

**FARKLI MIKNATIS MALZEMELERİNİN YÜZEY MIKNATISLI  
DOĞRUDAN TAHRİKLİ SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTOR  
PERFORMANSINA ETKİSİ\***

**EFFECT OF DIFFERENT MAGNET MATERIALS ON THE PERFORMANCE  
OF SURFACE MOUNTED DIRECT DRIVE PMSM**

**Adem DALCALI**

Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi

E-mail: [adalcali@bandirma.edu.tr](mailto:adalcali@bandirma.edu.tr)

**Cemil OCAK**

Gazi Üniversitesi

E-mail: [cemilocak@gazi.edu.tr](mailto:cemilocak@gazi.edu.tr)

MAKALE BİLGİSİ	ÖZET
<p><b>Anahtar Kelimeler:</b> Sabit mıknatıslı senkron motor, sonlu elemanlar analizi, verim, çıkış gücü.</p> <p><b>DOI:</b> 10.26809/joa.2018548632</p>	<p>Bu çalışmada, 5,5 kW gücünde 22 kutuplu doğrudan tahrikli yüzey yerleştirmeli sabit mıknatıslı senkron motorun (SMSM) tasarımı, analizi ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Analitik tasarım aşamasını geçen motorun sonlu elemanlar analizleri için 3 boyutlu modeli oluşturulmuştur. Nadir toprak elementleri tarafından kolayca üretilebilen farklı sabit mıknatıs malzemeleri (Alnico, Seramik, SmCo, NdFeB) kullanılarak motorun vuruş torku, çıkış gücü, verim ve maksimum çıkış gücü parametreleri incelenmiştir. Yapılan analizlerde, N50m tipi mıknatıs malzemesinde en iyi verim ve maksimum çıkış gücü değeri elde edilmiştir. Ayrıca, en düşük vuruş torku Alnico5 tipi mıknatıs malzeme ile elde edilmiştir.</p>

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><b>Keywords:</b> Permanent magnet synchronous motor, finite element analysis, efficiency, output power.</p> <p><b>DOI:</b> 10.26809/joa.2018548632</p>	<p>In the present study, a 5.5 kW, 22 pole direct drive surface mounted PM synchronous motor (PMSM) has been designed, analyzed and optimized. After an initial design stage, a 3D model of the motor has been created for the finite element analysis. Cogging torque, output power, efficiency and maximum output power parameters have been analyzed for various material of PM magnets (Alnico, Ceramic, SmCo, NdFeB), which can be produced easily by rare-earth elements. In the performed analyzes, the best efficiency and the maximum output power value has been obtained on the N50m type magnet material. Furthermore, the lowest cogging torque has been obtained with an Alnico5 type magnet material.</p>

\*Bu çalışma, 6-7 Eylül 2018 tarihlerinde Lviv /UKRAYNA' da gerçekleşen 3. Uluslararası Rating Academy Kongresi: "Uygulamalı Bilimler" konulu kongrede sunulmuş aynı isimli bildirinin gözden geçirilmiş halidir.

## **1. GİRİŞ**

Sabit mıknatıslı senkron motorların (SMSM) tasarımında elektriksel iletken, yumuşak manyetik malzeme, yalıtkan ve sabit mıknatıs malzemeleri kullanılır. Yumuşak manyetik malzemeler makinanın manyetik devresini oluşturduğundan bu malzemelerin yüksek geçirgenliğe, yüksek doyum özelliğine ve düşük nüve kaybına sahip olması arzu edilir. Makinalarda kullanılan manyetik malzemelerin manyetik devre relüktansını azaltması için manyetik geçirgenliğinin yüksek, demir hacmini ve ağırlığını azaltmak için doyma akı yoğunluğunun yüksek ve verimi etkileyip sıcaklığı arttırdığından kayıplarının düşük olması istenir (Gürdal, 2001).

SMSM yüksek güç ve tork yoğunluğuna sahip olup endüstride birçok uygulama alanında tercih edilirler (Jeong ve diğ., 2017; Athavale ve diğ., 2017). SMSM'lar pek çok uygulamada dişli kutusuna gerek duymadan düşük hızlarda direkt sürülebilen motorlardır (Zhou ve diğ., 2017). Bu motorlarda rotor manyetik alanı sabit mıknatıslar tarafından sağlandığından rotor bakır kayıpları yoktur ve bu durum motor veriminin yüksek olmasına öncülük etmektedir. Nadir toprak içeren kalıcı mıknatıslar özellikle verimlilik ve yüksek akı yoğunluğu istenen SMSM'da sıklıkla kullanılırlar. Bu avantajlarına rağmen nadir toprak kaynakların sınırlı arz ve yüksek maliyet gibi ciddi problemleri mevcuttur (Jeong ve Hur, 2017). Sabit mıknatısların etkisini incelemek amacıyla yapılan çalışmada rüzgâr türbinlerinde kullanılmak üzere yüzey yerleştirmeli dıştan rotorlu senkron generatör tasarımı gerçekleştirilmiş ve düşük hızlı rüzgâr türbinlerinde NdFeB tipi mıknatısın uygun seçim olacağını tespit edilmiştir (Htet ve diğ., 2018). Mıknatısın etkisinin incelendiği diğer bir çalışmada SMSM'da sabit mıknatıslarda meydana gelen girdap akım kayıplarına etkisi incelenmiş ve rotorda nispeten düşük ısı yayılımı olduğundan mıknatıslarda meydana gelen ısının NdFeB tipi mıknatıslarda bölgesel geri dönüşümsüz demanyetizasyona neden olduğunu belirlenmiştir (Chu ve diğ., 2015).

Bu çalışmada farklı mıknatıs malzemeleri kullanarak 22 kutuplu senkron motorun verim, çıkış gücü, vuruş torku ve maksimum çıkış gücünün mıknatıs malzemesi ile olan değişimleri analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen yapının manyetik davranışı incelenmesi amacıyla en iyi verim değerini veren N50m tipi mıknatıs tipinde 3 boyutlu motor modeli oluşturularak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

## **2. SABİT MIKNATISLARIN YAPISI VE ETKİLERİ**

Sabit mıknatıslar, bir manyetik devrenin hava aralığına devamlı bir enerji kaybı olmaksızın akı verme yeteneğine sahiptirler. İlk üretilen mıknatıslarda, manyetik özellikler yöne bağlı olmadığından tüm yönlerde mıknatısların özellikleri benzerdi. Eş yönlü olarak adlandırılan bu durum daha küçük kalıcı mıknatısiyet ve enerji üretimi anlamına geldiğinden oldukça pahalı olan malzemelerin verimsiz olarak kullanılması demektir. Yapılan çalışmalarda, manyetik özelliklerin belirli bir yönde yoğunlaştırılması ile mıknatısların daha etkin kullanımı sağlanmıştır. Sabit mıknatıslar elektrikli araçlarda, maglev trenlerde, elektronik ev eşyalarında, elektromekanik cihazlarda, veri depolama cihazlarında ve biyomedikal aletlerinde alan kaynağı olarak kullanılırlar (Peng ve diğ., 2017; Lee ve diğ., 2018; Yang ve diğ., 2017).

Endüstride birçok tipe sabit mıknatıs malzemesi mevcuttur. Sabit mıknatıslar, demir, nikel ve kobalt alaşımıdır. Alnico, Ferrit, Samaryum-kobalt ve Neodmyum-iron boron alaşımları endüstride mevcut kullanılan tiplerdir. Sabit mıknatıslar, büyük BH eğrisine, yüksek kalıcı mıknatısiyete ve yüksek mıknatıslanmayı giderici kuvvete sahiptirler (Galioto ve diğ., 2015; Hanselman, 2006). Bir mıknatısın kalitesi, manyetik alan şiddeti (H) ile manyetik akı yoğunluğunun (B) çarpımı ile ifade edilir. Tablo 1'de ticari olarak kullanımda olan mıknatısların manyetik ve ısıl özellikleri verilmiştir (Dalcalı ve diğ., 2012).

**Tablo 1.** Miknatısların manyetik ve ısıl özellikleri

Miknatıs tipi	BH <sub>max</sub> (kJ/m <sup>3</sup> )	B <sub>r</sub> (T)	H <sub>c</sub> (kA/m)	Curie Sıcaklığı (C°)
NdFeB	200-290	1,20	870	310
SmCo	130-190	0,97	750	720
AlNiCo	70-85	1,1	130	830
Seramik (Ferrit)	27-35	0,4	240	450

Tablo 1 incelendiğinde NdFeB tipi miknatısların çok yüksek BH<sub>max</sub> çarpımına sahip olduğu görülmektedir. AlNiCo miknatıslar yüksek sıcaklık kararlılığına sahip olmalarına karşın düşük koersif kuvvetlerinden dolayı kolayca demagnetize olabilirler. Ayrıca bu tip miknatıslar çok kırılğan olduklarında kullanımına dikkat etmek gerekmektedir (Çakır, 2012). Seramik miknatıslarda AlNiCo'lara benzer olarak çok sert ve kırılğandır. En büyük avantajı ise düşük maliyetli olmalarıdır. SmCo tipi miknatıslar ise 300 C° ye kadar yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmelerine karşın yüksek maliyetleri bu tip miknatısların dezavantajıdır. NdFeB miknatıslar, SmCo miknatıslardan daha yüksek bir maksimum enerji üretme yeteneğine sahiptirler. Fakat sıcaklık kararlılığı SmCo kadar iyi değildir.

### 3. SONLU ELEMANLAR METODU VE SMSM MODELİ

Sonlu elemanlar metodu (SEM), bir yapıda genel diferansiyel denklemlerin yaklaşık bir şekilde çözülebildiği sayısal bir yaklaşımdır (David, 2004). Bu metotta, çözüm yapılmak istenen kısım sonlu sayıda küçük bölgelere ayrılır. Çözümü elde etmek için belirlenen bu bölgeyi çevreleyen elemanların o noktaya katkıları dikkate alınır. Bu şekilde bütün elemanların, düğümlere ilişkin büyüklükleri zincirleme olarak birbirine bağlanmış olur. Dolayısıyla düğüm sayısı kadar denklemler bulunan bir doğrusal denklem takımı elde edilir. Böylelikle bu denklem takımının çözümünden istenenler hesaplanır (Dalcalı ve Akbaba, 2018). İlk defa 1956 yılında uçak gövdesindeki gerilmelerin analizinde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ile günümüzde katı ve sıvı mekaniği, akustik, ısı transferi ve elektromanyetik problemlerinin çözümü yapılabilmektedir (Ocak, 2013). Bu yöntemin kullanılması zaman ve ekonomik açıdan tasarımcıya avantaj sağlamaktadır. SEM'in elektrik makinalarına uygulanması ile makinaya ait akım, gerilim, tork parametrelerinin yanında elektromanyetik akı dağılımı, manyetik doyum bölgeleri gibi kritik bilgilere de ulaşılabilir.

Elektrik makinalarının tasarımında mümkün olan en küçük hacim ve en az malzeme ile en fazla güç elde etmek istenilir. Tablo 2'de farklı tipteki motorlardan elde edilen tork değerleri ve 1 kg bakır başına tork değerleri verilmiştir (Ehsani ve diğ., 2003).

**Tablo 2.** Farklı tip makinaların tork yoğunlukları

Makina tipi	T/H (Nm/m <sup>3</sup> )	T/Cu (Nm/kg)
Sabit miknatıslı	28860	28,7-48
Asenkron	4170	6,6
Anahtarlamalı Relüktans	6780	6,1

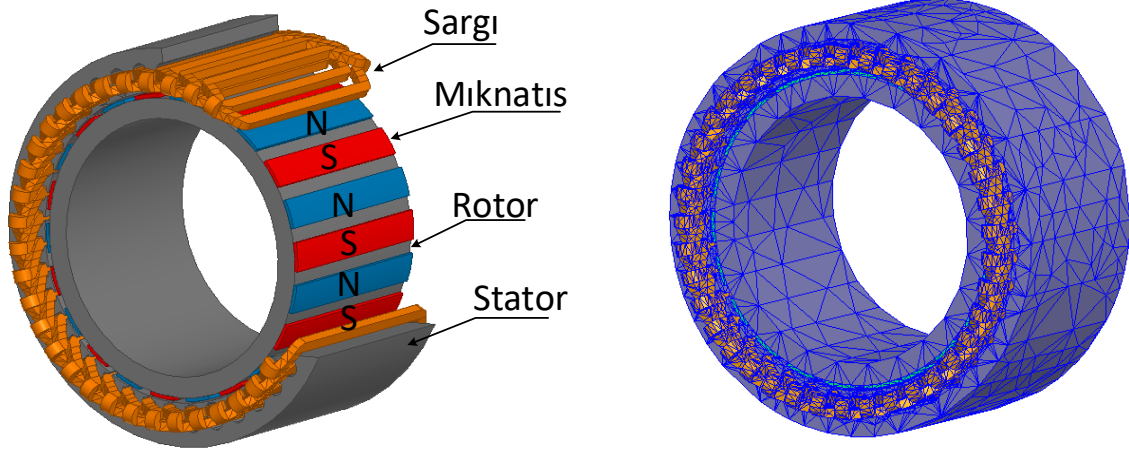
Tablo 2'den incelendiğinde sabit miknatıslı makinaların diğerlerine göre oldukça yüksek tork yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca sabit miknatıslı makinaların, asenkron ve anahtarlamalı relüktans makinalara göre daha az ağırlıkta (Lai ve diğ., 2017) daha yüksek tork verebildiği (Jun ve diğ., 2018) görülmektedir. Çalışma konu olan SMSM'un özellikleri Tablo 3'de verilmiştir.

**Tablo 3.** Tasarlanan SMSM'un özellikleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Güç	5,5 kW	Rotor dış çapı	249,4 mm
Kutup sayısı	22	Rotor iç çapı	210 mm
Stator dış çapı	324 mm	Stator-rotor malzemesi	M400- 50A
Stator iç çapı	252 mm	Mıknatıs kalınlığı	3 mm
Stator-rotor uzunluğu	155 mm	Ofset	40 mm
Oluk sayısı	39	Nominal hız	185 rpm

Tasarlanan motorun 3 boyutlu görünümü ve sonlu elemanlar analizinde kullanılan mesh yapısı Şekil 1'de verilmiştir.

**Şekil 1.** Motor modeli ve mesh ağı yapısı



#### 4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Yapılan analiz çalışmalarında mıknatıs malzemesi olarak AlNiCo5, AlNiCo9, Seramik5, Seramik8D, SmCo24, SmCo28 ve NdFeB tipi mıknatıslardan da N30, N35, N38, N48 ve N50m tipi mıknatıslar kullanılmıştır. Malzemenin etkisinin incelemek amacıyla tüm analiz koşulları ve fiziksel parametreler sabit tutulmuştur. Yapılan analizlerde motor verimi, çıkış gücü, maksimum çıkış gücü ve vuruş torku değeri incelenmiştir.

Vuruş torku, sabit mıknatıslı makinalarda stator akımı sıfır iken rotor mıknatısları ile statorun manyetik etkileşiminden meydana gelen, gürültü ve titreşime neden olan istenmeyen bir durumdur (Lee ve diğ., 2017). Dolayısıyla motorun vuruş torku değerinin en az değerde olması istenen bir durumdur. Gerçekleştirilen analizler sonucunda motorun farklı malzemelere göre performansı Tablo 4'de verilmiştir.

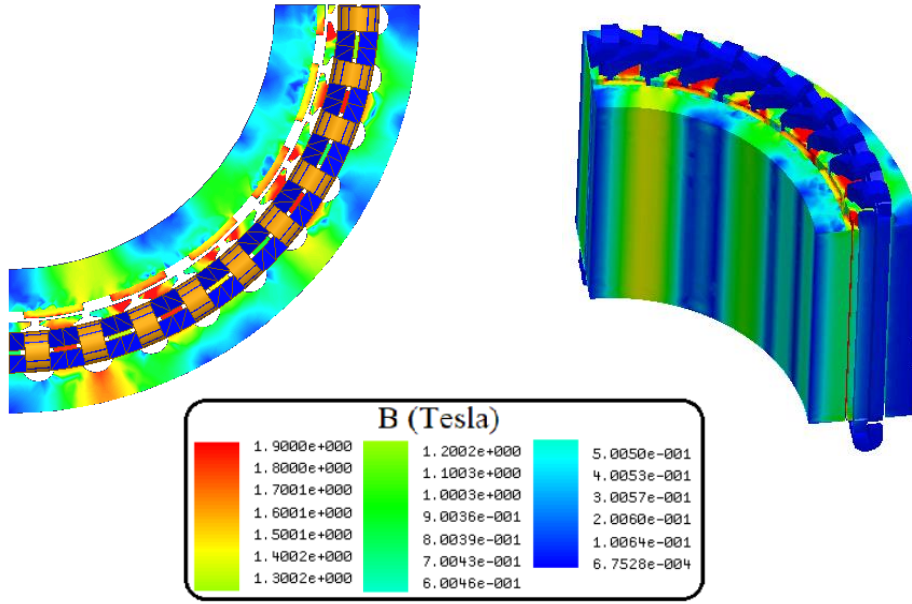
**Tablo 4.** Motor performansları

Miknatıs tipi	Verim (%)	Güç (W)	Vuruntu torku(mNm)	Maksimum çıkış gücü (W)
AlNiCo5	57,96	4608	0,083	4608
AlNiCo9	66,13	5501	0,126	7457
Seramik5	43,99	4275	0,035	4275
Seramik8D	47,37	4885	0,047	4885
SmCo24	83,59	5501	0,337	10730
SmCo28	85,35	5501	0,376	11295
N30	85,99	5500	0,391	11469
N35	88,08	5501	0,449	12015
N38	89,89	5500	0,523	12453
N48	90,34	5501	0,553	12414
N50m	90,75	5502	0,809	14399

Analizlerde elde edilen sonuçlara göre maksimum çıkış gücü değerinin kullanılan miknatısın remenans akı yoğunluğu değeri ile doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla yüksek BHmax değerine sahip miknatıslarda aynı hacimde daha yüksek güç elde etmek mümkündür. Aynı güç elde edilmek istendiğinde Seramik ve AlNiCo tipi malzemelerde kullanılan miknatısın boyutunun artırılması gerekecektir. Motorun çıkış gücü 5,5 kW olarak tasarlandığından hemen hemen her tipte yaklaşık sonuç elde edilmiştir. Miknatıslara ait BHmax çarpımlarının artması ile birlikte verimin de arttığı görülmektedir. Motora ait aktif hacim sabit tutulduğundan, düşük BHmax değerine sahip miknatısların kullanıldığı tasarımlarda aynı çıkış gücünün elde edilmesi için daha yüksek akımlara ihtiyaç duyulmakta ve bununla birlikte kayıplar artarak daha düşük verim değerleri elde edilmektedir. Diğer bir ifade ile düşük BHmax çarpımına sahip miknatıslar ile de yüksek verimli motorlar elde edilebilir fakat motora ait aktif hacim kesinlikle büyütülmelidir. Özetle BHmax değeri arttıkça motorun amper başına ürettiği maksimum tork değeri artmaktadır. Vuruntu torku değeri ise rotor veya stator da yapısal herhangi bir değişiklik yapılmadığından güç ve tork yoğunluğu en yüksek olan NdFeB tipi miknatıslarda diğerlerine göre yüksek çıkmıştır. Bu noktada sadece verim veya maksimum çıkış gücü değerleri referans alınarak doğru miknatısı seçmek mümkün değildir. Miknatıslar üzerindeki aşırı ısı, miknatısların manyetik özelliklerini geri dönüşümsüz olarak ortadan kaldırmaktadır. Dolayısıyla, yüksek sıcaklıklara ulaşılacak kullanımlarda NdFeB tipi miknatısların yerine SmCo tipi miknatısların tercihi daha doğru olacağı söylenebilir.

En iyi verimin elde edildiği N50m miknatıs malzemesinin kullanıldığı tasarım dikkate alınarak manyetostatik analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinin daha kısa sürede sonuçlanması amacıyla master-slave sınır koşulları kullanılarak motorun ¼ kesiti üzerinde yapılmıştır. Motor üzerinde elde edilen akı dağılımı Şekil 2’de verilmiştir.

Şekil 2. Manyetik akı dağılımı



## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada günümüz elektrik makinalarında sıklıkla kullanılan sabit miknatısların (AlNiCo5, AlNiCo9, Seramik5, Seramik8D, SmCo24, SmCo28, NdFeB30, NdFeB35, NdFeB38, NdFeB48 ve NdFeB50m) senkron motorun verim, çıkış gücü, vuruğu torku ve maksimum çıkış gücü üzerindeki etkileri manyetostatik analizler yapılarak incelenmiştir. Yapılan analizlerde sadece miknatıs malzemesinin etkisini araştırmak amacıyla diğer tüm fiziksel parametreler ve analiz koşulları sabit tutulmuştur. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, mevcut aktif motor hacmi için en yüksek verim değerlerinin NdFeB tipi miknatıslar ile sağlandığı görülmüştür. NdFeB tipi miknatıslar içerisinde ise N50m tipinde en yüksek verim ve maksimum çıkış gücü elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda en düşük vuruğu torku değeri ise en düşük maksimum çıkış gücünün elde edildiği Seramik5 tipi miknatıslı yapıda elde edilmiştir.

Gelişen miknatıs üretim teknolojisi ile NdFeB miknatısların üretimi artmış ve farklı endüstriyel uygulamalarda kullanımı mümkün hale gelmiştir. Ancak tüm bu artışlarının yanında NdFeB tipi miknatıslar yüksek sıcaklık derecelerinde çalışmaya uygun değildir. Yüksek sıcaklıklara ulaşılacak kullanımlarda NdFeB tipi miknatısların yerine SmCo tipi miknatısların tercihi daha doğru olacağı söylenebilir. Diğer taraftan, NdFeB tipi miknatıslarda kullanılan nadir elementlerin fiyatlarındaki hızlı yükseliş ve dalgalanma, üreticileri nadir elementlerin kullanılmadığı tasarım alternatiflerine yönlendirmekte ve bu alanla ilgili çalışmaların sayısı hızla artmaktadır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından BAP-18-MF-1009-069 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Athavale, A., Sasaki, K., Gagas, B.S., Kato, T. and Lorenz, R.D., 2017, Variable Flux Permanent Magnet Synchronous Machine (VF-PMSM) Design Methodologies to Meet Electric Vehicle Traction Requirements with Reduced Losses, *IEEE Transactions On Industry Applications*, 53(5), 4318-4326.
- Chu, L., Li, G.L., Qian, Z. and Yin, W.X., 2015, Analysis of eddy current loss on permanent magnets in PMSM with fractional slot, *IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications*, 15-17 June 2015, Auckland, 1246- 1250.
- Çakır, F.M., 2012, *Nano Boyutlu Manyetik Kompozit Toz Malzemelerin Üretimi İçin Model Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dalcalı, A. and Akbaba, M., 2018, 3-D Modeling and Analysis of Shaded Pole Motors Using Finite Elements Method, *International Conference on Advanced Technologies, Computer Engineering and Science*, 11-13 May 2018, Safranbolu, 635-638.
- Dalcalı, A., Çelik, E. and 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, *European Workshop on Renewable Energy Systems*, 17-19 September 2012, Antalya.
- David, M.M., 2004, *Design, Modelling and Control of Electrical Machines*, Thesis (PhD), Lund University.
- Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S., 2003, Characterization of Electric Motor Drives for Traction Applications, The 29th Annual Conference of the *IEEE Industrial Electronics Society, USA*.
- Galioto, S.J., Reddy, P.B., El-Refaie, A.M. and Alexander, J.P., 2015, Effect of Magnet Types on Performance of High-Speed Spoke Interior-Permanent-Magnet Machines Designed for Traction Applications, *IEEE Transactions On Industry Applications*, 51(3), 2148-2160.
- Gürdal, O., 2001, *Elektrik Makinalarının Tasarımı*, Atlas-Nobel Yayıncılık, Türkiye, 9789756574072.
- Hanselman, D., 2006, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, Magna Physics Publishing, USA, 1-881855-15-5.
- Htet, T.Z., Zhao, Z. and Li, K., 2018, PM Material Analysis of Permanent Magnet Synchronous Generator in Wind Turbines, *2nd International Conference on System Reliability and Safety*, 20-22 Dec. 2017, Milan, 332-336.
- Jeong, C.L. and Hur, J., 2017, Optimization Design of PMSM With Hybrid-Type Permanent Magnet Considering Irreversible Demagnetization, *IEEE Transactions On Magnetics*, 53(11).
- Jeong, C.L., Kim, Y.K. and Hur, J., 2017, Optimized Design of PMSM with Hybrid Type Permanent Magnet for Improving Performance and Reliability, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 1-5 Oct. 2017, USA, 2439-2444.
- Jun, H.W., Lee, J.W., Yoon, G.H. and Lee, J., 2018, Optimal Design of the PMSM Retaining Plate With 3-D Barrier Structure and Eddy-Current Loss-Reduction Effect, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 65(2), 1808-1818.

- Lai, C., Feng, G., Mukherjee, K. and Kar, N.C., 2017, Investigations of the Influence of PMSM Parameter Variations in Optimal Stator Current Design for Torque Ripple Minimization, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 32(3), 1052-1062.
- Lee, D.H., Jeong, C.L. and Hur, J., 2017, Analysis of Cogging Torque and Torque ripple according to Unevenly Magnetized Permanent Magnets Pattern in PMSM, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 1-5 Oct. 2017, Cincinnati, 2433-2438.
- Lee, J., Yoon, M., Nomura, T. and Dede, E.M., 2018, Topology optimization for design of segmented permanent magnet arrays with ferromagnetic materials, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 449, 571-581.
- Ocak, C., 2013, *Elektrikli Araçlar İçin Üç Kademeli Yeni Bir Fırçasız DA Motoru Tasarımı, Analizi ve Uygulaması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Peng, P., Xiong, H., Zhang, J., Li, W., Leonardi, F., Rong, C., Degner, M.W., Liang, F. and Zhu, L., 2017, Effects of External Field Orientation on Permanent Magnet Demagnetization, *IEEE Transactions On Industry Applications*, 53(4), 3438-3446.
- Yang, Y., Walton, A., Sheridan, R., Güth, K., Gauß, R., Gutfleisch, O., Buchert, M., Steenari, B.M., Gerven, T.V., Jones, P.T. and Binnemans, K., 2017, REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review, *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(1), 122-149.
- Zhou, G., Xu, X., Xiong, Y. and Zhang, L., 2017, Design and Analysis of Low-Speed High Torque Direct-Driven Permanent Magnet Synchronous Machines(PMSM) with Fractional-Slot Concentrated Winding Used in Coal Mine Belt Conveyor System, *20th International Conference on Electrical Machines and Systems*, 11-14 Aug. 2017, Sydney.