



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**YEDİ SERBESTLİK DERECELİ İKİ
KÜRESEL BİR DOĞRUSAL EYLEYİCİLİ
ROBOT KOLU SİSTEMİNİN TASARIMI VE
DİNAMİK ANALİZİ**

Ahmet Saygın ÖĞÜLMÜŞ

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Mayıs -2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet Saygın ÖĞÜLMÜŞ tarafından hazırlanan “ **Yedi Serbestlik Dereceli İki Küresel Bir Doğrusal Eyleyicili Robot Kolu Sisteminin Tasarımı Ve Dinamik Analizi** ” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

.....

Danışman

Doç. Dr. Mustafa TINKIR

.....

Üye

Doç. Dr. Murat DİLMEÇ

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ümit ÖNEN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Erdi GÜLBAHÇE

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Ahmet Saygın ÖĞÜLMÜŞ

Tarih:

ÖZET

DOKTORA TEZİ

YEDİ SERBESTLİK DERECELİ İKİ KÜRESEL BİR DOĞRUSAL EYLEYİCİLİ ROBOT KOLU SİSTEMİNİN TASARIMI VE DİNAMİK ANALİZİ

Ahmet Saygın ÖĞÜLMÜŞ

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Doç. Dr. Mustafa TINKIR

2022, 83 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

Doç. Dr. Mustafa TINKIR

Doç. Dr. Murat DİLMEÇ

Dr. Öğr. Üyesi Ümit ÖNEN

Dr. Öğr. Üyesi Erdi GÜLBAHÇE

Bu çalışmada, yedi serbestlik dereceli iki küresel bir doğrusal eyleyiciden oluşan robot kolunun özgün tasarımı, dinamik analizleri ve prototip imalatı gerçekleştirilmiş ve teorik hesaplamalar ile deneysel test sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca robot kolu üzerinde kullanılacak ve çalışmanın bir diğer özgün yönünü teşkil eden küresel motorların tasarımı, manyetik analizleri ve prototip imatları ilk defa gerçekleştirilmiştir. Bir robot kolunda kullanılan ilk küresel motor olması yönüyle bu zamana kadar yapılan çalışmalardan ayrılmaktadır. Bu çalışmada iki küresel ve bir doğrusal eyleyici kullanılarak yedi serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip yeni bir mekanizma ortaya çıkarılmıştır. Robot kolunda kullanılan küresel eyleyiciler hem küresel mafsal hem de ayrık hareket eden sabit mıknatıslı ve üç serbestlik dereceli yeni tip bir küresel motor özelliği taşımaktadır. Tümüleşik hareket yerine devinme ve dönme hareketleri birbirinden ayrılarak küresel motorun tasarımı sadeleştirilmiş, kontrolü ve uygulaması kolaylaştırılmıştır. Ayrıca, çalışmada prototipi yapılan küresel motorlar, ayrık hareket eden sabit mıknatıslı küresel motorlar (ASMKM) olarak bilinen motorlardan modüler tasarımı ve farklı rotor yataklaması ile ayrılmaktadır. Motorların tasarımında Ansys Maxwell sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Yedi serbestlik dereceli robot kolunun düz kinematik eşitlikleri ise Matlab/Peter Corke's RVC modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ters kinematik eşitliklerin çözümünde ise Newton-Raphson metodu kullanılmıştır. Çalışma sonunda; küresel motorların açı, tork ve devir testleri yapılmış ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca robot kolunun yörünge performansı hem sayısal hem de deneysel olarak ölçülmüştür. Bu sayede küresel eyleyiciler ilk defa bir robot kolunda kullanılarak bundan sonra yapılacak çalışmaların önü açılmış ve uzun süredir aynı yapıları kullanan robotik uygulamalara küresel motorda dahil edilerek farklı bir alternatif sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yedi serbestlik dereceli robot kolu, küresel motor, dinamik analiz prototip imalat, simülasyon, deneysel test.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

DESIGN AND DYNAMIC ANALYSIS OF SEVEN DEGREES OF FREEDOM ROBOT ARM SYSTEM WITH TWO SPHERICAL AND A LINEAR ACTUATORS

Ahmet Saygın ÖĞÜLMÜŞ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Assoc.Prof. Mustafa TINKIR

2022, 83 Pages

Jury

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM
Assoc. Prof. Mustafa TINKIR
Assoc. Prof. Murat DİLMEÇ
Asst. Prof. Ümit ÖNEN
Asst. Prof. Erdi GÜLBAHÇE

In this study, the novel design, dynamic analysis and prototype production of the robot arm consisting of two spherical and one linear actuators with seven degrees of freedom are carried out and the theoretical calculations and experimental test results are compared. In addition, in the current study, the design, magnetic analysis and prototype manufacturing of the spherical motor placed on the robot arm were carried out. In terms of being the first spherical motor used in a robot arm, it differs from the work done so far. As a result, a new mechanism with seven degrees of freedom of movement is revealed using two spherical and one linear actuators. The spherical actuators used in the robot arm both have the feature of a spherical joint and are a new type of spherical motor with three degrees of freedom and permanent magnets that act separately. By separating the tilting and spinning movements instead of integrated motion, the design of the spherical motor is simplified and its control and application is facilitated. The spherical motors prototyped in the study differ from the non-integrated permanent magnet spherical motors (NR-PMSM) with their modular design and different rotor bearings. Ansys Maxwell finite element program is used in the design of the motors. The forward kinematic equations of the seven-degree-of-freedom robot arm are obtained using Matlab/Peter Corke's RVC module. Newton-Raphson method is used in the solution of inverse kinematic equations. At the end of the study; angle, torque and speed tests of spherical motors are realized and compared with simulation results. In addition, the trajectory performance of the robot arm is measured both numerically and experimentally. In this way, spherical actuators are used in a robot arm for the first time and a different alternative studies are offered by including the spherical actuators in robotic applications that use the same structures for a long time.

Keywords: Seven degrees of freedom robot arm, spherical motor, dynamic analysis, prototype manufacturing, simulation, experimental testing.

ÖNSÖZ

Başta **ailem**'e ve sevgili hocam **Doç. Dr. Mustafa TINKIR**'a, emeğini esirgemeyen **Prof. Dr. Şahin YILDIRIM**'a ve **Dr.Öğr.Üyesi Ümit ÖNEN** 'e ve bu çalışmada tüm emeği geçenlere katkılarından dolayı sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışması, vatanın her karış toprağını kanıyla, canıyla sulamış **ecdadıma** ve **aziz şehitlerimize**, kısıtlı imkânlarla ülkem adına bilime ve fenne katkı sunan, sunmaya da devam eden tüm **bilim insanlarına** ithafen hazırlanmıştır.

Ahmet Saygın ÖĞÜLMÜŞ

KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	10
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
3.1. Robot Kolunun Dinamik Analizi.....	26
3.1.1. Robot Kolunun Kinematığı	26
3.1.2. Homojen Transformasyon Yöntemi.....	27
3.1.3. İleri kinematığın RVC Toolbox ile Çözümü.....	29
3.1.4. Jacobiyen Matris	30
3.1.5. Jakobien Matrisin Moore-Penrose Tersini	31
3.1.6. Ters Kinematığın Sayısal Çözümü	32
3.1.7. Newton Raphson Metodu.....	32
3.1.8. Lagrange -Euler Formülasyonu	33
3.1.9. Robot Kolunun Dinamiği	34
3.2. Farklı Yapıdaki Küresel Eyleyici/Motor Tipleri	36
3.2.1. Ultrasonik Küresel Eyleyici/Motor.....	36
3.2.2. Değişken Relüktanslı Küresel Eyleyici/Motor	36
3.2.3. Sabit Mıknatıslı Küresel Eyleyici/Motor	36
3.2.4. Küresel İndüksiyon Eyleyici/Motor.....	37
3.2.5. Küresel Adım Eyleyici/Motor	38
3.3. Küresel Motorun Yapısı	38
3.3.1. Stator Yapısı.....	38
3.3.2. Rotor yapısı	38
3.3.3. Manyetik Alan Ve Tork Modeli	38
3.4. Ansys Maxwell Sonlu Elemanlar Programı	40
3.5. Elektronik Donanım	40
3.6. Neodymium Mıknatıs	41
3.7. Doğrusal Eyleyici	42
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE BULGULAR.....	43
4.1. Yedi Serbestlik Dereceli İki Küresel Bir Doğrusal Eyleyicili Robot Kolu Sisteminin Tasarımı Ve Dinamik Analizi	43
4.1.1. İleri Kinematik	44
4.1.2. Ters Kinematik.....	45
4.1.3. Manüplatörün Dinamiği	46
4.2. Küresel Motorun Analizi Ve Tasarımı.....	53

4.3. Robot Kolunun Kontrolü	64
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	65
5.1. Küresel Motor Test Sonuçları.....	65
5.2. Robot Kolu Test Sonuçları.....	71
5.3. Sonuçlar	74
5.4. Öneriler	75
6. KAYNAKLAR	76
7. EKLER	83

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

- B** : Akı yoğunluğu,
 μ_0 : Hava geçirgenliği
dS : Sonsuz küçüklikte etki alanı
 B_n : Maksimum akı dağılımı
N : Kutup çifti
 θ : Rotor konumu
 Ψ_n : Devirme ve dönme sargı akımlarının faz açısı
 B_s : Dönme bobinlerinin ürettiği toplam hava boşluğunun akı yoğunluğudur.
 B_t : Devirme bobinlerinin ürettiği toplam hava boşluğunun akı yoğunluğudur.
r : Rotor yarıçapı ,
l : Statorun etkin boy uzunluğudur
 I_s : Dönme akımının maksimum değerini
 ω : Açısal hızı
 $\gamma_{\alpha,\beta}$: Rotor pozisyon açısı
 $I_{t,U}$: Üst statorün maksimum akımı
 $I_{t,L}$: Alt statorun maksimum akımı
P : Uç işleyicinin pozisyonunu
q : Eklem değişkenlerini

Kısaltmalar

- SPS (KKK)**: Spherica – Planar – Spherical (Küresel – Kayar– Küresel)
DC (DA): Direct Current (Doğru Akım)
NR-PMSM : Non-integrated Runner Permanent Magnet Spherical Motor (Ayrık Hareket Edebilen Sabit Miknatıslı Küresel Motor)
BPMSM (YSMSM) : Bearingless Permanent Magnet Synchronous Motor (Yataksız Sabit Miknatıslı Senkron Motor)

1. GİRİŞ

Robotik, geleneksel mühendislik sınırlarını aşan modern bir teknoloji alanıdır. Robotların karmaşıklığını ve uygulamalarını anlamak için birçok mühendislik bilimi disiplininin yetisine sahip olmak gerekir. Robot terimi ilk olarak Çek oyun yazarı Karel Capek tarafından 1920'de Rossum'un "Evrensel Robotlar" adlı oyununda kelime dağarcığımızıza eklendi, "robota" kelimesi çekçe işçi için kullanılan bir kelimedir (Pandilov ve Dukovski 2014). O zamandan beri bu terim medikal cihazlar, su altı araçları, otonom kara araçları, endüstriyel yardımcı araçlar vb. mekanik cihaz için yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Günümüzde genellikle bilgisayar kontrolü altında sınırlı otonom yapıda çalışan hemen hemen her şeye bir noktada robot denmektedir.

İnsanların kullanımının pratik olmadığı veya istenmediği alanlarda robotların kullanıldığı birçok uygulama vardır. Bunlar arasında endüstriyel operatörlük, sualtı ve uzay keşfi, uydu kontrolü ve onarımı, patlayıcı cihazların etkisiz hale getirilmesi ve radyoaktif ortamlarda çalışılması yer almaktadır. Bunlara ek olarak, yapay uzuvlar gibi protezler, endüstriyel manipülatörlerinkine benzer analiz ve tasarım yöntemleri gerektiren robotik cihazlardır.

Son yıllarda tüm dünyayı etkisi altına alan Covid-19 pandemi süreci ile beraber, endüstride üretim ve iş akışlarının sekteye uğraması tekrar robotik uygulamaları gündemde yer edinmiştir. Teknolojik gelişmeler ve imalat sektöründe işçilik maliyetlerinin ve rekabetin giderek artması üretimin belirli safhalarından başlamak üzere insanlarla aynı ekosistemde çalışabilen adaptif robot operatörlerini sektörün bir parçası haline getirmiştir. Bu bağlamda içinde bulunduğumuz konjontür robotlar üzerinde yapılan çalışmalarında hızlandırmış ve çeşitlendirmiştir. Genel olarak bir robot kolu belirli uzuvlar ve bu uzuvları manüple eden eyleyiciler, seçme, eleme, kavrama vb aksiyonu yerine getiren uç işleyici (end effector), kontrol ünitesi ve sensörlerden meydana gelmektedir. Robotun ana bileşenlerinden en önemli elemanı şüphesizki eyleyicilerdir. Eyleyici bir robotik sistemdeki ana maliyet yükününde çoğunu kapsamaktadır. Günümüzde robotik teknolojiden beklenen ana inovasyonların en önemlilerden bir taneside boyuttur. Robotun ağırlığı ve boyutu, endüstriyel olarak robotların iş istasyonları arasında kolay taşınabilir olması, bakım onarım süresinin minimize edilmesi, düşük enerji tüketimi ve minimum personel ile uygulama yapılabilmesi açısından oldukça önemlidir.

Artık hantal devasa robotlar yerine hafif, seri ve enerji verimi yüksek robotlar tercih edilmektedir.

Bunun için büyük konvansiyonel step, servo dc motorların yerini daha küçük ve daha hızlı bldc, coreless gibi elektrik motorları almıştır. Bu tip seri motorlar harmonik, sikloid, planet redüktör gibi teknolojik redüksüyon elemanları ile birleştirilip robotik sistemlerde kullanılmaktadır. Endüstriyel robotlardaki en büyük problemlerden biride enerji ve haberleşme kablolarının eklemlerin üzerinden döşenmesidir. Hem robotik proses esnasında talaş, cüruf gibi zararlı dış etkenlere maruz kalmakta hemde eklem hareketlerinden dolayı çabuk yıpranmaktadır. Yani geçmişte robotların endüstri ile tanıştığı yıllarda problem olarak görülmeyen ayrıntılar günümüzde farklı algılanmaktadır. Buda sektörden beklenti ve gelişimin göstergesidir.



Şekil 1.1 Dynamixel PM54 serisi tümleşik motor.



Şekil 1.2 Kollmorgen TBM serisi çerçevesiz motor.

Son yıllarda motor teknolojisindeki gelişmelerin neticesinde konvansiyonel motor tasarımları yerine robotlara özgü tasarımlar ön plana çıkmış ve eklemlerin içine gömülebilen delikli şafta sahip motorlar (Şekil 1.2) yada redüksiyonla tümleşik sürücüler üretilmiştir(Şekil 1.1). Arz ve talep döngüsünde robotların kullanımı arttıkça ve teknoloji geliştikçe sürekli kendini yenileyen,çeşitliliği artan ve dahada gelişen marjinal bir sektör oluşmaktadır. Robotların mimarisi yapılacak uygulamaya, kullanılacak ortama göre şekillenmektedir. Örneğin basit bir

seçme eleme operasyonu için 3 serbestlik dereceli scara robot işlevsel iken kaynak operasyonu için altı serbestlik dereceli endüstriyel robot tasarlanmaktadır. Robotların serbestlik derecesi arttıkça üzerinde kullanılacak eyleyici sayısı, donanım ve maliyet artmaktadır. Çok serbestlik dereceli hareket merkezinden tahrikli sistemlerde geleneksel tek serbestlik dereceli motorlar kullanıldığında bileşen sayısı ve ağırlık verimliliği düşürmekte, kompleks geometriye sahip olmasından dolayı tasarımı kısıtlamaktadır. Bu şartlarda bilinen dezavantajları ortadan kaldıran çok serbestlik dereceli motorlar önerilmiş ve araştırılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda yeni bir elektrik motoru modeli olarak, her yönde hareket edebilen küresel motorlar ortaya çıkmıştır (Williams, Laithwaite ve ark. 1959, Lee, Vachtsevanos ve ark. 1988, Kaneko, Yamada ve ark. 1989, Toyama ve Hatae 1993). Küresel motorlar en az iki en fazla üç serbestlik derecesine sahip olabilmektedir. Teorik olarak birden fazla motorun işlevini tek başına yerine getirdiği için tasarım açısından sağladığı kolaylığın yanında maliyet olarakta kazanç sağlamaktadır. Ama bu avantajına rağmen uygulama olarak henüz konvansiyonel motorlar gibi endüstriyel bir ürüne dönüşmemiş ve robotik sistemlerde uygulanamamıştır. Bunun en büyük nedenlerinden biri elektromanyetik olarak tek eksenli bir motorun hareketini sağlamaya nazaran aynı anda üç eksenle küresel bir yüzeyde hareket ettirebilmek oldukça zor ve karmaşıktır. Her geçen gün yeni ve inovatif çalışmaların sayısı ise giderek artmaktadır. Yani gelişim süreci dinamik olmasına rağmen henüz hedeflenen noktaya erişilememiştir.

Bu çalışma robot kolunun küresel tahrikleri için özgün küresel motorların/eyleyicilerin tasarımı ve uygulaması ile birlikte iki küresel bir doğrusal eyleyiciden oluşan 7 serbestlik dereceli mekanizmanın tasarımını ve analizini içermektedir. Mekanizmadaki doğrusal eyleyiciyi endüstriyel olarak temin etmek mümkünken hali hazırda küresel motor bulunmamaktadır. Çalışmanın isterlerine göre ayrıca özgün küresel motor tasarlanmış ve prototipi üretilmiştir.

Bu çalışmanın literatürde yapılan benzer çalışmalara göre farklılığı ve özgün yönleri aşağıda verilmiştir:

1. Daha önce yapılan çalışmalarda üç eyleyici/motorla manuplatör/robot kolu sistemlerinde yedi serbestlik derecesine ulaşamamıştır.
2. Mekanizma yedi serbestlik dereceli olmasına rağmen az sayıda bileşenden oluştuğu için çok minimal bir tasarıma sahiptir.

3. Bu zamana kadar yapılmış küresel motorlar herhangi bir çok serbestlik dereceli robot uzvunda/manuplatörde kullanılmamıştır.
4. Önerilen küresel motorda daha az malzeme kullanılarak daha kompakt bir motor olması için slot mekanizması modüler olarak tasarlanmıştır.
5. Küresel motorda rotorun yataklama tasarımında literatürdeki diğer motorlardan farklı olarak kapak üzerindeki plastik bilyalarla sağlanmış hem hafif hemde manyetik alana etki etmeyen bir yataklama sistemi elde edilmiştir.
6. Katmanlı tip bobin yapısı minimum yer kaplayacak şekilde yerleştirilerek literatürdeki çalışmaların aksine dairesel değil daha küçük altıgen gövde tasarımı elde edilmiştir.

Bu çalışmanın sonunda ulaşılmaması beklenen hedefler;

- Küresel motorun 3 eksende istenilen hareketleri yapabilmesi
- Küresel motorun yeterli torka ulaşabilmesi
- İki küresel bir lineer eyleyiciden oluşan robot kolunun hedef yörüngeyi takip edebilmesi.
- Tüm bu çalışmanın deneysel verilerinin teorik esasları doğrulaması.

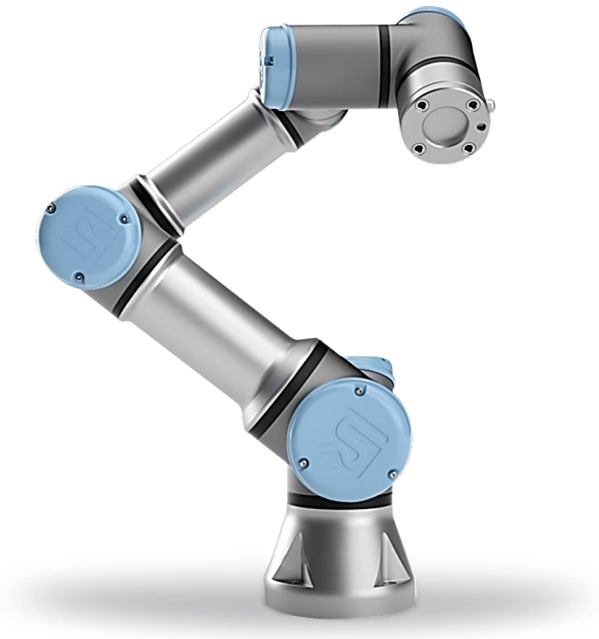
olarak söylenebilir.

Seri manipulatörlerin kinematik probleminin çözümünde genellikle homojen dönüşüm metodu kullanılarak matris cebri ile eşitlikler elde etmek mümkündür. Altı ve üzeri çok serbestlik dereceli sistemlerde bu hesaplamaları yapmak oldukça zordur. Hem ileri kinematik eşitlikleri elde etmek hem de elde edilen doğrusal olmayan konum eşitliklerinde mafsal değişkenlerini sağlayan ters kinematik çözüme ulaşmak çok karmaşık bir hâl almaktadır. Son yıllarda teknoloji ve bilgisayar yazılımlarının gelişmesi ile bazı karmaşık mühendislik problemlerini çözmek oldukça kolaylaşmıştır. Matlab® mühendislik problemlerinin çözümünde günümüzde en yaygın kullanılan programlardan biridir. Peter Corke'un oluşturduğu Robotic Vision and Control (RVC)® yazılımı ise robotikteki kinematik, dinamik ve yörünge planlama gibi temel hesaplamaları yerine getiren harici hazırlanmış çok serbestlik dereceli robotlar için hesaplamaları kolaylaştıran bir Matlab® kütüphanesidir. RVC yazılımı ayrıca homojen dönüşümler ile çeşitli açı ve eksen/açı gösterimleri arasında dönüştürme işlevleri için pratik çözüm sağlamaktadır. Çalışmada iki küresel ve bir prizmatik mafsaldan

oluşan yedi serbestlik dereceli robot kolunun kinematik analizi gerçekleştirilmiştir. Kinematik analiz yapılırken, ileri kinematik eşitlikleri Denavit-Hartenberg parametreleriyle oluşturulan birleşik homojen dönüşüm matrisini cebirsel çözmek yerine Peter Corke's RVC yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. İleri kinematik hesapları yaparken RVC yazılımı kullanılmasındaki amaç karmaşık mekanizmalardaki işlem yükünü ve çözümleme zorluğunu azaltarak kinematik hesaplamaları kolaylaştırmaktır. İleri kinematikten elde edilen konum eşitlikleri doğrusal olmadığı için ters kinematikten elde edilecek eklem değişkenlerini analitik olarak çözmek oldukça güçtür. Robot kolunun ters kinematik eşitlikleri jakobiyen matris kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Oluşturulan jacobian matrisi tersi alınmadığı için pseudo inverse jacobian'i elde edilmiştir. Basitliği ve çözüm hızı göz önünde bulundurularak sayısal çözümde Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır. Hesaplanan ileri ve ters kinematik çözümlerin farklı konum ve eklem değişkenleri ile sağlaması gerçekleştirilmiştir. Robot kolunun dinamik modelini elde etmek için daha sade ve uygulama kolaylığı sağlayan euler lagrange formülasyonu kullanılmıştır. Daha sonra sisteme lineer eyleyicinin dinamik parametreleride eklenmiştir. Küresel motor olarak ayrık hareket eden (non-integrated runner) sabit mıknatıslı üç serbestlik dereceli yeni bir küresel motor (**ASMKM**) önerilmiştir. Tümüleşik hareket yerine devinme ve dönme hareketleri birbirinden ayrılarak küresel motorun tasarımı sadeleştirilmiş , kontrolü ve uygulaması kolaylaştırılmıştır. **ASMKM** bilinen küresel motorlardan modüler tasarımı ve farklı rotor yataklaması ile ayrılmaktadır. Motorun gövdesi stator bloğu , rotor ve iki adet kapaktan oluşmaktadır. Demir çekirdekli statorlar üç boyutlu yazıcıda basılan ABS bloklara ayrı ayrı monte edilerek daha hafif bir gövde oluşturulmuştur. Yataklama farklı olarak iki kapak arasına çok noktalı bilya mekanizması ile sağlanmış bu şekilde motorun elektro manyetik yapısını etkilemeden rotorun daha kararlı hareket etmesi sağlanmıştır. Motorun deneysel ölçümleri için üç farklı test düzeneği tasarlanmıştır. Motorun dönme hareketi esnasındaki torku dinamometre ile, devinme esnasında uyguladığı maksimum kuvvet de rotor maksimum devinme açısında iken uygulanan karşı kuvvet ile loadcell kullanılarak ölçülmüştür. Motorun dönme maksimum hızı devir testinde takometre ile ölçümü gerçekleştirilmiştir. İmal edilen İki adet küresel motor prototipi yedi serbestlik dereceli robot kolu deney seti hazırlanmıştır. Belirlenen yörünge kinematik analizden elde edilen verilerle matlab üzerinde ve deneysel olarak sisteme uygulanmış analitik ve deneysel sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılarak paylaşılmıştır. Sonuçlar doğrultusunda, elde edilen dinamik model, fiziksel sistemin davranışını karşılamaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Modern bir robotik sistemi genellikle mekanik bir manipulatör, bir uç işleyici, mikroişlemci tabanlı bir denetleyici, bir bilgisayar ve dâhili ve harici sensörlerden oluşur. Robotlar çalışma uzayı, kinematik yapısı, serbestlik derecesi, kontrol yapısı ve donanım gibi özelliklere göre sınıflandırılabilir. En temel sınıflandırma şekli, robotları serbestlik derecelerine göre kategorize etmektir. İdeal durumda, bir manipulatör, bir nesneyi üç boyutlu uzayda serbestce manipüle etmek için 6 serbestlik derecesine sahip olması yeterlidir. Bu açıdan bakıldığında, bir robot 6 serbestlik derecesine sahipse genel amaçlı, 6'dan fazla serbestliğe sahipse artıksıl ve daha az serbestliğe sahipse eksiksil robot denmektedir. Bir diğer sınıflandırma biçiminde kinematik yapısına göre sınıflandırmadır. Bir robot açık kinematik zincir döngüsüne sahipse Seri, kapalı kinematik kinematik zincir döngüsüne sahipse paralel, her ikisininide sahipse hibrit robot denmektedir.



Şekil 2.1 Seri robot (Universal UR5)

Robotların sürüş donanımları elektriksel, hidrolik veya pnömatik tahrikli olarak gruplandırılmaktadır. Çoğu robotta DC, AC-servo veya step motorlar daha temiz, ucuz, sessiz ve kontrol etmesi nispeten kolay olduğu için kullanılır. Hidrolik tahrikler yüksek tepki hızı ve torca sahip olduğu için elektrik motorlarına göre avantajlıdır. Bu nedenle hidrolik robotlar öncelikle ağır yükleri kaldırmak için kullanılır. Hidrolik robotların dezavantajları,

hidrolik sıvı sızdırma problemleri , pompa ,redüktör,yağ tankı gibi çok daha fazla çevresel donanım gerektirmeleri ve gürültülü olmalarıdır. Pnömatik robotlar ucuz ve basittir, ancak hava sıkıştırılabilir bir sıvı olduğu için tam olarak kontrol edilemez. Sonuç olarak, pnömatik robotlar uygulama açısından hassas olmayan otomasyon sistemlerinde ve seçme eleme uygulamaları gibi daha sınırlı iş kollarında kullanılır.



Şekil 2.2 Paralel robot uçuş simulatörü (SSJ100 Training Center).

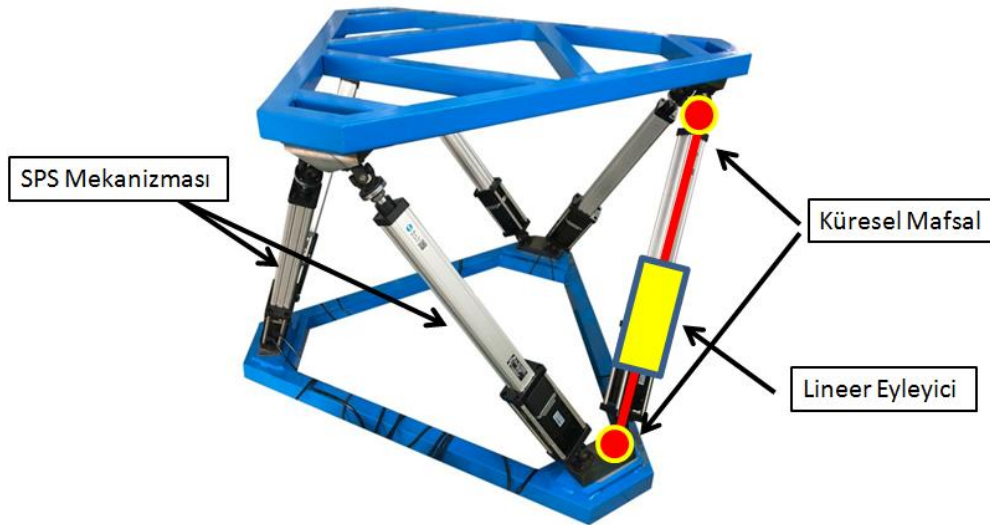
Bir manipülâtörün çalışma alanı, uç işleyicinin erişebileceği koordinat kümesinin (uzay) hacmi olarak tanımlanır. Azami çalışma alanı, her noktaya en az bir yönde uç işleyici tarafından erişilebilen uzayın hacmidir. Efektif çalışma alanı, tüm olası yönlendirmelerde her noktaya uç işleyici tarafından erişilebilecek uzayın hacmidir. Efektif çalışma alanı, azami çalışma alanının bir alt kümesidir.

Günümüzde çoğu endüstriyel robot altı veya daha az serbestlik derecesine sahiptir. Bu robotlar genellikle pozisyonu manipüle etmek için kullanılan kolun ilk üç eklemine (R-dönme veya P-prizmatik) göre kinematik olarak sınıflandırılırken, bilekle ilişkili eklemlerin geri kalanı oryantasyonu kontrol etmek içindir.

Robot			Bilek (DOF)		
Çalışma Prensipli	Kinematik Yapısı	Çalışma Uzayı			
Kartezyen			1	1	2
Silindirik			1	1	2
Küresel			1	2	3
SCARA			1	2	2
Eklemlili			2	3	3

Şekil 2.3 En yaygın robot mimarisi çeşitleri.

Bu robotların (manipülatorlerin) çoğunluğu Kartezyen (PPP), Silindirik (RPP), Küresel (RRP), SCARA (RRP), Mafsallı (RRR) (şekil 2.3) olmak üzere beş geometrik tipten birine girer. Bu beş manipülator kolunun her biri seri robotlardır. Altıncı farklı manipülator sınıfı, paralel robot olarak adlandırılır. Paralel bir manipülatörde, daha önce de belirttiğimiz gibi, bağlantılar açık kinematik zincirden ziyade kapalı olarak düzenlenmiştir. (Şekil 2.4)



Şekil 2.4 Paralel robot (Stewart platformu).

Seri robotlar, tipik olarak döner ve prizmatik olmak üzere iki çeşit bağlantı ile seri olarak bağlanan birkaç eklemden oluşur. Robotun bir ucu yere bağlı, diğer ucu ise uzayda serbestçe hareket edebilmektedir. Sabit bağlantıya taban ve bir tutucunun veya mekanik bir elin tutturulduğu serbest uca uç işleyici (End-Effector) denilmektedir.

Bir robotun belirli bir görevi yerine getirebilmesi için önce uç işleyicinin tabana göre konumu belirlenmelidir. Buna konum analizi denilir. İleri kinematik ve ters kinematik olmak üzere iki tür konum analizi vardır. İleri kinematik uç işleyicinin yerini bulmak için eklem değişkenleri kullanılır. Ters kinematikte ise, eklem değişkenlerini belirlemek için uç işleyicinin konumu kullanılır.

Seri bir manipulator için ileri kinematik çözümlemesi oldukça basit olmasına rağmen ters kinematik çözüm zor ve karmaşıktır. Eksiksiz bir robot için uç işleyici uzayda serbestçe konumlandırılmaz ve artıksal robot için, fazlalık serbestliğine bağlı olarak, belirli bir uç işleyici konumuna karşılık gelen birkaç sonsuz ters kinematik çözümü olabilmektedir. Ters kinematik problemini çözerken, genellikle kapalı biçimli bir çözüm elde etmekle ilgileniriz, yani problemi, uç işleyici yerini tek bir eklem değişkenine bağlayan cebirsel bir eşitliğe indirgemek temel amaçtır. Bu şekilde, tüm olası çözümler ve manipulator pozisyonları hesaba katılabilmektedir.

Literatürde kinematik analiz için vektör cebiri yöntemi (Chace 1963), geometrik yöntem (Duffy ve Rooney 1975), 4x4 matris yöntemi (Denavit-Hartenberg) (Denavit, Hartenberg ve ark. 1955), 3x3 çift matris yöntemi (Yang 1969), sayısal yöntem (Uicker Jr, Denavit ve ark. 1964), vüda yer değiştirmeleri yöntemi (Yuan ve Freudenstein 1971) ve quaternion (Ickes 1970) yöntemi gibi çeşitli yöntemler önerilmiştir.

Olası ters kinematik çözümlerinin sayısı, bir robot manipulatorünün türüne ve konumuna bağlıdır. Genel olarak, ortak bir noktada kesişen üç ardışık mafsalsal eksenine sahip manipulatorler veya birbirine paralel üç ardışık mafsalsal eksenine sahip basit geometri robot manipulatorleri için kapalı form çözümleri bulunabilir. Genel geometrinin manipulatorü için ters kinematik problemi çözmek son derece zordur.

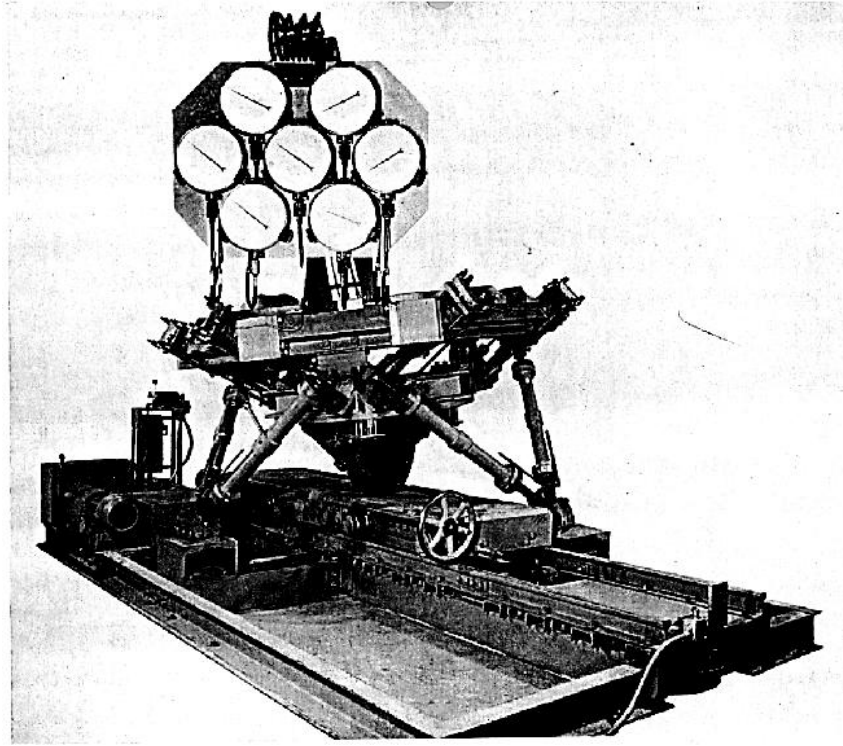
Seri robot manipulatorlerinin kinematik analizi için yaygın olarak kullanılan iki yöntem Denavit ve Hartenberg (Denavit, Hartenberg ve ark. 1955) ve ardışık vüda yer değiştirmeleri (Yuan ve Freudenstein 1971) yöntemidir.

Paralel bir robot manipulatorü, uç efektörün (mobil platform) sabit taban platformuna en az iki bağımsız kinematik zincirle bağlandığı iki veya daha fazla kapalı döngü kinematik zincirden oluşur (Şekil 2.4). Taban ve uç efektör platformları arasında seri zincirler bulunur.

Genel olarak, uzuvların sayısı serbestlik derecelerinin sayısına eşittir, böylece her uzuv bir aktüatör tarafından kontrol edilir ve tüm aktüatörler sabit tabana monte edilebilir. Harici yük aktüatörler tarafından paylaşılabilirdiğinden, paralel manipulatörler seri manuplatörlere göre ağır yük taşıma kapasitesine sahiptirler.

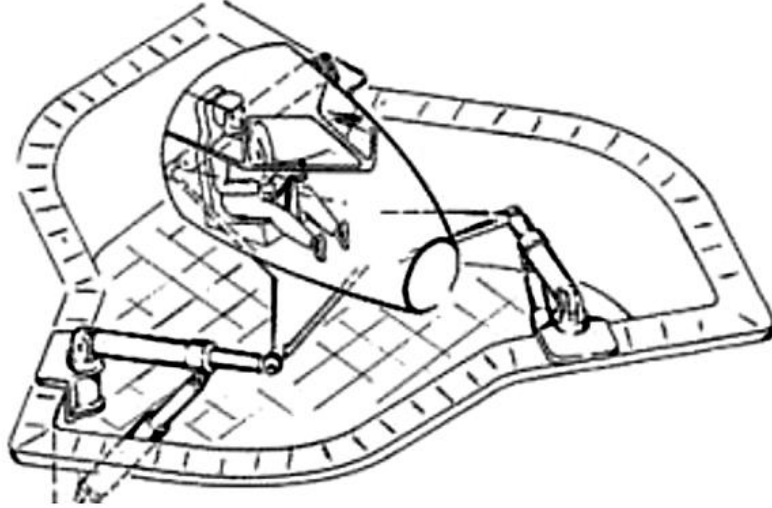
Bugüne kadar incelenen 6-DOF paralel manipulatörlerin çoğu altı lineer eyleyicili uzuvdan oluşmaktadır. Bu paralel manipulatörler, yüksek sertlik, düşük atalet ve büyük yük kapasitesi avantajlarına sahiptir. Bununla birlikte, nispeten küçük kullanışlı çalışma alanı, tasarım zorlukları ve zor kontrol sorunları dezavantajları olarak sıralanabilir.

Paralel mekanizma fikri ilk defa kuramsal olarak 1890 yılında Maxwell tarafından ortaya atılmıştır(Yıldız , Vasfi ve ark. 2011).



Şekil 2.5 Gough'un lastik test makinası (Gough 1962).

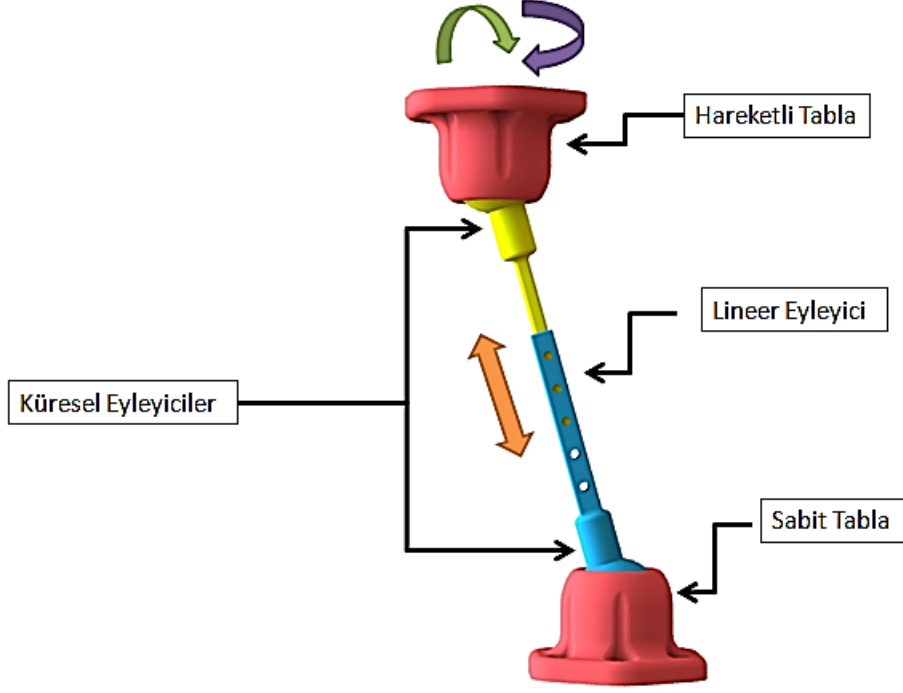
Daha sonra Gough 1962 yılında lastik test makinası işlevinde paralel bir mekanizma tasarlamıştır (Şekil 2.5). Bu şekilde yardımcı ve işlevsel bir mekanizma olarak ortaya konulması ile paralel manuplatörler gelişmeye başlamıştır.



Şekil 2.6 Stewart'ın tasarlamış olduğu uçuş simülatorü.

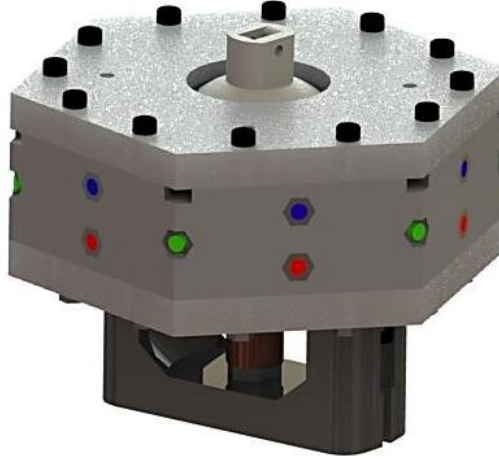
1965 yılında Stewart daha sonra adıyla anılacak ve endüstride yaygın olarak kullanılacak 6 serbestlik dereceli uçuş simülatorünü tasarlamıştır. Günümüzde hala çoğu simülator “Stewart Platformu” esas alınarak geliştirilmiştir. Stewart platformunun karakteristiği 6 adet lineer hareket edebilen kolların taban tablası sabit olmak üzere alt ve üst tablaya mafsallarla bağlanması ile gerçekleşmektedir. Devam eden yıllarda literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar genellikle manuplatörün işlevine yönelik farklı tahrik elemanları bağlantı şekilleri gibi tasarımsal dönüşümler, farklı dinamik hesaplama metodları ile de kavramsal uygulamalara konu edinmiştir (Stewart 1965, Gosselin ve Angeles 1988, Lebret, Liu ve ark. 1993, Dasgupta ve Mruthyunjaya 1998, Carretero, Podhorodeski ve ark. 2000, St-Onge ve Gosselin 2000, Bandyopadhyay ve Ghosal 2004). Literatürde paralel manuplatörlerin kinematik ve dinamik analizinin çözümünde analitik, sayısal ve yazılım tabanlı modern optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır.

Nanua ve arkadaşları nonlineer eşitliklerin çözümünde polinom derecelerini artırarak değişken eleme cebirsel yöntemini kullanan Bezout metoduyla sonuca gitmiştir(Nanua ve Waldron 1989). Nguyen jakobiyen matris kullanarak çözüme giderken(Nguyen, Zhou ve ark. 1991) Su genetik algoritma kullanarak analizini gerçekleştirmiştir(Su, Zheng ve ark. 2002). Geng yapay sinir ağları kullanarak düz kinematiğin çözümünü elde etmiştir(Geng ve Haynes 1991). Do ve Yang yapmış oldukları çalışmada Newton-Euler yöntemini altı serbestlik dereceli paralel robotun ters dinamik analizi için kullanmışlardır(Do ve Yang 1988).



Şekil 2.7 İki küresel bir doğrusal eyleyicili robot kolunun basitleştirilmiş modeli.

İki küresel bir doğrusal eyleyiciden oluşan yedi serbestlik dereceli robot kolu kinematik yapı olarak seri manuplatöre çalışma uzay yapısı olarak paralel manuplatöre benzemektedir. Sürüm yapısına göre ise iki adet küresel motor içermesinden dolayı özgündür (Şekil 2.7).



Şekil 2.8 Ayrık hareket edebilen sabit mıknatıslı küresel motor .

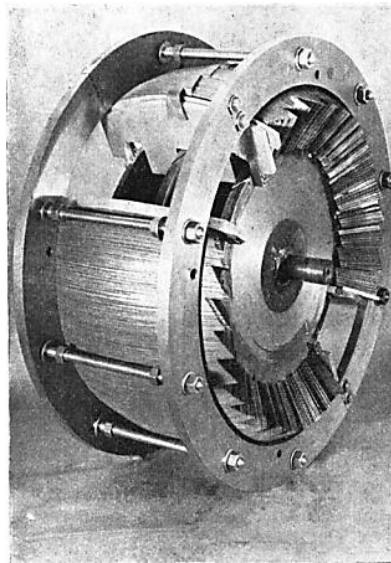
Son yıllardaki imalat ve tasarım teknolojisindeki gelişmelerin sağladığı kolaylıklarla küresel motorlar üzerinde yapılan çalışmaların çeşitliliği ve sayısı da artmaya başlamıştır. Bu zamana kadar genel olarak yapılan çalışmalar indüksiyon, step ve sabit mıknatıslı senkron motor gibi konvansiyonel motorların küre şeklinde rotor ve onu çevreleyen stator yapısına uyarlanması sonucu oluşmuştur (Williams, Laithwaite ve ark. 1959, Davey, Vachtsevanos ve

ark. 1987, Foggia, Olivier ve ark. 1988, Lee, Vachtsevanos ve ark. 1988, Kaneko, Yamada ve ark. 1989, Toyama ve Hatae 1993, Chirikjian ve Stein 1999, Arians ve Henneberger 2000, Week, Reinartz ve ark. 2000, Ebihara, Katsuyama ve ark. 2001, Wang, Mitchell ve ark. 2001, Sosseh ve Lee 2002, Yano ve Suzuki 2002, Lee ve Son 2005, Li, Xia ve ark. 2007, Lee, Bai ve ark. 2009, Mashimo, Toyama ve ark. 2009, Qian, Wang ve ark. 2009, Ueno, Saito ve ark. 2009, Xia, Song ve ark. 2009, Li, Li ve ark. 2011, Gofuku, Sasaki ve ark. 2012, Bai ve Lee 2013, Jinjun, Kim ve ark. 2013, Park, Lee ve ark. 2013, Kasashima, Ashida ve ark. 2016, Fernandes, Vieira ve ark. 2017, Chai, Gan ve ark. 2019, Gan, Pei ve ark. 2019).

Yazar	Yılı	Çalışmanın Karakteristiği
Williams ve Laithwaite	1959	İlk küresel geometrili motor
Lee ve arkadaşları	1988	İlk robot eklemünde kullanma fikri
Lee ve arkadaşları	1988	İlk küresel adım motoru fikri
Kaneko ve arkadaşları	1989	İlk küresel servo motor
Toyoma ve arkadaşları	1993	İlk ultrasonic küresel motor
Park ve arkadaşları	2013	İlk katmanlı tip küresel motor

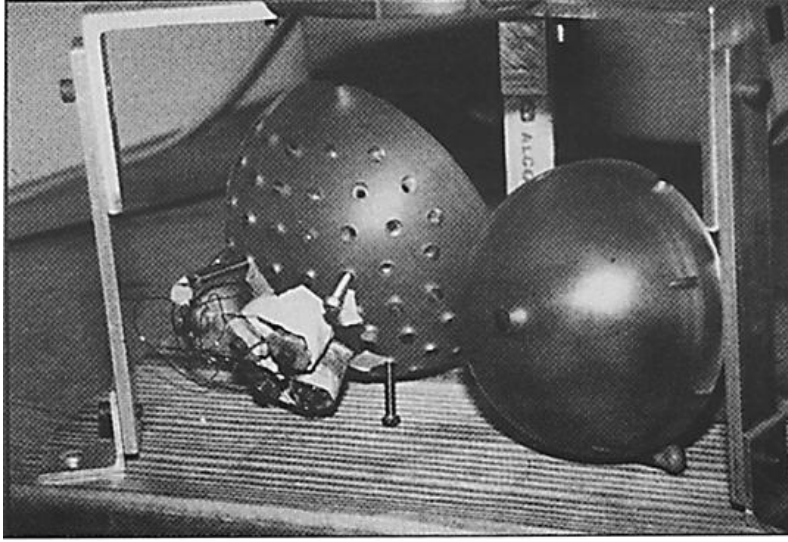
Tablo 2.1 Küresel motor ile ilgili yapılmış bazı karakteristik çalışmalar

Küresel motor ilk defa , Williams ve Laithwaite ‘nin 1959’da indüksiyon motorunu küresel bir rotordan oluşacak yapıda tasarlamasıyla gündeme gelmiştir (Williams, Laithwaite ve ark. 1959).



Şekil 2.9 Williams ve Laithwaite’in tasarlamış olduğu küresel motor.

Lee ve arkadaşları ilk defa robot eklemine kullanılmak üzere üç serbest dereceli küresel motor fikrini öne sürmüşlerdir. Daha az sayıda stator ve rotor elemanı ile daha kararlı hareketler yapabilen küresel adım motoru tasarlamışlardır. (Lee, Vachtsevanos ve ark. 1988)



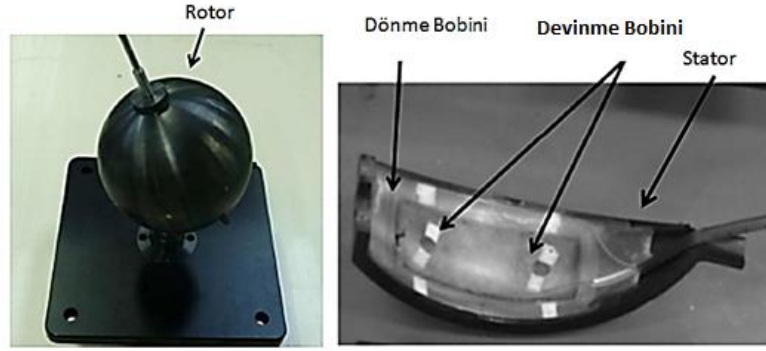
Şekil 2.10 Lee'nin tasarlamış olduğu küresel motor.

Kaneko ve arkadaşları üç serbestlik dereceli küresel DC servo motor geliştirmişlerdir (Kaneko, Yamada ve ark. 1989).Foggia ve arkadaşları indüksiyon tip motor üzerinde hareket karakteristik oranının konik 60° olması için çalışmıştır. Üç serbestlik dereceli bir elektromanyetik motor tasarlamışlardır ve bu motor $\pm 30^\circ$ ye kadar hareket edebilmektedir (Foggia, Olivier ve ark. 1988).



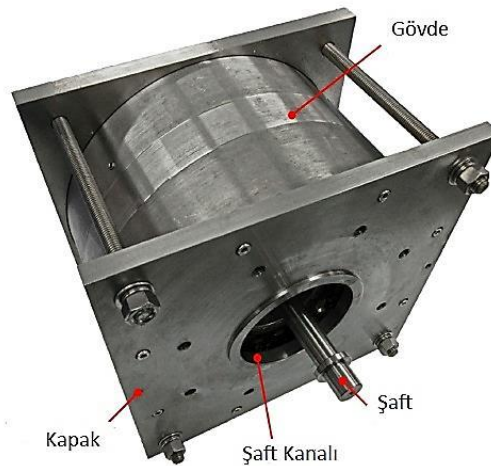
Şekil 2.11 Toyoma'nın tasarlamış olduğu küresel ultrasonic motor.

Toyoma ve arkadaşları iki serbestlik derecesinde hareket eden ultrasonik küresel motoru geliştirmiştir (Toyama ve Hatae 1993) . Mashimo ve arkadaşları çok serbestlik derecesinde hareket eden ultrasonik motor tasarlamışlardır (Mashimo, Toyama ve ark. 2009). Küresel motordan beklenti her ekseninde aynı serbestlikte hareket etmesidir. Fakat bu durum motorun kontrolünü karmaşık hale getirmekte , tasarımını herhangi bir sisteme uyarlamayı zorlaştırmaktadır. Ayrıca çoğu küresel motor tasarımında motorun büyüklüğü ve ağırlığıyla doğru orantılı tork elde edilememektedir. Örneğin herhangi bir robotik ekleme kullanılması ön görülen küresel motor kendi yüküyle beraber eklemleride hareket ettirebilmelidir. Bu nedenle hareketi sınırlayarak daha basit tasarım ve kontrol ile bu gerçekleştirilebilir. Son dönemde yapılan bazı çalışmalarda tümleşik hareket yerine ayrık hareket uygulanmıştır.



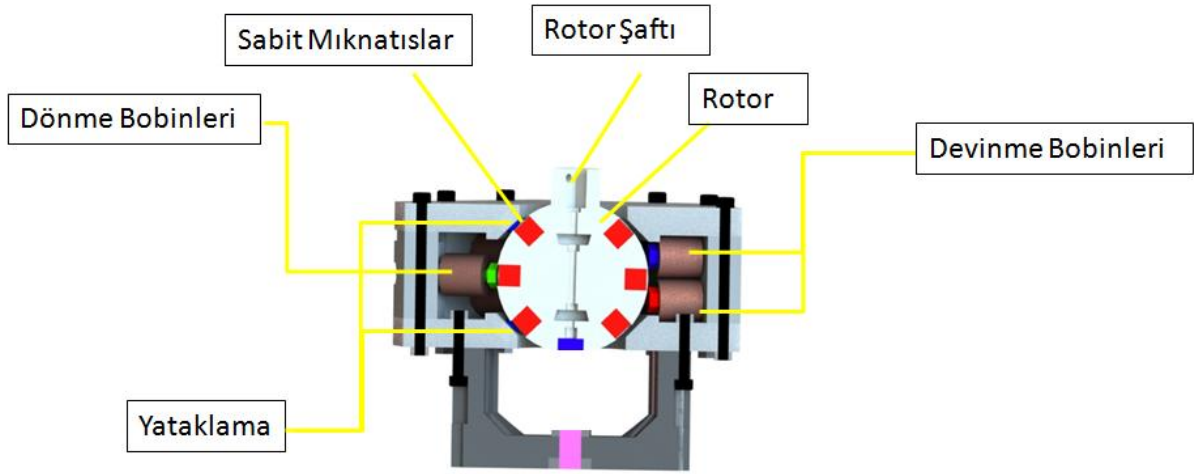
Şekil 2.12 Park'ın tasarlamış olduğu katmanlı tip nüvesiz küresel motor.

Park ve arkadaşları iki hareketi birbirinden ayıracak nüvesiz katmanlı bir model üzerine yoğunlaşmış (Park, Lee ve ark. 2013) , Gan ve arkadaşları ise demir çekirdekli katmanlı bir tasarım üzerinde çalışmışlardır (Gan, Pei ve ark. 2019).



Şekil 2.13 Gan ve ark.'nın tasarlamış olduğu katmanlı tip demir çekirdekli küresel motor.

Yapılan çalışmada önerilen motor ayrı hareket eden sabit mıknatıslı küresel motordur. Ayrı hareket edebilen sabit mıknatıslı küresel motor (**ASMKM**) daha hafif aynı zamanda daha modüler bir yapıda tasarlanarak herhangi bir robot kolu sisteminde ya da mekanizmada kullanılacak hale getirilmiştir. Yataklama diğer motorlardan farklı olarak iki kapak arasında çok noktalı bilya mekanizması ile sağlanmış bu şekilde rotorun merkezinden yada rotor yüzeyinden yataklı modellere göre daha stabil çalışması hedeflenmiştir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14 Ayrı hareket edebilen sabit mıknatıslı küresel motorun yapısı.

Bu çalışmada modellenen küresel motorun prototipi gerçekleştirilerek tork ve devir testleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. İki küresel ve bir doğrusal eyleyiciden oluşan yedi serbestlik dereceli robot kolunun tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılarak paylaşılmıştır.

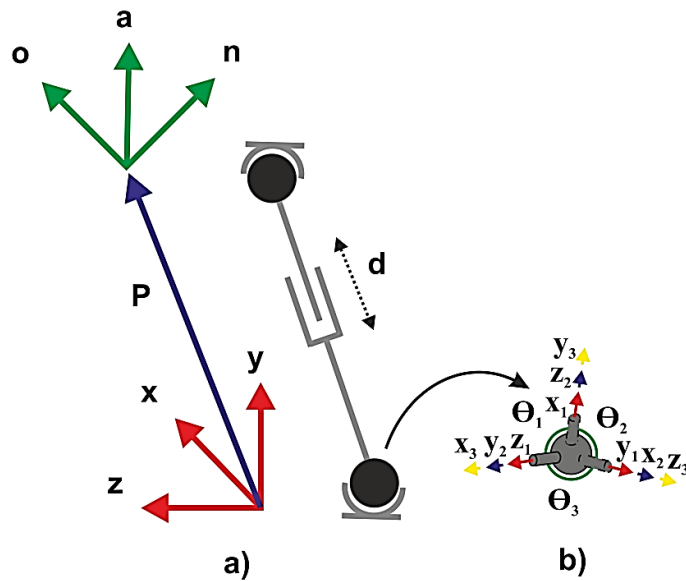
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Robot Kolunun Dinamik Analizi

Robotlar, hareketi iletebilen ve dönüştürebilen sistemlerdir. Bir robotun dinamik analizi hareket ve bu hareketi sağlayan kuvvetler / momentler olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır (Fernández, Martínez ve ark.). Kinematik Analiz , mekanizmanın hareketini sabit bir eksen takımına göre kuvvet ve momentler olmadan zamanın bir fonksiyonu olarak incelenmesidir (Küçük 2012). Bir hareketi konum , hız ve ivme ile tanımlayıp , karakterize edebiliriz (Öğülmüş , Tinkir ve ark. 2021). İleri kinematik ve ters kinematik olmak üzere iki tür kinematik analizi vardır. İleri kinematik uç işleyicinin yerini bulmak için eklem değişkenleri kullanılır. Ters kinematikte ise, eklem değişkenlerini belirlemek için uç işleyicinin konumu kullanılır. Seri bir manuplatör için ileri kinematiğin çözümü oldukça basit olmasına rağmen ters kinematiğin çözümü zor ve karmaşıktır.

3.1.1. Robot Kolunun Kinematiği

Kinematik probleminin homojen dönüşüm yöntemi ile çözümünde belirlenen sabit bir referans koordinat sistemine göre hareketli eksenlerin birbirlerine göre dönmelerini ve yer değiştirmelerini matris ile tanımlamak mümkündür. Homojen transformasyon matrisleri kullanılarak oluşturulan bileşke matrisi ile düz ve ters kinematik eşitlikler elde edilir (Duran ve Ankaralı 2010). Şekil 3.1'de



Şekil 3.1 a) Uzun koordinat sistemi b) ZYX Euler açısı gösterimi



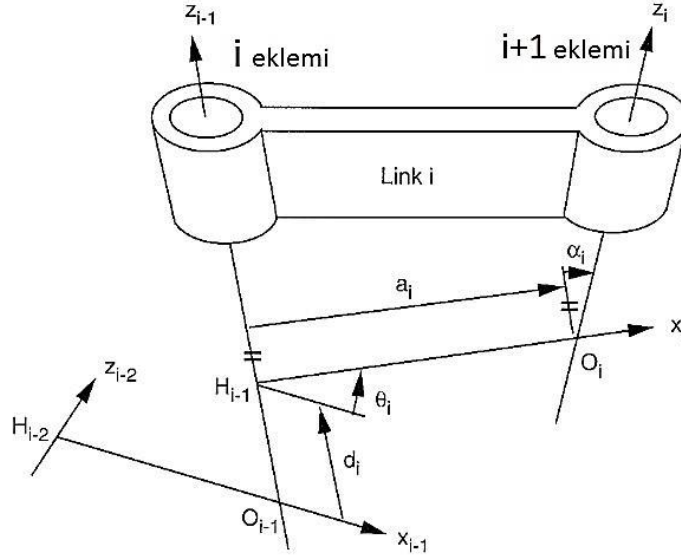
Şekil 3.2 ileri ve ters kinematik arasındaki ilişki.

Şekil 3.2 de ileri ve ters kinematik arasındaki ilişki akış şeması verilmiştir. Eğer mekanizmanın serbestlik derecesi yüksekse cebirsel işlemleri yapmak oldukça zordur. akış şeması verilen Hem ileri kinematik eşitlikleri elde etmek hem de elde edilen doğrusal olmayan konum eşitliklerinde mafsal değişkenlerini sağlayan ters kinematik çözüme ulaşmak çok karmaşık bir hal almaktadır. Günümüzde mühendislik problemlerini çözmek için işimizi kolaylaştıran çeşitli bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Matlab hem akademik çalışmalarda hemde endüstride yaygın olarak kullanılan programlardan biridir. Kullanımın yaygın olmasının sebeplerinden biri bazı uygulamalar ve kütüphanelerin açık kaynaklı olmasıdır. Bu çalışmada robot kolunun düz kinematik eşitlikleri , Peter Corke RVC toolbox kullanılarak matlab üzerinde elde edilmiştir.

3.1.2. Homojen Transformasyon Yöntemi

Kinematik modelleme yaparken sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri Denavit-Hartenberg parametrelerinin kullanıldığı homojen transformasyon yöntemidir. Bu yöntemde robotun uzuvları birbirine dönel yada kayar eklemlerle seri şekilde bağlı olmalıdır. Kinematik uygulamalarda manüplatorun uç işleyicisinin sabit bir eksen takımına göre konumunun belirlenmesi gerekmektedir. Uç işleyicinin toplam deplasmanı her bir bağıın dönme ve kayma hareketinin birleşiminden oluşmaktadır.

Denavit ve Hartenberg şekil 3.1-a daki gibi sabit bir referans koordinat sistemine göre şekil 3.3'deki eklem notasyonları verilen hareketli eksenlerin birbirlerine göre dönmelerini ve yer değiştirmelerini matris ile tanımlayarak sistematik bir metod geliştirmişlerdir (Denavit, Hartenberg ve ark. 1955).



Şekil 3.3 Eklem notasyonlarının gösterimi

* θ_i : Z_{i-1} ekseninde X_{i-1} ve X_i arasındaki açı ; a_i : Eklem boyu
 α_i : X_i ekseninde Z_{i-1} ve Z_i arasındaki açı ; d_i : Eklem ofseti

$${}^{i-1}_i T = R_x(\alpha_{i-1})D_x(a_{i-1})R_z(\theta_i)Q_i(d_i) \quad (3.0)$$

Birbirine kayar veya dönel mafsallarla bağlı ardışık iki uzuv için tanımlanan 4x4 homojen transformasyon matrisleri kullanılarak oluşturulan bileşke matris , manuplatörün uç işlevcisinin referans koordinat eksenine göre Eşitlik 3.1'deki gibi 3x3 dönme ve 3x1 ötelemesinide içerir.

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} \text{Dönme}_{3 \times 3} & \text{Öteleme}_{3 \times 1} \\ \text{İzdüşüm}_{1 \times 3} & \text{Ölçek}_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Küresel motorda ise durum biraz farklıdır. 3 serbestlik dereceli küresel motor sanki birbirine orijinleri çakışık 3 adet dönel motor varmış gibi hareket eder fakat dönme hareketini yaparken öteleme hareketi yapmaz. Bir katı cismin sabit bir O noktası etrafında ,bir eksen takımının başka bir sabit referans eksen takımına göre döndürülmesi arasındaki fonksiyonel bağıntı üç ardışık dönmenin bileşkesi olarak elde edilebilir (Shah, Saha ve ark. 2009). Hareketli

sistemin sabit sisteme göre konumunu belirleyen θ , θ ve ψ parametreler Euler açılarıdır. Denavit-Hartenberg yönteminde her eklem için tablo 3.1'deki 4 adet parametre kullanılarak robot kinematiği oluşturulmuştur.

Tablo 3.1 Denavit –Hartenberg parametreleri.

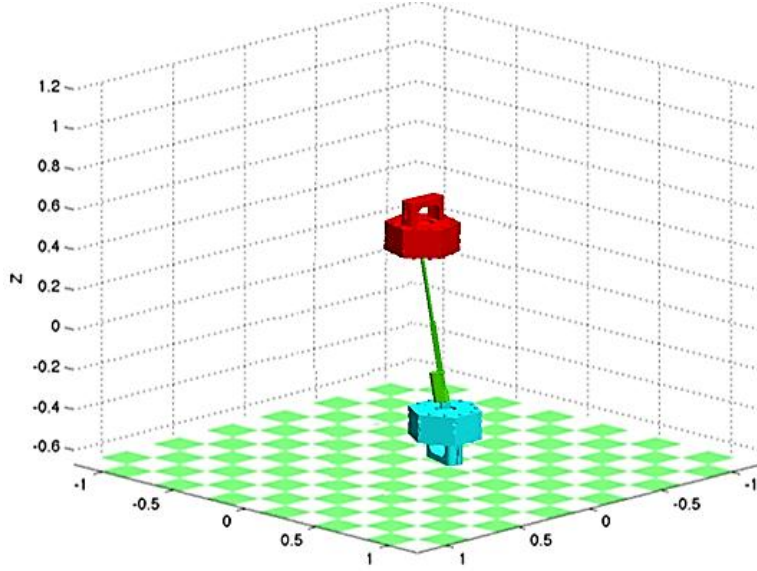
	$*\Theta_i$	a_i	d_i	α_i
1	Θ_1	-	-	$\frac{\pi}{2}$
2	Θ_2	-	-	$\frac{\pi}{2}$
3	Θ_3	-	-	$\frac{\pi}{2}$
4	-	-	d_4	-
5	Θ_4	-	-	$\frac{\pi}{2}$
6	Θ_5	-	-	$\frac{\pi}{2}$
7	Θ_6	-	-	$\frac{\pi}{2}$

Homojen Transformasyon yöntemi birbirine bağlı iki rijit uzvun arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Bu bağıntıyı oluşturabilmek için her bir uzva eksen takımı tanımlanır. DH Parametreleri kullanılarak herhangi bir ekleme ait transformasyon matrisi oluşturulur. Elde edilen transformasyon matrisleri birbirleri ile çarpılarak ileri kinematiği belirlenir.

3.1.3. İleri kinematiğin RVC Toolbox ile çözümü

Günümüzde mühendislik problemlerini çözmek için işimizi kolaylaştıran çeşitli bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. MATLAB® programı doğrusal cebir, grafikler ve dinamik simülasyon gibi mühendislik ihtiyaçlarının karşılanması için geliştirilmiştir. Çok çeşitli bilgisayar platformlarında mevcuttur ve üniversitelerde öğretim ve araştırma için yaygın olarak kullanılmaktadır. MATLAB®'in temel işlevselliği uygulamaya özgü araç kutuları tarafından genişletilebilir ve birçoğu ticari olarak veya çeşitli açık kaynaklı lisanslar altında kullanılabilir. MATLAB®'in temel veri türleri olan vektör ve matrisler, robotik uygulamalarında kullanılan bileşenlerdir. MATLAB® hem akademik çalışmalarda hemde endüstride yaygın olarak kullanılan programlardan biridir. Kullanımın yaygın olmasının sebeplerinden en önemlisi kullanıcılar tarafından geliştirilen uygulamalar ve kütüphanelerin

açık kaynaklı olmasıdır. Bu çalışmada robot kolunun ileri kinematik eşitlikleri ,Peter Corke RVC toolbox kullanılarak matlab üzerinde elde edilmiştir. Peter Corke'un Robotik araç kutusu robotikteki kinematik,dinamik ve yörünge planlama gibi temel hesaplamaları yerine getiren harici hazırlanmış çok karmaşık eklemlili robotlar için hesaplamaları kolaylaştıran bir matlab araç kutusudur(Corke 2007).



Şekil 3.4 Peter Corke's RVC toolbox ile 7 serbestlik dereceli robot kolunun simülasyonu.

Kendine özgü kısa kodlarla çok karmaşık ileri kinematik,ters kinematik gibi hesaplamalar çok basit bir şekilde çözümlenebilmektedir. Kendi içerisinde bulunan robot kütüphanesinden standart puma , kuka gibi endüstriyel robotların analizleri kolaylıkla yapılabilirken ,Şekil 3.4 deki gibi kendi tasarımlarımızıda toolbox'a aktarabilmekteyiz.

3.1.4. Jacobiyen Matris

Kinematik ve dinamik problemler, analitik yöntemlerle çözülemediği durumlarda **jakobiyen** matris kullanarak sayısal yöntemlerle de çözülebilir. **Jakobiyen** matris, manüplatörün her bir eklemdeki çok küçük değişimlerin uç işlevciye nasıl etki ettiğini ortaya çıkarmaktadır.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_x(q_1)}{\partial q_1} & \frac{\partial P_x(q_2)}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial P_x(q_i)}{\partial q_i} \\ \frac{\partial P_y(q_1)}{\partial q_1} & \frac{\partial P_y(q_2)}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial P_y(q_i)}{\partial q_i} \\ \frac{\partial P_z(q_1)}{\partial q_1} & \frac{\partial P_z(q_2)}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial P_z(q_i)}{\partial q_i} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2’de genel gösterimi verilen jakobien matrisinde P uç işleyicinin pozisyonunu q ise eklem değişkenlerini ifade eder. Eşitlik 3.3 ve 3.4 deki hali ile ifade edilebilir. Eğer jacobien matrisin inversi(tersi) alınabilirse eşitlik 3.5’deki gibi hız eklem değişkenlerindeki değişim cinsinden ifade edilebilir.

$$dP = \frac{\partial P(q_i)}{\partial q_i} dq_i \quad (3.3)$$

$$dP = Jdq \quad (3.4)$$

$$dq = J^{-1}dP \quad (3.5)$$

Herhangi bir A matrisi bir inverse sahip olabilmesi için A matrisinin nonsingüler ve kare matris olması gerekir. Bu durumda A matrisi yardımıyla

$$AX = B \quad (3.6)$$

doğrusal denklem sisteminin var olan tek çözümü $X = A^{-1}B$ şeklindedir. Ayrıca,

$$AA^{-1} = A^{-1}A = I \quad (3.7)$$

Şartını sağlayan ve A matrisinin inversi olarak adlandırılan A^{-1} matrisi vardır. Bununla birlikte A matrisinin kare matris olmadığı durumlarda ya da A matrisinin kare matris fakat singüler olduğu durumlarda inversi yoktur. Bu durumlarda A^{-1} matrisinin özelliklerini de içeren ve genelleştirilmiş invers (g-invers) matris adını alan yeni bir kavram sayesinde sisteminin bir çözümü olabilir. \mathbb{C}_n^m kompleks sayılar cismi üzerinde tanımlı $m \times n$ tipindeki tüm matrislerin kümesini gösterebilir. Bir $A \in \mathbb{C}_n^m$ matrisi için Moore-Penrose şartlarını sağlayan bir G matrisine A matrisinin Moore-Penrose inversi denir ve A^+ veya A^\dagger ile gösterilir.

3.1.5. Jakobien Matrisin Moore-Penrose Tersi

$J = [a_{ij}]_{m \times n}$ r ranklı jakobien matris için r ranklı J matrisinde, $r \times r$ tipinde nonsingüler herhangi bir B alt matrisinin inversi bulunup bu inversin transpozu alınır. J matrisinde B alt

matrisinin her bir elemanına karşılık gelen yere $(B^{-1})^T$ matrisinin elemanları yerleştirilir. J matrisinin diğer tüm elemanlarının yerine sıfır yazılır. Elde edilen matrisin transpozu alınır. Bu, J^\dagger matrisi J matrisinin bir g-inversidir.

$$J^\dagger = (J^{-1}J)^{-1}J^T \quad (3.8)$$

3.1.6. Ters Kinematığın Sayısal Çözümü

Ters kinematik çözümün analitik olarak çözülemeyeceği durumlarda bütün eklem değişkenlerinin bilgisayar ortamında yinelemeli işlemler gerçekleştirilerek Newton-Raphson yönteminde olduğu gibi sayısal olarak çözülebilir. Sayısal çözüm için kinematik eşitliklerin farklarının toplamını alan tahmin edici ve düzeltici algoritmalar kullanılır ve ilk tahmin gerektirir. Sayısal çözümde iterasyonun işlem yükü genellikle ilk tahminin kalitesiyle ilgilidir (Goldenberg, Benhabib ve ark. 1985).

3.1.7. Newton Raphson metodu

Newton metodunda ilk tahmin sonuca ne kadar yakınsa çözüm o kadar hızlı gerçekleşir. Düz kinematik analizde elde ettiğimiz uç işleyicinin konumunu p 'yi $p = f(\theta)$ doğrusal olmayan konum eşitliği, p_d 'yi ise istenilen konum, θ_d yi ise istenilen eklem açıları olarak ifade edersek, Newton –Raphson metodunu eşitlik 3.9' deki gibi yazabiliriz. Eşitlik 3.9'i Taylor serisi ile açarsak ilk tahmin değeri olarak Eşitlik 3.10'deki gibi, daha sonra eşitlik 5.11 elde ederiz, burada θ^i ilk tahmin değeridir. eklem değişkenlerini hesaplanması için $J^\dagger(\theta^i)$ kare matrisdir ve tersi alınabilir dolayısı ile iterasyonu sağlayan 3.12'deki eşitliği elde etmiş oluruz.

$$N(\theta_d) = p_d - f(\theta_d) = 0 \quad (3.9)$$

$$f(\theta_d) = f(\theta^i) + \frac{\partial f}{\partial \theta}(\theta^i)(\theta - \theta^i) + (\text{yüksek mertebeden terim}) \quad (3.10)$$

$$p_d = f(\theta_d) = f(\theta^i) + \frac{\partial f}{\partial \theta} \Big|_{\theta^i} (\theta_d - \theta^i) + (\text{yüksek mertebeden terim}) \quad (3.11)$$

$$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{J^\dagger(\theta^i)}$$

$$\theta^{i+1} = \theta^i + J^+(\theta^i) (p_d - f(\theta^i)) \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.12 robot manipulatör'ün uç işlevcisinin konumuna bağlı olarak eklem değişkenlerinin değerlerinin hesaplanmasını sağlar. Bu döngünün hesaba başlayabilmesi için θ^i indisli eklem değişkenlerine tahmini değerler verilmiştir ve θ^{i+1} değişkenleri hesaplanmıştır. Hesaplana θ^{i+1} değerleri bir sonraki adımda θ^i değişkenlerinin değerleri olur ve yeniden θ^{i+1} değişkenleri hesaplanır. Hata değeri $\varepsilon = p_d - f(\theta^i)$ istediğimiz değere ulaştığında elde edilen θ^{i+1} eklem değişkenleri uç işlevcinin istenilen koordinat değerleri olur.

3.1.8. Lagrange -Euler Formülasyonu

Lagrange-Euler formülasyonu bir sistemin dinamik modelini oluştururken sistemin toplam kinetik enerjisi ile toplam potansiyel enerjisi farkından yararlanır. Bir sistemin dinamik eşitliklerini elde etmek için oldukça kullanışlıdır. Tüm sistemin kinetik ve potansiyel enerjisine bağlıdır. Euler-Lagrange eşitliğinin çözümü motorun dinamik modeli elde edilir. Manipülâtörün dinamik modeli hareketin simülasyonu, yapının analizi ve kontrol algoritmasının tasarımı için önemlidir. Hareketin simülasyonu kontrol stratejilerini ve hareket planlama tekniklerini sistemin fiziksel varlığına ihtiyaç duymaksızın test edilmesine olanak tanır. L-E formülasyonuna göre yapılan manipülâtörün dinamik modelinin elde edilmesi diğerlerine göre basit ve sistemattir. K ve P sırasıyla bir robot kolunun toplam kinetik enerjisi ve toplam potansiyel enerjisini ifade etsin. Bu robot kolunun kinetik ve potansiyel enerjileri arasındaki farkı ifade eden Lagrange fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılır

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - P(q) \quad (3.13)$$

Fonksiyonda \mathbf{q} dönel eklemler için eklem açısını prizmatik eklemler için bağ uzunluğunu temsil eder. $\dot{\mathbf{q}} = \frac{dq}{dt}$ ise eklem hızlarını gösteren bir vektördür. Lagrange fonksiyonunda yer alan kinetik enerji (K) ifadesi robot kolunun konumu ve hızına bağlıken, potansiyel enerji (P) ifadesi sadece robot kolunun konumuna bağlıdır.

3.1.9. Robot Kolunun Dinamiği

Bir robot kolu için Lagrange fonksiyonunu yazabilmek için öncelikle robot kolunun toplam kinetik ve potansiyel enerji ifadelerinin hesaplanması gerekir. Robot kolunun toplam kinetik enerjisini hesaplamak için, robot kolunu oluşturan her bir bağı kinetik enerjisinin hesaplanması ve elde edilen sonuçların toplanması gerekir. Robot kolunu oluşturan bağların toplam kinetik enerjisi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (v_i)^T m_i v_i + (\omega_i)^T I_i \omega_i \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (3.14)$$

Kinetik enerji ifadesinde yer alan n robotu oluşturan bağ sayısını, v_i ve ω_i sırasıyla i . bağı kütlesinin ana koordinat sistemine göre doğrusal ve açısal hızlarını, m_i i . bağı kütlesini, I_i i . bağı kütlesinin ana koordinat sistemine göre atalet tensörünü ifade etmektedir. i . bağı kütlesinin açısal hızı ω_i ve doğrusal hızı v_i hesaplamak için i . bağı jakobiyen matrisinin bulunması gerekir.

$$J_i = \begin{Bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial h_i}{\partial q_i} \\ \xi_1 z^1 & \dots & \xi_i z^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Eşitlikde h_i vektörü i . bağı kütlesinin ana koordinat sistemine göre konumudur. A_i doğrusal hızlardan kaynaklanan jakobiyen matrisini, B_i açısal hızlardan kaynaklanan jakobiyen matrisini, ξ_i eklem tip değişkenini ve z^i ise i . koordinat sisteminin üçüncü kolon birim vektörünü temsil eder. Sonuç olarak robot kolunun toplam kinetik enerjisini bulmak için bulunan bu değişkenler Eşitlik 3.10 da yerine yazılıp gereken sadeleştirmeler yapılırsa toplam kinetik enerji ifadesi aşağıdaki gibi olur

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T \sum_{i=1}^n [(A_i)^T m_i A_i + (B_i)^T I_i B_i] \dot{q} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (3.16)$$

Eşitlik 3.16'daki toplam kinetik enerji ifadesi eklem hızları ve manipülatör atalet tensörü $M(q)$ cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} \quad (3.17)$$

Eşitlikte, $M(q)$ simetrik, pozitif tanımlı bir matristir ve aşağıdaki gibi gösterilir.

$$M(q) = \sum_{i=1}^n [(A_i)^T m_i A_i + (B_i)^T I_i B_i] \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (3.18)$$

Robot kolunun Lagrange fonksiyonunu tamamen ifade etmek için robot kolunun toplam potansiyel enerji ifadesinin de tanımlanması gerekir. Robot kolunun toplam potansiyel enerjisi, yerçekimi ivmesinin var olduğu ortamda bağ kütle merkezlerinin yer değiştirmelerini sağlayan iş miktarı kadardır ve aşağıdaki gibi gösterilir

$$P(q) = -\sum_{i=1}^n [m_i g^T h_i] \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (3.19)$$

Bulunan kinetik ve potansiyel enerji ifadeleri Lagrange fonksiyonunda yerine yazılarak bir robot kolunun genel dinamik modeli çıkarılabilir.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial K}{\partial q} + \frac{\partial P}{\partial q} = \tau \quad (3.16)$$

Gerekli düzenlemeler yapıldığında eşitlik şu hali alır;

$$\sum_{j=1}^n M_{ij}(q) \ddot{q}_j + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n C_{kj}^i(q) \dot{q}_k \dot{q}_j + y_i(q) + b_i(\dot{q}) = \tau_i \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (3.17)$$

Eşitlikte, ilk terim robot bağlarının hareketlerinden üretilen kuvvet ve tork ifadelerini temsil eden ivme terimidir. İkinci terim, robot bağlarının hızlarıyla ilişkilendirilen coriolis ve merkezkaç kuvvet vektörüdür ve aşağıdaki gibi ifade edilir

$$C_{kj}^i(q) = \frac{\partial}{\partial q_k} M_{ij}(q) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q_i} M_{ij}(q) \quad 1 \leq i, j, k \leq n \quad (3.18)$$

Üçüncü terim yerçekimi ivmesini temsil eder ve aşağıdaki gibi gösterilir

$$Y_i(q) = -\sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^n g_k m_j A_{ki}^j(q) \quad (3.19)$$

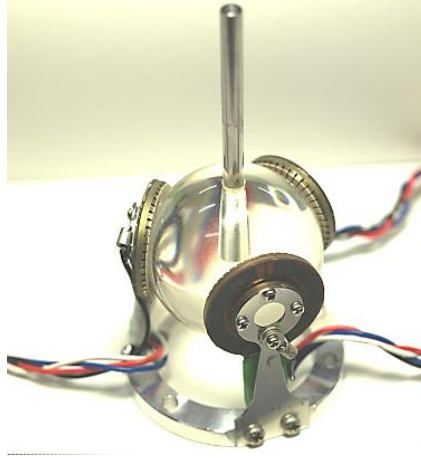
Son terim ise robot kolunun hareketine zıt olarak gerçekleşen sürtünmeyi temsil eder. Sürtünme terimi ihmal edilirse sonuç olarak bir robot kolunun eklem uzayındaki dinamik eşitliği aşağıdaki gibi olur

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q, \dot{q}) = \tau \quad (3.20)$$

3.2. Farklı Yapıdaki Küresel Eyleyici/Motor Tipleri

3.2.1. Ultrasonik Küresel Eyleyici/Motor

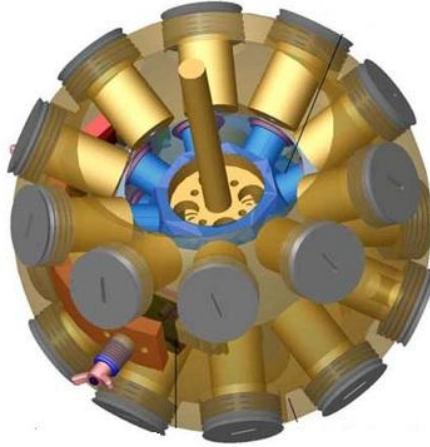
Küresel bir rotor etrafındaki piezo tırnaklara uygulanan gerilim sonucu oluşan hareket Ultrasonik küresel motorun çalışma prensibini oluşturur. Piezoların çalışma frekansının 20 Khz üzerine çıkmasından dolayı ultrasonik motor denmiştir.



Şekil 3.5 Ultrasonik küresel motor (OK Robotics SUMCS).

3.2.2. Değişken Relüktanslı Küresel Eyleyici/Motor

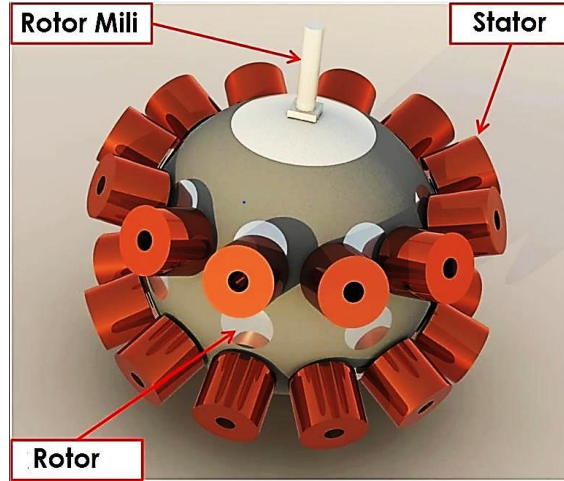
Bir takım ferromanyetik kutuplar stratejik olarak dış kürenin iç yüzeyine dağıtılmış ve başka bir kutup takımı da iç kürenin dış yüzeyine dağıtılmıştır. İç küreye stator denilmektedir. Stator üstündeki kutuplar veya stator kutupları ayrı ayrı enerjilendirilebilen sargılarla çevrelenmiştir. Diğer küreye ise rotor denir. Rotor kutbunun hiç sargısı yoktur. Güç iletimi için mil stator ve rotora bağlanır.



Şekil 3.6 Değişken relüktanlı küresel motor (Son ve Lee 2008).

3.2.3. Sabit mıknatıslı Küresel Motor

Sabit mıknatıslı küresel motorlar adındanda anlaşılabilceği gibi rotorun üzerinde yerleşik farklı sayı ve dizilimde manyetik kutupları oluşturan sabit mıknatıslar vardır. Dönme hareketi rotoru çevreleyen stator üzerindeki sargılar ile gerçekleşir. Konvansiyonel motorlarda olduğu gibi küresel motorlardada statordaki elektromanyetik varyasyonlar hem kontrol hemde modellemede uygulama kolaylığı sunmaktadır.



Şekil 3.7 Sabit mıknatıslı küresel motor (Rong, Wang ve ark. 2019).

3.2.4. Küresel İndüksiyon Eyleyici/Motor

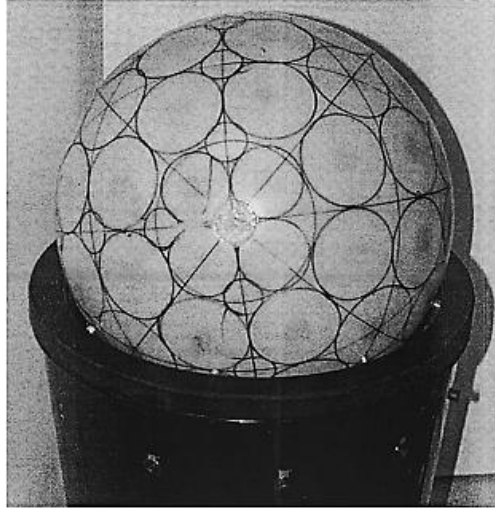
Küresel indüksiyon motorda rotor ve stator sargılardan oluşmaktadır. Motorun torku dönüş yönüyle orantılıdır. Küresel indüksiyon motorlar büyük boyutlarına nazaran verimi düşük eddy kayıpları fazladır. Bu yüzden robotik uygulamalar için uygun değildir.



Şekil 3.8 Küresel indüksiyon motoru (Seyfarth, Bhatia ve ark. 2016).

3.2.5. Küresel Adım Motoru

Küresel adım motorunun yapısı adım motorunun çalışması ile aynıdır. Sabit mıknatıslı stator içinde dönen bir rotor yerine, merkezde dönen bir dizi 'dişli' benzeri elektro mıknatıs rotoru etrafında sabit bir stator bulunur. Küresel adım motoru, bir step motor sürücüsü tarafından kontrol edilen darbeli bir elektrik akımını, bu dişli benzeri rotor etrafında hassas tek adımlı hareketlerine dönüştürür. Bu darbelerinin her biri rotoru tam dönüşte hassas ve sabit bir artışla hareket ettirmektedir.. Motorun dışında sırayla düzenlenmiş bobinler arasında akım geçiş yaptığından, rotor gerektiği gibi tam veya kısmi dönüşleri tamamlayabilir veya dönüşü etrafındaki adımlardan herhangi birinde çok ani bir şekilde sabit bir konumda durabilmektedir. Ancak bu hareketi küresel koordinat sisteminde her ekseninde sınırsız dönüş açısıyla sağlamak oldukça karmaşık ve çok fazla donanım yükü gerektirmektedir.



Şekil 3.9 Küresel adım motoru (Chirikjian ve Stein 1999).

3.3. Küresel Motorun Yapısı

Küresel Motoru tasarımında ilk etapta tasarlanacak küresel motor tipi seçimi yapılmalıdır. Kolay imal edilebilmesi ,daha küçük boyutta daha yüksek tork üretebilmesinden dolayı bu çalışmada ayrık hareket edebilen sabit mıknatıslı küresel motor yapılması planlanmıştır. Daha sonra hesaplamalarla ideal tasarım modeli ve temel boyutlandırma oluşturulmuştur.

3.3.1. Stator Yapısı

Küresel motorun temel parçalarından biri statordur. Stator dış kısımda Sabit sargılardan oluşmaktadır.Statorda bulunan stator kutupları stator yüzeyine belirli açılarda yerleştirilmiştir.

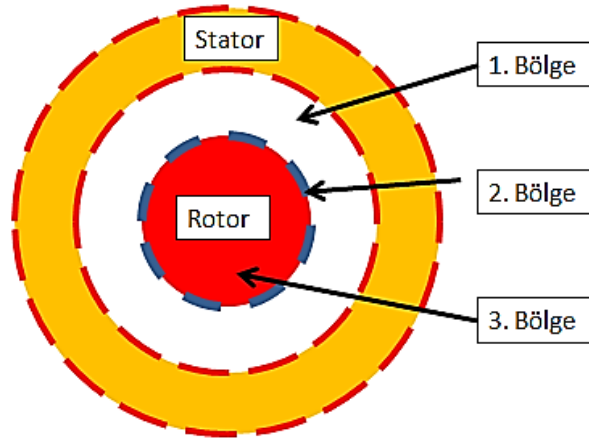
Stator rotorun dönmesi için gerekli manyetik akıyı oluşturan ana motor elemanıdır. Üzerinde bulunan telin tur sayısı, kalınlığı, nüve kalınlığı gibi parametrelerden oluşmaktadır.

3.3.2. Rotor yapısı

Küresel motorun diğer bir parçası rotordur. Rotor sabit mıknatıslardan oluşmaktadır. Tasarımda kullanacağımız rotor N ve S kutupları olarak küre yüzeyine belirli aralıklarda eşit sayıda yerleştirilmiştir. Stator ve Rotor arasında motor yapısı ve sürüm şekline göre belirli bir oran bulunmaktadır.

3.3.3. Manyetik Alan Ve Tork Modeli

Motorlarda rotor kutupları ile stator slotları arasındaki manyetik alanın oluşturduğu kuvvet ve bunun sonucunda elde edilen moment rotorun hareketini oluşturan temel bileşendir. Küresel motorun manyetik alan dağılımının çözümü hakkında daha iyi sonuçlar almak ve motor torkunun daha doğru bir formülasyonu için tork modelleri geliştirilmiştir. Küresel motordaki bu alan dağılımını kontrol eden Maxwell eşitlikleri sonlu elemanlar metoduyla çözümlenerek elde edilir.

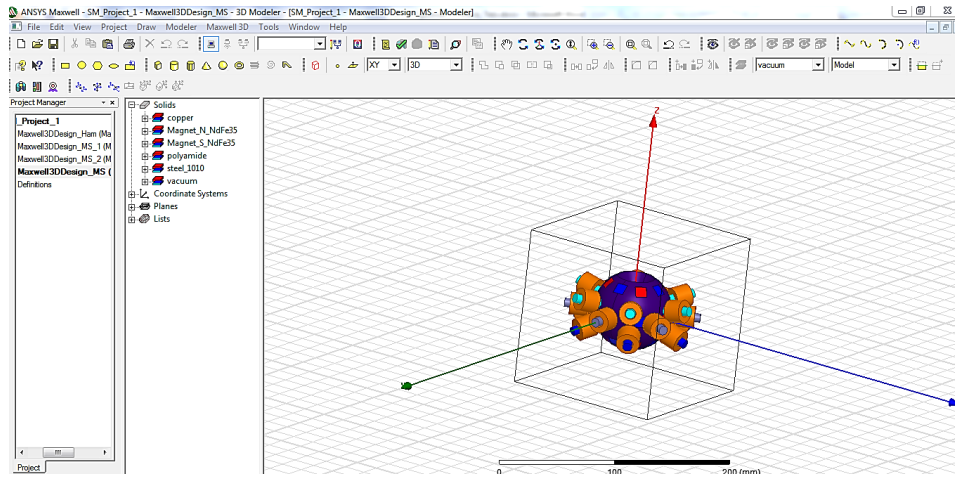


Şekil 3.10 Rotorun manyetik alan bölgeleri.

Manyetik alan eşitliğinde, rotor alanı üç bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölge rotor ve stator arasındaki hava boşluğudur. İkinci bölge sabit mıknatısların bulunduğu kutup yüzeyidir. Üçüncü bölge ise rotorun iç kısmıdır. Statorun bobinleri tarafından üretilen Maxwell kuvvetleri rotorun dönmesi için gerekli torku sağlar (Eşitlik 4.1)

3.4. Ansys Maxwell Sonlu Elemanlar Programı

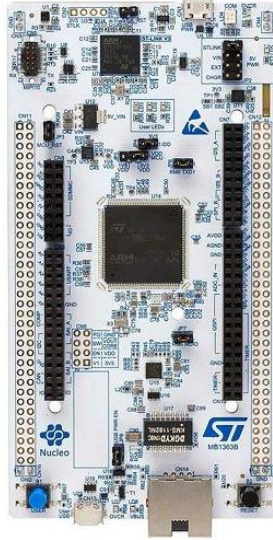
Küresel motorunun elektromanyetik analizleri Ansys Maxwell sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar methodu mühendislik uygulamalarında karmaşık ve çözümü güç problemleri modelleyerek çözüm olanağı sunmaktadır. Maxwell ile elektromekanik bileşenlerin doğrusal olmayan, geçici hareketini ve bunların tahrik devresi ve kontrol sistemi tasarımı üzerindeki etkilerini hassas bir şekilde karakterize edilebilmektedir. Maxwell'in gelişmiş elektromanyetik alan çözücülerinden yararlanarak ve bunları entegre devre ve sistem simülasyon teknolojisine sorunsuz bir şekilde bağlayarak, donanımda bir prototip oluşturmadan çok önce elektromekanik sistemlerin performansın anlaşılabilirliği.



Şekil 3.11 Maxwell sonlu elemanlar yazılımıyla küresel motor modellemesi.

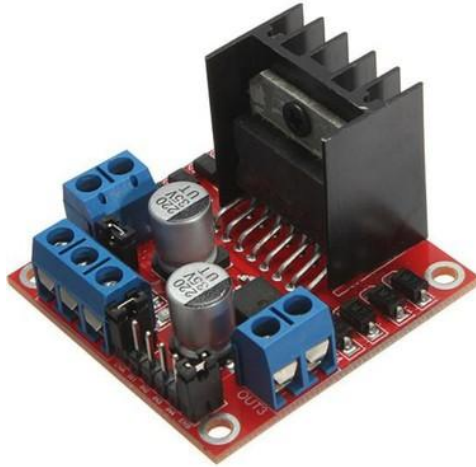
3.5. Elektronik Donanım

Robot kolu mekanizmasını oluşturan 2 küresel 1 doğrusal eyleyicinin hareket yönergeleri STM32 Nucleo-144 geliştirme boardu üzerinden L298n motor sürücü devrelerine aktarılarak oluşturulmuştur. STM32 Nucleo-144 boardu, STM32 mikrodenetleyici tarafından oluşturulmuş esnek programlama ve farklı donanımlarla geliştirme olanağın sunan motor kontrollerinin yapıldığı sistemlerle, IoT uygulamalarında, gelişmiş sensör tasarımlarında, medikal ve otomasyon uygulamalarında mühendisler tarafından sıklıkla kullanılan yarı profesyonel bir üründür. Gelişmiş açık kaynaklı donanımlar ve yazılım kütüphaneleri yaygınlaşmasında önemli bir etkidir. Kinematik ve kontrol algoritması bilgisayar arayüzünden Nucleo-144 kontrol borduna oradandan tahrik edilecek motor sargılarını enerjilendiren L298n sürücü devrelerine yönlendirilmiştir.



Şekil 3.12 STM32 Nucleo-144 geliştirme boardu.

L298n motor sürücü devresi oldukça yaygın olarak kullanılan düşük maliyetli ve stabil, motor için gerekli enerjiyi iletebilen bir set devredir. Toplamda 24 adet L298n sürücüsü kullanılmıştır.

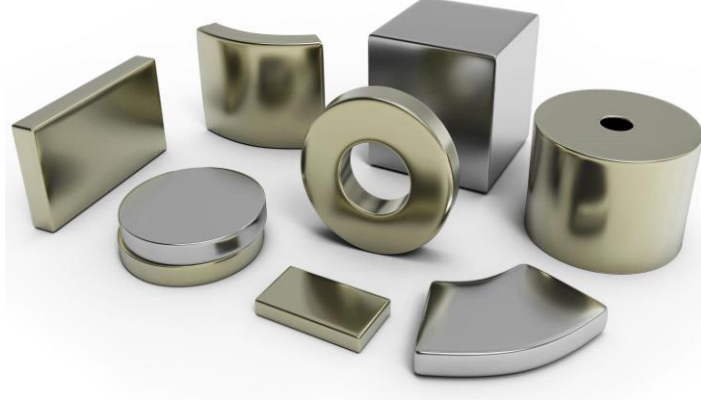


Şekil 3.13 L298n motor sürücü devresi.

3.6. Neodymium Mıknatıs

Metalleri çekebilen ve kendinden manyetik özelliği olan malzemelere mıknatıs denilmektedir. Mıknatıslar yeryüzünde doğal olarak bulunabilmesinin yanında suni olarakda uygun koşullar altında üretilmektedir. Farklı türden kullanım alanına göre mıknatıslar çeşitlilik göstermektedir. Düşük hacim ve ağırlığa sahip olmasından dolayı motor uygulamalarında neodymium ,bor ve demirden oluşan yüksek magnetik grade ve kalıcılığa sahip neodymium

mıknatıslar kullanılmaktadır. Yapmış olduğumuz çalışmada rotor üzerinde 1000 mm³ küp şeklinde N60 grade nikelajlı mıknatıslar kullanılmıştır.



Şekil 3.14 Farklı şekil ve ebatlarda neodmyium mıknatıslar.

3.7. Doğrusal Eyleyici

Robot kolunda doğrusal eyleyici olarak geri beslemeli Actuonix P16 serisi minyatür doğrusal motor kullanılmıştır. Actuonix P16 110 g ağırlığında olmasına rağmen 200 mm stroke ve 300 N yük kapasitesine sahiptir. Actuonix P16 muadillerine göre hafif olmasının yanında bağlantı noktaları sistemimiz için oldukça uygun olmasından dolayı tercih edilmiştir.



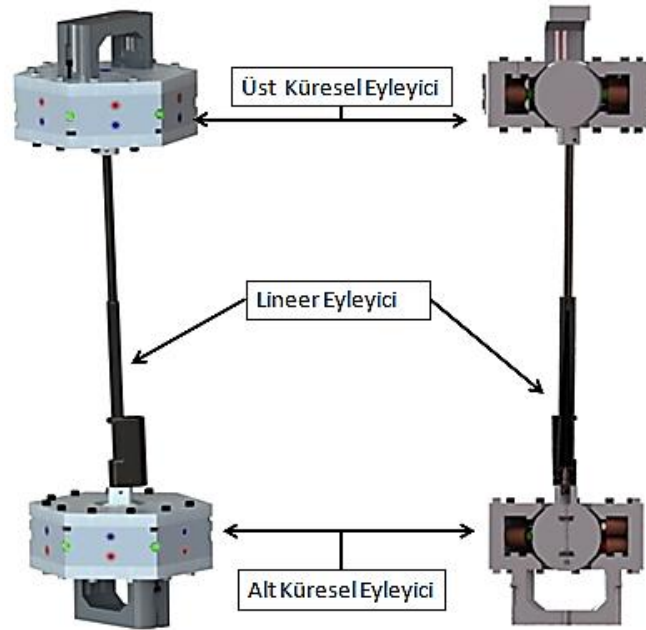
Şekil 3.15 Actuonix P16 doğrusal motor.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE BULGULAR

4.1.Yedi Serbestlik Dereceli İki Küresel Bir Doğrusal Eyleyicili Robot Kolu

Sisteminin Tasarımı Ve Dinamik Analizi

Bir robot kolunun dinamik modeli Lagrange mekaniği ve Newton mekaniği gibi fiziksel kanunlardan elde edilebilir. Bu kanunların uygulanmasıyla değişik sayıda mafsallı manipülatörün belirlenen kollarının geometrik ve atalet parametrelerine göre hareketin dinamik eşitliğinin elde edilmesi mümkündür. Klasik olarak Lagrange-Euler(L-E) ve Newton-Euler(N-E) formülasyonları sistematik olarak gerçek bir robot kol hareketinin eşitliklerini elde etmek için kullanılabilir. Buradan elde edilecek hareket eşitlikleri aynı fiziksel robotik manipülatörün dinamik davranışını tanımlayacağından bu anlamda birbirine eşittir. Bununla beraber, bu eşitliklerin yapısı değişik elde edilme nedenlerine bağlı olarak farklılık gösterebilir. L-E formülasyonuna göre yapılan manipülatörün dinamik modelinin elde edilmesi diğerlerine göre basit ve sistematiktir.



Şekil 4.1 İki küresel bir doğrusal eyleyicili yedi serbestlik dereceli robot kolunun kesit görünüşü.

L-E hareket eşitlikleri robot dinamiği için kapalı durum eşitliklerinin elde edilmesini sağlar ve bu eşitlikler ileri seviyede mafsallı değişkenli uzayla ilgili kontrol stratejilerinin tasarım ve analizinde kullanılabilir. Aynı zamanda, bu eşitlikler ileri dinamik problemlerinin çözümü için kullanılabilir.

4.1.1. İleri Kinematik

$$f(q_i) = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

İleri kinematik analizde uç işleyicinin \vec{P} konumunu bulmak için q_i eklem değişkenleri kullanılır. Robot kolunun tablo 3.1 DH parametreleri eşitlik 3.1'deki manuplasyonun herbir eklem için transformasyon matrisleri opere edilerek bileşke homojen dönüşüm matrisi eşitlik 4.2' deki gibi elde edilir.

$${}^B_A T = R_A T_d R_B T_a \quad (4.2)$$

RVC toolboxa eklem değişkenleri girilerek bileşke homojen transformasyon matrisi elde edilebilmektedir. Eklem değişkenleri Peter Corke's RVC Tools (Matlab)' a aktarılmıştır. Matlabdan elde edilen P_x , P_y , P_z uç işleyicinin konumu sırasıyla eşitlik 4.3,4.4 ve 4.5 'te verilmiştir.

```
clc
clear
% SPS Mechanism ** RVC Tools **
syms Q1 Q2 Q3 d4 Q4 Q5 Q6 d4
trotz(Q1)*troty(Q2)*trotx(Q3)*transl(0,0,d4)*trotz(Q4)*troty(Q5)*trotx(Q6);
display(ans);
```

Şekil 4.2 Homojen transformasyon matrisinin RVC tools' da çözümlenmesi

$$P_x = dS_2 - a(C_6(S_6(C_4S_2 + C_2S_3S_4) - C_2C_3C_6) - S_6(S_2S_4 - C_2C_4S_3)) \quad (4.3)$$

$$P_y = a(S_6(C_4(C_1C_3 - S_1S_2S_3) - C_2S_1S_4) + C_6(S_6(S_4(C_1C_3 - S_1S_2S_3) + C_2C_4S_1) + C_6(C_1S_3 + C_3S_1S_2))) - dC_2S_1 \quad (4.4)$$

$$P_z = a(C_6(C_6(S_1S_3 - C_1C_3S_2) + S_6(S_4(C_3S_1 + C_1S_2S_3) - C_1C_2C_4)) + S_6(C_4(C_3S_1 + C_1S_2S_3) + C_1C_2S_4)) + dC_1C_2 \quad (4.5)$$

Burada S_i : Sinüs (q_i) C_i : Cosinüs(q_i) sembolize etmektedir.

Normalde bileşke homojen matrisin hesaplamasında ardışık çok fazla matris cebri işlemi yapmamız gerekirken RVC tools yardımı ile basit bir şekilde Şekil 4.2 deki gibi bileşke matrisini elde ederiz . Eşitlik 3.1 deki 3x1 konum matrisinde uç işlevcinin konumunu veren P_x , P_y , P_z belirlenerek düz kinematik eşitlikler elde edilmiştir.

4.1.2. Ters Kinematik

Ters kinematik analizde q_i eklem değişkenlerini belirlemek için uç işleyicinin \vec{P} konumu kullanılır. Ters kinematik çözümünde ileri kinematikten elde edilen P_x , P_y , P_z konum eşitlikleri yinelemeli işlemler gerçekleştirilerek Newton-Raphson yöntemi ile sayısal olarak matlabda çözülmüştür. Sayısal çözüm için kinematik eşitliklerin farklarının toplamını alan tahmin edici ve düzeltici algoritmalar kullanılır ve ilk tahmin gerektirir. Sayısal çözümde iterasyonun işlem yükü genellikle ilk tahminin kalitesiyle ilgilidir .Manipülatörler için Jacobian, matematiksel yöntemlerle elde edilen ve manipülatörün eyleyici hızlarıyla uç işlevci hızı arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir matristir. Jacobian matrisi, manipülatörlerin yumuşak geçişli bir yörünge izleyebilmesinde, çalışma uzayı dışındaki tekil noktaların belirlenmesinde, dinamik eşitliklerinin elde edilmesinde ve eyleyicilerden uç işlevciye kadar aktarılan kuvvet ve torqların belirlenmesinde önemli bir rol üstlenmektedir.Jacobien matris konum eşitlikleri eklem değişkenleri cinsinden elde edilmektedir.

$$\theta^{i+1} = \theta^i + J^\dagger(\theta^i) (p_d - f(\theta^i)) \quad (4.6)$$

Bu döngünün hesaba başlayabilmesi için i elemanına tahmini değerler verilmiştir ve $i+1$ vektörünün elemanları hesaplanmıştır. $i+1$ vektörünün elemanları bir sonraki adımda i vektörünün elemanları olur ve yeniden $i+1$ vektörünün elemanları hesaplanır. $i+1$ vektörünün elemanlarının değerleri ile i vektörünün elemanlarının değerleri arasındaki fark istediğimiz değere düşünceye kadar hesaplama işlemi devam eder. Hata istediğimiz değere ulaştığında elde edilen $i+1$ vektöründe bulunan eklem değişkenleri hedef koordinatımıza ulaşabilmemiz için gereken değerler olarak tespit edilmiş olur.

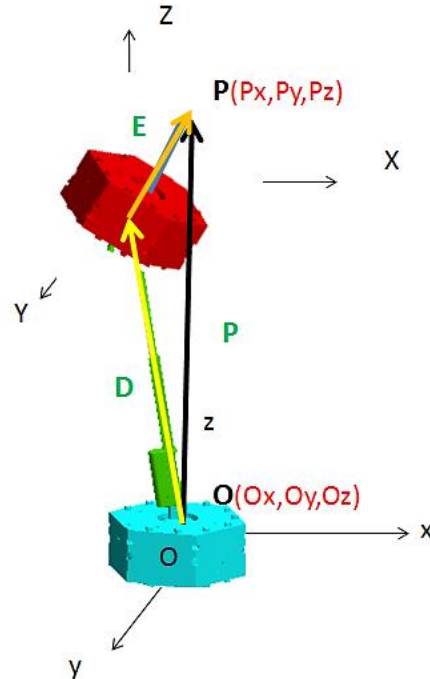
$$J^\dagger = (J^{-1}J)^{-1}J^T \quad (4.7)$$

Sayısal çözümde dikkat edilmesi gereken noktalardan biri Jacobien matrisin tersinin alınabilmesi için jacobien matrisinin tekil olmaması ve kare matris olması gerekir. Yedi serbestlik dereceli robot kolunda elde edilen jacobien matris eklem değişkeni sayısından dolayı kare matris değildir. Bu yüzden çözüme erişmemiz için J^\dagger yalancı tersini (Moon roose invers –pseudo invers) almamız gerekir. Programlamada i vektörüne ait değişkenlere atanan

ilk tahmini değerler, kabul edilebilir hata değeri ve dongu sayısı gibi parametreler hesaplamamıza uygun seçilmelidir. Uygun seçilmeyen değerler sebebi ile hedef noktaya ulaşabilmemiz için gerekli olan eklem değişkenleri hesaplanamaz. Ayrıca program, jakobiyen matrisin tekil olduğu noktalarda çözüm üretemez. Bir matrisin determinantı sıfıra eşit ise o matrisin tersi alınamaz. Determinantı sıfır olan jakobiyen matris tekildir denir. Jakobiyen matris, eklem değişkenlerinin bazı değerlerinde tekildir. Jakobiyen matrisin tekil olduğu noktalarda robot serbestlik derecesini kaybeder ve kaybettiği bu noktalarda matris robot kontrolünde kullanılamaz. Çoğu robot manipulator jakobiyen matrisini tekil yapan eklem açılarına sahiptir. Bu aıların meydana getirdiği kartezyen noktalara robotun tekil noktaları denir.

4.1.3. Manüplatorün Dinamiği

Yedi serbestlik dereceli robot kolu manüplatoru için yapılan ters dinamik analizdeki amaç, manipulatorün hareketli üst motor tablası için bir yorünge tanımlandığında manipulatorün bu yorüngeyi takip edebilmesi için gerekli olan ve manipulatorün eyleyicileri tarafından tahrik kollarına uygulanması gereken moment değerlerinin belirlenmesidir. Ters dinamik analizin ilk adımı diferansiyel eşitlikleri formüle etmektir. Genellikle eşitlik 3.20 deki gibi ifade edilir. Burada $M(q) \in R^{6 \times 6}$ bir atalet matrisini gösterir, $C(q, \dot{q})\dot{q} \in R^6$ Santrifüj ve Coriolis kuvvetlerinin neden olduğu bir tork vektörüdür, $G(q) \in R^6$ bir tork yerçekimi vektörüdür ve $\tau \in R^6$ eklem tork vektörünü temsil eder.



şekil 4.4 Robot kolunun dinamik yoneli mi.

Yedi serbestlik dereceli robot kolunun hareketli tablasının ağırlık merkezinin konum ve yönlendirilmesi verildiğinde lineer motorun boyunun elde edilmesi manipulatörün hedef koordinatlara oryantasyonun hızlı ve basit biçimde gerçekleşmesi anlamına gelir. Hareketli tablanın sabit tablaya göre yönelim matrisi R_P

$$R_P = R_Z(\gamma_P)R_Y(\beta_P)R_X(\alpha_P) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Eşitlik 4.8 deki gibi elde edilir. Lineer motorun D vektörü ise

$$\vec{D} = [\vec{P} - ER] R^T \quad (4.9)$$

Eşitlik 4.9'daki gibi olur .

$$D = \begin{bmatrix} P_x - O_x + E_x r_{11} + E_y r_{12} \\ P_y - O_y + E_x r_{21} + E_y r_{22} \\ P_z + E_x r_{31} + E_y r_{32} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Lineer motorun tek boyutlu hareketi d ;

$$d = \sqrt{(P_x - O_x + E_x r_{11} + E_y r_{12})^2 + (P_y - O_y + E_x r_{21} + E_y r_{22})^2 + (P_z + E_x r_{31} + E_y r_{32})^2} \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.11 deki gibi elde edilir. Bu eşitlikten görüldüğü üzere konum vektörü ve yönelim matrisi elemanları kullanılarak kolaylıkla gerekli kol uzunlukları bulunur. Kartezyen uzayda hareketli platformun konumu ve yönelimi, konum vektörü ve yönelimini ifade eden açılar cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$X_P = [P_x \quad P_y \quad P_z \quad \alpha_P \quad \beta_P \quad \gamma_P]^T \quad (4.12)$$

$$\dot{D} = J\dot{X}_P = J \begin{bmatrix} V_P \\ \omega_P \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Lagrange-Euler formülasyonu bir sistemin dinamik modelini çıkarırken, sistemin toplam kinetik enerjisi ile toplam potansiyel enerjisi farkından yararlanır (Eşitlik 3.16).

Şekil 4.4 de görüldüğü gibi üst küresel motorun tablasın E çıkıntısının alt küresel motorun orjinine göre koordinatları

$$E = [P_x \quad P_y \quad P_z]^T + {}^{KMalt}R_{KMüst} [E_x \quad E_y \quad E_z]^T \quad (4.14)$$

Şeklinde elde edilir. Burada $u_d = \frac{D}{\|D\|}$ birim vektörü D vektörünün normuna bölünerek elde edilir. Burada üstmotorun rotorunun hızı zamana göre türevi alınarak elde edilir ve

$$\vec{V}_{ROTORüst} = x + \omega {}^{KMalt}R_{KMüst} E \quad (4.15)$$

Eşitlik 4.15 deki gibi elde edilir. Lineer motor eksenindeki hız vektörünün iz düşümü

$$\dot{D} = E u_d \quad (4.16)$$

Eşitlik 4.16 deki gibi lineer motorun uzama hızını verir. Eşitlik 4.16 içsel çarpım yapılırsa

$$\dot{D} = J \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Eşitlik 4.17 elde edilir.

Üst Küresel motorun dönme hareketinden kaynaklı oluşan kinetik enerjisi eşitlik 4.18 deki gibi

$$K_{üst,öteleme} = \frac{1}{2} m_{km} (\dot{P}_x^2 + \dot{P}_y^2 + \dot{P}_z^2) \quad (4.18)$$

Dönme hareketinden kaynaklı kinetik enerjisi ise

$$K_{üst,dönme} = \frac{1}{2} \omega_{km}^T I_{km} \omega_{km} \quad (4.19)$$

Eşitlik 4.19 deki gibi elde edilir. Eşitlik 4.20 de matrisi verilen I_{km} atalet tensörü ω_{km} üst küresel motorun alt küresel motora göre açısal hızıdır.

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$K_{\text{üst,dönme}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_x C^2 \gamma + I_y S^2 \gamma & (I_x - I_y) C \alpha C \gamma S \gamma & b_{13} \\ (I_x - I_y) C \alpha C \gamma S \gamma & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$b_{13} = b_{13} = C \gamma I_x (-S \gamma C \alpha S \alpha - C \gamma S \beta C \alpha + S \gamma C \alpha S \alpha C \beta) - S \gamma I_y (-C \alpha C \gamma S \alpha + S \gamma S \beta C \alpha + C \alpha C \gamma C \beta)$$

$$b_{22} = C^2 \alpha (I_x S^2 \gamma + I_y C^2 \gamma) + I_z S^2 \alpha$$

$$b_{23} = b_{32} = S \gamma C \alpha I_x (-S \gamma C \alpha S \alpha - C \gamma S \beta C \alpha + S \gamma C \alpha S \alpha C \beta) - C \gamma C \alpha I_y (S \gamma S \beta C \alpha + C \alpha C \gamma C \beta - C \alpha C \gamma S \alpha) - S \alpha I_z$$

$$b_{33} = I_x (-S \gamma C \alpha S \alpha - C \gamma S \beta C \alpha + S \gamma C \alpha S \alpha C \beta)^2 + I_y (S \gamma S \beta C \alpha + C \alpha C \gamma C \beta - C \alpha C \gamma S \alpha)^2 + I_z (S^2 \alpha + C^2 \alpha C \gamma)$$

Eşitlik 4.21 deki gibi yazıldığında dönme kinetik enerjisi 4.21 deki gibi elde edilir. Sonuç olarak $K_{\text{üst}} = K_{\text{üst,dönme}} + K_{\text{üst,öteleme}}$ olarak elde edilir. Burada kütle atalet tensörü eşitlik 4.22 de

$$M_{\text{üst}} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_z S_\beta^2 + I_y C_\beta^2 C_\gamma^2 + I_x C_\beta^2 C_\gamma^2 & (I_x - I_y) C_\beta C_\gamma S_\gamma & I_z S_\beta \\ 0 & 0 & 0 & (I_x - I_y) C_\beta C_\gamma S_\gamma & I_x S_\gamma^2 + I_y C_\gamma^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_z S_\beta & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Santrifüj ve Coriolis kuvvetlerinin neden olduğu bir tork vektörünün matrisi ise eşitlik 4.23 de verilmiştir.

$$C(q, \dot{q})_{\text{üst}} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C_{22} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$C_{22} = \begin{bmatrix} -C_{221} \dot{\beta} - C_{222} \dot{\gamma} & -C_{221} \dot{\alpha} - C_{223} \dot{\beta} + C_{224} \dot{\gamma} & -C_{222} \dot{\alpha} + C_{224} \dot{\beta} \\ C_{221} \dot{\alpha} + C_{224} \dot{\gamma} & C_{225} \dot{\gamma} & C_{224} \dot{\alpha} + C_{225} \dot{\beta} \\ C_{222} \dot{\alpha} + C_{224} \dot{\beta} & -C_{224} \dot{\alpha} - C_{225} \dot{\beta} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$C_{221} = C_{\beta} S_{\beta} (C_{\gamma}^2 I_x + S_{\gamma}^2 I_y - I_z) \quad (4.25)$$

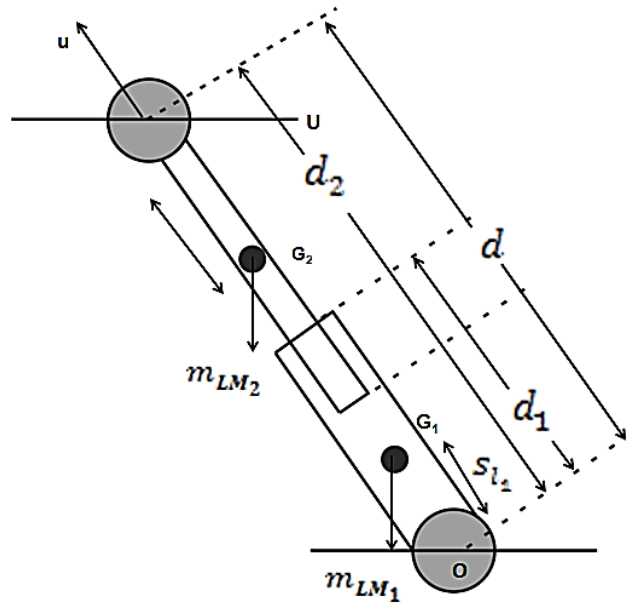
$$C_{222} = C_{\beta}^2 C_{\gamma} S_{\gamma} (I_x - I_y) \quad (4.26)$$

$$C_{223} = C_{\gamma} S_{\gamma}^2 (I_x - I_y) \quad (4.27)$$

$$C_{224} = \frac{1}{2} C_{\beta} (C_{\gamma} - S_{\gamma}) (C_{\gamma} + S_{\gamma}) (I_x - I_y) \quad (4.28)$$

$$C_{225} = C_{\gamma} S_{\gamma} (I_x - I_y) \quad (4.29)$$

Lineer motorun kinetik enerjisinde ise sabit ve hareketli kısım olmak üzere iki ayrı bölüme ayrılır. Şekil 4.5 de lineer motorun dinamik yerleşimi gösterildiği gibi G_1 ve G_2 iki parçanın ayrı ayrı kütle merkezlerini m_1 ve m_2 kütlelerini u lineer motorun doğrultusunu gösteren vektörü göstermektedir.



Şekil 4.5 Lineer motorun kütle merkezlerinin konumunun gösterimi

Lineer motorun kütle merkezinin konumu

$$\mathbf{OG}_{LM} = \frac{1}{m_{LM1} + m_{LM2}} \left[(s_{l1} m_{LM1} - \frac{1}{2} m_{LM2} d_2) + m_{LM2} d \right] \mathbf{u} \quad (4.24)$$

eşitlik 4.24 deki gibi ifade edilir. Eşitlik 4.24 , 4.25 teki hale getirilerek sadeleştirilebilir.

$$\mathbf{OG}_{LM} = \left[A + \frac{m_{LM2} d_2}{m_{LM1} + m_{LM2}} \right] \mathbf{u} \quad (4.25)$$

Burada eşitlik 4.25 deki A

$$A = \frac{1}{m_{LM_1} + m_{LM_2}} \left(s_{l_1} m_{LM_1} - \frac{1}{2} m_{LM_2} d_2 \right) \quad (4.26) \text{ Şeklindedir.}$$

Kütle merkezinin hızı \mathbf{V}_{GLM}

$$\mathbf{V}_{GLM} = \frac{d\mathbf{O}_{GLM_1}}{dt} \quad (4.27)$$

Eşitlik 4.27 deki gibi elde edilir. Eşitlik 4.24 eşitlik 4.27 de yerine konursa

$$\mathbf{V}_{GLM} = \frac{A}{d} [\mathbf{v}_P - (\mathbf{v}_P \mathbf{u}) \mathbf{u}] + \frac{m_{LM_2} d_2}{m_{LM_1} + m_{LM_2}} \mathbf{v}_P \quad (4.28)$$

Eşitlik 4.28 deki hız ifadesi elde edilir. Küresel motorun kinetik enerji ifadesi

$$\mathbf{K}_{LM} = \frac{1}{2} (m_{LM_1} + m_{LM_2}) \mathbf{V}_{GLM}^T \mathbf{V}_{GLM} \quad (4.29)$$

Eşitlik 4.29 açılırsa eşitlik 4.30 elde edilir.

$$\mathbf{K}_{LM} = \frac{1}{2} (m_{LM_1} + m_{LM_2}) \left[\mathbf{e} (\mathbf{v}_P^T \mathbf{v}_P - \mathbf{v}_P^T \mathbf{u} \mathbf{u}^T \mathbf{v}_P) + \left(\frac{m_{LM_2}}{m_{LM_1} + m_{LM_2}} \right)^2 \mathbf{v}_P^T \mathbf{u} \mathbf{u}^T \mathbf{v}_P \right] \quad (4.30)$$

Burada “e” eşitlik 31 deki gibidir.

$$e = \left(\frac{A}{d} + \frac{m_{LM_2}}{m_{LM_1} + m_{LM_2}} \right)^2 \quad (4.31)$$

Lineer motorun ucuna bağlı rotorun hızı

$$\mathbf{v}_P^T \mathbf{u} = \dot{\mathbf{d}} \quad (4.32)$$

Eşitlik 4.30 de yerine konursa

$$\mathbf{K}_{LM} = \frac{1}{2} (m_{LM_1} + m_{LM_2}) \left[\mathbf{v}_P^T \mathbf{e} \mathbf{v}_P - \mathbf{e} \dot{\mathbf{d}}^T \dot{\mathbf{d}} + \left(\frac{m_{LM_2}}{m_{LM_1} + m_{LM_2}} \right)^2 \dot{\mathbf{d}}^T \dot{\mathbf{d}} \right] \quad (4.33)$$

Eşitlik 4.33 deki ifade ortaya çıkar. Daha sade biçimde eşitlik 4.34 deki gibi olur.

$$\mathbf{K}_{LM} = \frac{1}{2} (m_{LM_1} + m_{LM_2}) [\mathbf{v}_P^T \mathbf{e} \mathbf{v}_P - \dot{\mathbf{d}}^T \mathbf{n} \dot{\mathbf{d}}] \quad (4.34)$$

Burada n eşitlik 4. 35 deki gibidir.

$$\mathbf{n} = \mathbf{e} - \left(\frac{m_{LM_2}}{m_{LM_1} + m_{LM_2}} \right)^2 \quad (4.35)$$

Lineer motorun kütle matrisi jakobien matrisi kullanılarak eşitlik 4.36 deki gibi ifade edilir

$$\mathbf{M} = (m_{LM_1} + m_{LM_2}) [J_2^T [e - J_2^T n J_1] J_1] \quad (4.36)$$

Lineer motorun potansiyel enerjisi eşitlik 4.37 deki gibi elde edilir.

$$\mathbf{U}_{LM} = (m_{LM_1} + m_{LM_2}) g \left[A \frac{1}{d_2} + \left(\frac{2m_{LM_2}}{m_{LM_1} + m_{LM_2}} \right) \right] P_z \quad (4.37)$$

Üst platformun potansiyel enerjisi ise

$$P_{km_{üst}} = m_{km_{üst}} g P_z \quad (4.38)$$

Eşitlik 4.38 deki gibi yazılır.

Alt tabladaki küresel motorun genelleştirilmiş tork eşitliğini ise

$$\tau_{km} = M_{km}(q) \ddot{q} + C_{km}(q, \dot{q}) \dot{q} \quad (4.39)$$

şeklinde yazabiliriz burada $I_x = I_y = I$ olmak üzere eylemsizlik kütle matrisi

$$M(q)_{km} = \begin{bmatrix} I_x c^2 \beta c^2 \gamma + I_y c^2 \beta s^2 \gamma + I_z s^2 \beta & (I_x - I_y) c \beta c \gamma s \gamma & I_z s \beta \\ (I_x - I_y) c \beta c \gamma s \gamma & I_x s^2 \gamma + I_y c^2 \gamma & 0 \\ I_z s \beta & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

coriolis matrisi;

$$C(q, \dot{q})_{km} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{31} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Coriolis matrisinin elemanları ;

$$C_{11} = (I_x c \beta s \beta c^2 \gamma - I_y c \beta s \beta s^2 \gamma + I_z s \beta c \beta) \dot{\beta} + (-I_x s \gamma c \gamma c^2 \beta + I_y c^2 \beta s \gamma c \gamma) \dot{\gamma},$$

$$C_{12} = (-I_x c \beta s \beta c^2 \gamma - I_y c \beta s \beta s^2 \gamma + I_z s \beta c \beta) \dot{\alpha} - ((I_x - I_y) s \beta c \gamma s \gamma) \dot{\beta} + \frac{1}{2} (-I_x - I_y) c \beta s^2 \gamma + (I_x - I_y) c \beta c^2 \gamma + I_z s \beta) \dot{\gamma},$$

$$\begin{aligned}
C_{13} &= -\left((I_x - I_y)c\gamma s\gamma c^2\beta\right)\dot{\alpha} + \frac{1}{2}\left(-\left(I_x - I_y\right)c\beta s^2\gamma + \left(I_x - I_y\right)c\beta c^2\gamma + I_3c\beta\right)\dot{\beta}, \\
C_{21} &= \left(I_x c\beta s\beta c^2\gamma + I_y c\beta s\beta s^2\gamma - I_z s\beta c\beta\right)\dot{\alpha} + \frac{1}{2}\left(-\left(I_x - I_y\right)c\beta s^2\gamma + \left(I_x - I_y\right)c\beta c^2\gamma - I_z c\beta\right)\dot{\gamma}, \\
C_{22} &= \left(\left(I_x - I_y\right)c\gamma s\gamma\right)\dot{\gamma}, \\
C_{23} &= \frac{1}{2}\left(-\left(I_x - I_y\right)c\beta s^2\gamma + \left(I_x - I_y\right)c\beta c^2\gamma - I_x c\beta\right)\dot{\alpha} + \left(\left(I_x - I_y\right)c\gamma s\gamma\right)\dot{\beta}, \\
C_{31} &= \left(\left(I_x - I_y\right)c\gamma s\gamma c^2\beta\right)\dot{\alpha} + \frac{1}{2}\left(\left(I_x - I_y\right)c\beta s^2\gamma - \left(I_x - I_y\right)c\beta c^2\gamma - I_z c\beta\right)\dot{\beta}, \\
C_{32} &= \frac{1}{2}\left(\left(I_x - I_y\right)c\beta s^2\gamma - \left(I_x - I_y\right)c\beta c^2\gamma + I_z c\beta\right)\dot{\alpha} - \left(\left(I_x - I_y\right)c\gamma s\gamma\right)\dot{\beta}, \\
C_{33} &= 0.
\end{aligned}$$

gibi ifade edilir.

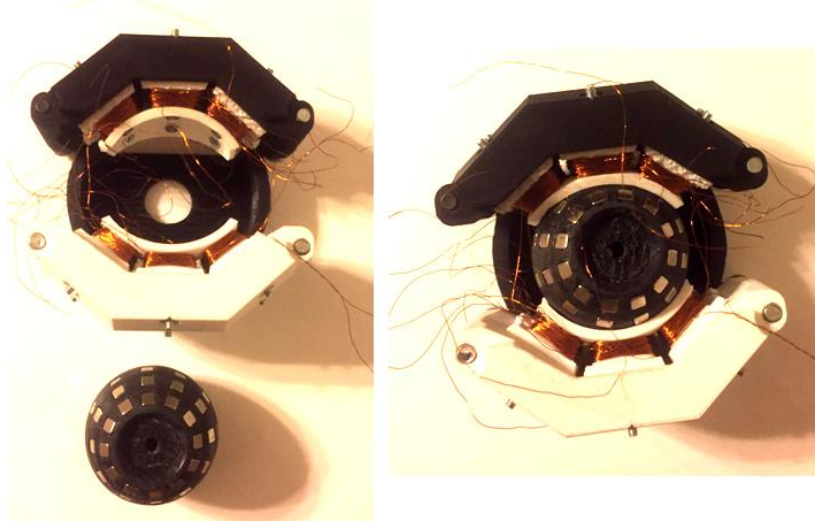
$$\tau_i = M(q)_i \ddot{q} + C(q, \dot{q})_i \dot{q} + G(q)_i \quad (4.42)$$

Sürtünme ihmal edilir ve edilen bileşke kütle matrisi , coiorils ve santrifuj kuvvetlerinin oluşturduğu matris ve yer çekimi matrisi , 4.42 de genel ifadesi verilen genelleştirilmiş tork eşitliğinde yerine konularak dinamik eşitlikler ifade edilir ve dinamik analizde asıl amaç olan $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6, \tau_7]^T$ eklem torkları elde edilir.

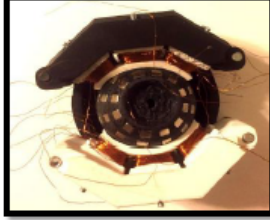
4.2. Küresel Motorun Analizi Ve Tasarımı

4.2.1. Kavramsal tasarımlar ve Prototip İmalatı

Küresel motor prototip çalışmasında her biri farklı ebat ve tasarımda toplam 3 farklı prototip motor tasarlanmış ve imal edilmiştir. Üretilen ilk prototip (KM₁) demir çekirdeksiz sabit mıknatıslı küresel step motordur. Yapısal olarak bu motorun seçilmesi adım sayısının fazla olmasından dolayı kontrol çözünürlüğünün yüksektir.

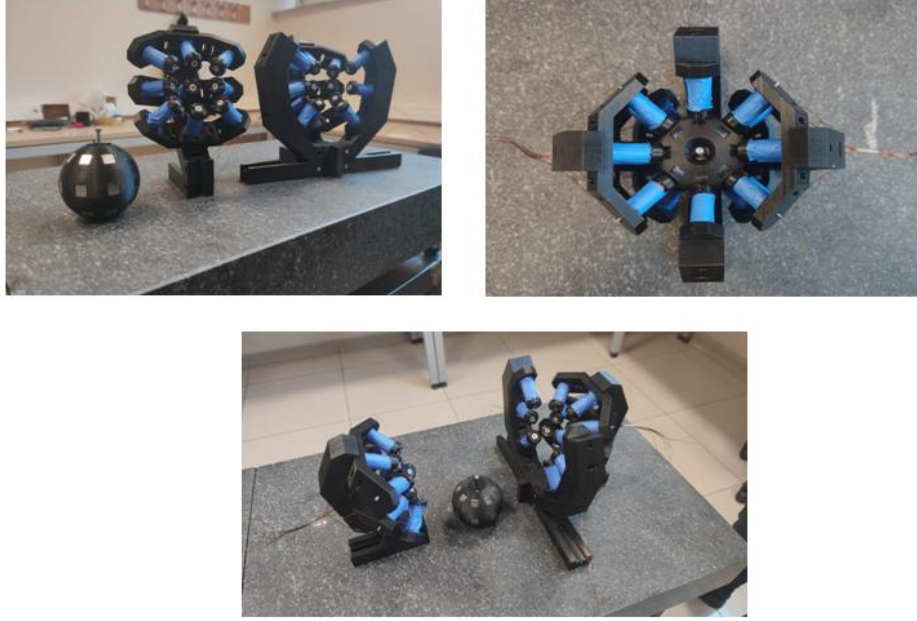


Şekil 4.6 KM₁ Sabit mıknatıslı küresel step motor 1. prototipi.

1. Prototip (KM1)	
	
18 Slot 72 Pole PM Küresel Motor Özellikleri	
X Ekseninde Dönme	$\pm 180^{\circ}$ (her adımda 15°)
Y Ekseninde Dönme	$\pm 45^{\circ}$ (her adımda 15°)
Z Ekseninde Dönme	360° (her adımda 10°)
Bobin Sayısı	18 Slot (12 Tilt 6 Spin)
Mıknatıs	72 Pole (12 X 6 Sıra)
Ebatları	60 X 85 X 70 mm
Ağırlık	600 gram

Şekil 4.7 KM₁ Sabit mıknatıslı küresel step motor özellikleri

Üzerinde 5 x 5 x 5 mm ebatında 72 adet neodmyium magnetten oluşan kutup ve 18 bobinden oluşan slot yapısı vardır. Bu tasarımdan vazgeçilmesinin sebebi kontrolünün çok zor olması ve yüksek kutup/slot oranına sahip olmasına rağmen küçük mıknatıs kutuplarının ve çekirdeksiz slotların ürettiği torkun çok küçük olmasıdır.



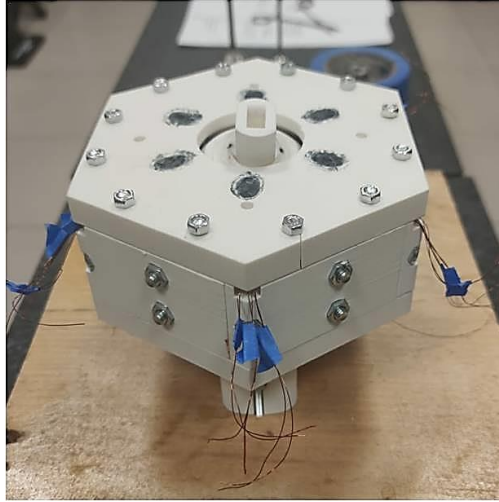
Şekil 4.8 KM₂ sabit mıknatıslı küresel motor 2. Prototipi

2. Küresel motor prototipinde ise sabit mıknatıslı demir çekirdekli 24 slot 8 kutuplu motor yapısında yeni bir tasarım yapılmıştır. Slotlardaki bobinlerin ve üzerinde mıknatısların ebatları büyütülerek ve kutup/pole oranı azaltılarak kontrolü daha kolay bir motor imal edilmiştir. Bu prototipin her ne kadar 1. Prototipe nazaran daha yüksek tork daha kolay kontrol hedeflense de rotor yataklamasından kaynaklanan aşırı sürtünmeden dolayı istenilen çalışma esaslarını sağlamamıştır.

2. Prototip (KM2)	
X Ekseninde Dönme	$\pm 30^{\circ}$ (her adımda 15°)
Y Ekseninde Dönme	$\pm 30^{\circ}$ (her adımda 15°)
Z Ekseninde Dönme	360° (her adımda 15°)
Bobin Sayısı	24 Slot (16 Tilt 8 Spin)
Mıknatıs	24 Pole (3 X 8 Sıra)
Ebatları	126 X 170 X 150 mm
Ağırlık	1300 gram

Şekil 4.9 KM₂ sabit mıknatıslı küresel step motor özellikleri

3. prototipte ise 1. Ve 2. Prototipde karşılaşılan problemleri ortadan kaldıran daha kompakt kontrolü daha kolay yeni bir tasarım çalışması yapılmıştır. Mıknatıs yapısı ,tasarım kısıtları, kontrol algoritmasındaki karmaşıklık ve donanım yetersizliğinden dolayı hareket modelini basitleştirilerek yeni bir tasarım ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.10 KM₃ Sabit mıknatıslı küresel motor prototipi

Kontrolü kolaylaştırmak ve donanıma binen yükü azaltmak için; bobin sayısı azaltılarak 24'den 18 e indirilmiş, sensor sayısı azaltıldı 48'den 6'ya indirilmiştir. Bobinlerdeki demir çekirdek vazifesi gören ve manyetik akıyı yönlendiren M3 Vida M6 Civatayla değiştirilerek yaklaşık 4 kat etkisi artırılmış. **Devinme** hareketi (X-Y) ile **dönme** (Z) hareketi birbirinden ayrılmıştır. Sürtünme minimuma indirmek için yataklama eklenmiştir. Kavramsal tasarımların prototipleri üzerinden farklı parametrelerde iyileştirmeler yapılacak çalışmada kullanılacak nihai küresel motor modeline ulaşılmıştır

4.2.2. Ayrık hareket edebilen sabit mıknatıslı küresel motor

ASMKM 'nin ayrık hareket eden yapısı yataksız sabit mıknatıslı senkron motorun (**YSMSM**) yapısına benzemektedir (Okada, Dejima ve ark. 1995, Zhang ve Luo 2008, Schweitzer ve Maslen 2009). Küresel motorun devinme hareketini yapmasını sağlayan devinme bobinleri tarafından oluşturulan Maxwell kuvvetleridir. Maxwell kuvvetinin formülü

eşitlik 4.44'deki gibidir. Burada B akı yoğunluğu, μ_0 hava geçirgenliği dS sonsuz küçüklikte etki alanıdır.

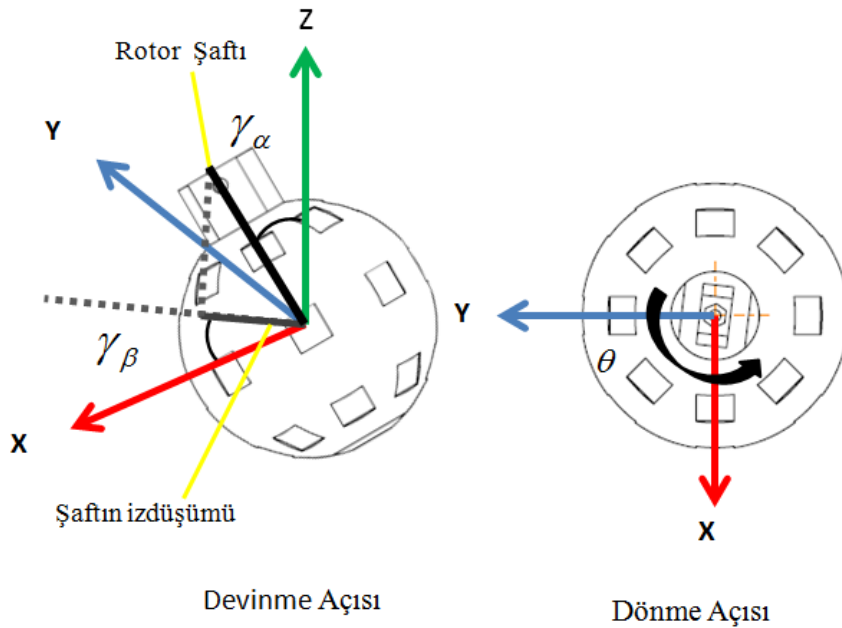
$$dF = \frac{B^2 dS}{2\mu_0} \quad (4.44)$$

Rotorun ürettiği akı yoğunluğu eşitlik 4.45 deki gibidir. B_n maksimum akı dağılımı N kutup çifti θ rotor konumu Ψ_n devinme ve dönme sargı akımlarının faz açısıdır.

$$B(\theta, t) = B_n \cos(N\theta - \omega t + \Psi_n) \quad (4.45)$$

O halde devinme kuvvetinin büyüklüğü eşitlik 4.3'deki gibi yazılabilir.,

$$|F_T| = \frac{lr\pi}{2\mu_0} |B_s||B_t| \quad (4.46)$$



Şekil 4.11 ASMKM devinme ve dönme açısı.

Burada B_s ve B_t sırasıyla dönme ve devinme bobinlerinin ürettiği toplam hava boşluğunun akı yoğunluğudur. r rotor yarıçapı, l statorun etkin boy uzunluğudur. Dönme ve Devinme hareketleri temelde bobinler üzerinden geçen akımla kontrol edilmektedir. Motorun kontrolü referans akım metodu ile sağlanmıştır. Dönme hareketinde, bobinler 3 fazlı, 8 kutuplu döner

motor ile aynıdır. Burada devinme açısının etkisi yoktur. Aynı şekilde, devinme bobinlerindeki akımlar sadece devinme hareketini etkiler.

Dönme hareketine neden olan akım eşitlikleri aşağıdaki gibidir:

$$I_{sA} = I_s \cos(N(\omega t + \theta)) \quad (4.47)$$

$$I_{sB} = I_s \cos(N(\omega t + \theta) - \frac{2\pi}{3}) \quad (4.48)$$

$$I_{sC} = I_s \cos(N(\omega t + \theta) - \frac{4\pi}{3}) \quad (4.49)$$

Burada A,B,C herbir fazı, I_s dönme akımının maksimum değerini, ω açısal hızı göstermektedir. Devinme hareketine neden olan akım eşitlikleri ise aşağıdaki gibidir :

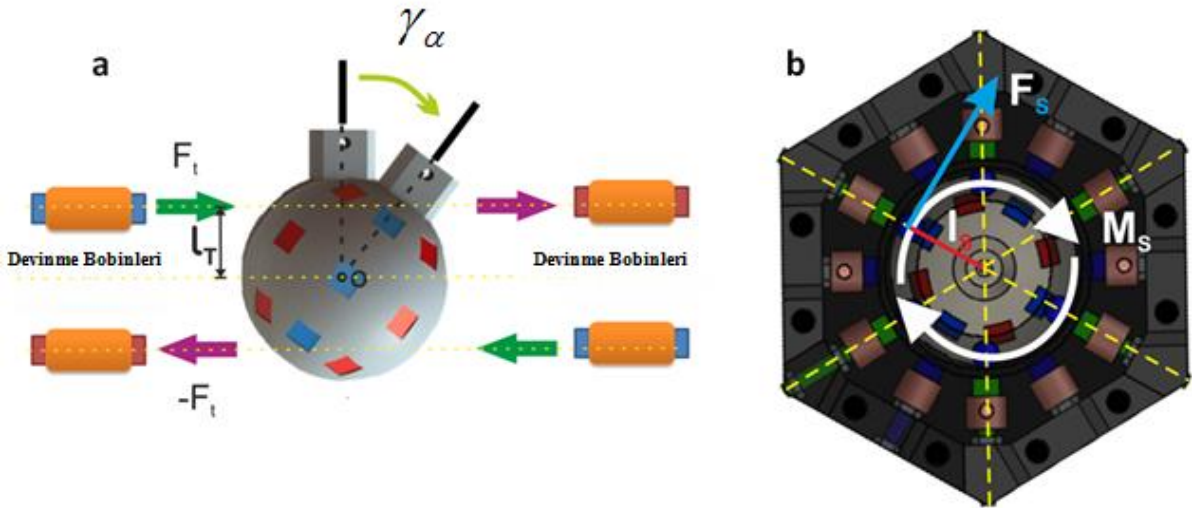
$$I_{t,U_A} = k_i I_t \cos\left(\frac{2\pi}{8} - k_i \gamma_\alpha \cos(\gamma_\beta)\right) = -I_{t,L_A} \quad (4.50)$$

$$I_{t,U_B} = k_i I_t \cos\left(\frac{2\pi}{8} - k_i \gamma_\alpha \cos(\gamma_\beta - \frac{2\pi}{3})\right) = -I_{t,L_B} \quad (4.51)$$

$$I_{t,U_C} = k_i I_t \cos\left(\frac{2\pi}{8} - k_i \gamma_\alpha \cos(\gamma_\beta - \frac{4\pi}{3})\right) = -I_{t,L_C} \quad (4.52)$$

$$(k_i = 1, \gamma_\alpha > 0^\circ \text{ } k_i = -1, \gamma_\alpha < 0^\circ)$$

Burada $\gamma_\alpha, \gamma_\beta$ rotor pozisyon açısını, $I_{t,U}$ ve $I_{t,L}$ statorun üst ve alt maksimum akımını göstermektedir.



Şekil 4.12 ASMKM Kuvvetleri a) devinme b) dönme.

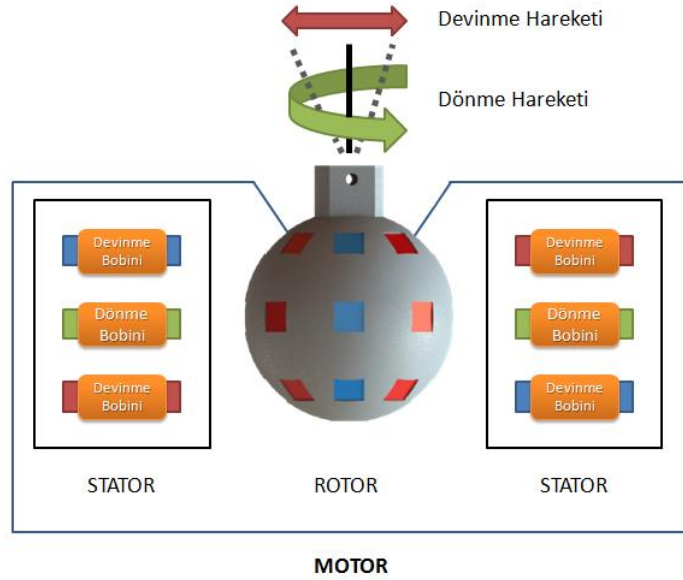
Torku bir nesneyi kendi eksenini etrafında döndürme momenti olarak tanımlayabiliriz. Motorda ise rotorun dönmesi için gerekli kuvvetlerden ortaya çıkan moment olarak tanımlanabilir. Devinme hareketi için kuvvet çiftlerinin oluşturduğu moment eşitlik (4.53) deki gibidir.

$$M_t = F_t l_t - (-F_t l_t) = 2F_t l_t \quad (4.53)$$

Rotorun dönme hareketi için ise eşitlik 4.11'deki ifadesi kullanılmıştır.

$$M_s = F_s l_s \quad (4.54)$$

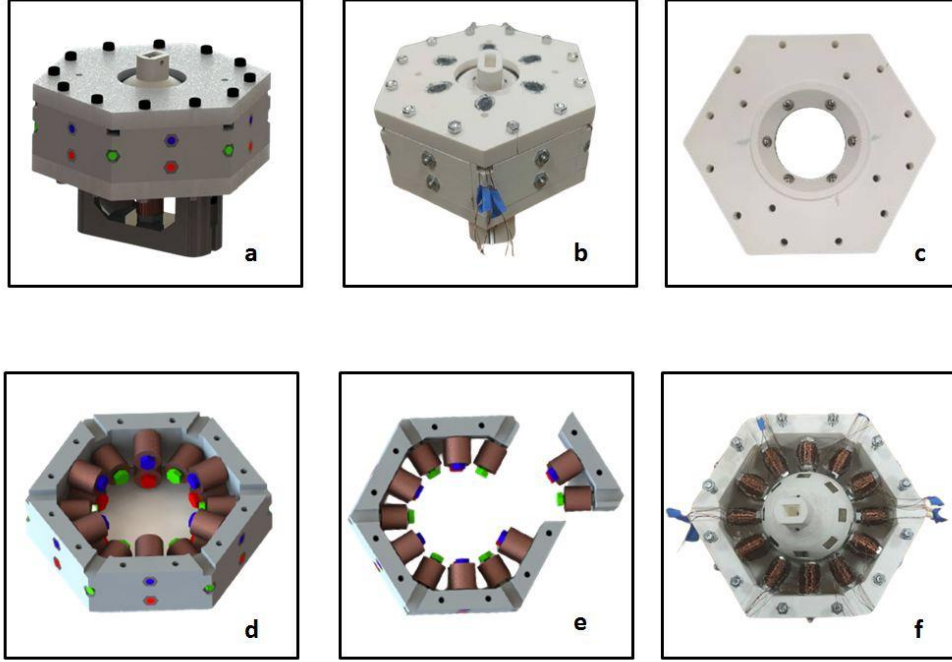
Dönme momentin büyüklüğü dönmeye neden olan kuvvet ve kuvvet kolu ile doğrudan ilişkilidir. Kuvvet kolu sabit olduğu için kuvvetteki artış ne kadar fazla olursa torkda o kadar büyük olur. Motorun karakteristik özelliği her bobinin tümleşik olarak tek bir bileşke hareket için karmaşık bir algoritma ile sürülmesi yerine devinme ve dönme hareketi olarak birbirinden ayrılmıştır (Şekil 4.13). Bu sayede kontrolü ve tasarımı kolaylaşmış hem de her bir hareket modeli için daha düşük enerji ile daha yüksek tork elde edilmiştir.



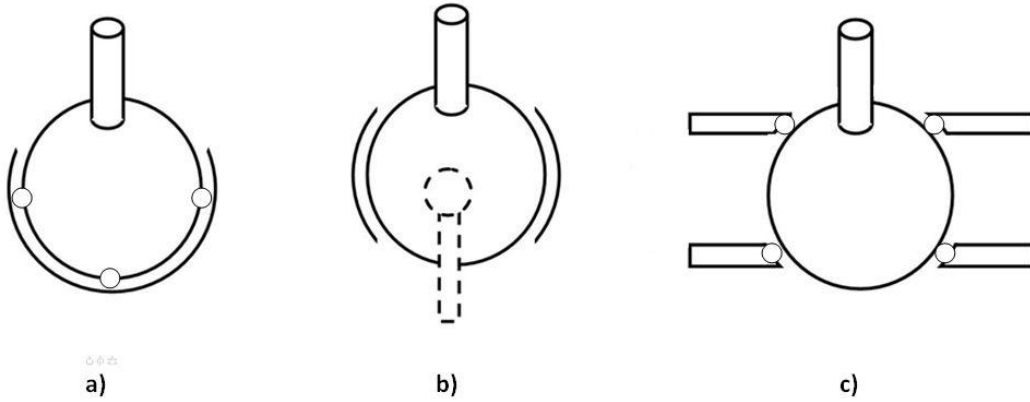
Şekil 4.13 Küresel motor bobin şeması.

Motorun her bir adımda ne kadar döneceği ; $2\pi/N.n_f$ formülü ile belirlenmektedir. Burada N pole çifti sayısı n_f faz sayısıdır. **ASMKM** tasarımsal olarak iç kısmında sabit mıknatıslı rotor ve onu çevreleyen bobinlerin bulunduğu statordan oluşmaktadır (Şekil 4.14-f). Küre şeklindeki Rotorun üzerine küp şeklinde 10 x 10 x 10 mm ölçülerinde neodymium mıknatıslar yerleştirilmiştir (Şekil 4.14). Rotorun üst kısmında ise bağlantı vazifesi gören shaft mevcuttur. Motorun tasarımında en büyük farklılık hem rotorun yataklamasını sağlayan hem de 6 adet modülden oluşan stator sistemini bir arada tutan 2 adet kapağın yer almasıdır (Şekil 4.13- c). Yataklama küresel motor için en büyük handikaplardan biridir. Yüzeyden yataklamalar statorun konumu, sürtünme ve temas yüzeyindeki boşluklardan dolayı rotorun hareketini ve motorun tasarımını kısıtlamaktadır (Şekil 4.13- a). Rotorun içinden merkez yataklamalar ise

hem ekstra ağırlık hem ekstra alan kaplamakta ayrıca manyetik alanı etkileyebilmektedir (Şekil 4.13- b).



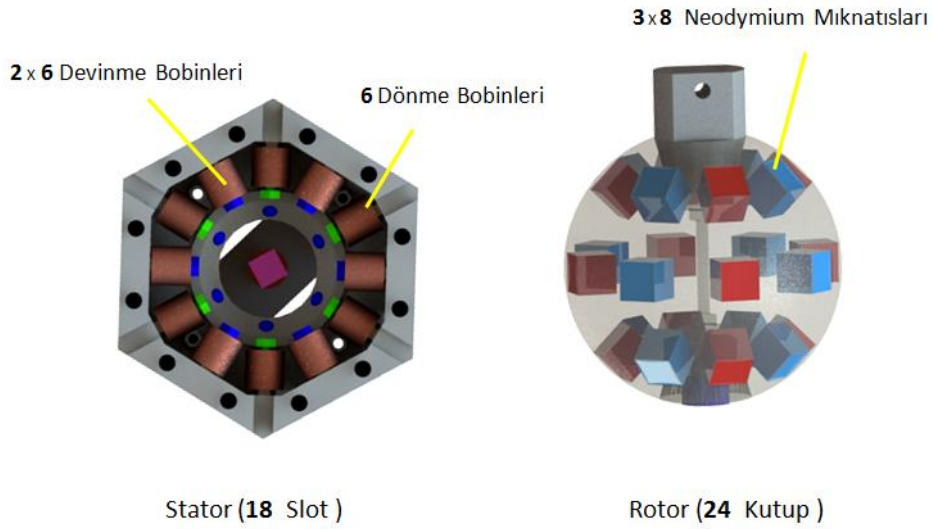
Şekil 4.14 Küresel motor a) 3D CAD modeli b) Prototip c) Kapak d) Sargı kombinasyonu e) Modüler statorlar f) Rotor ve Stator kombinasyonu.



Şekil 4.15 Küresel motor yataklama tipleri a) rotor yüzeyinden b) rotor merkezinden c) motor kapağından.

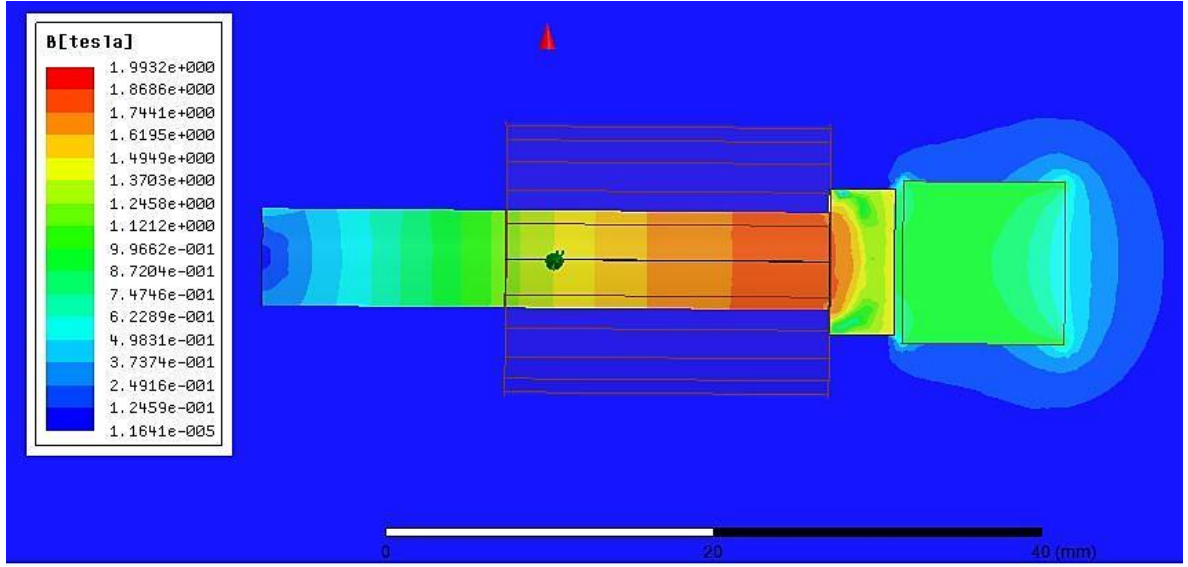
Kapaktan yataklama stator için geniş bir alan açarken manyetik alana etkisi çok kısıtlıdır. Aynı zamanda hem tasarımda büyük kolaylık sağlamakta hem de oldukça hafiftir. Kapak aynı zamanda rotorun üzerindeki bağlantı şaftıyla beraber mekanik sınır görevini de yerine getirmektedir. Bu sayede herhangi bir dikey mekanizma ,sistem boşta olsa bile belli bir açıyla

ayakta kalabilmektedir. Her bir stator modülü 2 devinme 1 dönme bobini olmak üzere 3 adet bobinden oluşmaktadır (Şekil 4.14-e). Modüler yapı sayesinde rotor ve bobinler çok kolay bir şekilde takılıp sökülmeaktadır. Ana Gövdenin kapak, stator modülleri, rotor gövdesi ve alt bağlantı köprüsü ABS malzemedan imal edilmiş yalnızca statorların demir çekirdekleri ve bağlantı elemanlarında metal malzeme kullanılmıştır. Ayrıca yataklamayı yapan alt ve üst kapak bilyalarında hem hafif olması hemde manyetik alanı etkilememesi için plastik malzeme kullanılmıştır (Şekil 4.14-c). Bu da tasarımın hafif olması açısından önemlidir. Bu şekilde önerilen robot kolunda kullanılması amaçlanmıştır.

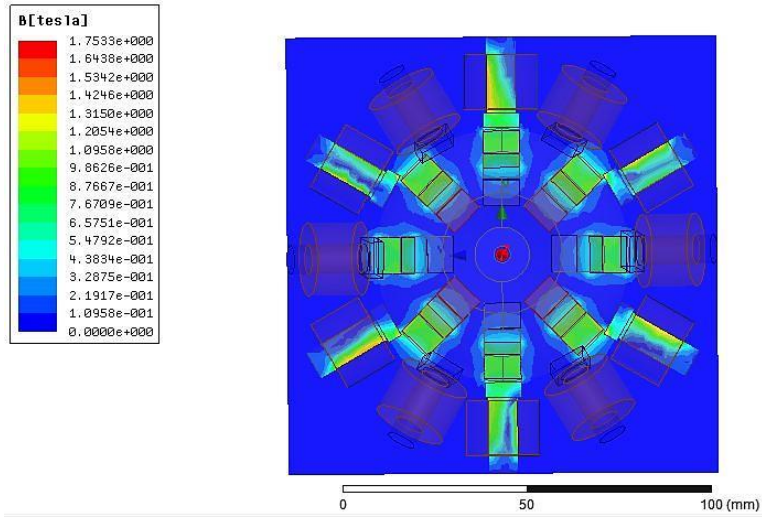


Şekil 4.16 Küresel motor kutup ve slotları.

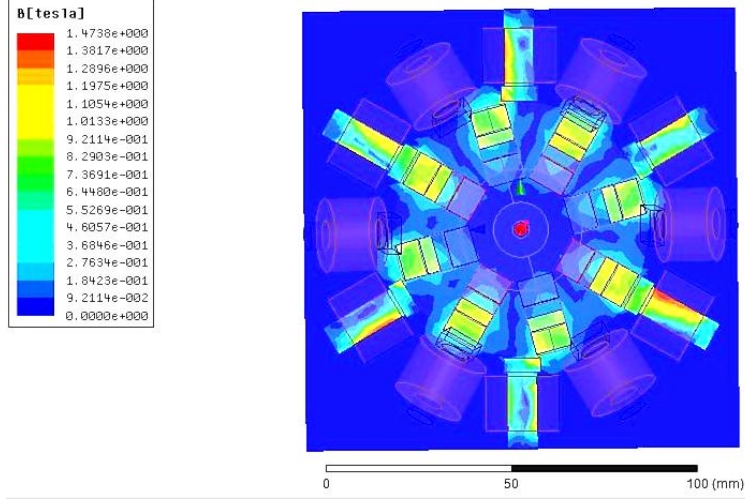
Statorlar 6 adet dönme 12 adet devinme olmak üzere toplam 18 adet bobinden oluşmaktadır (Şekil 4.16). Devinme bobinleri 2 katman halinde 6 sıradır. Bir yöne rotorun eğilmesi için bobinler karşılıklı itmekte veya çekmektedir (Şekil 4.13).



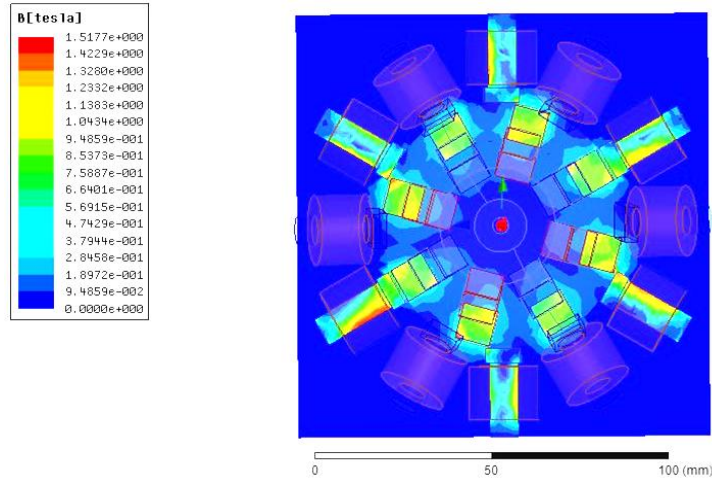
Şekil 4.17 Bir bobin mıknatıs çifti için manyetik akı dağılımı.



Şekil 4.18 Küresel motorun dönme hareketi esnasında 1. Faz da manyetik akı dağılımının Maxwell de görünümü.



Şekil 4.19 Küresel motorun dönme hareketi esnasında 2. faz da manyetik akı dağılımının Maxwell'de görünümü.

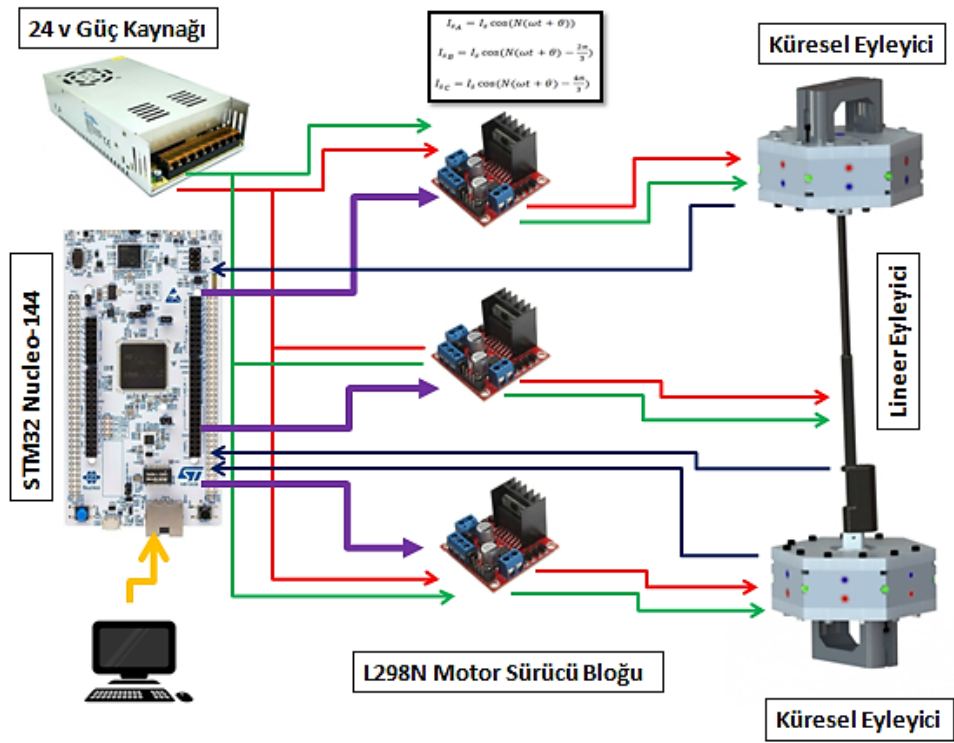


Şekil 4.20 Küresel motorun dönme hareketi esnasında 3. faz da manyetik akı dağılımının Maxwell'de görünümü.

Küresel motorun üzerindeki herhangi bir stator mıknatıs çifti Maxwell sonlu elemanlar programı ile incelendiğinde enerjilenen bobinin neden olduğu manyetik akı yoğunluğu Şekil 4.17 deki gibi görülmektedir. Kullanılan mıknatısların kalıcı manyetik akı yoğunluğu 1.0 T değerindedir. Stator ve mıknatısın yakın oldukları uç kısımlarda manyetik akı yoğunluğu değeri ortalama 1,3 T değerindedir. Ansys Maxwell elektromanyetik analiz parametrelerinin belirlenmesi ek-2 de ayrıntılı olarak verilmiştir.

4.3. Robot Kolunun Kontrolü

Analizleri ve hesaplamaları yapılarak prototipi üretilen robot kolunun kontrolü Şekil 4.14 deki gibi iki küresel ve bir doğrusal eyleyicinin hedef koordinatlarına göre STM32 Nucleo-144 bordu üzerinden L298N motor sürücülerinin tetiklemesi ile gerçekleştirilir. Küresel motorlar birçok şekilde kontrol edilebilir bu çalışmada 3 fazlı 8 statorlu senkron motorla aynı karakteristikte referans akım metodu ile gerçekleştirilmiştir (Park, Lee ve ark. 2013). Doğrusal motorda ise doğrusal enkoderden gelen geri beslemeye göre kapalı döngü kontrol mevcuttur. Konfigürasyonlarda hedef koordinatlara göre matlab üzerinden belirlenen eklem değişkenleri bilgisayar arayüzünden STM32 Nucleo-144 borduna tanımlanmıştır.

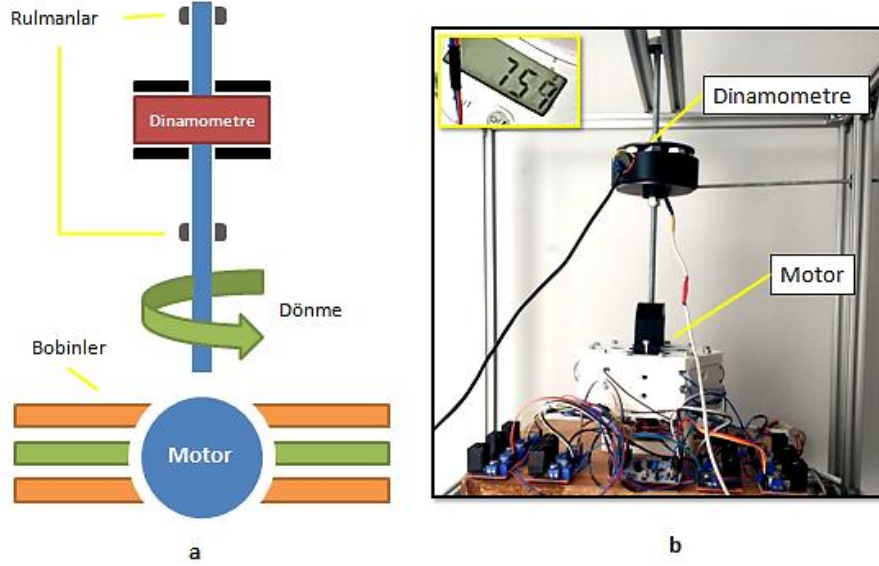


Şekil 4.25 Robot kolun kontrol şeması.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

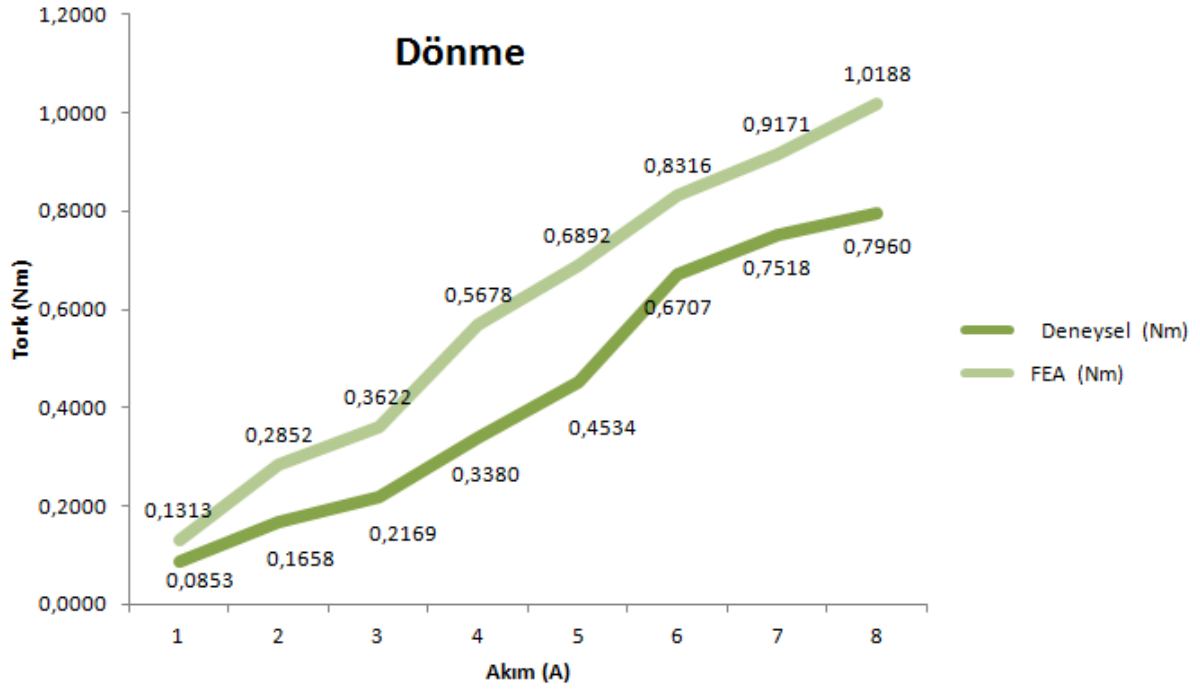
5.1. Küresel Motor Test Sonuçları

Bu çalışmada, yedi serbestlik dereceli robot kolunda kullanılacak çok serbestlik dereceli ayırık hareket edebilen küresel bir motor ortaya konmuştur. Prototipi imal edilen **ASMKM** hazırlanan test düzeneklerinde tork ve hız ölçümleri yapılarak robot kolunda kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Motorun deneysel ölçümleri üç farklı test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Motorun dönme hareketi esnasındaki torku dinamometre ile, devinme esnasında uyguladığı maksimum kuvvet de rotor maksimum devinme açısında iken uygulanan karşı kuvvet ile loadcell kullanılarak ölçülmüştür. Motorun dönme maksimum hızı devir testinde takometre ile ölçümü gerçekleştirilmiştir.

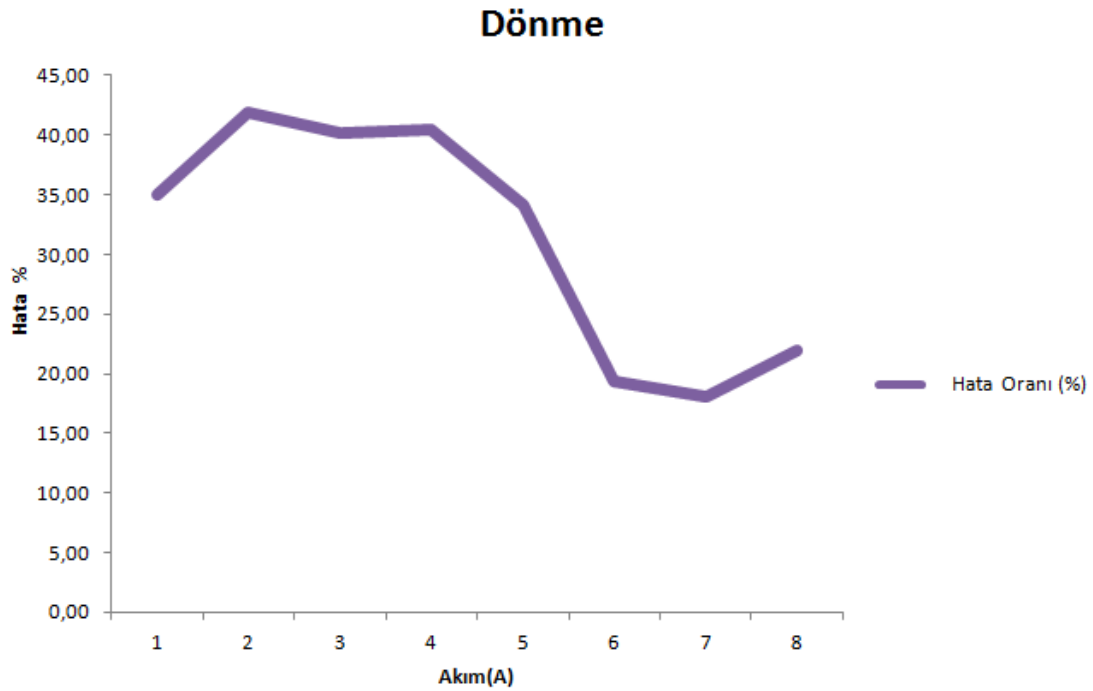


Şekil 5.1 Küresel motorun dönme torkü ölçümü a) Çalışma prensibi b) Test düzeneği.

Dönme torkünü ölçmek için dinamometre ve küresel motor Şekil 5.1 'deki gibi yataklanarak şaft ile birbirine bağlanmıştır. Dinamometrenin çalışma prensibi, küresel motor tarafından döndürülmek istenen bu şafta elektrik sargıları ile frenleme yaparak elde edilen frenleme kuvvetinin yük hücreleri ile ölçülmesi esasına dayanır. Motor kademeli olarak maksimum torka ulaşana kadar dönme bobinleri tetiklenerek beslenmesi yapılmıştır.



Şekil 5.2 Dönme Tork-Akım grafiği.

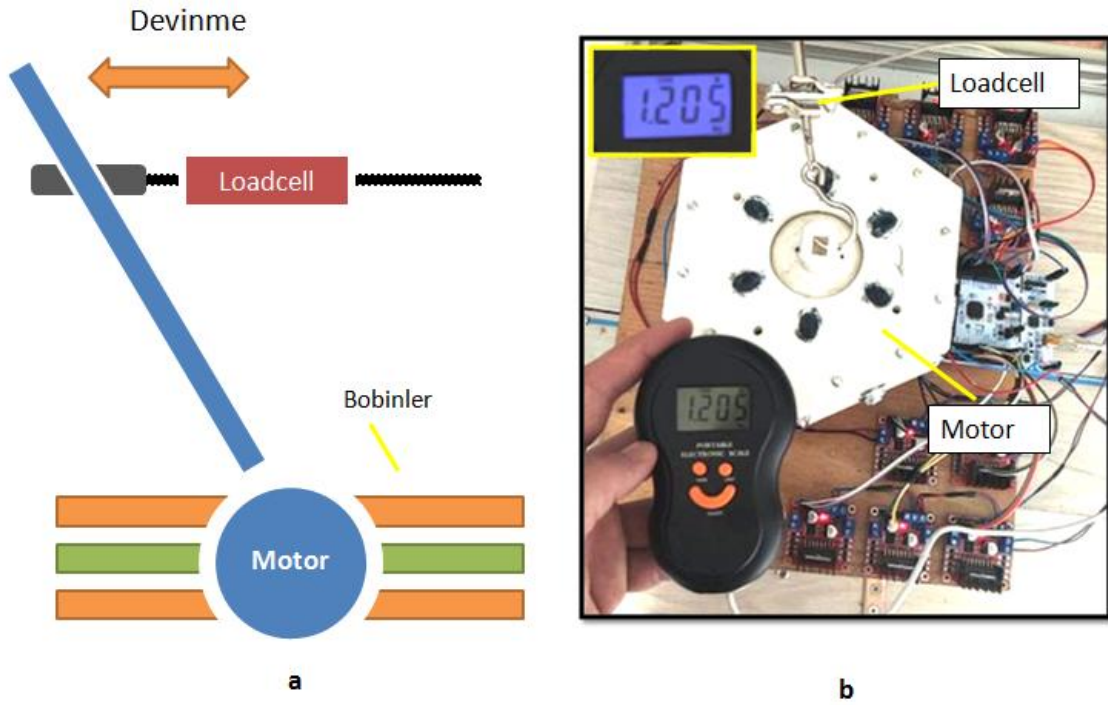


Şekil 5.3 Dönme hareketi hata oranı.

Rotor yalnız kendi eksenini etrafında dönerken ($\gamma_\alpha, \gamma_\beta = 0$) ölçülen maksimum dönme torkü, 7960 Nm'dir. Maksimum torka ulaşana kadar ortalama amper başına 0,091 Nm/A tork ve % 7,63'lük artış oranına ulaşmıştır. Elde edilen verilerden yola çıkılarak 8A tepe noktasında FEA ve deneysel çalışma arasındaki fark % 21,88 olarak gerçekleşmiştir (Tablo 5.1).

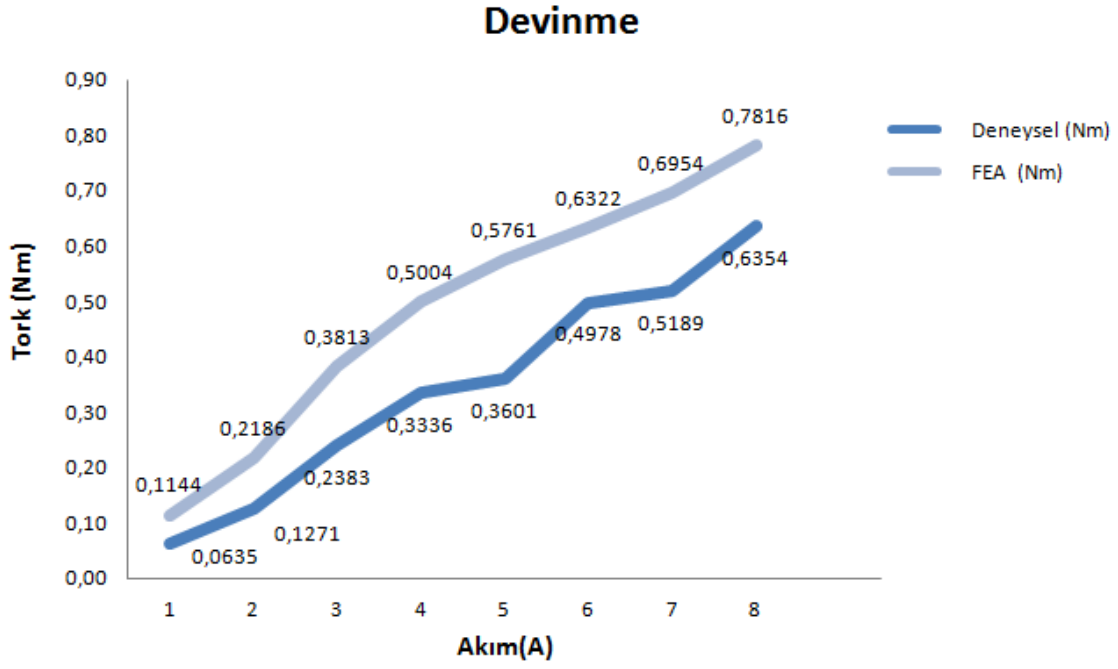
Akım (A)	Deneysel (Nm)	FEA (Nm)	Hata Oranı (%)
1	0,0853	0,1313	35,06
2	0,1658	0,2852	41,86
3	0,2169	0,3622	40,12
4	0,3380	0,5678	40,48
5	0,4534	0,6892	34,21
6	0,6707	0,8316	19,35
7	0,7518	0,9171	18,03
8	0,7960	1,0188	21,88

Tablo 5.1 Dönme torku ölçüm sonuçları.

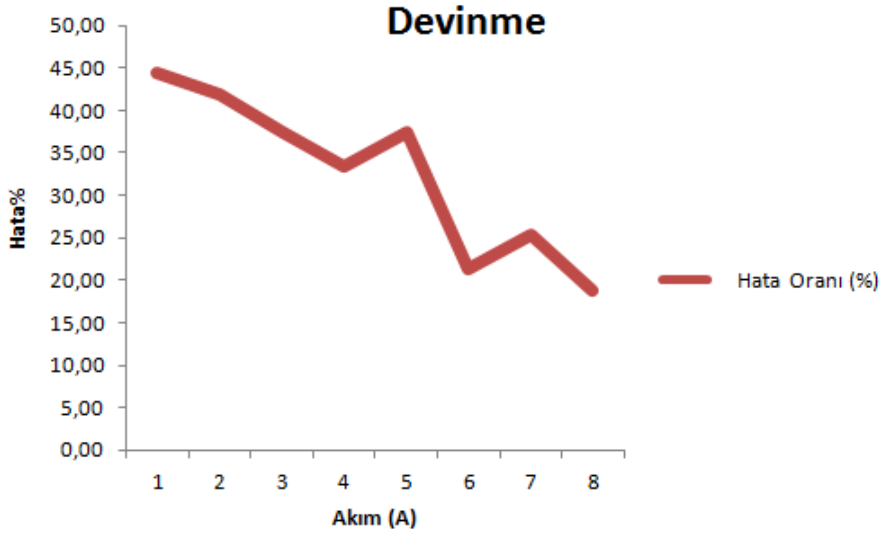


Şekil 5.4 Küresel motor devinme tork ölçümü a) Çalışma prensibi b) Test düzeneği.

Devinme torkunu ölçmek için bağlantı ayaklarından sabitlenen küresel motorun , rotor ucundaki bağlantı kaplinine loadcell bağlanmıştır (Şekil 5.4). $\gamma_\alpha = \pm 45^\circ$ $\gamma_\alpha = 0^\circ$ başlangıç konumlarında sabitlenen rotora karşı yük uygulanmıştır.



Şekil 5.5 Devinme Tork-Akım grafiği.



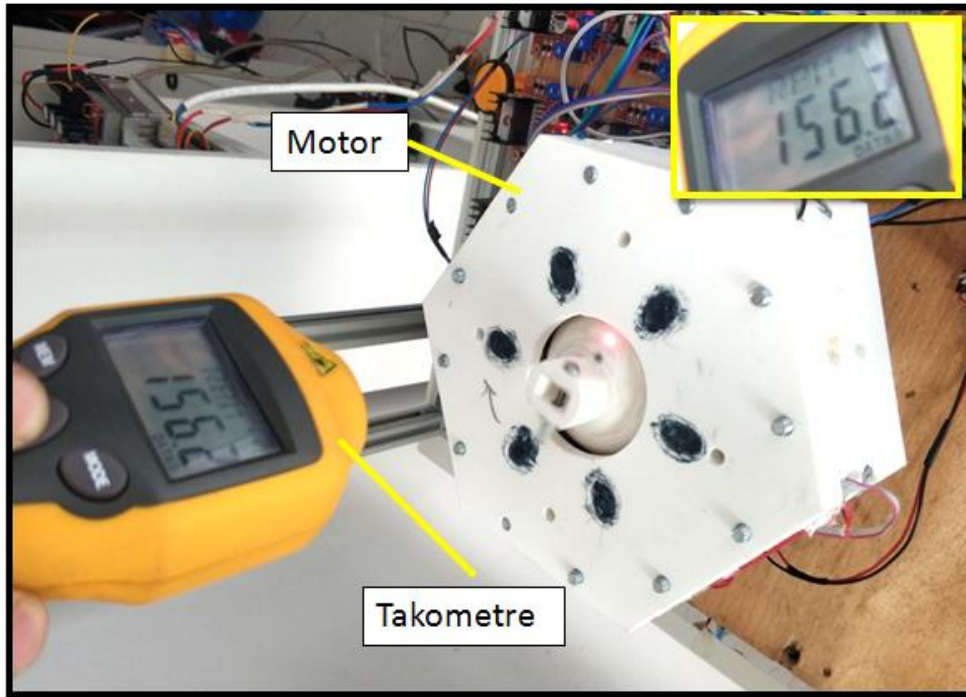
Şekil 5.6 Devinme hareketi hata oranı.

Ölçülen maksimum devinme torku 0,6354 Nm 'dir. Maksimum torca ulaşana kadar ortalama amper başına 0,0747 Nm/A tork ve % 17.7 lik artış oranına ulaşmıştır. Elde edilen verilerden yola çıkarak 8 amper peak noktasında FEA ve deneysel çalışma arasındaki fark % 18,70 olarak gerçekleşmiştir (Tablo 5.2).

Tablo 5.2 Devirme torku ölçüm sonuçları.

Akım (A)	Deneysel (Nm)	FEA (Nm)	Hata Oranı (%)
1	0,0635	0,1144	44,44
2	0,1271	0,2186	41,86
3	0,2383	0,3813	37,50
4	0,3336	0,5004	33,33
5	0,3601	0,5761	37,50
6	0,4978	0,6322	21,26
7	0,5189	0,6954	25,37
8	0,6354	0,7816	18,70

Dönme hareketinin devri , rotor üzerine reflektör bant uygulanarak Şekil 5.7 deki gibi lazer takometre yardımı ile ölçülmüştür. Dönme esnasında rotor şaftı merkezlenmiştir ($\gamma_\alpha, \gamma_\beta = 0$) . Test sonucunda ölçülen maksimum devir 156 rpm dir.



Şekil 5.7 Küresel motor devir testi.

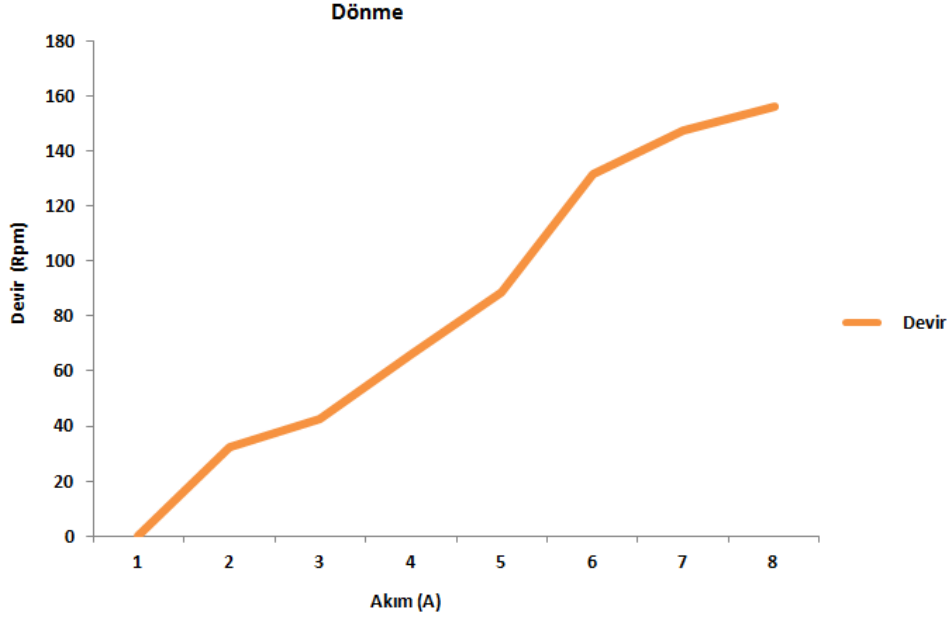
ASMKM 3 katmanlı 6 slotlu stator ve 8 kutuplu rotor yapısına sahiptir. Motorun çıplak boyutları 173 X 80 X 173 mm dir. 16 adet 10x10x10 mm neodmyium magnetten oluşan

rotorun çapı 60 mm'dir. Testlerden elde edilen performans verilerinin neticesinde Tablo 5.3 deki özellikleri belirlenmiştir.

Tablo 5.3 ASMKM özellikleri.

	<i>Değer</i>	<i>Birim</i>
Slot Sayısı	6	-
Kutup Sayısı	8	-
Rotor Çapı	60	mm
Motor Ağırlığı	1450	gr
Mıknatıs Ebatları	10x10x10	mm
Çalışma Voltajı	24	V
Çalışma Akımı	8,20	A
Hız	156	Rpm
Güç	197	Watt
Dönme Torku	0,7960	Nm
Devinme Torku	0,6354	Nm
Devinme Açısı	$\pm 45,63^\circ$	Derece
Dönme Açısı	360°	Derece

Deneysel çalışmadan elde edilen verilere göre, **ASMKM** 156 rpm maximum hızda 197 watta güç tüketmektedir. Harcadığı watt başına 0.004 Nm dönme torku , 0.003 Nm devinme torku üretmektedir. 1.450 kg ağırlığındaki motor kg başına 0,55 Nm dönme, 0,438 Nm devinme torku üretmektedir. Rotor $\pm 45^\circ$ maksimum devinme açısı ile hareket ederken 360° tam tur kendi etrafında dönebilmektedir.

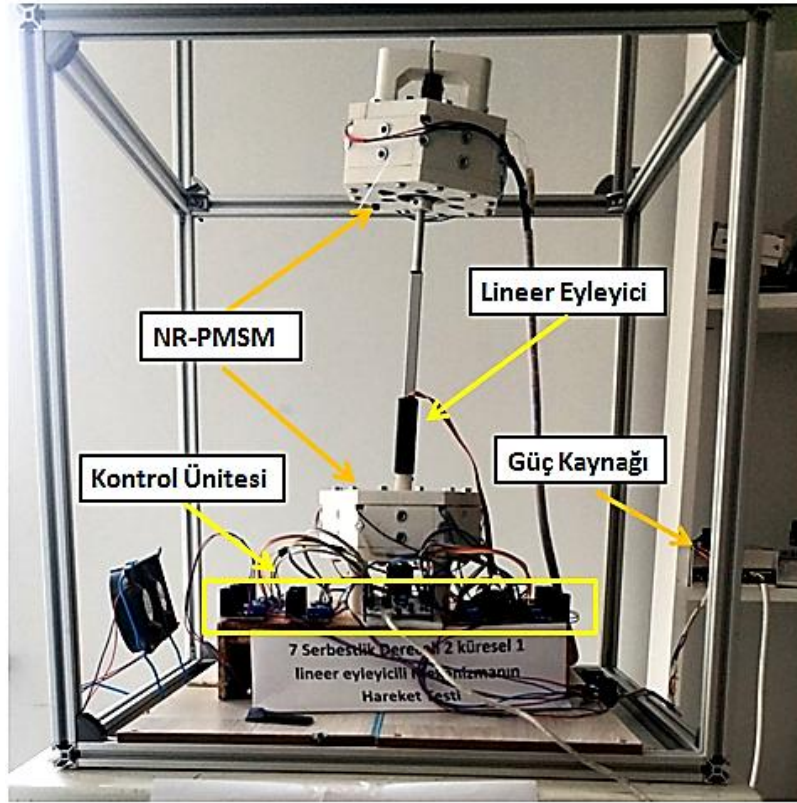


Şekil 5.8 Dönme Devir-Akım diagramı .

Prototipi imal edilen testleri gerçekleştiren **ASMKM** bilinen küresel motorlara göre daha modüler bir tasarım ve uygulama kolaylığı sunmaktadır. Devirme ve dönme hareketleri ayrılarak daha basit bir kontrol sağlanırken aynı zamanda demir çekirdek ile statorlar güçlendirilmiştir. Yataklama bilinen uygulamalara göre rotor merkezi ya da stator yatağından değilde rotorun maksimum eğilme açısını engellemeyecek şekilde motor kapaklarından yapılarak rotorun daha stabil dönmesi ve daha az sürtünmeye maruz kalması amaçlanmıştır. FEA ile elde edilen sonuçlar ile deneysel ölçümler birbiriyle örtüşmektedir.

5.2. Robot Kolu Test Sonuçları

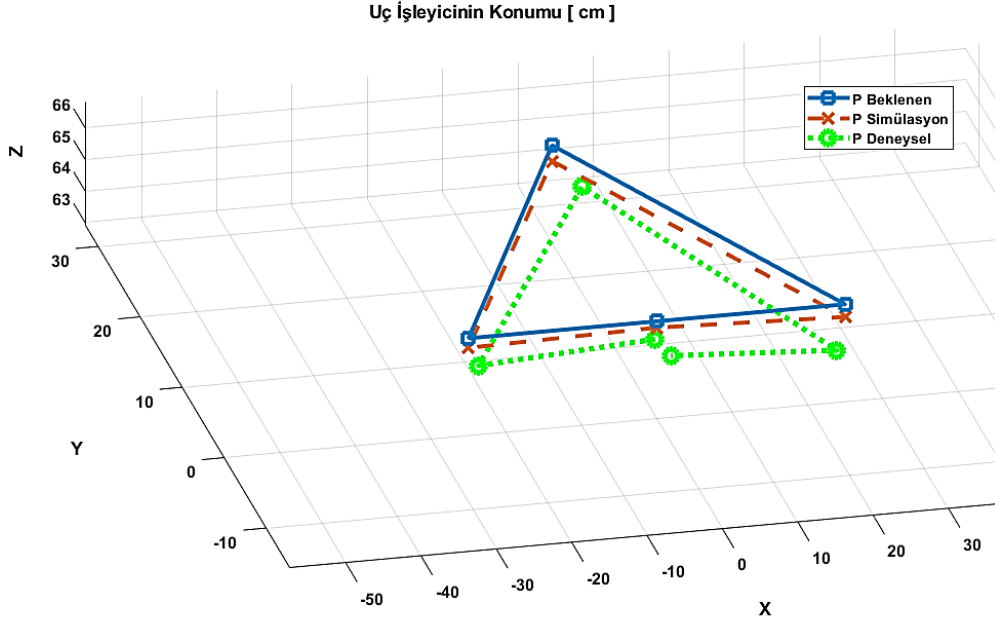
İki küresel ve bir prizmatik mafsaldan oluşan robot kolunun kinematik analizi gerçekleştirilerek prototipi imal edilmiştir. Doğrusal eyleyici olarak Actronix P16 kullanılırken küresel eyleyici olarak çalışmada önerilen **ASMKM** kullanılmıştır. Robot kolu 500 x 500 x 750 mm lik sigma profil kafesine yerleştirilmiştir. Motorun kontrol ünitesi STM32 nucleo 144 ve motor sürücüleri L298N ile bağlantıları yapılmıştır. Güç beslemesi olarak 24 v 30 A smtp tipi DC PS ile gerçekleştirilmiştir. Motorun uç işleyicisi üst küresel motorun tablasıdır. Uç işleyicinin konum ölçümleri (P_d) her deplasman sonunda elle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.9 Yedi serbestlik dereceli SPS robot kolu test düzeneği.

Tablo 5.4 Robot kolunun özellikleri.

	Değer	Birim
Serbestlik Derecesi	7	-
Ölçüleri (B x E x Y)		
Test Düzeneği	500 x 500 x 750	mm
Robot Kolu	250 x 250 x 650	mm
Toplam Ağırlık	3450	gr
Motor Yapısı		
Lineer Motor	1	Adet
Küresel Motor	2	Adet
Çalışma Voltajı	24	V
Çalışma Akımı	23,16	A
Güç	556	Watt



Şekil 5.10 Yedi serbestlik dereceli SPS robot kolu konum grafiği.

Elde edilen ölçümler sayısal hesaplamalarla karşılaştırılarak sistem doğrulaması yapılmıştır. Sayısal hesaplama yapılırken uç işleyicinin istenilen konumu için eklem değişkenlerine θ^i başlangıç değerleri verilerek % 2.46e-04 hata ile Tablo 5.6 daki değerler hesaplanmıştır. Sayısal yöntemlerde iterasyonun durumu başlangıç değerlerin kalitesiyle doğru orantılıdır. İlk iterasyonda % 6.8116 lık bir hata oranı varken 100. İterasyonda bu oran % 0.0396 'ya düşmüştür. 100 . iterasyon ile 200. İterasyon arasındaki fark çok azdır.

Tablo 5.6 NR Metodu ile bulunan eklem değişkenleri değerleri.

i	θ_1	θ_2	θ_3	d (cm)	θ_4	θ_5	θ_6	ϵ (%)
0	15°	15°	15°	20	15°	15°	15°	0
1	13.012°	15.447°	16.134°	20.016	16.220°	15.000°	14.530°	6.8116
100	-36.583°	12.456°	46.386°	21.152	5.695°	15.000°	-25.342°	0.0396
200	-36.795°	12.484°	46.484°	21.156	5.351°	15.000°	-25.571°	2.46e-04

İterasyon sonucu elde edilen değerler düz kinematik eşitliklerde eklem değişkenleri olarak uygulanmış ve uç işleyicinin istenilen konumu P_h (25,25,65) % 0.0008 hata ile tablo 5.5 deki gibi $P_{s_{200}}$ (24.9934, 25.0012, 64.9981) bulunmuştur. Robot kolunun deney düzeneğinde elle ölçülerek elde edilen değerler ise P_d (23.2 ,24.6,62.7) % 11,91 hata ile bulunmuştur.

Tablo 5.5 Yedi serbestlik dereceli SPS robot kolu test sonuçları.

i	$P_x(\text{cm})$	$P_y(\text{cm})$	$P_z(\text{cm})$	ϵ (%)
P_h	25	25	65	0
P_d	23.2	24.6	62.7	11,91
1	22.2328	4.9675	64.7082	22.599
100	24.9814	24.8834	64.9924	0.0021
200	24.9934	25.0012	64.9981	0.0008

5.3. Sonuçlar

Bu çalışmada iki küresel ve bir prizmatik mafsaldan oluşan SPS robot kolunun kinematik analizi , tasarımı ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. En az üç küresel mafsallı SPS mekanizmasının oluşturabileceği robot kolu iki küresel eyleyici kullanılarak tek SPS mekanizması ile sağlanmıştır. Bunun için SPS robot kolunda kullanılmak üzere çok serbestlik dereceli ayırık hareket edebilen sabit mıknatıslı küresel bir motor ortaya konmuştur. Prototipi imal edilen **ASMKM** bilinen küresel motorlara göre daha modüler bir tasarım ve uygulama kolaylığı sunmaktadır. Devirme ve dönme hareketleri ayrılarak daha basit bir kontrol sağlanırken aynı zamanda demir çekirdek ile statorlar güçlendirilmiştir. Yataklama bilinen uygulamalara göre rotor merkezi ya da stator yatağından değilde rotorun maksimum eğilme açısını engellemeyecek şekilde motor kapaklarından yapılarak rotorun daha stabil dönmesi ve daha az sürtünmeye maruz kalması amaçlanmıştır. Yedi serbestlik dereceli SPS robot kolunun İleri kinematik analizinde ise küresel eyleyici için Euler açı setinden yararlanılmış, DH Parametreleri belirlenerek Peter Corke's Robotics Toolbox ile homojen bileşke transformasyon matrisi Matlab'da elde edilmiştir. Elde edilen eşitliklerden pseudo inverse jacobian'i oluşturulmuştur. Mekanizmanın ters kinematiği, Newton–Ralphson yöntemi ile iteratif olarak Matlab'da çözümlenmiştir. Elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar kinematik analizin ve sistemin önermeye uygun olarak çalıştığını kanıtlamaktadır. Deneysel ölçümlerde elde ettiğimiz değerler ve kullanılan yöntemler sayısal çözüm kadar düşük hata oranı ile yakınsamasada sonuca etki eden parametre sayısı , sürtünme, tolerans yığılması,hasasiyet yerine düşük bütçeli teçhizat ve imalatın seçimi, ölçüm elemanları ve tekniğinden kaynaklanan hatalar gibi ister dışı kayıpların fazla olduğu mühendislik probleminin değerlendirilmesi için uygundur.

5.4. Öneriler

Altı ve üzeri serbestlik derecesine sahip mekanizmalarda kinematik analiz yapmak oldukça karmaşıktır. Hem ileri kinematik eşitlikleri elde etmek hem de elde edilen doğrusal olmayan konum eşitliklerinde eklem değişkenlerini analitik yöntemlerle hesaplamak çok zordur. Bu tür mühendislik problemlerinde yazılımlar yardımıyla sayısal hesaplamalar yaparak sonuca ulaşmak günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Farklı yazılım ve uygulamalar ile kinematik analiz yöntemlerinden bu ve benzeri çalışmalarda faydalanılabilir. Elektrik makinalarının en yaygın elemanlarından bir tanesi olan motor ile ilgili sayısız çalışmalar yapılmıştır. Küresel motora ilgi her geçen gün artmaktadır. Konvansiyonel elektrik motoru ile ilgili çalışmalardan literatür yer almayan uygulamalar küresel motor üzerinde denenebilir. İlerleyen çalışmalarda motor boyutunun küçültülerek farklı sargı yapıları ve mıknatis dizilimleri denenebilir.

6. KAYNAKLAR

Arians, G. and G. Henneberger (2000). Object oriented analysis and design of transient finite element solvers applied to coupled problems. 9th Conference on Electromagnetic Field Computation.

Bai, K. and K.-M. Lee (2013). "Direct field-feedback control of a ball-joint-like permanent-magnet spherical motor." IEEE/ASME Transactions on Mechatronics **19**(3): 975-986.

Bandyopadhyay, S. and A. Ghosal (2004). "Analysis of configuration space singularities of closed-loop mechanisms and parallel manipulators." Mechanism and Machine Theory **39**(5): 519-544.

Carretero, J., R. Podhorodeski, M. Nahon and C. M. Gosselin (2000). "Kinematic analysis and optimization of a new three degree-of-freedom spatial parallel manipulator." J. Mech. Des. **122**(1): 17-24.

Chace, M. A. (1963). "Vector analysis of linkages." : ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 85, 1963, pp. 289-297.

Chai, F., L. Gan, Y. Pei and L. Yuan (2019). Design and analysis of a novel multi-DOF PM spherical motor. 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE.

Chirikjian, G. S. and D. Stein (1999). "Kinematic design and commutation of a spherical stepper motor." IEEE/ASME Transactions on mechatronics **4**(4): 342-353.

Corke, P. (2007). "MATLAB toolboxes: robotics and vision for students and teachers." IEEE Robotics & automation magazine **14**(4): 16-17.

Dasgupta, B. and T. Mruthyunjaya (1998). "A Newton-Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator." *Mechanism and machine theory* **33**(8): 1135-1152.

Davey, K., G. Vachtsevanos and R. Powers (1987). "The analysis of fields and torques in spherical induction motors." *IEEE Transactions on Magnetics* **23**(1): 273-282.

Denavit, J., R. Hartenberg, B. Mooring, G. Tang, D. Whitney and C. Lozinski (1955). "54 KINEMATIC PARAMETER." *Journal of applied mechanics* **77**(2): 215-221.

Do, W. and D. Yang (1988). "Inverse dynamic analysis and simulation of a platform type of robot." *Journal of Robotic Systems* **5**(3): 209-227.

Duffy, J. and J. Rooney (1975). "A foundation for a unified theory of analysis of spatial mechanisms." *ASME J. Engng Ind*

Duran, M. A. and A. Ankarali (2010). "Üç serbestlik dereceli puma tipi bi manipulatörün pid kontrolü." *Journal of Selcuk-Technic* **9**(1): 20.

Ebihara, D., N. Katsuyama and M. Kajioka (2001). An approach to basic design of the PM-type spherical motor. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164), IEEE.

Fernandes, J. F., S. M. Vieira and P. C. Branco (2017). "Multiobjective optimization of a shell-like induction spherical motor for a power-assisted wheelchair." *IEEE Transactions on Energy Conversion* **33**(2): 660-669.

Fernández, F., N. Martínez and O. Fernández "Fundamentals of Machine Theory and Mechanisms." Springer, Mechanisms and Machine Science, Vol. 40

Foggia, A., E. Olivier, F. Chappuis and J. Sabonnadiere (1988). A new three degrees of freedom electromagnetic actuator. Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE.

Gan, L., Y. Pei and F. Chai (2019). "Tilting torque calculation of a novel tiered type permanent magnet spherical motor." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **67**(1): 421-431.

Geng, Z. and L. Haynes (1991). Neural network solution for the forward kinematics problem of a Stewart platform. Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE Computer Society.

Gofuku, A., R. Sasaki, T. Yano, Y. Wada and M. Shibata (2012). "Development of a spherical stepping motor rotating around six axes." *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* **39**(1-4): 905-911.

Goldenberg, A., B. Benhabib and R. Fenton (1985). "A complete generalized solution to the inverse kinematics of robots." *IEEE Journal on Robotics and Automation* **1**(1): 14-20.

Gosselin, C. and J. Angeles (1988). "The optimum kinematic design of a planar three-degree-of-freedom parallel manipulator." Ph.D. Thesis, Dept. of Mech. Eng., McGill University, Montr'eal, Qu'ebec, Canada, 1988.

Gough, V. E. (1962). "Universal tyre test machine." *Proc. FISITA 9th Int. Technical Congr.*, London, 1962: 117-137.

Ickes, B. (1970). "A new method for performing digital control system attitude computations using quaternions." *AIAA journal* **8**(1): 13-17.

Jinjun, G., D.-H. Kim and H. Son (2013). "Effects of magnetic pole design on orientation torque for a spherical motor." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **18**(4): 1420-1425.

Kaneko, K., I. Yamada and K. Itao (1989). "A spherical DC servo motor with three degrees of freedom."

Kasashima, N., K. Ashida, T. Yano, A. Gofuku and M. Shibata (2016). "Torque control method of an electromagnetic spherical motor using torque map." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **21**(4): 2050-2060.

Küçük, S. (2012). *Serial and Parallel Robot Manipulators: Kinematics, Dynamics, Control and Optimization*, BoD–Books on Demand.

Lebret, G., K. Liu and F. L. Lewis (1993). "Dynamic analysis and control of a Stewart platform manipulator." *Journal of Robotic systems* **10**(5): 629-655.

Lee, K.-M., K. Bai and J. Lim (2009). "Dipole models for forward/inverse torque computation of a spherical motor." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **14**(1): 46-54.

Lee, K.-M. and H. Son (2005). Torque model for design and control of a spherical wheel motor. *Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*.

Lee, K.-M., G. Vachtsevanos and C. Kwan (1988). "Development of a spherical stepper wrist motor." *Journal of Intelligent and Robotic Systems* **1**(3): 225-242.

Li, B., G.-D. Li and H.-F. Li (2011). "Magnetic field analysis of 3-DOF permanent magnetic spherical motor using magnetic equivalent circuit method." *IEEE Transactions on magnetics* **47**(8): 2127-2133.

Li, H., C. Xia, P. Song and T. Shi (2007). Magnetic field analysis of a Halbach array PM spherical motor. *2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics, IEEE*.

Mashimo, T., S. Toyama and H. Ishida (2009). "Design and implementation of spherical ultrasonic motor." *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* **56**(11): 2514-2521.

Nanua, P. and K. J. Waldron (1989). Direct kinematic solution of a Stewart platform. *1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE Computer Society*.

Nguyen, C. C., Z.-L. Zhou, S. S. Antrazi and C. Campbell (1991). Efficient computation of forward kinematics and Jacobian matrix of a Stewart platform-based manipulator. IEEE Proceedings of the SOUTHEASTCON'91, IEEE.

Okada, Y., K. Dejima and T. Ohishi (1995). "Analysis and comparison of PM synchronous motor and induction motor type magnetic bearings." IEEE Transactions on Industry Applications **31**(5): 1047-1053.

Öğülmüş , A. S., M. Tınkır and A. Özkan (2021). Kinematic analysis of a seven degree of freedom mechanism. 4. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi, Girne.

Pandilov, Z. and V. Dukovski (2014). "COMPARISON OF THE CHARACTERISTICS BETWEEN SERIAL AND PARALLEL ROBOTS." Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering **7**(1).

Park, H.-J., H.-J. Lee, S.-Y. Cho, H.-W. Ahn, K.-D. Lee, C.-Y. Park, S.-H. Won and J. Lee (2013). "A performance study on a permanent magnet spherical motor." IEEE transactions on magnetics **49**(5): 2307-2310.

Qian, Z., Q. Wang, L. Ju, A. Wang and J. Liu (2009). Torque modeling and control algorithm of a permanent magnetic spherical motor. 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, IEEE.

Rong, Y., Q. Wang, S. Lu, G. Li, Y. Lu and J. Xu (2019). "Improving attitude detection performance for spherical motors using a MEMS inertial measurement sensor." IET Electric Power Applications **13**(2): 198-205.

Schweitzer, G. and E. H. Maslen (2009). "Magnetic bearings. Theory, design, and application to rotating machinery."

Seyfarth, G., A. Bhatia, O. Sassnick, M. Shomin, M. Kumagai and R. Hollis (2016). Initial results for a ballbot driven with a spherical induction motor. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE.

Shah, S., S. K. Saha and J. K. Dutt (2009). Denavit-Hartenberg parameters of Euler-angle-joints for order (n) recursive forward dynamics. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference.

Son, H. and K.-M. Lee (2008). "Distributed multipole models for design and control of PM actuators and sensors." IEEE/Asme Transactions on Mechatronics **13**(2): 228-238.

Sosseh, R. A. and K.-M. Lee (2002). Finite element torque modeling for the design of a spherical motor. 7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2002. ICARCV 2002., IEEE.

St-Onge, B. M. and C. M. Gosselin (2000). "Singularity analysis and representation of the general Gough-Stewart platform." The International Journal of Robotics Research **19**(3): 271-288.

Stewart, D. (1965). "A platform with six degrees of freedom." Proceedings of the institution of mechanical engineers **180**(1): 371-386.

Su, Y. X., C. H. Zheng and B. Y. Duan (2002). Singularity analysis of a 6 DOF Stewart platform using genetic algorithm. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE.

Toyama, S. and S. Hatae (1993). Multi-degree of freedom spherical ultrasonic motor. RoManSy 9, Springer: 243-252.

Ueno, T., C. Saito, N. Imaizumi and T. Higuchi (2009). "Miniature spherical motor using iron-gallium alloy (Galfenol)." Sensors and Actuators A: Physical **154**(1): 92-96.

Uicker Jr, J. J., J. Denavit and R. Hartenberg (1964). "An iterative method for the displacement analysis of spatial mechanisms."

Wang, J., K. Mitchell, G. W. Jewell and D. Howe (2001). Multi-degree-of-freedom spherical permanent magnet motors. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164), IEEE.

Week, E., T. Reinartz, G. Henneberger and R. De Doncker (2000). "Design of a spherical motor with three degrees of freedom." *CIRP Annals* **49**(1): 289-294.

Williams, F., E. Laithwaite and J. Eastham (1959). "Development and design of spherical induction motors." *Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering* **106**(30): 471-484.

Xia, C., P. Song, H. Li, B. Li and T. Shi (2009). "Research on torque calculation method of permanent-magnet spherical motor based on the finite-element method." *IEEE Transactions on Magnetics* **45**(4): 2015-2022.

Yang, A. T. (1969). "Displacement analysis of spatial five-link mechanisms using (3×3) matrices with dual-number elements."

Yano, T. and T. Suzuki (2002). Basic characteristics of the small spherical stepping motor. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE*.

Yıldız , İ., E. Ö. Vasfi, E. Zeynep and G. Alper (2011). 6 Serbestlik Dereceli Paralel Mekanizmadaki İleri Kinematik Analiz Yöntemleri. İstanbul, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Yuan, M. and F. Freudenstein (1971). "Kinematic analysis of spatial mechanisms by means of screw coordinates. Part 1—Screw coordinates."

Zhang, S. and F. L. Luo (2008). "Direct control of radial displacement for bearingless permanent-magnet-type synchronous motors." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **56**(2): 542-552.

7. EKLER

Ek-1

Matlab Kodları

a- RVC Toolbox Ters Kinematik

```
clc
clear
% SPS Mechanism ** RVC Tools **
syms Q1 Q2 Q3 d4 Q4 Q5 Q6 d4
trotz(Q1)*troty(Q2)*trotx(Q3)*transl(0,0,d4)*trotz(Q4)*troty(Q5)*trotx(Q6)*transl(0,a4,0);
display(ans);
```

b- Jacobian Matrisin Çözümü

```
syms Q1_C Q2_C Q3_C d4_C Q4_C Q5_C Q6_C a ;
PX_d=8;
PY_d=8;
PZ_d=8;
Q1_C=(15*pi)/180;
Q2_C=(15*pi)/180 ;
Q3_C=(15*pi)/180 ;
d4_C=10 ;
Q4_C=(15*pi)/180 ;
Q5_C=(15*pi)/180 ;
Q6_C=(15*pi)/180;
a=6;
alpha=0.05;
for i=1:200

PX_C=d4_C*sin(Q2_C) - a*(cos(Q6_C)*(sin(Q6_C)*(cos(Q4_C)*sin(Q2_C) +
cos(Q2_C)*sin(Q3_C)*sin(Q4_C)) - cos(Q2_C)*cos(Q3_C)*cos(Q6_C)) - sin(Q6_C)*(sin(Q2_C)*sin(Q4_C) -
cos(Q2_C)*cos(Q4_C)*sin(Q3_C)));
PY_C=a*(sin(Q6_C)*(cos(Q4_C)*(cos(Q1_C)*cos(Q3_C) - sin(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) -
cos(Q2_C)*sin(Q1_C)*sin(Q4_C)) + cos(Q6_C)*(sin(Q6_C)*(sin(Q4_C)*(cos(Q1_C)*cos(Q3_C) -
sin(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) + cos(Q2_C)*cos(Q4_C)*sin(Q1_C)) + cos(Q6_C)*(cos(Q1_C)*sin(Q3_C) +
cos(Q3_C)*sin(Q1_C)*sin(Q2_C)))) - d4_C*cos(Q2_C)*sin(Q1_C);
PZ_C=a*(cos(Q6_C)*(cos(Q6_C)*(sin(Q1_C)*sin(Q3_C) - cos(Q1_C)*cos(Q3_C)*sin(Q2_C)) +
sin(Q6_C)*(sin(Q4_C)*(cos(Q3_C)*sin(Q1_C) + cos(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) -
cos(Q1_C)*cos(Q2_C)*cos(Q4_C)) + sin(Q6_C)*(cos(Q4_C)*(cos(Q3_C)*sin(Q1_C) +
cos(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) + cos(Q1_C)*cos(Q2_C)*sin(Q4_C))) + d4_C*cos(Q1_C)*cos(Q2_C);
Ja=[

0,
d4_C*cos(Q2_C) +
6*sin(Q6_C)*(cos(Q2_C)*sin(Q4_C) + cos(Q4_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) -
6*cos(Q6_C)*(sin(Q6_C)*(cos(Q2_C)*cos(Q4_C) - sin(Q2_C)*sin(Q3_C)*sin(Q4_C)) +
cos(Q3_C)*cos(Q6_C)*sin(Q2_C)),
- 6*cos(Q6_C)*(cos(Q2_C)*cos(Q6_C)*sin(Q3_C) + cos(Q2_C)*cos(Q3_C)*sin(Q4_C)*sin(Q6_C)) -
6*cos(Q2_C)*cos(Q3_C)*cos(Q4_C)*sin(Q6_C),
sin(Q2_C),
6*sin(Q6_C)*(cos(Q4_C)*sin(Q2_C) + cos(Q2_C)*sin(Q3_C)*sin(Q4_C)) +
6*cos(Q6_C)*sin(Q6_C)*(sin(Q2_C)*sin(Q4_C) - cos(Q2_C)*cos(Q4_C)*sin(Q3_C)), 0,
6*cos(Q6_C)*(sin(Q2_C)*sin(Q4_C) - cos(Q2_C)*cos(Q4_C)*sin(Q3_C)) -
```

```

6*cos(Q6_C)*(cos(Q6_C)*(cos(Q4_C)*sin(Q2_C) + cos(Q2_C)*sin(Q3_C)*sin(Q4_C)) +
cos(Q2_C)*cos(Q3_C)*sin(Q6_C)) + 6*sin(Q6_C)*(sin(Q6_C)*(cos(Q4_C)*sin(Q2_C) +
cos(Q2_C)*sin(Q3_C)*sin(Q4_C)) - cos(Q2_C)*cos(Q3_C)*cos(Q6_C));
- 6*cos(Q6_C)*(cos(Q6_C)*(sin(Q1_C)*sin(Q3_C) - cos(Q1_C)*cos(Q3_C)*sin(Q2_C)) +
sin(Q6_C)*(sin(Q4_C)*(cos(Q3_C)*sin(Q1_C) + cos(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) -
cos(Q1_C)*cos(Q2_C)*cos(Q4_C))) - 6*sin(Q6_C)*(cos(Q4_C)*(cos(Q3_C)*sin(Q1_C) +
cos(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) + cos(Q1_C)*cos(Q2_C)*sin(Q4_C)) - d4_C*cos(Q1_C)*cos(Q2_C),
6*sin(Q6_C)*(sin(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q4_C) - cos(Q2_C)*cos(Q4_C)*sin(Q1_C)*sin(Q3_C)) -
6*cos(Q6_C)*(sin(Q6_C)*(cos(Q4_C)*sin(Q1_C)*sin(Q2_C) + cos(Q2_C)*sin(Q1_C)*sin(Q3_C)*sin(Q4_C)) -
cos(Q2_C)*cos(Q3_C)*cos(Q6_C)*sin(Q1_C)) + d4_C*sin(Q1_C)*sin(Q2_C),
6*cos(Q6_C)*(cos(Q6_C)*(cos(Q1_C)*cos(Q3_C) - sin(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) -
sin(Q4_C)*sin(Q6_C)*(cos(Q1_C)*sin(Q3_C) + cos(Q3_C)*sin(Q1_C)*sin(Q2_C))) -
6*cos(Q4_C)*sin(Q6_C)*(cos(Q1_C)*sin(Q3_C) + cos(Q3_C)*sin(Q1_C)*sin(Q2_C)), -cos(Q2_C)*sin(Q1_C),
6*cos(Q6_C)*sin(Q6_C)*(cos(Q4_C)*(cos(Q1_C)*cos(Q3_C) - sin(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) -
cos(Q2_C)*sin(Q1_C)*sin(Q4_C)) - 6*sin(Q6_C)*(sin(Q4_C)*(cos(Q1_C)*cos(Q3_C) -
sin(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) + cos(Q2_C)*cos(Q4_C)*sin(Q1_C)), 0,
6*cos(Q6_C)*(cos(Q4_C)*(cos(Q1_C)*cos(Q3_C) - sin(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) -
cos(Q2_C)*sin(Q1_C)*sin(Q4_C)) - 6*sin(Q6_C)*(sin(Q4_C)*(cos(Q1_C)*cos(Q3_C) -
sin(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) + cos(Q2_C)*cos(Q4_C)*sin(Q1_C)) + cos(Q6_C)*(cos(Q1_C)*sin(Q3_C) +
cos(Q3_C)*sin(Q1_C)*sin(Q2_C))) - 6*cos(Q6_C)*(sin(Q6_C)*(cos(Q1_C)*sin(Q3_C) +
cos(Q3_C)*sin(Q1_C)*sin(Q2_C)) - cos(Q6_C)*(sin(Q4_C)*(cos(Q1_C)*cos(Q3_C) -
sin(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) + cos(Q2_C)*cos(Q4_C)*sin(Q1_C)));
6*sin(Q6_C)*(cos(Q4_C)*(cos(Q1_C)*cos(Q3_C) - sin(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) -
cos(Q2_C)*sin(Q1_C)*sin(Q4_C)) + 6*cos(Q6_C)*(sin(Q6_C)*(sin(Q4_C)*(cos(Q1_C)*cos(Q3_C) -
sin(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) + cos(Q2_C)*cos(Q4_C)*sin(Q1_C)) + cos(Q6_C)*(cos(Q1_C)*sin(Q3_C) +
cos(Q3_C)*sin(Q1_C)*sin(Q2_C))) - d4_C*cos(Q2_C)*sin(Q1_C),
6*cos(Q6_C)*(sin(Q6_C)*(cos(Q1_C)*cos(Q4_C)*sin(Q2_C) + cos(Q1_C)*cos(Q2_C)*sin(Q3_C)*sin(Q4_C)) -
cos(Q1_C)*cos(Q2_C)*cos(Q3_C)*cos(Q6_C)) - 6*sin(Q6_C)*(cos(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q4_C) -
cos(Q1_C)*cos(Q2_C)*cos(Q4_C)*sin(Q3_C)) - d4_C*cos(Q1_C)*sin(Q2_C),
6*cos(Q6_C)*(cos(Q6_C)*(cos(Q3_C)*sin(Q1_C) + cos(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) -
sin(Q4_C)*sin(Q6_C)*(sin(Q1_C)*sin(Q3_C) - cos(Q1_C)*cos(Q3_C)*sin(Q2_C))) -
6*cos(Q4_C)*sin(Q6_C)*(sin(Q1_C)*sin(Q3_C) - cos(Q1_C)*cos(Q3_C)*sin(Q2_C)), cos(Q1_C)*cos(Q2_C),
6*cos(Q6_C)*sin(Q6_C)*(cos(Q4_C)*(cos(Q3_C)*sin(Q1_C) + cos(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) +
cos(Q1_C)*cos(Q2_C)*sin(Q4_C)) - 6*sin(Q6_C)*(sin(Q4_C)*(cos(Q3_C)*sin(Q1_C) +
cos(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) + cos(Q1_C)*cos(Q2_C)*cos(Q4_C)), 0,
6*cos(Q6_C)*(cos(Q6_C)*(sin(Q4_C)*(cos(Q3_C)*sin(Q1_C) + cos(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) -
cos(Q1_C)*cos(Q2_C)*cos(Q4_C)) - sin(Q6_C)*(sin(Q1_C)*sin(Q3_C) - cos(Q1_C)*cos(Q3_C)*sin(Q2_C)))

```

```

- 6*sin(Q6_C)*(cos(Q6_C)*(sin(Q1_C)*sin(Q3_C) - cos(Q1_C)*cos(Q3_C)*sin(Q2_C)) +
sin(Q6_C)*(sin(Q4_C)*(cos(Q3_C)*sin(Q1_C) + cos(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) -
cos(Q1_C)*cos(Q2_C)*cos(Q4_C))) + 6*cos(Q6_C)*(cos(Q4_C)*(cos(Q3_C)*sin(Q1_C) +
cos(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) + cos(Q1_C)*cos(Q2_C)*sin(Q4_C));

```

```

error=[FX_d;PY_d;PZ_d]-[FX_C;PY_C;PZ_C];
J_Pseudo=pinv(Ja);
delta_teta=alpha*J_Pseudo*error;
Q1_C=Q1_C+delta_teta(1);
Q2_C=Q2_C+delta_teta(2);
Q3_C=Q3_C+delta_teta(3);
d4_C=d4_C+delta_teta(4);
Q4_C=Q4_C+delta_teta(5);
Q5_C=Q5_C+delta_teta(6);
Q6_C=Q6_C+delta_teta(7);

disp([Q1_C,Q2_C,Q3_C,d4_C,Q4_C,Q5_C,Q6_C])
disp(i)
disp(norm(error))
if(norm(error)<10^(-4))
    break
end
end

```

c- Kinematik Eşitliklerin Testi

```

syms Q1_C Q2_C Q3_C d4_C Q4_C Q5_C Q6_C a PX_C PY_C PZ_C;
Q1_C=-0.6385 ;
Q2_C=0.2174 ;
Q3_C=0.8096 ;
d4_C=10.5757 ;
Q4_C=0.0994;
Q5_C=0.2618;
Q6_C=-0.4423 ;

a=6;
PX_C=d4_C*sin(Q2_C) - a*(cos(Q6_C)*(sin(Q6_C)*(cos(Q4_C)*sin(Q2_C) +
cos(Q2_C)*sin(Q3_C)*sin(Q4_C)) - cos(Q2_C)*cos(Q3_C)*cos(Q6_C)) -
sin(Q6_C)*(sin(Q2_C)*sin(Q4_C) - cos(Q2_C)*cos(Q4_C)*sin(Q3_C)));
PY_C=a*(sin(Q6_C)*(cos(Q4_C)*(cos(Q1_C)*cos(Q3_C) -
sin(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) - cos(Q2_C)*sin(Q1_C)*sin(Q4_C)) +
cos(Q6_C)*(sin(Q6_C)*(sin(Q4_C)*(cos(Q1_C)*cos(Q3_C) -
sin(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) + cos(Q2_C)*cos(Q4_C)*sin(Q1_C)) +
cos(Q6_C)*(cos(Q1_C)*sin(Q3_C) + cos(Q3_C)*sin(Q1_C)*sin(Q2_C)))) -
d4_C*cos(Q2_C)*sin(Q1_C);
PZ_C=a*(cos(Q6_C)*(cos(Q6_C)*(sin(Q1_C)*sin(Q3_C) -
cos(Q1_C)*cos(Q3_C)*sin(Q2_C)) + sin(Q6_C)*(sin(Q4_C)*(cos(Q3_C)*sin(Q1_C) +
cos(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) - cos(Q1_C)*cos(Q2_C)*cos(Q4_C))) +
sin(Q6_C)*(cos(Q4_C)*(cos(Q3_C)*sin(Q1_C) + cos(Q1_C)*sin(Q2_C)*sin(Q3_C)) +
cos(Q1_C)*cos(Q2_C)*sin(Q4_C))) + d4_C*cos(Q1_C)*cos(Q2_C);

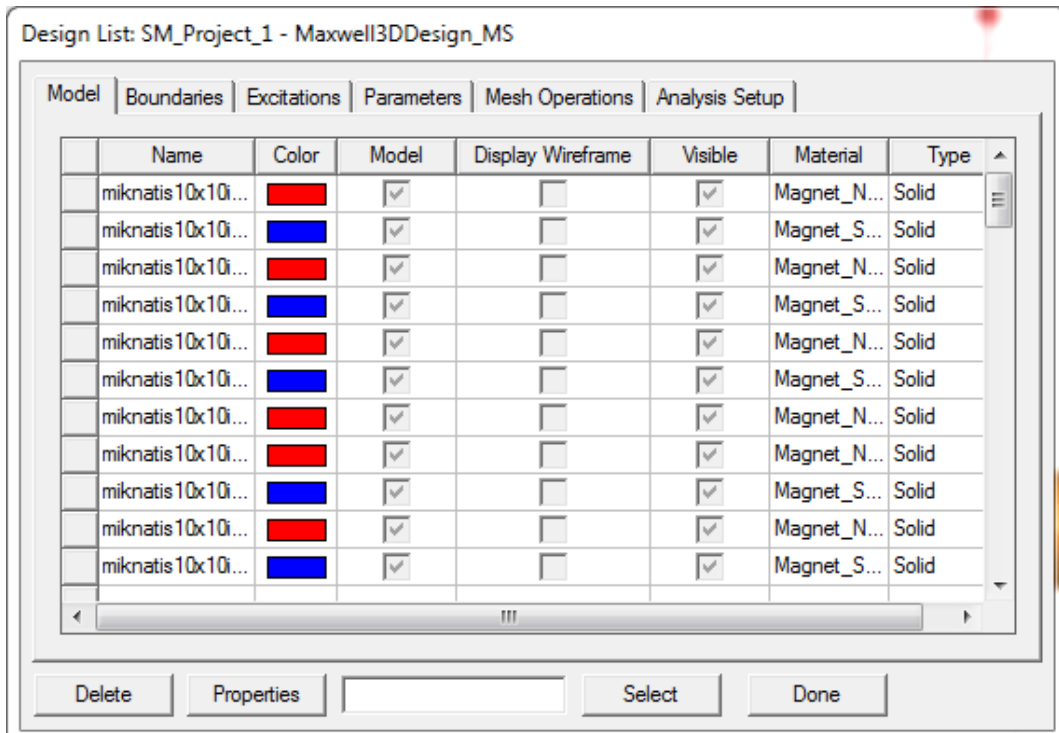
disp([PX_C,PY_C,PZ_C])

```

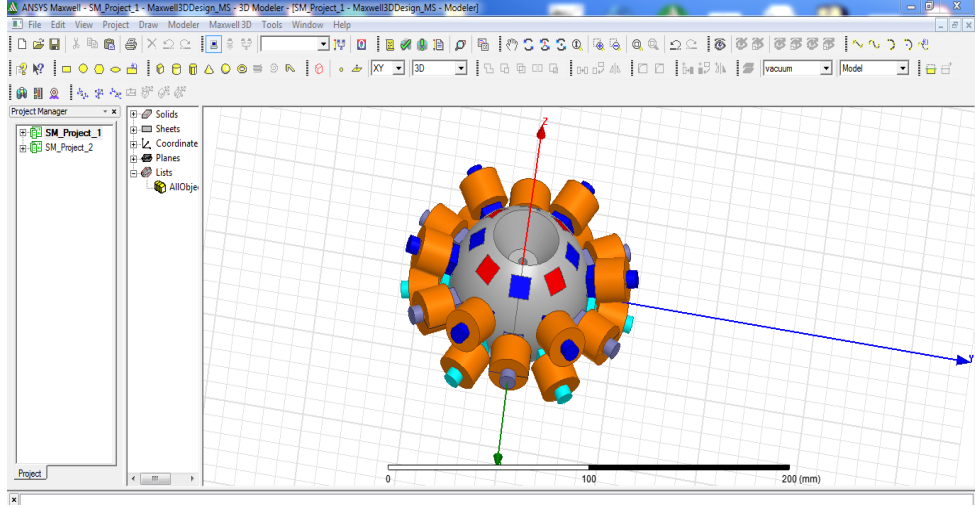
Ek-2

Ansys Maxwell İle Küresel Motorun Elektromanyetik Analizi

Küresel motorun elektromanyetik analiz sonucunda temel çıktımız torktur. Küresel motorun torkunu hesaplayabilmek için bölüm 4.2 de belirtilen manyetik akı dağılımının belirlenmesi elzemdir. Manyetik akı dağılımının belirlenmesi için ise temel girdilerimiz akım veya voltaj ve bunların türevleridir. Maxwell yazılımında herhangi bir küresel motorun elektromanyetik analizi yapılması için analiz koşullarının tamamlanması gerekmektedir. Bu koşullar Şekil 7.1 eki gibi motorun 2D veya 3D modeli, sınır şartlar , sistem uyarıcıları (Akım,Voltaj ve türevleri) , mesh yapısı , analiz ayarlarıdır.

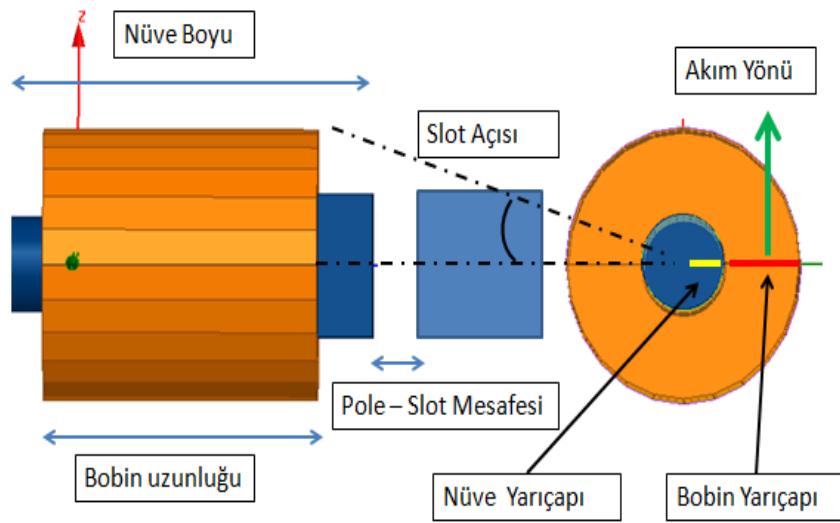


Şekil 7.1 Maxwell tasarım listesi



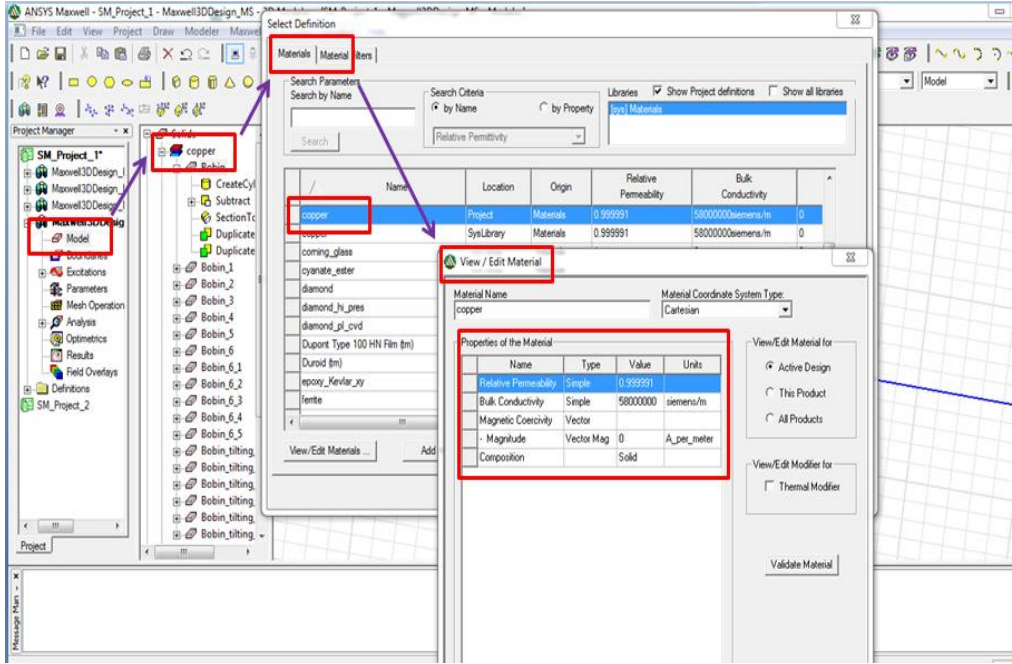
Şekil 7.2 Maxwell’de küresel motorun 3D modeli

Elektro manyetik analizleri gerçekleştirilecek olan motor modelinin tasarımı , kütüphanedeki hazır motor yapılarından çekilebileceği gibi kısmen yada tamamen 3 boyutlu CAD modeli import edilerekde düzenlenebilir. Ya da doğrudan maxwell in 2D veya 3D model oluşturma sekmesinden kendi katı modelleme sekmesinden basitleştirilmiş modeli elde edilebilir. Modelin bize sağladığı temel faydalardan biride nüveboyu, slot açısı, pole-slot arası mesafe bobin uzunluğu gibi parametrelerin model üzerinde mevcut olmasından dolayı analitik çözümde her durumda tek tek hesaplama yapmak yerine boyutsal olarak referans almaktadır.



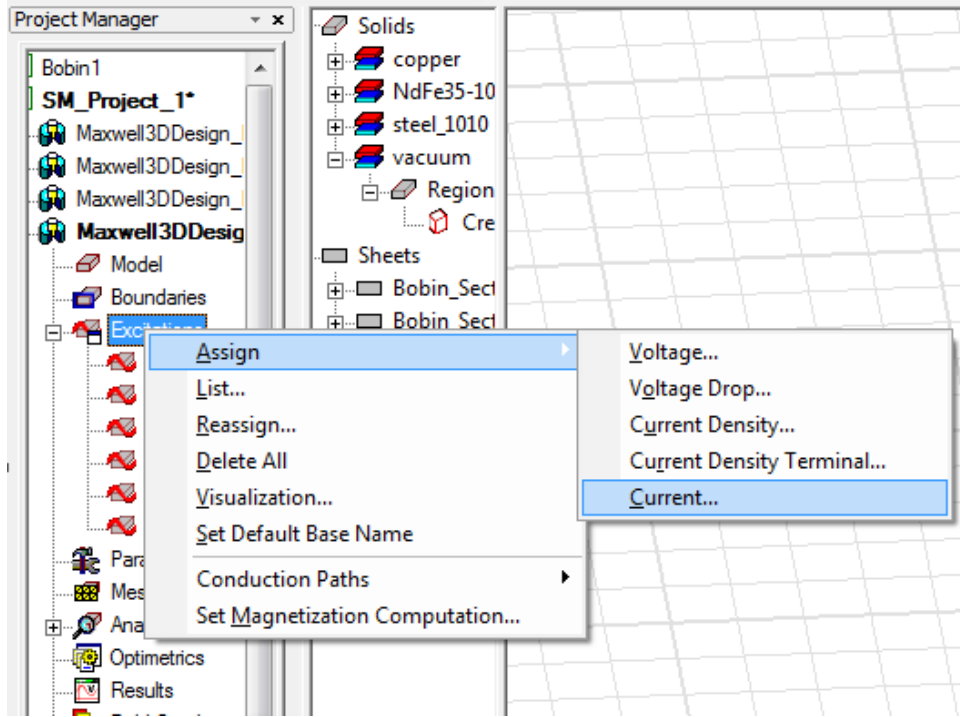
Şekil 7.3 Maxwell’de Pole-Slot tasarım parametreleri

Yapmış olduğumuz uygulamada şekil 7.2’deki gibi rotor ve mıknatıslar solidworkste tasarlanarak aktarılmış, stator bobinleri uygun bir biçimde maxwellin kendi 3D modelleme sekmesinde oluşturularak yerleştirilmiştir.



Şekil 7.4 Maxwell’de Malzeme seçimi

Elde edilen modelin düzgün bir şekilde manyetik akı dağılımının belirlenmesi için her bir elemanın kütüphaneden ya da elle tanımlanarak malzeme seçiminin yapılması gerekir. Şekil 7.4 teki gibi elektromanyetik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bir diğer husus ise sınır şartların belirlenmesi gerekmektedir. Sınır şartın kapsadığı bölgede manyetik akı yoğunluğu sıfır kabul edilmektedir. Eğerki modelde kaçak akılar ve çevresel etmenler fazla ise modelin boyutunun katları ebatında sınır şartlar belirlenebilir.



Şekil 7.5 Maxwell'de akımın oluşturulması

Elektromanyetik analizin uyarıcılarının yani voltaj akım ve türevlerinin bobin üzerinden tur sayısı ,akım büyüklüğü gibi girdiler belirlenmesi gerekmektedir. Yapmış olduğumuz çalışmada şekil 7.5 teki gibi 1 A den 8A kadar kademeli olarak artırım yapılarak manyetik akı dağılımı incelenmiştir. Bir diğer husus ise sonlu elemanlar yönteminin en önemli parametresi olan mesh yapısının belirlenmesidir. Maxwell model üzerinde çözüm ağlarının kendisi otomatik olarak belirlemektedir. Fakat bazı karmaşık tasarımlarda ve bölgelerde çözüm ağının yoğunlaştırılması ek düğümler oluşturulması gerekmektedir. Eğerki oluşturulan çözüm ağı yetersiz ise maxwell analiz işlemini gerçekleştirmez ve hata verir. Çözüm ağının sayısı ne kadar fazla ise analiz süresi ve donanım gereksinimleri o kadar artmaktadır. Elde ettiğimiz modelde yaklaşık olarak 200000 çözüm ağı kullanılmıştır.

Ek-3

Küresel motorun ölçüm sonuçları

Tablo 7.1 Devinin hareketi ölçümleri

Amper (A)	1. Test (Nm)	2. Test(Nm)	3. Test(Nm)	Ortalama(Nm)	Ortalama(Yuvarlanmış)(Nm)
1	0,06405	0,06304	0,06379	0,06354	0,06
2	0,12634	0,12659	0,12784	0,12709	0,13
3	0,23704	0,23779	0,24004	0,23829	0,24
4	0,33536	0,33235	0,33310	0,3336	0,33
5	0,36033	0,35933	0,36058	0,36008	0,36
6	0,49826	0,49801	0,49701	0,49776	0,50
7	0,51944	0,51819	0,51919	0,51894	0,52
8	0,63719	0,63494	0,63419	0,63544	0,64

Tablo 7.2 Dönme hareketi ölçümleri

Amper (A)	1. Test (Nm)	2. Test(Nm)	3. Test(Nm)	Ortalama(Nm)	Ortalama(Yuvarlanmış)(Nm)
1	0,08580	0,08480	0,08555	0,0853	0,09
2	0,16505	0,16530	0,16655	0,1658	0,17
3	0,21565	0,21640	0,21865	0,2169	0,22
4	0,33975	0,33675	0,33750	0,338	0,34
5	0,45365	0,45265	0,45390	0,4534	0,45
6	0,67120	0,67095	0,66995	0,6707	0,67
7	0,75230	0,75105	0,75205	0,7518	0,75
8	0,79775	0,79550	0,79475	0,796	0,80