

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSANSI ROBOT KOLU ÖN TASARIMI VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İLKAY MEŞELİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Sistem Dinamiği ve Kontrol Programı

EYLÜL 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSANSI ROBOT KOLU ÖN TASARIMI VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İlkay MEŞELİ
(503101605)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Sistem Dinamiği ve Kontrol Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şeniz Ertuğrul

EYLÜL 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503101605 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **İlkay MEŞELİ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**İNSANSI ROBOT KOLU ÖN TASARIMI VE ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Doç.Dr. Cüneyt Fetvacı**
İstanbul Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. Vedat Temiz
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **03 Mayıs 2013**
Savunma Tarihi : **11 Eylül 2013**

ÖNSÖZ

Günümüzde robot teknolojilerinin gelişmesi için ülkeler milyonlarca dolar bütçeler ayırıp, kısa ve uzun vadeli AR-GE çalışmalarında bu konuya yüksek önem vermektedirler. Özellikle insansı özellikler gösterip birebir insan ile etkileşim haline girebilen ve insanın yaptığı herhangi bir işi hızlı bir şekilde öğrenebilecek yapay zekâya sahip olan robot çalışmaları dünyanın her bir köşesinde hızla devam etmektedir.

Ülkemizde de bu tip çalışmalar yapılmaktadır, ancak istenilen seviyelerde olduğu pek söylenememektedir. Yapmış olduğum bu tez çalışması ile konu üzerine Türkiye içerisinde yapılacak olan çalışmalara katkı sağlamak birinci önceliğim arasındadır.

Tez çalışmamda fikirlerinden yararlandığım değerli hocam Prof.Dr. Şeniz Ertuğrul'a , melektaşlarım Osman Avcı, Hünkar Kemal Yurt ve Musa Özgün Güleç'e ve sevgili eşime gösterdiği ilgi ve anlayıştan dolayı teşekkür ederim

Eylül 2013

İlkay Meşeli
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
1.2.1 Geçmişten günümüze insansı robot tarihi	2
1.2.2 İnsansı robot kolu alanına yönelik yapılan çalışmalar	7
1.2.2.1 Festo Airic's arm.....	8
1.2.2.2 Rosetta project.....	9
1.2.2.3 Rabonaut arm	10
1.2.2.4 UR10	11
1.2.2.5 Compliant humanoid platform (COMAN).....	12
1.2.2.6 DLR hand arm system.....	13
1.2.2.7 Rollin' Justin.....	14
1.2.2.8 SHERPA	15
2. KOL TASARIMI.....	17
2.1 İnsansı Robotun Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi	17
2.1.1 Uzunluklar	17
2.1.2 Hareket Kabiliyeti	18
2.1.3 İnsan kolu dayanımı	20
2.2 Ön Tasarım	23
2.2.1 Kullanılan elemanlar ve malzeme bilgileri	26
2.2.1.1 Motor.....	26
2.2.1.2 Harmonic drive.....	26
2.2.1.3 Malzeme	27
2.3 Tasarımlar.....	28
2.3.1 Tasarım 1	29
2.3.2 Tasarım 5.....	30
2.3.3 Tasarım 8.....	31
2.3.4 Tasarım 11	34
3. DİNAMİK ANALİZ.....	41
3.1 İvme Profili Seçimi.....	42
3.2 Motor ve Harmonic Drive Seçimi İçin Dinamik Analizler	45
3.2.1 1. Eklem	45
3.2.3 3. Eklem	50
3.2.4 4. Eklem	51
3.2.5 Diğer eklemler	53

3.3 Kütle Yer Değişimi Dinamik Analizi	55
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	66
EKLER.....	69
ÖZGEÇMİş	73

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Ortalama insan kolu uzunlukları 1	17
Çizelge 2.2 : Ortalama insan kolu uzunlukları 2	18
Çizelge 2.3 : Ortalama bir insan kolu hareket kabiliyeti 1	19
Çizelge 2.4 : Ortalama bir insan kolu hareket kabiliyeti 2.	20
Çizelge 2.5 : İnsan kolu dayanım tablosu 1.....	21
Çizelge 2.6 : İnsan kolu dayanım tablosu 2.....	22
Çizelge 2.7 : İnsan kolu dayanım tablosu 3.....	22
Çizelge 2.8 : İnsan kolu dayanım tablosu 4.....	23
Çizelge 2.9 : Kol tasarımı hedeflenen özellikler	26
Çizelge 2.10 : Eksen hareket kabileyet hedefleri.....	26
Çizelge 2.11 : Alüminyum 7075-T6 alaşımı mekanik özellikleri	28
Çizelge 2.12 : Tasarım 8 dinamik analiz sonuçları.....	34
Çizelge 2.13 : Tasarım 11 harmonic drive seçimleri ve kapasiteleri.....	37
Çizelge 3.1 : Dinamik analiz sonuçları.....	54
Çizelge 3.2 : Planlanan eklem hareketleri	55
Çizelge 3.3 : Eklemler üzerinde oluşan maksimum tork miktarları[Nm]	60
Çizelge 3.4 : Eklemler üzerinde oluşan maksimum güç tüketim miktarı [W]	61
Çizelge 4.1 : Tasarım 11 özellikleri.....	64
Çizelge 4.2 : Tasarım 11 eksen hareket limitleri	65

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Capek'in tiyatro oyununda kullandığı robot	3
Şekil 1.2 : Unimation şirketinin üretimde bulunduğu ilk endüstriyel robot	3
Şekil 1.3 : Honda P-2 ve P-3 robotları	4
Şekil 1.4 : Honda tarafından 2012 yılında sunulan son ASIMO	4
Şekil 1.5 : NASA'nın geliştirmiş olduğu Robonaut 2	5
Şekil 1.6 : Reem 2010	6
Şekil 1.7 : Icube	7
Şekil 1.8 : COMAN	7
Şekil 1.9 : Festo Airic's arm	8
Şekil 1.10 : Frida	9
Şekil 1.11 : Rosetta project	9
Şekil 1.12 : Robonaut arm	10
Şekil 1.13 : Robonaut 2	10
Şekil 1.14 : UR1	11
Şekil 1.15 : COMAN mekanik tasarımı	12
Şekil 1.16 : Coman elastik tahrik elemanı	13
Şekil 1.17 : DLR hand arm system	13
Şekil 1.18 : Rollin' Justin	14
Şekil 1.19 : Sherpa kablo yapısı	15
Şekil 2.1 : İnsan kolu dayanım şekilleri	21
Şekil 2.2 : Kol tasarımı serbestlik dereceleri dağılımı	24
Şekil 2.3 : Kol tasarımı boyutlar	25
Şekil 2.4 : Harmonic drive firmasına ait CDG komponent seti	27
Şekil 2.5 : İnsansı kol tasarımı 1	29
Şekil 2.6 : İnsansı kol tasarımı 5	30
Şekil 2.7 : Tasarım 5 sınır şartları	31
Şekil 2.8 : İnsansı kol tasarımı 8	32
Şekil 2.9 : Tasarım 8 sonlu elemanlar yer değiştirme sonucu	33
Şekil 2.10 : Tasarım 8 sonlu elemanlar gerilme sonucu	33
Şekil 2.11 : Tasarım 11	35
Şekil 2.12 : Tasarım 11 eklem numaralandırmaları	36
Şekil 2.13 : Sonlu elemanlar sınır şartları	38
Şekil 2.14 : Kol üzerinde oluşturulan sonlu elemanlar yapısı	38
Şekil 2.15 : Sonlu elemanlar analizi Von Mises gerilmesi	39
Şekil 2.16 : Sonlu elemanlar analizi yer değiştirme	39
Şekil 2.17 : Sonlu elemanlar analizi emniyet katsayısı dağılımı	40
Şekil 3.1 : MSC Adams modeli	42
Şekil 3.2 : İvme profilleri	43
Şekil 3.3 : Hız profilleri	43
Şekil 3.4 : Yer değiştirme profilleri	44
Şekil 3.5 : Tork profilleri	44

Şekil 3.6 : Güç profilleri	45
Şekil 3.7 : 1. Eklem dinamik analiz hareketi	46
Şekil 3.8 : 1. Eklem güç ihtiyacı	47
Şekil 3.9 : 1. Eklem tork ihtiyacı	47
Şekil 3.10 : 2. Eklem dinamik analiz hareketi	48
Şekil 3.11 : 1. Eklem güç ihtiyacı	49
Şekil 3.12 : 2. Eklem tork ihtiyacı	49
Şekil 3.13 : 3. Eklem dinamik analiz hareketi	50
Şekil 3.14 : 3. Eklem güç ihtiyacı	51
Şekil 3.15 : 3. Eklem tork ihtiyacı	51
Şekil 3.16 : 4. Eklem dinamik analiz hareketi	52
Şekil 3.17 : 4. Eklem güç ihtiyacı	53
Şekil 3.18 : 4. Eklem tork ihtiyacı	53
Şekil 3.19 : Planlanan rota 1	56
Şekil 3.20 : Planlanan rota 2	56
Şekil 3.21 : Planlanan rota 3	56
Şekil 3.22 : Planlanan rota 4	56
Şekil 3.23 : Eklem açı-zaman grafiği	57
Şekil 3.24 : Eklem açısal hız -zaman grafiği	57
Şekil 3.25 : Eklem açısal ivme- zaman grafiği	58
Şekil 3.26 : Uç işlevci konum- zaman grafiği	58
Şekil 3.27 : Uç işlevci hız-zaman grafiği	59
Şekil 3.28 : Uç işlevci ivme-zaman grafiği	59
Şekil 3.29 : Eklem tork-zaman grafiği	60
Şekil 3.30 : Eklem güç- zaman grafiği	60

İNSANSI ROBOT KOLU ÖN TASARIMI VE ANALİZİ

ÖZET

Dolaylı ve direk robot teknolojisini hayatımızın birçok alanında görüyoruz. Özellikle endüstriyel yaşamda seri üretimin yoğun bir şekilde kullanıldığı sektörlerde ve insan hayatı için tehlike arz eden işlerde, yoğun bir şekilde robotlar kullanılmaktadır. Fakat robotların hayatımızın bu alanlarında sınırlı kalmasının önemli nedenlerinden biri, kullanılan elemanların büyüklüğü nedeni ile gündelik hayatta kullanılmasının zor olmasıdır. Fakat son 25 senedir, özellikle elektronik elemanların küçülmesi ve malzeme teknolojilerinin gelişmesi ile robot teknolojileri kendini daha küçük formlar içerisine sokabilmiştir.

Küçülen ve bu nedenle insan hayatına daha kolay adapte olabilen robot formları sayesinde robot teknolojilerinin insan hayatındaki yerinde büyük artış meydana gelmiştir. İnsan hayatını kolaylaştıracak ve insana hizmet amaçlı üretilen bu robotlar, genellikle insan formunda, insan dayanım ve performans özelliklerine göre tasarlanmaktadır. İnsan özelliklerinde üretilen robotlar sayesinde, insan robot etkileşiminin maksimum düzeyde olması sağlanarak, robotların insan hayatına daha çabuk girmesi amaçlanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında insansı özelliklere sahip olan robot kolu hakkında dünya üzerinde yapılan ve yapılmakta olan çalışmalar incelenmiştir. Bu inceleme ile dünya üzerinde bu konuda en son araştırmaların neler olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışmalardan elde edilen veriler ile insan kol boyutları, çalışma alanı ve istatistiksel çalışma performansı gibi kolu tanımlayan bazı değerler referans olarak alınmıştır.

İnsan kol gücü ile yapılan birçok işte (Seri üretim vb.) insan kolunun yerini alabilecek bir robot tasarlanmış, tasarlanan kolun sahip olduğu özelliklerin mümkün olduğu kadar insansı olması sağlanarak, insan gücü ile tekrarlanarak yapılan işlerde, hızlı bir adaptasyon ile kullanılabilmesi amaçlanmıştır.

Kolun imalata uygun bir şekilde tasarlanıp uzun süreli kullanımlarda aynı performansta çalışabilmesi için 3 boyutlu bir tasarım programından yararlanılmıştır. Böylelikle kolun imalatı öncesinde, bilgisayar ortamında, kolu oluşturan parçalar ve montaj ile ayrıntılı bir şekilde çalışılabilmiştir.

Kolun, araştırmalardan elde edilen istatistiksel sonuçlara yakın dayanım ve performans göstermesi için sonlu elemanlar ve dinamik modeller bilgisayar ortamında kurulmuştur. Sonlu elemanlar modeli yardımı ile koldaki statik yükler altında oluşan sehimler ve gerilmeler incelenmiştir. Dinamik simülasyon modeli yardımı ile ise seçilen motor ve redüktörlerin uygun olup olmadığı denetlenmiştir. Her iki modelden de elde edilen sonuçlar ışığında kol iskeletinde değişiklikler yapılmış ve seçimi yapılan motor, redüksiyon gibi elemanların seçimi güncellenmiştir. Bu şekilde iterasyonlar yapılarak, kolun minimum ağırlıkta olması ve performans kriterlerinin maksimum düzeye çekilerek tasarlanması sağlanmıştır.

PRE-DESIGN OF HUMANOID HUMAN ARM AND ANALYSIS

SUMMARY

Robot technologies are used more and more every day in our lives. Especially in heavy industry, robots are used extensively in serial production and unsafe working areas for humans. Because of their size, robots are not used in daily life by humans. But in the last 25 years, uses of robots have become widespread by development of electronic components and material technologies. With development of these areas, robots are produced in smaller form, so they can be used in daily life for making life easier.

First professional robot researches have been started in 1950s, therefore robotic concepts had been mentioned within only artistic events until that time. After first industrial robot was produced, humans noticed their advantages. Therefore universities started to open new research departments about this subjects. Especially, when microchip technologies have been improved by researchers, robots started to produce in smaller form than before. Thus they have become part of human daily life.

Robots which produced for making life easier are generally designed in human form and human performance properties so that they can be adapted to people's lives easier. If humanoid robots meet people's expectations, people may use them more and more every day. Therefore researchers work on about humanoid robots development. ASIMO, FRIDA and Justin are some of humanoid robot development projects on world.

In this study, a humanoid arm was designed and analyzed with pre-selected criteria. This arm is called ITECH-H1, which is part of a full humanoid robot project. Full humanoid robot project was divided into working areas. Master and PhD students whom, are studying in Istanbul Technical University, work in their thesis about these subjects. Leg and head studies were started. After arm, legs and head projects will be finished. all parts will be merged into one body. Thus artificial intelligence algorithms will be tried on full humanoid robot.

On the other hand, humanoid projects in the world are examined and used as example for our own humanoid arm project. Arm's size, workspace of arm, human arm's statistical working performance etc. were examined from different projects and sources. This information helped to us about preliminary design phase for determination of properties of robot arm. First motor and harmonic drive selection, material selection which is used in structure of arm, sizes of arm, workspace of arm were determined with it.

After preliminary design phase, three dimensional CAD program was used for design phase. In this stage, all parts of the robot arm were modeled and assembled in computer. Manufacturability, easily mounting of parts and be produced in ITU

laboratories as much as possible are most important criteria of arm design. Therefore 11 different designs were created in computer. In every design stage, design was modified with these criteria.

Early designs were helped us about determination of locations and orientations of motors and harmonic drives for each joint. Also, which connection type is used was decided in first designs. Use of welding is bad decision for robot arm production. Because if welding is used for connection of parts, manufacturing will be made difficult with big tolerances values. Therefore, bolt was preferred to connection for mounting.

After first five design, general shape of parts was determined. Strength of humanoid robot arm structure was analyzed with finite element method. Solidworks Simulation program was used for structural analysis.

Arm is positioned to critical load position where is the most dangerous for displacement and stress. Boundary conditions of model were determined from statistical working performance of human. Arm fixed from body connection to ground with 6 DOF. Force and torque loads are applied to end effector. Displacement and stress values were examined from result of finite element analysis. Stress and displacement results were obtained to low than related material properties. Structure of arm was updated with referenced these results. Thus, weight of arm was reduced.

Also selection of motors and harmonic drives were examined with dynamic model of robot arm which was created at MSC Adams program. Each joint was examined for critical motion which occurs most torque and power consumption situation. When joints perform its motion in analysis, load was applied from end effector to humanoid robot arm which simulate disturbing loads from environment to arm. This load is deduced from literature research. Totally 25 analysis were performed for each joint. Five different loads were applied to arm in 5 different time. In results of analysis, needed torque and power consumption values were detected for axes of joints and if properties of selected harmonic drive and motor combination is not suitable for this motions, selection was updated with a new combination.

Finally, arm was simulated dynamically to normal working conditions. In this analysis, arm carries from ground a mass which is 4 kg to another location in nine seconds. As before, values of torque and power consumptions were controlled for each joint, results are within the limits of motor and harmonic drive.

As a result, in this study, humanoid projects in the world are examined and used as example for our own humanoid arm project. Arm's size, workspace of arm, human arm's statistical working performance etc. were examined from different projects and sources. Thus, preliminary design criteria can be determined and has been started to arm design. Designs of arm have been created within 11 iterations. In every iteration, arm was controlled for to be suitable. These criteria are about manufacturability, easily mounting of parts and be produced in ITU laboratories as much as possible etc.

Also finite element and dynamic model of arm were created into computer. With these models, arm has been simulated as working in real world. If any problem was realized in result of analysis, design was updated about solving problem.

In future studies, arm must be detailed about electronic and structural element's locations. Wires, sensors, drives etc. elements haven't been added to 3D model of arm yet, but within analyses they were added to models with their mass. Thus they

will not be any problem about performance of arm. On the other hand, their location is big problem for mounting. That's way they must be modeled with a similar Solidworks Electrical.

Also Arm was controlled statically with created finite element model. In other words, forces which are applied to arm into analysis not changed with time. Therefore, arm hasn't been examined about natural frequencies and vibration subjects After arm will be produced, undesired vibrations could be created by disturbing loads .that's why, arm must be examined with dynamic finite element analysis.

End effector of arm hasn't been modeled yet, but its connection elements were added to 3D model. In future studies, somebody, who will work about end effector, should be designed end effector to these connections. Thus when end effector will be installed to arm, end effector can be mounted to arm without any problem.

1. GİRİŞ

Artan insan ihtiyaçları ve gelişen teknoloji ile birlikte, insanoğlunun robotik teknolojiye olan ilgisi giderek artmaktadır.

Özellikle 1950’lili yıllardan itibaren bilgisayar teknolojisi ile birlikte üretim teknolojilerinde değişimler meydana gelmiştir. Endüstriyel robotların seri üretim hatlarında görev alması ile özellikle belli bir rutinde yapılan işlemler artık robot teknolojisine bırakılmaya başlanmıştır.

Robotlar, gerek minimum hata ile iş çıkarmaları gerekse hızlı ve seri bir şekilde çalışma performansı sağlamaları açısından, özellikle geniş kitlelere hitap eden firmaların tercih sebebi olmuşlardır.

1980’li yıllara gelindiğinde bilgisayar teknolojilerinin daha küçük yapılar içerisine sığdırılması ile karmaşık sistemler ortaya çıkmış ve bu, üretim hatlarında kullanılan robotların, firmaların vazgeçilmezi olması sağlamıştır. 2012 yılına gelindiğinde ise dünya üzerindeki 160.000 den fazla endüstriyel robot satışının gerçekleşmesi bu verileri kanıtlar niteliktedir. (IFR International Federation Of Robotics, 2012)

Robot teknolojileri geliştikçe insan ile robot etkileşimleri artmaya başlamıştır. Robotlar artık sadece üretim hatlarında değil, programlamaları sayesinde insanlara günlük hayatlarında yardım edebilecek bir araç haline gelmişlerdir. Özellikle Japonya gibi yaşlı nüfusu giderek artan ülkelerde, gelecekteki durum göz önüne alınarak insansı robot teknolojilerine büyük yatırımlar yapılmaktadır.

Savunma, sağlık, enerji, hizmet vb. sektörlerde, insanların yapmakta zorlandığı ve insan hayatının tehlikede olduğu durumlarda, insansı robot teknolojileri kullanılmaya başlanmıştır.

1.1 Tezin Amacı

İnsansı robot teknolojilerinin yaygınlaştığı bu günlerde, endüstriyel robot kollarından çok farklı bir yapıya sahip olan insansı robot kolunun tasarımı ve dinamik benzetimlerinin yapılması amaçlanmıştır.

Bu kapsamda insansı robot kolu üzerine dünya üzerindeki yapılan son çalışmalar araştırılmış olup insan fizyolojisi de göz önünde bulundurularak, ilk önce kavramsal tasarım ardındansa, imalata uygun olacak şekilde robot kolunun tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tasarım sırasında insan fizyolojisine göre taşına bilecek maksimum yükler için sonlu elemanlar analizleri yapılmış olup, yapılan analizler ile minimum ağırlık ve maksimum rijitlikte kol tasarımı amaçlanarak, ideal insan kolu ağırlığının yakalanması amaçlanmıştır.

Ayrıca tasarımda kullanılacak motorlar için dinamik analizler gerçekleştirilmiş ve yine insan fizyolojisi göz önünde bulundurularak, optimum motor seçimleri yapılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

1.2.1 Geçmişten günümüze insansı robot tarihi

Robot kavramı günümüze kadar gelmeden önce ilk robot düşüncesi Homeros'un İlyada adlı eserinde insan yapımı kadın hizmetçiler şeklinde geçmektedir. Bu kavramla birlikte insanoğlunun daha ilk varoluşundan itibaren bu tip bir varlığa ihtiyaç duyduğu gözlemlenmektedir.

1920 tarihinde Karel Capek tarafından ilk defa 'Roboti' kelimesi kullanılmıştır ve Çekçe 'Roboti' kelimesi 'Zorla alıştırılan işçi' anlamına gelmektedir.şekil 1.1'de oyunda kullanılan robotu görebilirsiniz.

Robot kavramı, teknolojik gelişmelerin yeterli düzeyde olmaması nedeni ile belli bir döneme kadar sadece tiyatro oyunları ve kitaplarda yerini almaktadır.

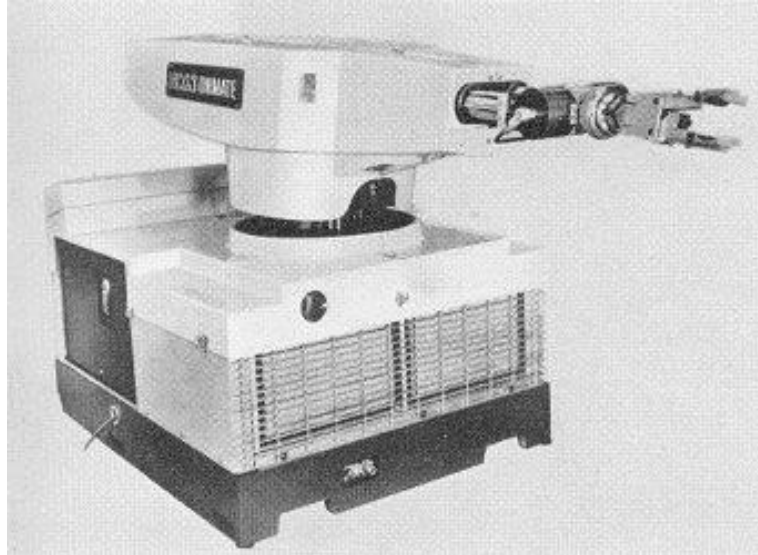
1956 yılında Gorge Devol ve Joe Engelberger 'ın Unimation isimli firmayı kurması ile ilk profesyonel endüstriyel robot üretimi yapılmış(şekil 1.2) ve 1961 yılında ise General Motor şirketinde ilk kez kullanılmıştır.

1963 yılına geldiğimizde Stanford niversitesi kendi bünyesinde yapay zeka laboratuvarını kurmuştur. 1968 yılında aynı laboratuvarı ilk görme duyusuna ve yapay zekâya sahip (Shakey), yapılmıştır. Aynı zamanda 1970 yılında Unimate kolunun daha gelişmiş bir sürümü olan Stanford kolu laboratuvar tarafından tasarlanıp ve üretilmiştir. . (Barutçuoğlu, 2001)



Şekil 1.1 : Capek'in tiyatro oyununda kullandığı robot.

1978 yılında Unimation şirketi, Genaral Motors için PUMA (Programmable Universal Manipulation Arm) seri hatlarda kullanmak üzere tasarlanmıştır. Yani giderek sanayide kullanılan robotların üretimine başlanmıştır.



Şekil 1.2 : Unimation şirketinin üretimde bulunduğu ilk endüstriyel robot.

1979 yılında üretim hatlarında kullanılmakta olan Scara robotlar, Yamanashi Üniversitesi bünyesinde geliştirilmiştir. (IFR Internatinal Federation Of Robotics, 2012)



Şekil 1.3 : Honda P-2 ve P-3 robotları.

İnsansı robotların üretilmesi için, robotlarda en büyük sorun olan yürüme işlemi üzerinde daha ayrıntılı araştırmalar yapılabilmesi için 1980 yılında Marc Raipert tarafından MIT içerisinde Bacak laboratuvarı kurulmuştur.



Şekil 1.4 : Honda tarafından 2012 yılında sunulan son ASIMO.

Ardından geleceğin robotlarda olacağı öngörüsünü yapan Honda şirketi 1986 yılında insansı robot geliştirmek için gizli bir proje başlamış ve P-2 yürüyen insansı robotu

1996 yılında dünyaya tanıtmıştır. Bu tarihten 2 yıl sonra Honda P-3 robotunu tanıtmıştır.

2000 yılına gelindiğinde ise Honda robot programının ismini “Advanced Step in Innovative Mobility” (ASIMO)(Şekil 1.4) olarak değiştirerek, yeni robotu ASIMO’yu dünyaya duyurmuştur. 2000 ile 2012 yılları arasında 5 farklı sürüm çıkarak geliştirmelerine devam etmektedir. (Sakagami & Ryuji Watanabe, 2002)

Uzay araştırmalarında kullanılmak üzere tasarlanacak araçlar arasında insansı robotlar en iyi çözümlerden biridir. Bu nedenle NASA insansı robotlar üzerine 1997 yılında Dextrous Robotics Laboratory kapsamında çalışmaya başlamıştır.



Şekil 1.5 : NASA'nın geliştirmiş olduğu Robonaut 2.

Şubat 2010 tarihinde uzay çalışmalarında kullanılmak üzere Robonaut 2(Şekil 1.5) NASA tarafından Dünya'ya tanıtılmıştır. (Diftler, Spain, & Radford, 2004)

İspanyada kurulan Pal Robotics, 2006 yılından itibaren insansı robotlar üzerine çalışmalarına devam etmektedir. Reem Serisi robotların sonuncusunu 2010 yılında tanıtmıştır(Şekil 1.6). Tanıtımı yapılan robot ile daha çok hizmet ve insana yardım amaçlanmaktadır. Gerek arkasındaki yük haznesi ile gerekse yüksek yük kaldırma kapasitesi ile bunu hedeflemektedir. Şekil 1.6'de Reem serisi üretilmiş olan robota ait bir fotoğrafı görebilirsiniz.



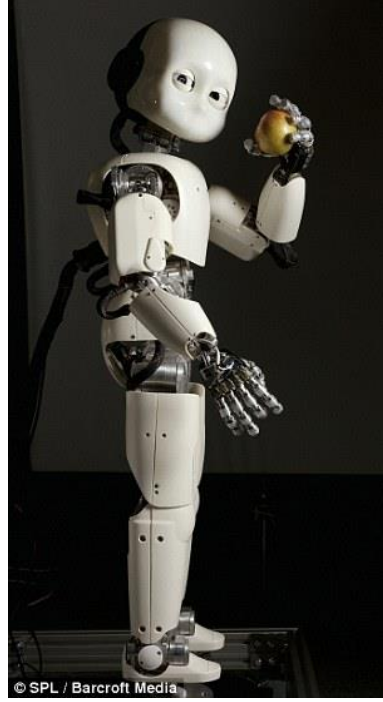
Şekil 1.6 : Reem 2010.

Bir diğer insansı robot projesi ise, Avrupa birliği tarafından desteklenen, Avrupa birliği çatısı altında kurulan RobotCub konsorsiyumu ile çalışmalarına devam edilen Icube projesi diyebiliriz. Ufak bir çocuk boyutlarında olan bu insansı robot projesi, açık kaynak bir proje olma özelliği taşımaktadır.

İnsansı robotlar olarak son olarak 2012 yılında tanıtımı yapılmış olan COMAN'dir. (Şekil 1.8) (COMAN Humanoid Robot, 2012) Icube'ta olduğu gibi yine Avrupa birliği destekli başka bir proje olan AMARSI European Project kapsamında geliştirilmiştir.(Şekil 1.7)

Görüldüğü üzere dünya üzerinde birçok ülke ve kuruluş bu tip çalışmalara ağırlık vermiş durumdadır. Bahsetmiş olduğum projeler dışında özellikle Uzakdoğu ülkelerinde yaşanan nüfusla birlikte insanlara yardım etmesi amacı ile birçok robot geliştirilmeye devam etmektedir.

Ülkemizde ise insansı robot teknolojilerine Sabancı Üniversitesi 2002 ile 2010 yılları arasında geliştirilen SURALP isimli robot ile adım atmıştır.



Şekil 1.7 : Icube.



Şekil 1.8 : COMAN.

1.2.2 İnsansı robot kolu alanına yönelik yapılan çalışmalar

İnsansı robotun en önemli parçalarından biri kol bölümüdür. İnsansı robotlar, kol bölümü sayesinde etrafı ile etkileşim haline geçebilir veya verilen bir görevi yerine Bilindiği gibi insan kolu belli bir dereceye kadar elastik bir yapıya sahip ve kolların hareketleri kaslar yardımı ile yapılmaktadır. Araştırmacılar bu yapıyı taklit edebilmek için kola fazladan serbestlik dereceleri yerleştirmek, kas benzeri yapılar

kullanmak gibi değişik yöntemler üzerine çalışmaktadırlar. Özellikle son zamanlarda yapılan çalışmalar, kas benzeri yapılar ile kontrol edilebilen esnek tasarımlar üzerinedir.

Bu bölümde son yıllarda yapılan insansı kol tasarımlarını incelersek;

1.2.2.1 Festo Airic's arm

Festo'nun 2007 yılında başlatmış olduğu Airic's Arm projede(Şekil 1.9), herhangi bir motor kullanmadan, insan kaslarına benzer, kendi ürünü olan “fluidic muscle” kullanarak robot kolu tasarımı gerçekleştirmiştir.



Şekil 1.9 : Festo Airic's arm.

Kullanılan yapay kasaların basınçlı hava yardımı ile %5 uzama, %25 kısalabilme kabiliyeti vardır. Bu kısalma ve uzama hareketi sırasında kullanılan yapay kasın tipine göre 6000 N 'a varan kaldırma kuvveti mevcuttur.

Tasarımı yapılan bu kolda değişik ölçülerden 32 yapay kas grubu kullanılmıştır. Bu kas yapıları ile insan kolunun sahip olduğu 7 serbestlik derecesi elde edilmiştir. (Festo, 2010). Fazladan verilen serbestlik derecesi sayesinde kolun aynı pozisyona farklı şekillerde gitmesi sağlanmış ve gerçek kolun sahip olduğu esneklik modellenmeye çalışılmıştır.

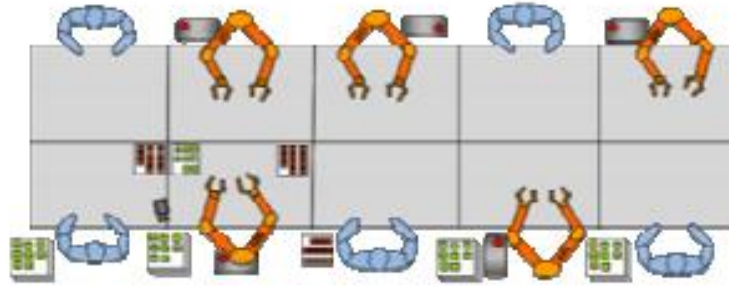
1.2.2.2 Rosetta project

ABB firması tarafından 2007 yılında başlatılan Rosetta Projesi, insan benzeri robotların insanlar ile iletişim halinde bulunarak çalışması amaçlanmıştır. Endüstride şu an kullanılan robotların gerek ebat olarak insanla beraber çalışabilecek ölçülerde olmaması gerekse adaptasyon konusunda yeteri kadar hızlı olamaması nedeni ile bu projeye başlanmıştır.



Şekil 1.10 : Frida.

Bu kapsamda 2 adet koldan oluşan ve insan ölçülerinden oluşan FRIDA (Friendly Robot for Industrial Dual-Arm Assembly) (Şekil 1.10) tasarlanmıştır. İnsanla benzer şekilde her bir uzvunda 7 serbestlik derecesi bulunan Frida tasarlanırken, insanlar ile rahatlıkla çalışabilmesi ve farklı işlere hızlı bir şekilde adaptasyon sağlaması amaçlanmıştır.



Şekil 1.11 : Rosetta project.

Proje sonrasında ortaya çıkacak olan robot, üretim hatlarında insanlar ile birlikte iletişim halinde çalışacağından dolayı, insan ile Frida etkileşimleri robotun kontrol sistemi tasarlanırken göz önünde bulundurulmuştur. Bu şekilde yaralanmaların ortadan kalkması amaçlanmıştır. (Park, Kyung, Choi, Do, Kim, & Lee, 2012)

1.2.2.3 Rabonaut arm

NASA'nın DARPA ile 1996 yılında geliştirmeye başladığı Rabonaut İnsansı robotu, özellikle uzay içinde insan hayatının tehlikeye düştüğü ve insanın gitmesinin mümkün olmadığı görevlere kullanılması amaçlanmıştır.



Şekil 1.12 : Robonaut arm.

R1 modelinin 1998 yılında ilk önce kol tasarımları bitirilmiş, ardından 2000 yılında 2 kollu, gövde ve baş kısmı olacak şekilde geliştirilmiştir. Farklı gezegen yüzeylerinde rahat hareket edebilmesi için 4 tekerlekli ve 2 tekerlekli olan 2 farklı versiyonu gerçekleştirmiştir. (Diftler, Spain, & Radford, 2004)



Şekil 1.13 : Rabonaut 2.

2006 yılında NASA General Electric ile Rabonaut 2'inin geliştirilme çalışmalarında başlamıştır. Yapılan bu tasarımın amacı, uluslararası uzay istasyonunda kalıcı olarak

görev yapacak olan bir insansı robot ortaya konması idi. Bu proje 2010 yılında dünyaya sunulmuştur. 24 Şubat 2011 tarihinde başlayan STS-133 uçuş operasyonu ile uluslararası Uzay istasyonuna taşıma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.13'de Rabonaut 2'yi görebilirsiniz.

Rabonaut 2 yapı itibari ile 132kg, kafası ile birlikte 100cm uzunluğunda, omuz genişliği 80 cm'dir. 54 Servo motoru ile toplam 42 serbestlik derecesine sahiptir. Rabonaut 1'de olduğu gibi 2'de de kollar üzerinde 7'şer serbestlik derecesi mevcuttur ve yine harmonic drive kullanılmıştır. (Ambrose, 2005)

1.2.2.4 UR10

Universal Robot şirketi tarafından Danimarka'da geliştirilen robot FRIDA'ya benzer şekilde üretim hatlarında insanlar ile etkileşimli bir şekilde çalışması için tasarlanmıştır.

Özelliklerinden bahsetmek gerekirse;

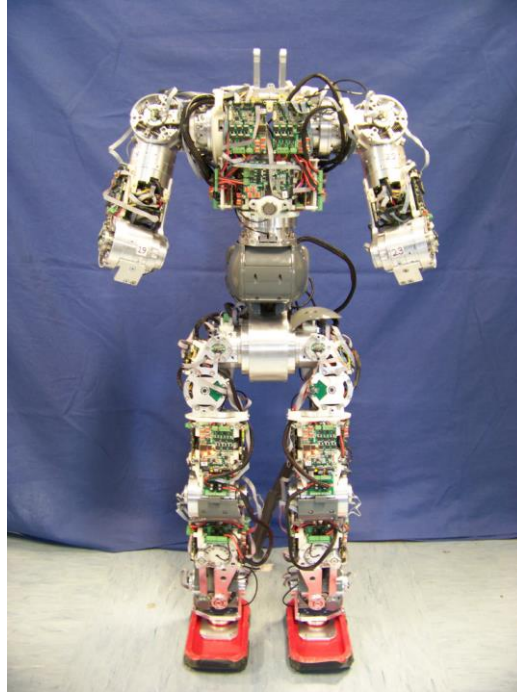
UR10 tasarlanırken 6 serbestlik derecesi dikkate alınmıştır (Şekil 1.14). Tüm eklemlerinin 360 derece dönebilmekte ve 130 mm menzili bulunmaktadır. Her bir ekleme 120/180 deg/sn hıza çıkabilmektedir. 10 kg'lık taşıma kapasitesi mevcuttur. (Danish Technological Institute, 2012)



Şekil 1.14 : UR1.

1.2.2.5 Compliant humanoid platform (COMAN)

AMARSI Avrupa Projesi altında çalışmalarına devam edilen COMAN projesi, modern mekanik malzemeler kullanılarak robotun etrafındaki cisimler ile maksimum etkileşim içerisinde çalışması amaçlanmıştır. Bu nedenle robotun kontrol algoritmalarının öğrenme ağırlıklı olmasını sağlamışlardır ve bu algoritmalarda insan güvenliği ve minimum enerji tüketimi yine ön plandadır.

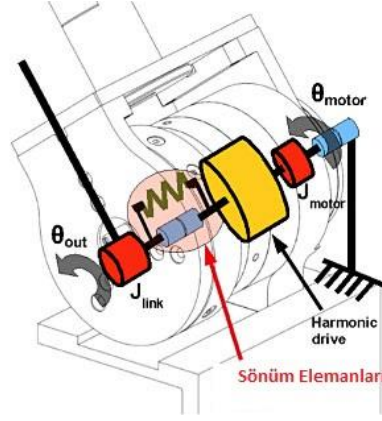


Şekil 1.15 : COMAN mekanik tasarımı.

Boy uzunluğu toplamda 95 cm olan robotun toplam ağırlığı 31 kg'dır. Tüm mekanik elemanlar titanyum alaşım, paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımlar kullanılarak yapılmıştır.

Robot tasarımında toplam serbestlik derecesi 25'tir. Bacaklarında altışar, belide 3 ve kollarında 4'er adet serbestlik derecesi bulunmaktadır. Kol tasarımında bilek ve el tasarımları şu anda yapılmıştır. Kolda bulunan 4 serbestlik derecesinin 3'ü omuzda 1'i ise direkte olacak şekildedir.

Her bir eklemden bulunan tork sensörleri, aktif bir şekilde tork kontrolü yapabilmesine imkân vermektedir. Ayrıca eklemlerde bulunan elastik tahrik elemanları sayesinde kolun beklenmedik durumlarda motor üzerine yük bindirilmesi engellemekte ve kolun pasif bir şekilde beklenmedik durumun ortadan kalması ile eski konumunu alması sağlanmaktadır.



Şekil 1.16 : Coman elastik tahrik elemanı.

Şekil 1.16’te de görüldüğü gibi motor harmonic drive ve sönüm elemanları sırası ile tasarım yapılmıştır. Çıkıştan herhangi bir beklenmedik tepki geldiğinde motorun bu kuvvetleri sönüm elemanlarının yardımı ile kontrol etmesi sağlanmıştır. (COMAN Humanoid Robot, 2012)

1.2.2.6 DLR hand arm system

Almanya Uzay Araştırmaları merkezinde geliştirilen robot, insan ile etkileşim içinde çalışan bir robotun günlük hayatta karşı karşıya kalabileceği her türlü etkiye karşı maksimum dayanıklılıkta olması amacı ile tasarlanmıştır.



Şekil 1.17 : DLR hand arm system.

Şekil 1.17’da görülen robot kol tasarımı etraftan gelen beklenmedik tepkilere karşı her bir eklemden bulunan değişken pasif sönüm elemanları ve 3 farklı değişken sertlik tahrik elemanı ile kartezyen empedans kontrol uygulanarak maksimum rijitlik elde edilmiştir.

Kol ve el tasarımı toplamda 26 serbestlik derecesine sahiptir. (Kol üzerinde 7 serbestlik derecesi, el üzerinden ise 21 serbestlik derecesi mevcuttur). 26 serbestlik derecesi toplam 52 motor yardımı tahrik edilmiştir. Kolda herhangi tork sensörü kullanılmamıştır.

Ayrıca kol üzerinde elastikiyet sağlanan elemanlar ile potansiyel enerji biriktirimi yaparak, bu enerjiyi devamında gelen hareketlerde kullanmaktadır. Bu şekilde enerji tüketiminde azalma sağlanmıştır.

1.2.2.7 Rollin' Justin

Almanya Uzay araştırmaları merkezi bünyesinde geliştirilen diğer bir robot olan Justin, ev ya da uzay ortamında insana yardımcı olacak bir robot olması amacı ile tasarlanmıştır. Altında bulunan 4 tekerlek sayesinde maksimum hareket kabiliyetine sahiptir. 2 eli ve geri besleme olarak kullanılan kamera sistemi ile her türlü operasyonu başarı ile gerçekleştirmektedir.

Justin ellerinde kollarında 7şer, ellerinde ise 12şer serbestlik derecesine sahiptir. Toplam robotun serbestlik derecesi ise 43'tür. 14 kg taşıma kapasitesi mevcuttur. Üzerinde toplam 41 adet tork ve 43 adet pozisyon sensörü bulunmaktadır.

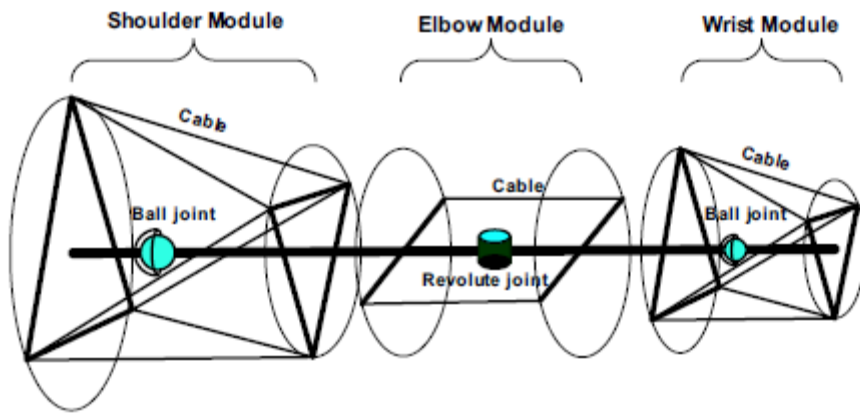


Şekil 1.18 : Rollin' Justin.

Ağır yük kaldırabilme ve güçlü görüntü işleme kabiliyeti sayesinde gerek üretim sistemlerinde gerekse insanlara yardımcı olacak işlemlerde kullanılması amacı için üzerinde çalışmalara devam edilmektedir. (Sporer, 2004)

1.2.2.8 SHERPA

Kablolu yapılardan özgün bir örnek de iskelet için karbon-fiber kullanan yapı SHERPA'da görülmektedir(**Hata! Yer işareti başvurusu geçersiz.**). Burada sadece kablolu sistemin hafifletici etkisi kullanılmamış aynı zamanda karbon fiber iskelet yapısı ile bu hafiflik korunurken rijit bir yapı elde edilmiş, kablo hareketleriyle kontrol edilen pozisyon bilgisinde kayıplar olmadan iletilebilmesi için diferansiyel dişli entegre edilmiştir. SHERPA'daki tasarım özgünlüklerinden biri de beş eksenli motor ve kayma olmadan hareket iletimi için vidalı mil mekanizması kullanmasıdır. (Olaru, Krut, & Pierrot, 2009)



Şekil 1.19 : Sherpa kablo yapısı.

2. KOL TASARIMI

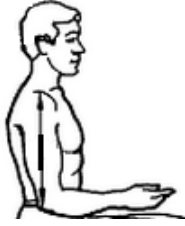
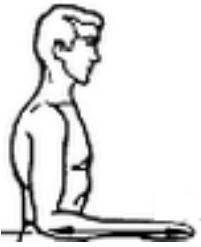
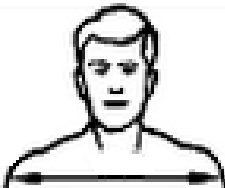
2.1 İnsansı Robotun Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi

İnsansı robot tasarımına başlamadan önce, insan kolunun sahip olduğu kabiliyetler hakkında bilgi sahibi olmamız gerekir. Belirlenen bu özellikler ışığında tasarım ortaya çıkacaktır.

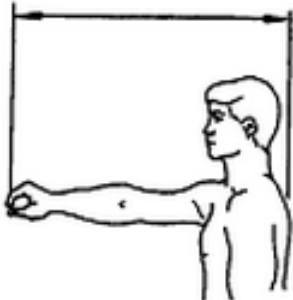
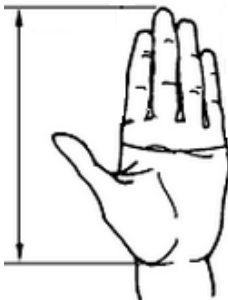
2.1.1 Uzunluklar

Aşağıdaki uzunluklar 40 yaşındaki ortalama bir Amerikan erkeği için verilmiştir. (National Aeronautics and Space Administration, 2013). Tablolarda verilen değerler binlerce insan üzerinde yapılan istatistiksel çalışmalar sonucu ortaya konmuştur. Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2 de çalışmamalardan ortaya çıkan kola ait değerler verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Ortalama insan kolu uzunlukları 1.

Kolun Bölümleri		Ortalama Uzunluklar (mm)
	Omuz Dirsek Arası Uzunluk	394
	Dirsek-Parmak Uçları arası Uzunluk	446
	Omuzlar Arası Genişlik	532

Çizelge 2.2 : Ortalama insan kolu uzunlukları 2.

Kolun Bölümleri	Ortalama Uzunluklar (mm)	
	Kol uzunluğu	979
	Sırt-Parmak Ucu Arası	882
	El Uzunluğu	187

2.1.2 Hareket Kabiliyeti

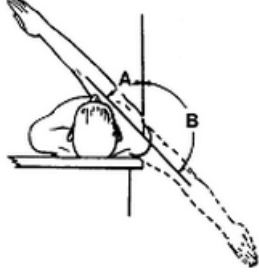
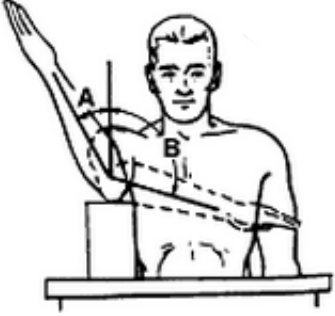
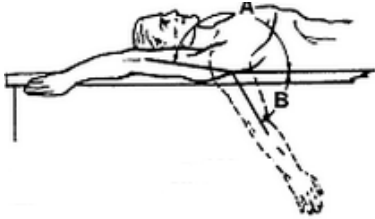
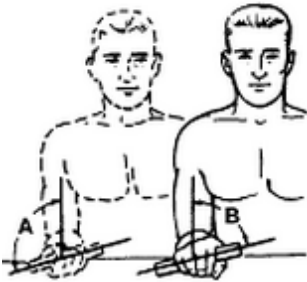
Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4'te verilen insan hareket kabiliyetleri 40 yaşındaki ortalama bir Amerikan erkeği için verilmiştir. Bu kabiliyetler kişiden kişiye ırktan ırka, kişi kilo ve boyuna vb. özelliklere göre farklılık gösterebilmektedir. Bu tablolar bize ortalama kabiliyetleri vermektedir.

Bu hareketleri insan kolu çalışma alanı olarak özetleyebiliriz. İnsan kolu gerek esnek yapısı ile gerekse kaslar yardımı ile hareket etmesinden dolayı sahip olduğu kol uzunluğunun rijit kabiliyetinden daha fazla bir çalışma alanına sahiptir.

Literatür araştırmalarında da bahsedildiği gibi araştırmacılar insan kolu üzerinde çalışırken bu esnekliği ve kaslar ile hareket etme kabiliyetini taklit etmeye

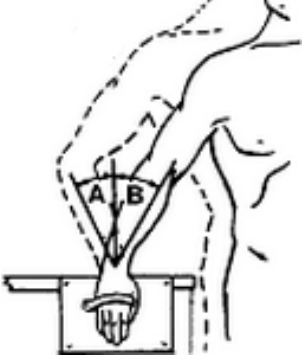
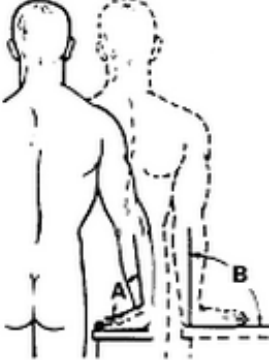
çalışmaktadırlar. Bunu gerek kas benzeri yapılar kullanarak gerekse fazladan serbestlik dereceleri vererek sağlamaktadırlar.

Çizelge 2.3 : Ortalama bir insan kolu hareket kabiliyeti 1.

Kolun Bölümleri	Hareket Kabiliyeti (Deg)
	Omuz Yatay Hareketi A+B 188,7
	Omuz Döndürme Hareketi A 96,7 B 126,6
	Omuz Germe Basma Hareketi A 210,9 B 83,3
	Ön Kol Döndürme A 125,8 B 116,1

Çizelgelerde verilenler, temel insan kolunun hareket alanını tanımlayan istatistiksel çalışmalardır. İstenirse bunlara farklı hareketler eklenerek ayrıntı verilebilir.

Çizelge 2.4 : Ortalama bir insan kolu hareket kabiliyeti 2.

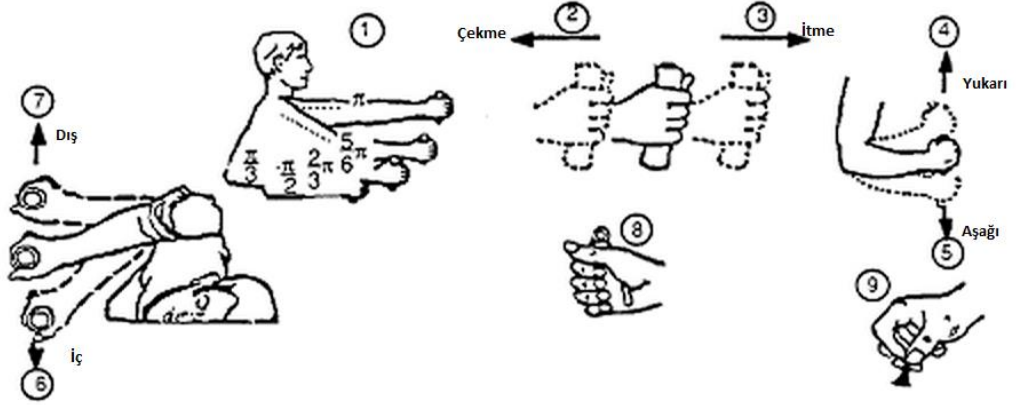
Kolun Bölümleri	Hareket Kabiliyeti (Deg)
	Direk Bükülme A 159
	Bileğin Radyal ve Ulnar Bükülmesi A 47,9 B 36,7
	Bilek Germe Basma Hareketi A 94,8 B 78

2.1.3 İnsan kolu dayanımı

Aşağıdaki şekillerde ve tablolarda, insan kolunun dayanım gücüne dair bilgileri bulabilirsiniz. Tüm bilgiler 40 yaşındaki bir Amerikalı adamın ortalama değerleridir.

Şekilde verilen hareket tanımlamaları, tasarlanacak olan insansı robot kolunun kullanımı sırasında en çok karşılaşılabilecek hareketlerdir. Tasarım üzerinde kullanılacak olan motor ve dişli mekanizmasının seçimleri bu değerler göz önünde bulundurularak yapılacaktır. Kolunun imalatı öncesi verilen değerler ile kol

bilgisayar üzerinde sınanarak, seçimi yapılan elemanların, istenilen hareketleri yapıp yapmadığı yorumlanacaktır.



Şekil 2.1 : İnsan kolu dayanım şekilleri.

Şekil 2.1'deki figürlere ait dayanım değerlerini Çizelge 2.5 ve Çizelge 2.6'te görebilirsiniz. (National Aeronautics and Space Administration, 2013). Bu değerler insanlar üzerinde yapılan istatistiksel çalışmalar sonucunda ortaya konulmuştur.

Çizelge 2.5 : İnsan kolu dayanım tablosu 1.

(1)	(2)		(3)		(4)		(5)		(6)		(7)	
Dirseğin hareket serbestliği (rad)	Çekme		İtme		Yukarı		Aşağı		İç		Dış	
	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ
π	222	231	187	222	40	62	53	75	58	89	36	62
$5/6 \pi$	187	249	133	187	57	80	80	89	67	89	36	67
$2/3 \pi$	151	137	116	160	76	107	93	116	89	98	45	67
$1/2 \pi$	142	165	98	160	76	89	93	116	71	80	45	71
$1/3 \pi$	116	107	96	51	67	89	80	89	76	89	53	76

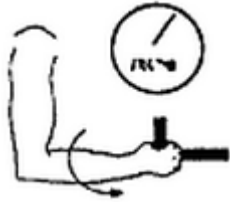
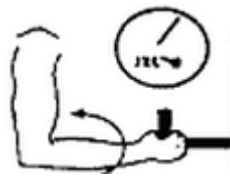
Çizelge 2.6'te verilen değerlerde, kolun yaptığı harekete göre sağ ve sol kolun farklı değerlerde tepki verdiği görülmüştür. Bu farklılık insan doğası gereği sağ elini daha çok kullanmasından kaynaklanmadır. Tasarlanacak olan kolda bu farklılık bulunmayacaktır. Sağ ve sol kol dayanım değerinin ortalaması alınarak, kol tasarımı bulunan değer üzerinden şekillenecektir.

Çizelge 2.6 : İnsan kolu dayanım tablosu 2.

	8		9
	El İle Sıkıştırma		Parmak Uçları İle Sıkıştırma
	Sol	Sağ	
Sıkma Momenti	56	59	60
Tutma Momenti	33	35	35

Çizelge 2.7 içerisinde verilen değerler insan eli ile yapılabilen maksimum sıkma ve tutma momentlerdir. (National Aeronautics and Space Administration, 2013) Bu tez konusu başlığı altında el tasarımı bulunmamasına rağmen, bu değerler de kol üzerine etkiliyor kabulü yapılarak hesaplamalarda kullanılmıştır.

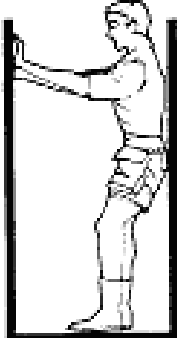
Çizelge 2.7 : İnsan kolu dayanım tablosu 3.

Maksimum Tork Tipi	Uygulanabilen Yük (Nm)
	13,73
	17.39

Robot kolu için Çizelge 2.7’de verilmiş olan maksimum ortalama tork değerleri kol için çok önemlidir. Robot yapması düşünülen parça montajı vb. işlerde yoğun olarak sıkma işlemi kullanacaktır. Bu nedenle kolun insansı özelliklere sahip olması açısından bu değerleri karşılaması gerekmektedir.

Sıkma sonucu oluşan tork değerlerinde, diğerlerinde olduğu gibi sağa ve sola hareket sonuçlarında farklılıklar bulunmaktadır. Kol için bu değer sağ ve solun ortalaması olarak alınacaktır.

Çizelge 2.8 : İnsan kolu dayanım tablosu 4.

Şekil	Kuvvet Uygulanma Yüksekliği	Uzaklık (mm)	Kuvvet(N)
	Omuz Yüksekliği	50	583
		60	667
		70	983
		80	1285
		90	979
		100	645
	Omuz Yüksekliği	50	369
		60	347
		70	520
		80	707
		90	325
	50	100	774 (174)
	50	120	778 (175)
	70	120	818 (184)

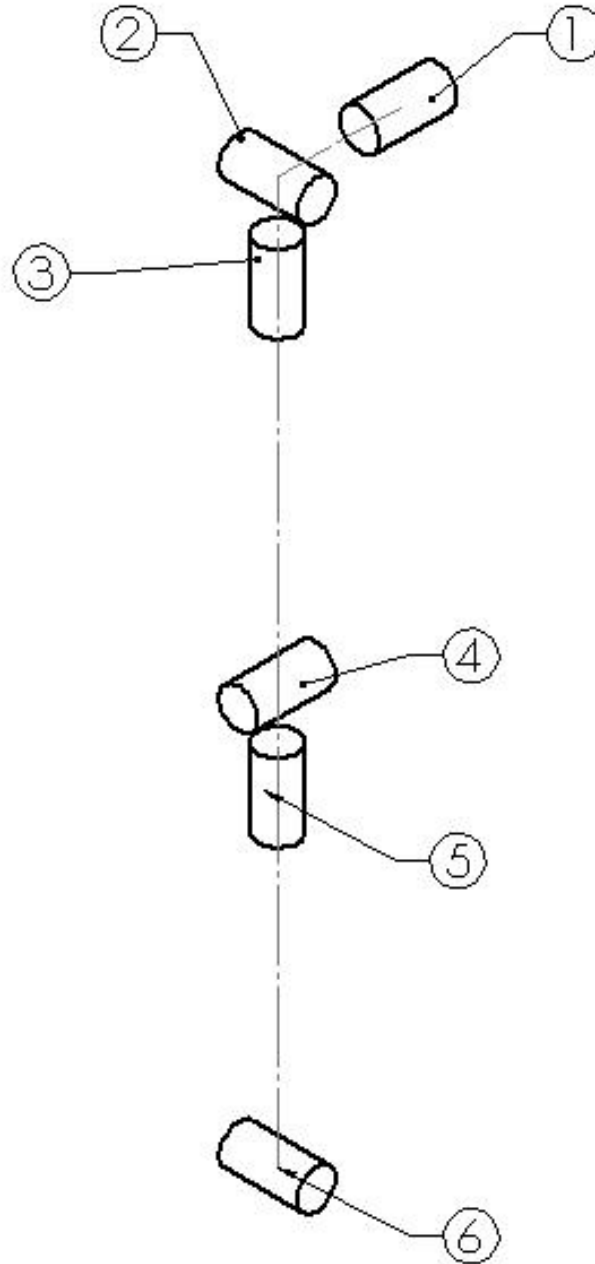
2.2 Ön Tasarım

Herhangi bir tasarım işinde olduğu gibi insansı kol tasarımında da çeşitli iterasyonlar sonrasında son tasarıma ulaşılabacaktır. Ön tasarımlar ve tasarımlara bağlı olarak yapılacak olan analizlerde kolun son geometrisi ortaya çıkacak ve son elemanların seçimi yapılacaktır.

Literatür araştırmalarında da görüldüğü üzere insan kolunun temsili 7 serbestlik derecesi ile sağlanmaktadır. Bu serbestlik dereceleri 3 omuz 1 dirsek ve 3 bilek olarak çalışmalarda dağıtılmıştır.

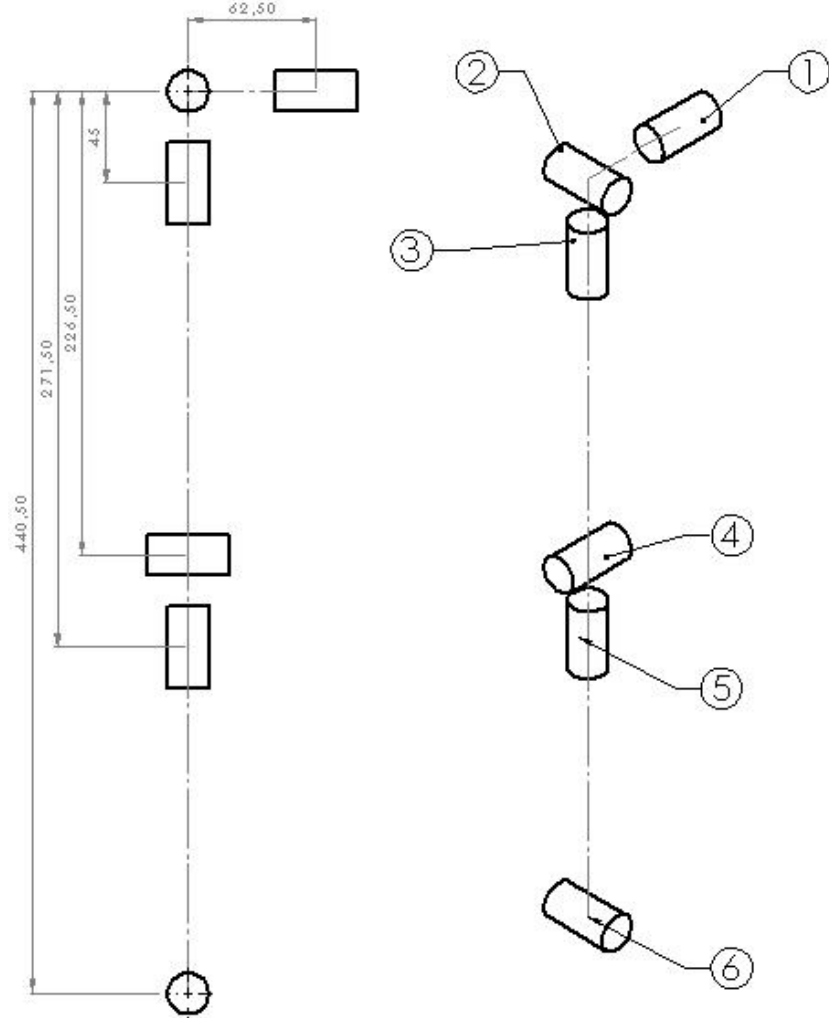
Uzayda herhangi bir noktaya ulaşmak için 6 serbestlik derecesi yeterli olmaktadır. 6 üzerinde serbestlik derecesinin kullanılması kola fazladan bir hareket imkânı sağlayacak ve çalışma alanı içerisinde 1 noktaya farklı pozisyonlar ile gidebilme şansına sahip olabilecektir.

Kendi tezimde gerek tasarım kolaylığından dolayı, gerekse insan kolunu iyi temsil edeceğini düşündüğüm 6 serbestlik derecesi için çalışma yapacak olup bu serbestlik derecelerin 3'ü omuzda, 2'si dirsekte ve sonuncusu bilekte olacaktır. Şekil 2.2'de bu dağılımı görebilirsiniz.



Şekil 2.2 : Kol tasarımı serbestlik dereceleri dağılımı.

Kol boyutları hakkında bir önceki bölümde ayrıntılı olacak bahsedilmişti. Yapılan araştırmalar sonucu elde edilen ortalama insan kolu boyutları kullanılarak tasarım çalışmalarına başlanılmıştır.



Şekil 2.3 : Kol tasarımı boyutlar.

Yapılan kol tasarımında omuz ile bilek arası bölümlere yer verilmiştir. Yapılan ilk kavramsal tasarımlarda el hariç, omuz bilek arası 440,5 mm'dir. Diğer ölçüler hakkında Şekil 2.3'dan dan bilgi sahibi olabilirsiniz.

Robotun sahip olacağı ve hedeflenen özellikler Çizelge 2.9'de belirtilmiştir. Robotun yük taşıma kabiliyeti ve eksen hızları, motor ve harmonic drive seçiminde çok önemlidir. İstenilen hızlara göre dinamik analizler gerçekleştirilerek motor ve harmonic drive seçimi bu sonuçlara göre yapılacaktır. Dinamik analiz bölümünde bu konu ile ilgili ayrıntılı bilgiye ulaşabilirsiniz.

2.2.1 Kullanılan elemanlar ve malzeme bilgileri

2.2.1.1 Motor

Kol tasarımında motor seçimleri Maxon marka motorlar üzerinden yapılacaktır. Maxon marka motorlar gerek insansı robot projelerinde önerilmesi gerekse temininin kolay olması nedeni ile seçilmiştir. Seçilen motor türleri hakkında ileri bölümlerde ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

Çizelge 2.9 : Kol tasarımı hedeflenen özellikler.

Özellik	Değer
Yükleme Sınırı	3kg
Serbestlik derecesi	6
Toplam Ağırlık	6 kg

Çizelge 2.10 : Eksen hareket kabiliyet hedefleri.

Eksenler	Menzil	Eklem Hızı
Eksen 1	$\pm 180^\circ$	80 %s
Eksen 2	$-4^\circ/+170^\circ$	80 %s
Eksen 3	$\pm 180^\circ$	80 %s
Eksen 4	$\pm 110^\circ$	80 %s
Eksen 5	$\pm 180^\circ$	80 %s
Eksen 6	$\pm 90^\circ$	80 %s

2.2.1.2 Harmonic drive

Kol tasarımında, motorlarda alınan tork miktarını yükseltmek için harmonic drive kullanılmıştır. Harmonic drive minimum yer kaplama ve ağırlık ile yüksek redüksiyon oranını veren bir makine elemanıdır. Bu tip robot projelerinde sahip olduğu özellikler nedeni ile çok kullanılmaktadır.(Şekil 2.4)

Mekanizmanın sahip olduğu özellikler;

- Sıfır diş boşluğu
- Çok iyi tekrarlama bilirlilik
- 1/30'dan 1/320'ye yüksek redüksiyon oranı
- Uzun Ömür
- Redüksiyon/ağırlık ve redüksiyon/hacim oranı çok düşük vb. (Drive, Harmonic, 2010)



Şekil 2.4 : Harmonic drive firmasına ait CDG komponent seti.

Bu gibi özelliklerden dolayı harmonic drive, tork arttırıcı eleman olarak kullanılmıştır. Üretici firmanın robotik tasarımlarda önerisi olan ve tasarım kolaylığı sağlayan CSG serisi harmonic drive setleri tasarımda kullanılmıştır. İlgili seti Şekil 2.4'te görebilirsiniz.

2.2.1.3 Malzeme

Kol tasarımında en önemli bileşenlerden bir tanesi ağırlık olduğundan, kolun tasarımında malzeme olarak alüminyum 7075-T6 alaşımı seçilmiştir. Bu malzeme özellikle havacılık sektöründe ağırlık/dayanım oranının yüksek olması nedeni ile kullanılmaktadır. Malzemeye ait özellikler aşağıdaki gibidir.

Yukarıda belirtilen özellikler kullanılarak, kolun sonlu elemanlar modeli oluşturulacak ve kolun belirtilen yükler altında statik dayanımı incelenecektir.

Çizelge 2.11 : Alüminyum 7075-T6 alaşımı mekanik özellikleri.

Özellik	Değer
Yoğunluk	2.81g/cc
Elastik Modül	71.7 GPa
Poisson Oranı	0.33
Kopma Gerilmesi	572 MPa
Akma Gerilmesi	503 MPa

2.3 Tasarımlar

Tasarımlar için SolidWorks 2013 programı kullanılmıştır. SolidWorks programı içerisinde tüm montaj ve tasarım işlemleri yapılmış ve analiz programları için gerekli olan değerler, CAD datalar üzerinden aktarılmıştır.

Kol üzerinde yapılan sonlu elemanlar analizleri için, Solidworks Simulation, dinamik analizler içinse, MSC Adams programı kullanılmıştır. Bu programların doğruluğu ile ilgili analitik hesap karşılaştırmaları ekte verilecektir.

Son tasarım olarak gösterilen tasarım öncesinde 11 adet iterasyon yapılmıştır. Bu iterasyonlar ile tasarım sınırları içerisinde istenilen sınır koşullarında gereken performans değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu sıra şu şekildedir ;

1. Çeşitli kabuller ile ön tasarım gerçekleştirilir
2. Yapılan ön tasarımın dayanıklılığının analizi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılır. Eğer tasarımda istenilmeyen bir durum var ise 1. Maddeye geri dönülür.
3. Yapılan doğrulama ardından, istenilen sınır koşulları altında kolun seçilen motorlar ile istenilen kabiliyette davranıp davranmadığı dinamik analizler ile kontrol edilir. Seçilen motor tasarımı istenilen şekilde tahrik etmiyor ise, motor değişimi yapılır. Değişim ile birlikte geometride değişiklik gerekiyorsa 1. Maddeye geri dönülür.

Yukarıdaki sıra ile iterasyonlar gerçekleştirilerek tasarıma yön verilmiştir.

2.3.1 Tasarım 1

İlk tasarım çalışması Şekil 2.5'te gösterilmiştir. İlk tasarım çalışması kavramsal tasarımda düşünüldüğü gibi omuzda 3, dirsekte 2, bilekte 1 serbestlik derecesi olacak şekilde oluşturulmuştur. Kol üzerinde tahminin karşılayabileceği düşünülen harmonic drive ve motor elemanları seçilerek yerleştirilmiştir. Ayrıca temsili olarak uç işlevci tasarlanmış ve kol ucuna eklenmiştir.



Şekil 2.5 : İnsansı kol tasarımı 1.

Kol tasarım 1 ile motor ve harmonic drive yerleşimlerini omuzda 3 serbestlik derecesi olacak şekilde yapımının zor olduğuna karar verilmiştir. 3. Serbestlik derecesinin kola paralel olacak şekilde yerleştirilmesinin yerleşim açısından daha kolay olacağı görülmüştür. Ayrıca iskelet yapısında kullanılacak olan sac levha şeklindeki parçaların, imalat toleranslarının yüksek olması nedeni ile vazgeçilmiş ve bu parçalarında CNC freze tezgâhında imal edilecek şekilde yapılmasına karar verilmiştir. Üretim için çoğunlukla İTÜ imkânları kullanılacağından, İTÜ bünyesindeki tezgâhların kabiliyetlerine göre parçalar tasarlanmıştır.

2.3.2 Tasarım 5

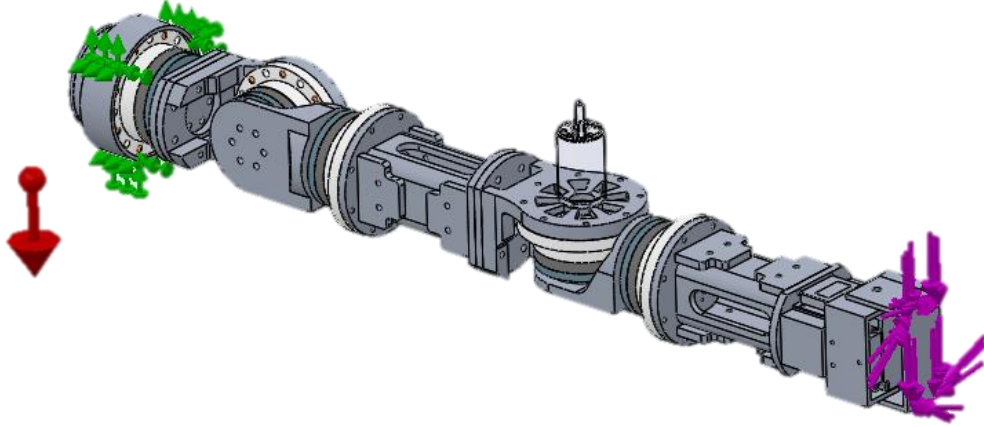
İlk tasarım ile tasarım 5 arasında birçok tasarım yapılmış ve imal edebilirlik ve kontrol edilebilirlik açısından incelerek iterasyonlar gerçekleştirilmiştir. Tasarım 5'e ait görüntüyü Şekil 2.6'da görebilirsiniz.



Şekil 2.6 : İnsansı kol tasarımı 5.

Tasarım 5'te parçaların tümü imal edilebilecek şekilde tasarlanmıştır. Kol üzerinde kaynak bağlantı yöntemi kullanılmasının imalat toleranslarını yükselteceği düşünülmüş, kolu oluşturan her bir parçanın cıvata, pim vb. elemanlar ile bağlanması gerektiği düşünülmüştür. Bu nedenle bağlantı elemanlarının yerleştirilmesi için gereken delikler açılmıştır. Tasarlanan kolun statik olarak incelenmesinin yapılabilmesi için solu elemanlar modeli oluşturulmuş ve kol üzerinde oluşan sehimler ve gerilme sonuçları incelenmiştir. Şekil 2.7'te tasarım 5'e ait Solidworks programı içerisinde alınmış görüntüsünü inceleyebilirsiniz.

Sonlu elemanlar modelinde kol, üzerinde en çok sehim ve gerilme oluşacağı düşünülen pozisyona getirilmiştir. Kol üzerine uç işlevci üzerinde yer çekimine paralel olacak şekilde 5 kg'lık yük ve kol ekseninde 5 Nm'lik tork uygulanmıştır. Bu kuvvetler kolun modellenemeyen bölümlerini ve üzerine gelmesi düşünülen bozucu etkileri temsil etmektedir.



Şekil 2.7 : Tasarım 5 sınır şartları.

Sonlu elemanlar sonuçları incelendiğinde kol üzerinde, maksimum 3 mm yer değiştirme ve 10 MPa gerilme meydana gelmiştir. Sonuçlarda da anlaşılabileceği üzere kol üzerinde oluşan gerilmeler çok azdır. Bu nedenle sonraki tasarımlarda kol ağırlığını azaltılması amacı ile kol iskeleti üzerinde hafifletmeler yapılması kararlaştırılmıştır.

2.3.3 Tasarım 8

Tasarım 8'de önceki tasarımlarda elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurularak, kol üzerinde güncelleştirmeler yapılmıştır.(Şekil 2.8)

Tasarım 8 üzerine sonlu elemanlar analizi ve dinamik analiz yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde kol mukavemet açısından incelenmiş, dinamik analizde de ise motorlar üzerine gelen kuvvetler incelenerek, seçilen elemanlar ile kolun istenildiği gibi kontrol edilip edilemeyeceği saptanmaya çalışılmıştır.

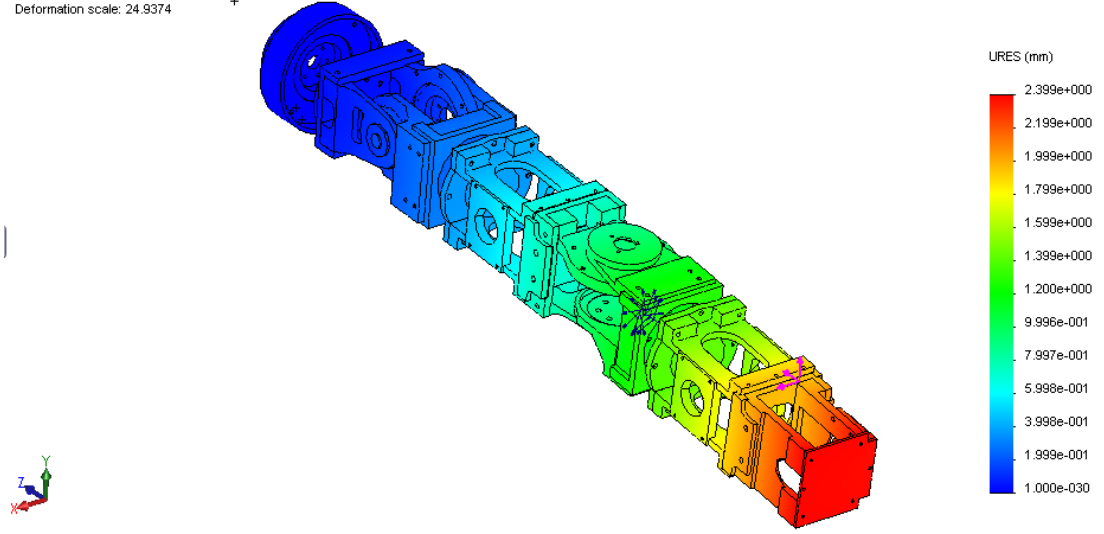
Sonlu elemanlar analizde kol Şekil 2.7'te gösterildiği gibi kritik pozisyona getirilmiş ve sınır şartları uygulanmıştır. Bu pozisyonun kol için en kritik konum olduğuna karar verilmiş ve sonlu eleman analizleri bu konum için yapılmıştır. Ayrıca uygulana yüklerde literatür araştırmalarından elde edilmiştir. Sınır koşulları ile ayrıntılı bilgiyi 11. tasarım bölümünde bulabilirsiniz.



Şekil 2.8 : İnsansı kol tasarımı 8.

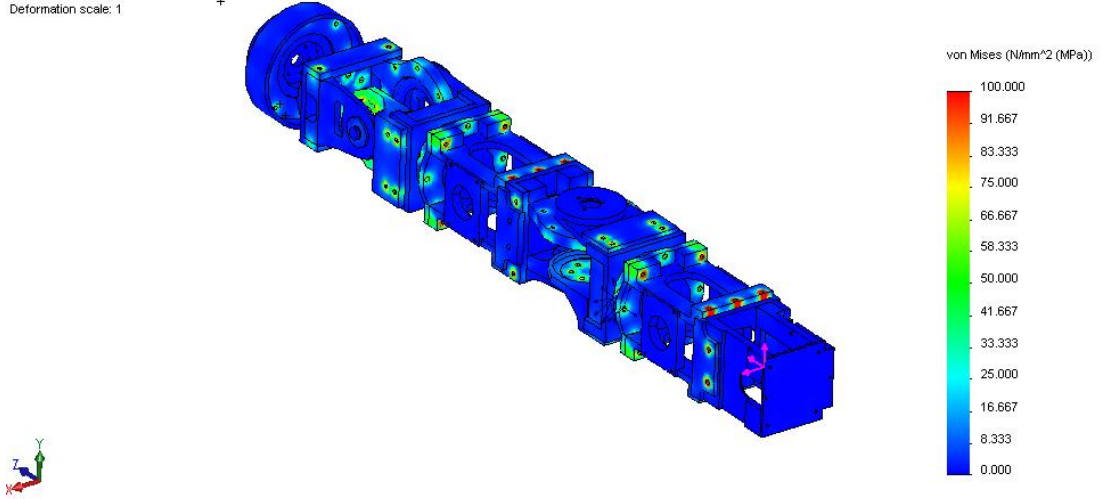
Elde edilen sonuçlarda kol üzerinde maksimum 2,4 mm sehim(Şekil 2.9) ve yaklaşık 25 MPa (Şekil 2.9) gerilme elde edilmiştir. Kolun istenilen mukavemet koşullarını sağladığı görülmektedir.

Model name: 8Tasarim_Analiz
Study name: 90deg
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 24.9374



Şekil 2.9 : Tasarım 8 sonlu elemanlar yer değışirme sonucu.

Model name: 8Tasarim_Analiz
Study name: 90deg
Plot type: Static nodal stress Stress1
Deformation scale: 1



Şekil 2.10 : Tasarım 8 sonlu elemanlar gerilme sonucu.

Kolda dinamik olarak motorlar üzerine gelen kuvvelerin incelenmesi amacı ile kolun dinamik modeli oluşturulmuştur. Bu modelde her eklem ayrı incelenmiştir. Her bir eklem için istenilen hız değerlerinde ve taşınması gereken yük miktarına göre ihtiyaç duyulan tork ve güç miktarları belirlenmiştir. Kol üzerine yükler uç işlevci bağlantı noktasından uygulanmış ve uygulanan değerler literatür araştırmasından elde edilmiştir. Şekil 2.2’de belirtilen serbestlik derecesi numaralarına göre aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Kol üzerinde yapılan dinamik analiz ile ilgili ayrıntılı bilgi son tasarım üzerinde anlatılmıştır.

Çizelge 2.12 : Tasarım 8 dinamik analiz sonuçları.

Kuvvet (N)	Zaman (sn)	1. Eklem		2. Eklem		3. Eklem		4. Eklem	
		Güç (W)	Tork (Nm)	Güç (W)	Tork (Nm)	Güç (W)	Tork (Nm)	Güç (W)	Tork (Nm)
1,00	10,00	48,5	11,5	41,03	11,20	7,80	3,80	9,21	3,46
1,00	20,00	66,0	15,7	55,70	15,42	11,90	5,79	14,42	5,44
1,00	30,00	83,6	19,9	70,36	19,68	16,00	7,78	19,63	7,43
1,00	40,00	101,	24,1	85,02	23,93	20,09	9,77	24,85	9,42
1,00	50,00	118,	28,3	99,69	28,19	24,19	11,76	30,06	11,40
2,00	10,00	24,3	11,7	21,09	11,67	3,90	3,64	4,66	3,54
2,00	20,00	33,1	16,0	28,70	15,92	6,00	5,63	7,27	5,53
2,00	30,00	41,9	20,2	36,32	20,17	8,09	7,62	9,88	7,51
2,00	40,00	50,8	24,5	43,93	24,43	10,18	9,61	12,48	9,50
2,00	50,00	59,6	28,7	51,55	28,68	12,28	11,60	15,09	11,49
3,00	10,00	16,3	11,8	14,09	11,76	2,60	3,61	3,12	3,56
3,00	20,00	22,2	16,0	19,17	16,01	3,99	5,60	4,85	5,55
3,00	30,00	28,2	20,2	24,25	20,27	5,38	7,59	6,59	7,54
3,00	40,00	34,1	24,5	29,33	24,52	6,77	9,58	8,33	9,53
3,00	50,00	40,0	28,7	34,40	28,78	8,17	11,57	10,07	11,52
4,00	10,00	12,2	11,8	10,60	11,79	1,94	3,60	2,34	3,57
4,00	20,00	16,7	16,1	14,41	16,04	2,99	5,59	3,64	5,56
4,00	30,00	21,1	20,3	18,22	20,30	4,04	7,58	4,94	7,55
4,00	40,00	25,5	24,9	22,02	24,55	5,08	9,57	6,25	9,54
4,00	50,00	30,0	28,8	25,83	28,81	6,13	11,56	7,55	11,53
5,00	10,00	9,8	11,8	8,49	11,81	1,56	3,59	1,87	3,57
5,00	20,00	13,3	16,7	11,54	16,06	2,39	5,58	2,91	5,56
5,00	30,00	16,9	20,3	14,58	20,31	3,23	7,57	3,96	7,55
5,00	40,00	20,4	24,8	17,63	24,57	4,07	9,56	5,00	9,54
5,00	50,00	24,0	28,4	20,68	28,82	4,90	11,55	6,04	11,53

Elde edilen dinamik analiz sonuçlarına göre kol üzerinde seçilmiş olan motor ve harmonic drive seçimleri güncellenmiştir. Ayrıca kol üzerindeki momentsel etki azalmak amacı ile 3 ve 5 eklem motor ve harmonic drive bölümlerinin kendi aralarında yer değiştirilmesine karar verilmiştir. Böylelikle kol ağırlık merkezi kök kısmına daha yakın olarak daha düşük momentsel etki yaratacaktır.

2.3.4 Tasarım 11

Ön tasarım çalışmaları yapılmasının ardından, önceki tasarımlarda göz önünde bulundurularak, 11. tasarımda kolun boyutları değiştirilmiş ve üzerindeki elemanların seçimi güncellenmiştir. Kol üzerinde fazla mukavim bölgelerde hafifletmeler yapılarak, kol ağırlığı azaltılmıştır. Ayrıca seçilen yeni ekipmanların montajlarına göre tasarım güncellenmiştir.



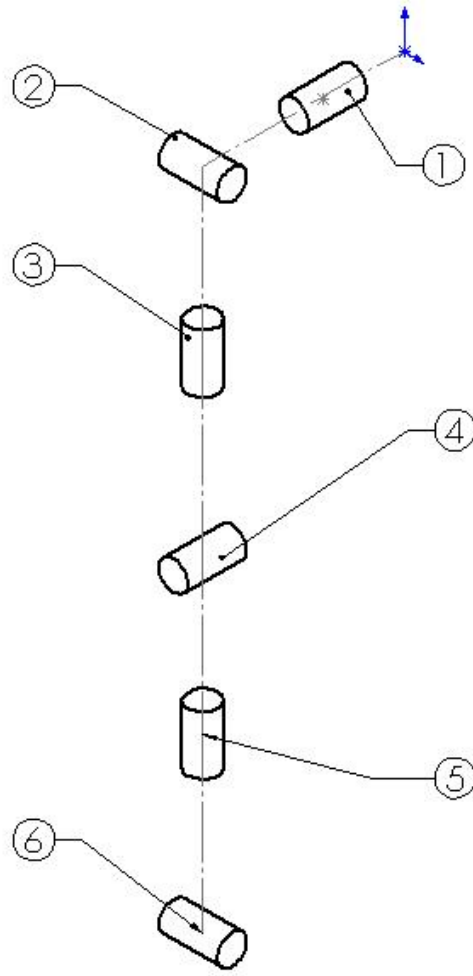
Şekil 2.11 : Tasarım 11.

Şekil 2.11’te kol tasarımına ait son çizimi görebilirsiniz. Şekil 2.12’de de kol tasarımının sıfır pozisyonunu ve eklemlerin konumlarına ait çizimi bulabilirsiniz.

11. Tasarımda diğer tasarımlardan farklı olarak, kolun kontrolü aşamasında kullanılması ön görülen tork sensörü tasarıma eklenmiştir. Ayrıca uç işlevciyi temsil etmesi amacı ile tork sensöründen sonra topuz eklenmiştir. Böylelikle uç işlevci tasarımına gerek duymadan, kol üzerinde topuz üzerine gelen kuvvetler denenerek kolun kontrolü sağlanabilecektir

Kol tasarımın 6 serbestlik derecesine sahip olacağından bahsedilmişti. Bu serbestlik dereceleri Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Bu numaralandırma üzerinden ileriki bölümlerde ilgili ekleme ait analiz sonuçlarını paylaşılacaktır. 11 iterasyon sonrasında eklemlerde kullanılan harmonic driveler ve motorlar şu şekildedir. Seçimler yapılırken kolun nominal çalışma koşullarında karşılayacağı güç ve tork değerleri göz önünde bulunulmuştur.

Çizelge 2.13’de yapılan seçimler ile tasarım güncellenmiştir. Bu güncelleme sonrasında yapılan sonlu elemanlar ve kinematik analizler sizinle paylaşılacaktır.



Şekil 2.12 : Tasarım 11 eklem numaralandırmaları.

6 Eklem için harmonic drive kullanılmamıştır. Bunun yerine içerinden dişli seti ile birlikte gelen Dynamixel serisinden MT106 motoru kullanılmıştır. Böylelikle gereksiz ağırlıktan kaçınılmıştır. MT106 motoru 3. ve 4 eksenlerdeki motor ve harmonic drive seçimlerini ile bezer değerlerde tork ve güç üretmektedir.

Sonlu elemanlar analizleri

11. tasarımın mukavemet açısından dayanımı ve belirlenen yükler altında ne kadarlık bir sehim yapacağını önemlidir. Kol çalışma koşulları altında yüklendiğinde belirli bir sehim yaparak hesaplanan teorik pozisyonunda sapmalara neden olacaktır. Bu nedenle yükler altında minimum sehim yapacak şekilde bir tasarıma sahip olmamız, sisteme kontrolcü tasarlamamızı bir o kadar kolaylaştıracaktır.

Çizelge 2.13 : Tasarım 11 harmonic drive seçimleri ve kapasiteleri.

Eklemler	Motor	Harmonic Drive	Güç	Tork
1	411678-EC60	CSG-17-2UH	100	34,8
2	411678-EC60	CSG-17-2UH	100	34,8
3	251601-EC 45 flat Ø45	CSG-14-2UH	50	8,27
4	251601-EC 45 flat Ø45	CSG-14-2UH	50	8,27
5	251601-EC 45 flat Ø45	CSG-14-2UH	50	8,27
6	Dynamixel MT106	--	62,4	8,2

Kol üzerinde yapılan sonlu elemanlar analizleri için, Solidworks Simulation programı kullanılmıştır. Program içerisinde yapılan modelleme sırasında bazı kabullerde bulunulmuştur. Bu kabuller çerçevesinde sonlu elemanlar geometrisi hazırlanmış ve sonuçlar alınmıştır.

Bunlar;

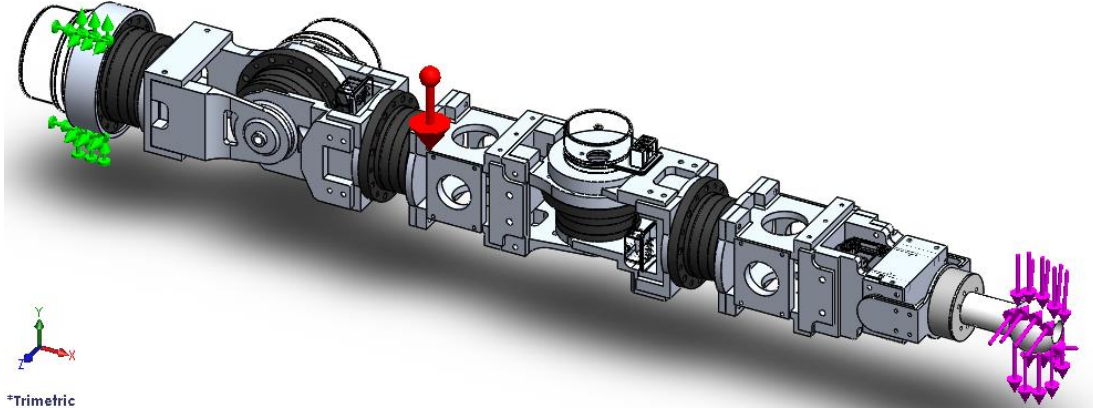
1. Kol, 2. eklemine 90 derece döndürülerek, x eksenine doğrultusunda bakacak şekilde konumlandırılmıştır. Geometrik olarak en büyük moment etkisinin oluşabileceği pozisyon olduğu için bu konuma getirilmiştir.
2. Tasarım üzerinde harmonic drive, motorlar ve alüminyum iskelet dışındaki tüm elemanlar kol ucunda uygulanacak bir kütle olarak kabul edilmiştir.
3. Harmonic drive ve motorların rigid oldukları kabul edilmiştir.
4. Kol üzerinde bulunan motorlar, kütleli olarak bağladıkları bölgelerde modellenmiştir.

Uygulanan sınır şartları şu şekildedir.

1. Kolun uç bölümden gerek kol üzerinde tahmin edilmeyen ağırlıkların temsil edilmesi amacı ile gerekse çalışma sırasında kola etki edebilecek olan kuvvetleri temsil etmesi amacı ile Y yönünde 5 kg ve X etrafında 5 Nm uygulanmıştır. Tüm yüklemeler statik olarak kabul edilmiştir.
2. Y yönünde yer çekimini temsil etmesi amacı ile 1 g'lik ivme uygulanmıştır.

3. Kolun gövdeye montajının olacağı bölümden, kol 6 serbestlik derecesinde sabitlenmiştir.

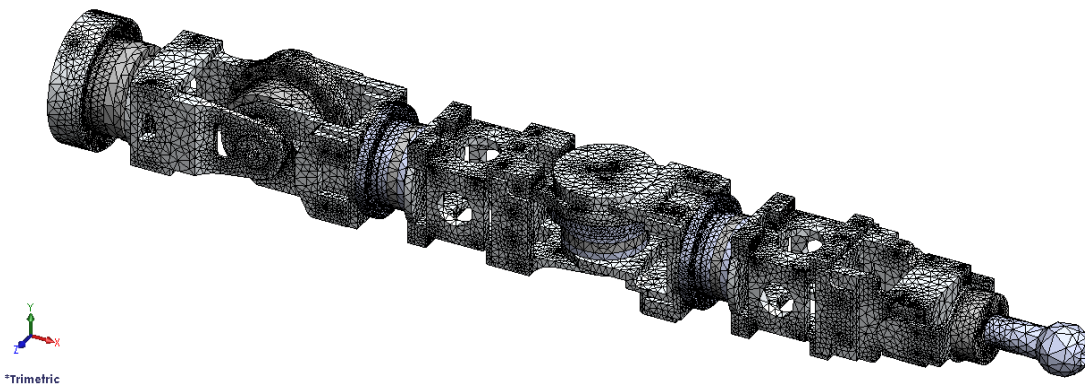
Şekil 2.13’de sınır şartları kol üzerinde görselleştirilmiştir. Yeşil renk ile sabitleme bölgesini, mor renk ile uygulanan kuvvet ve torku, kırmızı renk ile yer çekimi gösterilmiştir.



Şekil 2.13 : Sonlu elemanlar sınır şartları.

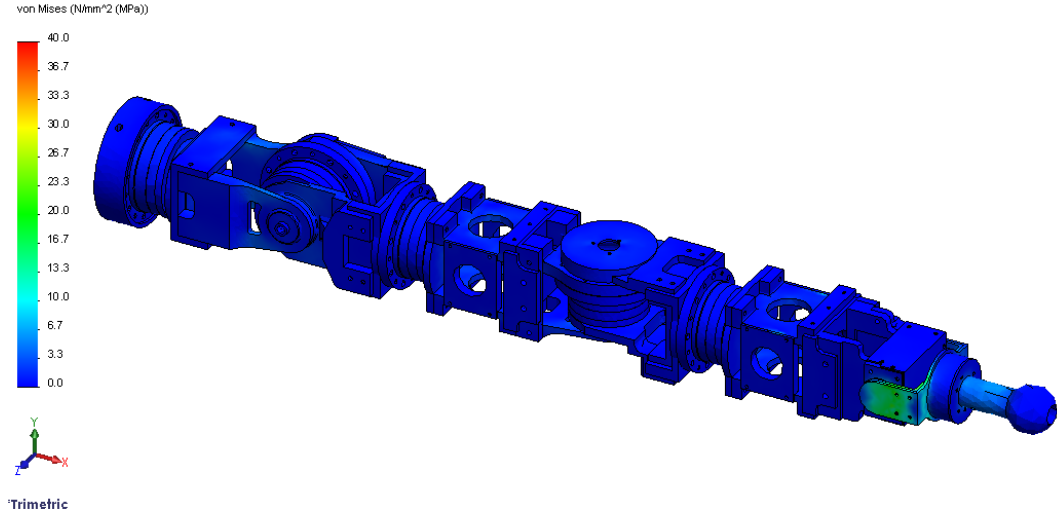
Kol üzerinde meshleme işlemi için 1. dereceden tetrahedral eleman kullanılmıştır. 2 mm ile 20 mm arasında değişecek boyutlarda elemanlardan oluşan mesh yapısı toplam 99888 nod ve 433115 elemandan oluşmaktadır.(Şekil 2.14)

Kolun çalışma şekline göre gerekli yerlere kontak tanılamaları yapılarak, kolun en uygun şekilde gerçek çalışma şartlarında modellenmesi amaçlanmıştır.

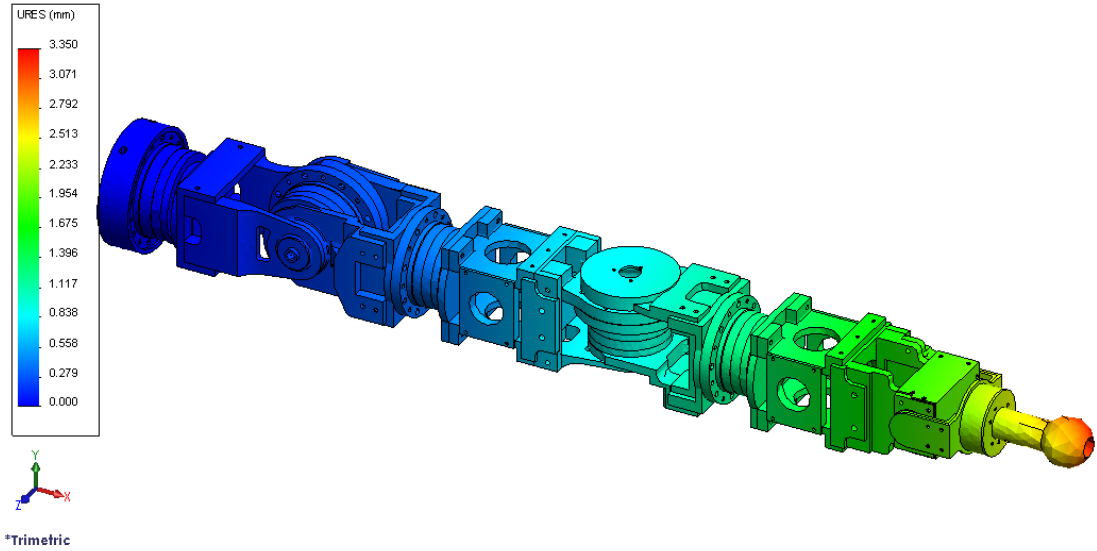


Şekil 2.14 : Kol üzerinde oluşturulan sonlu elemanlar yapısı.

Yukarıda belirtilen sınır şartları ve kabuller çerçevesinde analiz gerçekleştirildiğinde, kol üzerindeki sonuçlar şu şekildedir



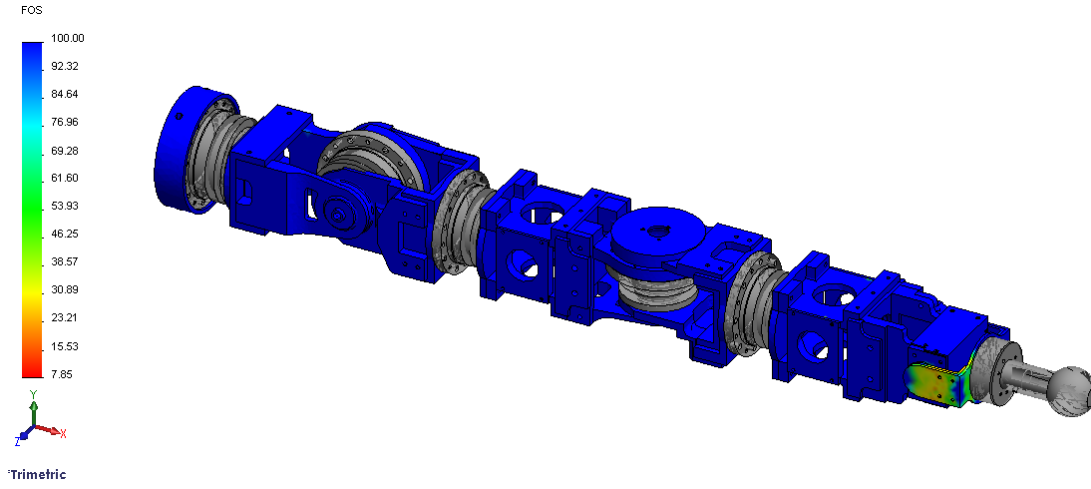
Şekil 2.15 : Sonlu elemanlar analizi Von Mises gerilmesi.



Şekil 2.16 : Sonlu elemanlar analizi yer değıştirme.

Şekil 2.15’da kolun analizi sonrasında elde edilen gerilme görüntüsünü inceleyebilirsiniz. Gerilme sonuçlarına göre kol üzerinde çıkan gerilmeler 25 MPa civarındadır. Bu kullanılan alüminyum malzemenin akma değerin çok çok altındadır.

Analiz sonucunda ortaya çıkan yer değıştirme 3.350 mm şeklidedir. Şekil 2.16’da ilgili analiz sonucu ait görüntüyü görebilirsiniz. Kol tasarımının analizinde elde edilen Von Mises gerilme sonuçlarına göre, sistemin minimum emniyet katsayısı 20 ’tir. Şekil 2.17’de kol tasarımda kullanılan alüminyum malzeme üzerindeki emniyet katsayısı dağılımını inceleyebilirsiniz.



Şekil 2.17 : Sonlu elemanlar analizi emniyet katsayısı dağılımı.

Yapılan analizde elde edilen sonuçlara göre, kol üzerinde belirtilen şartlar altında yeterince mukavimdir. Ortaya çıkan 3.350 mm sehim ise çıkabilecek olan maksimum statik sehimdir. Uygulanan kuvvetler kolun maruz kalabileceği en yüksek yüklem olduğu için, normal çalışma şartlarında bu sehim miktarının $\frac{1}{4}$ 'ü mertebesinde sehim oluşması beklenmektedir.

3. DİNAMİK ANALİZ

Tasarım üzerinde yapılan dinamik analizler ile eklemler üzerinde oluşan kuvvetler incelenmiş ve seçilmiş olan motor ekipmanlarının istenilen çalışma şartlarında çalışıp çalışmadığı kontrol edilmiştir.

Dinamik analiz için MSC ADAM 2013 programı kullanılmıştır. Dinamik analiz konularında kendini ispatlamış olan bu program, gerek savunma, otomotiv, imalat vb. sektörlerin AR-GE çalışmalarında yoğun olarak kullanılmakta gerekse akademik çevrelerde yapılan çalışmalarında tercih edilmektedir.

Adams programı içerisine Solidworks ortamında tasarlanan parçalar aktarılmıştır. Böylelikle kütle ve atalet bilgileri SolidWorks içerisinden malzeme bilgilerine göre otomatik olarak Adams ortamına geçmiştir. (Şekil 3.1)

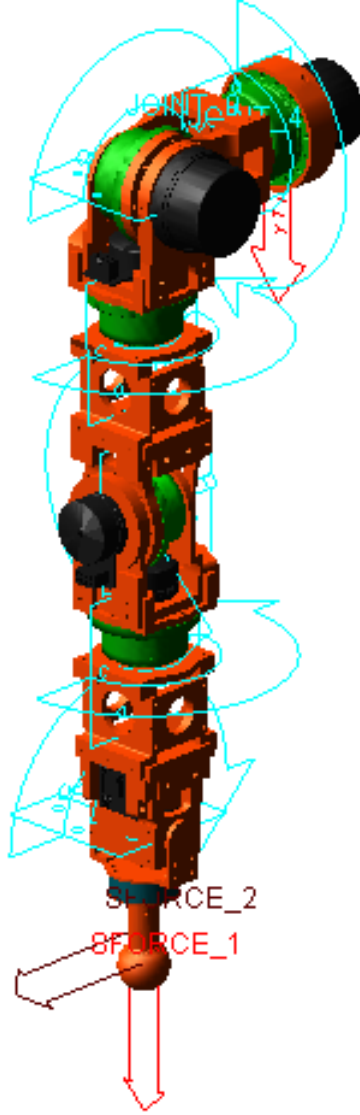
Modelde toplamda 7 adet ana hareketli parça bulunmaktadır. Bu 7 parça birbirine 6 döner mafsallık bağlantısı ile bağlanmıştır. Modelin kendisi ise yerçekiminden dolayı hareket etmemesi, yani kolun gövde ile bağlantısını modellemek için, kol zemine, kol gövde bağlantı parçasından 6 yönde sabitlenmiştir. Böylelikle sistemin toplam serbestlik derecesi 6 olacak şekilde modelleme tamamlanmıştır.

Kolun modellenen 6 serbestlik derecesinde istenildiği gibi sürülebilmesi için, her bir döner mafsallık eklemler bağlantısına, serbest olan yönde 6 adet hareket elemanı oluşturularak, kolun serbestlik derecesi 0'a indirilmiştir. Böylelikle kol bu hareket elemanları içerisine tanımlanacak herhangi bir hız ivme veya konum fonksiyonu yardımı ile sürülebilecektir.

Ayrıca kolun uç işlevci bölümüne, kolun taşıyacağı yükü ve kolda henüz tasarlanmayan bölümlerin ağırlıklarını temsil edecek olan kuvvet tanımları yapılmıştır. Bu kuvvet, analizin tipine göre yönünde değişiklikler olabilmektedir. Yönü hakkındaki bilgi, analiz tanımlamalarında paylaşılacaktır.

Analiz sonuçlarında verilmiş olan nominal limit kavramı, eklemlerde bulunan güç ekipmanları tarafından uygulanabilecek maksimum nominal güç ve tork değerleridir.

Limit tork değeri ise eklem güç grubunun ani ivmelenmeler durumunda kısa süreli olarak uygulayabileceği maksimum tork değerleridir.

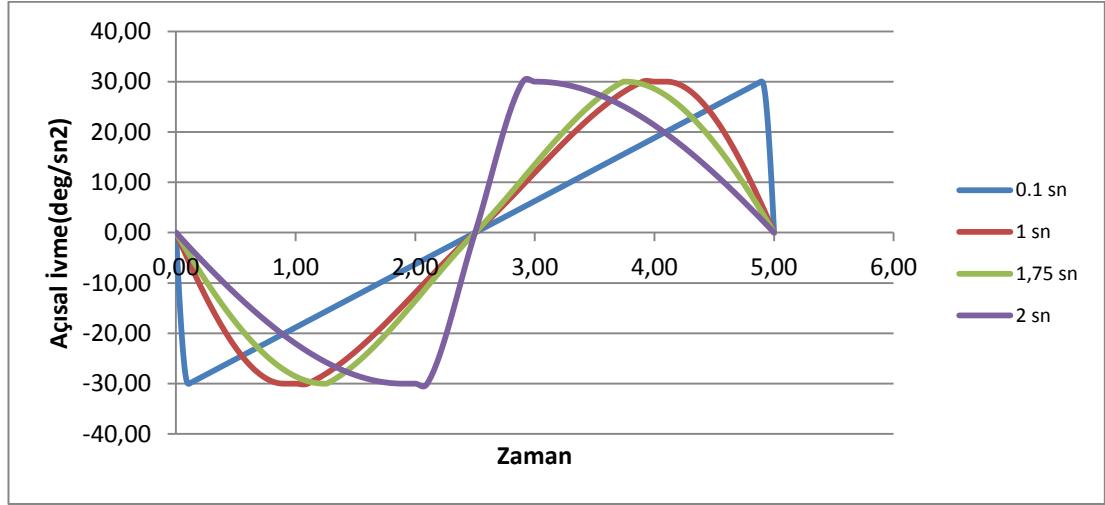


Şekil 3.1 : MSC Adams modeli.

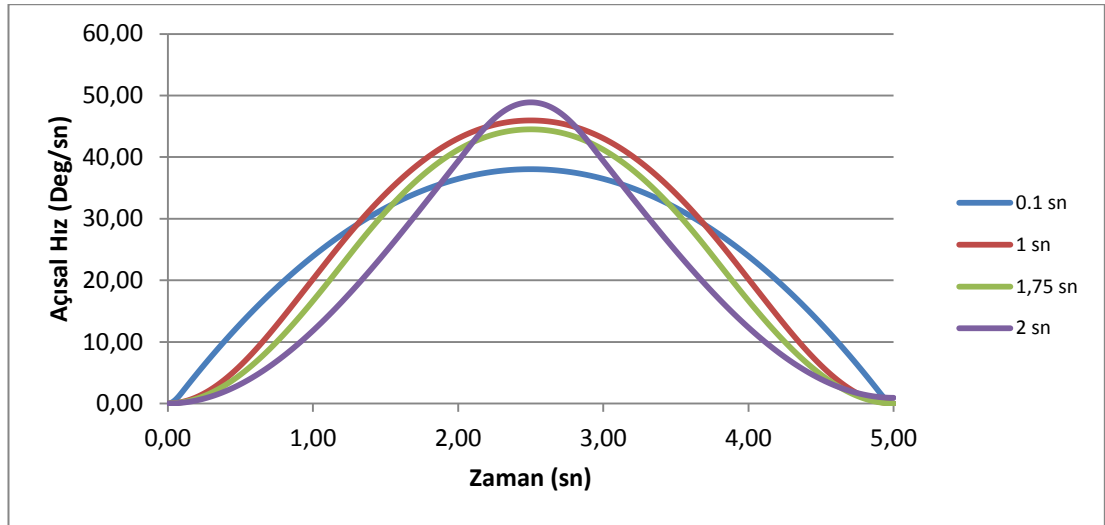
3.1 İvme Profili Seçimi

Dinamik analizler gerçekleştirilirken uygulanan hız eğrisinin ne şekilde olacağı önemlidir. Uygulanan ivme profili ile kolun aynı sürede alacağı yol ve ulaşacağı maksimum hız değişebilir. Bu bölümde kol üzerinde uygulanan ivme profillerinin sonuçları ne şekilde değiştirdiği incelenecektir. Aynı kol eksenin farklı sürelerde maksimum ivme değerine ulaşması sonucunda oluşan tork ve güç değerine ideal ivme profili seçilecektir.(Ogata)

Kolun 2. eklemi üzerine uygulanan farklı ivme profilleri aşağıdaki gibidir. Aynı eklem üzerinde ivme profillerin değişmesi incelenerek, aynı şartların oluşması sağlanmıştır.

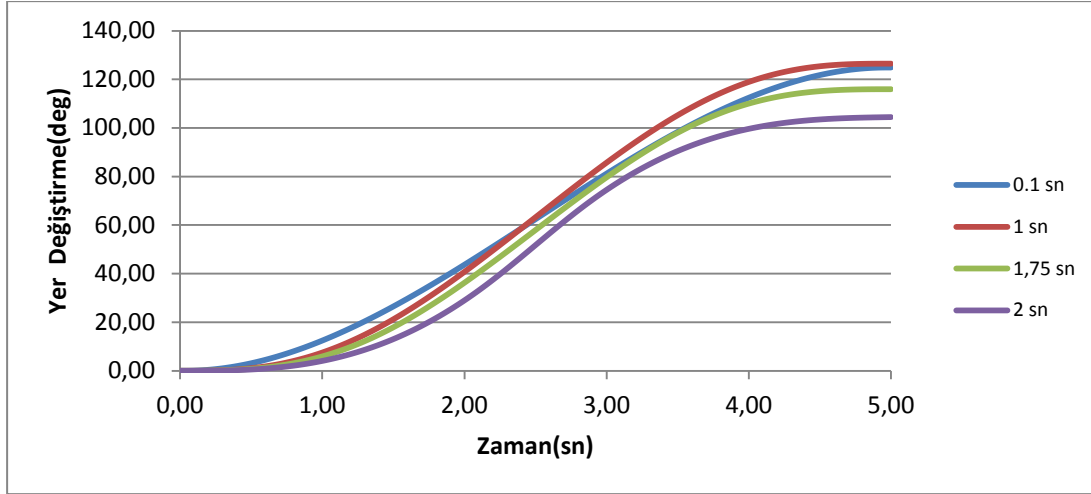


Şekil 3.2 : İvme profilleri.



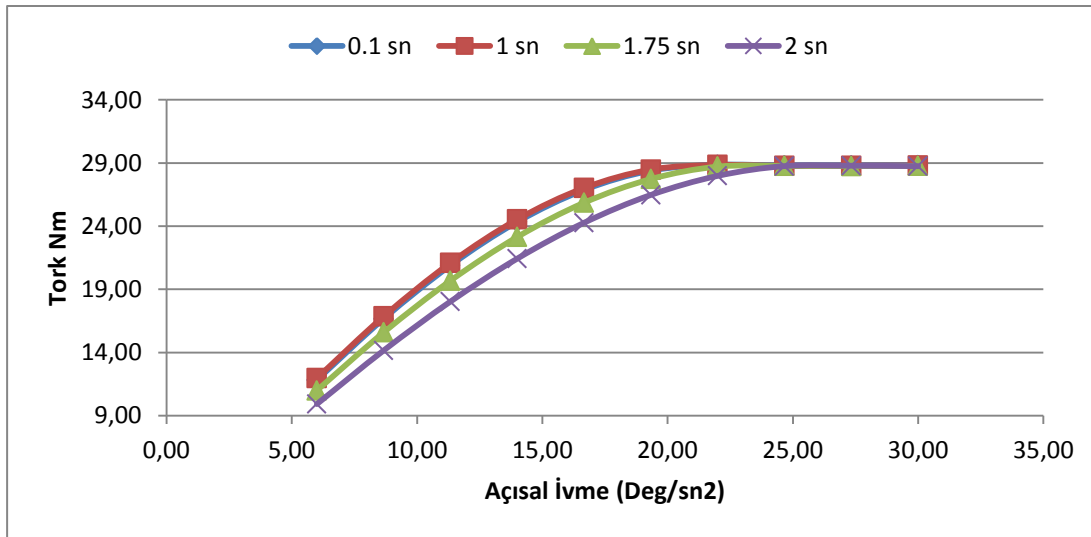
Şekil 3.3 : Hız profilleri.

Şekil 3.2’de verilen ivme değerleri kolun 5 saniye içerisinde maksimum hıza ulaşması ve durması şeklindedir. Yani kol üzerinde hem hızlanma hem de yavaşlama durumu için ivme durumu incelenmiştir. Kolun maksimum ivmeleri her bir profilde aynıdır. Tek değişken maksimum ivmelenmeye çıkan zamandır. Bu profillerin uygulanması sonucu eklem üzerinde Şekil 3.3’teki hız profilleri ve Şekil 3.4’teki yer değiştirme profilleri elde edilmiştir. 0.1 sn’lik ivme profilinin kullanılması ile düzgün bir hızlanma eğrisi elde edilmektedir, ayrıca aynı profil maksimum yer değişiminin elde edildiği profillerden biridir.



Şekil 3.4 : Yer değiştirme profilleri.

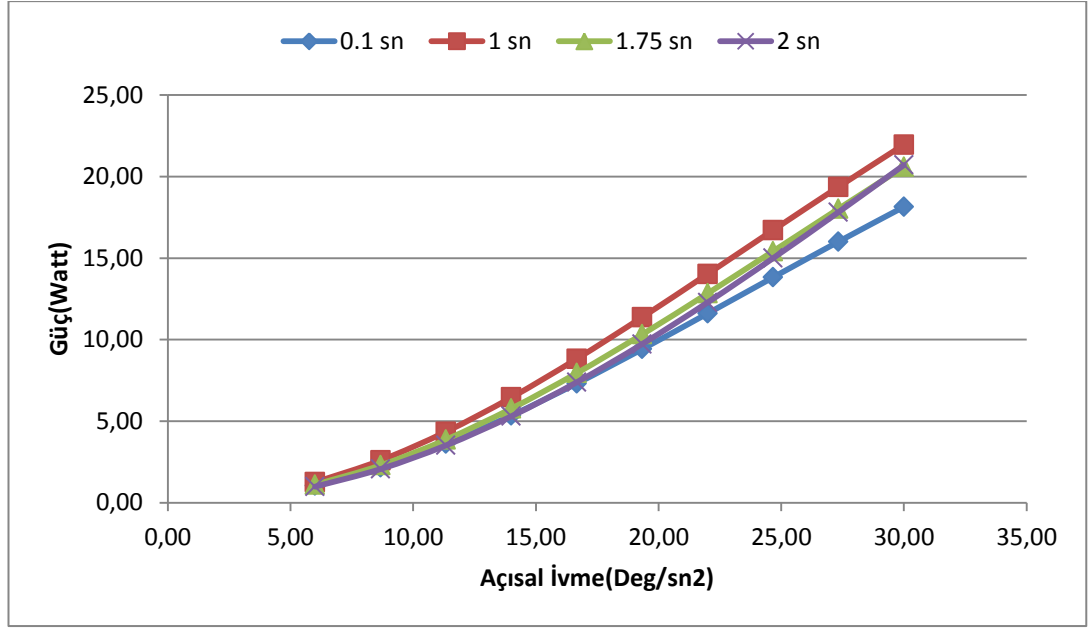
Karşılaştırılan ivme profilleri ile elde edilen tork ve güç değerleri karşılaştırılmak istenirse;



Şekil 3.5 : Tork profilleri.

Şekil 3.5 incelendiğinde tüm ivme profillerinin maksimum ivme değerinin aynı olması nedeni ile ulaşılan maksimum tork değeri tüm profillerde aynıdır. Maksimum ivmeye ulaşma süresinin değişmesi ile birlikte maksimum tork değerine ulaşma profili değişmektedir.

Analiz sonrası istenilen hareketlerin yapılması için güç miktarları Şekil 3.6'da gösterilmiştir. İvme profillerinin değişmesi ile birlikte istenilen maksimum güç miktarları değişmektedir. Aynı ivme değeri için minimum güç ihtiyacı, 0,1 sn içerisinde maksimum değere ulaşılan ivme profilidir. Bu nedenle bu profil analizlerde kullanılacak olan ivme profili olarak seçilmiştir.



Şekil 3.6 : Güç profilleri.

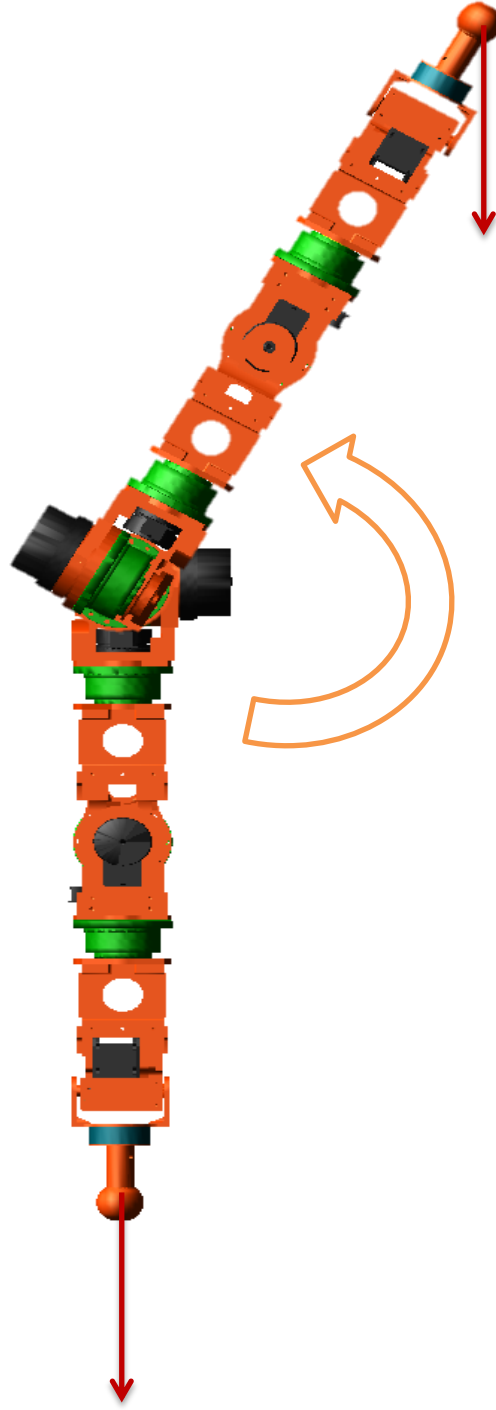
3.2 Motor ve Harmonic Drive Seçimi İçin Dinamik Analizler

3.2.1 1. Eklem

1. Eklem dinamik olarak incelenmesi için kol sıfır pozisyonuna getirilmiş ve Şekil 3.7 'de gösterildiği gibi 150 derecelik bir hareket yapılmıştır. Ayrıca 150 derecelik hareket gerçekleştirilirken uç kısmında 10 ile 50 N arasında kuvvetler uygulanmış ve eklem üzerinde oluşan tork ve güç değerleri incelenmiştir. İstenen güç ve tork değerleri, yapılan hareketin ne kadar sürede yapıldığına da bağlı olduğu için, hareket farklı hızlarda uygulanarak tork, güç değişimleri incelenmiştir.

Yapılan hareket sonrasında eklem üzerinde oluşan tork ve güç değişimleri Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'te verilmiştir.

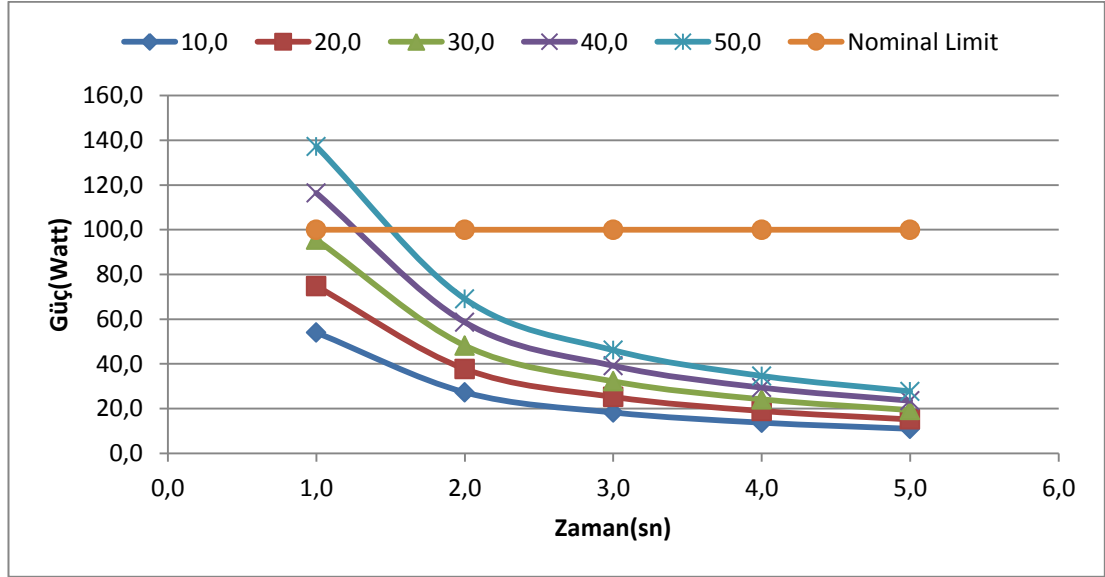
Kol ağırlıkları çok düşük olduğu için, kol üzerine etkileyen ivme değerinin değişmesi oluşan maksimum tork miktarını çok küçük ölçülerde değiştirmektedir. Bu nedenle Seçilen EC60 motoru ve CSG-2UH harmonic drive ile çalışabildiği nominal güç değeri 100 watt'tır. Analizler incelendiğinde, seçilen motor ile 50 Nm'lik bir ağırlığı yaklaşık 1,5 sn'lik bir sürede 150 derece hareket ettirebildiği görülmektedir. Şekil 3.9'da kol ucundaki ağırlığın değişmesine karşılık, eklemde oluşan tork değişimi incelenmiştir. Bu kuvvet gerçek insan kolu üzerine gelen kuvvetlerin incelendiği literatür araştırmasından elde edilmiştir.



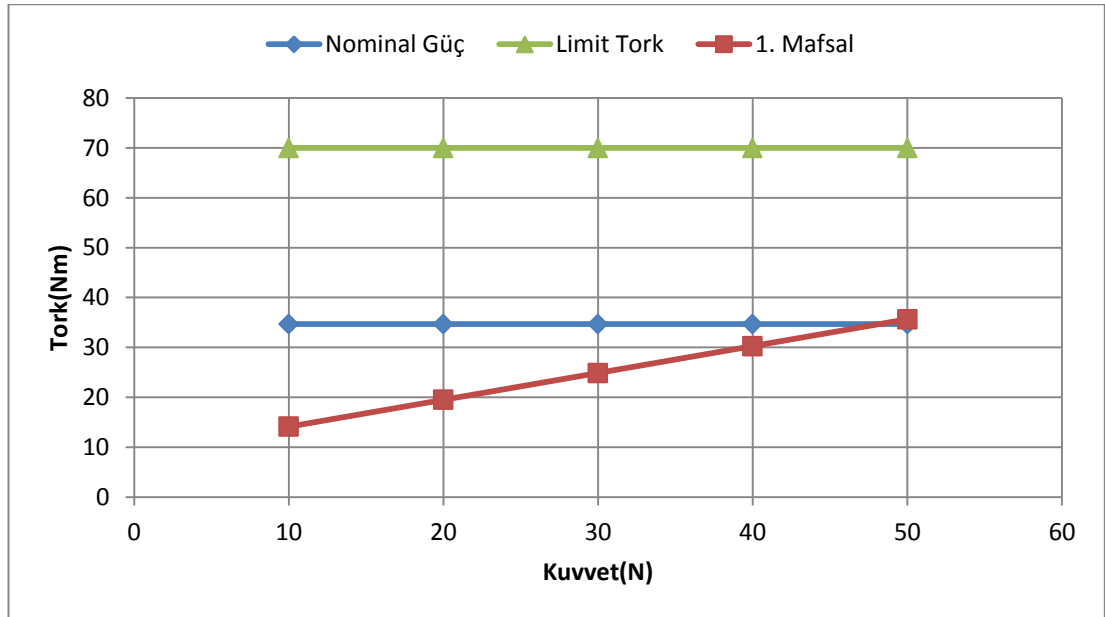
Şekil 3.7 : 1. Eklem dinamik analiz hareketi.

Motorun ve harmonic drive 'in oluşturabildiği nominal çalışma torku 35 Nm'dir. Kolun bu çıkış değeri ile uç kısmından maksimum 46,28 N kaldırabilmektedir. Kol bu nominal çalışma değerinin dışında yaklaşık 79 Nm'lik bir torku anlık olarak karışılabilir. Fakat bu 35 Nm üzerinde motora etkileyecek olan bir tork anlık olması gerekmektedir. Sürekli olması durumunda motor zarar görebilir.

Genel olarak incelendiğinde seçilen motor ve harmonic drive elemanları ile bu eklem eksenin de kolun uç bölümünden uygulanacak 40 N'luk bir kuvvet ile 150 derecelik bir açıyı 2 sn'nin altında rahatlıkla alabileceği görülmektedir.



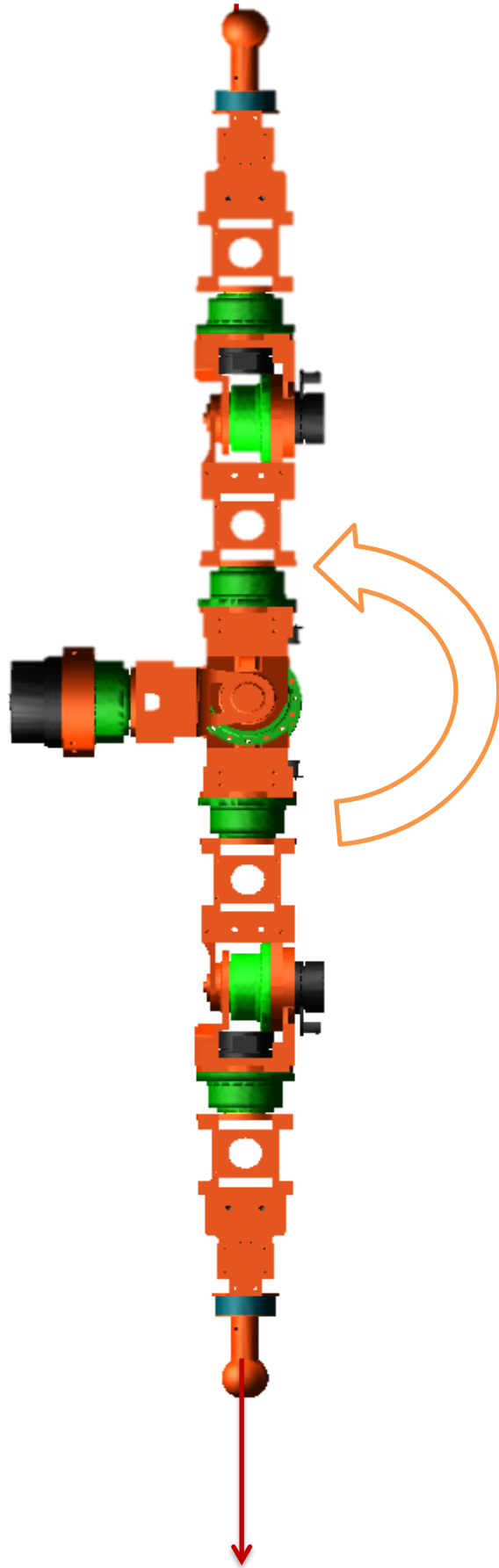
Şekil 3.8 : 1. Eklem güç ihtiyacı.



Şekil 3.9 : 1. Eklem tork ihtiyacı.

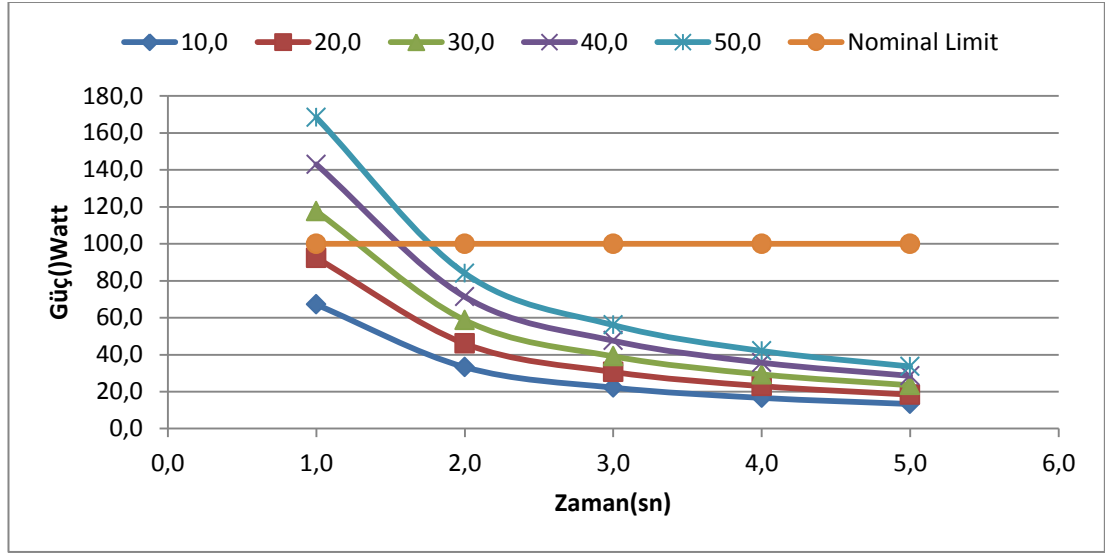
3.2.2 2. Eklem

2. Eklem üzerinde dinamik hareket gerçekleştirilirken, kolun sıfır pozisyonundan 180 derecelik bir açı yapması uygun görülmüştür. 1. ekleme olduğu gibi 2. ekleme de kolda 10 ile 50 N arasında değişen kuvvet uygulanmıştır.

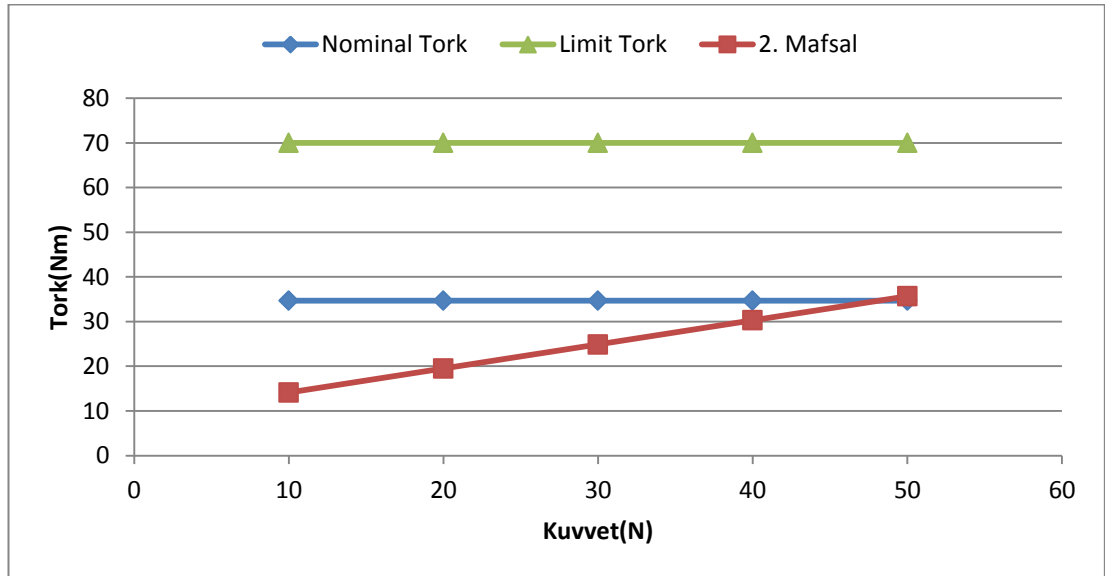


Şekil 3.10 2. Eklem dinamik analiz hareketi.

Uygulanan sınır koşulları çerçevesinde ortaya çıkan tork ve güç değerleri Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Tork değerleri farklı hız değerlerinde bezer çıktığından kol ucundaki kuvvet değişimine göre değişimi verilmiştir.



Şekil 3.11 : 1. Eklem güç ihtiyacı.

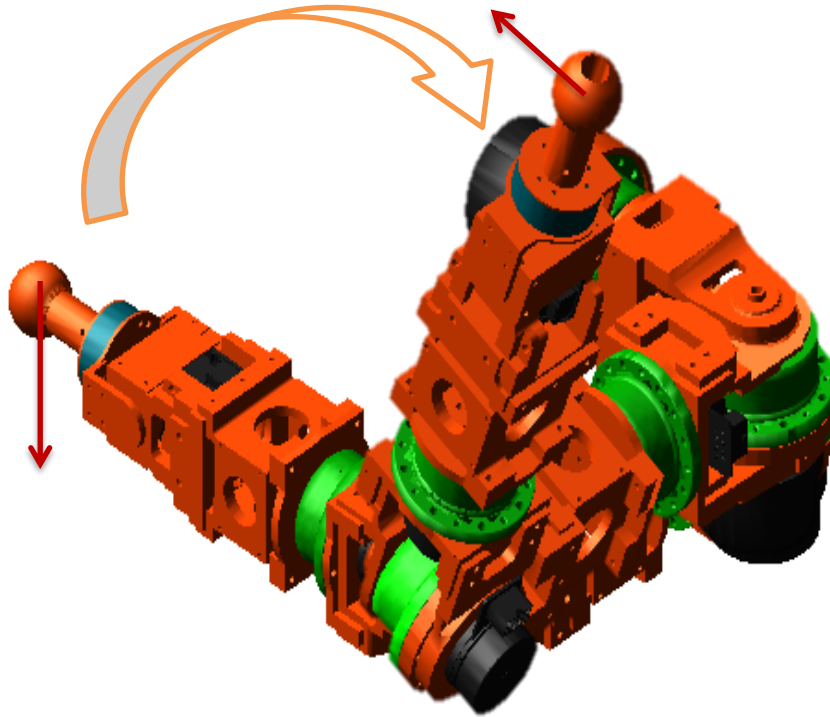


Şekil 3.12 : 2. Eklem tork ihtiyacı.

2. Eklem için analiz sonuçları incelendiğinde kol bu serbestlik derecesinde tarama alanı fazla olduğu için süreler azaldığında ortaya çıkan güç miktarı yüksektir. Seçilen motor ve harmonic drive 100 Watt güç ve 35 Nm’lik tork sağlamaktadır. Bu değerler ışığında, kol 40 N’luk ağırlık ve 2 sn’lik tarama süresinde emniyetli bir şekilde çalışabilir.

3.2.3 3. Eklem

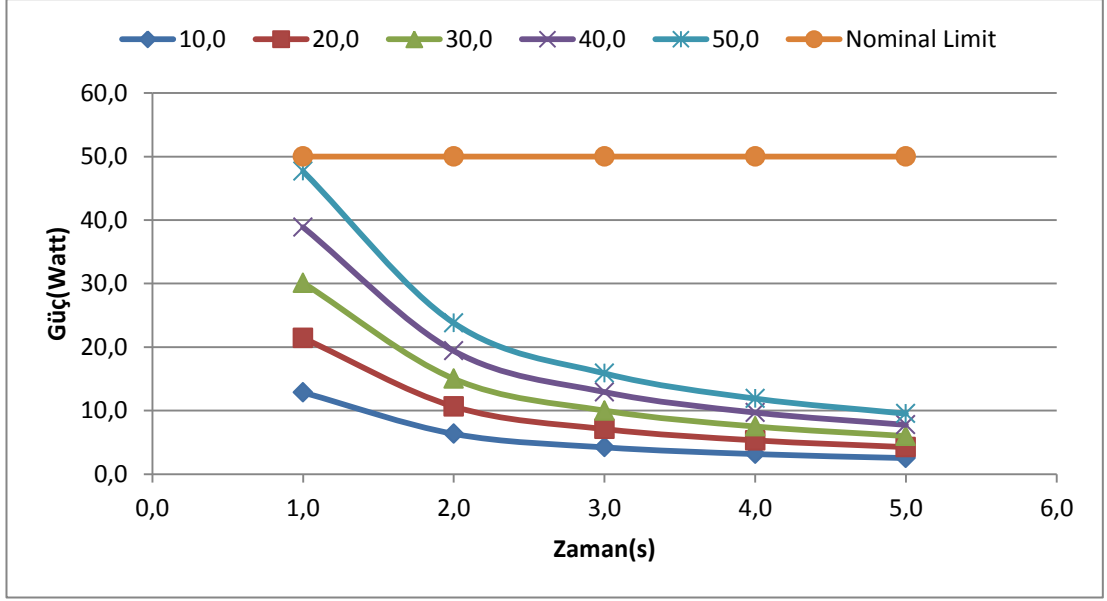
3. Eklem için dinamik analiz gerçekleştirmek için kol, eklemin en fazla yüke maruz kalacağı pozisyona getirilmiştir. Bu pozisyon için 1,3, ve 4 eklem 90 derecelik ilk pozisyonlara getirilmiştir. Ardından kolun 3. eklem üzerinden farklı hızlarda 110 derecelik bir hareket yapması istenmiştir. Bu hareket sırasında kolun uç bölümünden Şekil 3.13'te de olduğu gibi 10 ile 50 N arasında değişen kuvvetler uygulanmıştır. Uygulama esnasında kuvvetin yönelimi kol ile birlikte değişmiştir.



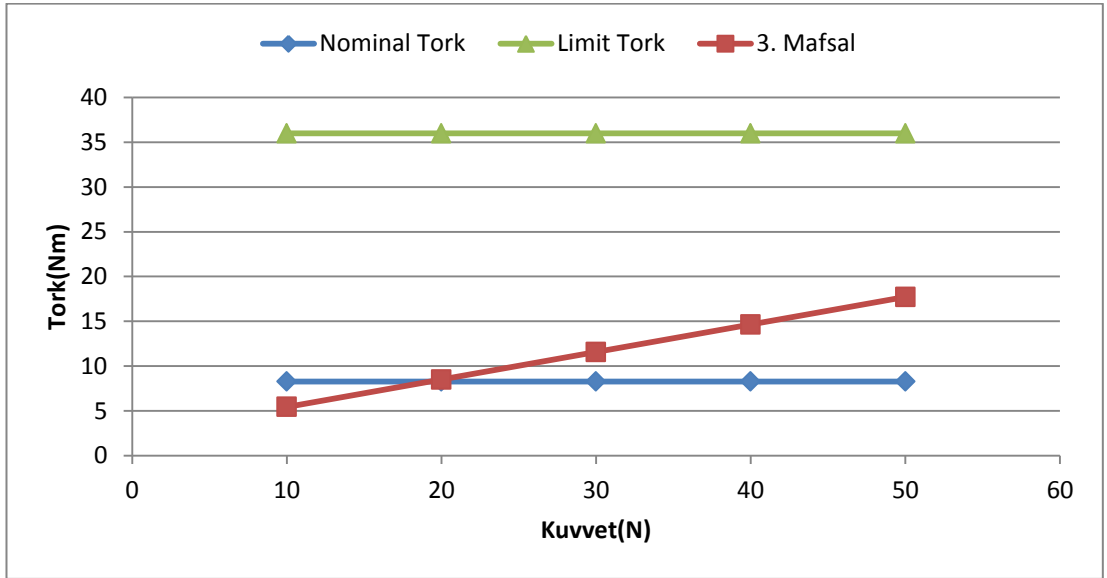
Şekil 3.13 : 3. Eklem dinamik analiz hareketi.

İstenen sınır koşullarına göre alınan tork ve güç tüketimleri Şekil 3.14 ve Şekil 3.15 grafiklerde verildiği gibidir.

3. Eklem için seçilen motor ve harmonic drive setleri daha önceki yapılan tasarım aşamalarındaki analizlerinde yetersiz olduğu görülmüş ve değiştirilmiştir. Yeni setlere göre tork limiti 8,2 Nm, güç limiti ise, 50 watt'tır. Bu limitler ışığında kolun bu eklemi nominal çalışma koşullarında 20 N'luk bir kuvveti ile 110 derecelik yer değiştirmeyi, 1 sn gibi bir sürede gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca kol bu eklem üzerinde 36 Nm 'ye kadar oluşan kısa süreli torkları karşılayabilmektedir. Uzun süreli bu tork değerlerinde kalınmadığı motor bu değerde çalışabilmektedir.



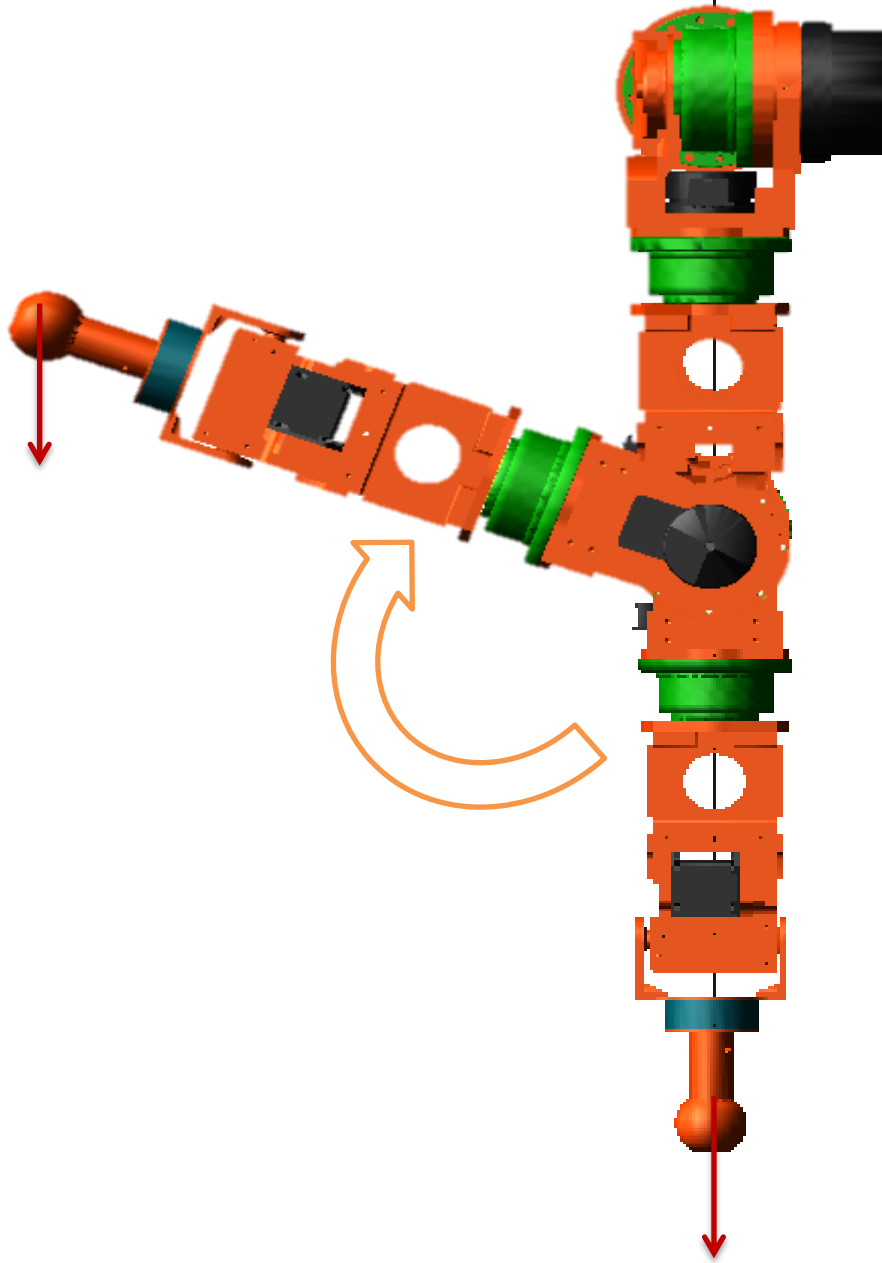
Şekil 3.14 : 3. Eklem güç ihtiyacı.



Şekil 3.15 : 3. Eklem tork ihtiyacı.

3.2.4 4. Eklem

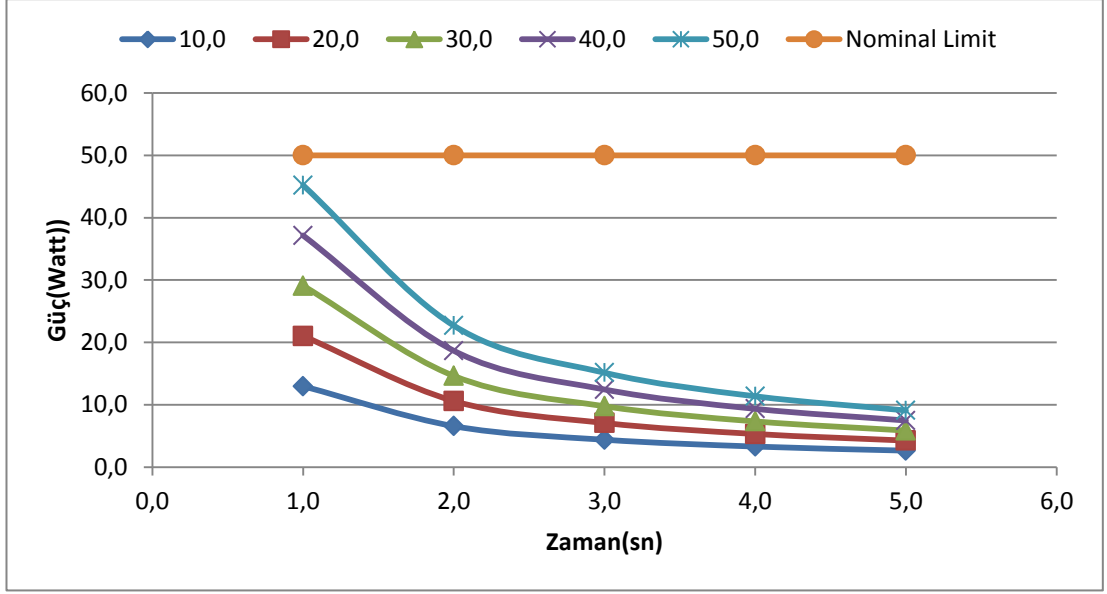
Bu eklem dinamik analizi gerçekleştirilebilmesi için kol sıfır pozisyonunda iken 4 eklem 110 derecelik yer değiştirme hareketi yapmaktadır. Eklem üzerine dinamik analiz yapılırken 110 derecelik açı, farklı sürelerde kol üzerine tatbik edilmiştir. Böylelikle ivme değişiminin etkisi gözlenecektir. Ayrıca bozucu etkileri temsil etmesi amacı ile kol ucundan uygulanan kuvvette 10 ile 50 N arasında değişecek şekilde kol üzerine uygulanmıştır. Böylelikle eklem üzerinde kuvvet ve hıza bağlı olarak analizler yapılmıştır.



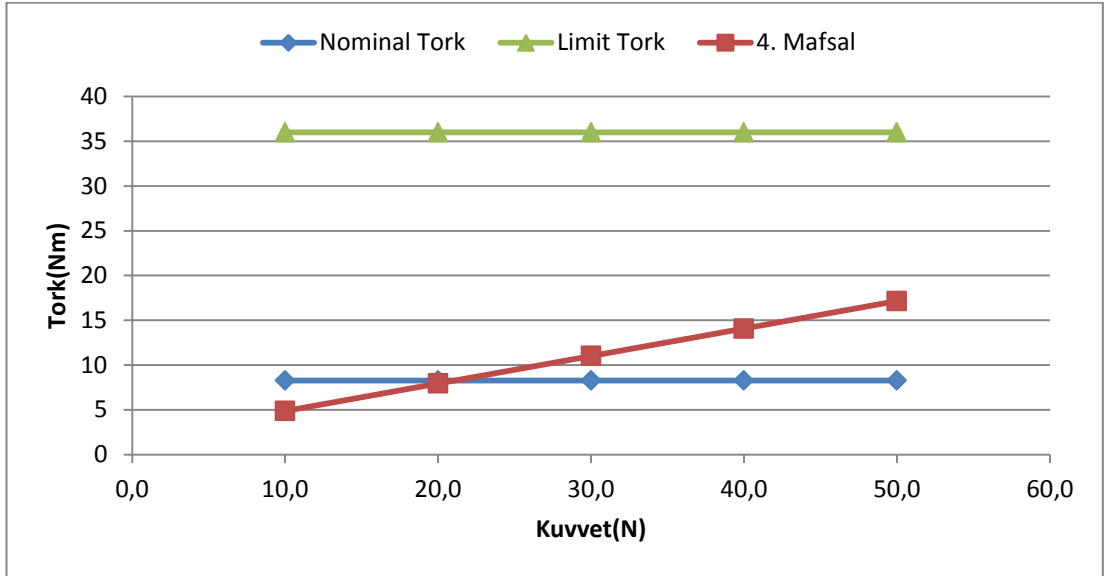
Şekil 3.16 : 4. Eklem dinamik analiz hareketi.

Yapılan analize göre 4. eklem eksenini için güç ve tork ihtiyaçları Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 gibidir.

Motor ve harmonic drive setlerine göre tork limiti 8,2 Nm, güç limiti ise, 50 watt'tır. Bu ekseninde 3. eklemlerle aynı elemanlar kullanıldığı için, bu ekseninde de 36 Nm 'ye kadar anlık yükler karşılanabilmektedir. Nominal limit üzerindeki tork değerlerinde uzun süreli kalınması motora zarar verebilir. Bu nedenle bu değerlerde uzun süreli eksen çalıştırılmamalıdır. Bu limitler ışığında kolun bu eklem nominal çalışma koşullarında 20 N'luk bir kuvveti ile 110 derecelik yer değiştirmeyi, 1 sn gibi bir sürede gerçekleştirebilmektedir.



Şekil 3.17 : 4. Eklem güç ihtiyacı.



Şekil 3.18 : 4. Eklem tork ihtiyacı.

3.2.5 Diğer eklemler

5. ve 6. eklemler için dinamik analiz gerçekleştirilmemiştir. 5. Eklemden seçilen motor ve harmonic drive elemanları 3 ve 4 ile aynıdır. 6. Eklemden seçilen dişli kutusunu kendi içerisinde bulunduran dynamixel motoru 3 4 ve 5. eklemleri güç grupları ile benzer güç ve tork değerleri bu eklemden elde edilebilmektedir. 5 ve 6. eklemlerin kuvvet kolları 3 ve 4 e göre daha kısa olduğu için benzer analizlerde daha düşük ihtiyaçlar ortaya çıkacaktır. Bu nedenle son 2 eklem için dinamik analizler gerçekleştirilmemiş ve 4. Eklemden daha düşük sonuçlar çıkacağı kabul edilmiştir.

Grafikler ile verilen güç ve tok ihtiyaçları Çizelge 3.1’de kuvvet ve zaman değişimine göre verilmiştir. Kol eksenler çıkan bu değerler, kolun çalışması sırasında eklem eksenlerinde oluşabilecek maksimum tork ve güç ihtiyaçlarıdır. Bu nedenle motor nominal limitlerine yakın çıkan sonuçlar motor ve harmonic drive ikisi tarafından anlık olarak karşılanabilmektedir.

Tüm sonuçlar incelendiğinde insansı robot kolunun eklem eksenlerinde oluşan tork ve güç ihtiyaçları Çizelge 3.1’te verilmiştir. Dinamik analizlerden elde edilen bu veriler kol eksenleri üzerinde oluşabilecek olan maksimum tork ve güç ihtiyaçlarıdır. Bu nedenle normal çalışma koşullarında motor üzerinde çıkan değerler çok çok altında değerler elde edilecektir.

Çizelge 3.1 : Dinamik analiz sonuçları.

Kuvvet (N)	Zaman (sn)	1. Eklem		2. Eklem		3. Eklem		4. Eklem	
		Güç (W)	Tork (Nm)	Güç (W)	Tork (Nm)	Güç (W)	Tork (Nm)	Güç (W)	Tork (Nm)
10,0	1,0	54,0	13,8	67,1	14,3	12,9	5,4	13,0	4,9
10,0	2,0	27,3	14,0	33,3	14,1	6,3	5,1	6,6	5,0
10,0	3,0	18,3	14,1	22,2	14,1	4,2	5,1	4,4	5,0
10,0	4,0	13,7	14,1	16,6	14,1	3,2	5,1	3,3	5,0
10,0	5,0	11,0	14,1	13,3	14,1	2,5	5,0	2,6	5,0
20,0	1,0	74,7	19,1	92,3	19,6	21,4	8,5	21,0	7,9
20,0	2,0	37,7	19,4	46,0	19,5	10,7	8,2	10,6	8,1
20,0	3,0	25,2	19,5	30,6	19,5	7,1	8,1	7,1	8,1
20,0	4,0	18,9	19,5	23,0	19,5	5,3	8,1	5,3	8,1
20,0	5,0	15,2	19,5	18,4	19,5	4,3	8,1	4,2	8,1
30,0	1,0	95,6	24,4	117	25,0	30,1	11,6	29,1	11,0
30,0	2,0	48,2	24,8	58,7	24,9	15,0	11,3	14,6	11,1
30,0	3,0	32,2	24,8	39,1	24,9	10,0	11,2	9,8	11,2
30,0	4,0	24,2	24,9	29,3	24,9	7,5	11,2	7,3	11,2
30,0	5,0	19,3	24,9	23,5	24,9	6,0	11,2	5,9	11,2
40,0	1,0	116	29,8	143	30,4	38,9	14,6	37,2	14,1
40,0	2,0	58,6	30,2	71,4	30,3	19,4	14,3	18,7	14,2
40,0	3,0	39,2	30,2	47,6	30,3	12,9	14,3	12,5	14,2
40,0	4,0	29,4	30,3	35,7	30,3	9,7	14,3	9,3	14,2
40,0	5,0	23,5	30,3	28,5	30,3	7,8	14,3	7,5	14,2
50,0	1,0	137	35,2	168	35,7	47,7	17,7	45,2	17,2
50,0	2,0	69,1	35,5	84,1	35,7	23,8	17,4	22,7	17,3
50,0	3,0	46,1	35,6	56,0	35,7	15,9	17,4	15,1	17,3
50,0	4,0	34,6	35,6	42,0	35,7	11,9	17,3	11,4	17,3
50,0	5,0	27,7	35,7	33,6	35,7	9,5	17,3	9,1	17,3

3.3 Kütle Yer Değişimi Dinamik Analizi

Bir önceki bölümde her bir eklem ayrı ayrı incelenmiş ve eklem farklı ivmeler altında farklı kuvvetlere maruz kalması sonucunda eklemde oluşan tork ve güç tüketim bilgileri incelenmiştir. Yapılan bu analizleri eklem eksenin de oluşabilecek maksimum tork değerlerinin bulunmuştur. Bu bölümde ise önceden belirlenmiş olan bir yörünge üzerinde kol sürülürken, uç işlevci tarafından bir kütle belli bir konumdan farklı bir konuma aktarımı yapılacaktır. Yani kolun imalatı sonrasında çalışmasında karşılaşılabileceği tipik bir hareketi yapması sonucu oluşan tork ve güç değerleri incelenecektir.

Daha önceki tasarım bilgilerinde anlatıldığı gibi kol tasarımı içerisinde herhangi bir uç işlevci söz konusu değildir. Uç işlevci yerinde topuz konulmuştur. Kavrama işlemleri topuz ucunda yapılmaktadır.

Çizelge 3.2 : Planlanan eklem hareketleri.

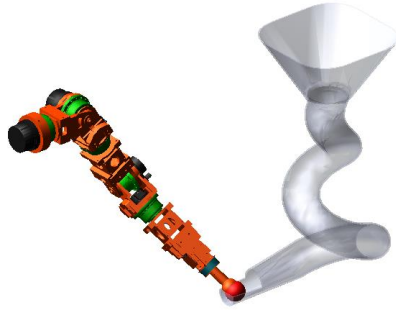
	Eklem 1	Eklem 2	Eklem 3	Eklem 4	Eklem 5	Eklem 6
0-3 sn	45°	30°	90°	45°	0°	0°
3-6 sn	0°	75°	0°	0°	-90°	-30°
6-9 sn	-45°	-105°	-90°	-45°	90°	30°

Kol toplam hareketini 9 sn içerisinde tamamlamaktadır. İlk 3 sn içerisinde 4 kg ağırlığında topun koordinatlarına ilerlemektedir. Bu ağırlık kolun maksimum kaldırabilme limiti olarak kabul edilmektedir. Kol, topun koordinatlarına ulaştığında sanki top uç işlevci tarafından kavranıyormuş kabulü yapılarak, topuz ucu ile top, birlikte hareket edecek şekilde programlanır(her hangi bir uç işlevci tasarımı daha olmadığı için böyle bir yöntem seçilmiştir.). 3-6. saniyeler arasında kol, topu hazırlanan boru mekanizmanın üzerinde sürmektedir. 6. saniyede kol, uç işlevcisinin topu bıraktığı kabulü yapılmıştır, yani topuz ile top arasındaki bağlantı kesilmektedir. 6 ile 9 saniyeler arasında kol tekrar başlangıç pozisyona geri gelmektedir.

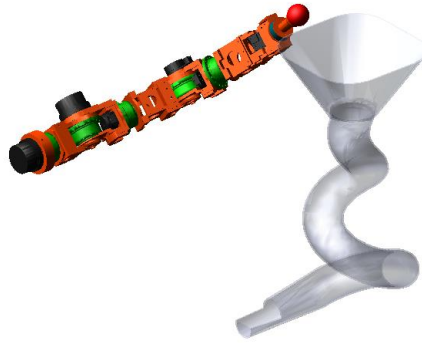
Kolun yukarıda bahsedilen hareketi sırasında kol eklemlerinin yaptıkları hareketleri Şekil 3.19,Şekil 3.20,Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’te MSC Adams programından alınan görüntüler ile görselleştirilmiştir.



Şekil 3.19 : Planlanan rota 1.



Şekil 3.20 : Planlanan rota 2.

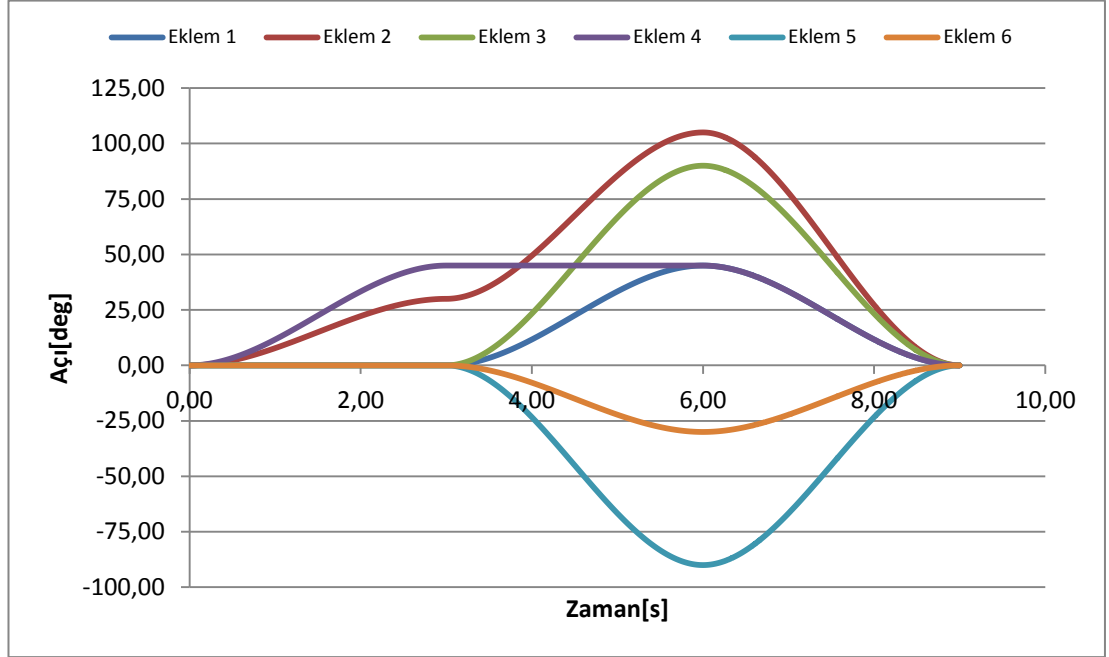


Şekil 3.21 : Planlanan rota 3.

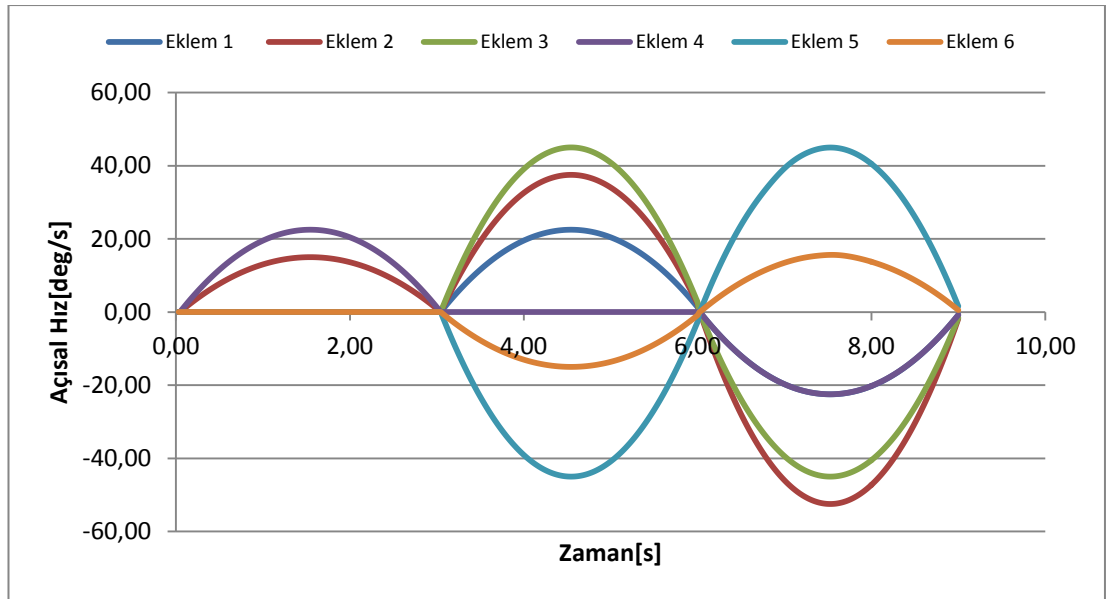


Şekil 3.22 : Planlanan rota 4.

Çizelge 3.2’de eklemlere göre verilmiştir. Eklemler için seçilen açı değerleri bizim tarafımızdan belirlenmiştir.

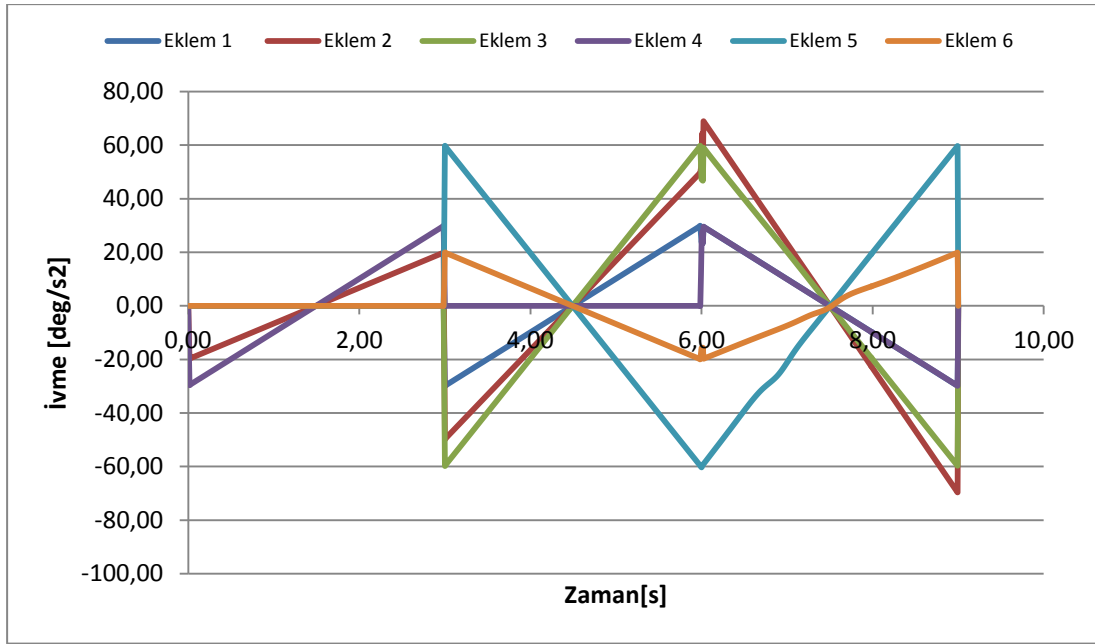


Şekil 3.23 : Eklem açı-zaman grafiği.



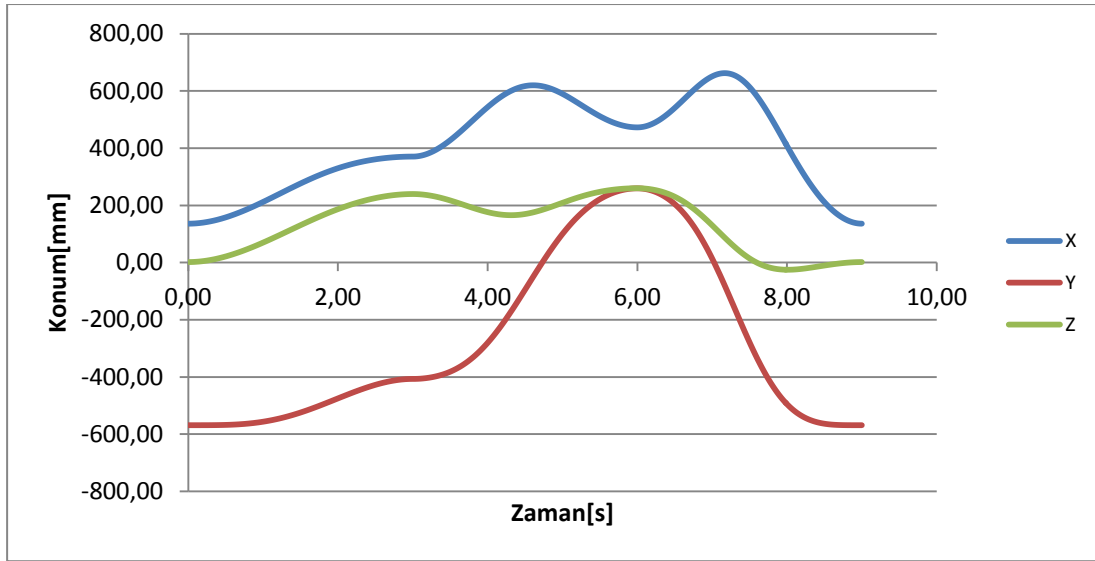
Şekil 3.24 : Eklem açısal hız -zaman grafiği.

Kol eklemlerini Çizelge 3.2’teki hareketlerini gerçekleştirirken izleyeceği hız ve ivme profilini sayfa 42’de ivme profili seçimi başlığı altında incelemiştir. Bu ivme profili seçimi yapılarak, minimum tork ve güç ihtiyacı için ivme profilinin seçimi gerçekleştirilmiştir.



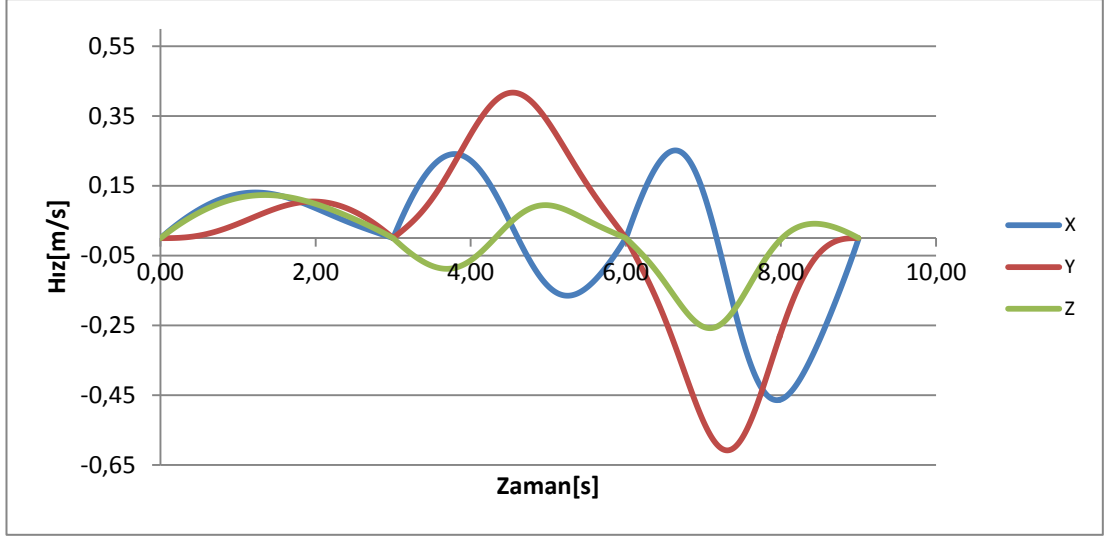
Şekil 3.25 : Eklem açısal ivme- zaman grafiği.

Eklemlerin yukarıda verilen grafiklerde hareket etmesi sonucunda uç işlevciye ait konum hız ve ivme grafiklerini aşağıda bulabilirsiniz. (Şekil 3.26, Şekil 3.27)

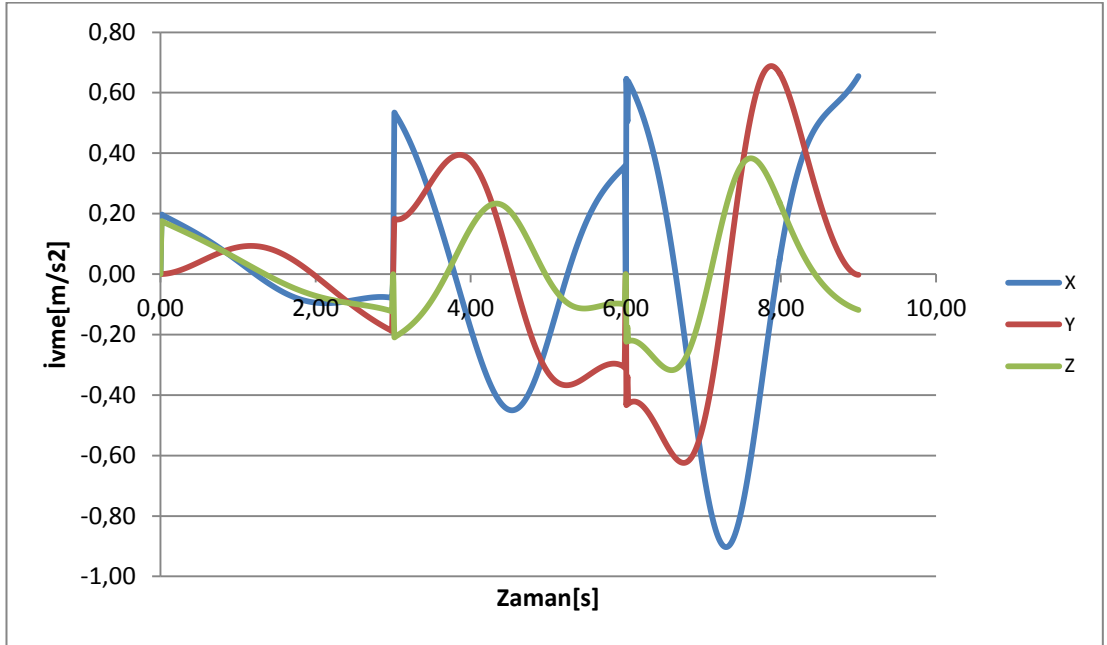


Şekil 3.26 : Uç işlevci konum- zaman grafiği.

Şekil 3.26’de konum değişiminin ilk değerleri kolun sıfır pozisyonu durumunda, uç işlevcinin bulunduğu pozisyonudur. 3. saniyede kol topun bulunduğu pozisyonunda, 6. Saniyede kolu bıraktığı pozisyonundadır. En son kol uç işlevcisi 9. Saniyede başladığı pozisyona geri dönmektedir. Orijin olarak 1. Eksenin merkezi kabul edilmiştir. Kolun boyutlarına ait şekilde bunla ilgili bilgiyi bulabilirsiniz..



Şekil 3.27 : Uç işlevci hız-zaman grafiği.

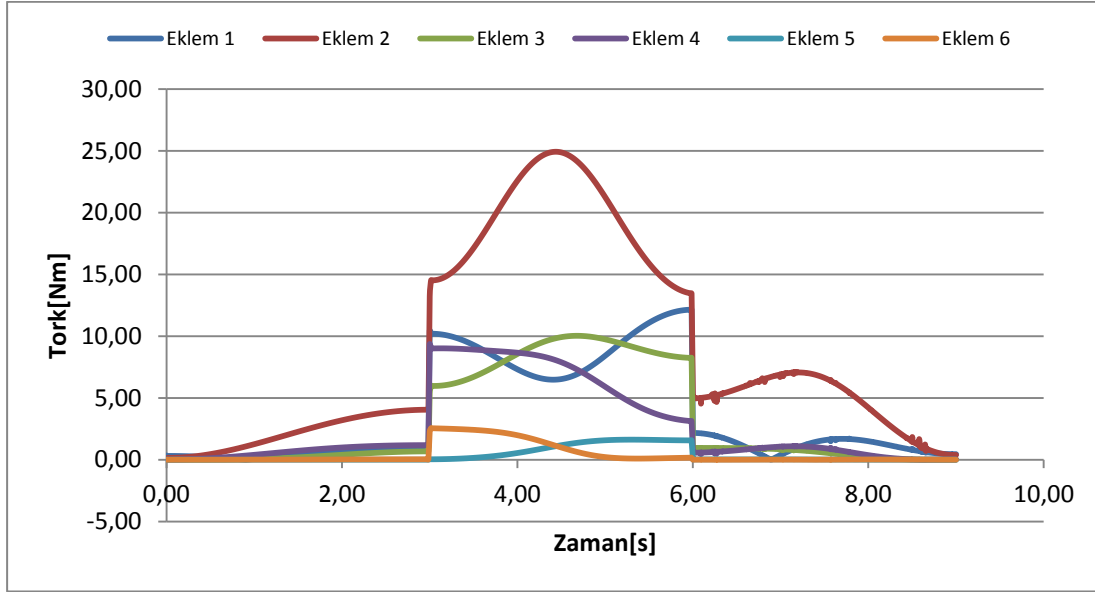


Şekil 3.28 : Uç işlevci ivme-zaman grafiği.

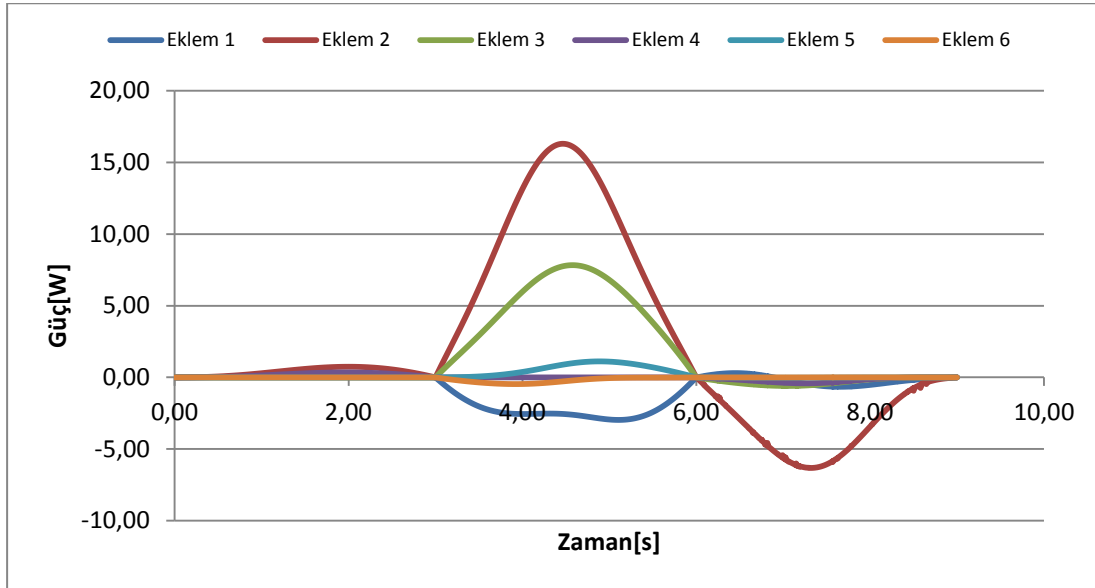
Yukarıda verilen eklem hareketleri, istenilen ivme ve hız profillerinde gerçekleştirildiğinde aşağıdaki tork ve güç tüketim grafikleri elde edilmektedir.

Şekil 3.29, Şekil 3.30'te kol eklemlerinin istenilen hareketleri yapabilmesi için gereken tork ve güç değerlerini görülmektedir. Her iki grafikte de görüldüğü üzere ilk 3 saniye içerisinde kol topu kavramak üzere hareketini yapmaktadır. Yani bu sırada sadece kendi ağırlığını taşıyarak hamle gerçekleştirmektedir. 3. Saniyede topu kavrayarak topu 3. Saniyede hedeflenen konuma ulaştırmaktadır. Bu işlem sırasında 4 kg'lık topun taşınması nedeni ile eklemler üzerinde oluşan tork miktarları

artmaktadır. Momentsel etkinin en fazla olduğu 2. Eklemde bu hareket sırasında yaklaşık 25 Nm’lik bir tork oluşmuştur. 0-9. Saniyeler arasında oluşan maksimum tork miktarlarını Çizelge 3.3’te görebilirsiniz.



Şekil 3.29 : Eklem tork-zaman grafiği.



Şekil 3.30 : Eklem güç- zaman grafiği.

Çizelge 3.3 : Eklemler üzerinde oluşan maksimum tork miktarları[Nm].

	Eklem 1	Eklem 2	Eklem 3	Eklem 4	Eklem 5	Eklem 6
0-9 sn	12,14	24,90	10,03	9,02	1,62	2,52

Tork sonuçlarına benzer şekilde güç tüketimleri 3. Saniye yani topun taşınmaya başlaması ile artmıştır. Taşıma sırasında maksimum güç tüketimi 2. Eklem üzerinde ve yaklaşık 16 Watt civarındadır. 0-9. Saniyeler arasında oluşan maksimum güç tüketim miktarlarını Çizelge 3.4’da görebilirsiniz.

Çizelge 3.4 : Eklemler üzerinde oluşan maksimum güç tüketim miktarı [W].

	Eklem 1	Eklem 2	Eklem 3	Eklem 4	Eklem 5	Eklem 6
0-9 sn	2,96	16,30	6,85	0.4	1,10	0.36

Elde edilen sonuçlar, seçilen motor kapasiteleri ile karşılaştırıldığında, motor üzerine binecek olan yüklerin, motorlar tarafından rahatlıkla karşılanacağı görülmektedir. Ayrıca oluşan maksimum yükler, sürekli olmadığından motorlar tarafından karşılanması daha kolay olacaktır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışma ile İTÜ Sistem Dinamiği ve Kontrol laboratuvarında yapılması düşünülen tam insansı robotun kol bölümü için ön konstrüksiyon ve güç elemanlarının seçimi gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamda dünya üzerinde yapılan ve yapılmakta olan insansı robot araştırmaları incelenmiş olup yapılacak olan tasarımın en güncel araştırmalar baz alınarak en sağlıklı şekilde oluşturulması sağlanmıştır.

Kol boyutları ve insan kolu performans kabiliyetinin ortaya konması için, istatistiksel çalışmalar göz önünde bulundurulmuştur. Robot kolunun hangi boyutta olacağı, çalışma alanının büyüklüğü, kaldırabileceği ağırlık, uç işlevcinin sahip olacağı hız gibi değerler ortalama bir insanın sahip olabileceği özelliklere göre seçilmiştir.

İnsansı robot kolu tasarımının ortaya çıkması için 3 boyutlu modelleme yapılmış, bu modelleme için SolidWorks programı kullanılmıştır. Modelleme aşamasında tasarım, imalat kriterleri ve gerekli mukavemet özelliklerinin sağlanabilmesi açısından 11 adımda son haline getirilmiştir. Ancak kablolama ve sensör yerleşimleri için değişiklikler olabilmektedir.

Yapılan her tasarımda kolun eksik ve geliştirilmesi gereken kısımlar kola eklenmiştir. İlk tasarımlarda daha çok eklemlerin dizilimlerinin nasıl olacağı ve imalata uygun olması açısından kolun parçalarının ne şekilde olması gerektiği ortaya çıkmıştır. Ayrıca imalat toleranslarının yüksek olduğu saç parçalar ve kaynaklı birleştirme işlemlerinin kol tasarımı için uygun olmadığına karar verilmiştir. Bu yöntemler yerine parçaların tamamının CNC bir tezgâh üzerinde işlenmesi ve parçaların birleştirmelerinin cıvata yardımı ile yapılmasının daha doğru olacağına karar verilmiştir.

5. Tasarımda kol istenilen boyutlarda ortaya konulmuştur. Tasarlanan parçaların mukavemet açısından değerlendirilmesi amacı ile kolun sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Kolun uç bölümüne, kolun modellenmeyen kısımlarını ve bozucu etkileri temsil etmesi amacı ile kuvvet ve tork değerleri uygulanmıştır. Elde edilen

sonuçlarda, kolun düşünölen bozucu etkiler ışığında yüksek mukavemete sahip olduğu görölmüşür. Bu nedenle ileriki tasarımlarda, kol üzerinde hafifletme çalışması yapılması kararı alınmıştır.

8. Tasarımda ise, kol üzerinde kullanılan motor ve harmonic drive seçimlerinin, doğruluğu kontrol edilmiştir. Bu kontrolün yapılabilmesi için MSC Adams programı içerisinde kolun dinamik modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model üzerinde her bir eklem, taşıyabileceğı maksimum yük ve güç ile kontrol edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre motor ve harmonic drive elemanlarının seçimleri güncellenmiştir. Ayrıca 3. eklemin farklı bir oryantasyonda kola bağlanmasına karar verilmiştir. Böylelikle kol ağırlık merkezi gövde bağlantısına daha yakın olabilecektir.

11. tasarımda kolun güncellenen hali ile analizler tekrar edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan kolun istenilen performans değerleri içerisinde çalıştığı görölmektedir. Ayrıca kolun normal çalışma şartları altında, herhangi bir kütlenin yerinin kol tarafından değıştirilmesi sırasında eklemlerde oluşan tork ve güç değerleri de incelenmiştir. Daha önceki yapılan analiz sonuçlarında olduğu gibi bu analizde de limitlerin altında kalınmıştır.

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 ‘te son tasarıma ait değerler görölmektedir. Eklemlere ait verilen çalışma alanı, sıfır pozisyonundan hareket edebileceğı açı miktarıdır. Eklem hızları ise, motorların sahip olduğu ve nominal hız değeri ile redüksiyon oranının çarpılmasıdır.

Çizelge 4.1 : Tasarım 11 özellikleri.

Özellik	Değer
Yükleme Sınırı	4 kg
Serbestlik derecesi	6
Toplam Ağırlık	6,750 kg

11. tasarıma kadar yapılan çalışmalarda kolun mümkün olduğu kadar bitmiş haline yakın olacak şekilde tasarımı yapılmış ve analizler yardımı ile bu çalışmaların istenilen koşulları sağlayıp sağlamadığının kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Kolun konstrüksiyonun temel öğelerinden olan motor ve harmonic drive yerleşimleri 11. tasarıma kadar olan çalışmalarda kesinleşmiştir. Bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda kol üzerine yerleştirilecek sensor ve sürücü kartı gibi elemanlar için konstrüksiyonda ufak değişiklikler yapılabilir. Yapılan bu değişiklikler ile kola eklenecek olan ağırlıklar dinamik ve sonlu elemanlar analizinde dikkate alındığı için herhangi bir sorun yaratmayacaklardır.

Çizelge 4.2 : Tasarım 11 eksen hareket limitleri.

Eksenler	Çalışma Alanı	Ekleme Hızı
Eksen 1	$\pm 180^\circ$	186,96%/s
Eksen 2	$-4^\circ/+170^\circ$	186,96%/s
Eksen 3	$\pm 180^\circ$	315%/s
Eksen 4	$\pm 110^\circ$	315%/s
Eksen 5	$\pm 180^\circ$	315%/s
Eksen 6	$\pm 90^\circ$	246%/s

Ayrıca kol ucuna yerleştirilmesi düşünülen uç işlevci için gerekli olan civata ve pim bağlantı delikleri tasarıma eklenmiştir. Uç işlevci hakkında çalışılacak olan diğer bir tez çalışmasında bu bağlantı deliklerinin konumları paylaşılarak, uç işlevcinin bu koşullar göz önünde bulundurularak tasarlanması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Ambrose, R.** (2005). *Robonaut*. Johnson Space Center.
- Asfour, T., Regenstien, K., Azad, P., Schröder, J., & Bierbaum, A.** (t.y). *ARMAR-III An Integrated Humanoid Platform for Sensory-Motor Control*. Karlsruhe: Institute for Computer Science and Engineering .
- Barutçuoğlu, E. I.** (2001). *Robotların Tarihçesi*.
- Diftler, M. A., Spain, I., & Radford, N.** (2004). Mobile Manipulation using Nasa's Robonaut. *International Conference on Robotic & Automation*. New Orleans.
- Festo.** (2010). *Airic's Arm*. Almanya: Festo AG & Co.
- IFR Internatinal Federation Of Robotics.** (2012). *History of Industrial Robots*. Almanya.
- Murray, Richard M.**, A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC, s 78-124, Boca Raton, 1994.
- Olaru, I., Krut, S., & Pierrot, F.** (2009, October 11-15). Novel mechanical design of biped robot SHERPA using 2 DOF cable differential modular joints'. *Internation Conference on Intelligent Robotic and Systems*. St. Louis USA.
- Ogata, K.**, 2002. Modern Control Engineering, Prentice Hall, New Jersey.
- Park, C., Kyung, J. H., Choi, T.-Y., Do, H. M., Kim, B.-I., & Lee, S.-H.** (2012). Design of an Industrial Dual Arm Robot Manipulator for a Human-Robot Hybrid Manufacturing. *9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*. Daejeon, Korea.
- Sakagami, Y., & Ryuji Watanabe, C. A.** (2002). The intelligent ASIMO: System overview and integration. *Intl. Conference on Intelligent Rotots and Systems*. Lausanne, Switzerland.
- Sporer, N.** (2004). *DLR Light Wight Robot III*. German Aerospace Center.
- COMAN Humanoid Robot.** (t.y.). Istituto Italiano di Tecnologia, Adres: www.iit.it/en/robots/coman.html
- Drive, Harmonic.** (2010). *Harmonic Drive Adantages*. Harmonic Drive: ,Adres: <http://www.harmonicdrive.net/reference/advantages/>
- Danish Technological Institute.** (2012). *UR-10 User Manual* tarih: 20.02.2013. Adres: www.universal-robots.com.
- National Aeronautics and Space Administration.** (2013). *MAN-SYSTEMS INTEGRATION STANDARDS*. Tarih: 01.02.2013 Adres: <http://msis.jsc.nasa.gov/sections/section03.htm>

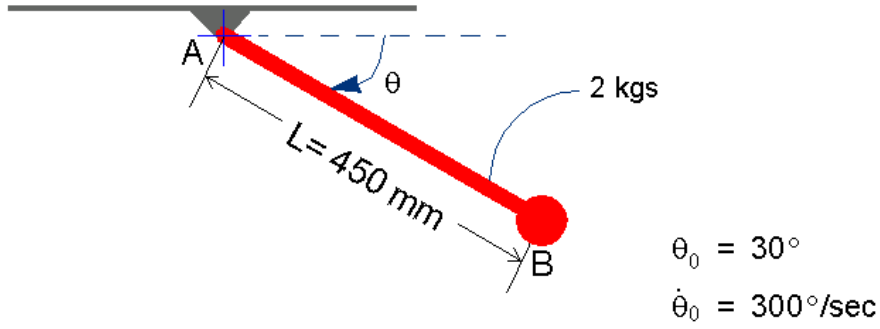
EKLER

EK A: Adams - Analitik Hesap Karşılaştırması

EK A

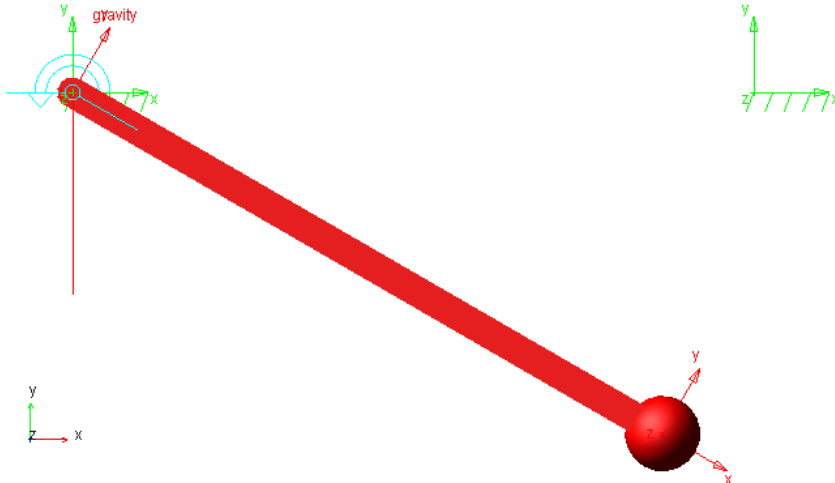
Bu bölümde 1 serbestlik derecesine sahip çubuk mekanizmasının dinamik modeli MSC Adams programı ve analitik olarak çözdürülerek sonuçlar karşılaştırılacaktır.

1 serbestlik derecesine sahip modeli aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz. Ağırlığı önemsiz bir çubuk ucunda bulunun kütlenin, bağlantı noktasında oluşturduğu reaksiyon kuvvetleri incelenecektir. Kütleimiz 300 deg/sn ilk hızla analizine başlamaktadır.

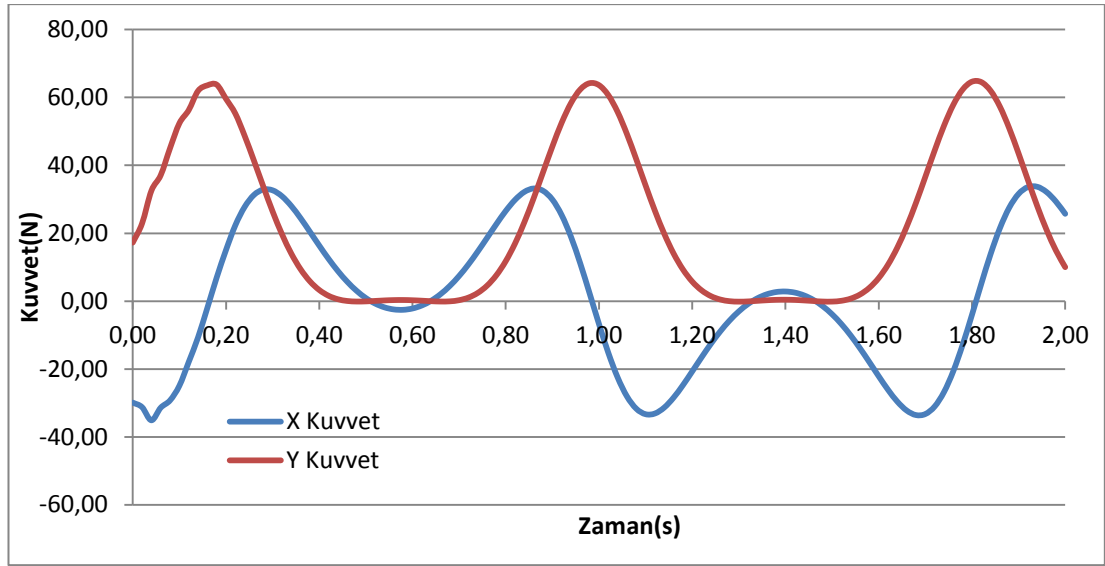


Şekil A.1 : Bir serbestlik dereceli çubuk mekanizması problem tanımı.

Problem tanımında verilen değerlere göre MSC Adams modeli kurulmuş ve toplam 2 sn için bir dinamik çözüm programdan alınmıştır.

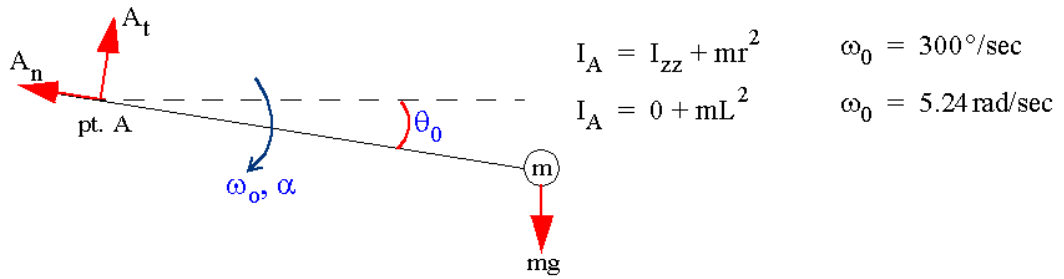


Şekil A.2 : Adams modeli.



Şekil A.3 : Dinamik modelin MSC Adams sonuçları.

Analitik hesaplamalar aşağıdaki formülasyonlar yardımı ile yapılmıştır. Analitik çözüm ilk an için yapılacak ve değerleri paylaşılacaktır.



Şekil A.4 : Dinamik model analitik çözüm.

$$\sum M_a = I_A * \alpha \quad (\text{A.1.1})$$

$$-mg(L \cos 30) = (mL^2)\alpha \quad (\text{A.1.2})$$

$$\alpha = -\frac{g}{L} \cos 30 = 18.88 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad (\text{A.1.3})$$

$$\sum F_t = mr\alpha \quad (\text{A.1.4})$$

$$mg \cos 30 - A_t = mL\alpha \quad (\text{A.1.5})$$

$$A_t = m(g \cos 30 - L\alpha) = 0 \text{ N} \quad (\text{A.1.6})$$

$$\sum F_t = mr\omega^2 \quad (\text{A.1.7})$$

$$A_n - mg \cos 30 = mL\omega^2 \quad (\text{A.1.8})$$

$$A_n = mg \cos 30 + mL\omega^2 = 34.53 \text{ N} \quad (\text{A.1.9})$$

Adams sonuçlarında t=0 için x ve y değerlerinin bileşkesi alındığında 34,48 değeri elde dilmektedir. Sonuç arasındaki fark % 0.14 mertebesindedir. Oluşan bu fark analitik hesaplamada kullanılan yuvarlamalardan kaynaklanmaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyadı: İlkay MEŞELİ

Doğum Yeri ve Tarihi: Bursa, 1988

E-Posta: ilkaymeseli@gmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği