



**Alınış tarihi (Received):** 27.06.2018  
**Kabul tarihi (Accepted):** 09.11.2018

**Baş editor/Editors-in-Chief:** **Ebubekir ALTUNTAŞ**  
**Alan editörü/Area Editor:** **Zafer DOĞAN/Bülent TURAN**

## **Düşük Çözünürlüklü Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Step Motorun Manyetik Analizi**

**Engin Hüner<sup>a,\*</sup>**

<sup>a</sup>*Kırklareli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 39000, Kırklareli-Türkiye*

<sup>\*</sup>*Engin Hüner (engin.huner@klu.edu.tr), 05062954425*

**ÖZET:** Sanayide mekanik enerji ihtiyacı ile birlikte konum kontrolü de çok önemlidir. Konum kontrolü için mekaniksel çözümlerin yanı sıra step ve servo motor sistemleri de kullanılabilir. Hassas konum kontrolü gereken yerlerde servo sistemler kullanılmaktadır. Bununla birlikte servo sistemler yüksek maliyetlidir. Step motorlar ise daha düşük maliyetli olan ve günlük hayatımızda yazıcılar, tarayıcılar gibi birçok cihazda da kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada düşük çözünürlüklü eksenel akılı sürekli mıknatıslı step (EASMS) motor tasarımı ve manyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Tasarımda birbirine göre yarım kutup açısı kadar kaydırılmış iki rotoru bulunan ve her gerilim darbesinde bir tarafın aktif olduğu bir yapıya sahiptir. Tasarlanan EASSP motorun ANSYS firmasının Maxwell programı ile manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Manyetik analizler sonucunda hava aralığı ve stator ayak genişliği sırasıyla 2mm ve 4mm olarak optimize edilmiştir. Bununla birlikte analiz sonuçlarında nüve manyetik akı yoğunluğu 0,8-0,9 tesla düzeyindedir. Bu sonuçlar bize demir nüvede doyumun olmadığını göstermektedir. Ayrıca optimize edilen parametreler ile çıkış momenti incelendiğinde sinüsoidal yakın bir eğri elde edilmiştir. Dolayısıyla moment eğrisi bize EASMS motorun düzgün bir çıkış momentine sahip olduğunu gösterir.

**Anahtar Kelimeler – Eksenel Akılı, Step Motor, Sabit Mıknatıs**

## **Magnetic Analysis Of Low Resolution Axial Flux Permanent Magnet Stepper Motor**

**ABSTRACT:** The position control is also very important with mechanical energy needs in the industry. In addition to mechanical solutions for position control, step and servo motor systems can be used. Servo systems are used where precise position control is required. However, servo systems are costly. Step motors are also used in many devices such as printers and scanners in our daily life which are less costly. In this study, low resolution axial flux permanent magnet stepper (AFPMSP) motor design and magneto static analysis were performed. The design has a structure with two rotors shifted by half-pole angle relative to each other, with one side active at each pulse. The designed AFPMSP motor was analyzed magnetically via Maxwell program of ANSYS. As a result of the magnetic analysis, the air gap and stator slot width are optimized to 2mm and 4mm respectively. However, analysis result show the magnetic flux density of the iron core is 0.8-0.9 tesla. These results show us that there is no saturation in the iron core. Moreover, when the output torque is examined with optimized parameters, a curve close to sinusoidal is obtained. So the moment curve shows us that the AFPMSP motor has a smooth output torque.

**Keywords – Axial flux, Stepper motor, Permanent Magnet**

## 1. Giriş

Günümüzde sürekli mıknatıslı makineler üzerine yapılan çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. Genel olarak yapılan çalışmaları radyal akılı ve eksenel akılı elektrik makineleri olarak ikiye ayırabiliriz. Son 10 yıldır eksenel akılı sürekli mıknatıslı makineler ile ilgili de yapılan önemli çalışmalar vardır.

Eksenel akılı makineler disk şeklinde yapıya sahiptirler. Tek rotor tek stator veya çoklu disk yapıya sahip olabilirler. Genellikle eksenel düzlemde oluşan kuvvetleri dengelemek için tek stator çift rotor, tek rotor çift stator veya her ikisinin çoklu yapıları kullanılmaktadır. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı (EASM) makinelerin sağladıkları yüksek güç yoğunluğu, yüksek verimlilik ve kompakt yapısı nedeniyle birçok uygulamada prototip çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Çetin ve Daldaban, 2014). Bunlardan bazıları rüzgar türbinleri, (Hüner ve Ataözden, 2016) elektrikli araçlarda teker motor olarak kullanımı, (Joseph, 2017) pompalama sistemlerde kullanımı, genel tahrik makinesi olarak kullanımı olarak sıralayabiliriz.

Avantajlarının yanı sıra en büyük dezavantajı vuru momentinin olmasıdır. Vuru momentini sürekli mıknatıslar ile demir nüvenin olukları arasındaki etkileşimin sonucu ortaya çıkan moment dalgalanmalarıdır. Bunu önlemek için literatürde farklı yöntemler uygulanmıştır. Bunların bir kısmı rotor tarafında uygulanan teknikler, diğer bir kısmı da stator tarafında uygulanan tekniklerdir.

Stator tarafında uygulanan teknikler maliyet ve uygulama zorlukları nedeniyle pek tercih edilmezler. Rotor tarafında uygulanan teknikleri ise farklı mıknatıs şekilleri, mıknatıslara uygulanan kaykay teknikleri, rotor kaydırma, mıknatıslara açı verme, mıknatıs gruplama teknikleri olarak çeşitlendirebiliriz (Aydın ve ark, 2007).

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı makineler yapısı gereği kutup sayısının çok olması doğal olarak EASM makineleri rüzgar türbinleri için iyi bir aday haline getirmektedir. Bununla birlikte yapılan bu çalışmada özellikle son yıllarda konum kontrolünü sağlayan step ve servo motorların kullanım oranlarının artması nedeniyle EASM makinelerin konum kontrolü için iyi bir aday olduğu düşünülmektedir (Kanuch ve Ferkova, 2013). Bu nedenle basit bir yapıya sahip olan bir eksenel akılı sürekli mıknatıslı step (EASMSP) motorun tasarımı manyetik analizi ve optimizasyonu verilmiştir. Yapılan çalışmada ANSYS firmasının Maxwell programı ile tasarlanan EASMSP motorun manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir.

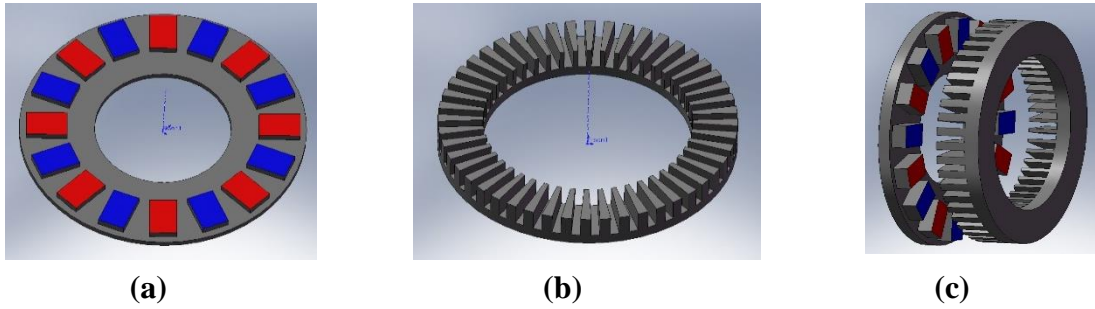
## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Eksenel Akılı Makineler

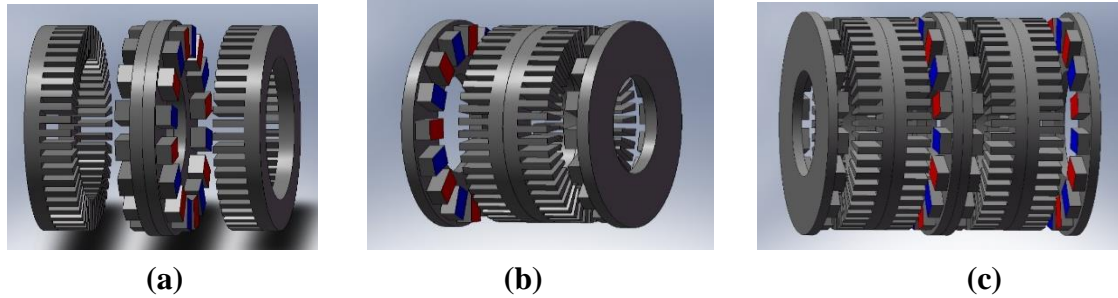
Eksenel akılı sürekli mıknatıslı makineler sağladıkları yüksek güç yoğunluğu ve kompakt yapısı ile birlikte yüksek verime sahiptirler (Husain ve ark, 2017). Genel yapıları disk şeklindedir. Şekil 1'de genel yapısı verilmiştir.

Şekil 1.a,b ve c'de sırasıyla EASM makinenin rotor, stator ve tam model verilmiştir. Şekil 1'de verilen EASM makine modeli tek taraflı en temel modeldir. Tek taraflı EASM makineler maruz kaldıkları eksenel kuvvetlerden dolayı pek tercih edilmezler. Bunun için çift rotor veya çift stator yapısı ve çoklu rotor-stator yapıları kullanılmaktadır. Şekil 2.a,b ve

c’de sırasıyla tek rotor çift stator (SRS), tek stator çift rotor (RSR) ve çoklu rotor-stator (ÇRS) yapısına sahip EASM makine yapısı verilmiştir.



**Şekil 1.** Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı makine a) Rotor b) Stator c) Tam Model  
**Figure 1.** Axial Flux Permanent Magnet machine a) Rotor b) Stator c) Full Model

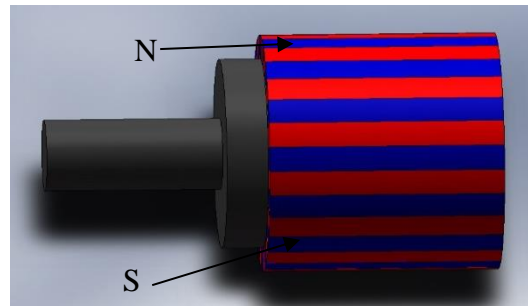


**Şekil 2.** EASM makine a) SRS b) RSR c) ÇRS  
**Figure 2.** AFPM machine a) SRS b) RSR c) DRS

## 2.2. Step Motorlar

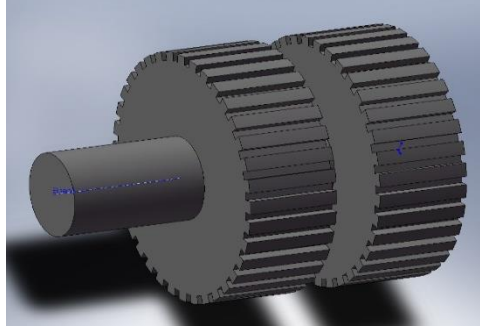
Step motorların (SM) hareketi adım adım gerçekleştiği için bu tip motorlara adım motorları da denilmektedir. SM’nin adım açısı yapısına bağlı olarak 90, 45, 18, 7.5, 1.8 derece olabilmektedir. Stator ve rotor olmak üzere temel iki parçası vardır. Basit bir yapıya sahip olmasının yanı sıra düşük maliyetli konum kontrolü sağlarlar.

Step motorların temel çalışma mantığı sargılara mikroişlemci ile uygulanan giriş palsine bağlı olarak sargıların sırayla devreye girmesine ve buna bağlı olarak rotorunda adımlar halinde hareket etmesine dayanmaktadır. Rotor yapısı sürekli mıknatıslı olarak ta yapılabilmektedir. Şekil 3’de sürekli mıknatıslı rotor yapısı verilmiştir.



**Şekil 3.** Sürekli mıknatıslı step motorun rotor yapısı  
**Figure 3.** Rotor structure of permanent magnet stepper motor

Bunun dışında rotorda birbirine göre kaydırılmış ayaklar kullanılarak ta açılı çözünürlüğü artırılabilir. Şekil 4’de verilen rotor yapısında birbirine göre rotor ayakları görülmektedir. Rotor üzerindeki ayakları oluşturan demir nüvenin orta kısmına yerleştirilen sürekli mıknatıs ile ayakların kutuplaşması sağlanmıştır. Dolayısıyla her iki ayağın açılma farkına göre step motorun adım sayısı artırılmış olmaktadır.



Şekil 4. Step motorun rotor yapısı

Figure 4. Rotor structure of stepper motor

### 2.3. Tasarımın 3D Katı Modeli ve Maxwell ile Manyetik Analizi

Yapılan çalışmada Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Step (EASMSP) motor tasarlanmıştır. Tasarlanan EASMSP motor ANSYS Maxwell ile analiz yapılarak hava aralığı ve ayak genişliği optimize edilmiştir. Bunun için öncelikle tasarım parametreleri belirlenmiştir. Tasarlanan EASMSP motorun elektriksel ve mekaniksel parametreleri Çizelge 1’de verilmiştir. Stator ayak sayısı, rotor kutup sayısı, rotor sayısı, stator sayısı ve adım açısı sırasıyla 12, 24, 2, 2 ve 7,50° dir.

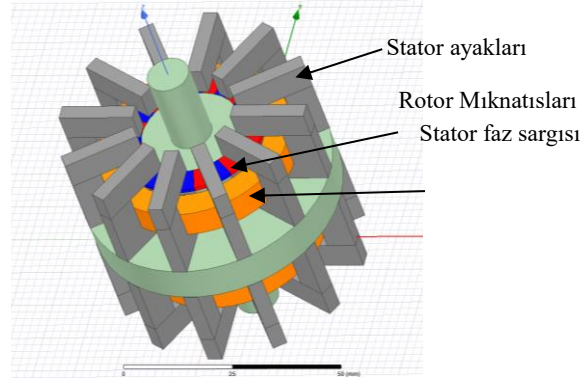
Çizelge 1. EASMSP motorun mekaniksel ve elektriksel parametreleri

Table 1. Mechanical and electrical parameters of the AFPMSP motor

Parametre	Değer
Stator Ayak Sayısı	12
Rotor kutup sayısı	24
Rotor sayısı	2
Stator sayısı	2
Adım açısı	360/48 (derece)
Sargı tipi	Toroidal iki faz
Stator dış çap	60 mm
Mıknatıs dış çap	35 mm
Mıknatıs yükseklik	1 mm
Mıknatıs tipi	NdFeBr
Mıknatıs yönlendirme	Eksenel
Stator ayak genişlik	4 mm
Sargı direnci	1,2 ohm

EASMS motorun Çizelge 1’e göre katı modeli Şekil 5’de verilmiştir. Stator ayakları C tipi demir nüveden oluşmaktadır. Stator toplam 12 ayaktan oluşmaktadır. Stator ayağının açık kısmının yarısı ise hava aralığını oluşturmaktadır. Statordaki sargı toroidal olup her bir ayakta kutuplaşma meydana getirmektedir. Toplam iki rotor, stator ve sargı vardır. Rotorlar birbirine göre yarım kutup uzunluğu kadar kaydırılmıştır.

3D katı modeli verilen EASMSP motorun çalışma mantığı birbirine göre kaydırılmış iki rotora dayanmaktadır. Birinci sargıya pals uygulandığında oluşan kutuplaşma ile stator ayaklarının arasında kalan kutuplar hareket etmektedir. Bu durumda ikinci kısımdaki rotor kutupları stator ayakları arasına doğru konum değiştirmektedir. Dolayısıyla birinci sargıya uygulanan palsin sonrasında ikinci sargıya pals uygulanarak hareketin devamı sağlanmaktadır. Bundan dolayı tasarımdaki EASMSP motor en az iki bölümlü yapıya gereksinim duymaktadır.



Şekil 5. Tasarlanan EASMSP motor

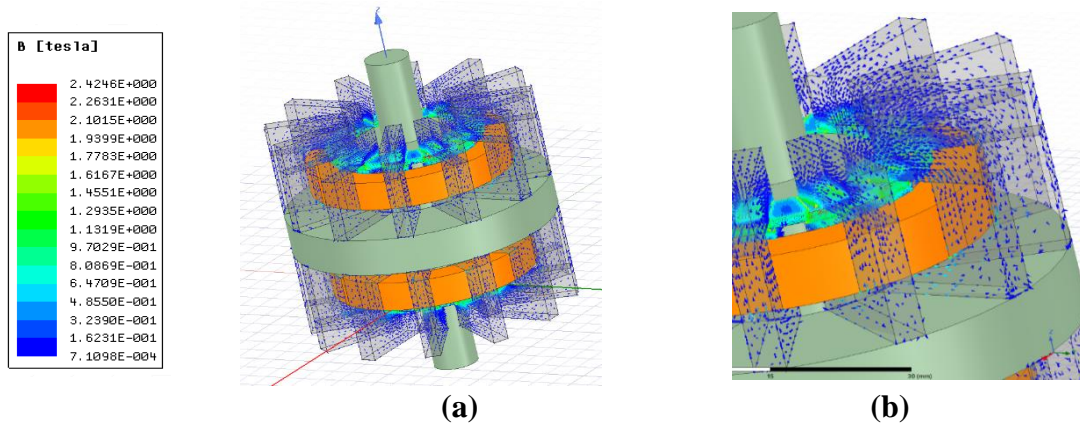
Figure 5. Designed of the AFPMSP engine

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Tasarımın Manyetik Analizi

Tasarımın ANSYS Maxwell ile manyetik analizleri Şekil 5’de verilen 3D katı model üzerinde gerçekleştirilmiştir. Manyetik analizlerde 67amper-sarımın sargılara uygulanması ile analiz sonuçları alınmıştır. Rotorda toplam birbirine bitişik 24 adet NdFeBr mıknatıs modellenmiştir. Kullanılan mıknatıslar programın kütüphanesinde olan N35 tipi neodyum mıknatıslardır. Şekil 6.a’da EASMSP motorun rotor ve statorundaki akı dağılımı verilmiştir.

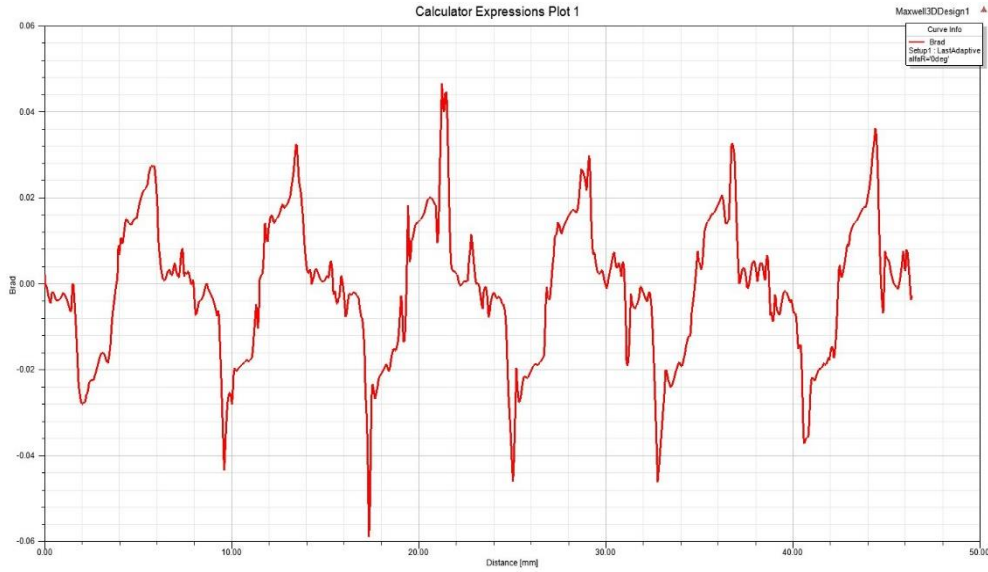
Şekil 6.b’de ise yarı model için akı dağılımı görülmektedir. Şekil 6.b’den görüldüğü üzere nüve ayaklarında doyum yoktur. Manyetik akı yoğunluğu da 0,8-0,9 tesla civarındadır. Kullanılan demir nüvenin manyetik alan şiddetine bağlı manyetik akı yoğunluğunun değişimini veren histerezis (BH) eğrisinde doyum noktası 1,7 tesla civarındadır. Dolayısıyla uygulanan amper-sarım miktarının nüveyi doyuma götürmediği söylenebilir.



Şekil 6. EASMSP motorun manyetik akı dağılımı a) Tam Model b) ¼ Model

Figure 6. Magnetic flux distribution of the AFPMSP engine a) Full Model b) ¼ Model

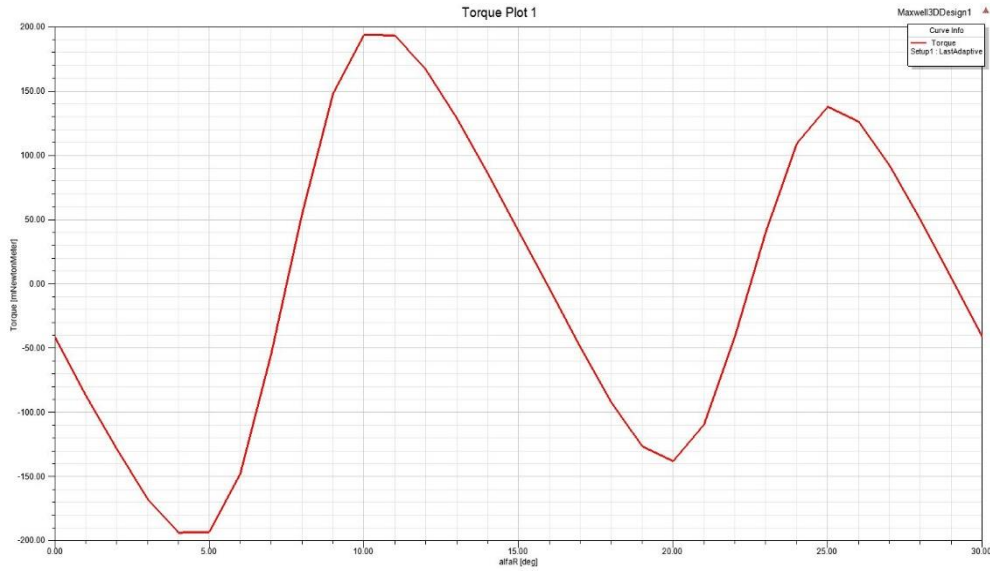
Şekil 7’de ise hava aralığında alınan kontur boyunca akı değişimleri incelenmiştir. Değişim eğrisi incelendiğinde dalgalanmalar göz önünde tutulmazsa hava aralığı akısının sinüsoidale benzediği görülebilir.



**Şekil 7.** EASMSP motorun kontur botunca manyetik akı dağılımı

*Figure 7. Magnetic flux distribution of the AFPMSM motor along the contour*

Şekil 8’de ise EASMSP motorun momentinin açısal değişimi verilmiştir. EASMSP motorun çıkış momentinin açıya bağlı olarak sinüsoidale yakın olması düzgün bir momente sahip olduğunu bize gösterir.



**Şekil 8.** EASMSP motorun moment değişimi

*Figure 8. The moment curve of the AFPMSM Motor*

EASMSP motorun hava aralığı ve ayak genişliği değişimine bağlı manyetik akı yoğunluğu değişimi Çizelge 2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.** EASMSP motorun hava aralığı ve ayak genişliği değişimine bağlı manyetik akı yoğunluğu değişimi

**Table 2.** The motor of AFPMSP magnetic flux density change connected with air gap and foot width change

Hava aralığı (mm) / Ayak genişliği (mm)	3,5	4	4,5
2	0.359608472435595	0.365240960511757	0.374336402669131
2,4	0.306186202328256	0.309130566890288	0.313729765530545
2,8	0.265510626808453	0.267207984437115	0.269855352990601
3,2	0.233322547754768	0.234269725929881	0.235798018655816
3,6	0.20865588930758	0.20927110314651	0.210185358789295
4	0.187738392621443	0.188145275552273	0.188602099187719

Kutupların iç yay uzunluğu 69,08 mm'dir. Bu durumda bir kutup yay uzunluğu 2,87 mm olur. İki ayak arasında kalan mesafe ise ayak genişliğinin 3,5 – 4 – 4,5 mm olması durumunda sırasıyla 2,25 – 1,75 – 1,25 mm olarak hesaplanmıştır. İki ayak arasında kalan mesafenin kutup yay uzunluğunu geçmeyen değer alınması durumunda sargıya uygulanan gerilim darbeleri ile daha kolay konum değişikliği ve düşük moment dalgalanmaları olacağı belirgindir. Bundan dolayı 3,5 veya 4 mm ayak genişliği seçilebilir.

#### 4. Sonuç

Yapılan bu çalışmada EASMSP motorun ANSYS Maxwell ile manyetik analizleri ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Son yıllarda konum kontrollü ucuz maliyetli motorlara duyulan ihtiyaç artmıştır. Bu bağlamda analizleri yapılan EASMSP motor basit yapısı ile hassas konum kontrolü gerekmeyen yerlerde kullanımı uygundur. Yapılan analiz sonuçlarında nüvedeki manyetik akı yoğunluğu en çok 0,8-0,9 tesla civarındadır. Bu da bize doyum noktasının 1,7 tesla civarında olan nüvenin uygun olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte hava aralığındaki manyetik akı dağılımı ve açığa bağlı moment değişiminin tutarlı olduğu görülmektedir. Hava aralığındaki manyetik akı dağılımı ne kadar sinüsoidale benzerse moment değişimi de o kadar düzgün çıkmaktadır.

Ayrıca hava aralığının ve ayak genişliğinin değişim değerleri Maxwell'den alınarak optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Hava aralığı manyetik akı değeri 0,3 tesla ve yukarı değerleri için baktığımızda hava aralığının 2 ve 2,4 mm, ayak genişliğinin ise 3,5-4,5 değerleri arasının uygun olduğu görülmektedir. Kutup yay uzunlukları göz önünde tutularak adım hareketleri düşünüldüğünde ise ayak genişliğinin 3,5 veya 4 mm alınması uygundur. Dolayısıyla yapılan bu çalışmada hava aralığı maksimum manyetik akı yoğunluğu için 2 mm hava aralığı ve 4 mm ayak genişliği değerleri için 0,365240960 tesla, ayak genişliğinin 4,5 mm olması durumunda ise 0,374336402 tesla olduğu görülmektedir. Ayak genişliği 4,5 mm olması durumunda iki ayak arasında kalan mesafe 15,08 mm'dir. Buda mıknatısın %56,34'lük kısmının ayaklara hizalandığını göstermektedir. Ayak genişliği 4 mm seçildiğinde ise iki ayak arasında kalan mesafe 21,08 mm'dir. Buda mıknatısın %38,96'lık kısmının ayaklara hizalandığını belirtmektedir. Tasarlanan eksenel akı step motorun her bir adım hareketinde tutucu momentin oluşması için mıknatısın bir kutbunun ya iki nüve ayağının ortasında olması ya da bir nüve ayağını ortalaması gerekmektedir. Bundan dolayı

optimum değer olarak ayak genişliği de 4 mm olarak seçilmiştir. Dolayısıyla 2 mm hava aralığı ve 4 mm ayak genişliği optimum değerler olarak seçilmiştir.

## Kaynaklar

- Aydin, M., Zhu, Z.Q., Lipo, T.A., Howe, D., 2007. Transaction on Magnetics, Minimization of Cogging Torque in Axial Flux Permanent Magnet Machines. Design Concept, 43, 3614-3622.
- Çetin, E., Daldaban, F., 2014. 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Otomotiv Uygulamalarında Kullanılacak Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı BLDC Motor Tasarım Modeli, OTEKON'14, 26-27 Mayıs, Bursa.
- Husain, T., Tekgun, B., Sozer, Y., Hamdan, M., 2017. Comparison of axial flux machine performance with different rotor and stator configurations, . Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 21-24 May, Miami, Florida, USA.
- Hüner, E., Ataözden, Y., 2016. Küçük Güçlü Rüzgar Türbinleri İçin 3d SEY Programı ile IPMS Alternatörün Elektromanyetik Tasarımı ve Analizi, Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 2(2), 60-73
- Joseph, J.J., 2017. Minimization of Cogging Torque in Axial Flux Permanent Magnet Brushless Motor with Certain Design, Journal of Electrical Engineering, 17.
- Kanuch, J., Ferkova, Z., 2013. Design and simulation of disk stepper motor with permanent magnets, Archives of Electrical Engineering, 62(2), 281-288.