

Sürekli Mıknatıslı AC Servomotor Tasarımında Radyel ve Paralel Mıknatıslamanın Motor Performansına Etkisi

Influence of Radial and Parallel Magnetization on the Design of Permanent Magnet AC Servomotors

Yücel Demir¹, Oğuzhan Ocak² ve Metin Aydın³

¹Ar-Ge Departmanı, MDS Motor Tasarımı Ltd.
Kocaeli Üniversitesi, Teknopark Kampüsü, İzmit, Kocaeli
yucel@mdsmotor.com

²Arge Departmanı, Akım Metal San. ve Tic. A. Ş.
İstanbul Anadolu Yakası Organize San. Bölge, Tuzla, İstanbul
oocak@akimmetal.com.tr

³Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe Yerleşkesi, İzmit, Kocaeli
metin.aydin@kocaeli.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, sürekli mıknatıslı AC servomotorlarda mıknatıslama yönünün motor performansına etkisi incelenmiştir. Vuruntu momenti, moment kalitesi ve zıt-EMK gibi unsurların sürekli mıknatıslı servomotorların performansına olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca paralel ve radyel mıknatıslama durumları için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Analiz sonuçları doğrultusunda sürekli mıknatıslı bir prototip üretilmiştir ve deneysel olarak doğrulanmıştır.

Abstract

In this paper, influence of parallel and radial magnetization on the performance of permanent magnet AC servomotors is examined. Some of facts as cogging torque, torque quality and back-EMF on the performance of permanent magnet AC servomotors are studied. In addition, the analyses in the motor with parallel and radial magnetization are also compared. Also, the prototype of the motor is manufactured and motor performance is verified experimentally.

1. Giriş

Sürekli mıknatıslı servomotorlar günümüzde enerji verimliliğinin de önem kazanması ile birçok uygulamada kullanılmaya başlanmıştır. Bu motorlar, AC asenkron ya da DC motorların kullanılamayacağı çok sayıda uygulamada, yüksek verim, düşük hacim ve ağırlık, yüksek moment/hacim ve moment/ağırlık oranlarının fazla olması nedeniyle sıkça kullanılmaya başlanmıştır [1-2].

Sürekli mıknatıslı standart AC servomotorların tasarımı, tüm dünyada birçok firma tarafından belirli güç ve hızlarda

yapılmaktadır. Standart dışı, kesir oluklu sürekli mıknatıslı motorların tasarımı ise uzmanlık gerektiren, motor yapısına bağlı olarak denklemleri farklılaşan, modelleme ve sonlu elemanlar analizi (SEA) gibi analizlere ihtiyaç duyulan yapılardır. Bu motorların tasarımlarının yanında belirli kritik fiziksel motor parametreleri sayesinde servomotorlardan maksimum performans elde etmek mümkündür. Bu parametreler arasında oluk açıklığı, mıknatıs kalınlığı, mıknatıslama yönü, besleme akım dalga şekli, bakır dolgu faktörü gibi parametreler bulunmaktadır.

Bu çalışmada, hem standart hemde standart dışı sürekli mıknatıslı senkron motorlarda (SMSM) mıknatıslama yönünün motor performansına etkisi incelenmiştir. Üretilebilirlik, moment kalitesi, zıt-EMK kalitesi gibi unsurların sürekli mıknatıslı servomotorların performansına etkisi incelenmiş ve analizlerle karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Sürekli mıknatıslı bir prototip tasarlanarak üretimi gerçekleştirilmiştir ve deneysel olarak doğrulanacaktır.

2. Sürekli Mıknatıslı Servomotor Tasarımı

Bir sürekli mıknatıslı AC servomotorda stator kaçak endüktansı ve direnci ihmal edilirse çıkış gücü

$$P_R = \eta m K_p E_{PK} I_{PK} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $e(t)$ ve E_{pk} hava aralığı faz EMF si ve tepe değeridir. Benzer şekilde I_{pk} faz akımı tepe değeri, η motor verimi, m faz sayısı olarak tanımlanmıştır. Denklemdaki K_p katsayısı elektriksel güç katsayısı olarak hesaplanmaktadır.

Hava aralığı faz EMF sinin tepe değeri sürekli mıknatıslı motorlar için denklem (4) de verilmiştir.

$$E_{PK} = K_e N_t B_g \frac{f}{p} \lambda_o D_o L_e \quad (4)$$

Burada K_e EMF faktörü, N_t sarım sayısı, B_g hava aralığı akı yoğunluğu, f frekans, p kutup çifti, λ_o ise çap oranı olarak tanımlanır. Çap oranı servomotorun fiziksel boyutlarını belirleyen en önemli parametredir ve rotor çapının stator dış çapına oranı olarak tanımlanır. D_o hava aralığı çapı, L_e ise motorun paket boyu olarak tanımlanmıştır.

Tasarım denklemlerindeki faz akımının tepe değeri ise motor fiziksel boyutların fonksiyonu olmasının yanında, toplam elektriksel yüklemenin (A) de fonksiyonudur.

$$I_{PK} = K_i A \pi \lambda_o \frac{D_o}{2 m_1 N_t} \quad (5)$$

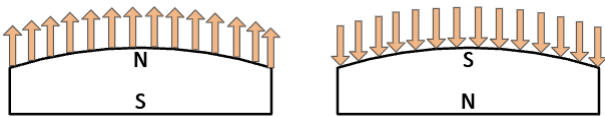
Bu denklemler birleştirilirse, sürekli mıknatıslı servomotorların çıkış gücü ya da mil momenti kolaylıkla elde edilir:

$$P_R = \frac{\pi}{2} K_e K_i K_p \eta B_g A \frac{f}{p} \lambda_o^2 D_o^2 L_e \quad (6)$$

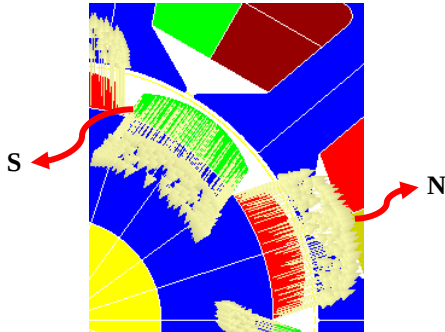
Bu denklemler kullanılarak servomotor ön tasarımı maksimum moment yada güç yoğunluğu için elde edilebilmektedir.

3. Radyel ve Paralel Mıknatıslama

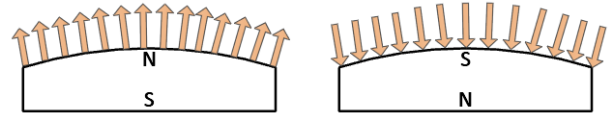
Mıknatısları rotor yüzeyine yapıştırılmış sürekli mıknatıslı motorlarda mıknatıslama yönleri genelde iki farklı şekilde olmaktadır. Şekil 1'de paralel mıknatıslamaya, Şekil 3'de ise radyel mıknatıslamaya bir örnek verilmiştir. Şekil 2'de sonlu eleman analizinde (SEA) kullanılan motordaki paralel mıknatıslama yönleri gösterilmiştir. Şekil 4'de ise yine bu çalışmada SEA'da kullanılan motorun radyel mıknatıslama yönleri verilmiştir.



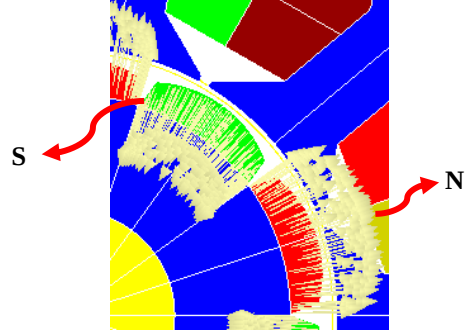
Şekil 1: Paralel şekilde mıknatıslama örneği



Şekil 2: Paralel şekilde mıknatıslı motor SEA modeli



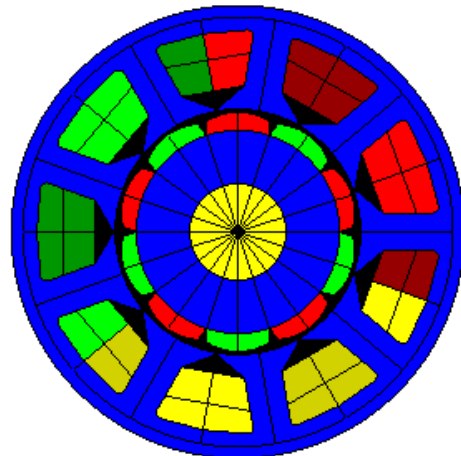
Şekil 3: Radyel şekilde mıknatıslama örneği



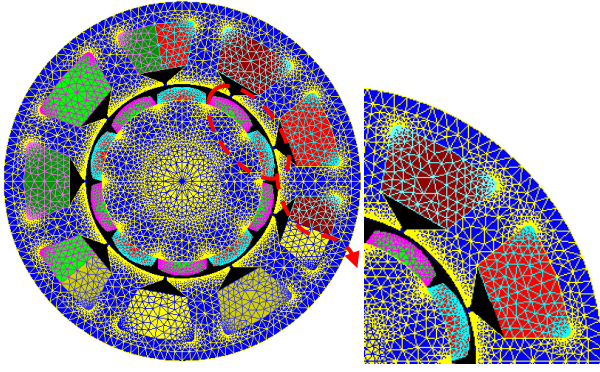
Şekil 4: Radyel şekilde mıknatıslı motor SEA modeli

4. Elektromanyetik SEA

Bu bölümde, çalışmada kullanılan servomotorun detaylı elektromanyetik SEA Flux-2D yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Şekil 5'de motorun SEA modeli ve Şekil 6'da ise motorun tamamına ve 2 kutbuna odaklanmış kısmının ağ yapısı verilmiştir. Elektrik motorlarında tüm enerji dönüşümü hava aralığında gerçekleştiği için, hava aralığında ve kritik objelerde ağ yapısı iyileştirilmiş, hava aralığındaki hesaplama hassasiyetini artırmak için katmanlar artırılmıştır. Ağ yapısına dikkatli bakıldığında elektromekanik enerji dönüşümünün gerçekleştiği hava aralığında ağ yapısının daha hassas olduğu gözlenecektir. Manyetik devrede akan akının çok yüksek seviyelere çıkmadığı veya akı yoğunluğunun düşük olduğu bölgelerde ağ yapısının hassas olmasına gerek yoktur. Bu önemli noktalar kullanılan ağ yapısından da rahatlıkla görülebilir. Bu analizlerdeki ağ yapısında 22244 adet üçgen ve 44551 adet düğüm ile yaklaşık 5 dakikada sonuca ulaşılmıştır.

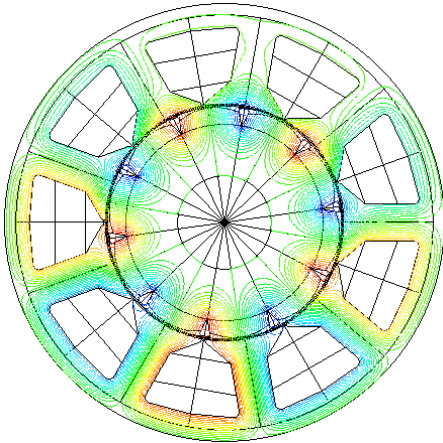


Şekil 5: Motorun SEA modeli (FEA)

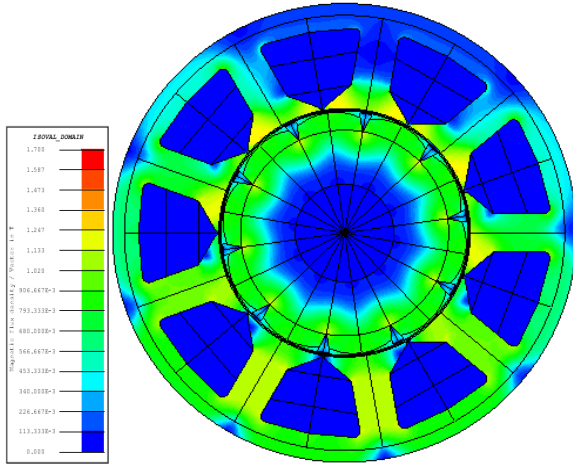


Şekil 6: Motorun tamamına ve 2 kutba odaklanmış kısmına ait ağ yapısı

Şekil 7'de motorun stator ve rotordaki yüksüz durum akı çizgileri ve akı yönü verilmiştir. Görüldüğü gibi N mıknatıstan çıkan akı, hava aralığını geçerek statora ulaşmakta, stator dişlerinden devam ederek stator tepesindeki nüveye girip, buradan da stator dişi, hava aralığı ve S mıknatıs üzerinden devresini tamamlamaktadır. Şekil 8'de ise yüksüz durumda motorun farklı bölgelerinde elde edilen akı yoğunlukları gösterilmiştir.

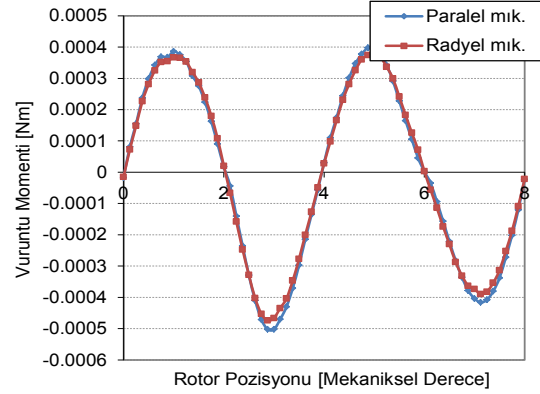


Şekil 7: Motorun yüksüz durum manyetik akı çizgileri



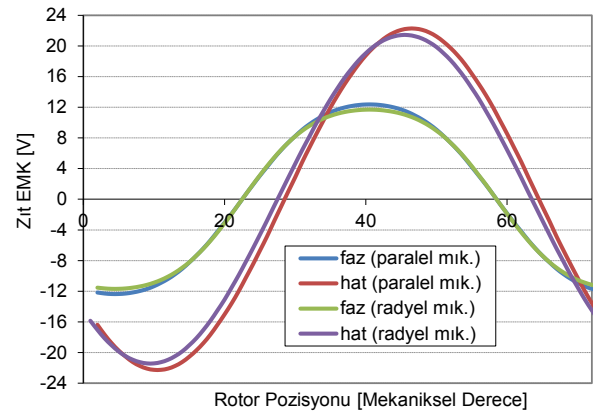
Şekil 8: Motorun yüksüz durum akı yoğunluğu

Motorun paralel ve radyel yönde mıknatıslanması durumunda vurutu momentinin değişimi Şekil 9'da görüldüğü gibidir. Vuruntu momenti değeri her iki durumda da anma momenti değerine göre çok düşük seviyededir. Vuruntu momenti, paralel mıknatıslamada ortalama momentin %0.017'si, radyel mıknatıslamada da ortalama momentin %0.016'sına eşittir. Ayrıca her iki durum için de elde edilen bu değerlerin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

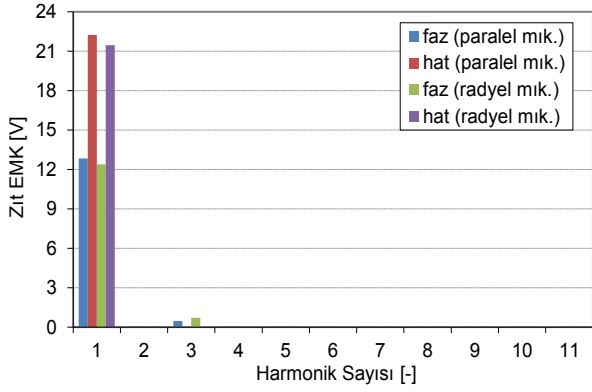


Şekil 9: Servomotor vurutu momenti değişimi

500rpm hız için paralel ve radyel yönlü mıknatıslanmış modellerin faz ve hat gerilimi dalga şekilleri Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu grafikten görüleceği üzere paralel ya da radyel mıknatıslamada hat gerilimi sinüzoidal dalga şekline sahiptir ve paralel durumdaki hat gerilimi tepe değeri 22.25V, radyel durumdaki ise 21.41V'dur. Paralel mıknatıslanmış yapılarda temel harmoniğin tepe değeri radyel mıknatıslı yapılara göre %3.8 fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca yapılara ait faz ve hat gerilimi FFT'leri alınmış ve Şekil 11'de harmonikleri gösterilmiştir. İki farklı durum için de faz geriliminde 3. harmonik görülürken, hat gerilimleri için harmonik görülmemektedir.



Şekil 10: 500rpm hızdaki faz ve hat gerilimi değişimleri



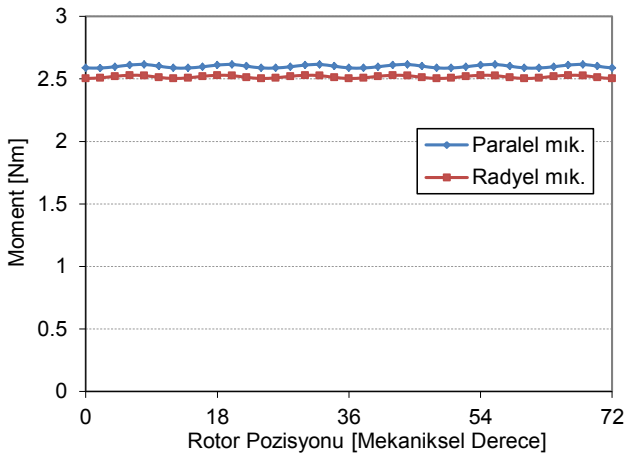
Şekil 11: 500rpm hızdaki faz ve hat gerilimi harmonikleri

Maksimum moment noktasını belirlemek amacıyla her iki durumdaki yapıların sargılarına (5.1Arms) uygulanması durumunda bulunan maksimum moment noktası için elde edilen çıkış momenti dalga şekilleri Şekil 12’de görülmektedir. Çıkış momentinin ortalama değeri paralel yönlü mıknatıslama için 2.6Nm, radyel yönlü mıknatıslama için ise 2.52Nm’dir. Ayrıca moment dalgalanması paralel yönlü olan yapıda ortalama momentin %1.11’i, radyel yapıda ise %1 mertebelerindedir.

Elektromanyetik analizi yapılarak, motor performansına olan etkisi incelenen paralel ve radyel mıknatıslama sonucu elde edilen SEA sonuçları Çizelge 1’de karşılaştırılarak verilmiştir.

Çizelge 1: Her iki yapının karşılaştırılması

	Paralel Mıknatıslı	Radyel Mıknatıslı	% Fark
Zıt-EMK temel harmonik	22.24V	21.45V	3.6
Vuruntu Momenti	0.00039Nm	0.00037Nm	6.2
Ortalama moment	2.6Nm	2.52Nm	3.2
Moment dalgalanması	1.105Nm	0.999Nm	9.5



Şekil 12: Çıkış momenti değişimi

5. Prototip Motor ve Deneysel Sonuçlar

Yapılan analizler sonucu sürekli mıknatıslı bir motor tasarlanarak, motor üretilmiştir. Üretilen prototipin rotor yapısı Şekil 13’de gösterilmiştir.

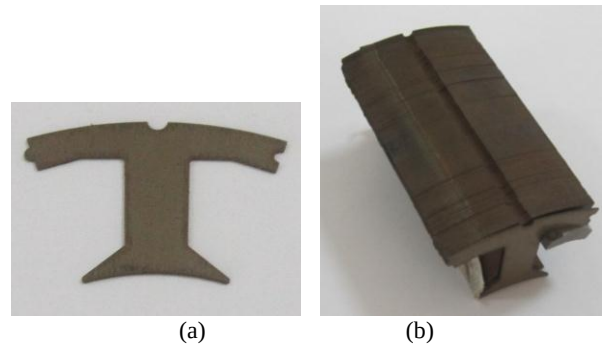


Şekil 13: Rotor yapısı

Prototipte kullanılan stator, segmentli bir yapıdan oluşmaktadır. Segment saclarını bir araya getirmek için yapılan master Şekil 14’de gösterilmiştir. Sacların kesimi için ise tel erezyon kullanılmıştır. Tek bir stator segmenti sacı ve bu sacların oluşturduğu stator segment paketi Şekil 15’de gösterilmiştir.



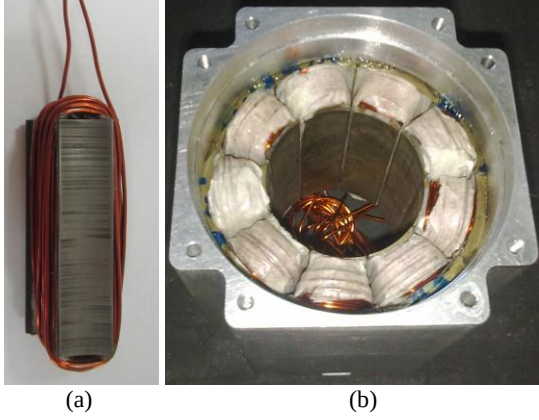
Şekil 14: Segment saclarını bir araya getirmede kullanılan master



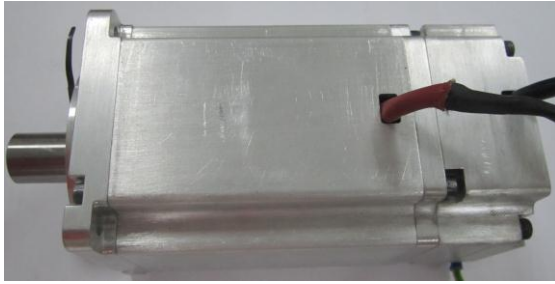
Şekil 15: (a) Tek bir stator segmenti sacı ve (b) stator segment paketi

Sarımı yapılmış bir adet stator segmenti ve sarımları tamamlanmış stator segmentlerinin gövdeye monte edilmiş hali Şekil 16’ dan görüldüğü gibidir. Ayrıca motorun tamamının montajının yapılarak bir araya getirilmiş hali Şekil

17' de gösterilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen prototip motoru endüstriyel bir sürücü kullanılarak çalıştırılmış ve herhangi bir problemle karşılaşmadan 5000rpm hıza kadar çıkarılmıştır. Motora ait vuruğu momenti, zıt EMK gibi parametreler için testler gerçekleştirilecek ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırmaları yapılacaktır.

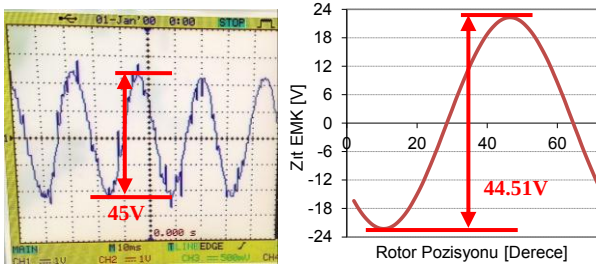


Şekil 16: (a) Sarımı yapılmış tek bir stator segmenti ve (b) statorun gövdeye yerleştirilmiş hali



Şekil 17: Üretimi gerçekleştirilen prototip motoru

Şekil 18'de, 500rpm hızda deneysel olarak elde edilen zıt EMK hat gerilimi ile elektromanyetik SEA sonuçları karşılaştırılarak gösterilmiştir. Her iki şekil de incelendiğinde, zıt EMK hat geriliminin tepeden tepeye değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu da yapılan SEA (44.51V) ile deneysel sonucun (45V) yaklaşık %1.1 hata ile doğru olarak hesaplandığını göstermektedir.



Şekil 18: 500rpm'de zıt-EMK deneysel ve analiz sonuçları

6. Sonuçlar

Bu çalışmada mıknatısları rotor yüzeyine yapıştırılmış sürekli mıknatıslı AC ve DC servomotorlarda mıknatıslamanın motor performansına etkisi incelenmiştir. Mıknatısların radyel veya paralel olması durumunda motor zıt-EMK sınıfı nasıl değiştiği, motor moment kalitesine ve ortalama momente bu mıknatıslama yöntemlerinin etkisi incelenmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizlerinden paralel mıknatıslı yapıların ortalama momenti %3.1 oranında daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca paralel mıknatıslamayla üretilen mıknatıslar kullanılarak segmentli stator yapısına sahip prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Motora ait ilk testler tamamlanmış, simülasyon sonuçları ile deneysel veriler arasındaki uyum karşılaştırılarak gösterilmiştir.

7. Kaynaklar

- [1] Sebastian, G. R. Slemon and M. A. Rahman, "Design considerations for variable speed permanent magnet motors", *Proceedings of International Conference on Electrical Machines (ICEM)* 1986, pp.1099-1102
- [2] S. Huang, M. Aydin and T. A. Lipo, "A direct approach to electrical machine performance evaluation: Torque density assessment and sizing optimization", *15th International Conference on Electrical Machine ICEM* 2002, Belgium.
- [3] M. Aydin, S. Huang and T. A. Lipo, "Design and electromagnetic field analysis of non-slotted and slotted TORUS type axial flux surface mounted disc machines", *IEEE International Conference on Electrical Machines and Drives*, Boston, 2001, pp.645-651.
- [4] M. Aydin, "Özel Uygulamalar İçin DC ve AC Sürekli Mıknatıslı Motorların Optimum Elektromanyetik Tasarımı", *ELECO* 2008, Bursa, EMO Yayın SK/2008/6TK, pp.267-271.

8. Teşekkür

Yazarlar elektromanyetik yazılım desteği sağlayan Cedrat Co. ve MDS Motor'a ve prototip üretiminde desteklerinden dolayı Akım Metal A.Ş.'ye teşekkürlerini sunar.