

SABİT MIKNATISLI DEMİR NÜVELİ KÜRESEL EYLEYİCİNİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ 3 BOYUTLU STATİK MANYETİK ANALİZİ VE UYGULAMASI

Osman GÜRDAL ve Yusuf ÖNER*

Elektrik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Teknikokullar, 06500, Ankara

*Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli

ogurdal@gazi.edu.tr, yoner@pamukkale.edu.tr

(Geliş/Received: 23.07.2004; Kabul/Accepted: 20.09.2005)

ÖZET

Bu çalışmada, NdFeB sabit mıknatıs dilimlerinden yapılmış sabit mıknatıslı küresel rotor ve yumuşak demir ve basit sargı düzenlemesine sahip bir statordan oluşan küresel eyleyici tanımlanmaktadır. Küresel rotor düşük sürtünme katsayılı teflon yüzey kaplamalı bir stator içine yerleştirilmiştir. Stator üzerindeki üç ortogonal sargı (8 adet bağımsız enerjilendirilebilen sargı) halka akısının artırılması için bir dış küresel demir kabukla çevrelenmiştir. Stator demir nüvesi yokken, rotorun analitik olarak formülasyonu yapılmış manyetik alan dağılımı değerleri sonlu elemanlar analizi ve deneysel ölçümler ile doğrulanmış ve stator demir nüvesi varken rotorun ürettiği tork değerleri sonlu elemanlar metodu (Ansoft Maxwell 3D ile) ile tahmin edilerek deneysel olarak doğrulanmıştır. Tasarımı yapılan ve uygulanan sabit mıknatıslı demir nüveli küresel eyleyici açık çevrimli olarak 360° dönme hareketinin yanında $\mp 45^\circ$ aşağı-yukarı hareketi yapabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Küresel eyleyici, sabit mıknatıs, 3 boyutlu manyetik analiz.

COMPUTER AIDED THREE DIMENSIONAL MAGNETOSTATIC ANALYSIS AND APPLICATION OF IRON CORED PERMANENT MAGNET SPHERICAL ACTUATOR

ABSTRACT

In this study, a spherical actuator which has spherical permanent magnet rotor made of NdFeB slices and stator comprising mild steel and simple winding arrangement is described. The spherical rotor is housed within the spherical stator on a low friction constant teflon surface coating. Accommodated on the stator are three orthogonal windings (8 coils to be energized independently) enclosed by an outer spherical iron shell to increase the flux linkage. Without stator iron core, the values of magnetic field distribution formulated analytically are validated by finite element analysis and experimentally, and with stator iron core the torque values generated by rotor are validated by finite element method (by Ansoft Maxwell 3D) and experimentally. The permanent magnet rotor spherical actuator designed and applied is capable of $\mp 45^\circ$ pan-tilt movements in addition to 360° rotation in an open loop circuit.

Keywords: Spherical actuator, permanent magnet, 3D magnetic analysis.

1. GİRİŞ

Robotik, büro otomasyonu ve akıllı esnek üretim ve montaj sistemleri çok serbestlik dereceli küçük hassas eyleyicilerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Genelde çok serbestlik dereceli hareket her eksen için hemen hemen ayrı bir motor/eyleyicinin kullanılmasıyla gerçekleştirilir ki bu karmaşık geçiş sistemle-

ri ve oldukça ağır yapılarla sonuçlanmaktadır. Bundan dolayı dişlilerin ataleti, geri kayması, doğrusal olmayan sürtünme ve elastik deformasyonundan dolayı yüksek bir dinamik performansın elde edilmesi zor olmaktadır. Üç serbestlik derecede kontrollü hareket yeteneğine sahip eyleyiciler bu problemlerin üstesinden gelebilmektedir. Böyle eyleyiciler mevcut durumda araştırma konusu olma özelliklerini sürdürmekle

beraber, karmaşık yapıları ve elektromanyetik davranışlarının modellenmesi ve tasarımlarının optimize edilmesinde karşılaşılan zorluklardan dolayı ticari boyuta ulaşmakta zorlanmaktadır [1].

Yüksek performanslı hareket kontrol sistemleri için güç elektroniği bilimi ve dijital kontrol teknolojisi süregelen pazar talepleri sonucunda küresel eyleyici uygulamalarına daha fazla eğilimin olmasını sağlamıştır. Böylece çoğu küresel eyleyici tipleri ve topolojileri çok değişken işlevsel özellikli, bir eksen etrafında dönebilme veya doğrusal hareket yapabilme özelliklerine sahip olmuştur. Küresel eyleyiciler bir eksen etrafında dönebilen, doğrusal hareket yapabilen, hareketli sargısı, hareketli demir nüvesi veya hareketli daimi mıknatısı ile 3 boyutta sınırlı hareket yapabilen elektromekanik elemanlardır.

Günümüze kadar farklı yapılarda küresel eyleyiciler tasarlanmış ve performans analizleri yapılmıştır. Williams ve Laithwaite'in 1950'lerde değişken hızlı indüksiyon motorlar üzerine çalışması, indüksiyon motorun küresel geometri ile geliştirilmesine yol açmıştır [2]. Williams ve Laithwaite'in bu çalışması üzerine Vachtsevanos ve arkadaşları robot bileği için üç serbestlik dereceli küresel indüksiyon motor kavramını ortaya atmışlar [3] ve detaylı bir analizle indüksiyon motor torku ve faydalı akısı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir [4]. İncelenen indüksiyon tipi küresel motor üç boyutlu uzayda basit bir tork üretimine izin vermektedir. Foggia ve arkadaşları küresel indüksiyon tip motor üzerinde hareket karakteristik oranının 60° konik olması için çalışmışlardır [5]. Oldukça geniş hareket oranına rağmen deneysel sonuçlar bu motorun prototipinin önemli bir gürültüsü olduğunu ve 5 saniyeden daha fazla tepkime zamanına sahip olduğunu göstermiştir. Küresel indüksiyon motorun farklı tasarımları karmaşık mekanik ve sargı tasarımına sahip olmasına rağmen Lee ve arkadaşları küresel adım motor kavramını keşfederek küresel yüzey üzerine 20 adet kutup yerleştirmişlerdir. Lee'nin küresel step motor tasarım kavramı ile yüksek kararlılıkta hareketler, gerçekte daha az sayıda rotor ve stator kutuplarıyla başarılabilmektedir [6]. Wang ve arkadaşları çok basit manyetik rotor montajı ve sargı düzenlemesiyle iki ve üç serbestlik derecesinde hareket edebilecek basit bir küresel motor geliştirmişler [7] ve motoru PD kontrolörle kontrol etmişlerdir [8]. John Hopkins Üniversitesi'nden Chirikjan ve arkadaşları rotorun hareketleri için kavramsal bir potansiyel enerji fonksiyonu geliştirerek rotorun denge durumunu sağlayacak manyetik alana bir yaklaşımda bulunmuşlardır [9]. Alman araştırmacı Kahlen ve arkadaşları son zamanlarda Lee tarafından önerilen benzer bir küresel adım kavramını rapor etmişlerdir [10]. Kullanılan rotora yerleştirilen sabit mıknatıslar ve statora monte edilmiş, tek tek kontrol edilebilen 96 adet elektromıknatıs ile 40 Nm'lik bir tork üretimi başarılmıştır. Kore'de Yang ve arkadaşları Lee'nin önerdiği benzer bir küresel eyleyici için PD kontrolör

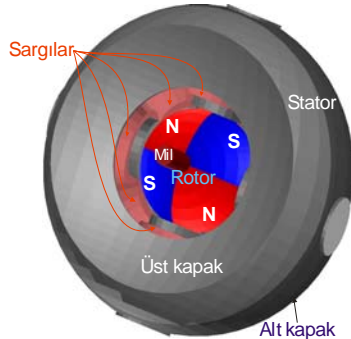
geliştirmişlerdir [11]. Hollis ve arkadaşları temel doğru akım prensiplerinde çeşitli serbestlik derecelerinde dönebilen çok hassas hareket tahrikli eyleyici geliştirmişlerdir [12]. Benzer bir DC küresel motor Kaneko ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [13]. Bu motor sürekli dönebilmekte ve maksimum eğilmesi de $\pm 15^\circ$ dir. Neto ve arkadaşları sabit stator yapısında üç dikey sargı ve uygun manyetizmada küresel rotor kullanarak üç serbestlik derecede pozisyon sağlayan DC küresel motoru geliştirmişlerdir [14]. Bederson tarafından, küresel yapıda olmamasına rağmen iki serbestlik derecede hareket yapabilen nokta motoru geliştirilmiştir [15]. Literatür taramasına göre Georgia Teknoloji Enstitüsü'nün çeşitli serbestlik derecelerinde küresel motorların geliştirilmesine katkıları çok fazladır. Lee ve arkadaşları değişken relüktanslı küresel motorun tork modeli ve dinamik modelini geliştirmişlerdir [16]. Tork modeli stator sargı setlerine uygulanan elektriksel giriş ile rotor arasındaki elektromanyetik etkileşim olarak tanımlanabilmektedir. Tork modeli parametreleri bütün olarak ele alındığında manyetik devre eşitlikleri geliştirilerek kullanılabilir. Kalıcılık modelinin motorun ürettiği tork için önceden bilinmesi önemli bir kuraldır. Kalıcılık modeli için ilk çalışma fikri Lee ve Kwan tarafından ortaya atılmış ve tahmini akı davranışlarında kullanmışlardır [17]. Roth tarafından deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Roth geliştirdiği bir deneysel metot ve algoritmalarla kalıcılık modelini açıklamıştır [18]. Lee, Kwan ve Pei tarafından önerilen bu teorik model bu sonuçlarla çok iyi anlaşılabilir [19]. Zhou rotor ve stator arasındaki sürtünme reaksiyonunu azaltmak için genişletilmiş tork modeli, altı serbestlik dereceli, serbest sürtünmeli, uygun strateji temelli ve manyetik kaldırma prensipli bir değişken relüktanslı küresel motoru tanımlamıştır. Zhou küresel motorun çıkış tork kabiliyetini maksimum tork formülasyonu ile karakterize etmiştir [20]. Kim sabit mıknatıslı küresel motor tarafından üretilen itme kuvveti modelini 2 boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanarak analizini araştırmıştır [21]. Ezenekwe stator sargılarının ferromanyetik nüveleri ve sabit mıknatıslı rotor arasındaki yüksek çekme kuvvetini ve elektromıknatıslar tarafından üretilen ısıdan dolayı muhtemel hava yatağı kullanımına araştırmalarıyla öncülük etmiştir [22]. He değişken relüktanslı küresel motorda alternatif rotor kutup düzenlemesinin motorun tork performansının üzerindeki etkilerini kapsamlı bir çalışmayla incelemiştir [23]. Wang ve arkadaşları hava nüveli, üç serbestlik dereceli küresel bir eyleyicinin analizini ve uygulamasını yaparak alan dağılımı, tork vektörleri ve zıt emf'leri analitik olarak çıkararak tasarım optimizasyonu, dinamik modelleme ve kapalı çevrim kontrol kuralı geliştirerek daha ileri araştırmalar için bir taban oluşturmuşlardır [24]. Mitchell ve arkadaşları iki serbestlik dereceli ve demir nüveli sabit mıknatıslı bir küresel eyleyicinin sonlu elemanlar metodu ve deneysel çalışması ile rotora bağlı milin bulunduğu statordaki açıklık kısmın etkilerini araştırmışlar; açıklık kısmın mevcudiyetinin bileşke tork üzerinde önemli tork bileşenleri oluştu-

arak dengersiz radyal bileşenlere neden olduğunu göstermişler ve öneriler sunmuşlardır [25]. En yakın tarihli bir çalışmada, Wang ve arkadaşları üç serbestlik derecede hareket edebilme yeteneğinde hava nüveli sabit mıknatıslı bir küresel eyleyicinin tasarımı ve kontrolü çalışmasında analitik manyetik alan dağılımına dayalı olarak tork vektörü ve zıt-emf'yi kapalı biçimde çıkartarak eyleyicinin kinematik ve dinamik modelini çıkartmışlardır [26]. Bu çalışmada üç serbestlik dereceli, demir nüveli sabit mıknatıslı bir küresel eyleyicinin tork üretebilme yeteneği yani anlık torkları Ansoft Maxwell 3D ile tahmin edilerek sonuçlar deneysel bir çalışmada doğrulanmaya çalışılmıştır.

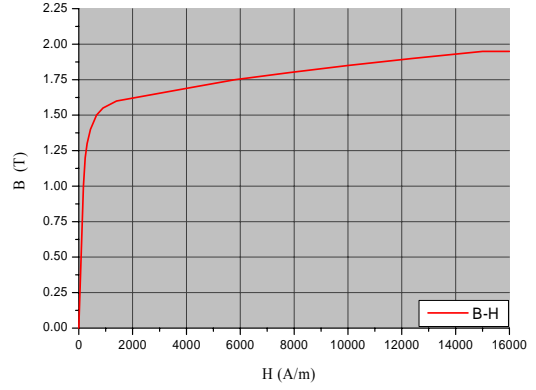
2. KÜRESEL EYLEYİCİNİN YAPISI

Küresel eyleyici teorisi, stator sargıları ve rotorun oluşturduğu manyetik kuvvetlerin bileşkesine göre küresel yapılı rotorun hareketi olarak tanımlanabilir. Bundan dolayı rotor ve stator sargılarının oluşturacakları kuvvetler küresel eyleyicinin çalışmasını etkilemektedir. Küresel eyleyicinin hareket serbestliğinin sağlanabilmesi ve enerji sarfiyatının az olması nedeniyle küresel rotor sabit mıknatıstan seçilmiştir. Böylece rotor hiçbir elektriksel bağlantı olmadan istenilen manyetik kuvveti sağlamış olacaktır. Stator sargılarına uygulanacak uygun bir akım ile oluşacak kuvvet rotorun oluşturacağı kuvvete karşı koyacak ve bu kuvvetlerin bileşkesi yönünde rotor hareket edecektir. Şekil 1'de sabit mıknatıslı küresel eyleyicinin yapısı şematik olarak gösterilmiştir.

Tasarlanan küresel eyleyici stator, rotor, yataklar, sargılar ve stator kapağı olmak üzere beş parçadan oluşmaktadır [27]. Stator olarak küresel yapıda ve eyleyicinin dış kabuğunu oluşturan kalıcı mıknatıslığı az yumuşak demir malzeme kullanılmıştır. Yumuşak demir malzemenin $B-H$ eğrisi Şekil 2'de gösterilmiştir. Statorun dış çapı 160 mm, iç çapı 140 mm, boyunduruk kalınlığı 10 mm ve stator kutupları küresel rotoru daha iyi kavrayabilecek şekilde 32 mm iç yarıçapta CNC tezgahında hassas bir şekilde işlenmiştir.



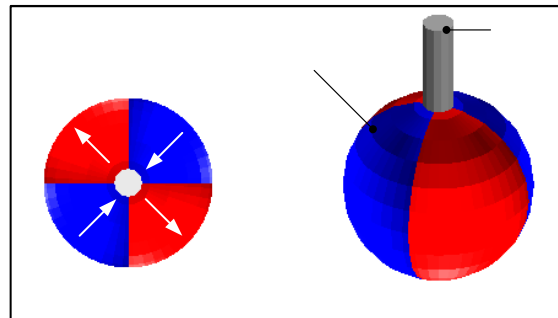
Şekil 1. Sabit mıknatıslı küresel eyleyicide küresel rotor, stator nüvesi ve sargıların şematik gösterimi. Sabit mıknatıslı rotor stator sargılarında akım yokken potansiyel enerjinin en az olduğu bu konumda (0° konumu) bulunur.



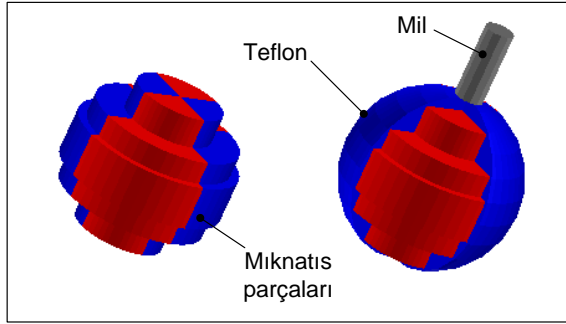
Şekil 2. Uygulamada kullanılan yumuşak demir malzemenin $B-H$ eğrisi

Küresel eyleyicinin en önemli parçalarından biri olan rotor, eyleyicinin istenilen 3 serbestlik dereceli hareketini yapabilecek şekilde manyetik alan yönleri dikkate alınarak dört kutuplu olarak seçilmiştir. İdeal küresel rotor dört çeyrek küre diliminden oluşmaktadır. İdeal küresel rotorun yapısı ve manyetik alan yönleri Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu tasarımın üç boyutlu manyetik analizleri yapılmış ve istenilen hareket yönlerinde tork oluşturduğu görülmüştür. Ancak tasarlanan yapıda bir küresel rotor mıknatıs imalatçıları tarafından temin edilemediğinden, rotor yüzeyinde aynı manyetik etkiyi oluşturabilecek farklı rotor tasarımları geliştirilmiştir. Bir, üç, beş parça silindirik sabit mıknatıs dört kutup oluşturacak şekilde küresel bir teflon yapının içerisine gömülmüş ve bu şekilde manyetik analizleri yapılmıştır. Yapılan manyetik analizler sonucunda beş parça silindirik sabit mıknatıstan oluşan rotor yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu ideal dilimli rotorun yüzey manyetik akı yoğunluğuna en yakın değerleri vermiştir. Bu nedenle uygulamada, beş parça silindirik sabit mıknatıstan oluşan küresel rotor kullanılmıştır.

Kutupların mıknatıslanma vektörü yarıçap doğrultusundadır. Silindirik sabit mıknatıslar küresel teflon içine gömülerek küresel yapı kazandırılmıştır. Mıknatısların üzerindeki teflonun kalınlığı 1 mm'dir. Şekil 4'de görüldüğü gibi statorun demir nüvesinin açıklık kısmına karşılık gelen rotorun üst kısmında mekanik



Şekil 3. Küresel motorun rotorunu oluşturan kutupların ideal manyetik alan yönleri ve rotora bağlanmış mil

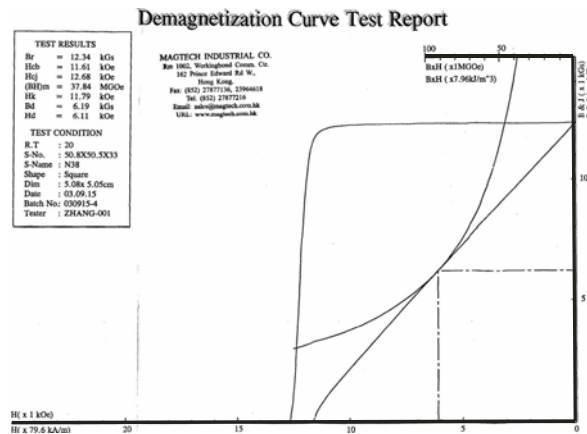


Şekil 4. Beş parçalı silindirik sabit mıknatıstan oluşan küresel rotor yapısı ve mekanik enerjinin alındığı mil

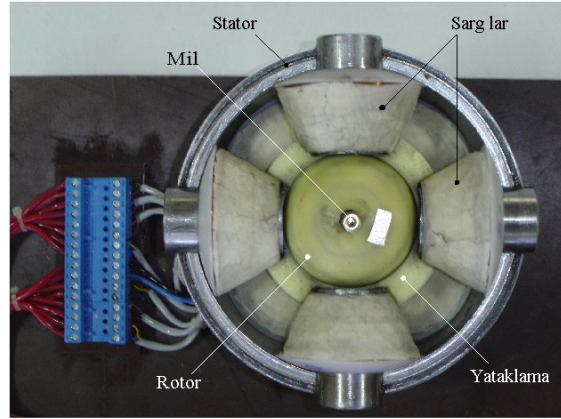
enerji alınabilecek bir mil çıkartılmıştır. Kullanılan sabit mıknatısın kalıcılık değeri $B_r=1,234$ T ve manyetik geçirgenliği $\mu_r=1,15$ dir [27]. Şekil 4’de beş parça silindirik sabit mıknatıstan tasarlanan küresel rotor yapısı ve Şekil 5’de ise rotor sabit mıknatısın $B-H$ eğrisi görülmektedir.

Küresel eyleyicinin yataklaması üzerinde önemle durulması gereken bir konudur. Eyleyici üç serbestlik derecede hareket yapacağı için henüz bu hareketi sağlayabilecek bir yatak tasarımı mevcut olmadığından çeşitli problemlerle karşılaşılabilir. Bu çalışmada yataklama sistemi olarak sürtünme katsayısı çok az olan teflon malzeme seçilmiştir. Rotorun boyutlarından 0,2 mm daha büyük bir teflon malzemeden iç küre işlenmiş ve rotor bu iç kürenin içine yerleştirilmiştir. Teflondan yapılan iç küre içerisine kayganlaştırıcı yağ konularak sürtünme azaltılmaya çalışılmıştır. Teflondan oluşan yataklama malzemesine sargıların ve stator kutuplarının gireceği yuvalar açılarak yatağın stator merkezinde sabitlenmesi sağlanmıştır.

Tasarlanan sabit mıknatıslı küresel eyleyicide birbirinden bağımsız sekiz adet sargı kullanılmıştır. Sargı yapıları küresel statora daha iyi yerleştirilebilmesi



Şekil 5. Üretici firmadan temin edilen sabit mıknatısın $B-H$ eğrisi. B_r değeri (1,234 T) kapalı çevrimli (manyetik nüveli) manyetik devre koşullarında ölçülen değerdir [28,29]. Bu değer mıknatısın yüzeyi üzerinde (manyetik nüvesiz) ~0,6 T olarak ölçülmüştür.



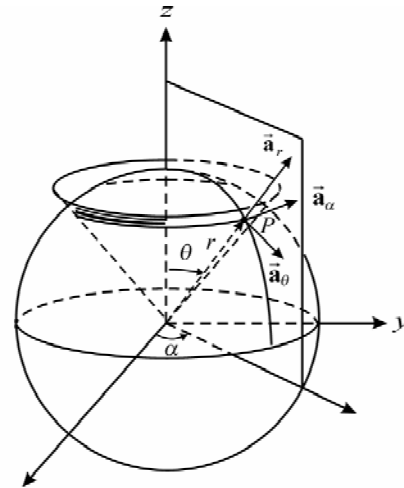
Şekil 6. Tasarımı yapılan sabit mıknatıslı küresel eyleyicinin stator üst kapağı kaldırılmış olarak parçalarının yerleşimi

amacıyla konik şekilde yapılarak stator yüzeyine tam bir dağılım sağlanmıştır. Sargılar 0,50 mm çapında bakır iletken 1000 sipir olarak sarılmıştır.

Yumuşak demirden yapılmış stator kapağında rotor milinin çıkartıldığı bir boşluk bulunmaktadır. Stator kapağındaki bu açıklık, rotorun $\pm 45^\circ$ lik hareket yapabilmesi için tasarlanmıştır. Kapaktaki açıklığın sınırlarının değiştirilmesi rotorda oluşan döndürme torkunda da değişim yapmaktadır [25]. Şekil 6’da sabit mıknatıslı küresel eyleyiciyi oluşturan parçalar gösterilmiştir.

3. KÜRESEL EYLEYİCİDE MANYETİK ALAN DAĞILIMI

Küresel eyleyicinin manyetik alan dağılımının hesaplanması eyleyicinin tasarım optimizasyonu ve küresel eyleyicinin doğru modelini kurmanın temelini oluşturur. Hava nüveli küresel eyleyicinin manyetik alan dağılımı küresel harmonikler içerdiğinden küresel koordinat sistemi kullanılarak analitik yolla hesaplanabilir. Şekil 7’de küresel koordinat sistemi görülmektedir.



Şekil 7. Küresel koordinat sistemi ve r , θ ve α değişkenleri

Manyetik alan iki alt bölgeye ayrılabilir; μ_0 manyetik geçirgenliğine sahip hava aralığı veya sargı bölgesi diğeri ise $\mu_0\mu_r$ manyetik geçirgenliğine sahip sabit miknatıs bölgesidir. Buna göre:

$$\mathbf{B} = \begin{cases} \mu_0 \cdot \mathbf{H} \\ \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H} + \mu_0 \cdot \mathbf{M} \end{cases} \quad (1)$$

Burada μ_r miknatısın bağıl geçirgenliği ve \mathbf{M} artık miknatıslanmadan kaynaklanan miknatıslanma vektörüdür. Doğrusal demanyetizasyon karakteristiğine sahip bir kalıcı miknatısta μ_r sabittir ve miknatıslanma vektörü, \mathbf{M} ve kalıcı miknatısıyet, B_r arasında $\mathbf{M} = B_r / \mu_0$ ilişkisi vardır.

Miknatıslanma vektörünün radyal bileşeni, M_r küresel harmonikler şeklinde açılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [26].

$$M_r = \sum_{l=2,4}^{\infty} \sum_{m=1,3}^l M_{lm} P_l^m(\cos\theta) \cdot \sin\alpha \quad (2)$$

Burada $P_l^m(\cdot)$ m . sıradan l . dereceden Legendre polinomuyla ilişkilidir ve M_{lm} aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$M_{lm} = \frac{4(2l+1)(l-m)!}{\pi m(l+m)!} M_c \int_0^l P_l^m(x) x dx \quad (3)$$

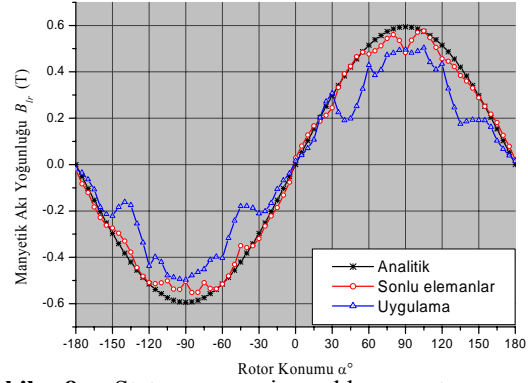
Burada $M_c = B_r / \mu_0 \sqrt{2}$ dir. Hava aralığı/sargı bölgesindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımının radyal bileşeni sınır şartları dikkate alınarak

$$B_r = \sum_{l=2,4}^{\infty} \sum_{m=1,3}^l C_{lm} (l+1) r^{-(l+2)} P_l^m(\cos\theta) \sin\alpha \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Burada;

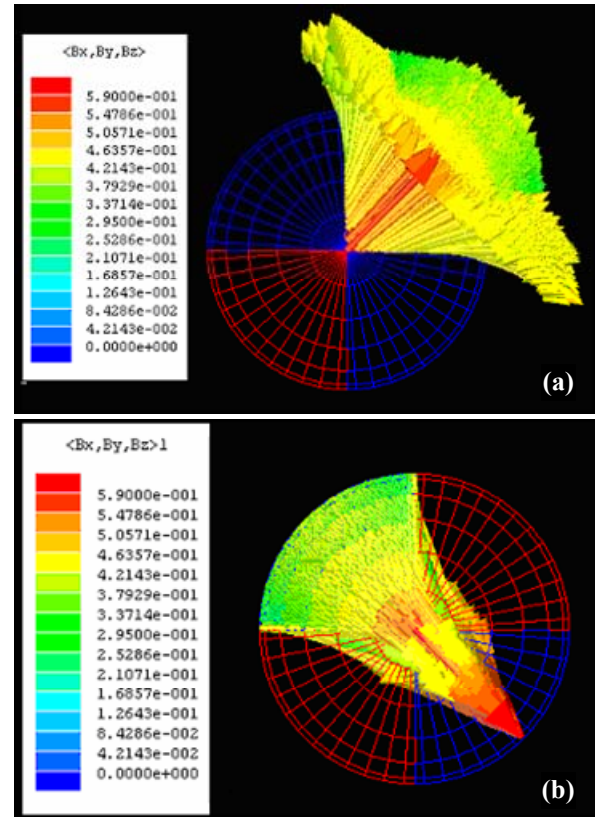
$C_{lm} = \mu_0 R_m^{l+2} M_{lm} / [(1+l)(1+\mu_r)]$ ve R_m küresel rotorun yarıçapıdır.

Şekil 8'de stator nüvesi yokken rotorun $R_m=0,030$ m, $r=0,031$ m ve $\theta=0^\circ$ pozisyonu için $\alpha=-\pi$ ile $\alpha=+\pi$ aralığında (4) eşitliğine göre hesaplanmış manyetik akı yoğunluğunun radyal bileşenlerinin analitik, sonlu elemanlar ve uygulama sonuçlarının bir karşılaştırılması verilmiştir. Analitik metotla hesaplanan (ideal) akı yoğunluğu ($r=0,031$ mm yarıçapındaki bir çember üzerindeki normal bileşenleri, B_n) ile sonlu elemanlar metoduyla tahmin edilen akı yoğunluğu arasındaki fark Ansoft Maxwell 3D yazılımının istenilen bir çizgi üzerindeki akı yoğunluklarının normal (B_n) ve teğet (B_t) bileşenlerinin bileşkesini $|B|$ vermesinden kaynaklanmaktadır. Yazılımın bir kısıtlaması olarak, bunun ayrılması mümkün olsaydı analitik ve sonlu elemanlar metodu ile bulunan değerler birbirine daha

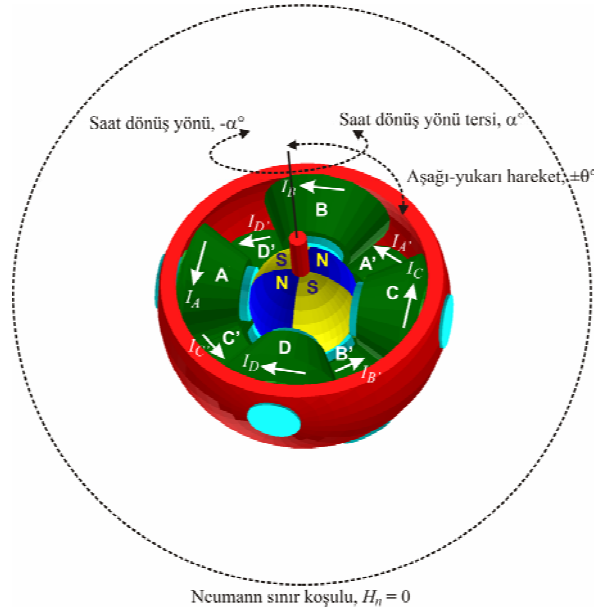


Şekil 8. Stator nüvesi yokken rotorun (xy düzleminde) $\theta=0^\circ$ pozisyonunda $\alpha=-\pi$ ile $\alpha=+\pi$ aralığı (rotorun çevresi) için manyetik akı yoğunluğunun radyal bileşenlerinin analitik, sonlu elemanlar ve uygulama sonuçlarının karşılaştırılması

yakın çıkabilirdi. Ölçme sonucu alınan akı yoğunluğu değerlerinin analitik ve sonlu elemanlar değerlerinden uzaklaşmasının nedeni, rotorun oluşturulmasında kullanılan miknatıs dilimlerinin ideal dilimlerden farklı olmasından kaynaklanmaktadır. İdeal çeyrek küresel dilimlerin kullanılmasıyla bu sorunun üstesinden gelinir. Şekil 9a ve b'de küresel miknatısın xy düzlemindeki \mathbf{B} manyetik akı yoğunlukları vektöriyel olarak gösterilmiştir.



Şekil 9. Stator nüvesi yokken ideal küresel rotorun (a) N ve (b) S kutuplarındaki \mathbf{B} manyetik akı yoğunluğunun vektöriyel gösterimi. Akı yoğunlukları kırmızı renkte en yoğun ve mavi renkte en az yoğunur.

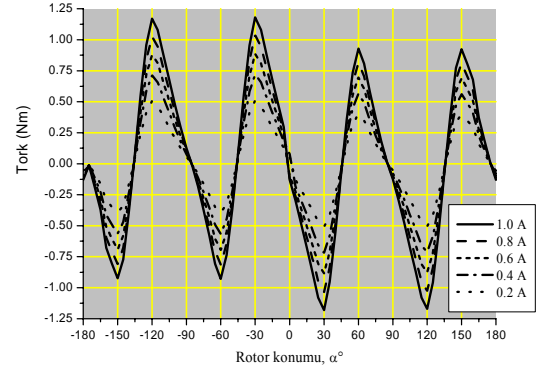


	Stator sargı akımları (Amper-sarım)	Rotor konumu	Stator sargı akımları (Amper-sarım)	Rotor yeni konumu
1	$I_A = 0,$ $I_{A'} = 0$	$\theta = 0^\circ,$ $\alpha = 0^\circ$	$I_A = 1000,$ $I_{A'} = 1000$	$\theta = 0^\circ,$ $\alpha = 45^\circ$
2	$I_B = 0,$ $I_{B'} = 0$	$\theta = 0^\circ,$ $\alpha = 45^\circ$	$I_B = 1000,$ $I_{B'} = 1000$	$\theta = 0^\circ,$ $\alpha = 90^\circ$
3	$I_C = 0,$ $I_{C'} = 0$	$\theta = 0^\circ,$ $\alpha = 90^\circ$	$I_C = 1000,$ $I_{C'} = 1000$	$\theta = 0^\circ,$ $\alpha = 135^\circ$
4	$I_D = 0,$ $I_{D'} = 0$	$\theta = 0^\circ,$ $\alpha = 135^\circ$	$I_D = 1000,$ $I_{D'} = 1000$	$\theta = 0^\circ,$ $\alpha = 180^\circ$

Şekil 10. Küresel motorun alan çözümü için sınır şartı ve bir dönüğe ait sargı akım değerlerinin çizelgesi ve rotorun dönme sonucu aldığı konumlar (saat yönü dönüş). $\theta=0^\circ$ iken $\alpha=-\pi$ ile $\alpha=+\pi$ aralığında yani küresel eyleyicinin bir devrine ait çeşitli akımlarda simülasyon sonucu elde edilen tork değerleri Şekil 11'de görülmektedir. Prototip küresel eyleyicinin bu konumdaki hızı, optik devir ölçer ile yüksüz olarak 541 d/d'lık bir hıza karşılık gelmektedir.

4. MANYETİK SİMÜLASYONLAR VE UYGULAMA SONUÇLARI

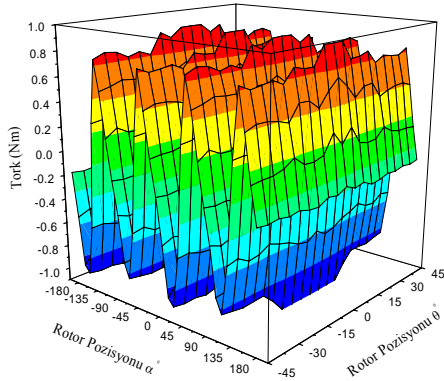
Sabit mıknatıslı küresel eyleyicinin kendisi oldukça basit bir geometriye sahip olmasına rağmen rotorun dönüşü süresince manyetik alanın belirlenmesi için üç boyutlu manyetik alan analizinin kullanılması gerekmektedir. Ansoft Maxwell 3D ile üç boyutlu manyetik simülasyon yapılmış ve buradan alınan sonuçlar ışığında eyleyicinin prototipi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 11. Sabit mıknatıslı küresel eyleyicinin $\theta=0^\circ$ iken $\alpha=-\pi$ ile $\alpha=+\pi$ aralığında çeşitli akımlarda simülasyon sonucu elde edilen tork eğrileri

Hava nüveli bir küresel eyleyici için rotorda oluşan torkun analitik yolla hesaplanması mümkündür (Ek.A). Fakat uygulaması yapılan demir nüveli küresel eyleyicide stator sargıları enerjili iken rotorun açılma yer değişimleri için relüktans torku ve kuvvetlerin (problem simetriklikten uzak 3 boyutlu bir özelliğe sahip olduğundan) analitik yolla hesaplanması zorlaşmakta ve bu Ansoft Maxwell 3D tarafından otomatik olarak Zahiri İş Metodu ile hesaplanmaktadır. Küresel motorun alan çözümünde sınır şartı (Statorun iki katı yarıçapa sahip en dış küresel bölge yüzeyinde $H_n=0$ dir. Hava nüveli küresel eyleyicinin sonlu elemanlar analizinde, doğru sonuçların elde edilmesi için bu yarıçapın 10-100 kat arası bir değerde alınması gerekir) ve bir dönüğe ait sargı akım değerleri Şekil 10'daki çizelgede görülmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre rotorun farklı pozisyonlarına göre farklı torklar oluşmaktadır. Rotor pozisyonu α ve θ açılma değişkenlerine göre küresel koordinat sisteminde $\alpha = 0-2\pi$ ve $\theta = 0-\pi/2$ aralığında değişmektedir. Rotorun hareket ettirilmesi için örneğin A-A' sargılarına 1000 amper-sarım akım verildiğinde rotorun S kutup eksenine ile A sargısının manyetik eksenleri aynı doğrultuya gelmek ister ve A' sargısı da rotorun N kutbunu iterek bu harekete yardım eder. Böylece akımların miktarına bağlı olarak rotor α yönünde $0^\circ-45^\circ$ dönme gerçekleştirebilir. Bu dönmenin akabinde A-A' sargılarının akımı kesilerek B-B' sargılarına aynı miktarda akımlar verilerek daha ileri bir 45° lik dönme gerçekleşir. Bu işlem böylece devam ettirilerek istenildiği kadar dönme hareketi yaptırılabilir. Rotorun θ eksenindeki (aşağı-yukarı) hareketleri için de uygun sargı kombinasyonunun enerjilendirilmesi gerekir.

Tüm bu aralıklar içinde kalan rotor pozisyonları için 5° 'lik aralıklarla toplam 648 adet üç boyutlu statik manyetik simülasyon yapılmıştır [27]. Küresel eyleyici üç boyutlu geometriye sahip olduğundan yapılan 3 boyutlu simülasyonlar oldukça büyük miktarda bilgisayar hesaplama zamanı gerektirmektedir. Örneğin sadece bir pozisyona ait manyetik akı, indüktans ve tork değerlerinin bulunması için gereken zaman P4 1,7 Ghz bilgisayar için 360 dakikadır.



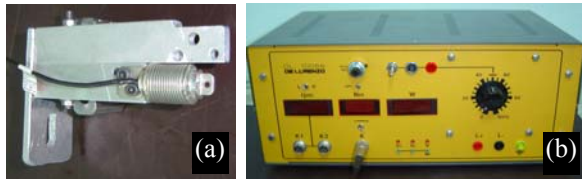
Şekil 12. Sabit mıknatıslı küresel eyleyicinin θ ve α konum değişkenlerine göre 1 amperlik sargı akımında ürettiği tork değerleri. Sargı akımları şekil 10'daki çizelgeye göre verilmiştir.

Sabit mıknatıslı küresel eyleyicinin θ ve α değerlerine göre 1 amper sargı akımında ürettiği tork değerleri Şekil 12'de üç boyutlu grafikte verilmiştir. Grafikte θ ve α konum değişkenlerine göre torkun farklı değerler alması rotordaki sabit mıknatısların yönlerinden kaynaklanmakta ve bundan dolayı kontrol sisteminde bu değişimin dikkate alınması önemlidir.

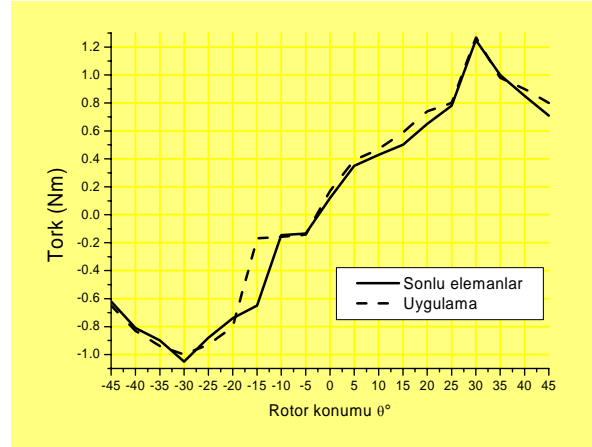
Sabit mıknatıslı küresel eyleyicinin y ve x eksenlerinde $\alpha=0^\circ$ iken $\theta=-\pi/4$ ile $\theta=+\pi/4$ aralığında ve 1A akım uygulandığı durumda simülasyon sonucu elde edilen tork eğrileri ve bu konumlara ait tork algılayıcısı (Şekil 13) ile ölçülen tork değerlerinin karşılaştırılması Şekil 14'de görülmektedir. Simülasyon ve uygulama sonucu elde edilen tork grafikleri kabul edilebilir bir yakınlıkta örtüşmektedir.

5. KÜRESEL EYLEYİCİNİN AÇIK ÇEVİRİM KONTROLÜ

Sabit mıknatıslı küresel eyleyicinin sekiz adet sator sargısı bulunmaktadır. Stator sargılarının her biri ayrı ayrı enerjilendirilebilmektedir. Bu yönüyle küresel eyleyici adım motoru prensibine yakın bir prensipte çalıştırılabilir. Sargılar istenilen sırada yeteri kadar bir akımla uyarıldığında küresel eyleyicinin hareketi sağlanmış olur [27]. Şekil 15a'da sabit mıknatıslı küresel eyleyici ve kontrol düzeneğinin fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 13. a) Tork algılayıcısı ve rotor miline bağlantı aparatı, b) Ölçüm arayüzü (Kullanılan tork algılayıcısı ve arayüz De Lorenzo Elektrik makinaları deney setiyle birlikte verilen BLH-150 N'luk Alpha Load Beam'dir)



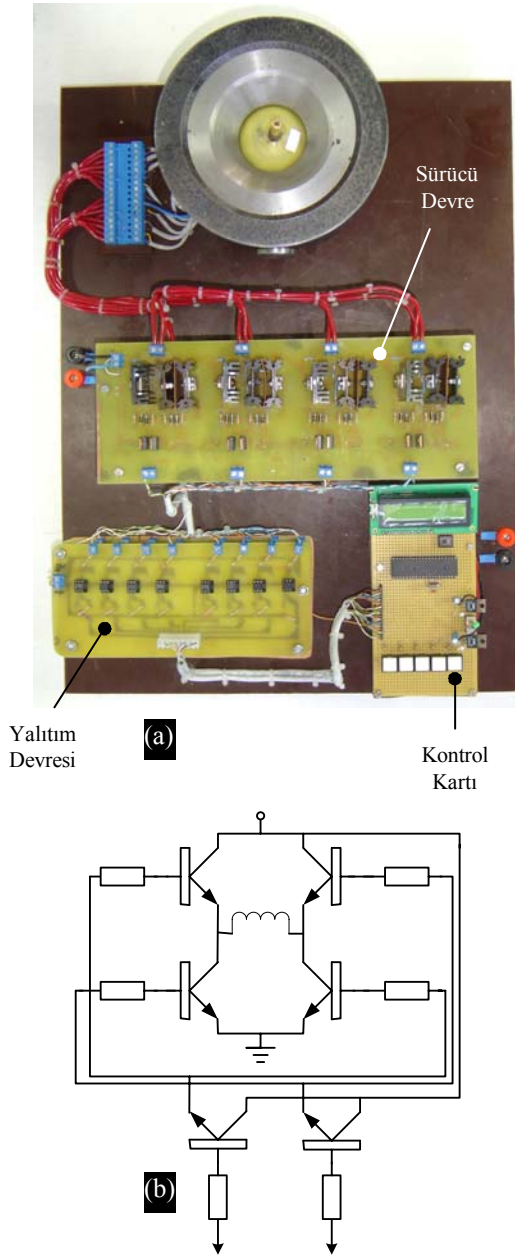
Şekil 14. Sabit mıknatıslı küresel motorun $\alpha=0^\circ$ iken $\theta=-\pi/4$ ile $+\pi/4$ aralığında simülasyon sonucu elde edilen tork eğrileri ve bu konumlara ait tork algılayıcısı ile ölçülen tork değerlerinin karşılaştırılması

Kontrol elemanı olarak PIC 16F877 mikro denetleyicisi kullanılmıştır. PIC 16F877'e yazılan programla, seçilecek değerlere göre eyleyicinin hareketi sağlanmış olur. Dört adet buton kullanılmıştır. Butonlardan birincisi tab butonu, ikincisi değerleri artırma, üçüncüsü değerleri azaltma ve dördüncü butonda start butonudur. Program çalıştırıldığında LCD display'de kutup seçimi, hareket yönü seçimi, adım seçimi ve hız seçimi gibi seçenekler vardır. Bu seçenekleri uygun konumlara getirerek start butonuyla PIC 16F877'nin çıkış vermesi sağlanır. Bu sinyaller 4N25 ile yapılmış yalıtım devresine gelir. Yalıtım devresine gelen sinyal sargı akım yönlerinin değiştirildiği H tipi köprü sürücü devresine gelir. Şekil 15b'de H tipi köprü sürücü devre gösterilmiştir. H tipi köprü sürücü devre çıkışı eyleyici sargı uçlarına bağlanmıştır. Böylece PIC 16F877'de üretilen bir sinyal küresel eyleyiciye ulaştırılmış olacaktır [27].

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada üç serbestlik dereceli sabit mıknatıslı rotorlu demir nüveli bir küresel eyleyicinin statik manyetik analizi ve uygulaması yapılmıştır. Uygulaması yapılan küresel eyleyici açık çevrimli olarak 360° dönme hareketinin yanında $\mp 45^\circ$ aşağı-yukarı hareketi yapabilmektedir. Küresel eyleyicinin stator nüvesi yokken analitik, sayısal metotlar ve uygulama sonucu elde edilen manyetik alan değerleri ve stator nüvesi varken sayısal metotlarla tahmin edilen ve uygulama sonucu üretilen tork değerlerinin kabul edilebilir bir yakınlıkta örtüştüğü görülmüştür. Gelecekteki çalışmalar aşağıdaki başlıkları içerebilir:

- Sabit mıknatıslı demir nüveli bir küresel eyleyici için stator sargılarının konumlarını içeren analitik eşitliklerin geliştirilmesi.
- Stator sargı boyutu ve rotor yarıçapının en fazla torku üretecek şekilde optimizasyonu.



Şekil 15. (a) Sabit mıknatıslı küresel eyleyici ve açık çevrim kontrol düzeneğinin fotoğrafı. Ölçek:~1/6. (b) Eyleyicinin tek bir sargısını enerjilendiren sürücü devre.

- Küresel eyleyicinin stator ve stator kapak yapısının ve malzemesinin eyleyicinin tork üretme yeteneğine etkileri.
- Küresel eyleyiciye yeni bir yataklama sisteminin uygulanarak sürtünme katsayısının düşürülmesi ve enerji sarfiyatının azaltılması.
- Küresel eyleyicinin kapalı çevrimli hassas konumlandırılması için Hall-etkili algılayıcılarının yerlerinin belirlenmesi ve dinamik kontrolünün yapılması.
- Küresel eyleyicinin sargılarına uygulanan akımların ve dinamik durumda demir nüvedeki eddy akımlarının ve histerezis etkilerinden dolayı 3 boyutlu ısıl analizlerinin yapılması.

KAYNAKLAR

1. Wang, J., Jewell, G.W. ve Howe, D., "Analysis of A Spherical Permanent Magnet Actuator", **J. Appl. Phys.** 81(8): 4266-4268, 1997.
2. Williams, F., Laithwaite, E.R. ve Eastham, J.F., "Development and Design of Spherical Induction Motors", **Proc. of the IEE.** 471-484, 1959.
3. Vachtsevanos., G.J., Davey., K. ve Lee., K.M., "Development of a Novel Intelligent Robotic Manipulator", **IEEE Control System Magazine** 9-15, 1987.
4. Davey., K., Vachtsevanos., G.J. ve Power., R. "An Analysis of Fields and Torques in Spherical Induction Motors", **IEE Transactions on Magnetics.** Mag-23.(1) 273-281, 1987.
5. Foggia., A., Oliver., E., Chappuis., F. "New Three Degree of Freedom Electromagnetic Actuator", **Conference Record IAS Annual Meeting** 35, New York, 1988.
6. Lee., K. M., Pei., J. "Kinematic Analysis of A Three Degree of Freedom Spherical Wrist Actuator", **The Fifth International Conference on Advanced Robotics**, 72-77, Italy, 1991.
7. Wang., J., Jewell., G., Howe., D. "Modeling of a Novel Spherical Permanent Magnet Actuator", **Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation** 1120-1125, New Mexico, 1997.
8. Wang., J., Jewell., G., Howe., D. "Analysis, Design and Control of Novel Spherical Permanent Magnet Actuator", **IEE Proceedings on Electrical Power Applications.** Cilt 154, No 1, 61-71, 1998.
9. Chirikjian., G.S. ve Stein., D. "Kinematic Design and Commutation of A Spherical Stepper Motor", **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,** Cilt 4, No 4, 342-353, Piscataway, New Jersey, 1999.
10. Kahlen., K., De Doncker., R.W. "Current Regulators of Multi Phase Permanent Magnet Spherical Machines", **Industry Applications Conference Record of the 2000 IEEE** 3, 2011-2016, 2000.
11. Yang., C., Back, Y.S. "Design and Control of the 3 Degrees of Freedom Actuator by Controlling The Electromagnetic Forces", **IEEE Transactions on Magnetics,** 3607-3609, 1999.
12. Hollis., R.L., Ralph L., "Magnetically Levitated Fine Motion Robot Wrist with Programmable Compliance", United States Patent, Ekim, 1989.
13. Kaneko., K., Yamada, I, nad Itao. K. "A Spherical DC Servo Motor with Three Degrees of Freedom", **Transactions of the ASME Journal of Dynamic System Measurement and Control** 111, 398-402, Eylül 1989.
14. Neto., L., Mendes, R. ve Andrade, D.A. "Spherical Motor A Three Dimensional Position Servo", **Proceeding of IEE Conferences on Electrical Machines and Drives,** 227-231, 11-13 Eylül, 1995.

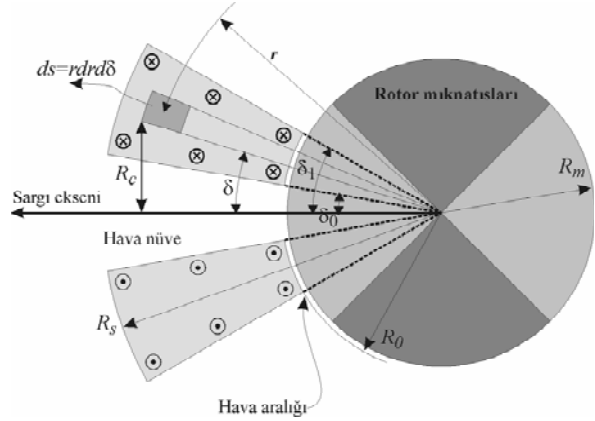
15. Benjamin, B. Bederson “A Miniature Space Variant Active Vision System: Cortex-1”, Phd Thesis **New York University**, 25-64, Haziran, 1992.
16. Lee., K.M. G. Vachtsevanos, C.K. Kwan. “Development of A Spherical Stepper Wrist Motor”, **IEEE International Conference on Robotics and Automation**, 1: 267-272, 24-29 Nisan 1988.
17. Lee., K.M. Kwan, C., “Design Concept Development of A Spherical Stepper for Robotic Applications”, **IEEE Transactions on Robotics and Automation**. Cilt 1, No 7, 175-181 Şubat 1991.
18. Roth., R. Lee., K.M., “Design Optimisation of A Three Degrees of Freedom Variable Reluctance Spherical Wrist Motor”, **Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry** 117, 378-388, Ağustos, 1995.
19. Raye., A. S., “Finite Element Torque Modeling And Backstepping Control of A Spherical Motor”, Phd Thesis, **George W. Woodruff school of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology**, 8-52, 2001.
20. Zhou., Z. Lee., K.M., “Real Time Motion Control of Multi Degree of Freedom Variable Reluctance Spherical Motor”, **Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation**, 2859-2864, Minneapolis-Minnesota, 1996.
21. Kim, D., “A Design Methodology of A High-Torque Multi Degree of Freedom Spherical Motor”, M.Sc. Thesis, The George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 24-76, 1997.
22. Ezenekwe., D. ve Lee, K.M., “Design of Air Bearing System for Fine Motion Application of Multi Dof Spherical Actuators”, **Proc. of the IEEE/ASME AIM 99**. 812-818, Atlanta, Eylül 1999.
23. He., T. “Effects of Rotor Configurations on the Characteristic Torque of A Variable Reluctance Spherical Motor”, Phd Thesis **Georgia Institute of Technology-China**, 35-75, Temmuz 2000.
24. Wang, J., Wang, W., Jewell, G.W., Howe D., “A Novel Spherical Permanent Magnet Actuator with Three Degrees of Freedom”, **IEEE Transactions on Magnetics**, Cilt 34, No 4, Temmuz 1998.
25. Mitchell, J.K., Jewell, G.W., Wang, J., Bingham, C.M., Howe, D., “Influence of An Aperture on the Performance of A Two-Degree-of-Freedom Iron-Cored Spherical Permanent-Magnet Actuator”, **IEEE Transactions on Magnetics**, Cilt 38, No 6, Kasım, 2002.
26. Wang, J., Wang, W., Jewell, G.W., Howe D., “Design and Control of A Novel Spherical Permanent Magnet Actuator With Three Degrees of Freedom”, **IEEE Transactions on Mechatronics**, Cilt 8, No 4, Aralık 2003.
27. Öner, Y., **Sabit Mıknatıslı Küresel Motorun Bilgisayar Destekli Üç Boyutlu Manyetik Analizi, Tasarımı ve Uygulaması**, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz, 2004.
28. Moskowitz, L., **Permanent Magnet Design and Application Handbook**, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, USA, 1995.
29. Sievert, J., Ahlers, H., Ludke, J., Siebert, S., Pareti, L., Solzi, M., “European Intercomparison of Measurements on Permanent Magnets”, **IEEE Transactions on Magnetics**, Cilt 29, No 6, 2887 – 2889, Kasım 1993.

Ek.A: Hava nüveli bir küresel eyleyicide rotorda oluşan torkun Zahiri İş Metodu ile analitik yolla hesaplanması [24]:

Stator sargılarından geçen akımın manyetik alanı ile rotor mıknatıslarının manyetik alanının etkileşimi sonucu rotor üzerinde aşağıdaki eşitlik ile verilen bir tork oluşur.

$$\mathbf{T} = - \int_v r(\mathbf{J} \cdot \mathbf{B}) dv \quad (\text{E.1})$$

Burada \mathbf{J} , Şekil E.1’de görüldüğü gibi v hacmindeki sargının akım yoğunluk vektörünü temsil eder. Şekilde görüldüğü gibi r R_θ ile R_s arasında δ δ_θ ile δ_1 arasında değişim göstermektedir. Yüzeyi $ds = r dr d\delta$ olan çok küçük bir sarımlık bir sargı düşünüldüğünde ve c konturu ile daire içine alındığında, sargının ürettiği toplam tork aşağıdaki eşitlik ile elde edilebilir.



Şekil E.1. Torkun hesaplanması için hava nüveli bir sargı ve sabit mıknatıslı rotorun kesit görünüşü

$$\mathbf{T} = -2\mathbf{J} \int_{R_0}^{R_s} \int_{\delta_0}^{\delta_1} \left\{ \int_c r B_{lr}(r, \theta) dl \right\} r dr d\delta \quad (\text{E.2})$$

B_{lr} 'nin temel bileşenleri ($l=2, m=1$) baskın olduğundan yüksek dereceli harmonikler ihmal edilerek tork aşağıdaki gibi verilir.

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = T_m \begin{bmatrix} v_y^2 - v_z^2 \\ -v_x v_y \\ v_x v_z \end{bmatrix} \quad (\text{E.3})$$

Burada $v = [v_x \ v_y \ v_z]^T$ sargının yön kosinüsüdür ($v_x = \sin \theta \cos \alpha$; $v_y = \sin \theta \sin \alpha$; $v_z = \cos \theta$). Torkun büyüklüğü,

$$T_m = \frac{15\pi\sqrt{2}B_{\text{rem}}JR_m^4 \ln\left(\frac{R_s}{R_0}\right)(\sin^3 \delta_1 - \sin^3 \delta_0)}{8(2\mu_r + 3)} \quad (\text{E.4})$$

ile bulunur. Eşitlikten görüleceği gibi T_m torku B_{rem} ve J 'ye bağımlı olduğu gibi rotor ve sargıların geometrik parametreleri ile de ilgilidir. Rotor üzerindeki toplam tork bütün sargı akımlarının bileşke etkisi ile elde edilir.