



DOĞRUDAN TAHRİKLİ ASANSÖR SİSTEMLERİNDE KULLANILAN SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTORLARDA MIKNATIS GEOMETRİSİNİN MOTOR PERFORMANSI VE MALİYETİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Cemil OCAK*

Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Ankara, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Asansör,
Doğrudan Tahrik,
Sabit Mıknatıs,
Senkron Motor,
Maliyet.*

Öz

Doğrudan tahrikli sistemler dişli kutusu gibi aktarma organlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırarak daha yüksek verimlilik ve daha küçük bir yapı sunmaktadırlar. Bu çalışmada, doğrudan tahrikli asansör uygulamalarında kullanılan sabit mıknatıslı senkron motorlarda mıknatıs geometrisi değiştirilerek motor performansı ve maliyeti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Motorlarda kullanılan mıknatıslara ait maliyet, toplam motor maliyeti üzerinde önemli bir paya sahiptir. Bu sebeple öncelikle 5,5 kW gücünde yüzey yerleştirmeli bir sabit mıknatıslı senkron motor tasarlanıp analiz edilerek parametreleri sunulmuştur. İlk tasarım aşamasını geçen motorda mıknatıs geometrisini belirleyen kutup yayı/kutup adımı oranı, kutup çıkıntı kaçıklığı (ofseti) ve mıknatıs kalınlığı değerleri değişken olarak tanımlanmış ve parametrik çözümler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda motor verimi, vuru moment, toplam mıknatıs ağırlığı ve maksimum çıkış gücü değerleri elde edilerek karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı kriterleri amaçlayan tasarımlar için motorların toplam maliyetleri karşılaştırılmıştır. Böylelikle motor verimi ve maliyeti arasında en iyi dengeyi sunan mıknatıs geometrisi ve motor tasarımı elde edilerek başlangıç tasarımı iyileştirilmiş ve %30 daha düşük maliyet elde edilmiştir. Bununla birlikte maksimum verimlilik yaklaşık olarak %91 olarak elde edilirken, dengeli tasarım yaklaşık olarak %88 değerinde kabul edilebilir bir verimlilik sunmaktadır.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF MAGNET GEOMETRY ON MOTOR PERFORMANCE AND COST IN PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS USED IN DIRECT DRIVE ELEVATOR SYSTEMS

Keywords

*Elevator,
Direct Drive,
Permanent Magnet,
Synchronous Motor,
Cost.*

Abstract

Direct drive systems eliminate the need for drivetrain such as gearboxes to provide higher efficiency and a more compact structure. In this study, magnet geometry of surface mounted permanent magnet synchronous motors used in direct drive elevator applications was changed and its effects on motor performance and total active material cost were investigated. As is known, the cost of magnets used in electric motors has a significant share on total motor cost. Consequently, a 5.5 kW surface mounted permanent magnet synchronous motor has been designed, analyzed and its parameters are presented. For the motor that passes the first design phase, the parameters that constitute the magnet geometry given as pole arc/pole pitch ratio, pole offset and magnet thickness values determined as variable and parametric solutions were implemented. As a result of the analyses, motor efficiency, cogging torque, total magnet weight and maximum output power values were obtained and compared. In addition, the total costs of the motors were compared for designs that aim different design criteria. Thus, the initial design was optimized by obtaining the magnet geometry and motor design that provides an optimal equilibrium between motor efficiency and cost. As a result, 30% lower cost was obtained. However, while the maximum efficiency is obtained as approximately 91%, the optimized design offers an acceptable efficiency of about 88%.

* İlgili yazar / Corresponding author: cemilocak@gazi.edu.tr, +90-312-354-8401

Alıntı / Cite

Ocak, C., (2019). Doğrudan Tahrikli Asansör Sistemlerinde Kullanılan Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlarda Mıknatıs Geometrisinin Motor Performansı ve Maliyeti Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(4), 825-834.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

C. Ocak, 0000-0001-6542-6350

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	19.01.2019
Revizyon Tarihi / Revision Date	29.04.2019
Kabul Tarihi / Accepted Date	11.06.2019
Yayın Tarihi / Published Date	19.12.2019

1. Giriş

Günümüzde kent nüfusunun artması ile birlikte yüksek binaların sayısı da hızla artmaktadır. Bu binalarda taşımanın kolay ve verimli yapılabilmesi önem arz etmektedir. Asansörler binalarda gerekli dikey taşıma işlemini gerçekleştiren cihazlardır. Klasik asansör sistemlerinde dişli kutusu ve ayrı bir makine dairesi kullanılmaktadır. Bu sistemler mekanik düzenekleri ve kullandıkları motor teknolojilerinden dolayı düşük verim, titreşim, akustik gürültü, sık tamir ve bakım ihtiyacı gibi istenmeyen birtakım özelliklere sahiptirler (Das vd., 2016; Cicale vd., 2012). Aktif malzeme ve motor sürücü teknolojilerinde yaşanan gelişmeler doğrultusunda asansör sistemlerinde yüksek performans ve verim sunan sabit mıknatıslı senkron motorların (SMSM) kullanımı artmaktadır. Yüksek kutup sayılarına sahip SMSM'ların doğrudan tahrik imkânı sağlaması neticesinde dişlisiz ve makine dairesiz asansör sistemleri yaygınlaşmaktadır. Böylelikle hem kullanılan SMSM'ların diğer motorlara kıyasla sunduğu verim avantajı, hem de mekanik aktarma organlarında yaşanan kayıpların ortadan kaldırılması ile birlikte sistem verimliliği önemli ölçüde artmaktadır. SMSM'lar diğer motor türlerine kıyasla yüksek verim, maksimum moment üretimi, yüksek birim güç yoğunluğu ve geniş sınırlar içinde hız kontrolü sunmaktadırlar (Hwang vd., 2012; Dalcı ve Akbaba, 2017; Krasnow vd., 2017). Doğrudan tahrikli SMSM kullanılan asansörler geleneksel sistemlerle karşılaştırıldığında birçok avantaja sahiptirler. Gelişen sürücü teknolojisinin yardımıyla asansörler kalkış, seyir ve duruş esnasında kullanıcıya konfor sağlamaktadırlar. Yüksek moment kabiliyetine sahip olan SMSM'lar tüm yük koşullarında etkin bir moment-hız denetimi sayesinde kat hizalamasında başarılı performans sergilemektedirler (Demiröz vd., 2010). Bu motorların düşük hızda yüksek momente sahip olmaları dişli kutusunun ortadan kaldırılmasına imkan sağlamıştır. Dişli kutusunun kaldırılması yüksek verime, küçük yapıya, düşük gürültüye, bakım kolaylığına ve çevre dostu teknolojiye öncülük etmektedir (Anand ve Mahesh, 2016).

Literatürde SMSM'ların tasarımı ve performanslarının iyileştirilmesine yönelik pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar büyük çoğunlukla sürücü denetimine ve motorun fiziksel yapısı üzerine odaklanmıştır. Yetis ve diğerleri dişlisiz asansör sistemlerinde kullanılmak üzere iki farklı stator-rotor

oluk sayısı kombinasyonunda SMSM tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bunlardan ilki 36/34 ve ikincisi 36/42 kombinasyonuna sahiptir. Analiz sonucunda ilk tasarımda daha düşük vuru moment, hafif yapı ve düşük mıknatıs maliyeti elde edilmiştir. İkinci tasarımda ise daha düşük moment dalgalanması ve manyetik yüklemeye sahip motor tasarımı gerçekleştirilmiştir (Yetiş vd., 2013). Bu çalışmaya benzer diğer bir çalışmada 6 farklı stator-rotor oluk kombinasyonu analiz edilerek optimum radyal elektromanyetik kuvvetin elde edilmesi amaçlanmıştır (Kim vd., 2017). Diğer bir çalışmada asansörde kullanılan SMSM'larda tam adımlı ve kesirli tip sarım yapısının moment dalgalanmasına etkisinin incelenmesi amacıyla yüzey yerleştirmeli bir motor tasarlanarak deneysel olarak doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Kesirli tip sarımda 5., 7., ve diğer yüksek dereceden harmonik bileşenlerin azaltıldığı belirlenmiştir (Bakhtiarzadeh vd., 2017). Yüksek hızlı asansörlerde kullanılan SMSM'un oluk/kutup oranının etkisinin belirlenmesi için yapılan çalışmada 144 oluk/32 kutup yapısına sahip prototip motor ile 144 oluk/40 kutba sahip optimize edilmiş motor karşılaştırılmıştır. Optimize edilen SMSM'un nominal ve maksimum yük koşullarında 32 kutuplu motora nazaran daha düşük harmoniklere sahip olduğu tespit edilmiştir. Düşük harmoniğe rağmen artan kutup sayısı ve demir kaybı nedeniyle 40 kutuplu SMSM'un veriminin daha düşük olduğu görülmüştür (Sim vd., 2018). İç ve dış rotorlu doğrudan tahrikli SMSM'ların asansör uygulamaları için karşılaştırıldığı bir çalışmada, motorun tasarımındaki temel sorunları dikkate alan araştırmacılar, iç rotor yapısına sahip SMSM'un dış rotor yapısına sahip motordan daha büyük ve daha ağır olduğunu belirtmişlerdir. Bu dezavantajına rağmen iç rotorlu motorda ısı dağılımının daha iyi olduğu belirtilmiştir (Wang vd., 2005). Farklı mıknatıs yerleşimlerinin dikkate alındığı diğer bir çalışmada ise yüzey yerleştirmeli mıknatıslar ile gömülü tip radyal ve teğetsel manyetize edilmiş mıknatıslara sahip motorlar karşılaştırılmıştır. Yaklaşık olarak aynı verim ve güç yoğunluğu değerlerini sunan her bir motor için en yüksek maliyet yüzey yerleştirmeli mıknatıslara sahip SMSM'da elde edilmiştir (Torrent vd., 2018).

Literatür çalışmalarında özellikle performans iyileştirmelerine yer verildiği bununla birlikte motor maliyetinin ise az sayıda çalışmada irdelendiği görülmektedir. Genel olarak yüksek verimlilik beraberinde yüksek maliyeti de getirmektedir. Bazı

spesifik uygulamalarda maliyet göz ardı edilerek motor tasarımındaki en önemli kriter yüksek verimlilik olabilmektedir. Fakat asansörler, elektrikli araçlar, fan ve pompalar gibi endüstriyel uygulamalarda ideal bir seri üretim motor için verimlilikle birlikte motor maliyetinin de titizlikle ele alınması gerekmektedir. Böyle bir motorun tasarımı mutlak suretle verim, maksimum moment üretimi ve maliyet gibi kriterleri dikkate alan çok amaçlı bir optimizasyon probleminin çözümüne ihtiyaç duymaktadır. Böyle bir problemde genel olarak kullanılan malzemelerin özellikleri, makinanın aktif boyutları, stator ve rotor geometrik parametreleri, sargı özellikleri ve yük davranışı değişken olarak tanımlanır ve belirlenen sınırlar doğrultusunda çözümler elde edilir. Fakat çok fazla değişkenin tanımlanması problemin çözümünü ve giriş çıkış parametrelerinin birbirleri üzerindeki etkilerinin yorumlanmasını zorlaştırmaktadır. Literatür çalışmalarında ağırlıklı olarak çok amaçlı optimizasyon problemlerine yer verilmektedir. Bununla birlikte çalışmaların önemli bir kısmı farklı rotor topolojilerine ve mıknatıs malzemelerine sahip motorların verimlerinin ve maliyetlerinin karşılaştırması üzerine yoğunlaşmıştır. Bu kapsamda, Torrent ve arkadaşları yüzey yerleştirmeli mıknatıslar ve gömülü tip mıknatıslara sahip cer motorlarının verim ve maliyetlerini karşılaştırmış, yüzey yerleştirmeli mıknatıslara sahip motorların daha yüksek maliyete rağmen daha iyi verimlilik sunmadığını ortaya koymuştur. Doğrudan tahrikli asansör motorları yüksek kutup sayılarından dolayı yüzey yerleştirmeli yapılandırmaya sahip olmak zorundadır. Bu sebeple verim ve maliyet odaklı bir karşılaştırma için mıknatıs geometrisi, stator boyutları sabit kalmak kaydıyla değiştirilerek her bir geometrik değişkenin etkisi gözlemlenmelidir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde her bir değişkenin etkisini takip etmek oldukça zordur. Bu çalışma ile mıknatısa ait her bir geometrik parametrenin etkisi doğrudan gözlemlenebilmektedir.

Yüksek BH_{maks} çarpımına sahip neodimiyum mıknatıslar elektrik motorlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Knebl vd., 2018; Zhao vd., 2018). Bu tür mıknatısların kullanımı ile yüksek hava aralığı akı yoğunluğuna ve küçük boyutlara sahip motorların tasarım ve üretimi yaygınlaşmaktadır (Grunditz vd., 2018; Hu vd., 2017). Diğer taraftan nadir element malzemelerin fiyatları son yıllarda hızla artmakta ve fiyatlarda yaşanan istikrarsızlık motor üreticileri için olumsuz bir tablo meydana getirmektedir. Mıknatıs maliyeti, toplam motor maliyeti üzerinde önemli bir paya sahiptir. Bu sebeple motor üreticileri, mıknatıs kullanımını azaltmaya yönelik tedbirler almakta ve daha az mıknatıs kullanımına imkân sağlayan tasarımlar üzerinde çalışmaktadırlar.

Yukarıda ifade edildiği üzere, mıknatıs geometrisi ve dolayısı ile toplam mıknatıs kullanımı motor

performansı ve maliyeti üzerinde önemli bir yere sahiptir. Bu gerekçeler doğrultusunda bu çalışmada, ilk olarak 5,5 kW (600-700 kg, 8 kişi taşımaya uygun) gücünde bir SMSM'un sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Akabinde mıknatıs geometrisinin ve dolayısı ile toplam mıknatıs miktarının motorun performansı ve maliyeti üzerindeki etkilerinin incelenmesi için mıknatıs geometrisini oluşturan parametreler değişken olarak tanımlanmıştır. Böylelikle farklı mıknatıs geometrileri sonucunda motor verimi, vuruğu momenti, çıkış gücü ve toplam mıknatıs kullanım miktarı değerleri elde edilmiştir. Analiz sonuçları incelenerek maksimum verim, minimum maliyet ve dengeli verim-maliyet tasarımları elde edilmiştir. Her bir tasarım kriterine ait toplam motor maliyetleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Karşılaştırma sonuçlarının doğrudan mıknatıs geometrisi ile ilişkilendirilebilmesi için motorlara ait paket boyu ve çapı, hava aralığı ve sargı özellikleri değiştirilmemiştir. Daha önce ifade edildiği üzere çok amaçlı bir optimizasyon için motora ait tüm değişkenleri içeren bir problem tanımlanmalıdır. Böylelikle daha yüksek performans ve daha düşük maliyet hedeflerine ulaşılabilir.

2. SMSM'un Tasarımı ve Analizi

Elektrik makinalarının tasarımı birçok mühendislik disiplinin birbiri ile ilişkisini içerir. Bir elektrik makinasının tasarımında elektromanyetik, ısıl ve mekanik problemlerin dikkate alınması ve İstenilen özellikleri karşılayan bir tasarıma ulaşılması için bir dizi analizin gerçekleştirilmesi gerekir. Elektrik makinalarının tasarımında ve analizinde kullanılan Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) elektromanyetik tasarım parametrelerinin çok yüksek bir doğrulukla belirlenmesine imkân tanır (Upadhyay, 2008; Duan, 2010; Dalcalı ve Akbaba, 2016). Elektrik makinalarının tasarımı genellikle boyutlandırma eşitlikleriyle başlar. Boyutlandırma hesapları sonucunda elde edilen paket çapı (D) ve boyu (L), çoğu zaman eşitlik içerisinde doğrudan ifade edilemeyen bir takım kabul ve varsayımlarla ilişkilidir. Bu sebeple tasarımcının deneyimi, boyutlandırma hesaplarının, tasarımdan beklenenleri karşılaması açısından önemlidir. Aynı zamanda boyutlandırma hesaplamaları sonucunda elde edilen boyutların, nihai tasarım boyutlarına yakın olabilecek şekilde yüksek doğrulukla belirlenmesi gerekmektedir. Böylelikle optimizasyon sürecinde tanımlanacak aralıklar daraltılarak daha hızlı ve doğru sonuç alınabilmesi mümkün olur. Eşitlik 1'de boyutlandırma için kullanılacak genel bir eşitlik verilmiştir. Eşitlikten görüleceği üzere, motordan alınabilecek güç, manyetik ve elektriksel yüklemeye, stator iç çapına, paket uzunluğuna ve dönme hızına bağlıdır. Tüm bunlara ek olarak soğutma tipi de boyutlar üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle makinanın soğutma şekline göre boyutlandırma hesaplamaları uygun bir katsayı ile güncellenmelidir. Örneğin daha iyi

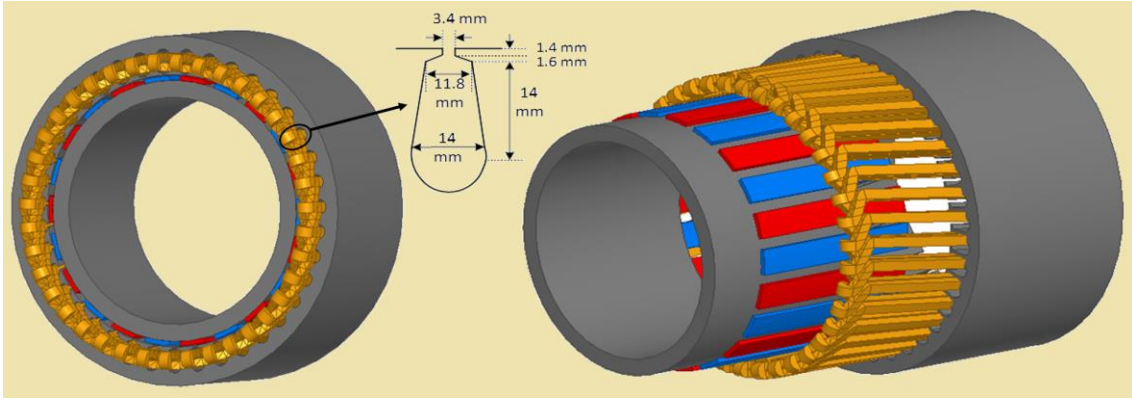
soğutulabilen bir motordan aynı paket hacminde daha fazla sürekli güç alınabilmektedir.

$$S = 11 \cdot K_{wl} \cdot \bar{B} \cdot ac \cdot \left(\frac{D}{1000} \right)^2 \cdot \frac{L}{1000} \cdot n \quad (1)$$

Burada S VA cinsinden güç, B spesifik manyetik yüklemesi, ac spesifik elektriksel yüklemesi, D stator iç çapı, L paket uzunluğu, K_{wl} sargı katsayısı ve n motorun anma hızıdır (Dalcı ve Akbaba, 2017; Ocak vd., 2017). Çalışmanın bu kısmında motorun tasarım detaylarına, içeriğin uzunluğu ve tek başına farklı bir çalışmanın konusunu oluşturması sebebiyle yer verilmeyecektir. Fakat SMSM'a ait matematiksel model ilgili kaynaklarda detaylıca bulunabilir (Çelik, 2012; Öztürk vd., 2017). Boyutlandırma çalışmaları sonucunda elde edilen tasarıma ait parametreler Tablo 1'de sunulmuştur. Tablo 1 parametreleri doğrultusunda elde edilen başlangıç tasarımına ait 3 boyutlu (3B) motor görünümü ve oluk geometrisine ait detaylar Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Başlangıç tasarımı parametreleri.

Parametre	Değer	Birim
Anma Gücü	5,5	kW
Anma Hızı	185	rpm
Anma Gerilimi	400	V
Mıknatis Malzemesi	N40-UH	-
Nüve Malzemesi	M400-50A	-
Oluk Başına İletken	68	-
İletken Çapı	1,15	mm
Oluk Sayısı	39	-
Stator Dış Çapı	324	mm
Rotor Dış Çapı	252	mm
Paket Uzunluğu	155	mm
Hava Aralığı	1,2	mm
Kutup Sayısı	22	-
Mıknatis Kalınlığı	3	mm
Kutup Yay Ofseti	0	-



Şekil 1. SMSM'un başlangıç tasarımına ait 3B görünümü ve oluk detayları.

Başlangıç tasarımı gerçekleştirilen SMSM'un yüklü ve yüksüz durum analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Analiz sonuçları.

	Parametre	Değer	Birim
Anma Yükte	Endüklenen Faz Gerilimi	448	V
	Faz Akımı	12,05	A
	Toplam Kayıplar	958,67	W
	Çıkış Momenti	283,94	Nm
	Verim	85,19	%
Yüksüz	Stator Dış Akı Yoğunluğu	1,485	T
	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu	0,569	T
	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu	0,488	T
	Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	0,774	T
	Mıknatis Akı Yoğunluğu	0,804	T

Yüksüz durumdaki analiz sonuçları başlangıç tasarımında oluşturan nüve geometrisinin ve seçilen manyetik malzemenin uygunluğunu göstermektedir. Genel bir yaklaşım olarak nüvenin çalıştırıldığı akı yoğunluğu değeri, doyum bölgesinin altında ve

geçirgenliğin maksimum olduğu noktaya göre belirlenmelidir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar tasarım öncesi hedeflenen ölçütlere uygundur.

3. Mıknatis Geometrisinin Değişimi

Mıknatis geometrisi motor performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Zarko vd., 2018; Jo vd., 2019; He ve Wu, 2019). Bu çalışmada doğrudan tahrikli uygulamalar hedeflendiğinden 22 kutuplu bir tasarım dikkate alınmıştır. SMSM'larda mıknatıslar yüzeye veya rotor içerisine gömülü olarak yerleştirilebilir. Yüksek kutup sayısına sahip tasarımların, daha küçük rotor çapında yüzey yerleştirmeli olarak gerçekleştirilmesi daha kolaydır. Gömülü tip yapılarda mıknatısların rotor içerisindeki etkin yerleşme çapı küçüldüğünden, gömülme miktarı arttıkça kutup sayısını düşürme veya rotor çapının büyütülmesi problemleri ortaya çıkmaktadır. Yüzey yerleştirmeli ve gömülü tip mıknatıslara sahip tasarımlarda mıknatısların geometrik değişimleri farklı parametrelerle ifade edilir. Bu çalışmada yüzey yerleştirmeli yapı dikkate alındığından, rotor yüzeyine yerleştirilen mıknatis geometrisini değiştiren

parametreler dikkate alınacaktır. Bu parametrelerden ilki, Şekil 2a'da verilen ve mıknatıslar arasındaki boşluğu belirleyen kutup yayı/kutup adımı oranıdır. Diğer bir parametre ise Şekil 2b'de verilen mıknatis kalınlığıdır. Çalışmada tanımlanan son değişken ise mıknatis kenarlarının basıklık düzeyini ifade eden kutup yay ofset parametresidir. Mıknatisin üst yüzeyini oluşturan yayın merkezi referans alınır, kutup yay ofset parametresi bu merkeze dik olan uzaklık olarak ifade edilir. Kutup yay ofset değeri sıfır iken, mıknatis ve stator arasındaki hava aralığı sabit bir değer olacaktır. Kutup yay ofset değeri arttıkça, mıknatisin kenarlarındaki basıklık artacak ve buna bağlı olarak mıknatis ve stator arasındaki hava aralığı merkezde minimum, kenarlarda ise maksimum değer olarak değişken bir hava aralığı elde edilmesine sebep olacaktır. Şekil 2c'de kutup yay ofset değeri değişiminin mıknatis geometrisi üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

Tablo 3'te mıknatısların geometrisini oluşturan ve değişken olarak tanımlanan parametreler için belirlenen sınır aralıkları ve çözüm adımları verilmiştir. Bu kapsamda toplamda 1302 farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Kutup yayı/kutup adımı değerinin alabileceği üst sınır değeri 1'dir. Montaj gereksinimlerinden dolayı bu çalışmada maksimum 0,95 ve minimum 0,65 olarak belirlenmiştir. Minimum olarak belirlenen değerden daha küçük değerler genellikle daha küçük birim güç yoğunluğuna sahip makineler elde edilmesine sebep olur. Kutup yay ofset değerinin alt sınırı 0, diğer bir ifadeyle ofset tanımlanmadığı durumu ifade eder. Bu değer üst sınırı ise kutup yayı/kutup adımı değerini fiziksel olarak etkilemeyecek en büyük değer olarak belirlenmiştir. Aksi halde daha fazla ofset verilmesi mıknatıslar arasındaki boşluğun artmasına sebep olacaktır.

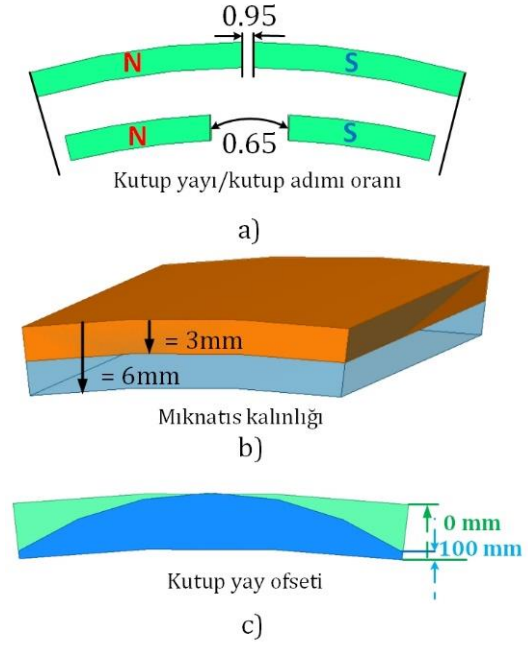
Tablo 3. Parametrelere ait çözüm aralıkları ve adımları.

Parametre	Tanımlanan Aralık	Adım
Kutup Yayı/Kutup Adımı Oranı	$0,65 \leq P1 \leq 0,95$	0,01
Kutup Yay Ofseti (mm)	$0 \leq P2 \leq 100$	20
Mıknatis Kalınlığı (mm)	$3 \leq P3 \leq 6$	0,5

$P1$ değeri değişiminin motor performansı üzerindeki etkileri kestirmek zordur. Bu sebeple ilgili değişken için çözüm adımları olabildiğince küçük tanımlanmıştır.

Burada daha küçük adım değerleri tanımlanabilir fakat mıknatısların imalat toleransı dışında kalacağından gerçekçi bir yaklaşım olmayacaktır. Diğer taraftan $P2$ ve $P3$ değişkenlerinin etkileri çoğu zaman doğrusal bir bant içerisinde kalır ve kestirilebilir. Bu sebeple $P2$ ve $P3$ değişkenlerine ait çözüm adımları toplam analiz miktarını ve süresini azaltmak adına nispeten daha büyük adımlara sahip

olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 2'de değişken olarak belirlenen parametrelerin minimum ve maksimum değerleri ve bu değerlerdeki mıknatıslara ait görünüm vermiştir.



Şekil 2. Değişkenlerin minimum ve maksimum değerlerinde mıknatıslara ait görünüm a) Kutup yayı/kutup adımı oranı değişimi, b) Mıknatis kalınlığı değişimi c) Kutup yay ofseti değişimi.

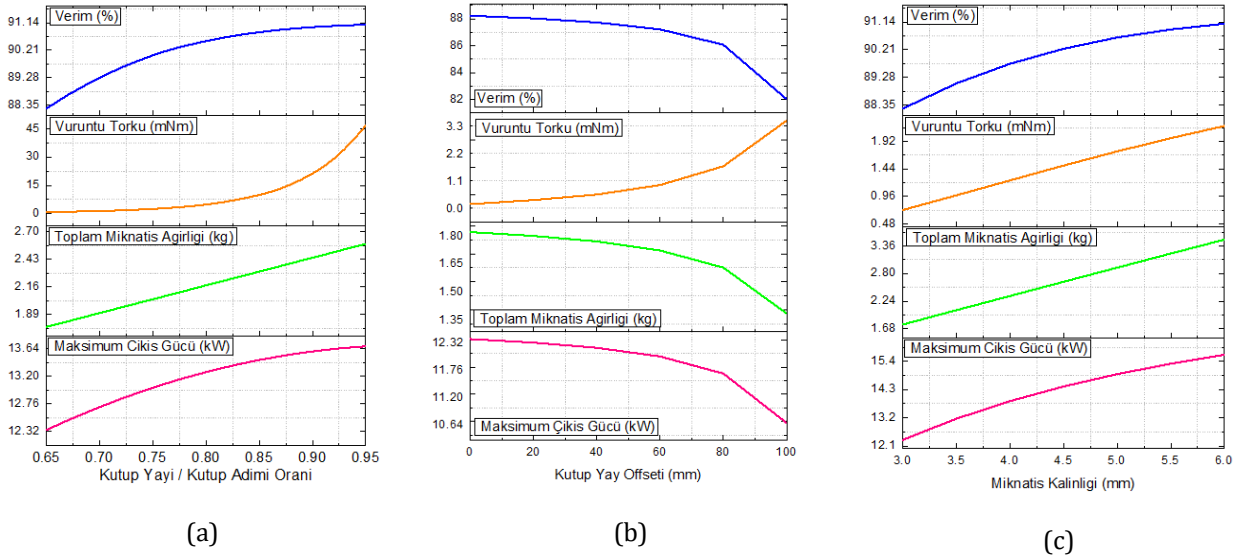
4. Performans ve Maliyet Çıktılarının Karşılaştırılması

Tanımlanan parametrelerin değişimi, hava aralığı akı yoğunluğunu ve dalga formunu önemli ölçüde değiştirerek indüklenen gerilimler ve moment gibi motor performans çıktılarının değişimine yol açar. Aynı zamanda tüm bu parametrelere motorda kullanılan toplam mıknatis miktarını belirler ve motorun toplam maliyetini değiştirir. Motor verimliliğinin maksimum, maliyetinin ise minimum olması tüm tasarım çalışmalarının ortak hedefidir. Ancak, hem maliyetin düşürülmesi hem de verimin artırılması çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Motor verimliliğinin arttıran etkenler (daha güçlü mıknatıslar, düşük kayıplı nüve malzemeleri, daha yüksek sargı iletkenliği vb.) aynı zamanda motor maliyetinin artmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple verim ve maliyet arasında kabul edilebilir bir denge yakalanmalıdır. İfade edilen gerekçeler ve tanımlanan değişkenler doğrultusunda toplam 1302 adet farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Her bir analizde değişkenlere göre vuruş momenti değeri, motor verimi, kullanılan mıknatis miktarı ve motorun verebileceği maksimum çıkış gücü değerleri elde edilmiştir. Sabit mıknatıslı makinelerde vuruş momenti, faz akımları sıfır iken mıknatıslar ile stator olukları arasındaki etkileşimden meydana gelen momenttir. Bu istenmeyen bir etkidir ve makinede titreşime ve akustik gürültüye neden olmaktadır

(Saygın vd., 2015). Bu sebeple çıkış parametrelerinden vuruğu momenti değeri minimuma indirebilmek gerekir. Motora ait verim değeri ise hedeflenen maliyetler dikkate alınarak arttırılmalıdır. Diğer taraftan motor maliyetinin düşürülebilmesi için mıknatis kullanımının azaltılması gerekir. Asansör sistemleri gibi kısa süreli (S5 – %40) çalışma rejimine sahip değışken hız ve güç uygulamalarında motora ait anma çıkış gücünü dikkate almak tek başına yeterli olmayabilir. Bu sebeple motorun soğutma tipi de dikkate alınarak maksimum çıkış gücünün dikkate alınması gerekir. Çalışmada, öncelikle her bir değışkenin tek başına motor çıkış parametreleri üzerindeki etkileri elde edilerek sırasıyla Şekil 3a, 3b ve 3c’de verilmiştir. Analizlerde bir değışkenin etkisi incelenirken diğer iki değışken için başlangıç tasarımlarına ait değerler referans alınmıştır. Böylelikle her bir değışkenin motor performansı ve toplam mıknatis kullanımı üzerindeki etkilerini incelemek mümkün olmaktadır.

Şekil 3a’da kutup yayı/kutup adımı oranının değışimi verilmiştir. Bu değerin artması ile birlikte çıkış gücü artmakta, bununla birlikte benzer bir profil sergileyen verim değeri de artmaktadır. Toplam mıknatis ağırlığı ise beklenildiği üzere doğrusal bir artış sergilemektedir. Vuruğu momenti değeri stator ve rotor geometrisi ile doğrudan ilişkilidir. Stator geometrisinin sabit tutulduğu dikkate alınırca, böyle bir tasarım için 0,8 kutup yayı/kutup adımı oranı üzerinde önemli ölçüde vuruğu momenti meydana gelmektedir. Şekil 3b’de kutup yay ofseti değeri değışimi verilmiştir. Bu değer mıknatis kullanımını 80mm’ye kadar yavaş, sonrasında ise hızlı bir şekilde azaltmaktadır. Azalan mıknatis miktarı ile birlikte çıkış gücü de aynı şekilde azalmaktadır. Azalan çıkış

gücü ise verimin düşmesine sebep olmaktadır. Vuruğu momenti değeri ise mıknatis kenarlarının statordan uzaklaşması ile birlikte artmaktadır. Farklı bir stator oluk sayısı değeri vuruğu momentinde artış yerine azalma da gözlemlenebilir. Bu sebeple stator oluk sayılarının değışimleri de ayrıca dikkate alınmalıdır. Şekil 3c’de ise mıknatis kalınlığının değışimi verilmiştir. Mıknatis kalınlığının genel olarak motor çıkış parametreleri üzerinde doğrusal bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Bu değerin artışı çıkış gücünü ve buna paralel olarak verimlilik değeri arttırmaktadır. Diğer taraftan mıknatis kalınlığının minimum ve maksimum değerleri arasında toplam mıknatis ağırlığı iki kat değışmektedir. Dolayısı ile artan verim değeri kıyasla kullanılan mıknatis miktarı önemli ölçüde artmaktadır. Vuruğu momentindeki artış ise diğer iki değışkenin aksine kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Maksimum çıkış gücü, mıknatis kalınlığının en fazla olduğu noktada elde edilebilmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen analizler doğrultusunda, kullanılan farklı mıknatis miktarlarının motorun toplam maliyeti üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Motor maliyetinin önemli bir bölümünü mıknatisler oluşturmaktadır. Bu sebeple mıknatislere ait değışkenlerin minimum ve maksimum değerlerinde elde edilen mıknatis maliyetleri ve toplam aktif malzeme maliyetleri Tablo 4’de verilmiştir (N40UH: 95 \$/kg, M400-50A: 1,9 \$/kg ve Bakır: 7 \$/kg olarak değerlendirilmiştir). Böylelikle performans çıktıları ile birlikte mıknatis geometrilerinin motor maliyetini nasıl ve ne kadar değıştirebileceği ifade edilebilmektedir. Tablo 4’de verilen her bir değışkenin minimum ve maksimum değerlerinde, ilgili diğer iki değışken başlangıç tasarımındaki belirtilen değerlerdir.



Şekil 3. Mıknatislere ait değışkenlerin motor verimi, vuruğu momenti, toplam mıknatis ağırlığı ve maksimum çıkış gücü üzerindeki etkileri a) Kutup yayı/kutup adımı oranının değışimi, b) Kutup yay ofseti değeri değışimi, c) Mıknatis kalınlığının değışimi.

Çalışmada her bir tasarım için aynı tip mıknatıslar dikkate alındığından mıknatıs kullanımı kg olarak ifade edilmiştir. Şayet tasarımlar arasında farklı mıknatıs malzemeleri kullanılacaksa, örneğin ferit ve neodimiyum, maliyet hesaplamalarında mıknatıs ağırlığı yerine mıknatıs hacminin dikkate alınması daha doğru olacaktır. Tablo 4'ten görüldüğü üzere değişen mıknatıs geometrileri toplam malzeme maliyetleri arasında önemli farklara sebep olmaktadır. Mıknatıs maliyeti, aktif malzemelere ait maliyetler arasında en büyük paya sahip olduğundan motor performansını önemli ölçüde etkilemeksizin düşürülmelidir. Yüksek verimlilik ve performans beraberinde yüksek maliyetleri de getirmektedir. Benzer şekilde en düşük maliyete sahip tasarımlar da çoğu zaman en kötü performansı sunmaktadır. Tasarımcı verim ve maliyet arasında uygulamaya uygun bir kriter belirlemeli ve tasarımı bu kriter doğrultusunda sonuçlandırmalıdır. Bazı özel uygulamalarda verimlilik tek ve en önemli kriter olabilir. Diğer taraftan endüstriyel uygulamalara bakıldığında maliyet de en az verimlilik kadar önemli bir parametredir. Gerçekleştirilen çözümler içerisinde maksimum verimlilik değerini sunan mıknatıs geometrisi ile birlikte toplam maliyetin minimum olduğu mıknatıs geometrisine ait değerler elde edilmiştir. Bu nedenle çalışmadaki değişkenler parametrik olarak çözdürülerek tanımlanan aralıklara uygun tüm ihtimaller dikkate alınmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen performans ve maliyet değerleri karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda mıknatıs parametrelerine dayalı üç farklı tasarım kriteri belirlenmiştir. Bunlardan ilki maksimum verimliliğinin sağlandığı tasarım, diğeri minimum maliyetinin elde edildiği tasarım ve sonuncusu da verim/maliyet oranının maksimum olduğu dengeli tasarımdır. Analiz sonuçlarında verim/maliyet oranının daha yüksek olarak elde edildiği tasarımlar bulunmasına rağmen, maksimum çıkış gücü ve vuruş momenti diğer etkenler olarak dikkate alınmıştır. Bu sebeple maksimum verim/maliyet oranıyla birlikte en iyi maksimum çıkış gücü ve vuruş momenti değerine sahip olan tasarım dengeli tasarım olarak belirlenmiştir. Maksimum verim tasarımı, minimum maliyet tasarımı ve dengeli tasarıma ait performans ve maliyet değerleri

tasarımlara ait mıknatıs parametreleriyle birlikte Tablo 5'te verilmiştir.

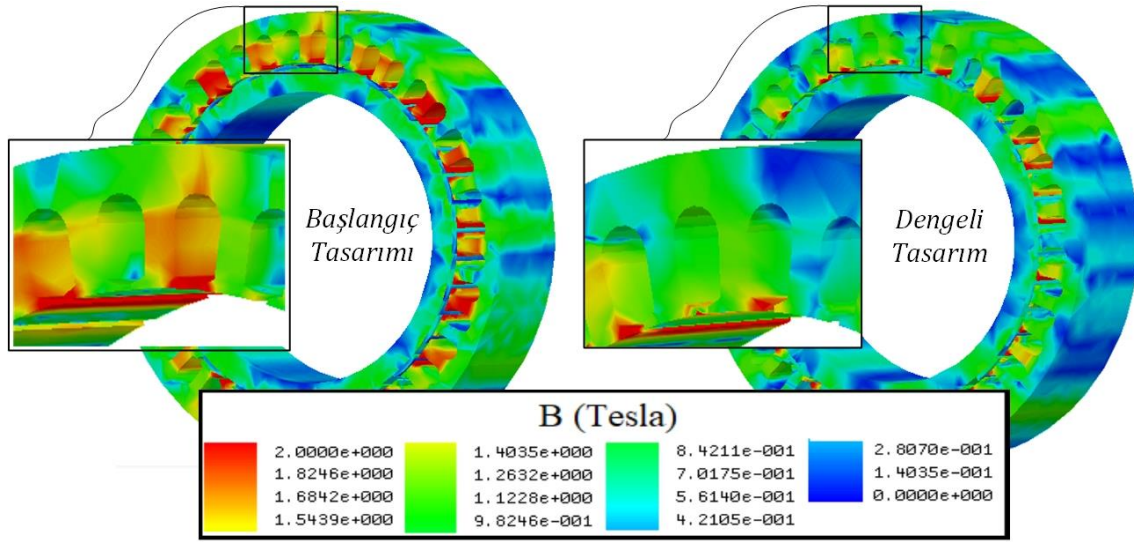
Tablo 5'teki sonuçlar incelendiğinde görülmektedir ki maksimum verimliliği sağlayan mıknatıs parametrelerinin kullanıldığı motor ile minimum maliyetin elde edildiği motor verimliliği arasında %9,31'lik önemli bir fark ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan maksimum veriminin sağlandığı motorun maliyeti ise minimum maliyet kriterine sahip motordan yaklaşık olarak %65 daha maliyetlidir. En yüksek verimlilik değeri genel olarak en büyük mıknatıs kalınlığı, en büyük kutup yayı/kutup adımı oranı ve en düşük kutup yayı ofseti değeri ile elde edilebilmektedir. Özellikle belirli verim değerlerinden sonra verimliliği %1 oranında arttırabilmek için yaklaşık olarak %50 daha fazla mıknatıs kullanımı söz konusu olmaktadır. Bu noktalar itibarıyla verim/maliyet oranı hızla düşmekte ve sadece tek kriter olarak verimliliği dikkate alan uygulamalarda bir seçenek olarak sunulabilmektedir. Asansör gibi endüstriyel uygulamalar dikkate alındığında verim değerinin yanında maliyet ve diğer performans değerleri de ön plana çıkmaktadır. Bu sebeple maksimum verim/maliyet oranının sağlanabildiği, bununla birlikte kabul edilebilir performans değerleri sunan tasarımlar dikkate alınmalıdır. Bu amaçla belirlenen dengeli tasarım kriteri sonucunda elde edilen tasarım ile en yüksek verimliliğin elde edildiği tasarım karşılaştırıldığında, verim değerleri arasında yaklaşık olarak %3, maliyetler arasında ise yaklaşık olarak %44 gibi oldukça büyük bir farkın meydana geldiği görülmektedir. Diğer taraftan dengeli tasarıma ait vuruş momenti değeri, en yüksek verimliliğin elde edildiği tasarımdan oldukça küçüktür. Maksimum çıkış güçleri ve güç yoğunlukları arasındaki fark ise her tasarım için aynı stator yapısı kullanıldığından dolayı birbirlerine yakın sayılabilecek düzeydedir ve kutup sayısının arttırılmasıyla daha büyük iyileştirmeler gerçekleştirilebilir (Torrent vd., 2018). Böylelikle dengeli tasarım kriterine göre elde edilen tasarım sonucunda verimlilik, maliyet ve performans beklentilerinin karşılanabildiği en uygun motorun geliştirilmesi mümkün olmaktadır.

Tablo 4. Değişkenlerin minimum ve maksimum değerlerine göre kullanılan toplam aktif malzeme miktarları ve maliyeti.

Parametre		Mıknatıs (N40UH)		Nüve Malzemesi (M400-50A)		Bobin Teli (Bakır)		Toplam Maliyet (\$)
		Miktar (kg)	Toplam (\$)	Miktar (kg)	Toplam (\$)	Miktar (kg)	Toplam (\$)	
Kutup Yayı/Kutup Adımı Oranı	Min=0,65	1,766	167,81	38,89	73,89	11,38	79,70	321,40
	Maks=0,95	2,581	245,26	38,89	73,89	11,38	79,70	398,85
Kutup Yayı Ofseti (mm)	Min=0	1,766	167,81	38,89	73,89	11,38	79,70	321,40
	Maks=100	1,329	126,32	38,89	73,89	11,38	79,70	279,91
Mıknatıs Kalınlığı (mm)	Min=3	1,766	167,81	38,89	73,89	11,38	79,70	321,40
	Maks=6	3,489	331,54	36,32	69,00	11,38	79,70	480,24

Tablo 5. Belirlenen tasarım kriterlerine göre elde edilen performans ve maliyet değerleri.

Tasarım Kriteri	Parametreler	Verim (%)	Toplam Malzeme Maliyeti (\$)	Vuruntu Momenti (Mnm)	Maksimum Çıkış Gücü (W)
Maksimum Verim	Kutup Yayı Ofseti = 0 mm Kutup Yayı/Kutup Adımı Oranı = 0,8 Mıknatıs Kalınlığı = 4,5 mm	91,34	461,51	6,87	15332
Minimum Maliyet	Kutup Yayı Ofseti = 100 mm Kutup Yayı/Kutup Adımı Oranı = 0,65 Mıknatıs Kalınlığı = 3 mm	82,03	279,91	4,06	10605
Dengeli Tasarım	Kutup Yayı Ofseti = 40 mm Kutup Yayı/Kutup Adımı Oranı = 0,67 Mıknatıs Kalınlığı = 3 mm	88,17	320,79	0,45	12299

**Şekil 4.** Başlangıç tasarımı ve dengeli tasarımı ait akı yoğunluklarının dağılımı

Ayrıca Şekil 4'te başlangıç tasarımı ile analizler sonucunda önerilen dengeli tasarıma ait akı yoğunluklarının dağılımları verilmiştir. Dengeli tasarım, başlangıç tasarımına kıyasla daha kabul edilebilir (doyum noktasının altında) bir akı yoğunluğu dağılımına sahiptir.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, dişli kutusuz asansör sistemleri gibi doğrudan tahrik uygulamaları için yüzey yerleştirmeli mıknatıslara sahip 5,5 kW gücünde bir SMSM'nin tasarımı gerçekleştirilerek, mıknatıs geometrisinin değişiminin motorun performansı ve maliyeti üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Mıknatısları meydana getiren parametreler değişken olarak tanımlanarak farklı mıknatıs geometrileri için motor performans ve maliyet değerleri elde edilmiştir. Bu kapsamda maksimum verimlilik, minimum maliyet ve dengeli tasarım olarak adlandırılan üç farklı tasarım kriterine göre tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Dengeli tasarım neticesinde maksimum verim/maliyet oranı elde edilerek, maksimum verimliliği sunan tasarıma kıyasla %30 daha düşük maliyet elde edilmiştir. Bununla birlikte maksimum verimlilik yaklaşık olarak

%91 olarak elde edilirken, dengeli tasarım yaklaşık olarak %88 değerinde kabul edilebilir bir verimlilik sunmaktadır. Tasarımlara ait mıknatıs geometrileri ve toplam mıknatıs kullanımları verilmiştir. Maksimum motor verimliliğini hedefleyen tasarımların, yüksek mıknatıs kullanımına ve dolayısı ile yüksek malzeme maliyetlerine sahip olacağı görülmektedir. Mıknatıs maliyeti motorun toplam maliyeti içerisinde önemli bir paya sahiptir. Bu sebeple verim ve maliyet arasında diğer motor performans çıktılarına da gözetilen dengeli bir tasarıma gerçekleştirecek mıknatıs parametreleri elde edilmiştir. İlerleyen çalışmalarda, motor maliyetinin daha fazla düşürülebilmesi için farklı mıknatıs malzemeleri, stator yapıları ve kutup sayılarını dikkate alan optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilebilir.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar

- Anand, R., Mahesh, M., 2016. Analysis of elevator drives energy consumptions with permanent magnet machines", 4th IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering, 186-190.
- Bakhtiarzadeh, H., Polat, A., Ergene, L. T., 2017. Design and analysis of a permanent magnet synchronous motor for elevator applications. Optimization of Electrical and Electronic Equipment Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, 293-298.
- Cicale, S., Albin, L., Parasiliti, F., Villani, M., 2012. Design of a permanent magnet synchronous motor with grain oriented electrical steel for direct-drive elevators. XXth International Conference on Electrical Machines, 1256-1263.
- Çelik E., 2012. Sürekli mıknatıslı senkron motor hız denetiminin genetik tabanlı bulanık mantık denetleyici ile arayüz destekli simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 14-49.
- Dalcalı, A., Akbaba, M., 2016. Comparison of 2D and 3D magnetic field analysis of single-phase shaded pole induction motors. Engineering Sciences and Technology, an International Journal, 19(1), 1-7.
- Dalcalı, A., Akbaba, M., 2017. Optimum pole arc offset in permanent magnet synchronous generators for obtaining lowest voltage harmonics. Scientia Iranica D, 24(6), 3223-3230.
- Das, D., Kumaresan, N., Nayanar, N., Navin Sam, K., Ammasai Gounden, N., 2016. Development of BLDC motor-based elevator system suitable for DC microgrid. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 21(3), 1552-1560.
- Demiröz, R., Göngür, M., Duru, H. T., 2010. Asansör sistemlerinde dişlisiz tahrik uygulamaları. Asansör Sempozyumu, 90-95.
- Duan, Y., 2010. Method for design and optimization of surface mount permanent magnet machines and induction machines. Ph.D, Dept. Electrical and Comp. Eng., Georgia Ins. of Technology.
- Grunditz, E. A., Lundmark, S. T., Nodelöf, A., 2018. Three Traction Motors with Different Magnet Materials - Influence on Cost, Losses, Vehicle Performance, Energy Use and Environmental Impact. Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies.
- He, C., Wu, T., 2019. Analysis and Design of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor and Generator. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 94-100.
- Hu, X., Guo, H., Qian, H., Ding, X., Yang, Y., 2017. Development of a high-power-density motor for formula SAE electric race car. 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 6618-6622.
- Hwang, J. C., Liu, C. S., Chen, P. C., 2012. Design of permanent-magnet synchronous gear motor with high efficiency for elevators. IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies. 205-210.
- Jo, I-H., Lee, H-W., Jeong, G., Ji, W-Y., Park, C-B., 2019. A Study on the Reduction of Cogging Torque for the Skew of a Magnetic Geared Synchronous Motor. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 55, No. 2.
- Kim, D. Y., Park, M. R., Sim, J. H. and Hong, J. P., "Advanced Method of Selecting Number of Poles and Slots for Low-Frequency Vibration Reduction of Traction Motor for Elevator", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 22, No. 4, pp. 1554-1562, August 2017.
- Knebl, L., Ondrusek, C., Kurfürst, J., 2018. Ferrite Assisted Synchronous Reluctance Motor Design, Manufacturing and Material Influence on Motor Characteristics. 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME).
- Krasnov, I. Y., Langraf, S. V., Odnokopylov, I. G., Krokhta, Y. V., Natalinova, N. M., Galtseva, O. V., Rogachev, A. A., 2017. Sensorless determination of initial position of the rotor of permanent-magnet synchronous motor of the gearless elevator hoist. International Siberian Conference on Control and Communications.
- Ocak, C., Dalcalı, A., Çelik, E., Uygun, D., 2017. FEA-Based Design Improvement of Small Scale BLDCMs Considering Magnet Thickness and Pole Embrace. Int'l Journal of Computing, Communications & Instrumentation Engg. 4(2), 31-35.
- 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, 17593-17600.
- Saygın, A., Ocak, C., Dalcalı, A., Çelik, E., 2015. Optimum rotor design of small pm bldc motor based on high efficiency criteria. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 10(19), 9127-9132.
- Sim, J-H., Ahn, D-G., Kim, D-K., Son, D-K., Kim, S., Hong, J-P., Lee, T. H., 2018. Multiphysics Design of Triple 3-Phase PMSM for Ultra-High Speed Elevator Applications. XIII International Conference on Electrical Machines. 284-290

- Torrent, M., Perat, J. I., Jimenez, J. A., 2018. Permanent Magnet Synchronous Motor with Different Rotor Structures for Traction Motor in High Speed Trains. *Energies*, Vol. 11, No. 6.
- Upadhyay, K.G., 2008. Design of electrical machines. New age international limited publishers.
- Wang, J. H., Tan, F. W., Jin, R. L., 2005. Research on low-speed gearless permanent magnet synchronous motor for elevator drive. Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems.
- Yetiş, H., Boztepelı, H., Yaşa, Y., Meşe, E., 2013. Comparative design of direct drive PM synchronous motors in gearless elevator systems. 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems.
- Zarko, D., Stipetic, S., Martinovic, M., Kovacic, M., Jercic, T., Hanic, Z., 2018. Reduction of Computational Efforts in Finite Element-Based Permanent Magnet Traction Motor Optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, No. 2, pp. 1799-1807.
- Zhao, W., Shen, H., Chai, W., Wang, X., Kwon, B., 2018. Optimal Design and Experimental Test of a SPM Motor with Cost-Effective Magnet Utilization to Suppress Torque Pulsations. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, No. 11.