



KÜRESEL EYLEYİCİNİN ROTOR MIKNATIS MALZEMESİ VE STATOR SARGI GEOMETRİSİNİN EYLEYİCİ TORKUNA ETKİSİ

Adem DALCALI*

Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Bandırma, Balıkesir, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Küresel eyleyici, Sargı tasarımı, Sabit mıknatıs, Tasarım optimizasyonu, Tork.</i>	Klasik elektrik motorları tek serbestlik derecesinde hareket kabiliyetine sahip motorlardır. Çok serbestlik derecesinde hareket gerçekleştirmek istendiğinde birden çok klasik motorun kullanımı söz konusudur. Bu durumda toplam verimin azalması ile sonuçlanmaktadır. Birden fazla serbestlik derecesine sahip olan küresel eyleyiciler çok serbestlik dereceli hareketlerin yapılmasında tercih edilebilirler. Bu çalışmada, yüksek tork yoğunluğuna sahip sabit mıknatıslı bir küresel eyleyicinin 3 boyutlu tasarımı ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak manyetostatik analizi gerçekleştirilmiştir. Eyleyiciden düşük hacimde yüksek tork elde edilmesi amacıyla, rotor mıknatıs malzemesi ve stator sargısının fiziksel yapısının optimize çalışmaları yapılmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda mıknatıs malzemesi olarak N50m tipi mıknatıs malzemesi tercih edilmiştir.

INFLUENCE OF ROTOR MAGNET MATERIAL AND STATOR WINDING GEOMETRY ON OUTPUT TORQUE IN SPHERICAL ACTUATOR

Keywords	Abstract
<i>Spherical actuator, Winding design, Permanent magnet, Design optimization, Torque.</i>	Classic electric motors are motors capable of moving in single-degree-of-freedom. It is necessary to use more than one classical motor in order to perform movement in multi-degree-of-freedom. In this case, it results in a reduction in total efficiency. Spherical actuators with multiple degrees of freedom may be preferred for performing multi-degree-of-freedom movements. In this study, 3D design of permanent magnet spherical actuator with high torque density has been realized as well as magnetostatic analysis by using finite element analysis. In order to achieve high torque at low volume, the rotor magnet material and the physical structure of stator winding have been designed optimally. As a result of the optimization studies, N50m type magnet has been preferred as the magnet.

Alıntı / Cite

Dalcalı, A., (2019). Küresel Eyleyicinin Rotor Mıknatıs Malzemesi ve Stator Sargı Geometrisinin Eyleyici Torkuna Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(1), 145-151.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Dalcalı, 0000-0002-9940-0471

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	28.06.2018
Revizyon Tarihi / Revision Date	26.10.2018
Kabul Tarihi / Accepted Date	19.12.2018
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2019

1. Giriş

Birçok endüstriyel uygulamada belirlenen amaçları gerçekleştirmek için çok serbestlik dereceli hareket gerekmektedir. Klasik motorlar döner veya doğrusal olarak tek serbestlik derecesine sahip olduklarını dikkate alırsak çok serbestlik dereceli hareket için birden fazla klasik motorun akuple olarak çalışması

gerekmektedir. Bu durum hem toplam sistem verimini azaltacağından hem de elektriksel olarak her bir motorun ayrı ayrı kontrolünü gerektireceğinden dezavantajlı bir durumdur. Gelişen teknolojinin bir sonucu olarak daha az insan gücüyle daha verimli işlemlerin yapılması önem kazanmaktadır. Tasarımcılar, tasarımlarını bu kriteri göz önünde bulundurarak gerçekleştirmektedir. Tüm bu kriterler

* İlgili yazar / Corresponding author: adalcali@bandirma.edu.tr, +90-266-717-0117

dikkate alındığında çok serbestlik derecesinde hareket kabiliyeti bulunan küresel eyleyici çözüm olarak sunulabilmektedir. Küresel eyleyici; “bir eksen etrafında dönebilen doğrusal hareket yapabilen, hareketli sargısı, hareketli demir nüvesi veya hareketli daimi mıknatısı olan sınırlı üç boyutlu hareket yapabilen elektromekanik eleman” olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla bildiğimiz motorların birkaç tanesinin birlikte yapabileceği işleri tek başına yapmaktadır. Bunun kazancı olarak daha az miktarda motor kullanılarak maliyet düşürülebilmektedir (Öner, 2005; Gürdal ve Öner, 2005; Yan vd., 2011).

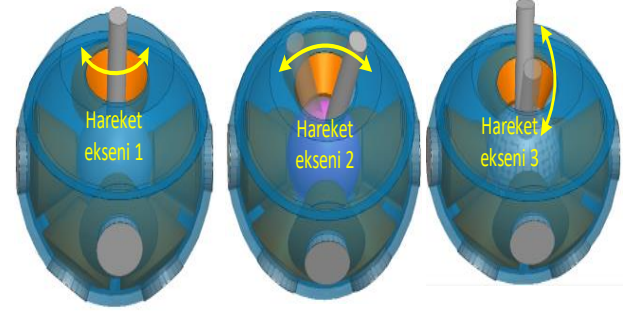
Kompakt yapısı, hızlı tepkime ve yüksek hareket kabiliyeti, doğrudan tahrik edilebilen ve yüksek verimliliğe sahip olan küresel eyleyiciler, otomobil, sağlık sektörü, savunma sanayi ve özellikle robotik alanında kullanılmaktadırlar (Dai vd., 2018; Fernandes vd., 2018; Li ve Li, 2018). Mevcut durumda farklı yapılar ve farklı amaçlara yönelik küresel eyleyiciler tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon motorunun küresel geometri ile tasarlanması küresel motorun oluşumuna ilk basamak olarak sayılmaktadır (Williams vd., 1959). Gürdal ve Öner, NdFeB tipi sabit mıknatıs kullanarak küresel rotor ve basit sargı yapısına sahip statordan oluşan küresel eyleyicinin statik manyetik analizi ve uygulamasını gerçekleştirmişlerdir (Gürdal ve Öner, 2005). Zhang 24 hava nüveli stator sargısı ve 8 sabit mıknatıstan oluşan rotor kutbuna sahip küresel eyleyicinin tork eşitliklerini sonlu elemanlar metodu (SEM) ile elde ederek eyleyici torkunun giriş akımı ile ilişkisini belirlemiştir (Zhang vd., 2011). Benzer yöntem kullanarak eyleyici torkunun mıknatıs kalınlığı ve hava aralığının genişliği gibi parametrelere göre değişimi incelenmiştir (Kim vd., 2015). Eyleyici torkunun matematiksek modelinin türetildiği diğer bir çalışmada, demir nüvenin tork çıkışı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Çalışmada demir kullanımının, eyleyici torkunu %60'a kadar arttırabileceği tespit edilmiştir (Yan vd., 2009).

Bu çalışmada, sabit mıknatıslı küresel bir eyleyicinin 3 boyutlu (3B) tasarımı ve tork optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla stator sargısı ve sabit mıknatıslı rotorun tork üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çerçevede, makalede ilk olarak küresel eyleyicinin yapısı tanıtılmış daha sonra mıknatıs malzemesinin eyleyici torkuna etkisi incelenmiştir. 4. bölümde stator sargısının fiziksel parametreleri ve sınırları belirlenmiş, sonraki bölümde ise torka etkisi incelenmiştir. 6. bölümde optimize edilen yapıdaki eyleyicinin manyetostatik analizi gerçekleştirilmiştir. Son olarak, sonuç bölüm 7 kısımda sunulmuştur.

2. Sabit Mıknatıslı Küresel Eyleyicinin Yapısı

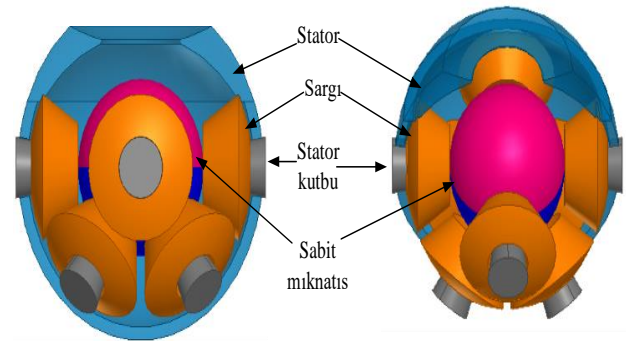
Küresel eyleyiciler de hareket, klasik makinalarda olduğu gibi stator manyetik alanı ile rotor manyetik alanının etkileşimi sonucunda oluşur. Klasik

makinalardan farklı olarak küresel eyleyiciler birden fazla eksende hareket kabiliyetine sahiptirler. Küresel eyleyicinin temelleri 1950'li yıllarda değişken hızlı indüksiyon motorlar üzerine çalışan Williams ve Laitwaite'in, indüksiyon motorun küresel geometri ile geliştirilmesi sonucunda atılmıştır (Williams vd., 1959). Küresel eyleyicilerin yaptığı sınırlı üç serbestlik dereceli hareket eksenleri rotora bağlanan bir mil yardımıyla Şekil 1 yardımıyla ifade edilebilir.



Şekil 1. Küresel eyleyicinin hareket eksenleri.

Küresel eyleyicilerin 3 farklı sürüş tekniği mekanik, piezoelektrik ve elektromanyetik kuvvetler olarak sıralanabilir. Çalışmaya konu olan küresel eyleyici elektromanyetik kuvvetler kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan eyleyicinin rotorunda kalıcı mıknatıs kullanarak, rotorda uyarıma gerek kalmamıştır. Böylece rotorda sargı kullanılmamış ve rotor bakır kaybı önlenerek verimliliğe katkı sağlanmıştır. Tasarlanan küresel eyleyici stator, rotor, sargılar ve stator kapağı olmak üzere 4 parçadan meydana gelmektedir. Küresel eyleyici 8 adet stator sargısı ve iki kutuplu sabit mıknatıslı rotordan meydana gelmektedir. Rotor 4 mm çapında daimi mıknatıstan oluşmaktadır. İlk tasarım için stator malzemesi olarak M19_24G ve rotor malzemesi olarak NdFeB35 tercih edilmiştir. Şekil 2'de sabit mıknatıslı eyleyicinin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2. Sabit mıknatıslı küresel eyleyici.

3. Farklı Mıknatıs Malzemelerinin Tork Üzerine Etkisi

Sabit mıknatıs malzemeler kimyasal kompozisyonlarına göre Alnico, seramik (veya ferrit) ve nadir toprak mıknatısları olarak gruplandırılabilir

(Kurt, 2006). Mıknatis teknolojisindeki gelişmeler ışığında nadir toprak mıknatısların kullanımı maliyetlerinin azalmasından dolayı artmaktadır. Düşük hacim ve ağırlık gereken çoğu uygulamalarda nadir toprak mıknatıslar kullanılabilir. Bu tip malzemeler yüksek enerji çarpımından dolayı daha küçük mıknatısların kullanımına olanak sağlar. Bir mıknatısın kalitesi maksimum enerjisini gösteren manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddetinin maksimum enerji çarpımı ile karakterize edilir (Dalcalı vd., 2012; Öztürk vd., 2017). Küresel eyleyicide 10 tip mıknatis kullanılarak mıknatis malzemesinin etkisi incelenmiştir. İncelemenin daha ayrıntılı olması için (BH)max değeri en yüksek olan NdFeB tipi mıknatıslara daha fazla yoğunlaşmıştır. Stator nüvesi varken ve stator sargısı 1000 Ampersarım uyarımlı iken yapılan analizlerde karşılaştırmanın dahi adil olması için tüm fiziksel parametreler sabit tutulmuş, böylelikle sadece mıknatis malzemesinin etkisi araştırılmıştır. Her bir mıknatis tipi için yapılan manyetostatik analizler sonucunda oluşan tork değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Mıknatis malzemesine göre tork değerleri.

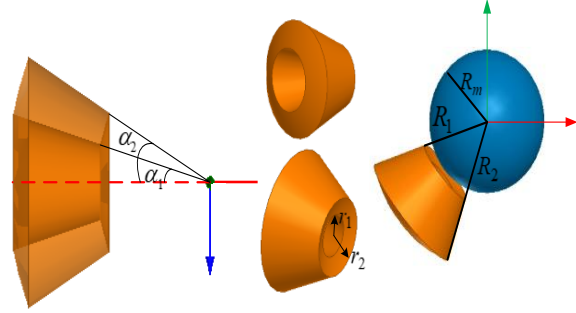
MIKNATIS TİPİ	TORK DEĞERİ(μNm)	
Alnico5	211,09	
Seramik 5	405,62	
Seramik 8D	415,28	
SmCo24	1042	
SmCo28	1105,7	
NdFeB	N30	1141
	N35	1265,5
	N38	1416,7
	N48	1492,9
	N50m	1908,1

Tablo 1 incelendiğinde, küresel eyleyici için en yüksek çıkış tork değerinin NdFeB tipi mıknatıslar tarafından sağlandığı açıktır. Genel olarak, küresel eyleyici için çıkış tork değerinin, kullanılan mıknatısın remanans akı yoğunluğu değeri ile doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Gelişmekte olan mıknatis üretim teknolojisinin yardımıyla NdFeB mıknatıslarının üretimi arttırılmakta ve bu tip mıknatısların kullanımı farklı endüstriyel uygulamalarda mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, tüm bu avantajlara rağmen, NdFeB tipi mıknatıslar yüksek sıcaklıklarda çalışmaya uygun değildir (Dalcalı vd., 2012). Tüm bu değerlendirmeler ışığında eyleyicide mıknatis tipi olarak N50m tercih edilmiştir.

4. Sargının Geometrik Parametreleri

Küresel eyleyicinin stator sargıları konik biçimde tasarlanarak rotoru çevreleyebilecek dolayısıyla da mevcut alan etkin bir şekilde kullanılacaktır. Eyleyicinin tork parametresi kalıcı mıknatis ve stator

sargısına bağlıdır. Bu noktada rotor malzemesi olarak seçilen NdFeB tipi mıknatıslar torkun yüksek olmasına öncülük etmektedir. Mıknatis olarak kullanılan malzemelerin torka etkisi 3 bölümde ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Stator sargısında ise torku arttırmak için bobinin geometrik parametreleri veya sarım sayısı optimize edilebilir. Bu çalışmada küresel eyleyicide, Şekil 3'de gösterildiği gibi konik biçimli bir bobin tasarlanacaktır.



Şekil 3. Stator sargısı parametreleri.

Stator sargılarını konik tasarlayarak küresel eyleyicinin yapısının en etkin biçimde kullanılması sağlanmıştır. Stator sargısında fiziksel parametreler belirlenerek optimum sargı tasarımı elde edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 2'de belirtilen değişkenlerden R_1 rotor merkezinden bobinin üst yüzeyine olan uzaklığı, R_2 rotor merkezinden bobinin alt yüzeyine olan uzaklığı, R_m ise rotorun yarıçapı, α_1 bobinin iç yüzey açısı, α_2 bobinin dış yüzey açısını, r_1 bobinin iç yarıçapını ve r_2 bobinin dış yarıçapını ifade etmektedir. Tablo 2'de bobin tasarımında kullanılan değişkenlerin sınırları tanımlanmıştır.

Tablo 2. Bobin tasarım parametrelerinin limitleri.

PARAMETRE	ARALIK
$L_c(R_2 - R_1)$	$2 \text{ mm} \leq L_c \leq 60 \text{ mm}$
α_1	$14,03^\circ \leq \alpha_1 \leq 32^\circ$
α_2	$20,55^\circ \leq \alpha_2 \leq 36,86^\circ$

α_1 ve α_2 açıları Denklem 1 kullanılarak belirlenmiştir. Açılar belirlenirken sargının çapının tam sayı olmasına dikkat edilmiş bu yüzden de ondalıklı açılar elde edilmiştir.

$$\tan^{-1} \alpha_1 = \frac{r_1}{R_1} \quad (1)$$

$$\tan^{-1} \alpha_2 = \frac{r_2}{R_2}$$

5. Bobin Tasarım Parametrelerinin Küresel Eyleyicinin Torkuna Etkisi

Küresel eyleyicide tork rotordaki mıknatıslar tarafından üretilen manyetik alan ile stator manyetik

alanının etkileşimi sonucunda oluşur. Manyetik akı yoğunluğu B bilindiğinde, küresel eyleyici tarafından üretilen tork,

$$T = -\int_v r(J \cdot B)dv \quad (2)$$

Denklemden r rotor merkezinden kuvvetin hesaplandığı noktaya kadar olan vektörü, J , v hacimli stator sargısının akım yoğunluğunu temsil etmektedir. Kapalı bir dairesel C yolunda yüzeyi $ds = r dr d\alpha$ olan sargının oluşturacağı tork değeri Denklem 3 ile belirlenir.

$$T_C = \iiint_v r_{er} \times [-J r dr d\alpha dl \times B_{er}(r, \theta, \phi) e_r] \quad (3)$$

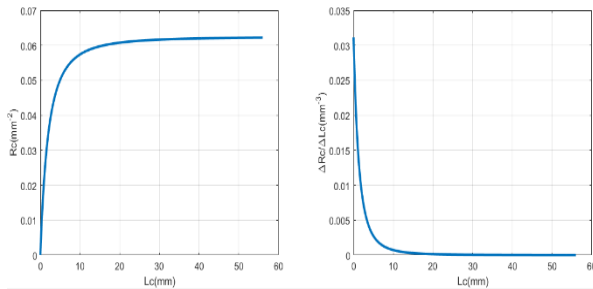
Toplam sargı hacmi Şekil 2'den görüldüğü üzere $R_1, R_2, \alpha_1, \alpha_2$ olmak üzere dört parametre ile ifade edilir. Tork değeri bu hacimde tekrar tanımlanırsa Denklem 4 elde edilir (Yan vd., 2011; Wang vd., 1998).

$$T_C = -J \int_{R_1}^{R_2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \left[\int_c r B_{lr}(r, \theta, \phi) dl \right] r dr d\alpha \quad (4)$$

denklemden B_{lr} , küresel koordinat sisteminde r yönündeki manyetik akı yoğunluğu değerini ifade etmektedir. Stator sargısının uzunluğu $L_c = R_2 - R_1$ olarak tanımlanabilir. Stator sargısı rotor yüzeyine çok yakın olduğundan ($R_1 \approx R_m$) olarak ifade edilir. R_c stator sargısı sabiti $R_c = R_1^{-2} - R_2^{-2}$ olmak üzere stator sargısı uzunluğunu Denklem 5'deki gibi tekrar tanımlanabilir (Wang vd., 1998).

$$R_c = R_1^{-2} - R_2^{-2} = R_m^{-2} - (R_m + L_c)^2 \quad (5)$$

Şekil 4'de sargı uzunluğunun değişimi ile L_c sabitinin ve R_c artış hızının ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4. R_c sabitinin ve artış hızının L_c ile değişimi.

Yüksek tork değeri elde etmek için sargı tasarımında, sargı sarım sayısının mümkün olduğunca büyük olması gerekmektedir. Şekil 4 analiz edildiğinde L_c 'nin artması R_c 'nin artmasına ve bu durumda da sargının hacminin artmasına öncülük etmektedir. Bu durum daha fazla tel sarılmasına ve yüksek tork oluşmasını sağlamaktadır.

Mıknatısın oluşturduğu akı yoğunluğu değeri rotordan uzaklaştıkça azalmaktadır. Belirli mesafeden sonra bu değer oldukça küçülmektedir. Şekil 4'den görüldüğü üzere $L_c > 12$ mm olduğunda R_c 'deki artış çok azalmaktadır. Sargı uzunluğunun bu değerinden sonra artan tel sargısı, tork üretimi üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olacaktır. Dolayısıyla sargının uzunluğunun 12 mm'den sonrası sargı maliyeti ve fazla sipirden dolayı oluşacak elektriksel kayıp dikkate alındığında dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca $L_c = 5$ mm'den sonra artım hızı oranı belirgin bir şekilde değişmemektedir. Tüm bu değerlendirmelere göre bu çalışmada stator sargısı uzunluğu 5 mm olarak belirlenmiştir.

Şekil 3 incelendiğinde, sargı iç açısı sabit kabul edildiğinde sargı dış açısının artması tel sarımında kullanılan alanı attıracaktır. Dolayısıyla bu durum ampersarım değerinin fazla olabilmesine ve torkunda daha fazla olmasına olanak sağlayacaktır. Fakat fiziksel olarak sargının dış açısı α_2 değeri bir ekseninde 4 sargı olacağından maksimum 45° olabilecektir. Sargı dış açısı sabit kabul edilerek iç açısının artması ise toplam hacmi azaltacağından ampersarım değerinin düşmesine ve torkunda azalmasına neden olacaktır. Stator sargılarının, stator kutbu üzerine sarılacağı dikkate alınarak çalışmada iç sargı açısı $14,03^\circ$ olarak ve dış açısı da $26,56^\circ$ olarak belirlenmiş ve stator dışyarıçapı 10,5 mm ve iç çapı 9,7 mm olarak tasarlanmıştır.

6. Optimize Edilen Yapıdaki Eyleyicinin Manyetostatik Analizi

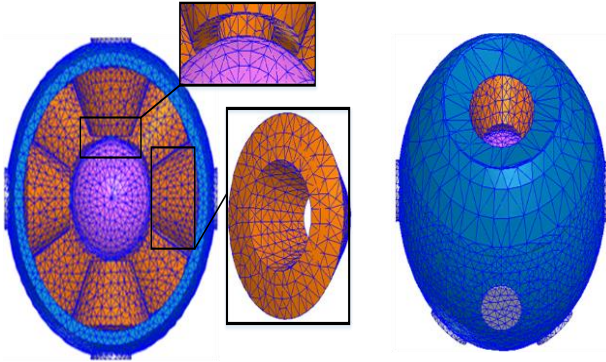
SEM, elektrik alanı ve manyetik alan gibi belirli bir bölgede sürekli olan ve bu bölge üzerindeki değişimleri kısmi diferansiyel denklemler ile ifade edilebilen büyüklüklerin bölge üzerindeki yaklaşık sayısal çözümlerini bulmak amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir. SEM çözümü yapılmak istenen bölge sonlu sayıda küçük bölgelere ayrılır. Bölge üzerinde herhangi bir noktadaki çözümü elde etmek için, o noktayı çevreleyen elemanların o noktaya katkıları dikkate alınır ve böylelikle bölgedeki bütün elemanların köşe noktalarına veya düğümlere ilişkin büyüklükler zincirleme olarak birbirine bağlanmış olur. Sonuç olarak düğüm sayısı kadar denklemi bulunan bir doğrusal denklem takımı elde edilir. Böylelikle bu denklem takımının çözümünden istenenler hesaplanır (Akbaba ve Fakhro, 1992; Rao, 2004).

SEM'in makine tasarımına uygulanması ile elektromanyetik parametrelerin yüksek bir doğrulukta belirlenmesi sağlanabilir. SEM'in kullanılması tasarımcıya zaman ve ekonomik açıdan yarar sağlamaktadır. Bu metodun makine tasarımına uygulanması ile makinaya ait sargı endüktansları ve endüklenen tork gibi önemli tasarım parametrelerinin çok yüksek bir doğrulukla belirlenmesi sağlanır (Ho ve Fu, 1998; Dalcalı ve Akbaba, 2018). SEM'in elektrik

makinalarının dışında farklı alanlarda da uygulaması mevcuttur (Damlar vd., 2014; Yang vd., 2018; Vassiliou vd., 2017; Mhamad vd., 2017).

Günümüzde, elektrik makinalarının tasarımında mümkün olan en küçük hacim ve en az malzeme ile en yüksek güç ve tork yoğunluğunun elde edilmesi istenmektedir. Eyleyicinin nüve malzemesi olarak kullanılan yumuşak manyetik malzemeler, makinanın manyetik devresini oluşturduğundan bu malzemelerin yüksek geçirgenliğe, yüksek doyum özelliğine ve düşük nüve kaybına sahip olması istenir. Bu amaçla stator nüve malzemesi olarak M19 sacı tercih edilmiştir. Eyleyicinin rotor kısmı düşünüldüğünde, yüksek BH_{max} değerine sahip mıknatıslarla aynı hacimde daha yüksek güç ve tork elde etmek mümkündür. Seramik ve Alnico tipi malzemeler kullanılarak aynı güç ve tork değeri elde edilmek istendiğinde ise kullanılan mıknatısın boyutunun artırılması veya sargı akımlarının artırılması gerekecektir. Sargı akımlarının artması kayıpları artırarak daha düşük verim değerlerine öncülük edecektir (Dalcalı ve Ocak, 2018). Bu çalışmanın amacı olan en küçük hacimde en yüksek tork yoğunluğunun elde edilmesi için sabit mıknatıs malzemesi olarak N50m tipi tercih edilmiştir.

3B modeli oluşturulan küresel eyleyicinin ve stator sargının ayrıntılı olarak verilen mesh yapısı Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5. Eyleyicinin mesh yapısı.

Elektrik makinalarında çalışma büyüklüklerinin hesaplanmasındaki doğruluk derecesi endüktansların doğru olarak bilinmesine bağlı olduğundan bu makinalarda manyetik alan dağılımının bilinmesi önem kazanmaktadır. Elektrik makinalarında manyetik alan Maxwell denklemleri ile ifade edilir;

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial B}{\partial t} \end{aligned} \quad (6)$$

burada, \vec{H} manyetik alan şiddeti, \vec{J} akım yoğunluğu, \vec{E} elektrik alan şiddeti, \vec{B} manyetik akı yoğunluğudur.

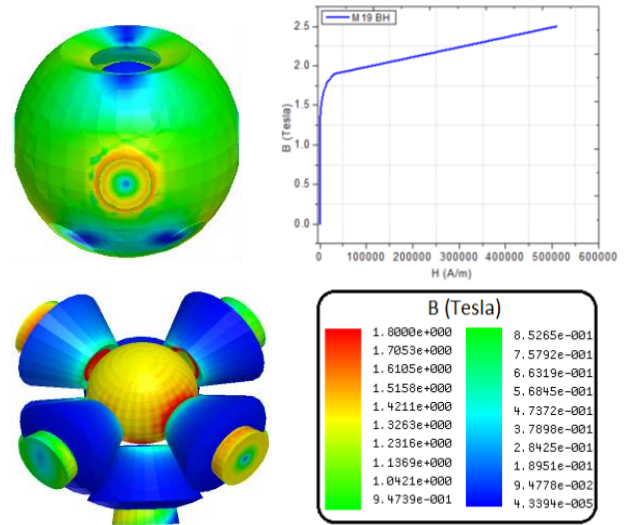
Manyetik vektör potansiyeli \vec{A} , manyetik akı yoğunluğu cinsinden Denklem 7'deki gibi tanımlanır(Li vd., 2014).

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (7)$$

Manyetik alan için vektör potansiyelinin temel formülasyonu Denklem 8 ile ifade edilir.

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J} \quad (8)$$

Burada $v, B = f(H)$ eğrisinin doğrusal olmamasından dolayı değişken geçirgenliği göstermektedir ve $v = \frac{\partial B}{\partial H}$ olarak ifade edilebilir. 3B statik manyetik analizi gerçekleştirilen küresel eyleyicinin manyetik akı dağılımı Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Küresel eyleyicinin akı dağılımı.

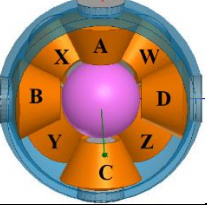
Elde edilen manyetik akı dağılımında özellikle kutup uç bölgelerinde akı değerlerinin nispeten yüksek olduğu görülmektedir. Nüvede kullanılan M19 sacının BH eğrisi göz önüne alınarak incelendiğinde akı değerlerinin hedeflenen sınırlar içinde olduğu görülmektedir. İlk tasarlanan ve optimize edilen eyleyicinin parametreleri ve elde edilen tork değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

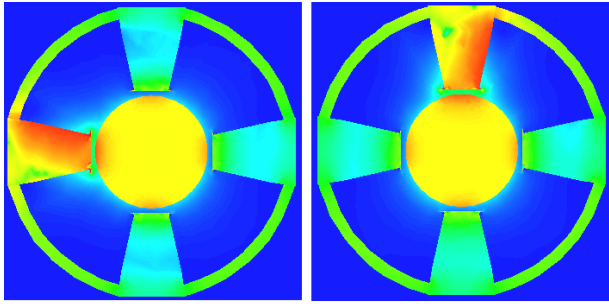
Tablo 3. Parametreler ve tork değerleri.

PARAMETRE	İLK TASARIM	OPTİMUM TASARIM
L_c (mm)	4	5
R_m (mm)	4	4
α_1	7,53°	14,03°
α_2	18,28°	26,56°
Mıknatıs tipi	N35	N50m
Tork(μ Nm)	1265,6	3121

Tasarlanan eyleyicinin farklı sargı konfigrasyonları yeteri kadar enerjilendirilerek istenilen eksenlerde hareket ettirilebilir. Tablo 4’de stator sargılarının enerjilendirilmesi ile oluşacak üç boyutlu hareket için örnek sargı konfigrasyonları verilmiştir. Şekil 7’de hareket eksenleri 2 ve 3 için düzlemsel olarak elde edilen örnek akı dağılımları verilmiştir.

Tablo 4. Sargı uyartım konfigrasyonları.

		Enerjilendirilen Sargılar	
Hareket eksen-1	$0^\circ \rightarrow 45^\circ$	B-W	
	$45^\circ \rightarrow 90^\circ$	A-Z	
	$90^\circ \rightarrow 135^\circ$	D-Y	
	$135^\circ \rightarrow 180^\circ$	C-X	
Hareket eksen-2	B-D		
Hareket eksen-3	A-C		



Şekil 7. Düzlemsel akı dağılımı grafiği.

7. Sonuç

Çalışmada, küresel eyleyicinin rotor mıknatıs malzemesi ve stator sargı geometrisinin eyleyici torkuna etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, tüm analiz koşulları ve eyleyicinin fiziksel parametreleri sabit tutulmuştur. Rotor mıknatıs malzemesi (Alnico 5, Seramik 9 ve 8D, SmCo 24 ve 28 ve NdFeB 30, 35, 38, 48, 50m) değiştirilerek eyleyici torkuna etkisi incelenmiştir. Yapılan analizlerde en yüksek tork değeri NdFeB tipi mıknatıslarda ve bu grupta da N50m tipinde elde edilmiştir. Bu çalışmada, küresel eyleyicinin rotor yapısında N50m daimi mıknatısların kullanılarak tork değerlerinin yüksek olması sağlanmıştır. Bu noktada sadece tork değerlerine bağlı olarak doğru mıknatıs seçmek doğru bir adım değildir. Eyleyici çalışırken aşırı ısı ve sıcaklıkta artış meydana gelebilir. Mıknatıslar üzerindeki aşırı ısı, mıknatısların manyetik özelliklerini geri dönüşü olmaksızın ortadan kaldırmaktadır. Bu nedenle, tercih edilen mıknatısın Curie sıcaklığının ve

maliyetinin tasarımcılar tarafından dikkate alınması gerekmektedir.

Eyleyicinin torku rotor mıknatısı ve stator sargısına bağlıdır. Rotor kısmında NdFeB tipi mıknatıslar torkun yüksek olmasına öncülük etmektedir. Stator kısmında ise sargıları konik biçimde tasarlanarak rotor çevrelenmiş dolayısıyla da mevcut alan etkin bir şekilde kullanımı amaçlanmıştır. Stator sargısının fiziksel parametrelerinin (sargı uzunluğu, sargı iç açısı ve sargı dış açısı) etkisini inceleyerek stator sargı uzunluğunun 5 mm, iç sargı açısı $14,03^\circ$ olarak ve dış açısı da $26,56^\circ$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen parametreler kullanılarak eyleyicinin manyetostatik analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen akı değerlerinin hedeflenen sınırlar içinde olduğu görülmüştür.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar

- Akbaba, M., Fakhro, S.Q., 1992. Field distribution and iron loss computation in reluctance augmented shaded-pole motors using finite element method. IEEE Transactions on Energy Conversion, 7(2), 302-307.
- Dai, M., Zhang, Y., Zeng, L., Zhu, Z., Sun, J., Zhang, F., 2018. Research on Bearing Characteristics of Air Gap Flow-field for a Maglev Spherical Motor. 4th International Conference on Control, Automation and Robotics, 296-300.
- Dalcalı, A., Akbaba, M., 2018. 3-D modeling and analysis of shaded pole motors using finite element method. International Conference on Advanced Technologies, Computer Engineering and Science, Safranbolu, 635-638.
- Dalcalı, A., Çelik, E., Ocak, C., 2012. Investigation of the Effects of Permanent Magnet Materials Used in Spherical Actuator Rotor on the Machine Torque Characteristic and Magnetic Flux Density. The European Workshop & Conference on Renewable Energy Systems, Antalya.
- Dalcalı, A., Ocak, C., 2018. Farklı Mıknatıs Malzemelerinin Yüzey Mıknatıslı Doğrudan Tahrikli Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Performansına Etkisi. III. International Rating Academy Congress on Applied Sciences, Lviv, Ukraine.
- Damlar, İ., Özyılmaz, E., Altan, A., Özyılmaz, E., 2014. Üç Boyutlu Sonlu Eleman Analiz Yöntemiyle İki Ticari İmplant Sisteminin Gerilme Dağılımlarının

- İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2(3), ÖS: BiyoMekanik2014, 175-180.
- Fernandes, J.F.P., Vieira, S.M., Branco, P.J.S., 2018. Multiobjective Optimization of a Shell-Like Induction Spherical Motor for a Power-Assisted Wheelchair. IEEE Transactions on Energy Conversion, 33(2), 660-669.
- Gürdal, O., Öner, Y., 2005. Sabit Mıknatıslı Demir Nüveli Küresel Eyleyicinin Bilgisayar Destekli 3 boyutlu Statik Manyetik Analizi ve Uygulaması. J. Fac. Eng. Arch. Gazi University, 20(4), 433-442.
- Ho, S.L., Fu, W.N., 1998. Review and future application of finite element methodes in induction motors. Electric Machines & Power Systems, 26(2), 111-125.
- Kim, H.Y., Kim, Y., Gweon, D.G., Jeong, J., 2015. Development of a Novel Spherical Actuator with Two Degrees of Freedom. Transaction on Magnetism, 20(2), 532-540.
- Kurt, Ü., 2006. Eksenel akıllı sürekli mıknatıslı senkron makineler için yeni tasarım modeli geliştirme. Doktora Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Türkiye.
- Li, H., Li, T., 2018. End-Effect Magnetic Field Analysis of the Halbach Array Permanent Magnet Spherical Motor. IEEE Transactions on Magnetism, 54(4).
- Li, Z., Wang, C., Lun, Q., Zhang, L., 2014. Design and electromagnetic analysis of a novel 3-DOF deflection type permanent magnet actuator. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), USA.
- Mhamad, A., Antonio, R., Michel, M., 2017. Finite element model of a dynamic spinal implant. Fourth International Conference on Advances in Biomedical Engineering, Lebanon.
- Öner, Y., 2005. A permanent magnet spherical rotor design and three dimensional static magnetic analysis. Sensors and Actuators A 137, 200-208.
- Öztürk, N., Dalcalı, A., Çelik, E., Sakar, S. 2017. Cogging torque reduction by optimal design of PM synchronous generator for wind turbines. International Journal of Hydrogen Energy, 42(28), 17593-17600.
- Rao, S.S., 2004. The Finite Element Method in Engineering. Elsevier Science & Technology Books, 4. basım.
- Vassiliou, M.F., Mackie, K.R., Stojadinovic, B., 2017. A finite element model for seismic response analysis of deformable rocking frames. Earthquake Engineering Structural Dynamics 46, 447-466.
- Wang, J., Jewell, G.W., Howe, D., 1998. Analysis, Design and Control of a Novel Spherical Permanent Magnet Actuator. Electric Power Applications, 145 (1), 61-71.
- Williams, F.C., Laithwaite, E.R., Eastham J.F., 1959. Development and Design of Spherical Induction Motors. Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering, 106 (30) 471-484.
- Yan, L., Chen, I.M., Lim C.K., Yang, G., Lee, K.M., 2011. Design, Modeling and Experiments of 3-DOF Electromagnetic Spherical Actuators, içinde (s. 21-88), Springer Science+Business Media B.V, Netherlands: Springer.
- Yan, L., Chen, I.M., Lim, C.K., Yang, G., Lin, W., Lee, K.M., 2009. Torque Modeling and Analysis of Spherical Actuators with Iron Stator. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 164-169.
- Yang, H., Xu, X., Neumann, I., 2018. Optimal finite element model with response surface methodology for concrete structures based on Terrestrial Laser Scanning technology. Composite Structures, 183, 2-6.
- Zhang, L., Yan, L., Chen, W., Liu, J., 2011. Current optimization of 3-DOF permanent magnet spherical motor. 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Beijing.