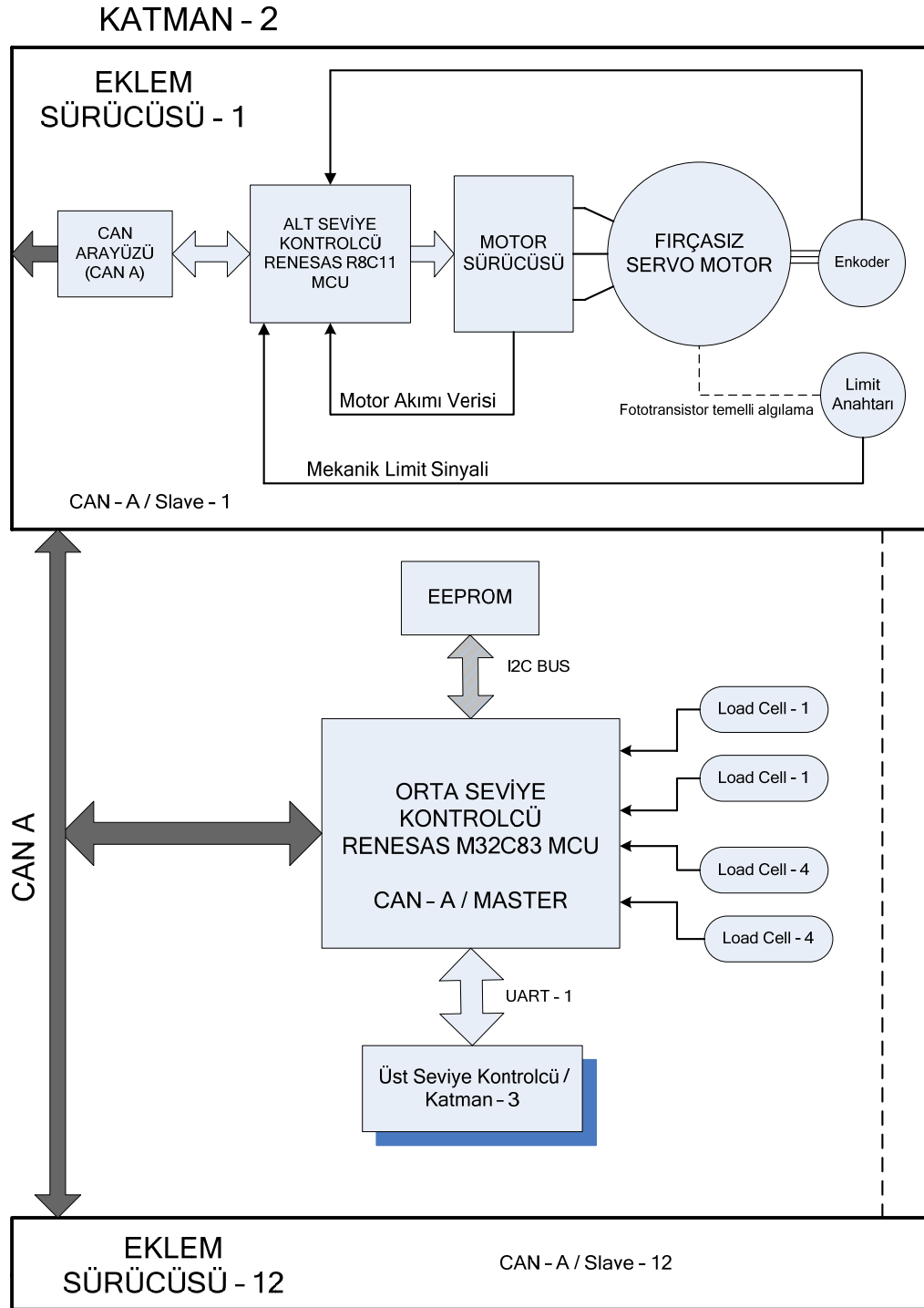
Eklem sürücüler alt seviye kontrolcüler içermektedir. Bu kontrolcüler pozisyon bilgisine göre gerekli sürücü sinyallerinin üretilmesinden sorumludurlar. Bu pozisyon bilgileri motor miline tutturulmuş optik enkoderler tarafından sağlanmaktadır. Diğer bir taraftan bütün eklemler mekanik limitlere sahiptirler. Kontrolcünün, eklemin bu limitlere ulaştığı bilgisini alabilmesi amacıyla bütün eklemlere limit anahtarları eklenmiştir.

DC enerjiyi 3 – fazlı AC enerjiye dönüştürebilmek amacıyla güç elektroniği kullanılmıştır. Bu dönüşümü gerçekleştirmek için alt seviye kontrolcünün kontrol sinyallerini ürettiği 2- seviyeli dönüştürücü devre kullanılmıştır.

Orta seviye kontrolcü daha çok aktüatörlerle üst seviye kontrolcü arasında düzgün bir geçiş sağlayan köprüye benzer. Her vagon için sadece 1 adet orta seviye kontrolcü vardır ve aynı eklem sürücülerine benzer. Orta seviye kontrolcüler üst seviye kontrolcünden aldıkları komutları ters kinematikle çözerek alt seviye kontrolcü için gerekli komutların üretilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Diğer bir

görevi ise kuvvet sensöründen gelen analog sinyali dijitalle çevirerek üst seviye kontrolcüye iletmektir.

Bu katmanda önemli parametreleri saklayabilmek amacıyla EEPROM yüksek kapasite I2C aracılığıyla orta seviye kontrolcüye bağlanmıştır.



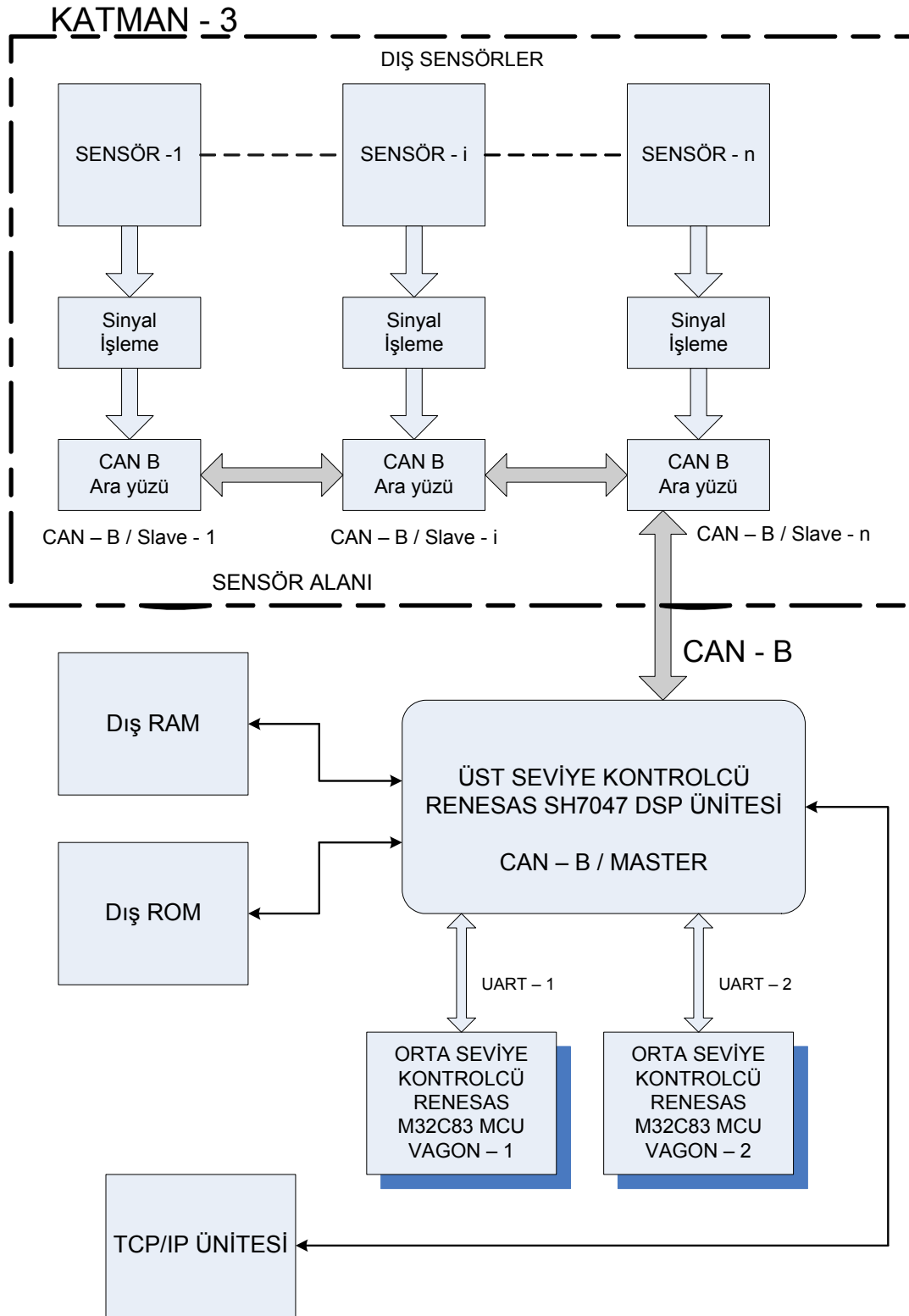
Yukarıdaki şekilden de görüldüğü gibi 1 orta seviye kontrolcüde 12 adet eklem sürücüsü bulunmaktadır. Bunlar arasındaki iletişim CAN ağı sayesinde gerçekleştirilmektedir. CAN Bus oldukça gelişmiş elektronik gürültü önleme sistemine ve adresleme tekniğine sahip bir iletişim ağıdır [14].

Katman – 2’de gösterilen CAN ağı bizim sistemimizde CAN – A olarak adlandırılmaktadır. CAN – A hiyerarşisi içinde orta seviye kontrolcü *master*, bütün eklem sürücülerini ise *slave* olarak tanımlanmaktadır. Katman – 2’de CAN kullanılmasının ana amacı orta seviye kontrolcüler ile eklem sürücülerini arasında kolay ve sağlam bir adresleme gerçekleştirebilmektir.

Katman – 3’ün fonksiyonları bir insan beyninin fonksiyonlarına benzemektedir. Katman – 3 ileri kontrol tekniklerinin uygulandığı bir üst seviye kontrolcü içermektedir. Ayrıca dış sensörlerde Katman – 3’te bulunmaktadır.

Bütün dış sensörler, örneğin inertial MEM’ler, doppler, CCD kamera ve diğerleri, üst seviye kontrolcüye bağlanmıştır. Ayrıca kuvvet sensörleri işaretleri de orta seviye kontrolcü sayesinde dijital hale getirildikten sonra üst seviye kontrolcü tarafından kontrol edilmektedir. Bütün bu sensörlerin kontrolü için bu katmanda oldukça fazla algoritma çalışmaktadır.

Sensörler ve kontrolcüler arasındaki iletişim yine bir CAN ağı sayesinde sağlanmaktadır. Bu CAN ağı bizim sistemimizde CAN – B ağı olarak isimlendirilmektedir. CAN – B ağında üst seviye kontrolcü *master* ve diğer bütün dış sensörler *slave* olarak tanımlanmıştır. Katman – 3’te CAN ağı kullanılmasının ana sebebi CAN ağının artan sensör sayısına karşı oldukça esnek olmasıdır. Mobil robotumuza, sonraki versiyonları için farklı sensörler eklenmek istenirse bu oldukça kolay bir şekilde gerçekleştirilebilecektir. Burada CAN ağı kullanarak, uyguladığımız kontrol metodolojisine rağmen, dış sensörler eklenebilir veya çıkarılabilir. Aynı zamanda CAN ağı oldukça basit ve sağlam bir adresleme imkanı sunmaktadır.



Şekil 4.3: Mantıksal Katman – 3[14]

Üst seviye kontrolcünün görevleri arasında yürüyüş planlama, kuvvet kontrolü, dinamik model tabanlı kontrolcü, sensör füzyonu ve diğer geliştirilmiş kontrol metodolojileri bulunmaktadır.

Üst seviye kontrolcü, orta seviye kontrolcü ile sürekli iletişim halindedir. İletişim aracı profibus değildir. Bu iki kontrolcü arasında sadece seri iletişim ara yüzü bulunmaktadır. Basit bir seri iletişim ara yüzü kullanmak profibus sistemlerine göre oldukça avantajlıdır. Çünkü seri iletişimi ara yüzünde sadece 2 alıcı bulunmaktadır, böylece adresleme yapma gereksinimi ortadan kalkmaktadır.

Genel olarak üst seviye kontrolcü kullandığımız kontrol metodolojisine uygun olarak orta seviye kontrolcülere komutlar vermektedir. buna karşılık olarak ise orta seviye kontrolcülerden geri beslemeler ve kuvvet sensörleri bilgileri almaktadır [14].

5. LOKOMASYON

Sekiz bacaklı mobil robot tasarımına başlarken amacımız bu mekanizmanın belirlenen bir yörüngede bağımsız olarak hareket edebilmesiydi. Bu amaçla, ters kinematik çözümüleme yapılmadan önce çok bacaklı yürüyen mekanizmaların incelenmesi ve yürüyüş düzeninin çıkarılması gerekmektedir.

Mobil robotumuzda, her bacakta 3 aktif eklem bulunmaktadır. Böylece mekanizmamızın pozisyonunu sağlayan bacaklardaki 24 eklem hepsinin etkin bir şekilde kombinasyonu sağlanmıştır. Mobil robotumuza sağlam bir hareket kabiliyeti kazandırmak amacıyla sekiz bacağın birbirleriyle senkronize ve uyumlu bir şekilde hareket etmesi gerekmektedir.

Robotumuzda mekanik tasarımdan iletişim ağına kadar birçok noktada biyomimetrik yaklaşım kullanılmıştır. Ayrıca yürüyüş planlama sırasında gerçek bir 8 bacaklı yaratık olan akrepten esinlenilmiştir. Bacakların gövde üzerindeki dağılımı ve gövde şekli itibari ile mekanizmamız gerçek bir akrebe oldukça benzemektedir. Bu sebeple gerçek bir akrebin yürüyüş şeklini mobil robotumuza rahatlıkla uygulayabiliriz.

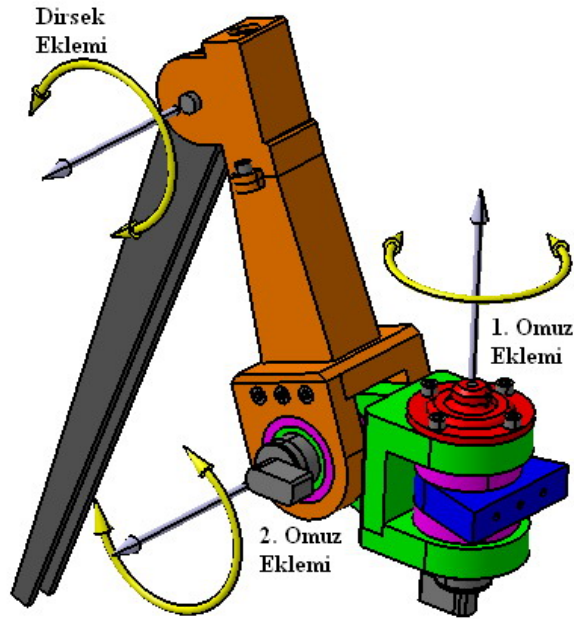
Bütün mekanik yapıyı göz önüne alacak olursak yürüyüş planlama aşağıdaki 3 ilkeye dayanmaktadır;

- Mobil robot 2 vagon ve 8 birbirinin aynı bacaktan oluşmaktadır ve her bacak 3 serbestlik derecesine sahiptir.
- Enine ve boyuna simetri vardır
- İki vagon arasındaki pasif eklem sıklıdır.

5.1 Bacak Yapısı

Şekil 5.1’de bacak yapısının detaylı bir resmi görülmektedir. Aşağıdaki şekilden de anlaşılacağı gibi 3 serbestlik derecesi bacağın 3 boyutta serbestçe pozisyon almasını sağlamaktadır.

1. omuz eklemi, 1. omuz eklemi mili üzerinde taşınmakta ve bu mil ekseninde dönebilmektedir. Böylece 1. omuz eklemi bütün bacağı ileri veya geri hareket ettirebilmektedir. İkinci omuz eklemi ise bacağın geri kalanını yukarı aşağı hareket ettirebilmektedir. 2. omuz eklemi sayesinde duruş ve yürüyüş anı kontrol edilmektedir. Mekanik tasarım bölümünde de anlatıldığı gibi dirsek eklemi bir sonsuz vida ve çarkı sisteminden oluşmaktadır. Bu sayede motor hareketi 90^0 çevrilebilmektedir. Dirsek eklemi sayesinde bacağımızın son kol kısmı yukarı ve aşağı hareket ettirilebilmektedir.



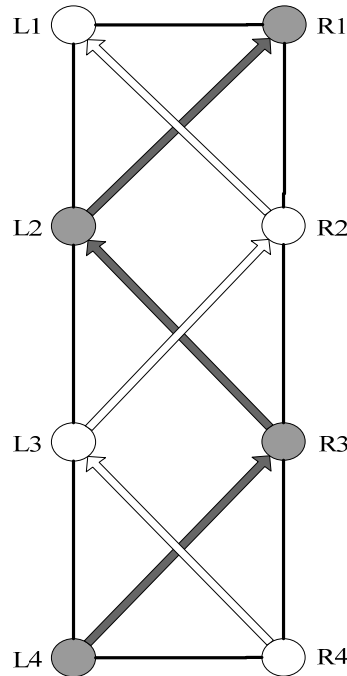
Şekil 5.1: Bacak Yapısı

Sistemimizin mekanik olarak açıklamalarını göz önüne alarak, mobil robotumuzun istenilen yörüngede oldukça düzgün hareket edebileceğini söyleyebiliriz. Bacak uzunluklarının çeşitli varyasyonları ile yani eklemlerin başlangıç açılarının

değiştirilmesi ile mekanizmamız uygulanacak herhangi bir lokomasyonu başarı ile uygulayabilir.

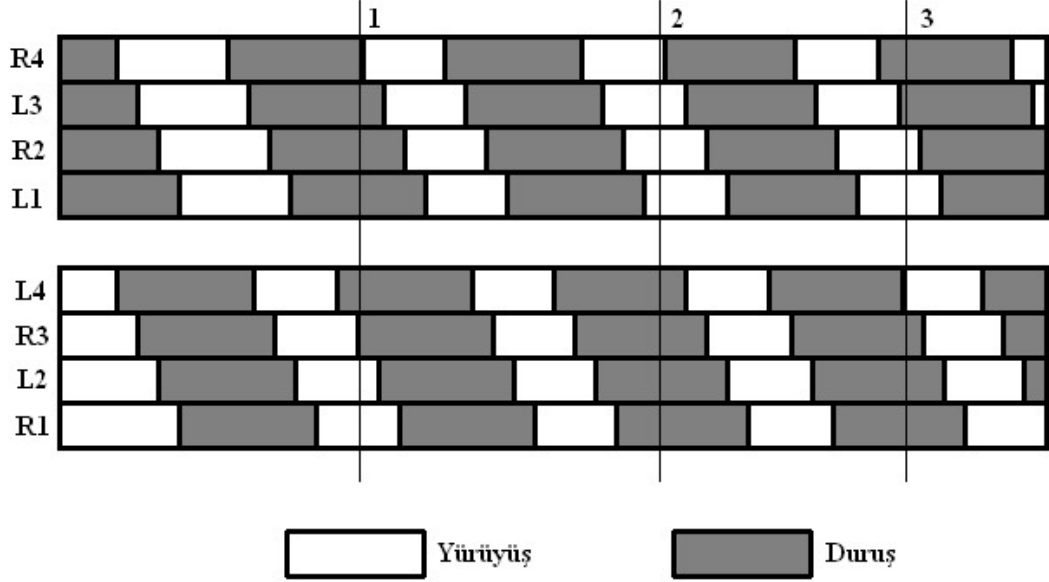
5.2 Hareket Biçimleri

Yaşayan bir akrebin yürüyüş düzeni hemen hemen birbirini izleyen 4 bacaklı canlıların yürüyüş düzeni gibidir (Şekil 5.2). Bir dört bacaklıda yürüyüş düzeni, öndeki ayağın hareketinin arkadan gelen ayak tarafından tetiklenmesi şeklindedir. Fakat bu düzen çapraz ayakların tetiklenmesi şeklinde devam etmektedir. Bütün bacaklar birbirlerini düzenli bir şekilde takip etmekte ve her bacak hareketine bir önceki baktan toplam periyodun (fazın) %10'u kadar bir gecikme ile başlamaktadır. Bir başka deyişle eğer bacak hareketi bir sinüzoidal fonksiyonla tanımlanırsa faz farkı toplam periyodun %10'u kadar olacaktır. Bir başka dört bacaklıda ise bacak, önceki bacak periyodunun yarısını tamamladığı sırada tetiklenmektedir. Bacak periyodu hareket periyodu ve duruş periyodundan oluşmaktadır. Periyot, hareket periyodu, duruş periyodu ve bacak uzunlukları mobil robot hareket düzeni için (Şekil 5.3) oldukça önemli parametrelerdir. [15]



Şekil 5.2: Gerçek bir akrebin yürüyüş biçimi

Bir periyot bacak hareketlerini diğer bir deyişle yürüyüş ve duruş anını kapsamaktadır. Duruş periyodu sırasında bacak yere dokunmaktadır. Bu dokunma anına *yükselme* (promotion) denilmektedir.



Şekil 5.3: Hareket Düzeni

Şekil 5.3'te 8 bacaklı bir yapının hareket düzeni görülmektedir. Şekildeki dikey çizgiler o an için kaç bacağın yerle temas halinde olduğunu veya kaç bacağın hareket halinde olduğunu göstermektedir. Yatay çizgiler ise zamanı belirtmektedir.

Bowerman[15] hareket periyodu T_1 'in lineer değişiminin uzun adımlarla hareket frekansı duruş periyodu T_2 ile aynı olduğunu belirtmiştir. Hareket periyodunda eğim 0,2 duruş periyodunda ise yaklaşık 0,8 olmaktadır. Bu bağıntı bize iki parametreyi de diğeri cinsinden ifade etme serbestliği vermektedir. Hareket ve duruş periyotları birbirleriyle bağlantılı haldedir ve asla yalnız olarak değiştirilemezler. Hareket ve duruş periyotları uzun adımlarla hareket frekansının parametreleridir.

$$f(t) = \begin{cases} A \cdot \sin(\pi \cdot t / T_1 - \pi / 2) & 0 \leq \text{MOD}(t, T_1 + T_2) \pi T_1 \\ A \cdot \sin(\pi \cdot (t - T_1) / T_2 + \pi / 2) & T_1 \leq \text{MOD}(t, T_1 + T_2) \pi T_1 + T_2 \end{cases} \quad (5.1)$$

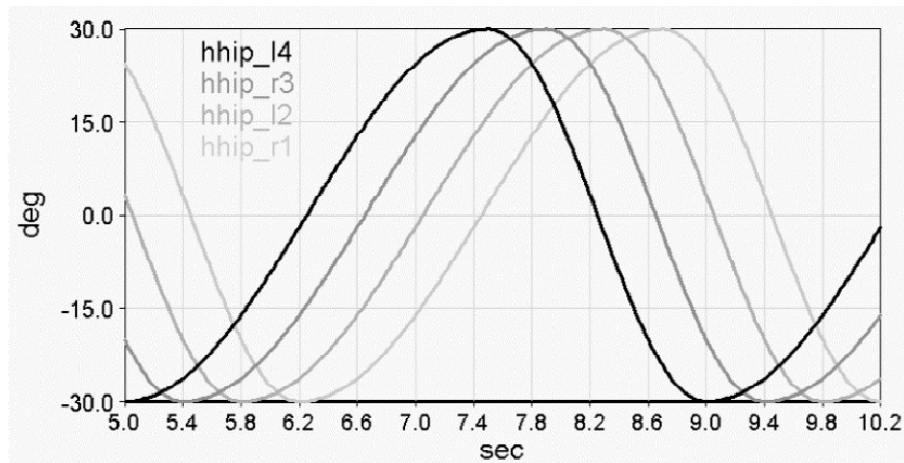
Biyomimetrik yaklaşıma göre yukarıda açıklanan yürüyüş düzeni direkt olarak bizim mobil robotumuza uygulanabilir. $f(t)$ fonksiyonu yürüyüş sırasında bacak L4'ün hareketini göstermektedir. yukarıda açıklandığı gibi dalga biçimi iki farklı sinüs dalgasından oluşmaktadır. Biyomimetrik analizde gövdenin her zaman dengede kalabilmesi için duruş periyodunun hareket periyodundan daha küçük olması gerekmektedir.

Yürüyüş gerideki bacadan başlamakta ve hareket sırasıyla öndeki bacaklarla doğru devam etmektedir. Bu hareket biçiminde diğer bacakların hareketleri de yukarıdaki fonksiyona bir faz farkı eklenerek açıklanabilir. Bu durumda fonksiyon diğer bacaklar içinde ifade edilecek olursa;

$$g(t) = \begin{cases} A \cdot \sin(\pi \cdot t/T_1 - \pi/2 + \varphi) & 0 \leq \text{MOD}(t, T_1 + T_2)\pi T_1 \\ A \cdot \sin(\pi \cdot (t - T_1)/T_2 + \pi/2 + \varphi) & T_1 \leq \text{MOD}(t, T_1 + T_2)\pi T_1 + T_2 \end{cases} \quad (5.2)$$

Verilen herhangi bir bacak hareketi için örnek bir sinüzoidal dalga şekli aşağıda şekil 5.4'te gösterilmiştir. Burada bütün bacaklar birbirlerini φ ile sembolize edilen küçük faz farklarıyla takip etmektedirler.

Biyomimetrik yaklaşımda hareket periyodu, T_1 , daima duruş periyodundan, T_2 , büyüktür. Bizim hareket düzenimizde T_1 / T_2 oranı 5 / 3 olmaktadır.



Şekil 5.4: Sinüzoidal yürüyüş formu

Dengesizlikten kaçınmak için, bacaklardaki 3 eklem sadece ileri yöndeki harekete katkı sağlayacaktır. Her birinin duruş periyodu sırasında, gövde ve ayaklar arasındaki yatay mesafe ve gövdenin yerden dikey yüksekliği, tıpkı gerçek bir akrebin yürüyüş sırasında içgüdüsel olarak sağladığı gibi, sabit kalmalıdır. Bu sebeple 2. omuz eklemi açısı ve dirsek eklemi açısının, 1. omuz eklemi açısı cinsinden bir fonksiyon ile ifade edilmelidir.

5.3 Yürüyüş Düzeninin Biyometrik Karşılaştırılması



Şekil 5.5: Akrep yürüyüşü – 2

Şekil 5.3'te, yürüyüş düzeni hareket ve duruş periyotları şeklinde gösterilmiştir. Dikey çizgiler ise bize bacak pozisyonları hakkında bilgi vermektedir.

İkinci dikey çizgiyi göz önüne alırsak (2); L2, L3, L4, R4 ve R1 yerdedir. L1 ise hareket halindedir. Şekil 5.5'te bu durum açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.6: Akrep yürüyüşü – 3

Eğer 3. dikey çizgiye (3) bakarsak; L1, L2, L3 ve R4 yere temas etmektedir. L4 ise hareket halindedir. Şekil 5.6’da bu durum gözlenebilmektedir.

Akrebin hareketi sırasında birçok hareket durumu incelenmiş ve şekil 5.3’te verilen yürüyüş düzeni ile birebir uyduğu gözlemlenmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında sekiz bacaklı mobil robotun mekanik tasarım, modelleme ve lokomasyon aşamaları aktarılmıştır. Mobil robottan beklenen görevler açıklanmıştır. Bu görevlerden boru hatlarında veya hasar görmüş binalarda kullanım amacı ile tasarım çalışmanın ana motivasyonunu oluşturmuştur. Bu amaç doğrultusunda 8 bacaklı 2 vagonlu, 24'ü aktif olmak üzere toplam 26 serbestlik derecesine sahip bir sistem ortaya çıkmıştır.

Mobil robot genel şeklinin oluşması sırasında biyomimetrik bir yaklaşım izlenmiştir. Yapılan çalışmada öncelikle doğadaki canlılar incelenmiş ve tasarım bu doğrultuda şekillendirilmiştir. Doğa daha derinlemesine incelenirse içersinden daha optimize mobil robot tasarımlarının çıkacağı açıktır.

Mobil robotun kullanılabileceği koşullar göz önüne alınarak oldukça sağlam bir gövde yapısı ve bu gövde yapısını rahatlıkla hareket ettirebilecek bacak yapıları tasarlanmıştır. Motor boyutlarının küçültülmesi için ağırlıklar azaltılarak motorlara etkiyen yükler de azaltılmıştır. Mekanik yapının herhangi bir şekilde hasar görmemesi için bilgisayar destekli tasarım programlarında oluşturulmuş ve gerilme analizleri yapılmıştır.

İstenilen amaca uygun motor seçimi sonucu yüksek momentli küçük boyutlu motorlar kullanılmış ve bunlar eklemlerin içlerine yerleştirilerek oldukça özgün bir tasarım yapılmıştır. Böylece mobil robota sağlamlığının yanı sıra estetik bir görünüm kazandırılmıştır.

Bu tez çalışmasına paralel bir şekilde yürüyen diğer bir tez çalışmasında seçilen motorların istenilen şekilde kontrol edilebilmesi amacıyla motor sürücüleri ve

iletişim ağı tasarımı yapılmıştır. Ayrıca tüm sensörler ve kontrolcüler yine bu çalışma sonucu belirlenmiştir.

Sonraki çalışmalara ışık tutmak amacıyla tek bacak için kinematik model çıkarılmıştır. Ayrıca mobil robotun mekanik yapısına uygun bir kontrol algoritması geliştirilmesi için giriş seviyesinde bir lokomasyon analizi de yapılmıştır.

6.2 Öneriler

Bu ve paralelinde yürüyen tez çalışması sayesinde ortaya çıkarılan gerek mekanik gerek elektriksel tasarım sonuçları pratiğe dökölmek suretiyle bir prototip geliştirilebilir.

Prototip üretiminden sonra dış ortam testleri gerçekleştirilip gerekli kontrol algoritmaları ve sensör ilaveleri ile çeşitli amaçlara yönelik olarak farklı versiyonların tasarım ve imalatları gerçekleştirilebilir.

Bu tez çalışması sayesinde elde edilen bilgiler kullanılarak çeşitli kurumların ihtiyacı olan sistemler yerli imalat ile üretilerek ölkemizin bu tür sistemlere harcadığı özsermaye kısmen azaltılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Xiao J., Minor M., Tummala, K.**, Modelling and Control of an Underactuated Crawle Robot. Proceedings of the 2003 IEEE Intermtiond Conference on RoboticS &Automation Maui, Hawaii,USA November 03-19, 2001
- [2] **Tak Y., Jeong Y., Kim, B.**, A Ciliary Based Walking 8-Legged Robot Using IPMC Actuators. Proceedings of the 2003 IEEE Intermtiond Conference on RoboticS &Automation Taipei, Taiwan, September 14-19, 2003
- [3] **Masakado S., Ishii T., Ishii, K.**, A Gait-Transition Method for a Quadruped Walking Robot. Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Monterey, California, USA, 24-28 July, 2005.
- [4] **Brandon L., Quinn R.**, A Robot with Cockroach Inspired Actuation and Control. Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Monterey, California, USA, 24-28 July, 2005.
- [5] **Klaassen B., Kirchner B.**, Biomimetic Walking Robot Scorpion: Control and Modeling. Robotics and Autonomous Systems Journal, USA, 2005
- [6] **Summer M., Davis L.**, Design and Control of a Dexterous Biomimetic Multi-Limbed Walking Robot. Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Monterey, California, USA, 24-28 July, 2005.
- [7] **Massari M., Nebuloni S.**, Realization and Control of a Prototype of Legged Rover for PlanetaryExploration Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Monterey, California, USA, 24-28 July, 2005.

- [8] **Roland Siegwart and Illah R. Nourbakhsh**, Introduction to Autonomous Mobile Robots, Sf. 13 – 36, ISBN 0-262-19502-X (hc : alk. paper)1. Mobile robots. 2. Autonomous robots.
- [9] <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bilgipaket/canlilar/animalia/omurgasiz/2bilateria/1protostomia/arthropod.htm>
- [10] <http://www.bisohbet.com/form/index.php?topic=33748.0;imod>
- [11] SKF Rulman Kataloğu
- [12] http://www.mekatronikkulubu.org/40_soruda_marc_mentat_ile_sonlu_elemanlar_analizi
- [13] **Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M.**, 2006. Robot Modeling and Control, sf. 74 – 83, Hoboken, NJ : John Wiley & Sons.
- [14] **Uğurlu R.B.**, 2006. Electronic control unit and power electronics design for an eight legged mobile robot, *Master Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [15] **Bowerman R. F.** (1975) The Control of Walking in the Scorpion I.Leg Movements during Normal Walking. J comp Physiol 100:183196

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

İsim : Cengiz Mete UZUNDERE

Doğum Yeri / Tarihi : Iğdır / 24.07.1982

Eğitim

2004 - İstanbul Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

1999 – 2004 Ege Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Makina Mühendisliği Bölümü

1996 – 1999 Bursa Cumhuriyet Lisesi

İlgi Alanları : Bacaklı ve Paletli Mobil Robotlar, Mekanik Tasarım,
Doğadan Esinlenilmiş Sistemler