

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNSANSI ROBOTLAR İÇİN MODÜLER YAPAY OMURGA TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ekim YURTSEVER**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Sistem Dinamiği ve Kontrol Programı**

**Anabilim Dalı : Herhangi Mühendislik, Bilim**

**Programı : Herhangi Program**

**MAYIS 2014**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNSANSI ROBOTLAR İÇİN MODÜLER YAPAY OMURGA TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ekim YURTSEVER  
(503121606)**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Sistem Dinamiği ve Kontrol Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Seniz ERTUĞRUL  
Anabilim Dalı : Herhangi Mühendislik, Bilim  
Programı : Herhangi Program**

**MAYIS 2014**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503121606 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ekim YURTSEVER**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**İNSANSI ROBOTLAR İÇİN MODÜLER YAPAY OMURGA TASARIMI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Şeniz ERTUĞRUL**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Yar. Doç. Dr. Pınar BOYRAZ**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Yar. Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **5 Mayıs 2014**  
**Savunma Tarihi :**      **26 Mayıs 2014**



*Anneme ve babama,*



## ÖNSÖZ

Tez danışmanım değerli hocam Prof. Dr. Şeniz Ertuğrul'a çalışmama gösterdiği ilgi ve anlayıştan, Yar. Doç. Dr. Pınar Boyraz'a ve aynı laboratuvarında çalıştığım iş arkadaşlarım Gökçe Tağlıoğlu'na, Cihat Bora Yiğit'e ve Barış Tezcan'a huzurlu ve bilimsel bir çalışma ortamı sağladıklarından ve İTÜ Asistan Dayanışmasına, üniversitede özgürlük mücadelesi veren bütün öğrencilere ve üniversite personeline İTÜ'nün daha emek dostu ve bilimsel bir kurum olması için gösterdikleri çabadan ötürü teşekkür ederim.

Mayıs 2014

Ekim Yurtsever  
(Makina Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ.....                                                                | vii       |
| İÇİNDEKİLER .....                                                         | ix        |
| KISALTMALAR .....                                                         | xi        |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                        | xv        |
| ÖZET.....                                                                 | xvii      |
| SUMMARY .....                                                             | xix       |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                     | <b>1</b>  |
| 1.1 Tezin Amacı .....                                                     | 1         |
| 1.2 Literatür Araştırması .....                                           | 2         |
| 1.2.1 Geleneksel insansı robot uygulamaları .....                         | 3         |
| 1.2.2 Yapay omurgaya sahip robotlar .....                                 | 7         |
| 1.2.2.1 Robota .....                                                      | 7         |
| 1.2.2.2 CLA.....                                                          | 10        |
| 1.2.2.3 Kenta, Kotaro, Kojiro, Kenzoh ve Kenshiro.....                    | 10        |
| 1.2.2.4 ECCE 1 .....                                                      | 15        |
| 1.2.2.5 Liang ve Ceccarelli gövde çalışması.....                          | 16        |
| 1.2.2.6 Romeo .....                                                       | 16        |
| <b>2. YAPAY OMURGA TASARIMI.....</b>                                      | <b>19</b> |
| 2.1 İnsanın Anatomik Özellikleri .....                                    | 19        |
| 2.1.1 Vücut bölümleri ve uzunlukları .....                                | 20        |
| 2.1.2 İnsan eklem özellikleri .....                                       | 21        |
| 2.1.3 Omurga özellikleri .....                                            | 25        |
| 2.2 Basitleştirilmiş Omurga Modeli .....                                  | 28        |
| 2.3 Tasarım Çalışmaları .....                                             | 30        |
| 2.3.1 Tek kardan mafsallı omurga .....                                    | 31        |
| 2.3.2 İlk modüler tasarım .....                                           | 33        |
| 2.3.3 Paralel mekanizmalı modüler tasarım.....                            | 35        |
| 2.3.4 Nihai tasarım: geliştirilmiş paralel mekanizmalı modüler yapı ..... | 41        |
| <b>3. BENZETİMLER.....</b>                                                | <b>49</b> |
| 3.1 Amaç .....                                                            | 49        |
| 3.2 Hareket Analizi .....                                                 | 50        |
| 3.3 Mukavemet Analizi .....                                               | 52        |
| <b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                                          | <b>61</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                    | <b>63</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                      | <b>71</b> |



## **KISALTMALAR**

|            |                                  |
|------------|----------------------------------|
| <b>BOM</b> | : Basitleştirilmiş Omurga Modeli |
| <b>PM</b>  | : Paralel Mekanizma              |
| <b>YO</b>  | : Yapay Omurga                   |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1 : Vücut parçalarının uzunlukları ve yerden yükseklikleri.. .....       | 21 |
| Çizelge 2.2 : İnsan eklemlerinin hareket menzilleri.. .....                        | 22 |
| Çizelge 2.3 : Mafsal sayısı ve serbestlik dereceleri.....                          | 38 |
| Çizelge 2.4 : Geliştirilmiş PM için mafsal sayıları ve serbestlik dereceleri. .... | 43 |
| Çizelge 3.1 : Al 7050- T7451 alaşımının mekanik özellikleri.....                   | 52 |
| Çizelge 3.2 : AISI 4340 normalize çeliği mekanik özellikler. ....                  | 52 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1 : İlk endüstriyel robot “Unimate”[6].                                          | 3  |
| Şekil 1.2 : HONDA’nın geliştirdiği insansı yürüyebilen robotlar ve “ASIMO” [7].          | 4  |
| Şekil 1.3 : Robonaut 2, uzaya çıkan ilk insansı robot [8].                               | 4  |
| Şekil 1.4 : Üçbuçuk yaşında bir insan boyutlarına sahip iCub [9].                        | 5  |
| Şekil 1.5 : “SURALP”, Türkiye’de geliştirilen ilk insansı robot [10].                    | 5  |
| Şekil 1.6 : Dr. Zeki Yağız Bayraktaroğlu liderliğinde geliştirilen robot [11].           | 6  |
| Şekil 1.7 : İlkey Meşeli tarafından tasarlanan altı serbestlik dereceli robot kolu [12]. | 6  |
| Şekil 1.8 : Yapay bir omurgaya sahip olan Robota isimli robot [2].                       | 7  |
| Şekil 1.9 : Robota’nın yapay omurgasının çalışma prensibi [2].                           | 8  |
| Şekil 1.10 : Omurga içinde yay ve pistonların dağılımı [2].                              | 8  |
| Şekil 1.11 : Akışkanın omurlardan ve pistonlardan geçen hareketi [2].                    | 9  |
| Şekil 1.12 : Robota’nın prototip omurgası [2].                                           | 9  |
| Şekil 1.13 : CLA robotunun omurga yapısı [13].                                           | 10 |
| Şekil 1.14 : JSK’nın ilk yapay kas-iskelet sistemli insansı robotu Kenta [14].           | 11 |
| Şekil 1.15 : Kotaro’nun özellikleri [14].                                                | 11 |
| Şekil 1.16 : Kojiro [14].                                                                | 12 |
| Şekil 1.17 : Kojiro’nun yapay omurga yapısı [14].                                        | 12 |
| Şekil 1.18 : Kojiro’nun hareket kabiliyeti [14].                                         | 13 |
| Şekil 1.19 : Kenshiro’nun özellikleri [14].                                              | 13 |
| Şekil 1.20 : Planar kas sistemi [14].                                                    | 14 |
| Şekil 1.21 : Planar kasın omurgaya bağlanması [14].                                      | 14 |
| Şekil 1.22 : İnsansı robot ECCE 1[15].                                                   | 15 |
| Şekil 1.23 : ECCE 1’in esnek omurgası [15].                                              | 15 |
| Şekil 1.24 : Göğüs ve Bel modülünden oluşan gövde sistemi [16].                          | 16 |
| Şekil 1.25 : Romeo’nun gelişme adımları [17].                                            | 17 |
| Şekil 1.26 : Romeo’nun omurgasında kullanılan paralel mekanizma [17].                    | 17 |
| Şekil 2.1 : İnsan oryantasyonu ve ana düzlemler [18].                                    | 20 |
| Şekil 2.2 : İnsan vücudunun bölümleri ve temsili düzlemler [18].                         | 20 |
| Şekil 2.3 : Omurganın ana bölümleri. [22].                                               | 25 |
| Şekil 2.4 : Cervical Grubu [19].                                                         | 26 |
| Şekil 2.5 : Thoracic Grubu [19].                                                         | 26 |
| Şekil 2.6 : Lomber grubu [19].                                                           | 27 |
| Şekil 2.7 : Sacrum [19].                                                                 | 27 |
| Şekil 2.8 : Coccyx [19].                                                                 | 28 |
| Şekil 2.9 : (a) Omur grupları, (b) İndirgenmiş düzlemler, (c) Modüller.                  | 29 |
| Şekil 2.10 : Omurgayı temsil eden 3 modül.                                               | 30 |
| Şekil 2.11 : Tasarım faaliyeti sırasında oluşturulan örnek bir çalışma sayfası.          | 31 |
| Şekil 2.12 : İnsansı robot “iTech”                                                       | 32 |
| Şekil 2.13 : iTech’in gövde hareketleri.                                                 | 32 |
| Şekil 2.14 : Bel, göğüs ve boyun modüllerinden oluşan yapay omurga.                      | 33 |
| Şekil 2.15 : Dik pozisyonunda omurganınve YO’nun aldığı şekil.                           | 34 |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.16 : Geliştirilen yapının çeşitli hareketleri. ....                         | 34 |
| Şekil 2.17 : Tasarlanan yeni paralel mekanizma. ....                                | 36 |
| Şekil 2.18 : Geliştirilen PM'lerden oluşan yapay omurga yapısı. ....                | 36 |
| Şekil 2.19 : YO'nun hareket kabiliyeti. ....                                        | 37 |
| Şekil 2.20 : (a) RRURR çiftinin (b) RRUCR çiftinin mafsalları. ....                 | 38 |
| Şekil 2.21 : PM'nin serbestlik derecelerinin benzetim ortamında gösterilmesi. ....  | 39 |
| Şekil 2.22 : Yapay omurganın hareket benzetimleri. ....                             | 40 |
| Şekil 2.23 : Modüllerin birbirine elastik bir eleman aracılığı ile bağlanması. .... | 40 |
| Şekil 2.24 : Geliştirilmiş paralel mekanizma. ....                                  | 42 |
| Şekil 2.25 : Geliştirilmiş PM için mafsalları. ....                                 | 42 |
| Şekil 2.26 : (a) Z yönünde doğrusal (b) yalpa (c) dalma hareketleri. ....           | 44 |
| Şekil 2.27 : Geliştirilmiş yapay omurganın ilk hali. ....                           | 44 |
| Şekil 2.28 : YO'nun uzayda yapabildiği çeşitli hareketler. ....                     | 45 |
| Şekil 2.29 : Yapay omurga nihai hal. ....                                           | 45 |
| Şekil 2.30 : iTech insansı robot. ....                                              | 46 |
| Şekil 2.31 : iTech'in insansı gövde hareketleri. ....                               | 47 |
| Şekil 3.1 : Hareketler soldan sağa doğru 7 saniye içinde gerçekleştirilmiştir. .... | 50 |
| Şekil 3.2 : Z yönünde lineer hareket için motorların güç sarfiyatları. ....         | 51 |
| Şekil 3.3 : Eğilme hareketi sırasında motorların güç sarfiyatları. ....             | 51 |
| Şekil 3.4 : Mesh yapısı. ....                                                       | 53 |
| Şekil 3.5 : Belirlenen sınır şartları. ....                                         | 53 |
| Şekil 3.6 : Von Mises gerilme dağılımı. ....                                        | 54 |
| Şekil 3.7 : Yer değiştirme sonuçları. ....                                          | 54 |
| Şekil 3.8 : Yalpa hareketi analizi için oluşturulan mesh yapısı. ....               | 55 |
| Şekil 3.9 : Yalpa analizi için sınır şartları. ....                                 | 56 |
| Şekil 3.10 : Yalpa esnasında oluşan Von Mises gerilmeleri. ....                     | 56 |
| Şekil 3.11 : Şekil değişimi. ....                                                   | 57 |
| Şekil 3.12 : YO'ya atılan mesh yapısı. ....                                         | 58 |
| Şekil 3.13 : YO analizi sınır şartları. ....                                        | 58 |
| Şekil 3.14 : Von Mises gerilme dağılımı. ....                                       | 59 |
| Şekil 3.15 : YO şekil değişimi. ....                                                | 60 |
| Şekil A.1 : Paralel modül montaj hali. ....                                         | 66 |
| Şekil A.2 : Omur. ....                                                              | 67 |
| Şekil A.3 : Kanatçık. ....                                                          | 68 |
| Şekil A.4 : Kardan mili montaj. ....                                                | 69 |

## İNSANSI ROBOTLAR İÇİN MODÜLER YAPAY OMURGA TASARIMI

### ÖZET

Yirminci yüzyılın son çeyreğinde insana benzeyen ve insan gibi hareket edebilen robotlar geliştirilmeye başlanmıştır. Gelecekte insansı robotların sanayi ve servis sektörlerinde, okul öncesi ve özel durumları bulunan çocukların eğitiminde ve birçok başka alanda toplum hayatına gireceği çeşitli araştırmacılar tarafından savunulmaktadır.

İnsansı robotlar en basit hali ile yürüme için iki bacak ve iş yapma için iki kol kullanan mekanik yapılardır. Yürüme ve iş yapma işlevleri geleneksel olarak açık seri kinematik zincirler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Seri açık kinematik zincirlerin ileri ve ters kinematik çözümlemelerinin kolay elde edilebilmesi kontrol uygulamalarında sıklıkla kullanılmasına yol açmıştır. İnsansı robotlarda kullanılan mekanik tasarımlar bu sebep ile seri açık kinematik zincirlerin bir araya getirilmesi ile ortaya çıkmıştır.

Ancak, çok serbestlik dereceli insansı robotlarda yukarıda bahsedilen geleneksel mekanik çözümler, robot hareketlerinin süresiz ve insansı olmayan bir biçimde eylemlenmesine sebep olmaktadır. Bu çalışmada, sürekli ve insansı hareketler elde edebilmek için uzuvların hatta gövdenin birbirine göre bağlı hareket edebilen modüler yapılardan oluşması gerektiği öngörülmektedir. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sistem Dinamiği ve Kontrol Programında Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmada insansı bir robotta kullanılmak üzere modüler yapay bir omurga geliştirilmiştir. Amaç sürekli ve insansı bir hareketi mümkün olan en az sayıda motorla elde etmektir.

Tez kapsamında dört adet gövde tasarımı yapılmıştır. İlk üç tasarımın iyileştirilmesi ile elde edilen nihai tasarımın istenilen hareket işlevlerini yerine getirdiği gözlemlenmiştir.

Geliştirilen Omurga birbirine modüler bir şekilde eklenen paralel mekanizmalardan oluşturulmuştur. Bu amaç için özgün bir paralel mekanizma modülü geliştirilmiştir. Geliştirilen konsept tasarım, yapılan benzetimlerde insan gövde hareketlerini gerçeğe çok yakın bir biçimde taklit edebilmiştir. Yeni geliştirilen sistem sürekli hareket sağlamasının yanı sıra motor tahriki kesildiğinde konumunu koruyacak mekanik kararlılığı da sağlamaktadır.

Yapılan sonlu elemanlar ve dinamik analizler sonucu nihai boyutlandırma ve malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir ve tasarım çalışması son bulmuştur.

Bu tez kapsamında yapay omurganın tasarım süreci ile ilgili çalışılmıştır. İlerleyen yıllarda devam eden proje doğrultusunda prototip üretilecek ve kontrol uygulamaları gerçekleştirilecektir.



# **DESIGN OF A MODULAR CONSTRUCTED SPINE FOR HUMANOID ROBOTS**

## **SUMMARY**

In recent decades, various types of humanoid robots with the goal of acting like human beings have been developed by many research groups. The earlier humanoids which resemble the human form were constructed as biped walkers with limbs as legs and arms and a torso to carry the loads and components required for robot operations. The conventional solutions for limb and body structures consist of dedicated motors for each degree of freedom axis, which establishes a serial open loop kinematic chain. While a simple approach like this enabled the control of the robot as an achievable task, the lack of fluidity in the motions caused by low degree of freedoms and serial kinematic chains made the movements of the robots discontinuous and not human-like.

Until recent years the importance of the mechanical aspect of mimicking human skeletal and muscular structures has been neglected. However, robots like Robota, Kotaro, Kojiro and Kenzoh introduced new approaches to mechanical design of limbs and body. Furthermore, the works of these researchers showed the validity of the applications of human-like artificial skeletal and muscular structures in robotics. Conventional designs like Honda's ASIMO fail to create human-like motions while the mentioned Kojiro and Kenzoh achieves this criteria but fails to avoid nonlinear behavior and maintain mechanical stability.

In this thesis, the design of a torso will be discussed, as the motion of the torso is a crucial element to achieve human-like movements in robots and also the trunk is the main part where all other limbs are connected.

As mentioned above, conventional mechanical applications in humanoid robots cause non-human-like and discontinuous motion. In this work, to create human-like motions, a modular structure where every module can move relative to the preceding or the following module has been suggested. A novel parallel mechanism as a module has been designed for this purpose. Parallel mechanisms are attached to each other as modules to constitute the spine. In addition to the continuous movement, the mechanism is able to maintain its position when the motors cease to work, which makes the system mechanically stable. In simulations, the new concept design achieved to mimic human spine movements successfully. The modular spine like mechanism is designed as a part of an ongoing humanoid project in Istanbul Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, System Dynamics and Control Laboratory.

The design requirements of the torso may summarized as below:

- 1) The design must allow fluid, human-like motions
- 2) Nonlinear behavior characteristics must be avoided in order to achieve the model and controllability of the system in future works

3) The structure must be able to hold its position in any given state without help from motors

4) The structure should provide space and carry equipment for other parts

First the kinematic specifications of human trunk must be investigated. The trunk part of the human body is from neck to hip. Neck can roll and pitch, waist can yaw and hip can yaw, pitch and roll. Main parts of the trunk are thorax, waist and pelvis. Thorax plate can yaw, pitch and roll relative to pelvis plate. Thorax plate is connected to pelvis plate through the spine. Spine consists of 33 vertebrae in 5 main zones; cervical, thoracic, lumbar, sacral and coccyx, coccyx is attached to Sacrum. Due to the lack of the motion of sacral group, only cervical, thoracic and lumbar parts of the spine will be considered in our work.

Spine is divided into four main groups. These groups are reduced to four planes in our design. These planes are as follows;

Plane D is the end of lumbar group and start of the sacral group.

Plane C is the end of thoracic group and start of lumbar group.

Plane B is the end of cervical group and start of thoracic group.

Plane A is the starting point of the cervical group.

Movement capabilities of human spine will be recreated through these four planes. When the longitudinal axis of the spine is accepted as Z axis, In order to achieve continuous motion of the body, each plane must be able to; Pitch, yaw and move in X,Y and Z directions. However, with the consideration of human spine restrains, the transitional displacement in X and Y axis must be constrained. These planes will be the end actuators of the each parallel mechanism. The artificial spine will be constructed with the serial connection of these parallel mechanisms.

Parallel mechanisms are closed kinematic chains with high degree of freedoms. They have many advantages over serial kinematic chains as being stiffer, accurate construction with a low moment of inertia.

The desired degrees of freedom were mentioned. To achieve these degrees of freedom a novel 5 DOF RRURR/RRUCR asymmetric parallel mechanism is suggested. Where, R stands for one directional rotation (Rotation), C for one directional rotation and linear displacement at the same axis of rotation (Cylindrical), U for two degree of freedom universal joint (Cardan coupling). Also two screw joints are used.

One, two or three of this module can be used together to obtain any desired degree of freedom. It should be noted that this is still an ongoing research and the design will be refined after a set of analysis.

The CAD model of the suggested spine module has been created in SOLIDWORKS. Parts are mated together as explained in kinematic design process. With using SOLIDWORKS motion add in yaw, pitch and transitional X,Y,Z motions have been simulated. Bottom plane is fixed in the simulations. Position of the top plane has been changed with various inputs. The spine structure is also modeled in SOLIDWORKS. With using motion add in, motion of the spine structure has been observed.

Strength related finite element and dynamical analysis has been done as a part of the work. Final dimensioning and material selections has been done according to these simulations.

In future, the design will be improved and a prototype will be manufactured. Kinematic and inverse kinematics of the mechanism will be solved and known control methods will be applied. The spine structure will be combined with an arm design which is also an undergoing project under the humanoid robot project.



## 1. GİRİŞ

Özellikle son otuz sene içerisinde insanoğlu gibi hareket etme ve iş yapma kabiliyetini hedefleyen robotlar çeşitli araştırma grupları ve firmalar tarafından geliştirilmiştir. İnsan yapısını andıran ilk tam insansı robotlar, iki ayak kullanarak yürüme kabiliyetine, kol ve bacağı andıran uzuvlara ve robotun elektronik aksamını ve üst yapısını taşıyan bir gövdeye sahipti. Geleneksel mekanik çözümler, açık seri bir kinematik zincir oluşturacak şekilde her serbestlik derecesi eksenini için bir eyleyici kullanarak oluşturulmuştur.

Böyle bir yaklaşım robotların kontrolünü kolay bir şekilde gerçekleştirmeye yararken, bir yandan da düşük serbestlik dereceleri ve seri açık kinematik zincirler robotların süreksiz, akıcı olmayan ve dolayısı ile insana benzemeyen bir biçimde hareket etmesine sebep olmaktadır. Honda'nın ASIMO [1] robotu bahsedilen geleneksel çözümlerin en başarılı temsilcilerinden biri olmasına rağmen akıcı ve sürekli insansı hareketleri gerçekleştirmede sorunlar yaşamıştır.

Son on yıla kadar insan iskelet ve kas sistemlerine benzeyecek mekanik çözümler göz ardı edilmiştir. Ancak Robota [2], Kotaro [3], Kojiro [4] ve Kenzoh [5] gibi robotlarla birlikte gövde ve uzuvların mekanik yapısında yeniliklere (insan sistemlerine benzeme açısından) gitme fikri gelişmeye başlamıştır. Bahsedilen araştırmacılar yapay iskelet ve kas sistemlerinin robotikte uygulanmasının mümkün olduğunu başarılı bir şekilde göstermişlerdir.

### 1.1 Tezin Amacı

Bu tezde amaç sürekli ve insansı bir gövde hareketini gerçekleştirecek mekanik yapıyı tasarlamak ve geliştirilen tasarımı dinamik ve mukavemet açısından benzetimler kullanarak analiz etmektir.

Geliştirilecek tasarımın aşağıdaki dört kriteri sağlaması öngörülmektedir;

1) Tasarım akıcı, insansı hareketlere izin vermelidir.

2) Tasarımın dinamik modelinin elde edilmesi ve kontrol edilebilmesinin kolay olması için lineer olmayan davranış karakteristiği gösterecek elemanlardan kaçınılmalıdır.

3) Yapı, tahriki sağlayan motorlardan yardım almadan her hangi bir pozisyonda durumunu koruyabilmelidir.

4) Yapı robotun diğer parçalarını taşıma görevini gösterecek mukavemete sahip olmalı ve hacimsel olarak elektronik aksamı yerleştirmeye müsait olmalıdır.

Bu kapsamda insansı robotların gövdeleri hakkında literatürde yapılan son çalışmalar araştırılmıştır. Ardından insan omurgası anatomik açıdan incelenmiş ve omurganın hareket kabiliyeti analiz edilmiştir. Bu analizin sonucunda omurga hareketini yaklaşık olarak taklit edecek kinematik bir model geliştirilmiştir.

Elde edilen modele göre konstrüktif tasarım çalışmaları yapılmıştır. Çeşitli ön tasarımlar elde edildikten sonra paralel mekanizmalardan oluşan modüler bir yapı nihai tasarım olarak seçilmiştir. Bu tasarım imalata uygun olacak şekilde geliştirilmiştir.

Nihai tasarımda kullanılan modül dinamik açıdan incelenmiş ve hareket esnasında oluşan atalet kuvvetleri ve gerekli motor torkları benzetimler kullanılarak hesaplanmıştır.

Son olarak, sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak tasarımın yük altındaki davranışı önce modül bazında daha sonra modüllerin bir araya gelmesi ile oluşan yapay omurga bazında analiz edilmiştir.

## **1.2 Literatür Araştırması**

Bu bölümde önce belli başlı geleneksel insansı robot uygulamaları incelenmiş ve geçmişten günümüze bu alanda yapılan çalışmalar derlenmiştir. Ardından, yapay omurgaya sahip, sürekli ve insansı bir şekilde hareket edebilen robotlar incelenmiş ve tanıtılmıştır. Bu çalışmada sürekli ve insansı hareketi yakalayacak gövde tasarımı hedef olduğu için yapay omurgalı robotlara literatür araştırmasında daha çok ağırlık verilmiştir.

### 1.2.1 Geleneksel insansı robot uygulamaları

İnsansı robotlar kavramsal olarak, mühendisliğin alanına girmeden ve teknolojik olarak geliştirilmeden çok önce edebiyatta, özellikle bilimkurgu alanında yapılan çalışmalarda kendini göstermiştir.

Ancak 1960'lı yıllara gelinene kadar kendini sadece kavramsal olarak var eden robotlar, uygulamada üretilmemiştir.

1956 yılında Şekil 1.1'de gözüken ilk endüstriyel robot Unimate, Gorge Devol ve Joe Emgelberger tarafından, kendi kurdukları Unimation firması bünyesinde geliştirilmiştir. Robotrun sanayide kullanımı ise 1961 yılında, robotun General Motors'a satılması ile birlikte başlamıştır.



**Şekil 1.1 :** İlk endüstriyel robot “Unimate”[6].

İlk robottan sonra insansı robotların geliştirilebilmesi için yaklaşık bir 30 yıl daha gerekmiştir. İnsansı hareketi temsil eden en temel özelliklerden biri olan iki bacak kullanarak yürüme işleminin zorluğu en önemli problemlerden biri idi. MIT 1980 yılında bu problemi incelemek için bacak laboratuvarı kurmuştur. Marc Raipert bu laboratuvarın kurucusuydu.

Üniversiteler dışında HONDA şirketi 1986 yılından itibaren iki ayak kullanarak yürüyebilen robotlar geliştirmiştir [7]. Honda'nın robotları Şekil 1.2'de görülebilir.

HONDA'nın geliştirdiği insansı robotların son modeli ASIMO'dur. Açılımı Advanced Step in Innovative Mobility (ASIMO) olan robot 2000 yılında HONDA tarafından üretilmiştir. ASIMO'nun gelişimi günümüzde de devam etmektedir. 2000 yılından itibaren 5 farklı versiyon geliştirilmiştir.



**Şekil 1.2 :** HONDA'nın geliştirdiği insansı yürüyebilen robotlar ve "ASIMO" [7].

En son versiyon 2012 yılında tanıtılmıştır ve HONDA'nın çalışmaları hala devam etmektedir. Günümüzde, ASIMO en gelişmiş insansı robotlardan biridir.

NASA, 1997 yılında insansı robotlar üzerine çalışmak için Dextrous Robotics laboratuvarını kurmuştur. 2010 yılında NASA, General Motors şirketi ile birlikte Robonaut 2 isimli bir insansı robot geliştirmiştir. Bu robot 2011 yılında Uluslararası Uzay İstasyonuna gönderilmiştir ve böylece uzaya çıkan ilk insansı robot olmuştur [8]. Robonaut 2 Şekil 1.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 1.3 :** Robonaut 2, uzaya çıkan ilk insansı robot [8].

Son yıllarda Avrupa Birliği de insansı robot projelerine destek vermektedir. Bu desteklerden biriyle RobotCub adıyla bir konsorsiyum oluşturulmuştur. Bu konsorsiyum üç buçuk yaşında olan bir insanın boyutlarına sahip Şekil 1.4'te gösterilen iCub adında bir insansı robot geliştirmiştir.



**Şekil 1.4 :** Üçbuçuk yaşında bir insan boyutlarına sahip iCub [9].

Bahsedilen çalışmalar insansı robot tarihinde önemli yer tutan gelişmelerdir. Dünyada bu gelişmeler yaşanırken, Türkiye’de yapılan ilk insansı robot çalışması Sabancı Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir. SURALP isimli Şekil 1.5’te görülen robotun çalışmaları 2002 yılında başlamış ve 2010 yılında proje sonuçlanmıştır.



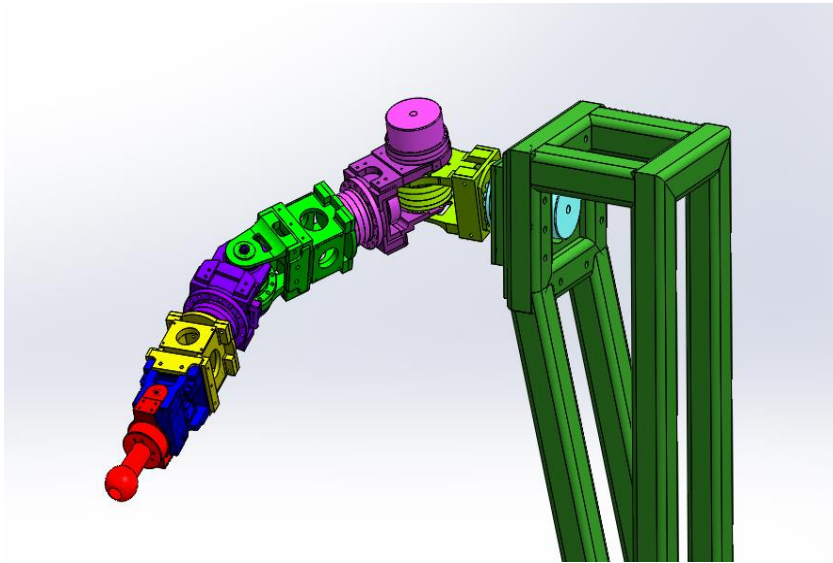
**Şekil 1.5 :** “SURALP”, Türkiye’de geliştirilen ilk insansı robot [10].

İTÜ Makina fakültesi bünyesinde yapılan ilk insansı robot çalışması Yar. Doç. Dr. Zeki Yağız Bayraktaroğlu liderliğinde 2008-2010 yılları arasında yürütülmüştür. Şekil 1.6’da görülen çalışma sonucu iki ayak kullanarak yürüme kabiliyetine sahip olması hedeflenen iki ayaklı bir robot tasarlanmış ve imal edilmiştir.



**Şekil 1.6 :** Dr. Zeki Yağız Bayraktaroğlu liderliğinde geliştirilen robot [11].

İTÜ Makina Fakültesi Otomatik Kontrol Laboratuvarı bünyesinde yürütülen robotik çalışmalarından biri de Prof. Dr. Şeniz Ertuğrul tarafından yürütülen ITech isimli insansı robot çalışmasıdır. Bu çalışma kapsamında Mak. Yük. Müh İlkey Meşeli “İnsansı Robot Kolu Ön Tasarımı Ve Analizi” adında bir yüksek lisans tezi yayınlamıştır. Bu tez kapsamında Şekil 1.7’de görülen kol tasarlanmıştır.



**Şekil 1.7 :** İlkey Meşeli tarafından tasarlanan altı serbestlik dereceli robot kolu [12].

Tarafımdan yazılan, insansı robot gövdesi tasarımı hakkında olan bu tez de, Prof. Dr. Şeniz Ertruğrul tarafından yürütölen ITech projesi kapsamındağır.

### 1.2.2 Yapay omurgaya sahip robotlar

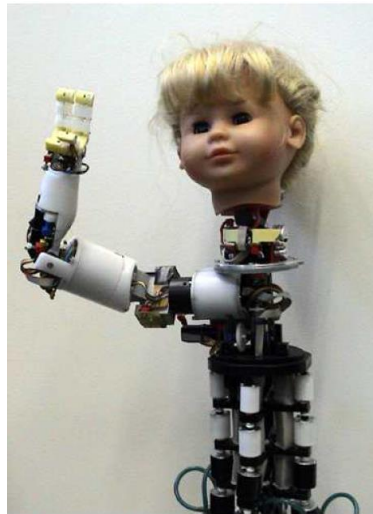
Literatür özetinde şimdiye kadar iki ayak kullanarak yürüme kabiliyetine, kol ve bacağı andıran uzuvlara ve robotun elektronik aksamını ve üst yapısını taşıyan bir gövdeye sahip geleneksel insansı robotlardan bahsedildi. Bu robotlarda geleneksel mekanik çözümler kullanılarak, açık seri bir kinematik zincir oluşturacak şekilde her serbestlik derecesi eksenini için bir eyleyici felsefesi takip edilmiştir.

Düşük serbestlik dereceleri ve seri açık kinematik zincirler kullanarak robotların kontrolünü göreceli olarak kolay bir şekilde gerçekleştirmek mümkündür. Ancak bu yöntemle geliştirilen robotlar süreksiz, akıcı olmayan ve dolayısı ile insana benzemeyen bir biçimde hareket etmektedir.

Son yıllarda bazı araştırmacılar sürekli ve insansı hareket kabiliyetine sahip robotlar geliştirmişlerdir. Bu robotlarda insan kas ve iskelet yapısına benzer tasarımlar kullanılmıştır, bu bölümde bahsedilen robotlar incelenecektir.

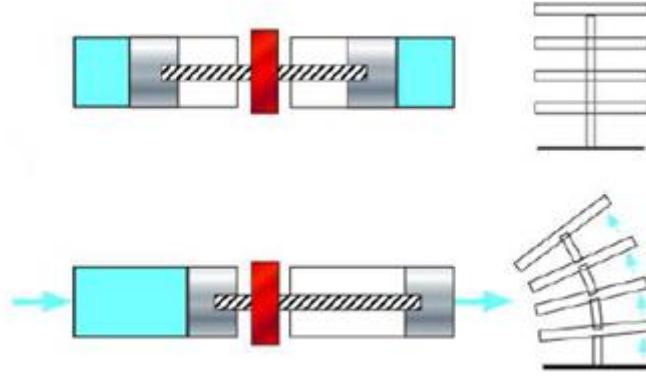
#### 1.2.2.1 Robota

İnsansı robot Robota projesi kapsamında Şekil 1.8 ve Şekil 1.10’da görölen 3 serbestlik derecesine sahip yapay bir omurga geliştirilmiştir. İnsan gövdesinin öne ve yana eğilme kabiliyetini akıcı bir biçimde taklit etmeye çalışan ekip, bu şartı sağlayan bir prototip üretmiştir.



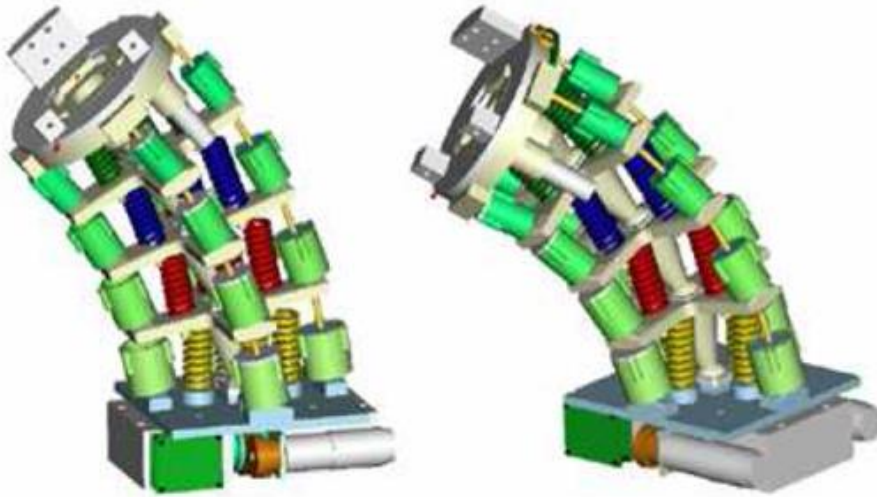
**Şekil 1.8 :** Yapay bir omurgaya sahip olan Robota isimli robot [2].

Robota'nın omurgasında her omur bir sonraki omura küresel mafsal ile bağlanmıştır. Eyleyici olarak hidrolik piston kullanan sistem, hidrolik sıvının omurlardan geçmesine izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Hidrolik pompa omurganın altına yerleştirilmiştir. Şekil 1.9'da görülebileceği gibi pistonlara sıvı basılması ile omurga hareketini gerçekleştirmektedir.



**Şekil 1.9 :** Robota'nın yapay omurgasının çalışma prensibi [2].

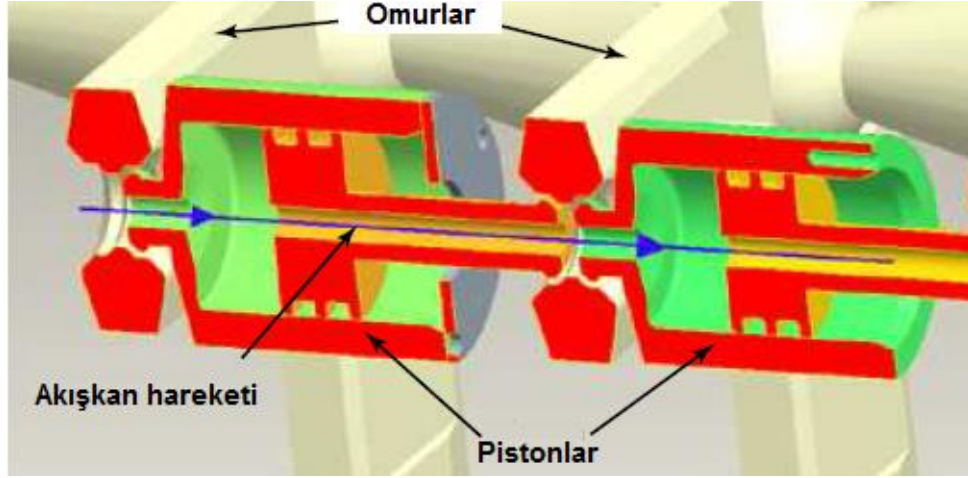
Hidrolik pistonlar her omur çifti arasında dört tane gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Ayrıca sistemin kararlı olması için her omur çifti arasında dörder yay eklenmiştir.



**Şekil 1.10 :** Omurga içinde yay ve pistonların dağılımı [2].

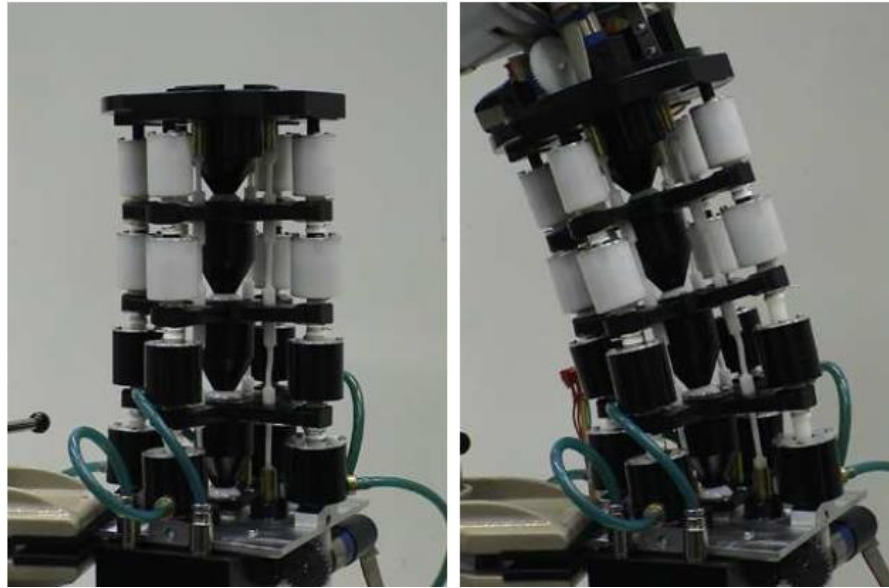
Şekil 1.11'de akışkan hareketi görülebilir. Akışkan pompadan basılarak kendi sırasında bulunan her pistondan ve omurdan geçerek hareket eder. Pistonlar basınca göre her omuru hareket ettirir. Artı şeklinde tasarlanan omurlarda, iki adet olan piston çiftleri biri basma biri çekme şeklinde çalışır. Çalıştırılan piston çiftine göre omurga

sağa-sola ya da öne arkaya eğilme hareketi yapar. Piston çapları farklı olduğu için her omurun hareketi bir öncekinden farklı olur. Sonuç olarak insansı bir eğilme hareketi ortaya çıkar.



**Şekil 1.11 :** Akışkanın omurlardan ve pistonlardan geçen hareketi [2].

Şekil 1.12’de görülen prototip yaklaşık 200 mm uzunluğunda ve 90 mm çapındadır. Yaklaşık 1 kg ağırlığındadır ve 2kg’lık bir yükü taşıyacak kapasitededir.



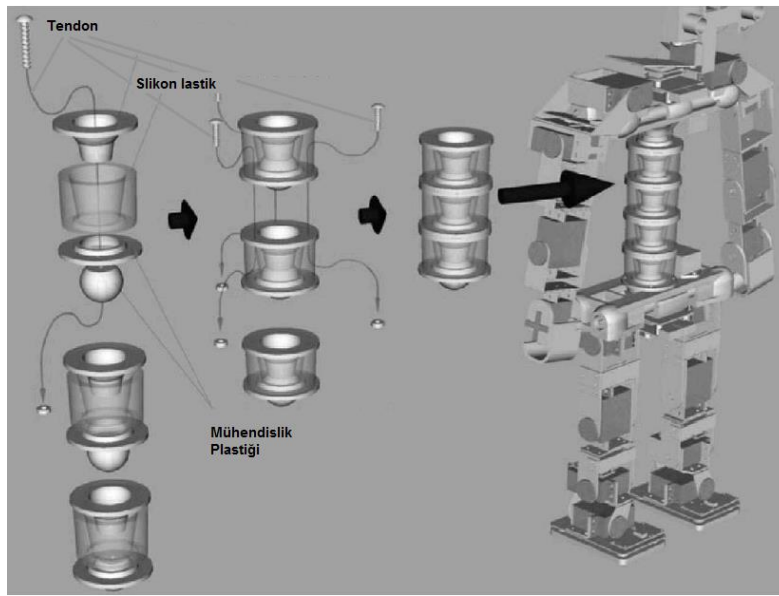
**Şekil 1.12 :** Robota’nın prototip omurgası [2].

Robota sürekli bir hareket elde edebilmesine rağmen sadece yana ve öne eğilme hareketlerini gerçekleştirebilmektedir. Omuzları hareket ettiren 3. Serbestlik derecesi ayrı bir motor kullanılarak geleneksel bir yolla elde edilmiştir [2].

### 1.2.2.2 CLA

Tokyo Üniversitesi bünyesinde geliştirilen CLA insansı bir yapay omurga kullanan ilk robottur. Lastik omurlar kullanılan yapı elastik özellik göstermektedir.

Omurga hareketini tendon modülleri sayesinde yapar. Tendon modülleri tellerden oluşur. Tellerin sarılı olduğu makaraların motorlar yardımı ile döndürülmesi ile ilgili tendon gerilerek ilgili omuru hareket ettirir ve omurga şekil değiştirir. Her omur küre ve yuva mafsalı ile bir sonraki omura bağlanmıştır. Mafsal yapısı 3 serbestlik derecesine sahiptir. Toplam 5 mafsala sahip yapının toplam serbestlik derecesi 15'tir [13]. Şekil 1.13'te CLA robotunun omurga yapısı görülebilir.

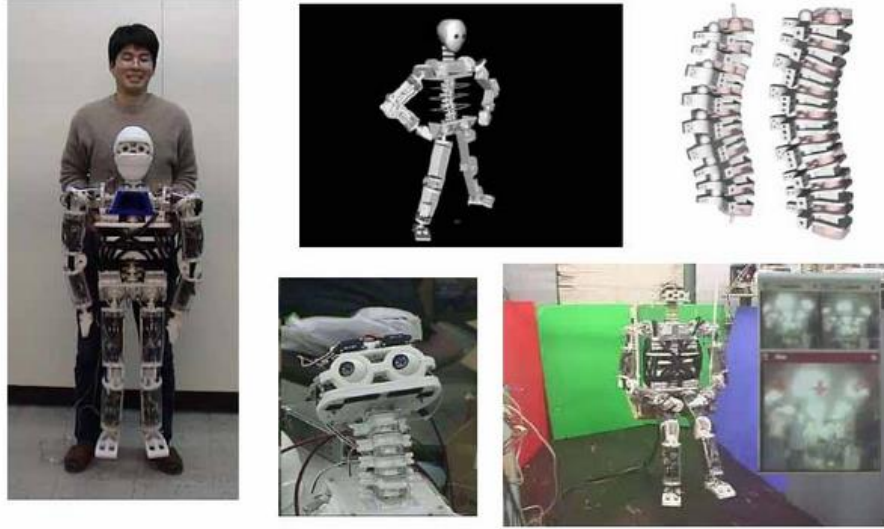


Şekil 1.13 : CLA robotunun omurga yapısı [13].

### 1.2.2.3 Kenta, Kotaro, Kojiro, Kenzoh ve Kenshiro

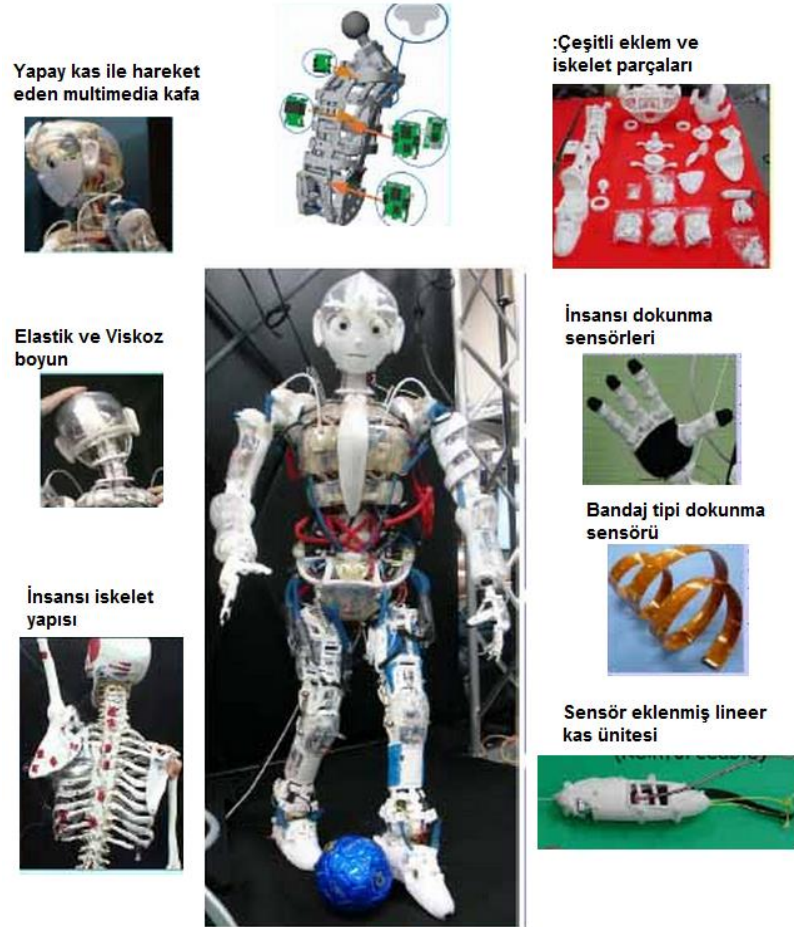
Tokyo Üniversitesi Jouhou System Kougaku laboratuvarı (JSK) bünyesinde geliştirilen Kenta, Kotaro, Kojiro, Kenzoh ve Kenshiro isimli robotlar Musculo-Skeletal (kas-iskelet) sistemlerle oluşturulmuş insansı robotlardır. JSK, insansı hareket elde edebilmek için insan anatomisine benzer kas, eklem ve iskelet sistemleri geliştirerek robotiğin bu alanına öncülük etmektedir. Her geliştirdikleri robotla birlikte robotikte yapay kas ve iskelet sistemlerinin kullanımına yenilik getirmişlerdir. 2000'li yılların başında Şekil 1.14'te gösterilen Kenta ile başlayan araştırmalar günümüzde Şekil 1.19'da gösterilen Kenshiro ile devam etmektedir.

Kotaro ile birlikte insan iskelet sisteminin bir çok özelliği yapay olarak sağlanmıştır.



**Şekil 1.14 :** JSK'nın ilk yapay kas-iskelet sistemli insansı robotu Kenta [14].

Kotaro'da insansı dokunma sensörleri, eklemler ve kas sistemleri mevcuttur. Boyutlarda insana Kenta'dan daha çok yaklaşmıştır. Kotaro Şekil 1.15'te gösterilmiştir.



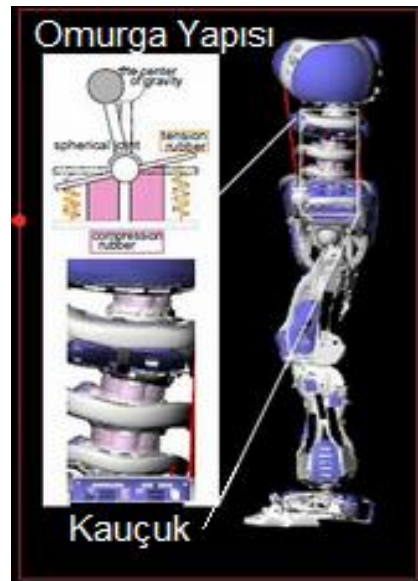
**Şekil 1.15 :** Kotaro'nun özellikleri [14].

Şekil 1.16’da gösterilen Kojiro 109 kas modülü ile 82 serbestlik dereceli, 140 cm boyunda sadece 45 kilo ağırlığında olan bir robottur [4]. Kenta ve Kotaro’nun geliştirilmesi ile meydana gelmiştir. Özellikle hafiflik anlamında ileri bir tasarımıdır.



Şekil 1.16 : Kojiro [14].

JSK’nın tüm robotları gibi Şekil 1.17’de gösterilen Kojiro’da yapay bir omurgaya sahiptir. Yapay omurga insansı hareket için büyük bir önem taşımaktadır.



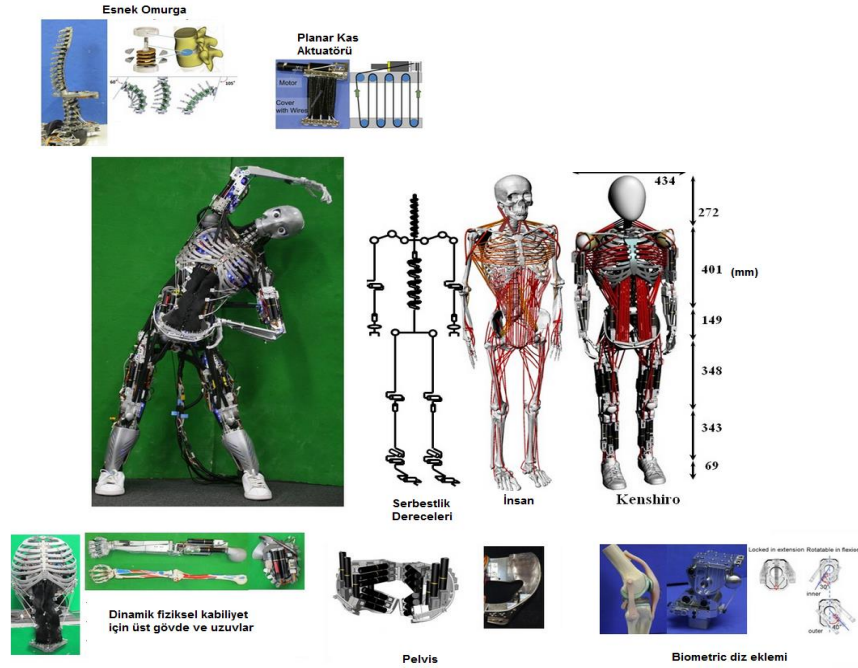
Şekil 1.17 : Kojiro’nun yapay omurga yapısı [14].

Kojiro oldukça insansı hareket kabiliyetine sahiptir. Hafif bir tasarım olmasına rağmen ekstra yüklü olma durumunda bile Şekil 1.18’de görülebileceği gibi esnek bir şekilde hareket edebilmektedir [4].



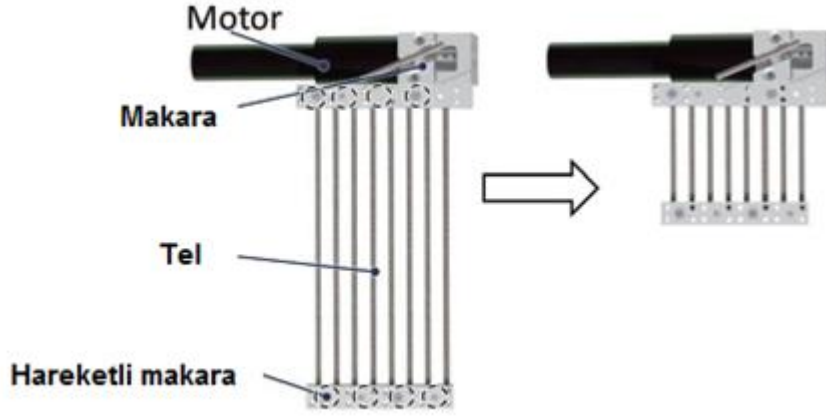
Şekil 1.18 : Kojiro’nun hareket kabiliyeti [14].

Şekil 1.19’da gösterilen Kenshiro 158 cm boyunda 55 kg ağırlığındadır. Kenshiro ile birlikte JSK yeni bir yapay kas sistemi geliştirmiştir. Kenshiro ile birlikte insan anatomisi büyük ölçüde taklit edilmiştir. Belli başlı özellikleri, esnek omurga, biometrik eklemler, hafiflik, yüksek serbestlik derecesi ve kararlılıktır.



Şekil 1.19 : Kenshiro’nun özellikleri [14].

Yeni yapay kas sistemi Planar kas ismi verilen hareketli, sabit makaralar ve tellerden oluşan bir yapıdır. Şekil 1.20’de gösterilen Planar kas eyleyicinin teli ana makaraya dolmasıyla çalışır. Gerilen tel birçok hareketli makaradan geçerek bağlı olduğu yeri çeker [4].



**Şekil 1.20 :** Planar kas sistemi [14].

Omurga uygulamasında planar kasın hareketli makaraları Şekil 1.21’de gösterildiği gibi farklı omurlara bağlanır. Tek eyleyiciden gerilen tel dinamik şartlara bağlı olarak hareketli makaraları çeker. Bu şekilde omurga oldukça insansı ve esnek bir biçimde şekil değiştirir.

Omurga yüklenme durumuna göre oldukça kompleks bir davranış gösterebilir. Birden fazla omurun hareketinin bir tendon grubuna bağlı olması insan anatomisinin bir özelliğidir. Kenshiro ile birlikte sadece yapısal/iskelet anlamında değil kas-iskelet ilişkisi bağlamında da insana oldukça yaklaşılmıştır [14].



**Şekil 1.21 :** Planar kasın omurgaya bağlanması [14].

#### 1.2.2.4 ECCE 1

Avrupa birliği tarafından finanse edilen ECCEROBOT (Embodied Cognition in a Compliantly Engineered Robot) projesi kapsamında geliştirilen Şekil 1.22’de gösterilen ECCE 1 robotu yapay kaslar ve esnek omurga kullanan bir başka insansı robottur. Telli yapılardan oluşan yapay tendonlar kullanarak hareketini sağlamaktadır.



Şekil 1.22 : İnsansı robot ECCE 1[15].

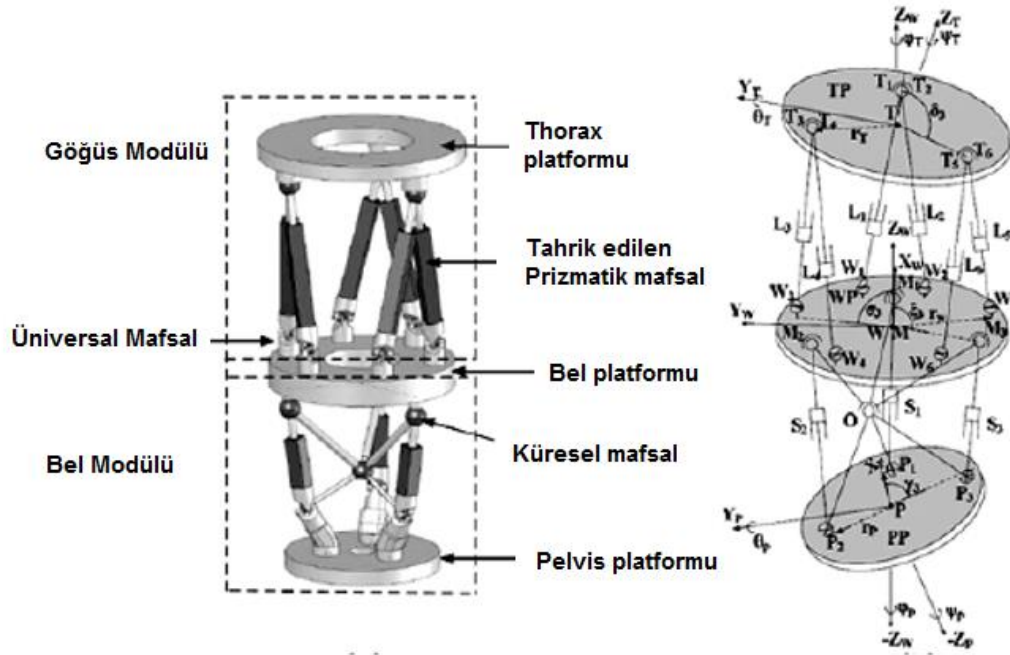
Şekil 1.23’te görülebileceği gibi ECCE 1 robotunda kaslar birden fazla mafsallı hareket ettirir. Böylece mafsalların serbestlik dereceleri birbirine bağlanmış olur. Geleneksel çözümlerde alışık olunmayan bu durum, insan anatomisinde oldukça yaygındır. Bu yüzden geleneksel insansı robotlara göre ECCE 1 robotu çok daha akıcı ve insansı hareketler gerçekleştirebilmektedir [15].



Şekil 1.23 : ECCE 1’in esnek omurgası [15].

### 1.2.2.5 Liang ve Ceccarelli gövde çalışması

Conghui Liang ve Marco Ceccarelli isimli iki araştırmacı sadece gövde tasarımına odaklanarak konsept kinematik bir gövde tasarlamışlardır. Şekil 1.24’de gösterildiği gibi geliştirdikleri sistemde 2 paralel mekanizmanın art arda çalıştırılmasını önermişlerdir. Pelvis (kalça) düzleminde Thorax (göğüs) düzlemine kadar olan insanın gövde kısmını 3 platforma ayıran ikili, paralel mekanizmaların düzlemlerini bu platformlara oturtmuştur. 2 paralel mekanizma Göğüs ve Bel olmak üzere 2 modül oluşturmaktadır. Göğüs modülü 6 serbestlik dereceli bir Steaward platformudur. Bel modülü 3 serbestlik dereceli bir başka paralel mekanizmadır [16]. Paralel mekanizmaların yüksek serbestlik derecesine sahip olmaları avantajını kullanarak insana benzer hareket elde etmek amaçlanmıştır.

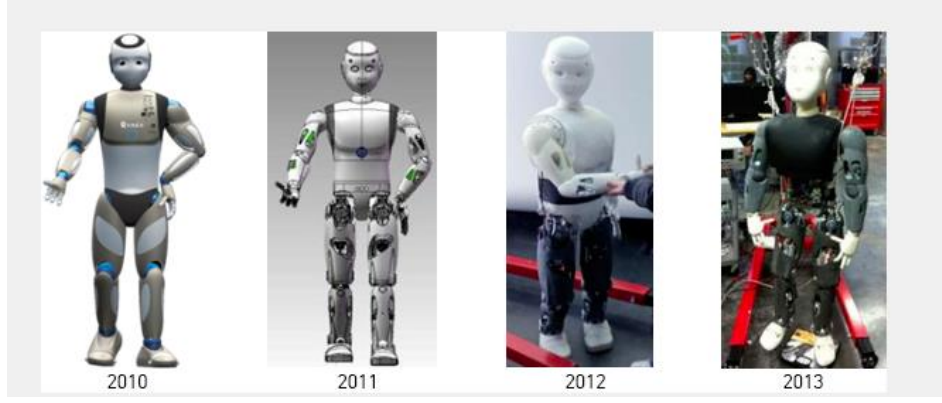


Şekil 1.24 : Göğüs ve Bel modülünden oluşan gövde sistemi [16].

### 1.2.2.6 Romeo

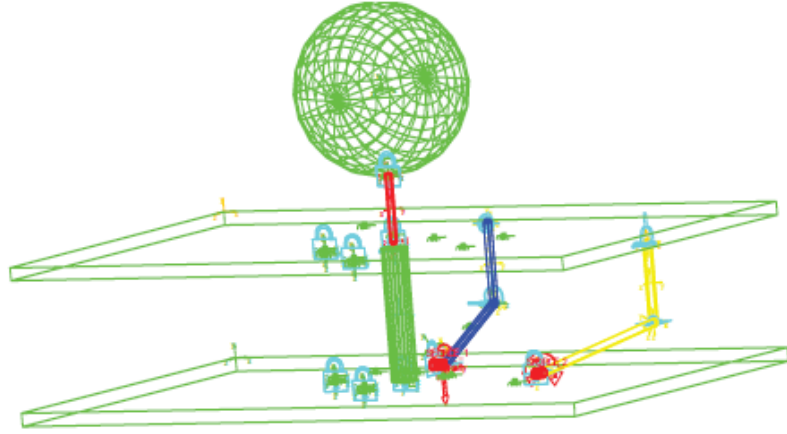
Fransız ALDEBARAN firması tarafından desteklenen Romeo projesi kapsamında Şekil 1.25’te görülen insansı robot çalışmaları yapılmıştır.

Romeo’nun gövdesinde yine bir yapay omurga uygulaması kullanılmıştır. Şekil 1.26’da bir tek omur için kullanılan paralel mekanizma yapısı görülmektedir.



**Şekil 1.25 :** Romeo'nun gelişme adımları [17].

Yapı iki serbestlik derecesine sahiptir [17].



**Şekil 1.26 :** Romeo'nun omurgasında kullanılan paralel mekanizma [17].



## **2. YAPAY OMURGA TASARIMI**

Sürekli ve insansı harekete izin verecek gövde tasarımında, yapılan literatür araştırmasında da görüleceği gibi yapay bir omurganın olması gerekmektedir.

Yapay omurganın tasarımı için önce insan anatomisi incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucu, insan omurgasının basitleştirilmiş bir modeli çıkarılmıştır. Bu model, omurganın çeşitli düzlemlere bölünerek ve birçok omurdan ve diskten oluşan yapısını bu düzlemlere indirerek yapay bir şekilde taklit edilmesine olanak vermiştir.

Daha sonra basitleştirilmiş modelin nasıl konstrüktif olarak şekillendirileceği üstünde çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu çeşitli ön tasarımlar elde edilmiştir. Ön tasarımlardan birinin en iyi çözüm olacağı düşünülerek seçilmiş ve CAD çizimleri yapılmıştır. Yapılan ilk CAD modelinde SOLIDWORKS programı kullanılarak hareket incelenmiş ve insansı hareketin sağlanabileceği görülmüştür. Benzetimler kullanılarak konum-hız-ivme profilleri incelenmiştir. İnceleme sonucu tasarımın iyileştirilebileceği görülmüş ve tasarımda bazı değişikliklere gidilmiştir.

Nihai tasarım tekrar benzetimler kullanılarak dinamik olarak incelenmiş ve bu inceleme sonuçlarına göre sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak yapının dayanıklılığı benzetimler sonucu araştırılmıştır.

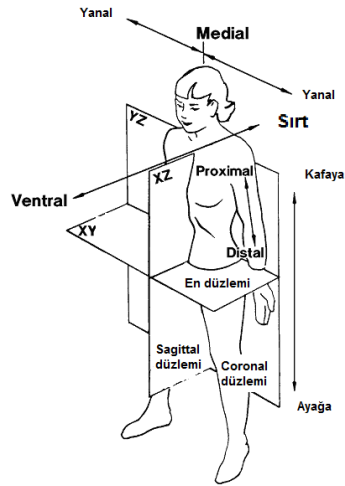
### **2.1 İnsanın Anatomik Özellikleri**

İnsansı harekete müsaade edecek bir tasarım yapılmadan önce insan anatomisi incelenmelidir. ASIMO gibi geleneksel insansı robotlar sadece son efektörlerin uzayda yaptıkları hareketleri insana benzetmeye çalışırken, ara elemanların vb. nasıl bir şekil alarak harekete izin verdiklerini es geçmektedir. Bunun sonucu olarak robotun gövdesi, eklem görevi gören mafsalları ve uzuvları insansı olmaktan oldukça uzak bir şekilde hareket etmektedir.

Bu durumun önüne geçmek için insanın çeşitli anatomik özellikleri incelenecektir.

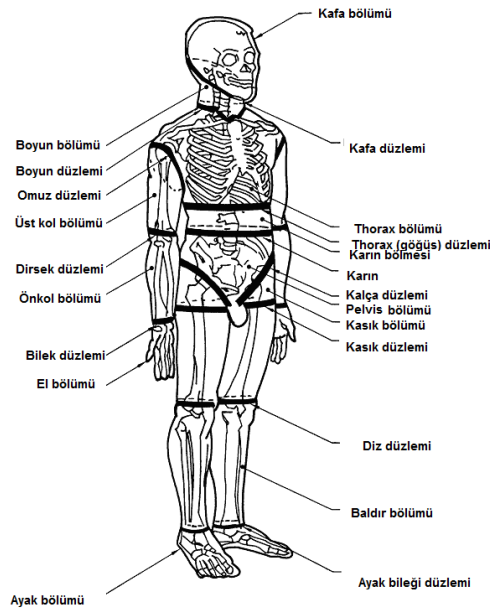
### 2.1.1 Vücut bölümleri ve uzunlukları

Öncelikle vücudun oryantasyonu, bölümleri, vücut parçalarının uzunlukları, bu parçaların yerden yükseklikleri ve uzunlukları araştırılacaktır. Bu bölümde bulunan şekil ve çizelgelerde bahsedilen özellikler verilmiştir. Şekil 2.1 insan oryantasyonu ve ana hareket düzlemlerini göstermektedir.



Şekil 2.1 : İnsan oryantasyonu ve ana düzlemler [18].

Şekil 2.2’de vücudu temsil eden ana düzlemler daha detaylı olarak gösterilmiştir. Vücudun kinematik olarak bir modele indirgenmesi sırasında bu düzlemler, eklem özellikleri ile birlikte büyük önem taşıyacaktır.



Şekil 2.2 : İnsan vücudunun bölümleri ve temsili düzlemler [18].

Çizelge 2.1’de vücut parçalarının uzunlukları ve yerden yükseklikleri, ayakta durma ve oturma pozisyonu için verilmiştir. Değerler ortalama boya sahip bir erkek ve kadın içindir.

**Çizelge 2.1 : Vücut parçalarının uzunlukları ve yerden yükseklikleri [18].**

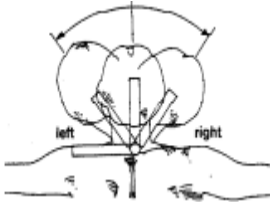
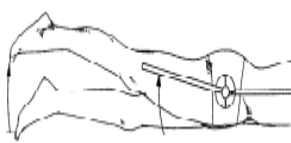
| Vücut bölümleri                       | Erkek    | Kadın    |
|---------------------------------------|----------|----------|
| Boy uzunluğu                          | 175 (cm) | 165 (cm) |
| Göz yüksekliği                        | 164      | 154      |
| Kol yüksekliği                        | 144      | 134      |
| Dirsek yüksekliği                     | 108      | 103      |
| Diz yüksekliği                        | 51       | 49       |
| El menzili genişliği                  | 186      | 165      |
| Uzatılmış el-kol uzunluğu             | 86       | 71       |
| Bükülmüş ön kol uzunluğu              | 48       | 43       |
| Kol genişliği                         | 46       | 40       |
| Göğüs uzunluğu                        | 23       | 25       |
| Kalça genişliği                       | 32       | 34       |
| Oturma pozisyonunda vücut yüksekliği  | 90       | 84       |
| Oturma pozisyonunda göz yüksekliği    | 79       | 73       |
| Oturma pozisyonunda kol yüksekliği    | 60       | 54       |
| Oturma pozisyonunda dirsek yüksekliği | 23       | 21,5     |
| Sırt diz mesafesi                     | 61       | 56       |
| Alt bacak uzunluğu                    | 48       | 46       |
| Diz arkası kirişinin yüksekliği       | 45       | 43       |
| Otururken bacak yüksekliği            | 13       | 14       |
| Ayak uzunluğu                         | 27       | 25       |
| Ayak genişliği                        | 10       | 9        |
| El uzunluğu                           | 19       | 17,5     |
| El genişliği                          | 9,5      | 8        |

### 2.1.2 İnsan eklemlerinin özellikleri

Eklemlerin serbestlik dereceleri ve hareket menzilleri insan vücudunun hareket kabiliyetini belirleyen en önemli unsurlardan biridir. İnsanda 244 adet serbestlik derecesi mevcuttur. Bu serbestlik derecesi yaklaşık 700 kas ile motorize edilir [19]. Vücutta dirsek gibi tek serbestlik dereceli eklemlerden, kalça ve omuz gibi 3 serbestlik

dereceli eklemlere birçok farklı yapıda mafsal görevi gören yapılar bulunur. İnsan vücudunun hareket menzilini bu eklemlerin limitleri belirler. Çizelge 2.2’de insan vücudunda bulunan çeşitli eklem gruplarının sebep olduğu hareket menzilleri verilmiştir.

**Çizelge 2.2 : İnsan eklemlerinin hareket menzilleri [20].**

| Vücut bölümleri, eklemler   | Şekil                                                                               | Açı                       |                           |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Sırt                        |    | Öne eğilme: 90°           | Arkaya gerilme: 25°       |
| Bel                         |   | Sola: 25°                 | Sağa: 25°                 |
| Boyun (öne arkaya)          |  | Arkaya: 60°               | Öne: 50°                  |
| Boyun (yana)                |  | Sola: 45°                 | Sağa: 45°                 |
| Boyun (dönme)               |  | Sola: 80°                 | Sağa: 80°                 |
| Kalça (arkaya doğru uzanma) |  | Sol bacakla birlikte: 30° | Sağ bacakla birlikte: 30° |

Kalça  
(yukarı  
doğru  
çekme)



Kırılmış dizle birlikte: 100°

Gergin dizle  
birlikte: 100°

Kalça yan  
(içe  
dönme)



Sol bacak için: 20°

Sağ bacak  
için: 20°

Kalça yan  
(dışa  
dönme)



Sol bacak için: 40°

Sağ bacak  
için: 40°

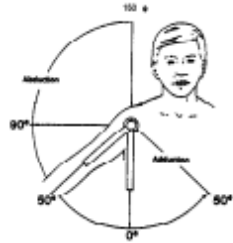
Diz



ol: 150°

Sağ: 150°

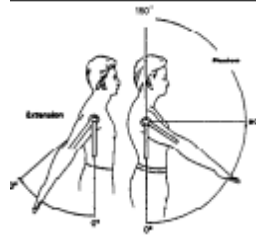
Omuz  
yana (içe-  
dışa açma)



Dışa: 150°

İçe: 150°

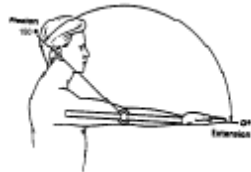
Omuz (öne  
arkaya)



Arkaya: 50°

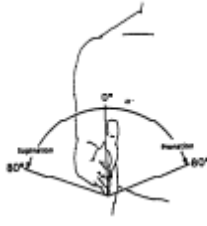
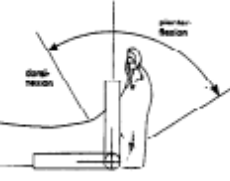
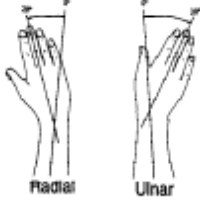
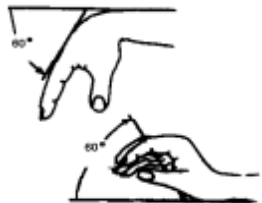
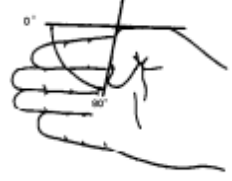
Öne: 150 °

Dirsek



Dışa: 0°

İçe: 150°

|                            |                                                                                     |            |             |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------|
| Önkol                      |    | Sola: 80°  | Sağa: 80°   |
| Ayak bileği (içe-dışa)     |    | İçe:30°    | Dışa: 20°   |
| Ayak bileği (yukarı-aşağı) |    | Yukarı:20° | Aşağı:40°   |
| Bilek                      |   | Dönme: 20° | Yanal: 30°  |
| Bilek (yukarı-aşağı)       |  | Aşağı:60°  | Yukarı: 60° |
| Başparmak iç eklem         |  | İçe: 60°   | Dışa: 0°    |
| Başparmak dış eklem        |  | İçe: 80°   | Dışa: 0°    |

Çizelge 2.2’de görüldüğü gibi insanda birçok serbestlik derecesi mevcuttur. Bu çalışmada, insansı bir robotun gövde tasarımı üstünde durulduğu için boyun, sırt, bel ve kalça eklemlerinin hareket menzilleri tasarım kriterleri olarak seçilmiştir.

### 2.1.3 Omurga özellikleri

İnsansı robot için yapılan bu gövde çalışmasında insanın boyun, sırt, bel ve kalça hareket kabiliyetine sahip bir yapı tasarlanacaktır. Bahsedilen eklemlerin hareket kabiliyeti, insan iskelet yapısının en kompleks bölümü olan omurganın özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu bölümde omurganın yapısı incelenecektir.

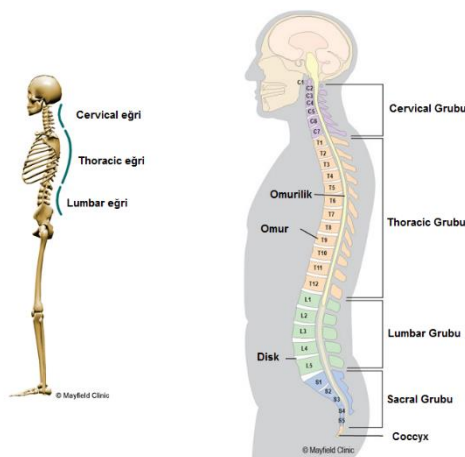
Kuyruk sokumundan kafatasına kadar uzanan omurga, insan vücudunun üst bölümünü taşıma, vücudun hareketi sırasında esneklik sağlama, duruşu destekleme ve sinir sisteminin çok önemli bir parçası olan omuriliği koruma gibi hayati görevlere sahiptir [21].

Omurga 5 ana gruba dağılan 26 kemikten oluşmaktadır. Sacrum ve coccyx kemikleri omurganın kalça istikametinin en sonunda bulunmaktadır. Omurlar bulundukları omurga bölgesinin ismine göre adlandırılırlar. Örnek olarak, cervical grubunda (boyun kısmı) bulunan 5. omura C5 ismi verilmiştir.

Omur yapısı işlevine göre farklı bölümlerden oluşur. Omurun ana kısmı ağırlık taşıyan bölümdür. Her omur içinden omuriliğin geçmesine müsaade edecek bir delik taşır [21]. Omurun daha detaylı özellikleri anatomi kitaplarında incelenebilir.

Omurlar arasında ince disk denilen bölümler bulunur. Diskler omurları birbirine bağlayacak kadar rijit ancak harekete izin verecek kadar da esnektir. Diskler omurların birbirine değerek aşındırmasını engeller ve darbe efektlerini sönümler [19].

Şekil 2.3'te gösterilen 5 ana omur grubu; cervical, thoracic, lumbar, sacral ve coccyx'tir [21].



Şekil 2.3 : Omurganın ana bölümleri. [22].

Cervical grubu: Bu grup, boyun bölümünde bulunan C1'den C7'ye kadar olan 7 omurdan oluşur. Bu omurlar omurgada bulunan en ince ve narin omurlardır. Bu grup boyuna yüksek esneklik özellikleri verir. C1 omuru kafatasını taşır ve omurganın ilk omurudur. Boyunun sahip olduğu 3 serbestlik derecesi bu grubun esnekliği sayesinde kaynaklanır [19].

Şekil 2.4'te cervical grubu görülebilir.



**Şekil 2.4 : Cervical Grubu [19].**

Thoracic grubu: Bu grup, göğüs bölümünde bulunan, T1'den T12'ye kadar olan 12 adet omurdan oluşur. Bu omurlar boyun omurlarından daha büyük ve mukavim olmakla beraber boyun kadar esnek bir yapı oluşturmazlar. Göğüs omurları hayati organları koruyan göğüs kafesini oluşturan kaburgaların omurgaya bağlanmasını sağlayan eklemlere sahiptir.

Şekil 2.5'te thoracic grubu görülebilir.



**Şekil 2.5 : Thoracic Grubu [19].**

Lumbar: Bu grup, bel bölümünde bulunan, L1'den L5'e kadar olan 5 adet omurdan oluşur. Bu gruptaki omurlar thoracic grubunda bulunan omurlara göre hem daha büyük ve mukavim, hem de daha esnektir. Bunun sebebi göğüs kafesinin lumbar grubuna bağlantısı olmamasıdır. İnsanın hareketleri esnasında üst gövdenin bütün yükü bu gruptaki omurlara biner. Bu bölüm, geniş ve mukavim omurlardan oluşmasına rağmen maruz kaldığı yüklerden ötürü insanda en çok ağrıya sebep olan ve erken hasara uğrayan bölümdür [19].

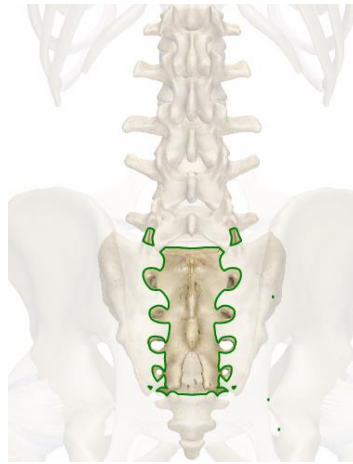
Şekil 2.6'da lumbar grubu görülebilir.



**Şekil 2.6 : Lumbar grubu [19].**

Sacral: Bu grup omur kategorisine girmeyen sacrum adı verilen tek bir kemikten oluşur. Bu kemik 5 küçük omurun kaynaşması ile meydana gelmiştir. Bu kemik düz üçgensel bir yapıdadır ve 2 kalça kemiğinin arasına doğru kıvrılmıştır. Hareket kabiliyeti sınırlıdır [19].

Şekil 2.7'de sacrum grubu görülebilir.



**Şekil 2.7 : Sacrum [19].**

Coccygeal: Bu grupta sadece coccyx ismi verilen bir adet kemikten oluşur. Coccyx 4 küçük omurun kaynaşmasıyla oluşmuştur. Kuyruk sokumu olarak ta bilinen bu grup kuyruklu hayvanların kuyruk kemiklerine benzer özellik göstermektedir. Oturma durumunda vücut ağırlığı bu gruba biner. Hareket kabiliyeti sınırlıdır [19].

Şekil 2.8’de coccygeal grubu görülebilir.



Şekil 2.8 : Coccyx [19].

## 2.2 Basitleştirilmiş Omurga Modeli

Önceki bölümde insan gövdesinin ve omurgasının ana bölümlerinden bahsedildi. Bu bölümde omurganın, hareket kabiliyetini yitirmeden basitleştirilmesi yapılacaktır.

Basitleştirme için çeşitli varsayımlar yapılmıştır. Sacrum ve coccyx’ın hareketlerinin kısıtlı olması sebebi ile omurganın sadece cervical, thoracic ve lumbar grupları üzerinde durulacaktır. Omurganın esnek hareket kabiliyetine bu üç grubun yapısı sebep olmaktadır.

Şekil 2.9’da gösterildiği gibi modelde bu üç grubun başlangıç ve bitiş yerlerine düzlemler yerleştirilmiştir. Omurganın bütün hareketi bu düzlemler üstüne indirgenecektir.

D düzlemi sacral grubunun başlangıcı, lumbar grubunun bitişidir. Bu düzlem yapay omurganın en alt bölümünü oluşturacaktır. Diğer bütün düzlemler bu düzleme göre hareket edecektir.

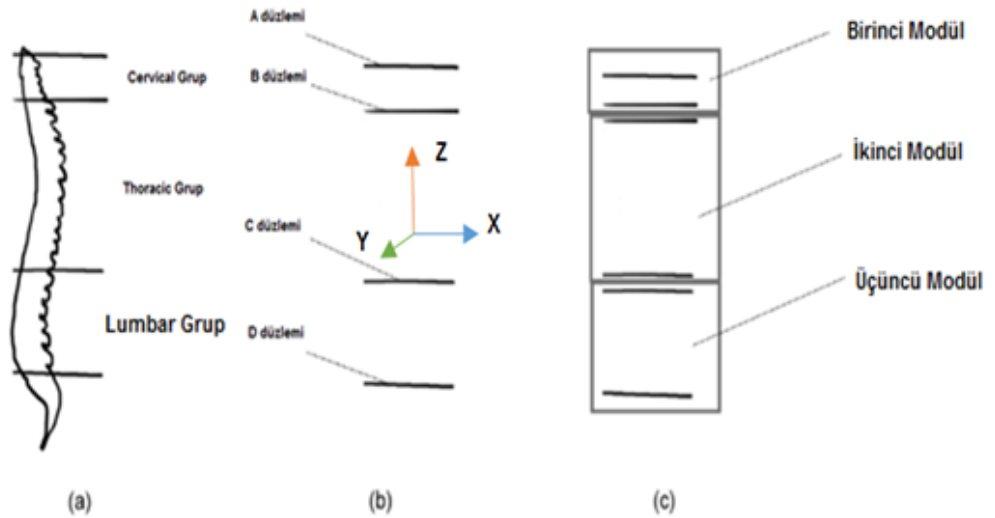
C düzlemi lumbar grubunun başlangıcı, thoracic grubunun bitişidir. Yapay omurgada insanın bel hareketleri bu düzlemin hareketleri olarak yaratılacaktır.

B düzlemi thoracic grubunun başlangıcı, cervical grubunun bitişidir. İnsanın sırt hareketleri bu düzleme indirgenecektir.

A düzlemi cervical grubunun başlangıcıdır. İnsan boynunun 3 serbestlik derecesi bu düzlem üstüne kurulacaktır.

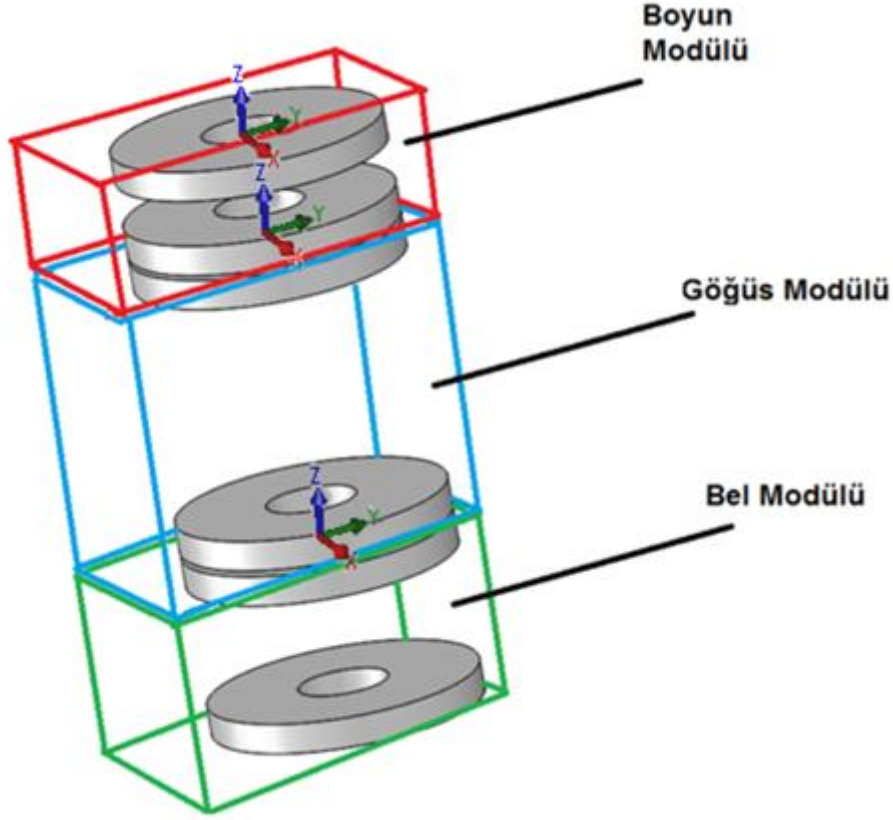
İnsan omurgasının hareketi göz önüne alındığında bütün düzlemlerin X ve Y yönünde lineer hareketinin kısıtlı olması gerektiği öngörülmüştür. İndirgeme sonucu omurların Z yönünde birbirlerine yaklaşması (disklerin şekil değiştirmesi ile birlikte) modelde kaybolduğu için düzlemlerin Z yönünde lineer hareketinin, bu davranışı yakalayabilmek için gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. C,B ve A düzlemlerinin ise X ve Y eksenleri etrafında dönebilmesi gerekmektedir. Z yönünde dönmenin modüler olarak değil, yapay omurganın tümünün ayrı bir eyleyici ile tahrik edilerek sağlanması gerektiği düşünülmüştür.

Bahsedilen düzlemlerden yola çıkarak 3 adet modül önerilmiştir. Şekil 2.9'da omurga grupları, indirgenmiş düzlemler ve modüller görülmektedir.



**Şekil 2.9 :** (a) Omur grupları, (b) İndirgenmiş düzlemler, (c) Modüller.

Birinci modül boyunu, ikinci göğsü ve son modül beli temsil etmektedir. Bu modüller SOLIDWORKS ortamında oluşturulmuş ve yukarıda bahsedilen kriterlere göre birbirleri ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 2.10'da modüllerin oryantasyonu görülmektedir.



**Şekil 2.10 :** Omurgayı temsil eden 3 modül.

Bu üç modülün birleştirilmesi ile yapay omurga oluşturulacaktır.

### 2.3 Tasarım Çalışmaları

Bu bölümde, bir önceki bölümde tanımlanan omurga modelini gerçekleyebilecek sistemin tasarımı üstünde durulmuştur. Tasarım çalışmaları, tez kapsamında en uzun süren faaliyet olmuştur. Tasarım faaliyetinde, heuristik zihinsel çalışmanın yanı sıra metodik düşünme yolları da izlenmiştir. Nihai tasarım bu iki yöntem sonucu ortaya çıkmıştır. Şekil 2.11’de tasarım faaliyetleri sırasında oluşturulan bir örnek çalışma sayfası gösterilmiştir.

Tasarım çalışmaları sırasında geleneksel mekanik çözümlerin yanında yeni bir yaklaşımın gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu sebeple yeni bir paralel mekanizma tasarlanmıştır. Nihai tasarımda, tasarlanan paralel mekanizma modüler olarak birbirine eklenerek omurga formu oluşturulmuştur.



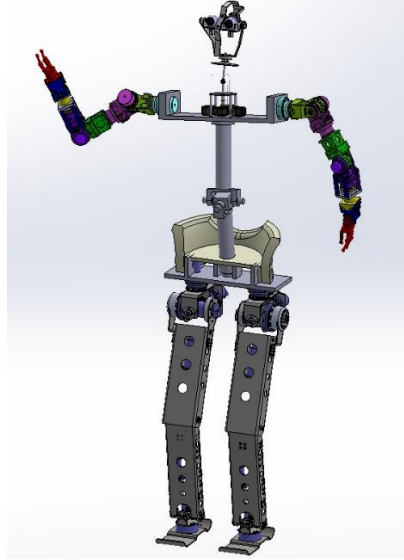
**Şekil 2.11 :** Tasarım faaliyeti sırasında oluşturulan örnek bir çalışma sayfası.

### 2.3.1 Tek kardan mafsallı omurga

İlk tasarım İTÜ Makina Fakültesi Otomatik Kontrol Laboratuvarı bünyesinde yapılan bir başka çalışmadan esinlenerek oluşturulmuştur. Yar. Doç. Dr. Pınar Boyraz'ın danışmanlığında Mak. Müh. Mehmet Akif Ceylan tarafından mekanik tasarımı yapılan boyun yapısı [23] incelenmiş ve geliştirilerek yapay omurga için uygulanmıştır. Ceylan tarafından yapılan çalışmada 2 paralel düzlem araya bir yay konularak ve yayın içinden bir kardan mili geçirilerek oluşturulmuştur. Mekanizma tahrikini alt düzlemde bulunan motorlara sarılı tellerin üst düzlemin çeşitli noktalarına bağlanarak bu düzlemi hareket ettirmesi ile almaktadır.

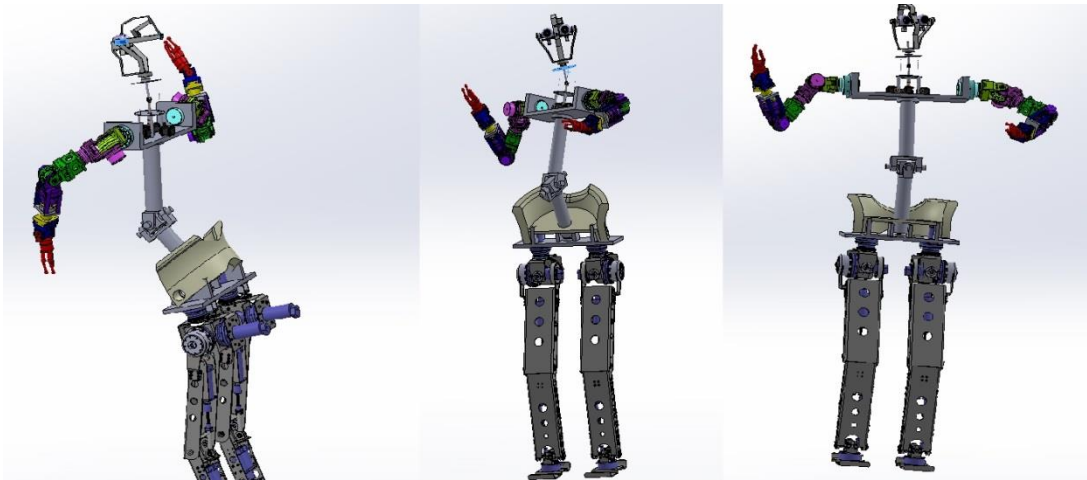
Bu tezin de danışmanı olan Prof. Dr. Şeniz Ertuğrul tarafından yürütülen iTech insansı robot projesi kapsamında omurga tasarımına ek olarak kalça ve omuz modülleri tasarlanmış ve Yar. Doç. Dr. Zeki Yağız Bayraktaroğlu tarafından geliştirilen bacak kısmıyla [11] birleştirilmiştir. Boyun ve kafa için Yar. Doç. Dr. Pınar Boyraz'ın danışmanlığında bahsi geçen tasarım omurganın sonuna eklenmiştir. Son olarak Yük.

Mak. Müh. İlkey Meşeli tarafından yine iTech projesi kapsamında geliştirilen 6 serbestlik dereceli insansı robot kol [12] kullanılarak SOLIDWORKS programında insansı robot montaj edilmiştir. Şekil 2.12’de iTech insansı robotunun ilk tasarım evresi görülmektedir.



**Şekil 2.12 :** İnsansı robot “iTech”.

Gövde, bir önceki bölümde anlatılan basitleştirilmiş omurga modeline bire bir uymamakla beraber iteratif tasarım sürecinin ilk adımını oluşturması bakımından önemlidir. Bu tasarımda, gövde X,Y ve Z yönünde dönmeye sahip 3 serbestlik dereceli bir yapıdır. X ve Y yönünde dönme omuz hizasına bağlı çelik tellerin kalçada bulunan motorlarla gerilmesi ile sağlanmaktadır. Z yönünde dönme gövdeyi oluşturan milin kalçadan motor yardımı ile tahrik edilmesiyle sağlanmaktadır. Robotun hareket kabiliyeti Şekil 2.13’te görülmektedir.



**Şekil 2.13 :** iTech’in gövde hareketleri.

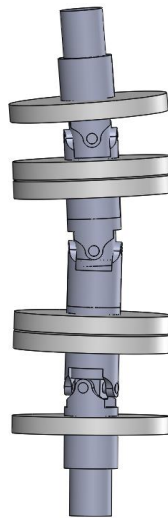
Yapılan bu tasarım, geliştirilen omurga modeline uymadığı ve yük altında davranışının istenen performansı vermeyeceği düşünülerek geliştirilmemiştir, ancak bir sonraki tasarım bu aşamanın üstüne inşa edildiğinden ve yapılan kol, bacak, kafa ve gövde tasarımlarının bir araya getirildiği ilk çalışma olmasından dolayı tez kapsamında yapılan çalışmaların temelini oluşturmaktadır.

### 2.3.2 İlk modüler tasarım

İkinci tasarım, 2.3.1’de geliştirilen tasarımın, 2.2’de oluşturulan omurga modeline uyarlanmasıyla elde edilmiştir. Basitleştirilmiş omurga modelinde bulunan düzlemler göz önüne alınarak bel, göğüs ve boyun omurları oluşturulmuştur. Bu omurlar bir birlerine göre X ve Y yönünde dönme yapmaya izin verecek şekilde kardan (universal) mafsalları kullanılarak bir mil aracılığı ile bağlanmıştır. Z yönünde dönme bütün diskler için ortaktır. Bu yöndeki dönme, milin ayrı bir motor yardımı ile tahrik edilmesi yolu ile elde edilecektir. Kardan mafsalı 2 serbestlik derecesi içermektedir. Yapıda 3 kardan mafsalı 6 serbestlik derecesi sağlamaktadır. Omurların X ve Y yönündeki dönme hareketleri teller yardımı ile gerçekleştirilecektir.

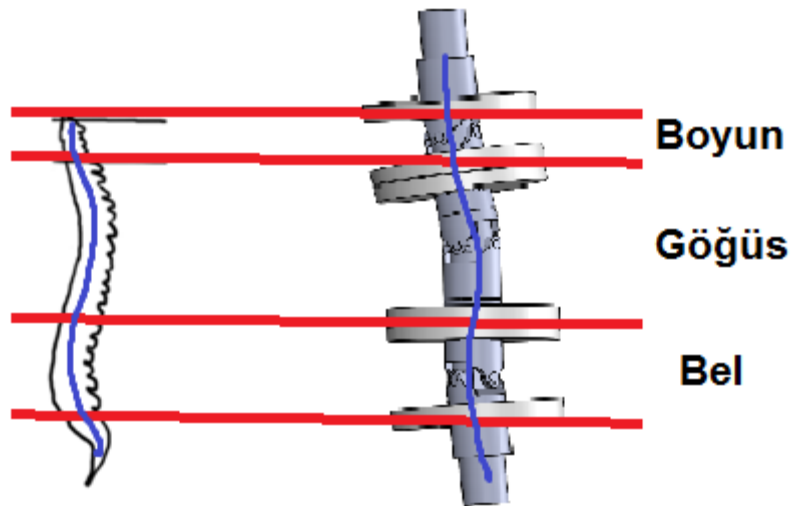
Yapının serbestlik derecesi omurların çoğaltılması ile modüler olarak arttırılmaya müsaittir. Ayrıca omurlar üstüne inşa edilecek yan yapılar yardımı ile bütün insansı robotun operasyonları için gerekli elektronik aksamın yerleştirilmesi mümkündür.

Şekil 2.14’de SOLIDWORKS programı kullanılarak oluşturulan ve montajı yapılan tasarım görülmektedir.



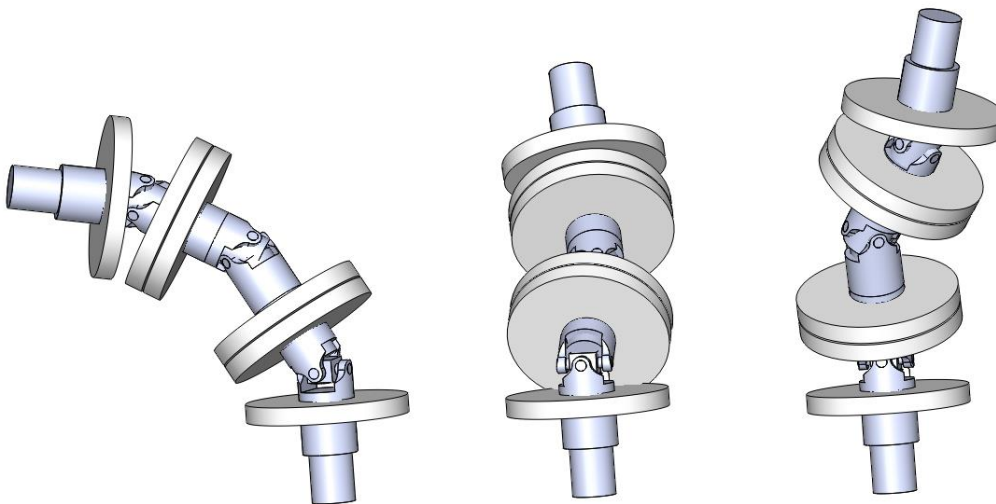
Şekil 2.14 : Bel, göğüs ve boyun modüllerinden oluşan yapay omurga.

Şekil 2.15’te sol tarafta insan omurgasının dik durma pozisyonunda aldığı şekli, sağ tarafta ise geliştirilen tasarımın aldığı şekil görülmektedir.



**Şekil 2.15 :** Dik pozisyonunda omurganınve YO'nun aldığı şekil.

Tasarlanan yapı Şekil 2.16’da görüldüğü gibi geleneksel insansı robot uygulamalarında kullanılan gövde çözümlerine nazaran çok daha insansı hareketler yapmaya müsaittir.



**Şekil 2.16 :** Geliştirilen yapının çeşitli hareketleri.

Şekilde görülen hareketler omurlara SOLIDWORKS motion analysis eklentisi kullanılarak kuvvetler uygulanması yoluyla elde edilmiştir.

Elde edilen hareketler istenene yakın olmakla birlikte mekanizma tahrikini dışarıdan almaktadır. Ayrıca tellerle gerdirme yolu izlendiğinden her omur arasına konulacak yaylarla birlikte dinamik analizin çözümünün güç olacağı, dolayısı ile kontrol safhasına geçildiği zaman bu durumun zorluklara yol açacağı öngörülmüştür. Bu yüzden tasarım daha fazla geliştirilmemiş ve ara bir adım olarak bırakılmıştır.

### **2.3.3 Paralel mekanizmalı modüler tasarım**

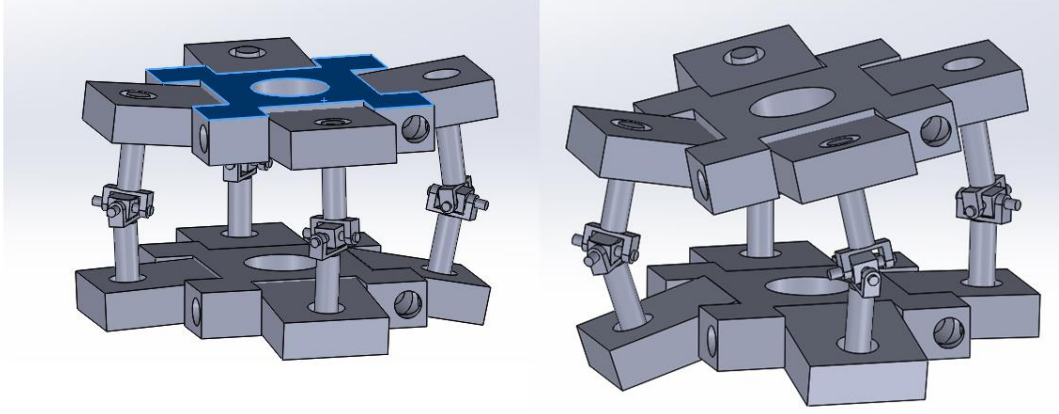
Paralel mekanizmalar yüksek serbestlik derecelerine sahip kapalı kinematik zincirlerdir. Seri kinematik zincirlere kıyasla birçok avantajları vardır. Bunlar, daha kararlı olma, düşük atalet momentleri ihtiva etme ve daha yüksek dayanıma sahip olma olarak özetlenebilir [24].

Hem istenen insansı, sürekli harekete izin verip hem de, tezin giriş kısmında da belirlenen kriterlerde açıklandığı gibi, yapının tahriki sağlayan motorlardan yardım almadan her hangi bir pozisyonda durumunu koruyabilme ve robotun diğer parçalarını taşıma görevini gösterecek mukavemete sahip olma özelliklerine sahip bir yapının ancak paralel mekanizmalar kullanarak oluşturulabileceği öngörülmüştür. Paralel mekanizmaların yukarıda belirtilen özellikleri sayesinde istenen tasarım kriterlerine ulaşmak mümkün olacaktır.

Bu bağlamda, basitleştirilmiş omurga modelinde önerilen modüllerin paralel mekanizmalardan oluşması gerektiğine karar verilmiştir. Ancak literatürde bulunan PM'ler bütün tasarım şartlarını sağlayamamaktadır. Bu yüzden tez kapsamında, yapay omurganın modülü olarak kullanılmak üzere yeni bir paralel mekanizma geliştirilmiştir.

Geliştirilecek PM'de lineer eyleyici kullanılmamasına ve vida mekanizması gibi dönme hareketini lineer harekete dönüştüren, serbest halde konumunu koruyacak elemanlar kullanılması uygun bulunmuştur.

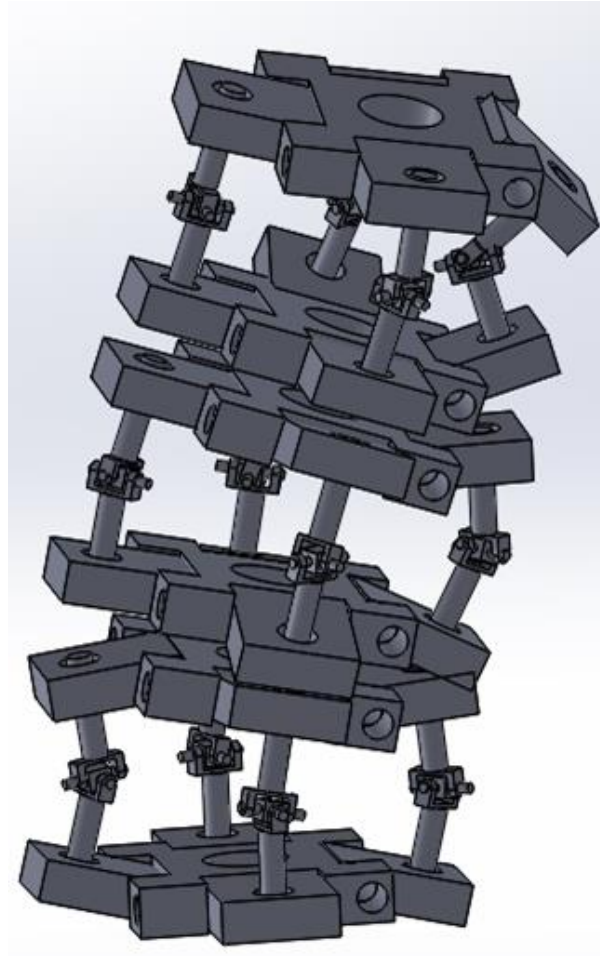
Yapılan çalışmalar sonucu yukarıda belirtilen şartları yerine getirecek bir PM tasarlanmıştır. Şekil 2.17'de tasarlanan yapı görülmektedir.



**Şekil 2.17 :** Tasarlanan yeni paralel mekanizma.

Geliştirilen PM'nin BOM'da önerilen modüler olarak kullanılması ile yapay omurga yapısı oluşturulmuştur.

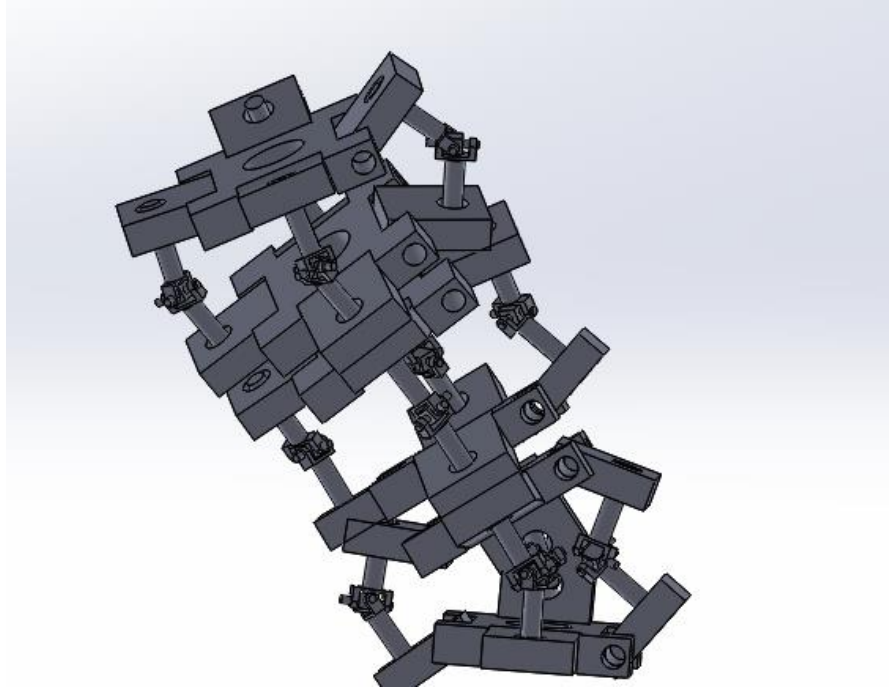
Şekil 2.18'de PM'lerin arka arkaya eklenmesiyle oluşan yapı gözükmemektedir.



**Şekil 2.18 :** Geliştirilen PM'lerden oluşan yapay omurga yapısı.

PM modüllerinin birleştirilmesi ile elde edilen YO SOLIDWORKS programının motion analysis eklentisi kullanılarak mafsallara tork uygulanmak suretiyle hareket ettirilmiştir.

Şekil 2.19’da YO’nun hareket kabiliyeti görülmektedir.

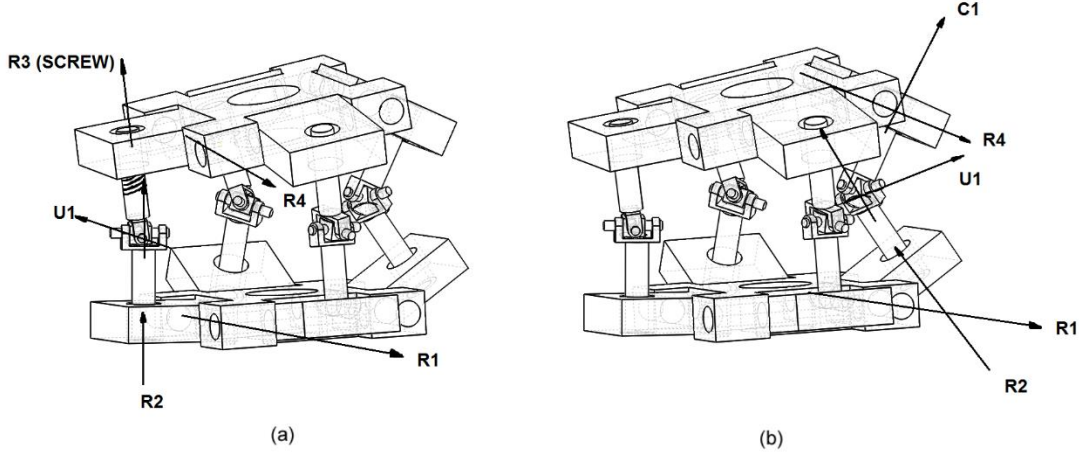


**Şekil 2.19 :** YO’nun hareket kabiliyeti.

BOM’nin oluşturulduğu bölümde istenilen serbestlik dereceleri belirlenmişti. Şimdi tasarlanan PM’nın serbestlik derecesi incelenecektir.

Aşağıdaki şekilde mafsalların mekanizma üzerinde dağılımı görülmektedir. Şekilde, R tek yönde dönme (Rotation), C tek yönde dönme ve lineer deplasman (Cylindrical) ve U iki serbestlik dereceli üniversal (Kardan) mafsal anlamına gelmektedir. Mekanizmada iki adet vida mekanizması da kullanılmıştır ancak vida mekanizmaları tek serbestlik derecesine sahip oldukları için ayrı bir sembolle gösterilmemişlerdir. Vida mekanizması şekilde R3 olarak gösterilmiştir. Şekil 2.20’de gösterilem tasarlanan yapı asimetrik bir paralel mekanizmadır.

Yapıda 4 adet uzuv bulunmaktadır, ancak mafsal yerleşimi 2 çift için farklıdır. Böyle PM’ler asimetrik paralel mekanizmalar olarak adlandırılırlar. Yukarıdaki şekilde 2 farklı dağılım görülmektedir.



**Şekil 2.20 :** (a) RRURR çiftinin (b) RRUCR çiftinin mafsalları.

F tasarlanan paralel mekanizmanın toplam serbestlik derecesi,  $n$  bağımsız rijit kabul edilen parçaların sayısı,  $f_i$  her bir mafsallın kendi serbestlik derecesi ve  $F_{id}$  mekanizmada bulunan “idle” (hareketi mekanizmanın pozisyonunu etkilemeyen serbestlikler) hareketler olmak üzere, Grübler formülü **(2.1)** kullanılarak mekanizmanın toplam serbestlik derecesi belirlenebilir.

Grübler formülü **(2.1)** aşağıda görülmektedir.

$$F = 6(n - 1) - \sum_i^i (6 - f_i) - F_{id} \quad (2.1)$$

Tasarlanan asimetrik paralel mekanizmada toplam on sekiz adet bağımsız rijit kabul edilen parça vardır. Mafsalların toplam sayısı ve Grübler formülünün 2.teriminin hesaplanması Çizelge 2.3’te gösterilmiştir. Hareketi mekanizmanın pozisyonunu etkileyemeyen serbestliklerin toplamı üçtür.

Çizelge 2.3’te mafsalları ve Grübler formülünün 2. teriminin hesaplanması görülmektedir.

**Çizelge 2.3 :** Mafsalları ve serbestlik dereceleri.

| Mafsalları Tipi | Mafsalları Sayısı | Serbestlik Derecesi | (M.S) x (6- SD) |
|-----------------|-------------------|---------------------|-----------------|
| U               | 4                 | 2                   | 16              |
| R               | 12                | 1                   | 60              |
| C               | 2                 | 2                   | 8               |
| R3(Vida)        | 2                 | 1                   | 10              |
| Toplam          |                   |                     | 94              |

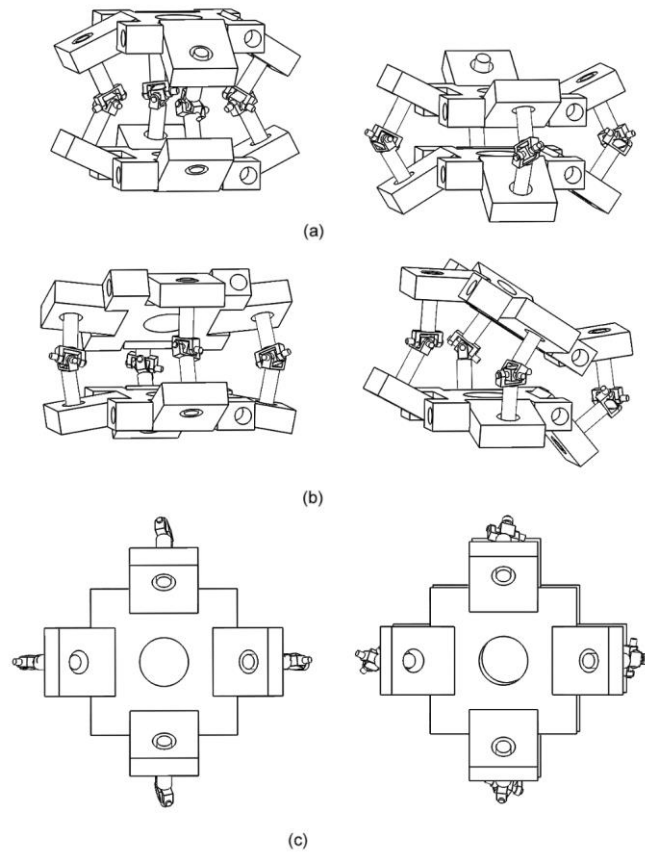
Bulunan değerler (2.1) 'de yerine konulursa mekanizmanın serbestlik derecesi bulunabilir. Aşağıdaki denklemde (2.2) görüleceği gibi bu hesaplamanın sonucunda serbestlik derecesi 5 çıkmıştır.

$$F = 6 * (18 - 1) - 94 - 3 = 5. \quad (2.2)$$

Mekanizmanın sahip olduğu beş serbestlik derecesi şunlardır; X ve Y yönlerinde dönme ve X,Y,Z yönlerinde lineer deplasman.

şekil 2.21'de, bahsi geçen 5 serbestlik derecesinin SOLIDWORKS programının motion analysis eklentisi kullanarak, millere tork uygulamak suretiyle elde edilmesi gösterilmiştir..

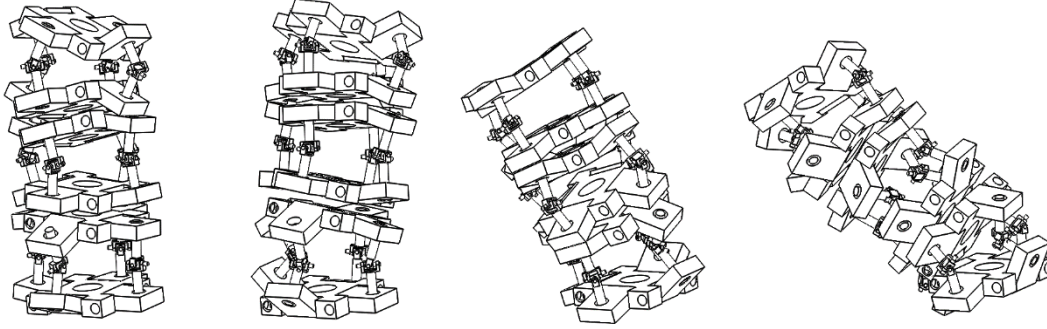
şekilde 2.21'de; (a) Z yönünde deplasman, (b) X ve Y eksenleri etrafında dönme, (c) X ve Y yönünde lineer deplasman hareketleridir.



**şekil 2.21 :** PM'nin serbestlik derecelerinin benzetim ortamında gösterilmesi.

Yine SOLIDWORKS programının motion analysis eklentisi kullanılarak paralel mekanizmaların modül olarak arka arkaya eklenmesiyle oluşan YO yapısı, millere tork uygulanma suretiyle hareket ettirilmiştir.

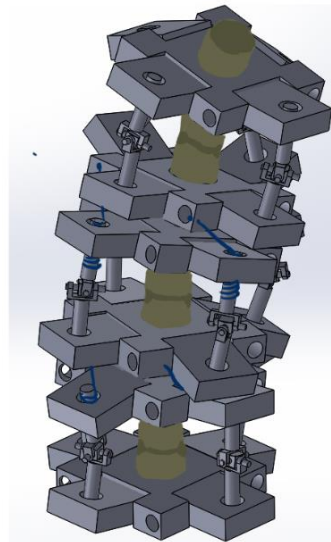
Şekil 2.22’de YO yapısının çeşitli hareketleri görülmektedir.



**Şekil 2.22 :** Yapay omurganın hareket benzetimleri.

Hareket analizi esnasında her paralel mekanizmanın alt ve üst modülü arasına yay ve sönüm elemanı benzetim ortamında konulmuştur. Hareketler bu kapsamda elde edilmiştir.

Şekil 2.23’te ayrı ayrı yaylar yerine elastik bir elemanın modüller arasından geçirilerek modüllerin bütünleşik bir yapıda birbirlerine bağlanması fikri gözükmemektedir.



**Şekil 2.23 :** Modüllerin birbirine elastik bir eleman aracılığı ile bağlanması.

Yapılan tasarım incelendiğinde, belirlenen tasarım kriterlerinin sağlandığı halde hala olgun bir sonuca ulaşamadığı düşünülmüştür. Bu yorumun sebebi; yapının çok sayıda parçadan oluşması, YO formunda millere motorların bağlanacak yer kalmaması gibi konstrüktif nedenlerdir.

Bu yüzden yapılan tasarım iyileştirilecek ve nihai çözüm bu iyileştirilmenin sonucunda elde edilecektir.

#### **2.3.4 Nihai tasarım: geliştirilmiş paralel mekanizmalı modüler yapı**

Bir önceki tasarım çalışmasında paralel mekanizma kullanımının faydaları açıklanmış ve tasarım kriterlerine göre bir yapı tasarlanmıştır. Ancak tasarlanan yapının konstrüktif olgunlukta olmadığı düşünülmüştür.

Yapının geliştirilmesi için, ilk önce parça sayısının azaltılarak aynı kriterleri yerine getirecek şekilde bir iyileştirme yapılması gerektiği öngörülmüştür.

İkinci geliştirme olarak yapının serbestlik derecesinin düşürülmesine karar verilmiştir. Bunun sebebi; yapılan kinematik analizler sırasında yapının yüksek serbestlik derecesinin bazı sorunlar çıkarması ve toplam motor gereksiniminin yüksek olmasıdır.

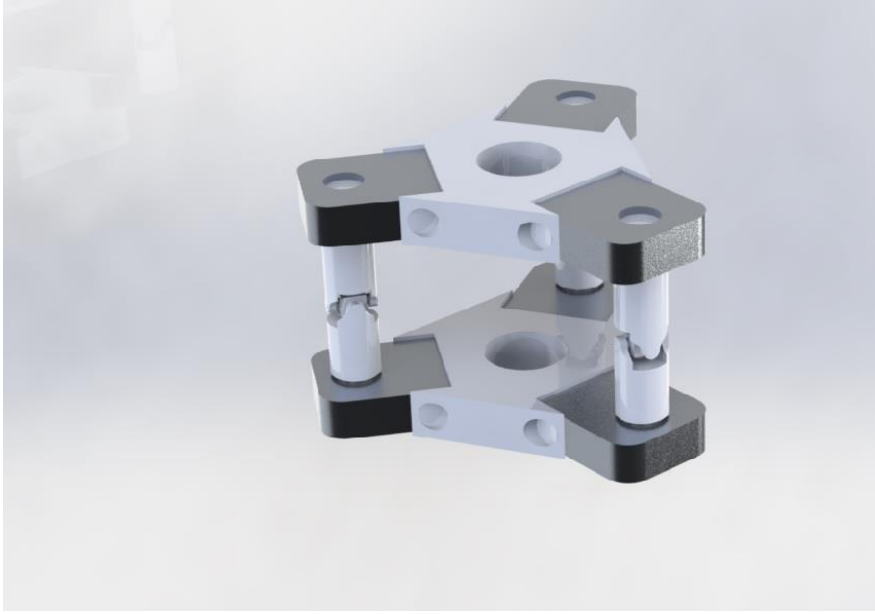
Her modül için 5 ayrı motor (her serbestlik derecesi için 1 motor) gereksinimi, yapay omurgada 3 modül kullanılacağı düşünülürse toplamda 15 motor kullanımına ihtiyaç doğuracaktır.

Yine kontrol uygulamaları düşünüldüğünde bu durum komplikasyonlara yol açacaktır.

Bu düşünceden hareketle, dört bacak yerine üç bacak kullanarak ve serbest silindirik mafsallar yerine bütün uzuvların üst düzlem bağlantılarını vida mafsallarına dönüştürerek tasarım bir adım iyileştirilmiştir.

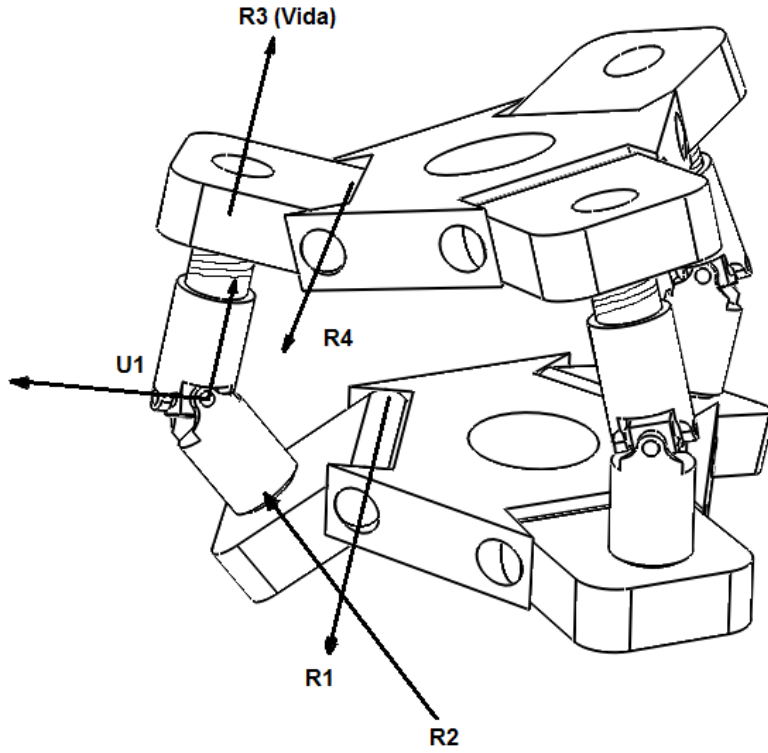
Şekil 2.24'te geliştirilmiş paralel mekanizma modülü gözükmemektedir. Bu değişiklik ile mevcut modül, simetrik bir paralel mekanizmaya dönüşmüştür.

Yapılan iyileştirme sonucu parça sayısı dörtte bir oranında azaltılmıştır. Yapılan bu iyileştirme ile birlikte kinematik zincir değiştiği için tekrar serbestlik derecesi analizi yapılacaktır.



**Şekil 2.24 :** Geliştirilmiş paralel mekanizma.

Şekil 2.25'te mafsalların geliştirilmiş mekanizma üzerinde dağılımı görülmektedir. Şekilde bulunan R,C ve U harfleri bir önceki kısımda açıklanmıştı.



**Şekil 2.25 :** Geliştirilmiş PM' için mafsal dağılımı.

Yapıda 3 adet uzuv bulunmaktadır. Mafsalların uzuvlara dağılımı aynı olduğu için şekilde tek uzuv gösterilmiştir.

Bir önceki kısımda olduğu gibi, Grübler formülü (2.1) kullanılarak mekanizmanın toplam serbestlik derecesi belirlenecektir.

Geliştirilen paralel mekanizmanın bağımsız rijit kabul edilen parça sayısı ondört düşmüştür. Yeni durumda mafsalların toplam sayısı ve Grübler formülünün 2. teriminin hesaplanması aşağıdaki tablodadır. Hareketi mekanizmanın pozisyonunu etkileyemeyen serbestliklerin toplamı üçtür.

Çizelge 2.4'te geliştirilmiş paralel mekanizma için mafsal sayıları ve Grübler formülünün 2. teriminin hesaplanması görülmektedir.

**Çizelge 2.4 :** Geliştirilmiş PM için mafsal sayıları ve serbestlik dereceleri.

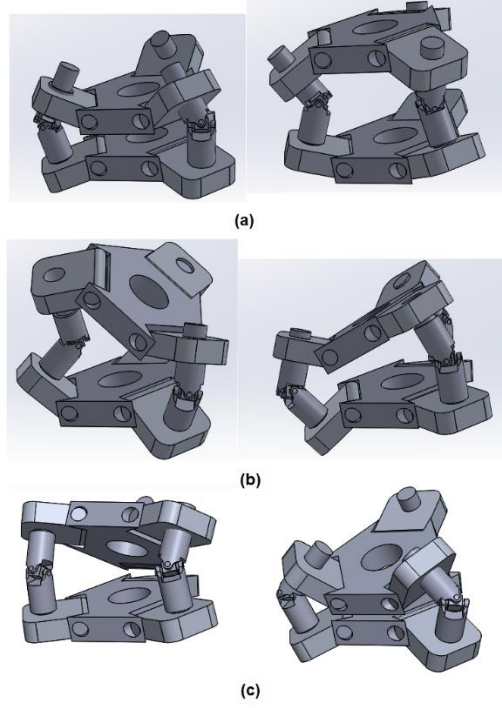
| Mafsal Tipi | Mafsal Sayısı | Serbestlik Derecesi | (M.S) x (6-SD) |
|-------------|---------------|---------------------|----------------|
| U           | 3             | 2                   | 12             |
| R           | 9             | 1                   | 45             |
| C           | 0             | 2                   | 0              |
| R3(Vida)    | 3             | 1                   | 9              |
| Toplam      |               |                     | 66             |

Bulunan değerler (2.1) 'de yerine konulduğunda serbestlik derecesi üç çıkmıştır.

Geliştirilmiş paralel mekanizmanın sahip olduğu üç serbestlik derecesi şunlardır; X ve Y yönlerinde dönme ve Z yönünde lineer deplasman.

Şekil 2.26'da, bahsi geçen 3 serbestlik derecesinin, SOLIDWORKS programının motion analysis eklentisi kullanarak, millere tork uygulamak suretiyle elde edilen hareketler gösterilmiştir.

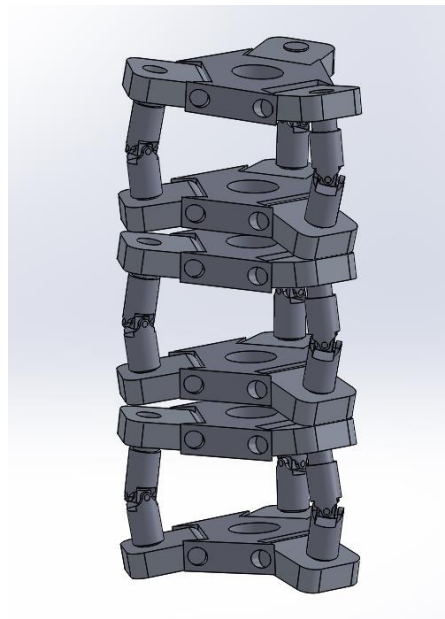
Şekil 2.26'da ;(a) Z yönünde deplasmanı, (b) X eksenini etrafında dönmeyi (yalpa), (c) Y eksenini etrafında dönmeyi (dalma) görülmektedir.



**Şekil 2.26 :** (a) Z yönünde doğrusal (b) yalpa (c) dalma hareketleri.

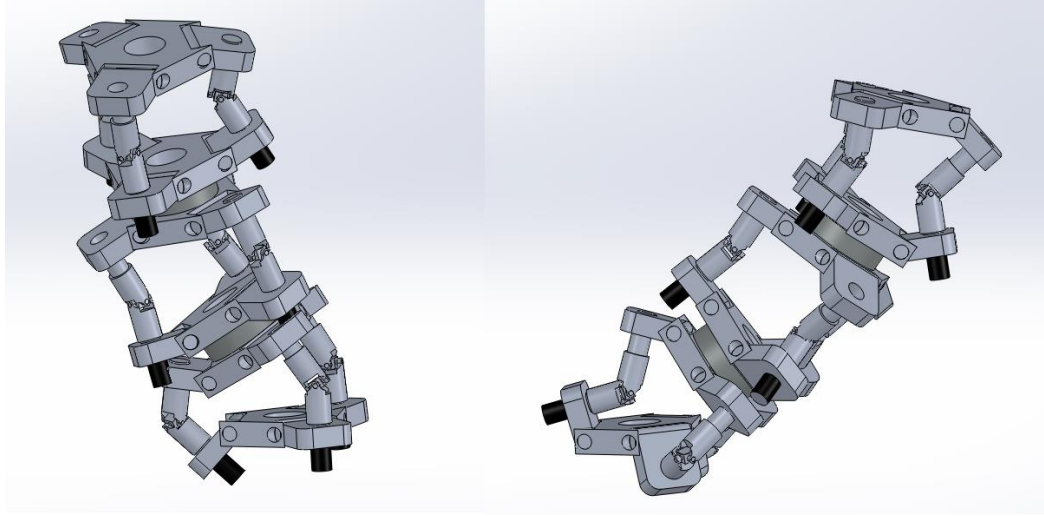
Geliştirilmiş paralel mekanizmaların arka arkaya montajlanması ile oluşan YO yapısı SOLIDWORKS programının motion analysis eklentisi kullanılarak millere tork uygulanma suretiyle hareket ettirilmiştir.

Şekil 2.27’de geliştirilmiş YO yapısının ilk hali ve yukarıda belirtilen yöntemle elde edilen çeşitli hareketleri görülmektedir.



**Şekil 2.27 :** Geliştirilmiş yapay omurganın ilk hali.

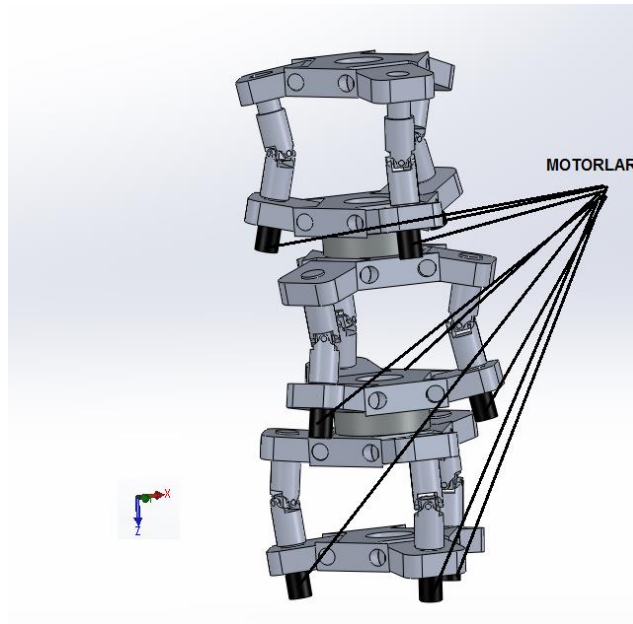
Şekil 2.28’de YO’nun uzayda gerçekleştirdiği çeşitli hareketler verilmiştir.



**Şekil 2.28 :** YO’nun uzayda yapabildiği çeşitli hareketler.

Hareket analizi esnasında her paralel mekanizmanın alt ve üst modülü arasına yay ve sönüm elemanı benzetim ortamında konulmuştur. Hareketler bu kapsamda elde edilmiştir.

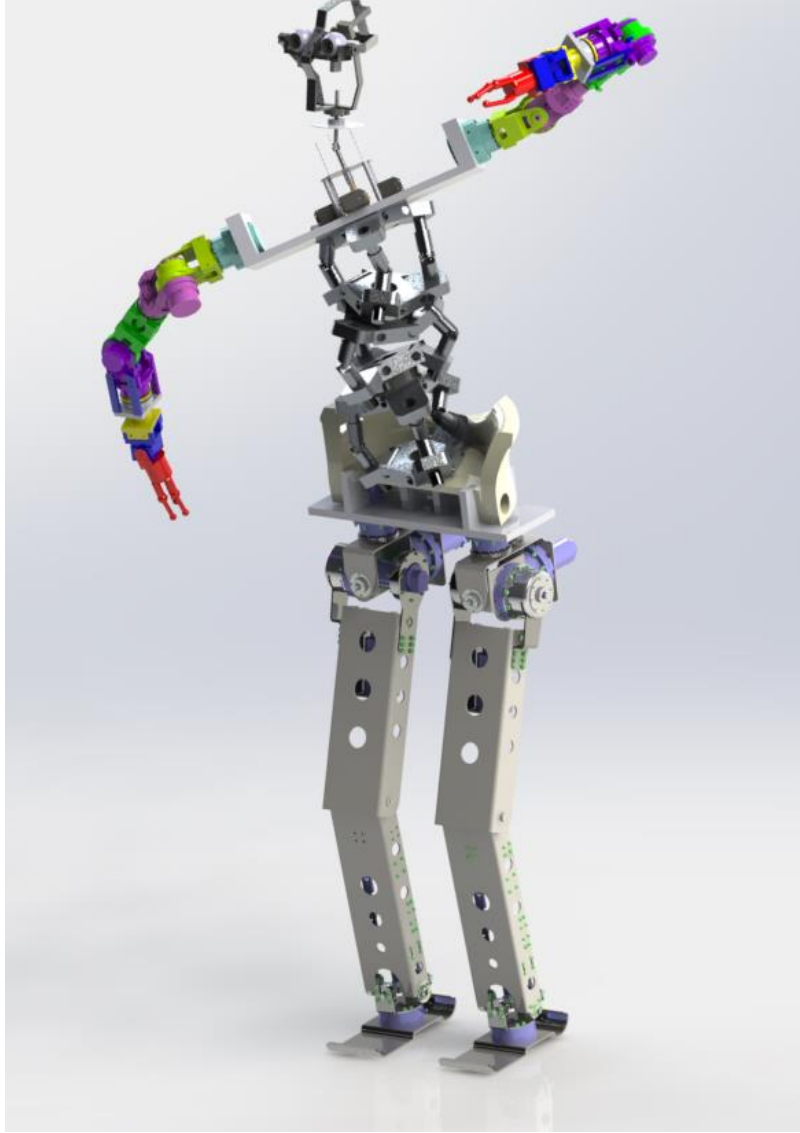
Yapının parça sayısı azaltılmıştır, ancak hala millere bağlanacak motorlar için yer sorunu vardır. Bu problem modüllerin Şekil 2.29’da gösterildiği gibi montajlanması ile çözülmüştür.



**Şekil 2.29 :** Yapay omurga nihai hal.

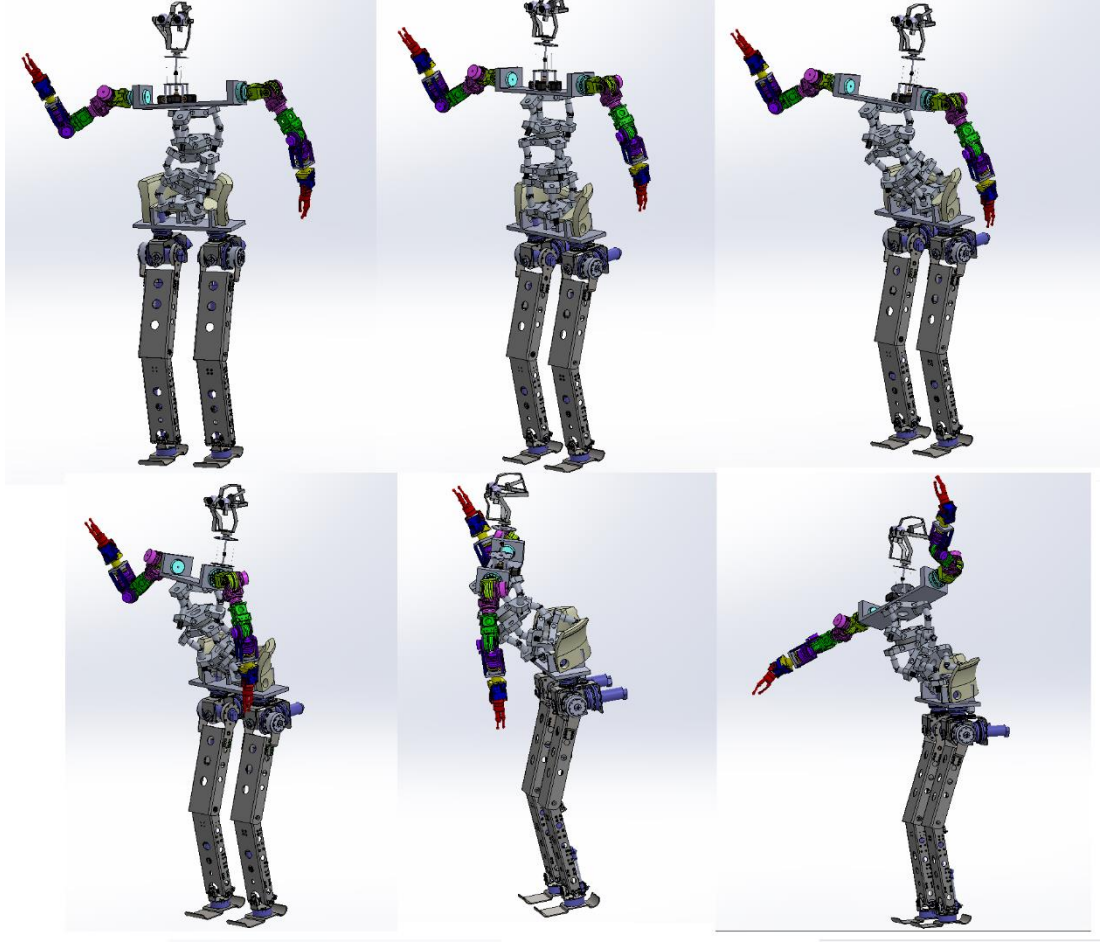
Tahrik millerinin ve motorların yerleşimi şekil 2.29’da gösterilmiştir.

2.3.1. kısmında bahsedilen iTech insansı robot projesi kapsamında, tasarlanan omurga projede geliştirilen kol, bacak ve kafa ile birleştirilmiştir. Şekil 2.30’da yapay omurgaya sahip insansı robot iTechin bilgisayar ortamında oluşturulmuş fotoğraf görünümü verilmiştir.



**Şekil 2.30 : iTech insansı robot.**

SOLIDWORKS programının motion analysis eklentisi kullanılarak montajı yapılan iTech’e uzayda çeşitli hareketler yaptırılmıştır. Elde edilen sonuçlar oldukça tatmin edici olmuştur. Tezin başında belirtilen sürekli ve insansı hareket tasarlanan yapay omurga sayesinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.31’de iTech’in insansı hareketleri gözükmektedir.



**Şekil 2.31** : iTech'in insansı gövde hareketleri.

Bir sonraki bölümde nihai tasarımı boyutlandırılabilmesi, malzeme ve motor seçimini gerçekleştirebilmek için benzetimler yolu ile analizler yapılacaktır.



### 3. BENZETİMLER

#### 3.1 Amaç

Tasarımın nihai boyutlandırmasını yapmak, malzemesini ve motorlarını seçebilmek için yapının dinamik ve mukavemet hesapları yapılmalıdır.

Boyutlandırma işleminde iteratif bir yöntem izlenmiştir. Önce başlangıç boyutları ve malzemeleri atanmış, bu değerler ile birlikte yapı benzetimler kullanılarak, belirli bir süre içinde çeşitli hareketlere maruz bırakılmıştır. Bu hareketlerin tahrik mafsallarında neden olduğu tork değerleri incelenmiştir. Elde edilen bu tork değerleri tahrik mafsallarına uygulanmış ve güç gereksinimleri incelenmiştir. Güç gereksinimleri istenilen boyutlarda bir motordan karşılanamayacak seviyede çıktığında yapının boyutları değiştirilerek ataleti istenilen seviyeye indirilmiş ve aynı işlem tekrarlanmıştır. İstenilen güç tüketimi seviyesine inilene kadar bahsedilen yöntemle iteratif olarak boyutlandırma sürmüştür.

Boyutlar elde edildikten sonra yapı kendi ağırlığı ile yüklenerek ve uygun başlangıç koşulları belirlenerek mukavemet analizi benzetimler yolu ile yapılmıştır. Daha sonra çeşitli durumlarda dışarıdan yüklere maruz bırakılarak mukavemet analizi devam ettirilmiştir. Herhangi bir kesitte seçilen başlangıç malzemesinin akma dayanımına ulaşan ya da yaklaşan değerler bulunduğu tekrar boyutlandırma ve malzeme seçimi aşamasına dönmüştür.

Bahsedilen yöntemle 9 adet iterasyon sonucunda nihai boyutlara ve malzemelere ulaşılmıştır.

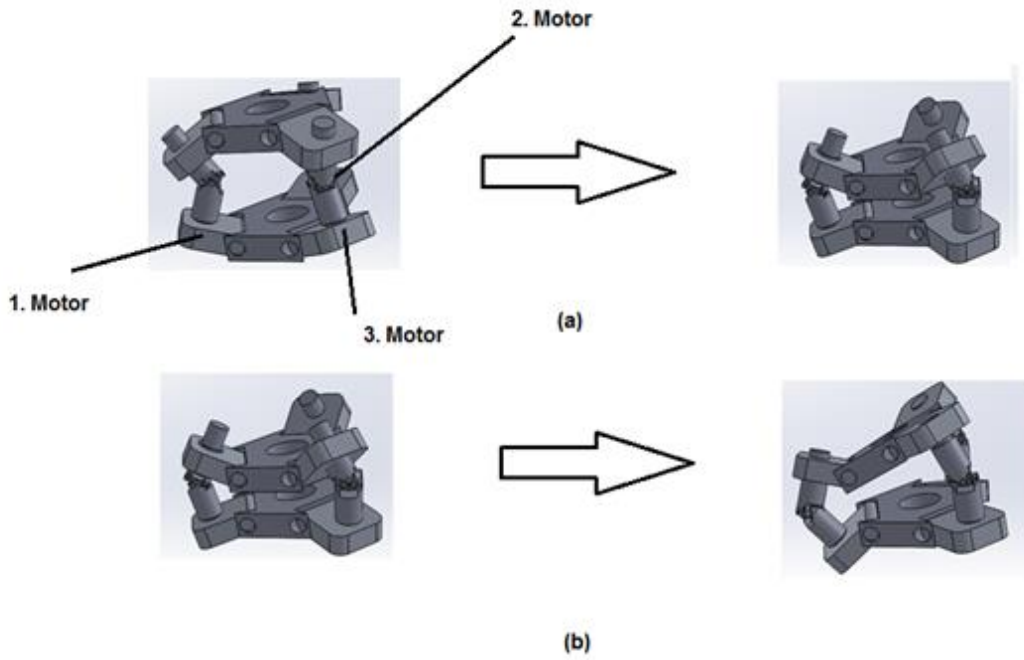
Bir sonraki kısımda nihai boyutlandırması yapılmış modülün dinamik açıdan incelenmesi ve tahrik millerinin motor mafsallarına atanan motorların güç tüketimi verilmiştir. Analizler benzetimler kullanılarak yapılmıştır.

Son olarak, sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak boyutlandırılmış tasarımın yük altındaki davranışı önce modül bazında daha sonra modüllerin bir araya gelmesi ile oluşan yapay omurga bazında incelenmiş ve sonuçlar verilmiştir.

### 3.2 Hareket Analizi

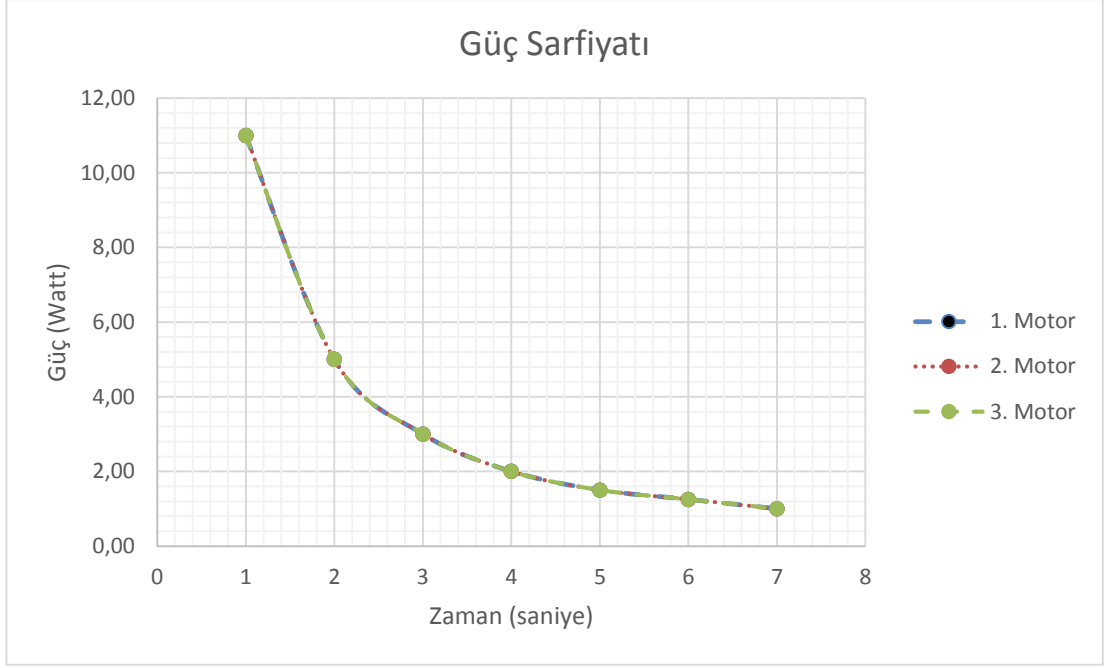
Nihai tasarımın boyutları ekte verilen teknik resimlerde görülebilir. Malzeme olarak alüminyum 7050-T7451 alaşımı seçilmiştir. Bu malzeme havacılıkta ağırlık/dayanım değerinin düşük olması sebebi ile yoğun olarak tercih edilmektedir. Malzeme özellikleri mukavemet analizi bölümünde verilmiştir.

Hareketler SOLIDWORKS programının motion analysis eklentisi kullanılarak oluşturulmuştur. İlk önce paralel mekanizmanın üst modülüne Şekil 3.1’de gözüken hareketler yaptırılmıştır. Bu hareketler 7 saniye zarfında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu hareketlerin tahrik mafsallarında neden olduğu tork değerleri alınmıştır. Elde edilen bu tork değerleri tahrik mafsallarına uygulanmış ve güç gereksinimleri incelenmiştir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’te motorların çektikleri güçlerin zamana göre değişimi verilmiştir.



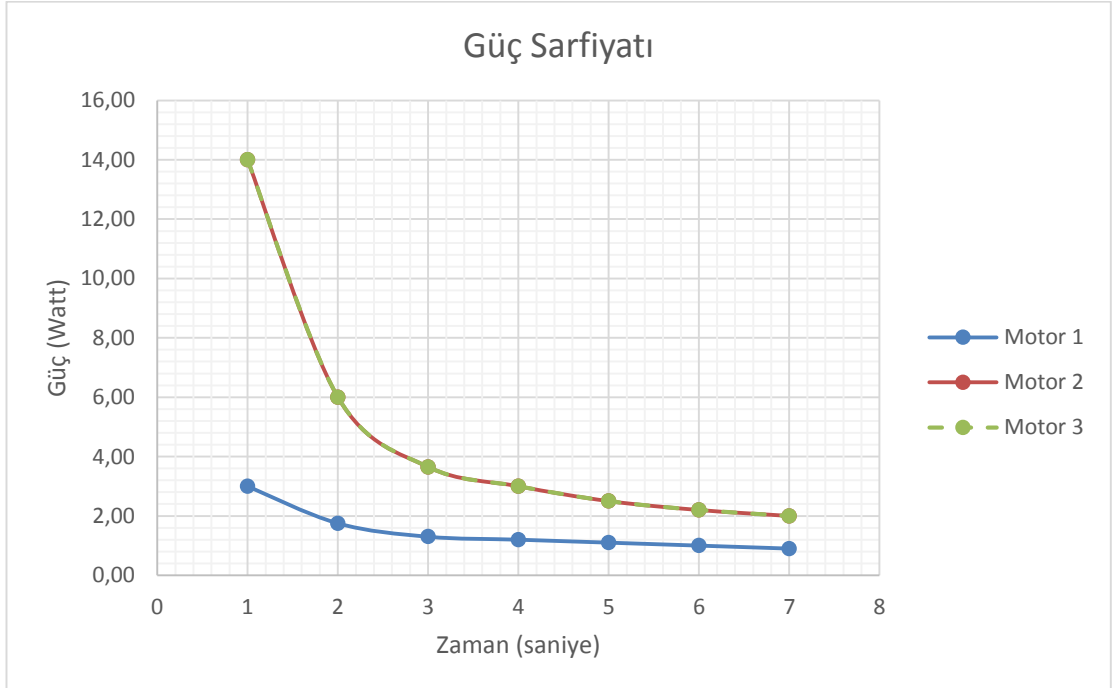
**Şekil 3.1 :** Hareketler soldan sağa doğru 7 saniye içinde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.1 (a)’da Z yönünde lineer deplasman yapılmıştır. 7 saniyede gerçekleşen hareket sırasında motorların harcadıkları güçler şekil 3.2’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.2 :** Z yönünde lineer hareket için motorların güç sarfiyatları.

Mekanizma sadece Z yönünde hareket ederken simetrik çalıştığı için bütün motorlar aynı miktarda güç tüketmiştir. Şekil 3.1 (b)'de görülen eğilme hareketi sırasında motorların güç sarfiyatları şekil 3.3'te verilmiştir.



**Şekil 3.3 :** Eğilme hareketi sırasında motorların güç sarfiyatları.

Birinci motor tahmin edileceği gibi oldukça düşük miktarda güç çekmiştir. Bunu sebebi gerçekleştirilen hareket için birinci uzvun az miktarda dönmesidir. Simetriden dolayı ikinci ve üçüncü motorlar aynı miktarda güç sarf etmişlerdir.

Tüketilen güçler konstrüksiyona uygun motorlar (boyut ve ağırlık bakımından) tarafından rahatlıkla sağlanabilecek bir aralıktadır.

### 3.3 Mukavemet Analizi

Mukavemet analizleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu analizler SOLIDWORKS programının Simulation eklentisi kullanılarak elde edilmiştir. İlk önce paralel mekanizma modülü incelenmiş, ardından bütün omurga yapısı analiz edilmiştir.

Kardan mafsalları haricinde yapıda malzeme olarak Al 7050 T7451 alaşımı kullanılmıştır. Malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de görülmektedir.

**Çizelge 3.1 :** Al 7050- T7451 alaşımının mekanik özellikleri.

| Özellik           | Değer                     |
|-------------------|---------------------------|
| Akma gerilmesi    | 470 MPa                   |
| Kopma gerilmesi   | 525 MPa                   |
| Elastiklik modülü | 72 GPa                    |
| Poisson oranı     | 0.33                      |
| Yoğunluk          | 2830<br>kg/m <sup>3</sup> |

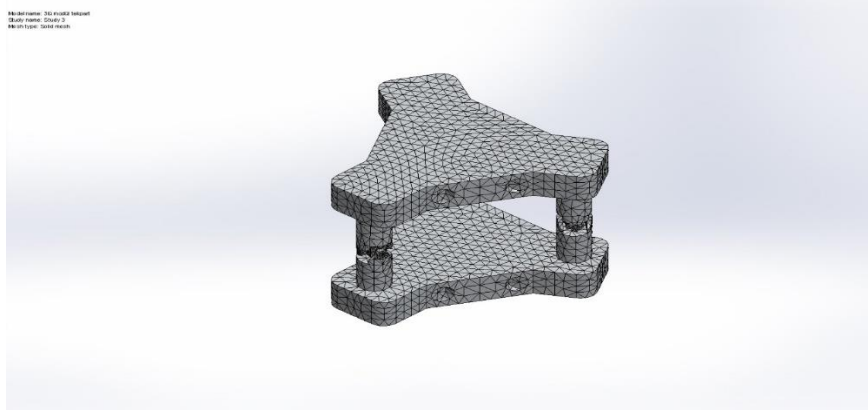
Kardan mafsallında AISI 4340 normalize edilmiş çelik kullanılmıştır. Malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2 :** AISI 4340 normalize çeliği mekanik özellikler.

| Özellik           | Değer                     |
|-------------------|---------------------------|
| Akma gerilmesi    | 710 MPa                   |
| Kopma gerilmesi   | 1100 MPa                  |
| Elastiklik modülü | 205 GPa                   |
| Poisson oranı     | 0.32                      |
| Yoğunluk          | 7850<br>kg/m <sup>3</sup> |

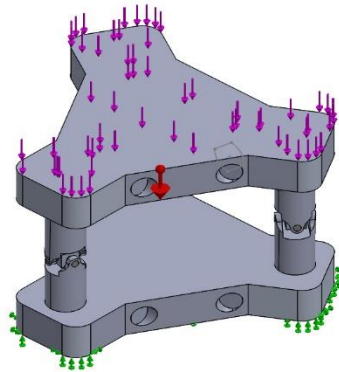
İlk analiz PM modülünün tek yönden zorlanması senaryosuna göre yapılmıştır. Bu senaryo üst gövde yükünün, YO modülleri arasında tek yönde kuvvet dağıtarak paylaşıldığı kabulü ile oluşturulmuştur.

Şekil 3.4’de paralel mekanizma modülüne uygulanan mesh yapısı görülmektedir. Mesh yapısı 33942 nod ve 20681 elemandan oluşmaktadır. Maksimum En/Boy oranı 7.9641’dir. Mesh işlemi için 1. dereceden tetrahedral elemanlar kullanılmıştır.



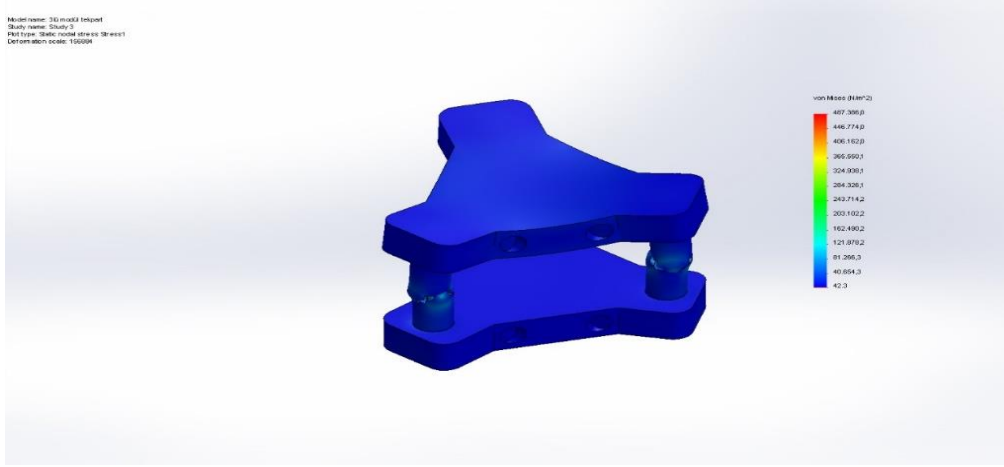
**Şekil 3.4 :** Mesh yapısı.

Paralel mekanizma modülü analiz edilirken alt düzlem 6 serbestlik derecesinden tutulmuştur. İlk analizde insansı robotun üst gövde yükü modüller arasında paylaşılmış ve incelenen modülün z yönünde yayılı kuvvet olarak indirgenmiştir. Analiz esnasında 1 G’lik yerçekimi ivmesi eklenmiştir. Yükleme 10 kg ve statik olarak yapılmıştır. Sonuçlar Von Mises teoremine göre alınmıştır. Sınır şartları Şekil 3.5’te görülmektedir.



**Şekil 3.5 :** Belirlenen sınır şartları.

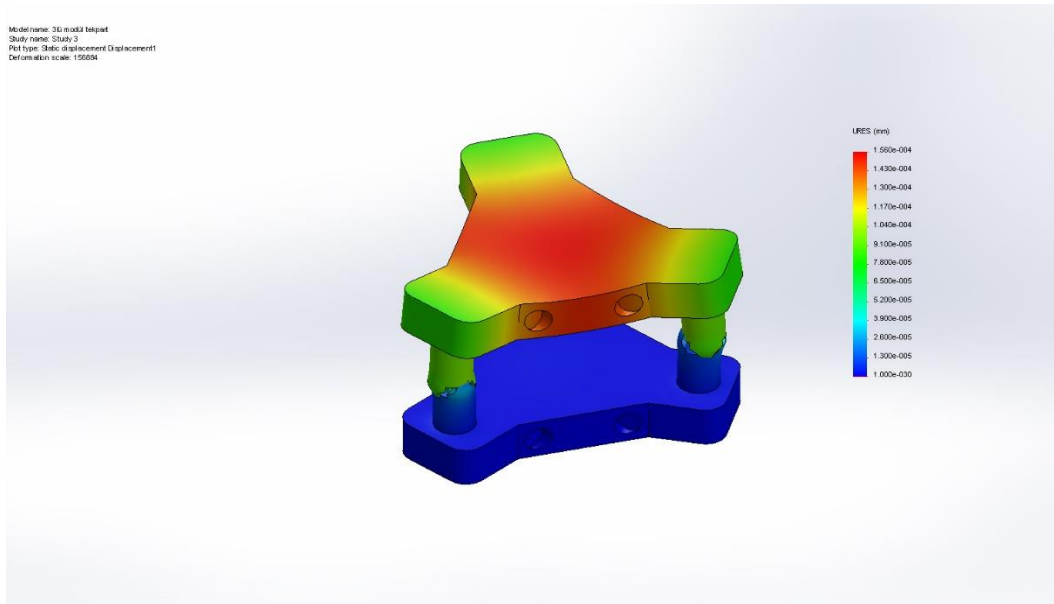
Şekil 3.6’ da Von Mises gerilme dağılımı gözükmektedir. Analiz sonucunda maksimum gerilme  $487386 \text{ N/m}^2$ , minimum gerilme  $42.31 \text{ N/m}^2$  çıkmıştır.



**Şekil 3.6 :** Von Mises gerilme dağılımı.

Tahmin edileceği gibi en yüksek gerilme kardan mafsallında ortaya çıkmıştır. Tüm yük kardan mafsallının pimlerine bindiği için en kritik kesit pim kesitleridir. Ancak gerilme değerleri AISI 4340 normalize çeliğinin akma gerilmesinden oldukça düşük çıkmıştır. Mafsalda çelik malzeme kullanılmasının sebebi zaten bu yüzdendir. Tasarım bu hali ile güvenli bölgededir.

Şekil 3.7’de elde edilen şekil değişimleri gözükmektedir. Maksimum yer değiştirme Z yönünde  $0.000156 \text{ mm}$  olarak üst düzlemin tam ortasında çıkmıştır.

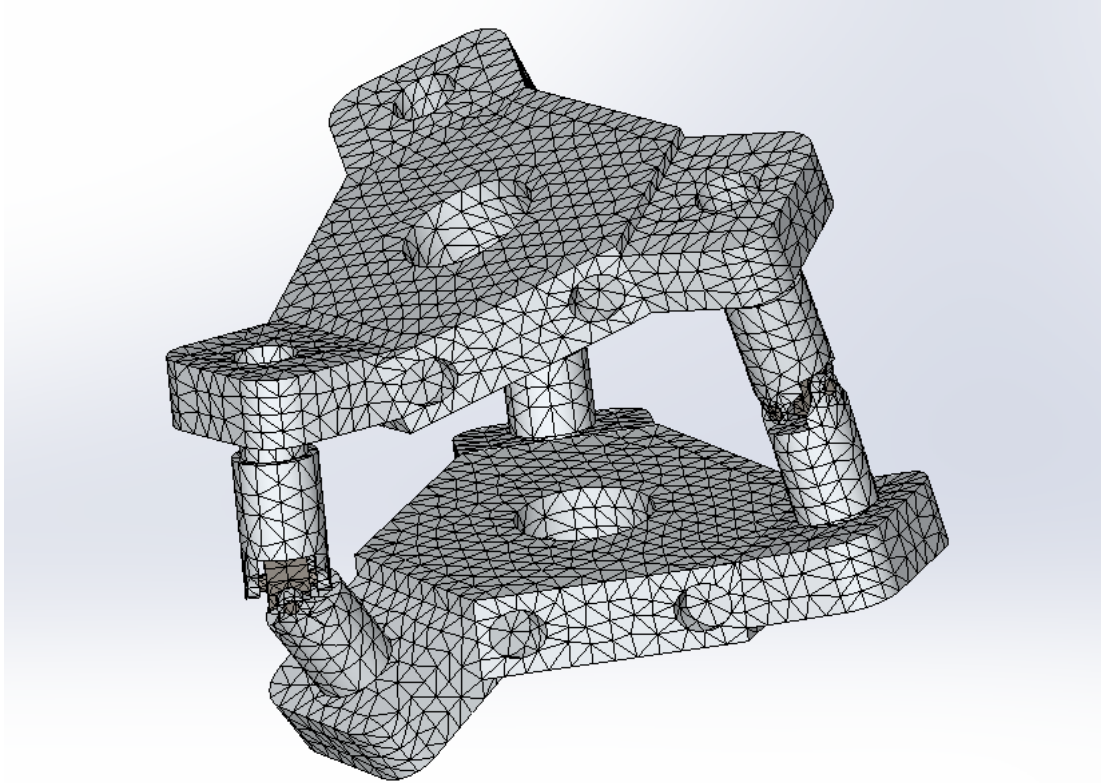


**Şekil 3.7 :** Yer değiştirme sonuçları.

Şekil değişimi beklenen bölgede meydana gelmiştir. Mekanizma ortasından desteklenmediği için maksimum şekil değişiminin bu bölgede olması kaçınılmazdır. Ancak 0.000156 mm'lik şekil değişimi kabul edilebilecek bir aralıkta olduğundan bu durum bir sorun teşkil etmemektedir.

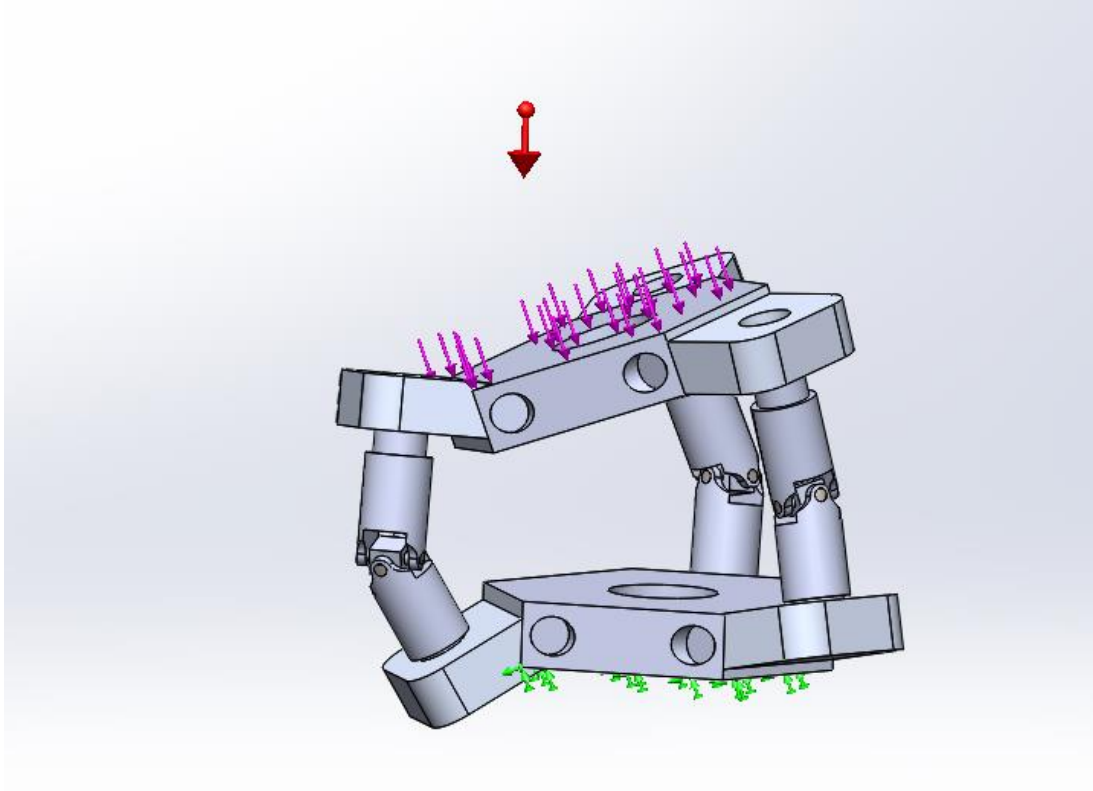
İkinci analiz PM modülünün yalpa hareketi senaryosuna göre oluşturulmuştur. Bu senaryoda paralel mekanizmanın üst düzlemi yatayla açı yapmakta ve bir önceki PM modülünden gelen kuvvetlerin üst düzlemin Z yönünde iletildiği kabul edilmiştir.

Şekil 3.8'de paralel mekanizma modülüne uygulanan mesh yapısı gözükmemektedir. Mesh yapısı 47028 nod ve 28995 elemandan oluşmaktadır. Maksimum En/Boy oranı 30.302'dir. Mesh işlemi için 1. dereceden tetrahedral elemanlar kullanılmıştır.



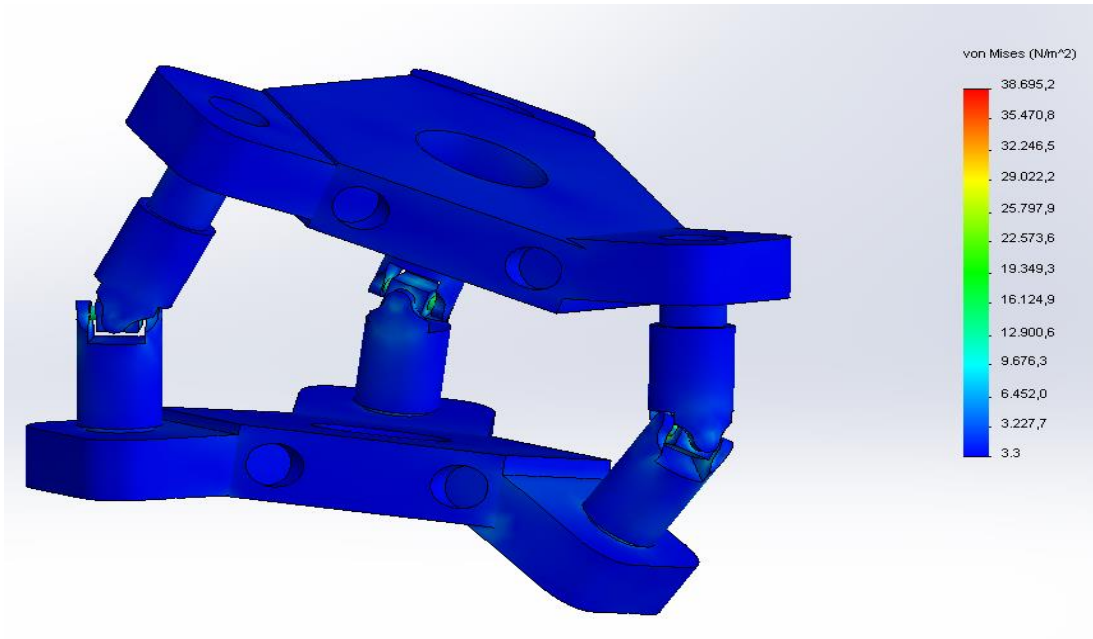
**Şekil 3.8 :** Yalpa hareketi analizi için oluşturulan mesh yapısı.

Modül alt düzleminde 6 serbestlik derecesinden tutulmuştur. Üst gövde yükü modüller arasında paylaşılmış ve incelenen modülün üst düzleminin Z yönünde yayılı kuvvet olarak indirgenmiştir. Analiz esnasında 1 G'lik yerçekimi ivmesi eklenmiştir. Yükleme 5 kg ve statik olarak yapılmıştır. Sonuçlar Von Mises teoremine göre alınmıştır. Sınır şartları Şekil 3.9'da gözükmemektedir. Şekilde mor yükü, kırmızı yerçekimi ivmesini ve yeşil sabitlenen düzlemi göstermektedir.



**Şekil 3.9 :** Yalpa analizi için sınır şartları.

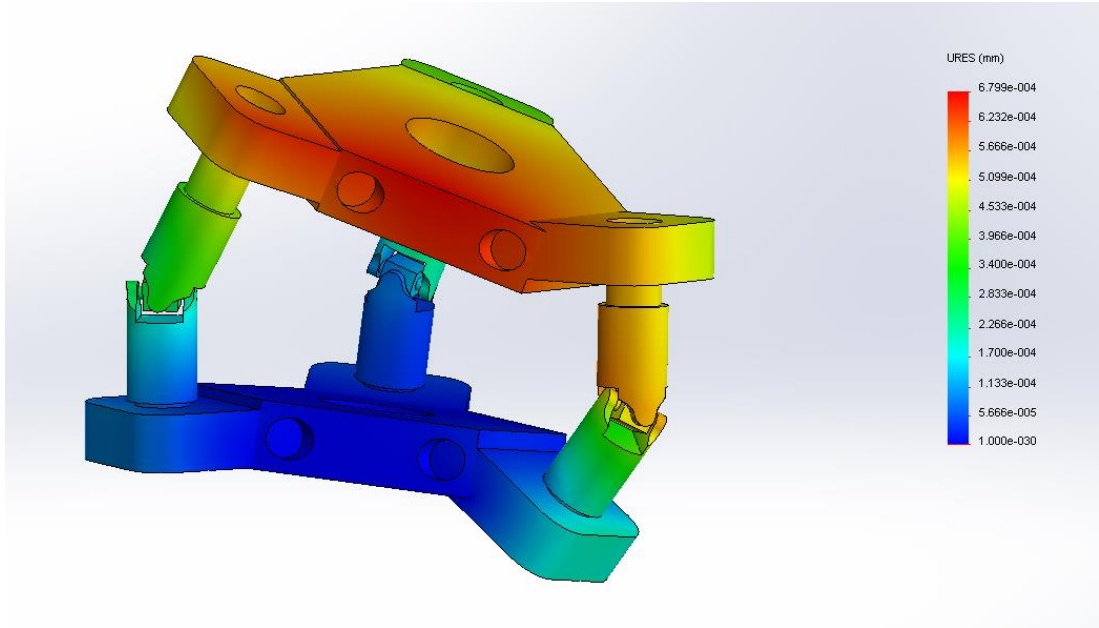
Şekil 3.10’da yalpa hareketi esnasında oluşan Von Mises gerilmelerinin dağılımı gözükmemektedir. Analiz sonucunda maksimum gerilme  $38695.2 \text{ N/m}^2$ , minimum gerilme  $3.34 \text{ N/m}^2$  çıkmıştır.



**Şekil 3.10 :** Yalpa esnasında oluşan Von Mises gerilmeleri.

En yüksek gerilme yine kardan mafsasında ortaya çıkmıştır. Tüm yük kardan mafsasının pimlerine bindiği için en kritik kesit pim kesitleridir. Ancak gerilme değerleri, bir önceki analizde olduğu gibi AISI 4340 normalize çeliğinin akma gerilmesinden oldukça düşük çıkmıştır. Modül bu yüklenme durumu için güvenli bölgededir.

Şekil 3.11’de elde edilen şekil değişimleri gözükmemektedir. Maksimum yer değiştirme 27638. Nod’da 0.00068 mm olarak çıkmıştır.



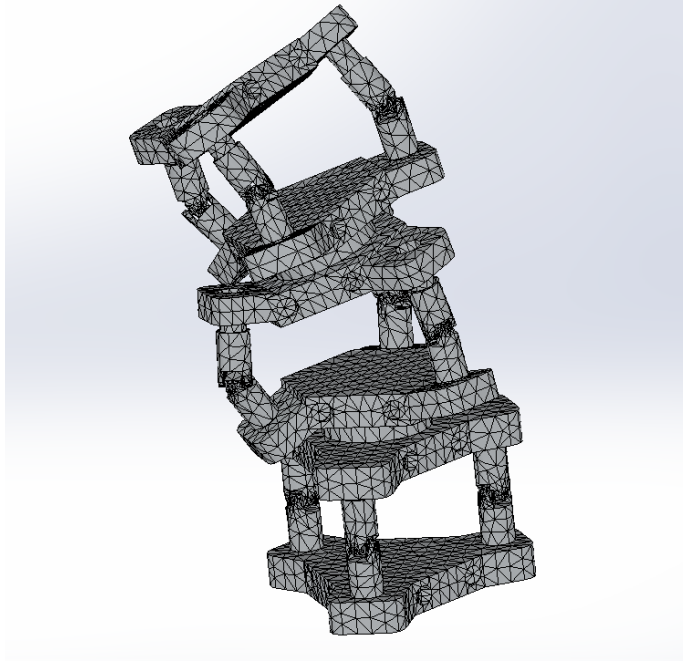
**Şekil 3.11 : Şekil değişimi.**

En büyük şekil değişimi modülün üst düzleminde, en çok kırılan uzuv ile bu uzvun en yakınındaki uzuv arasında kalan bölgede meydana gelmiştir. Bu durumda oluşan 0.00068 mm’lik şekil değişimi kabul edilebilir aralıktadır.

Üçüncü analiz senaryosu YO’nun bir bütün şeklinde eğilme durumunu incelemektedir. Üst gövde yükü ve yapının kendi ağırlığına ek olarak en üst modülün üst düzlemine dışarıdan ekstra bir yükleme yapılmıştır.

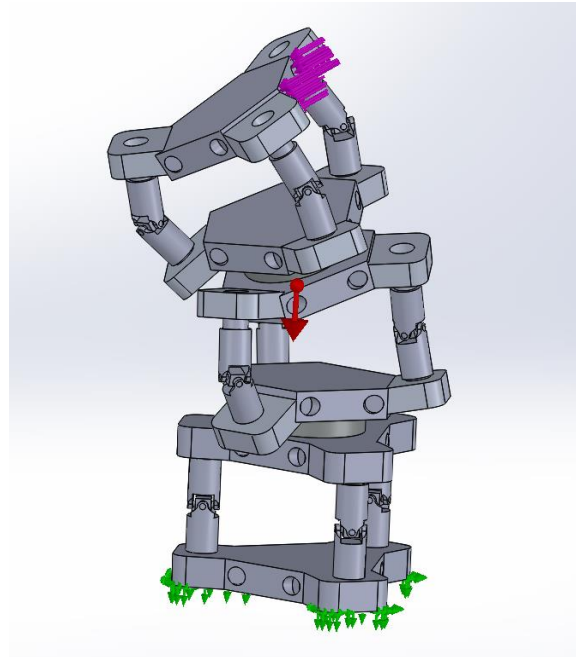
Şekil 3.12’de YO’ya uygulanan mesh yapısı gözükmemektedir. Mesh yapısı 63412 nod ve 37557 elemandan oluşmaktadır. Maksimum En/Boy oranı 19.653’dür. Mesh işlemi için 1. dereceden tetrahedral elemanlar kullanılmıştır.

YO alt düzleminden 6 serbestlik derecesini engelleyecek şekilde tutulmuştur.



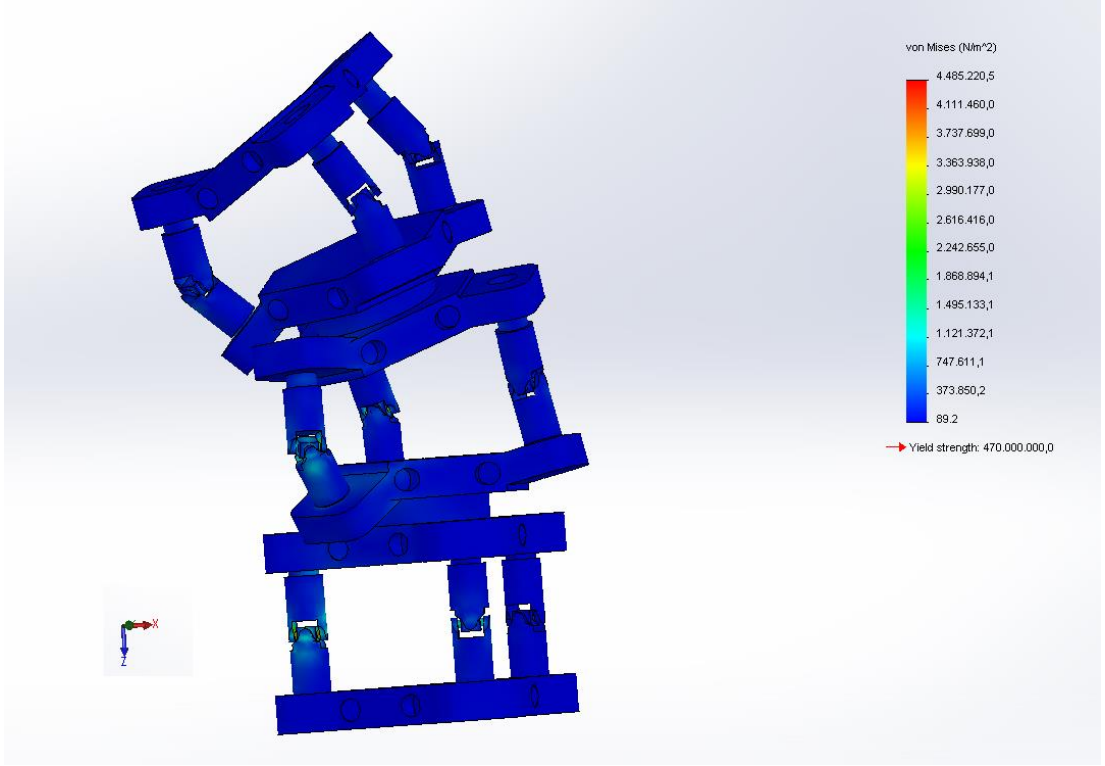
**Şekil 3.12 :** YO'ya atılan mesh yapısı.

Analiz esnasında 1 G'lık yerçekimi ivmesi eklenmiştir. Ek yükleme 1 kg ve statik olarak yapılmıştır. Sonuçlar Von Mises teoremine göre alınmıştır. Sınır şartları şekil 3.13'te görülmektedir. Şekilde mor yükü, kırmızı yerçekimi ivmesini ve yeşil sabitlenen düzlemi göstermektedir.



**Şekil 3.13 :** YO analizi sınır şartları.

Şekil 3.14’de YO’da oluşan Von Mises gerilmelerinin dağılımı görülmektedir. Analiz sonucunda maksimum gerilme 4485220 N/m<sup>2</sup> ile 36983. nod’da, minimum gerilme ise 89.21 N/m<sup>2</sup> çıkmıştır.



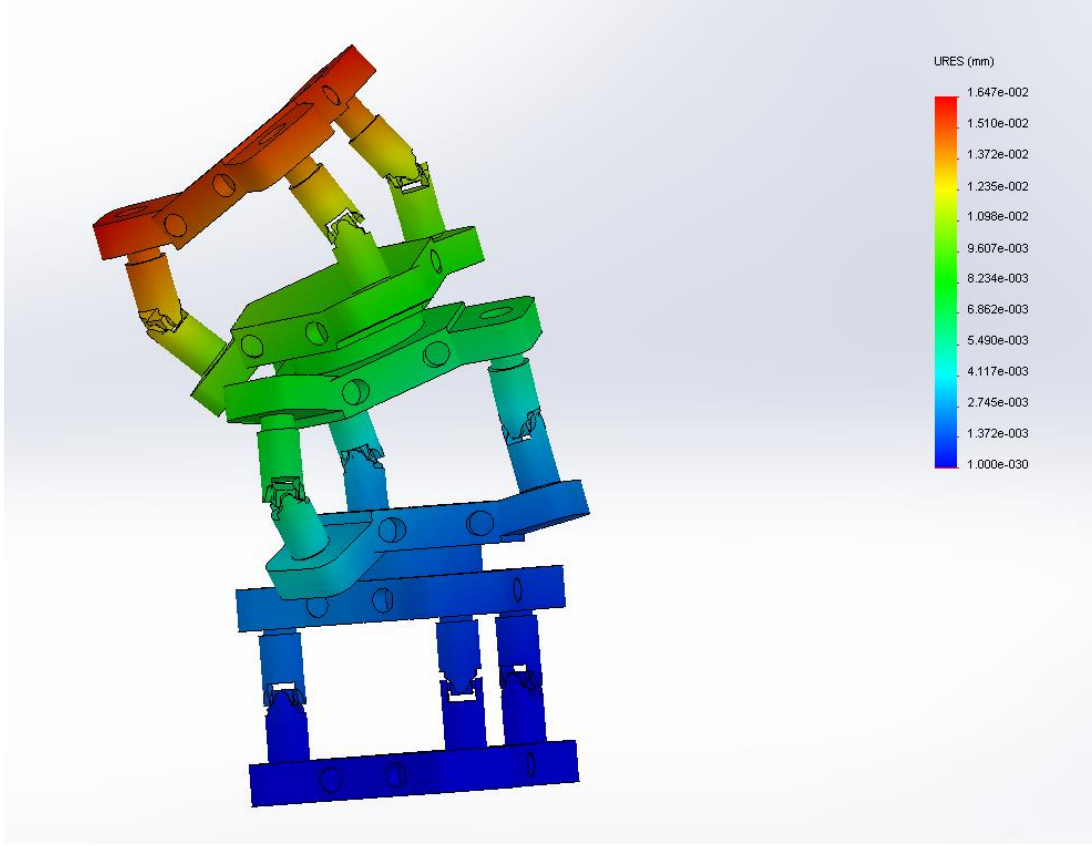
**Şekil 3.14 :** Von Mises gerilme dağılımı.

En yüksek gerilme kardan mafsalları ve en çok bükülen uzuvlarda ortaya çıkmıştır. Gerilme değerleri, önceki analizlerde olduğu gibi AISI 4340 normalize çeliğinin ve Al 7050- T7451 alaşımının akma gerilmelerinden oldukça düşük çıkmıştır. Yapı bu yüklenme durumu için güvenli bölgededir.

Şekil 3.15’de elde edilen şekil değişimleri görülmektedir. Maksimum yer değiştirme 50665. nod’da 0.0164 mm olarak çıkmıştır.

En büyük şekil değişimi en üst modülün üst düzleminde meydana gelmiştir. 0.0165 mm’lik bu değer yapılan analizler arasında ulaşılan en büyük şekil değişimidir. Bu senaryoda bütün YO yapısı analiz edildiği ve ekstra yükleme yapıldığı için bu sonuç beklenen bir değerdir.

Yapılan analizler sonucunda tasarımın gerek modüler olarak, gerek bütün YO yapısı olarak güvenli bölgede kaldığı görülmüştür.



Şekil 3.15 : YO şekil değişimi.

#### **4. SONUÇ VE ÖNERİLER**

Tez kapsamında literatürde bulunan yapay omurgaya sahip insansı robotlar incelenmiş ve yapay omurga yapısının nasıl geliştirilebileceği tartışılmıştır. Yapılan tasarım çalışmaları sonucu paralel mekanizmalar kullanılarak bir yapay omurga yapısı oluşturulmuştur.

Tasarım istenilen sürekli ve insansı hareketleri benzetim ortamında gerçekleştirebilmiştir. Yapılan dinamik ve mukavemet analizler sonucu tasarımın güvenli bir şekilde çalışabileceği gösterilmiştir.

Yapılan tasarım daha da iyileştirilerek robotik alanında, özellikle insansı hareketin istendiği durumlarda kullanılabilir.

Gelecekte tasarımın prototipi üretilecek ve iTech insansı robot projesi kapsamında kontrol uygulamalarına başlanacaktır.



## KAYNAKLAR

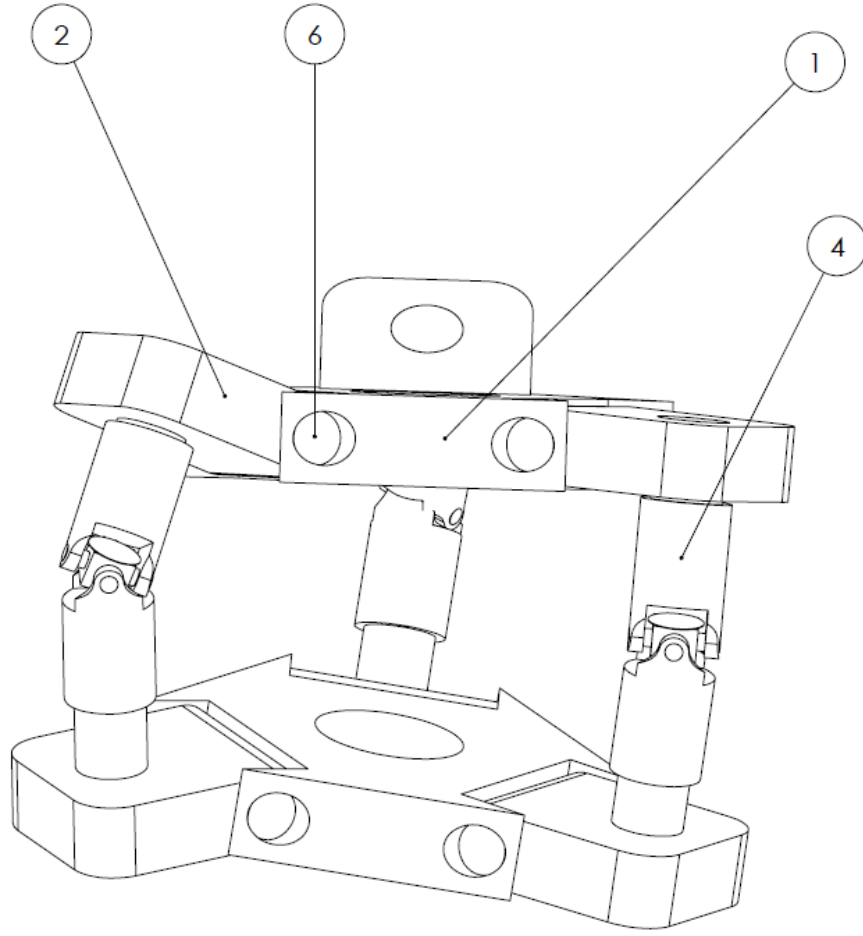
- [1] **Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N. And Fujimura, K.** (2002), “The intelligent ASIMO: system overview and integration”, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, Sf. 2478–2483.
- [2] **Roos, L., Guenter, F., Guignard, A. and Billard, A.G.**(2006), “Design of a Biomimetic Spine for the Humanoid Robot Robota”, IEEE / RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, Pisa, Italy, Sf. 329 – 334.
- [3] **Mizuuchi, I., Yoshikai, T., Sodeyama, Y., Nakanishi, Y., Miyadera, A., Yamamoto, T., Niemela, T., Hayashi, M., Urata, J., Namiki, Y., Nishino, T. and Inaba, M.**(2006), “Development of musculoskeletal humanoid Kotaro”, Proceedings of The 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sf. 82–87.
- [4] **Mizuuchi, I., Nakanishi, Y., Sodeyama, Y., Namiki, Y., Nishino, T., Muramatsu, N., Urata, J., Hongo, K., Yoshikai, T. and Inaba, M.,** (2007) “An advanced musculoskeletal humanoid Kojiro”, Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Sf. 294 – 299.
- [5] **Osada, M., Ito, N., Nakanishi, Y. and Inaba, M.,** (2010), “Stiffness readout in musculo-skeletal humanoid robot by using rotary potentiometer”, Proceedings of the 9th Annual IEEE International Conference on Sensors, Sf. 2329–2333.
- [6] **Url-1** <[http:// http://en.wikipedia.org/wiki/Unimate](http://en.wikipedia.org/wiki/Unimate)>, alındığı tarih: 14.04.2014.
- [7] **Url-2** <<http://world.honda.com/ASIMO/history/>>, alındığı tarih: 29.04.2014.
- [8] **Url-3** <<http://www.nasa.gov/>>, alındığı tarih: 05.04.2014.
- [9] **Url-4** <<http://www.robotcub.org/>>, alındığı tarih: 07.03.2014.
- [10] **Url-5** <<http://people.sabanciuniv.edu> >, alındığı tarih: 10.04.2014.
- [11] **Url-6** <<http://www.mkn.itu.edu.tr/>>, alındığı tarih: 10.04.2014.
- [12] **Meşeli, İ.** (2013), *İnsansı robot kolu ön tasarımı ve analizi* (yüksek lisans tezi). Adres: <http://fbe.itu.edu.tr>
- [13] **Mizuuchi, I., Yoshida, S., Inaba, M. And Inoue, H.** (2003). The development and control of a flexible-spine for a human-form robot. *Advanced Robotics*, Cilt. 17, Sayı. 2, pp. 179–196.
- [14] **Url-7** <[http:// http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp](http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp)>, alındığı tarih: 19.03.2014.
- [15] **Marques, H. G., Jantsch, M., Wittmeier, S., Holland, O., Alessandro, C., Diamond, A., Lungarella, M. And Knight, R.** (2010), “ECCE1: The first of a series of anthropomorphic musculoskeletal upper torsos”, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Nashville

- [16] **Liang, C., Ceccarelli, M.** (2012). Design and simulation of a waist-trunk system for a humanoid robot. *Mechanism and Machine Theory*, Cilt. 53, Sf. 50–65.
- [17] **Url-8** < <http://projetro.meo.com/>>, alındığı tarih: 12.04.2014.
- [18] **Url-9** <<http://msis.jsc.nasa.gov/sections/section03.htm>>, alındığı tarih: 12.04.2014.
- [19] **Url-10** < <http://www.innerbody.com> >, alındığı tarih: 19.03.2014.
- [20] **Url-11** < [http://www.dshs.wa.gov/pdf/ms/forms/13\\_585a.pdf](http://www.dshs.wa.gov/pdf/ms/forms/13_585a.pdf) >, alındığı tarih: 16.03.2014.
- [21] **Bullough, P. G. and Boachie-Adjei, O.**, (1988), Atlas of Spinal Diseases, JB Lippincott, Philadelphia.
- [22] **Url-12** < [http://www.mayfieldclinic.com/PE-AnatSpine.htm#U-u4B\\_mSyFE](http://www.mayfieldclinic.com/PE-AnatSpine.htm#U-u4B_mSyFE)>, alındığı tarih: 15.04.2014.
- [23] **Boyraz, P., Yigit, C.B., Bicer, H.O.** (2013), “UMAY: A modular humanoid platform for education and rehabilitation of children with autism spectrum disorders”, 9th Control Conference (ASCC), Sf. 1–6.
- [24] **Merlet, J.**, (2000), Parallel Robots, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.

## **EKLER**

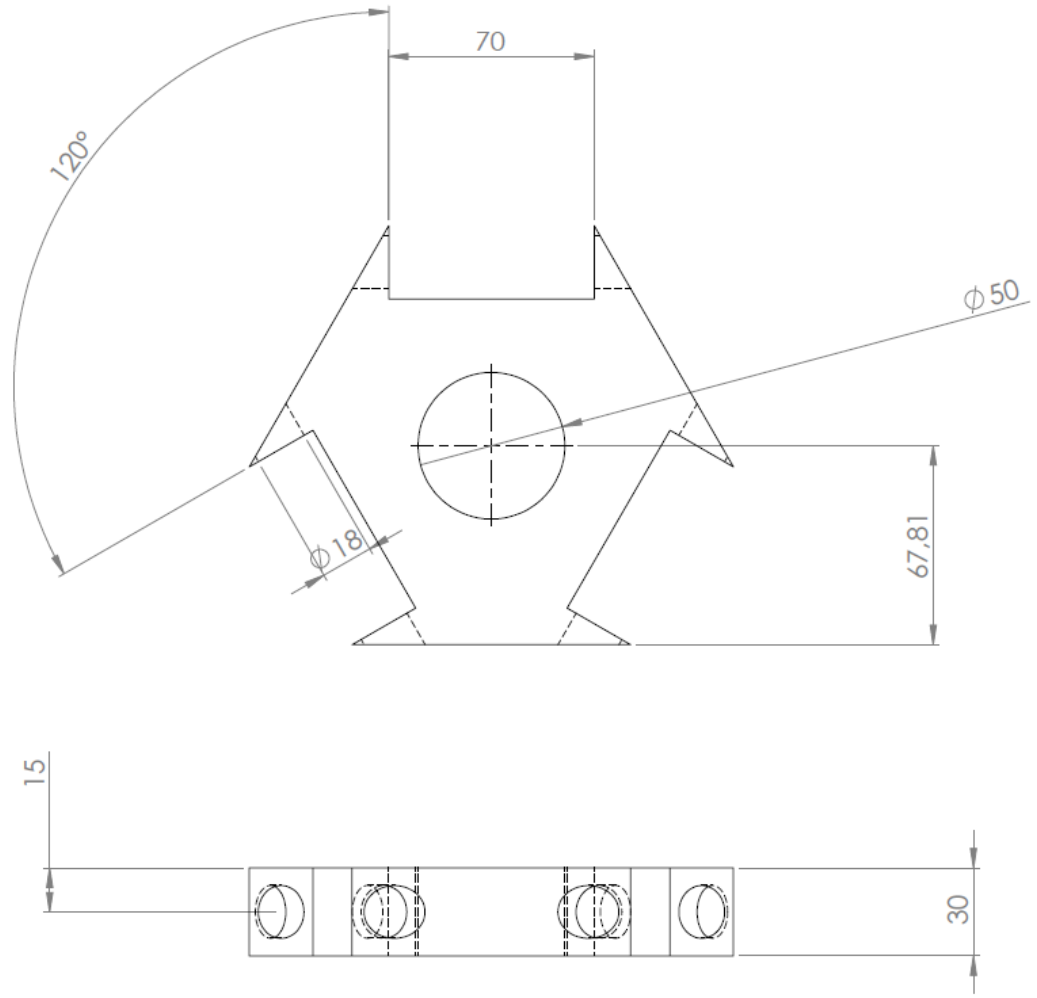
**EK A:** Nihai tasarımın teknik resimleri

## EK A

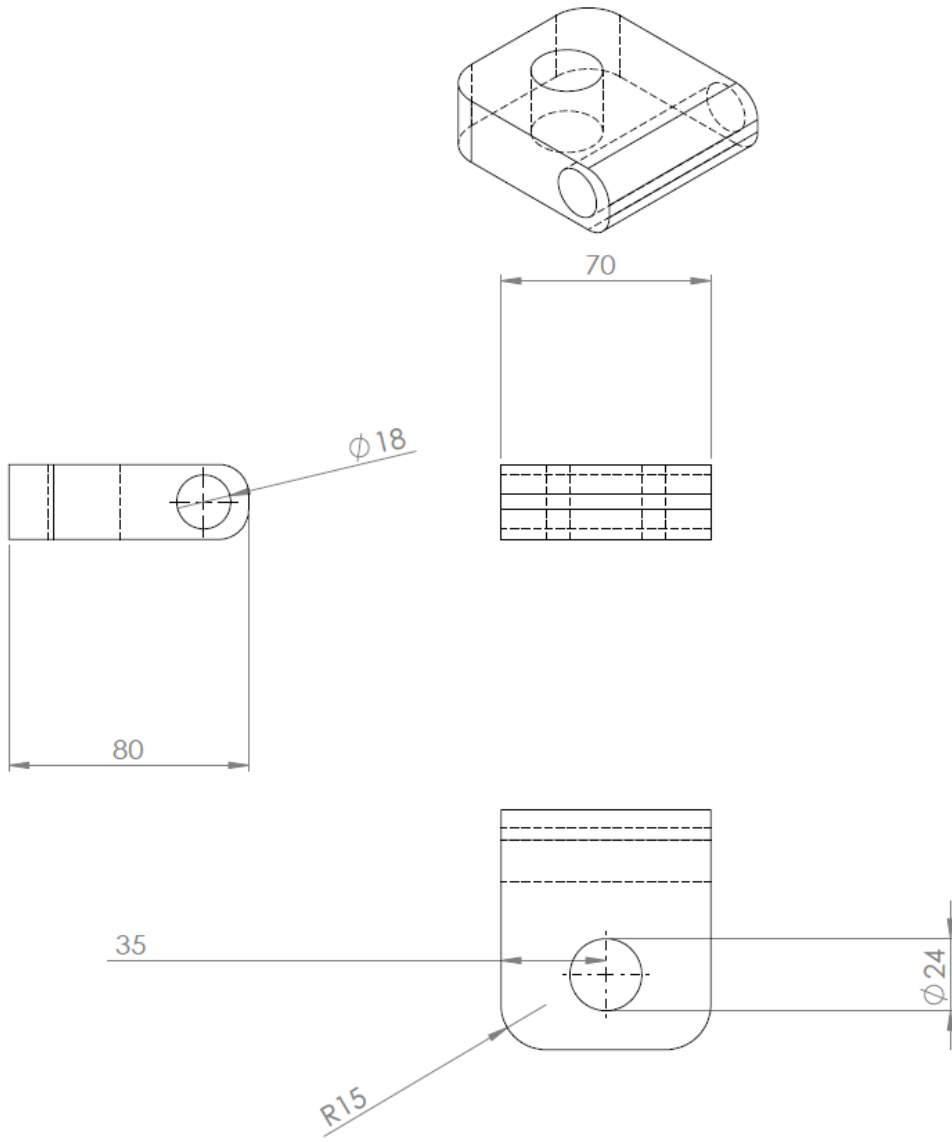


|                |                    |              |
|----------------|--------------------|--------------|
| 6              | Pim                | 6            |
| 4              | Kardan mili montaj | 3            |
| 2              | Kanatçık           | 6            |
| 1              | Omur               | 2            |
| Parça numarası | Parça adı          | Parça Sayısı |

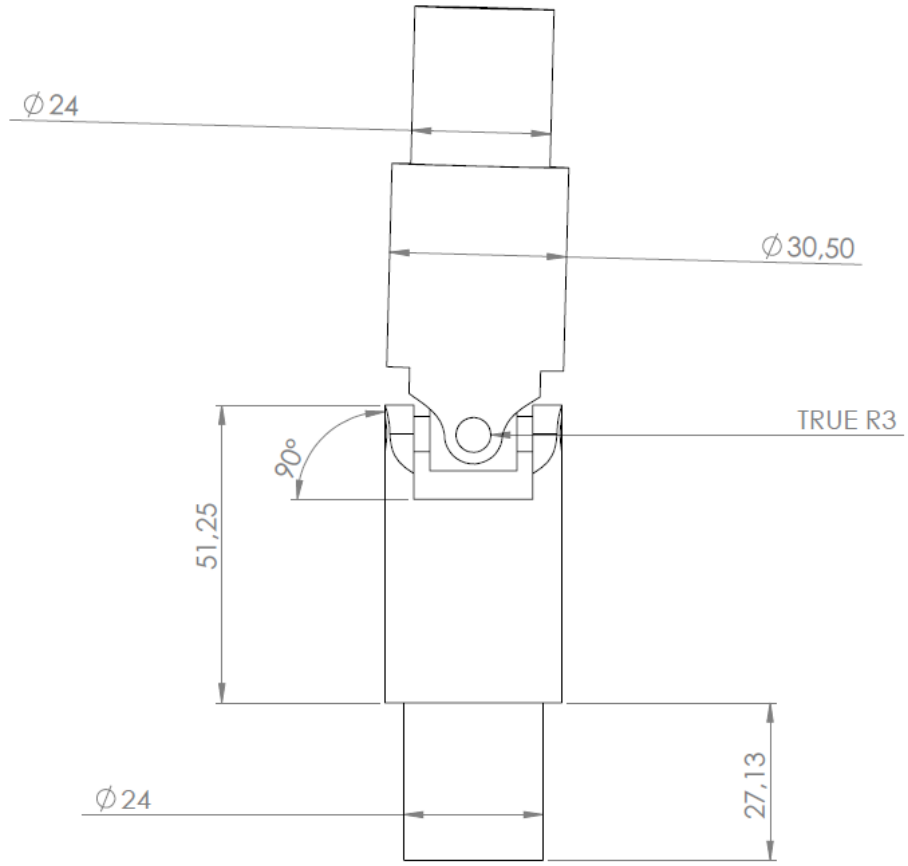
Şekil A.1 : Paralel modül montaj hali.



**Şekil A.2 : Omur.**



**Şekil A.3 : Kanatçık.**



Şekil A.4 : Kardan mili montaj.



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad : Ekim Yurtsever**

**Doğum Tarihi ve Yeri : 04/10/1987 Köln/F.Almanya**

**E-posta : ekimyurtsever@gmail.com**

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Yurtsever E., Ertuğrul Ş.,2014. Design Of A Humanoid Robot Spine Constructed Of Asymmetric Parallel Mechanism Modules *The 16th International Conference on Machine Design and Production June 30 – July 03 2014 Izmir, Türkiye*