



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Dişlisiz Asansör Sistemleri İçin Alüminyum Sargılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Maliyet Analizi

Murat AYZAZ^{a,*}

^a *Elektrik ve Enerji Bölümü, Uzunçiftlik Nuh Çimento MYO, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE*

** Sorumlu yazarın e-posta adresi: murat.ayaz@kocaeli.edu.edu.tr*

ÖZET

Günümüzde, artan enerji talebinin karşılanması için yüksek enerji tüketimine sahip verimsiz sistemlerin yerine daha az enerji tüketen sistemlerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar büyük önem arz etmektedir. Gün geçtikçe kullanımı yaygınlaşan asansör sistemlerinde, enerji tüketiminin düşürülerek daha verimli hale getirilmesi için dişli aktarma yapıları yerine yüksek moment yoğunluğuna sahip sabit mıknatıslı senkron motorlar ile doğrudan sürüş tercih edilmektedir. Ancak, sabit mıknatıs ve geri besleme elemanı kullanılması bu motorların maliyetini yükseltmektedir. Bu çalışmada, bakır sargı yerine alüminyum sargı kullanılarak sabit mıknatıslı senkron motor maliyetinin azaltılması hedeflenmektedir. Aynı çıkış parametrelerini sağlayacak şekilde hem bakır sargılı hem de alüminyum sargılı sabit mıknatıslı senkron motor modelleri Maxwell programı ile oluşturularak geçici hal analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen veriler ışığında her iki model, maliyet, hacim, ağırlık ve verim açısından detaylı olarak karşılaştırılmaktadır. Elde edilen maliyet kazancı asansör motoru üreticilerinin rekabet gücünü arttırmak için önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Sabit mıknatıslı senkron motor, Doğrudan sürürlü asansör sistemleri, Alüminyum sargı, Enerji verimliliği*

Design and Cost Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor with Aluminum Winding for Gearless Elevator Systems

ABSTRACT

Nowadays, it is of great importance to research on the development of less energy-consuming systems instead of inefficient systems with high energy consumption in order to meet the rising energy demand. In elevator systems becoming widespread day by day, direct drive is preferred with permanent magnet synchronous motors capable with high moment density instead of gear transmission in order to reduce energy consumption and make it more efficient. However, the use of permanent magnets and feedback devices increases the cost of these motors. In this study, it is aimed to reduce the cost of permanent magnet synchronous motor by using aluminum windings instead of copper windings. Both the copper-wound and aluminum-wound permanent magnet synchronous motor models have been designed with the same output parameters and transient analysis has been done with the RMxprt-Maxwell program. According to analysis results, both models have been compared in terms of cost, volume, weight

and efficiency. The resulting cost reduction is proposed to increase the competitiveness of elevator motor manufacturers.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor, Direct drive elevator systems, Aluminum windings, Energy efficiency

I. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler ile birlikte gerek ihtiyaç gerekse konfor gibi etkenlerden dolayı enerji tüketimi artmaktadır. Bu durum, enerji üretim kapasitesinin artırılmasını ve mevcut enerjinin daha verimli kullanılmasını kaçınılmaz hale gelmiştir. Enerji tüketiminin önemli paydaşlarından biri olan asansör sistemlerinde enerji tüketiminin azaltılarak daha verimli hale getirilmesi için kabin tasarımı, tahrik sistemi, enerji geri besleme ve yüksek enerji verimliliğine sahip elemanların kullanılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır [1-3]. Asansör güç aktarma sistemlerinde düşük verime sahip dişli yapıları yerine doğrudan sürüş imkânı sağlayan yüksek güç yoğunluğuna sahip sabit mıknatıslı motorların kullanımı %40 -50 verim oranının %70 -80 verim oranına artışını sağlamaktadır [4]. Ayrıca, dişli aktarma yapısı ortadan kalktığı için bakım ve büyük alan gereksinimi ortadan kalkmaktadır.

Sabit mıknatıslı senkron motorlar, dişli yapıları asansör sistemlerinde yer alan asenkron motorlara kıyasla daha fazla maliyete imal edilmektedirler. Bu motorlarda, nadir toprak elementi sürekli mıknatıslar yerine ferrit mıknatısların kullanılması ile maliyet azaltılmaktadır. Ancak, ferrit mıknatısların akı yoğunluğu nadir toprak elementi sürekli mıknatıslara nazaran oldukça düşük olduğundan elektrik makinasının boyutları oldukça büyümektedir [4, 5]. Ayrıca ferrit mıknatısların demagnetizasyon akı şiddeti (Hc) değeri düşüktür.

Elektrik makinalarında gerek maliyet düşürülmesi gerekse daha hafif yapı oluşturulması için alüminyum sargı yaygın olarak kullanılmaktadır [6-7]. Bakır madenin alüminyuma kıyasla dünya üzerindeki rezervlerinin gittikçe azaldığı dikkate alındığında, bakırın fiyatının gün geçtikçe artacağı öngörülmektedir. Bu bağlamda alüminyumun elektrik makinalarında sargı malzemesi olarak kullanılması yaygınlaşmaktadır. Dağıtım transformatörlerinde bakır yerine alüminyum sargı kullanımı üzerine yapılan karşılaştırma çalışmasında, 190 kVA gücüne kadar tasarlanan transformatörlerde alüminyum kullanımı maliyetlerin düşmesini sağlarken, 190 kVA gücünün üzerindeki transformatörlerde ise bakır sargı kullanımı, nüve boyutunun düşürülmesi, daha az yalıtkan ve soğutma ekipmanları gerektirmesinden dolayı daha uygun olmaktadır [8]. Elektrik motorlarında alüminyum sargı kullanılması üzerine yapılan çalışmalarda, maliyetin oldukça düşürülebileceği, ağırlığın azaltılabileceği detaylıca ortaya konulmuştur. Ancak, sağlanan bu avantajların yanında, stator nüvesinin çapının büyümesine, daha fazla miktarda sac kullanımına ve dolayısıyla makinanın toplam hacminin artmasına neden olmaktadır [9-12]. Özellikle düşük hacimlerde yüksek güç yoğunluğu gerektiren uygulamalarda alüminyum sargı kullanılarak tasarlanan elektrik makinası hacminin büyük olmasından dolayı dezavantaj oluşturmaktadır. Sonuç olarak elektrik makinasının kullanılacağı uygulama ve güç değeri sargı malzemesi seçiminde önemli rol oynamaktadır.

Bu çalışmada 630 kg yük taşıma kapasitesine sahip bir asansör sistemi için sabit mıknatıslı senkron motorda alüminyum sargı kullanımı maliyet, verim, hacim ve ağırlık açısından analiz edilmektedir.

Gerekli olan motor çıkış parametreleri hesaplanarak hem bakır hem de alüminyum sargı ile oluşturulan modeller Maxwell programı ile analiz edilerek sonuçlar elde edilmiştir.

II. SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTOR

Sabit mıknatıslı senkron motorlar daha düşük hacimlerde yüksek güç ve moment sağlamalarından dolayı bir çok endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Asansör sistemlerinde, sabit mıknatıslı senkron motorların kullanımıyla doğrudan sürüş sağlanarak dişli yapılar ortadan kaldırılmaktadır. Böylece asansör sürme sistemlerinin verimleri arttırılmaktadır. Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan 1 m/s kabin hızı, 630 kg yük taşıma kapasitesine sahip bir asansör sistemi doğrudan sürüşü için yüzey montajlı sabit mıknatıslı senkron motor ele alınmıştır. Belirlenen yük kapasitesi dikkate alınarak doğrudan sürüş için gerekli olan motor hız, moment ve güç parametreleri Eş. 1 ve Eş. 2 kullanılarak hesaplanabilir [4].

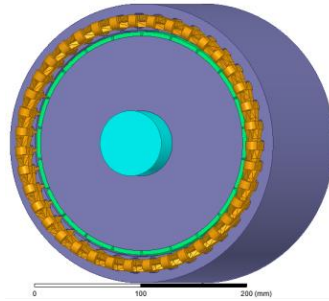
$$T_m = r_{kasnak} \times g \times (m_{yük} + m_{kabin} - m_{karşit_ağırlık}) / (u \times \eta) \quad (1)$$

$$P_m = T_m \times u \times v_{kabin} \times r_{kasnak} \quad (2)$$

Eş. 1'de T_m motor çıkış momentini, r_{kasnak} kasnak yarıçapını, u askı tipine bağlı katsayı, η taşıma halat sistemi verimi, $m_{yük}$, m_{kabin} ve $m_{karşit_ağırlık}$ sırasıyla taşınacak yükün, kabinin ve kullanılacak karşıt ağırlığın kütesini simgelemektedir. Eş. 2'de P_m motor çıkış gücünü, v_{kabin} kabin çizgisel hızını belirtmektedir. Eş. 3 ile verilen genel moment denklemi kullanılarak motorun rotor çapı (D_{rotor}) ve uzunluğu (L_{motor}) belirlenmektedir.

$$T_m = K \times D_{rotor}^2 \times L_{motor} \quad (3)$$

Elde edilen temel boyutlar ve çıkış parametreleri kullanılarak motora ait diğer boyutların belirlenmesi için Maxwell programında modelleme yapılmıştır. Şekil 1'de tasarlanan sabit mıknatıslı senkron motorun modeli ve sargı yapısı gösterilmektedir. Tasarlanan motorda sabit mıknatıslar rotorun yüzeyine yapıştırılmıştır. Sargı yapısı olarak dağıtılmış sargı yöntemi tercih edilmiştir. Vuruntu momentinin düşürülmesi için genel olarak sabit mıknatıslı makinalarda stator oluk geometrisi veya rotor üzerine yerleştirilen mıknatıslar belli bir açıda burulur. Bu tasarımda stator oluk geometrisi burulmuştur.



Şekil 1. Sabit mıknatıslı senkron motor modeli

Yapılan nümerik analizler neticesinde istenilen çıkış performansını elde etmek için gereken motor parametreleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Sargı malzemesi olarak alüminyum veya bakır kullanılması bu parametrelerin değişmesine etki etmeyecektir. Ancak, sargı malzemesi, sargı direncine sargı hacmine

ve dolayısıyla oluk alanına, stator dış çapına doğrudan etki etmektedir. Bu etkiler sargı malzemesi seçimi ve karşılaştırması bölümünde detaylıca ele alınmaktadır.

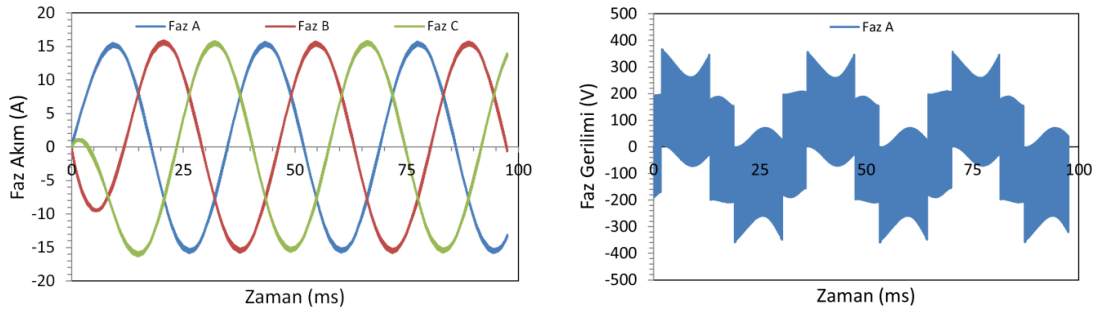
Tablo 1. Sabit mıknatıslı senkron motor temel parametreleri

Parametreler	Değerler
Çıkış Gücü (P_m)	4300 W
Çıkış Momenti (T_m)	260 Nm
Hız (n)	160 dev/dk
Kutup Sayısı ($2p$)	22
Motor Eksenel Uzunluk (L_{motor})	178 mm
Rotor Dış Çapı (D_{rotor})	213 mm
Hava Aralığı Akı Yoğunluğu (B_{hava})	0,75 T
Faz Sayısı	3
Stator Burulma Açısı	11 derece
Mıknatıs Yüksekliği	5 mm
Mıknatıs Genişliği	24,82 mm
Hava Aralığı (Yarıçap uzunluğu)	1,25 mm

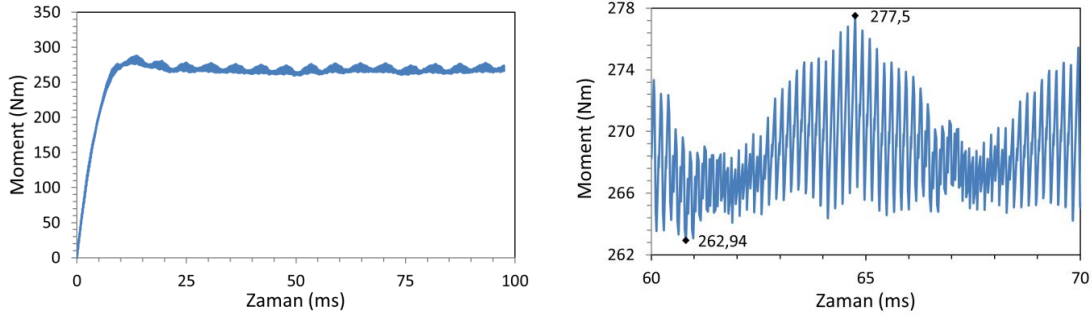
Şekil 2’de motor tam yük altında çalıştırılırken faz sargılarından geçen akım ve gerilim grafiği verilmektedir. Motor tam yük altında çalışırken şebekeden yaklaşık 10,5 A değerinde akım çekmektedir. Faz akımlarının sinüsoidal dalga formuna yakın olması, moment dalgalılığının az olmasını sağlamaktadır. Şekil 3’de motor momentinin zamana göre değişimi yer almaktadır. Ortalama 270 Nm değerinde bir moment indüklenmektedir ve moment değişimi incelendiğinde 263 Nm ile 278 Nm değerleri aralığında salınım yapmaktadır. Moment dalgalılığı, Eş. 4 kullanılarak hesaplandığında yaklaşık % 5,4 oranında olduğu görülmektedir.

$$\%T_{dalgalılık} = \frac{T_{maksimum} - T_{minimum}}{(T_{maksimum} + T_{minimum})/2} \quad (4)$$

Asansör sistemleri mekanik tahrik sisteminde moment salınımının mümkün olduğunca düşük olması istenmektedir. Bu kapsamda moment dalgalılık yüzdesinin mümkün olduğunca düşük tutulması uygulama açısından önemlidir. Bu çalışmada önerilen makine sahip olduğu moment dalgalılık yüzdesi ile asansör sistemleri için uygun olduğu söylenebilir [13].



Şekil 2. Sabit mıknatıslı senkron motor faz akımları ve gerilim grafiği



Şekil 3. Sabit mıknatıslı senkron motor moment grafiği

III. SARGI MALZEMESİ SEÇİMİ VE KARŞILAŞTIRMA

Bir önceki kısımda temel parametreleri belirlenen motorun sargı malzemesi olarak bakır ve alüminyum kullanımı bu kısımda detaylandırılmaktadır. Bakırın, alüminyuma göre elektriksel ve termal iletkenliği daha yüksektir. Ancak, alüminyumun özgül ağırlığı bakıra kıyasla oldukça düşüktür. Sargı malzemesi olarak bakır yerine alüminyum kullanımı sargı ağırlığının azaltılmasını sağlamaktadır. Ağırlık kazancının yanı sıra maliyet açısından da kazanım elde edilmektedir. Tasarlanan sabit mıknatıslı motorun çıkış parametreleri sabit tutulmak kaydı ile her iki sargı malzemesi ile modellenerek karşılaştırılmaktadır. Alüminyum ve bakır sargı malzemelerine ait fiziksel özellikler Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. Bakır ve Alüminyum sargı malzemelerinin fiziksel özellikleri[8]

Fiziksel Özellikler	Bakır	Alüminyum
Elektriksel İletkenlik (ρ) – $\Omega.mm^2/m$	0,016642	0,03
Öz Kütle (d) – kg/dm^3	8,89	2,7
Termal İletkenlik – W/mK	398	210
Genleşme Katsayısı – $\mu m/m ^\circ C$	16,7	23,86

Doğru bir karşılaştırma yapmak için her iki sargı modelinde de eşit sargı direnci oluşturulması gerekmektedir. Eşit sargı direncinin elde edilebilmesi için öncelikle sargı boyu sabit tutulmalıdır. Dolayısıyla, sargıların üzerine sarıldığı stator dış genişliği her iki motor modelinde de eşit değerdedir. Eş. 5’de eşit sargı boyuna ve direncine bağlı olarak bakır sargı ile alüminyum sargı kesit eşitliği verilmektedir. Eş. 6 ile kesit değerine bağlı olarak kullanılacak tel çapı hesaplanabilir.

$$S_{Al} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} S_{Cu} \Rightarrow S_{Al} = 1,8 \times S_{Cu} \quad (5)$$

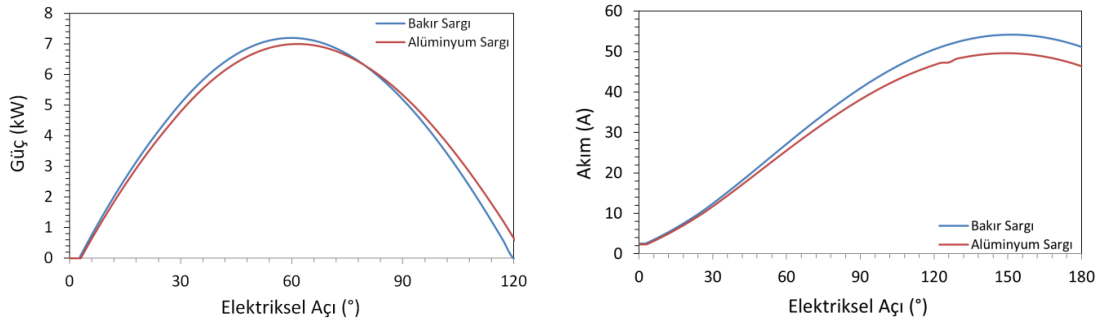
$$\frac{S_{Al}}{S_{Cu}} = \frac{\pi \times r_{Al}^2}{\pi \times r_{Cu}^2} \Rightarrow r_{Al} = 1,34 \times r_{Cu} \quad (6)$$

Eş. 5 kullanılarak eşit sargı direnci için alüminyum sargı teli kesiti bakır tek kesitinin yaklaşık 1,8 katı kadardır. Buna bağlı olarak tel çapı oranı ise yaklaşık 1,34 kattır. Sonuç olarak, alüminyum kullanılarak oluşturulacak sargı için oluk alanı bakır sargıya kıyasla aynı oranda artacaktır. Bu durum stator dış

çapının artmasına neden olmaktadır. Sargı ağırlığı dikkate alındığında, bakır sargı ağırlığı ile alüminyum sargı ağırlığı Eş. 7 ile hesaplanabilir.

$$\frac{m_{Cu}}{m_{Al}} = \frac{d_{Cu} \times S_{Cu}}{d_{Al} \times S_{Al}} \Rightarrow \frac{m_{Cu}}{m_{Al}} = \frac{1}{1.8} \times \frac{d_{Cu}}{d_{Al}} \Rightarrow \frac{m_{Cu}}{m_{Al}} = 1.826 \quad (7)$$

Eş. 7 kullanılarak hesaplanan sargı malzemesi kütle karşılaştırmasında, eşit sargı direnci ve uzunluğuna sahip bakır sargı alüminyum sargıya göre 1,826 kat daha ağır olmaktadır. Bu durumda alüminyum sargı kullanılarak toplam sargı ağırlığı azaltılabilir. Tasarlanan makinada alüminyum ve bakır sargı kullanımı ile oluşturulan modellerin analizi sonucunda elde edilen veriler Tablo 3’de verilmektedir. Ayrıca her iki model içinde akım, güç değişimi Şekil 4 ile gösterilmektedir. Doğru bir karşılaştırma yapılabilmesi için sargı direnci, akım yoğunluğu, oluk doluluk oranı, çıkış gücü, rotor çap ve uzunluğu, mıknatıs boyutları, hava aralığı gibi parametrelerin aynı olması gerekmektedir. Bu durum dikkate alınarak, Tablo 3’de diğer parametrelerin değişimi karşılaştırmalı olarak detaylandırılmaktadır.



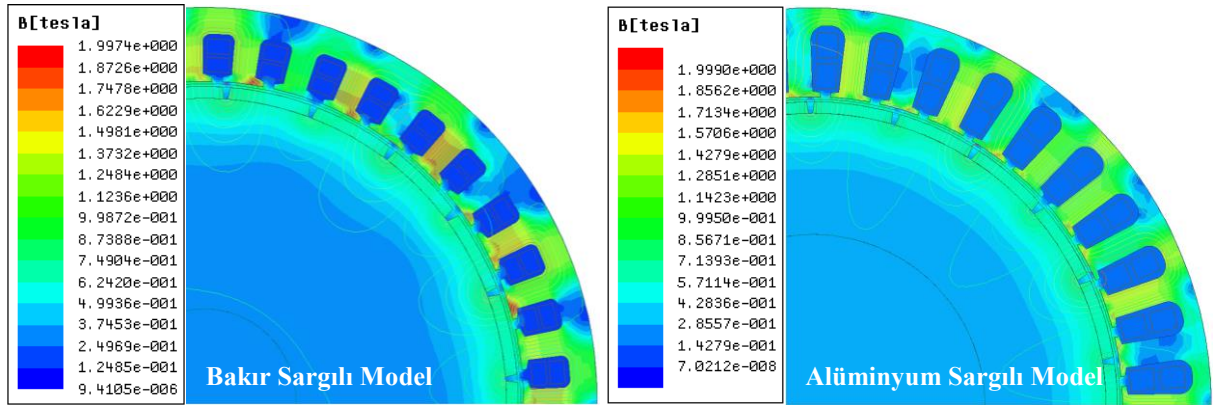
Şekil 4. Sabit mıknatıslı senkron motor güç, akım değişim grafiği

Tablo 3. Sabit mıknatıslı senkron motor sargı malzemeleri karşılaştırma tablosu

Parametreler	Birim	Bakır Sargılı Motor Modeli	Alüminyum Sargılı Motor Modeli
Sargı Tel Çapı	mm	0,80	1,00
Bobin Uzunluğu	mm	481,454	495,528
Faz Sargısı Direnci	Ω	3,532	3,635
Stator Dış Çapı	mm	266	278
Stator Oluk Alanı	mm ²	147,564	244,999
Stator Oluk Doluluk Oranı	%	52,5103	53,5342
Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu	Tesla	1,11293	1,39532
Stator Dış Akı Yoğunluğu	Tesla	1,70339	1,65604
Stator Nüve Ağırlığı	kg	17,1532	18,8803
Rotor Nüve Ağırlığı	kg	28,0411	28,0411
Mıknatıs Ağırlığı	kg	3,21174	3,21174
Toplam Sargı Ağırlığı	kg	6,68461	3,66079
Toplam Motor Ağırlığı	kg	55,0898	52,7736
Nüve Kayıpları	Watt	23,1643	33,0205
Sargı Kayıpları	Watt	1105,96	1148,12
Akım Yoğunluğu	A/mm ²	9,84006	9,88245
Verim	%	78,8612	78,1139

Tablo 3’de yer alan veriler incelendiğinde, bakır sargı yerine alüminyum sargı kullanımı stator dış çapının 12 mm kadar büyümesine ve stator nüve ağırlığının yaklaşık 1,7 kg kadar artmasına neden olmaktadır. Ayrıca sargı setlerinin yerleştirileceği oluk alanı da yaklaşık 1,66 kat artmaktadır. Her iki sargı yapısında ortalama bobin uzunlukları birbirine yakın olmakla beraber alüminyum sargı bobinin uzunluğu stator dış çapının artmasından dolayı bakır sargı bobin boyuna kıyasla yaklaşık 14 mm daha uzundur. Ancak, alüminyum sargı hacmi her ne kadar bakır sargıya oranla daha fazla olsa da, öz kütlelerinin bakıra göre çok daha düşük olmasından dolayı sargı ağırlığı yaklaşık 1,83 kat daha az olmaktadır. Toplam makine ağırlığı açısından bakıldığında, stator nüvesinde ağırlık artışının sargı ağırlığının azaltılması ile ortadan kalktığı görülmektedir. Stator nüve boyutunun artması nüve kayıplarının da artmasına neden olacaktır. Ancak, motorun çalışma hızının düşük olmasından dolayı nüve kayıbındaki artış çok küçük değerlerde olmaktadır. Bu yüzden motor kayıp gücün büyük bir oranını sargı kayıpları oluşturmaktadır. Dolayısıyla bakır sargıya eş sargı direncine sahip alüminyum kullanımı kayıp gücün çok az bir değer de artmasına neden olmaktadır. Motor verimi her iki sargı modeli içinde yaklaşık olarak eşittir.

Tablo 3’de verilen akı yoğunluğu değerlerinin her iki sargı yapısı için oluşturulan modeller için birbirine yakın olması doğru bir karşılaştırma yapılması açısından önemlidir. Bu kapsamda yapılan elektromanyetik analizler sonucunda elde edilen akı dağılımı ve akı yoğunluğu her iki model içinde Şekil 5’de gösterilmektedir. Şekil 5 incelendiğinde her iki modelde de stator dişlerindeki akı yoğunluğu yaklaşık 1,7 T, stator boyunduruk akı yoğunluğu 1,3 T değerinde olduğu görülmektedir. Rotor geometrisi her iki modelde de aynı olduğundan akı yoğunluğu değeri aynıdır. Ayrıca her iki model içinde kaçak akıların ihmal edilebilecek düzeyde olduğu şekil üzerinden görülmektedir.



Şekil 5. Sabit mıknatıslı senkron motor akı dağılımı ve akı yoğunluğu değerleri

Alüminyum sargı kullanımı, makinanın toplam hacminin artmasına neden olmasına rağmen ağırlık ve çıkış performansının değişmediği ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan, alüminyum sargı kullanımının motor maliyeti açısından nasıl bir etki ortaya çıkardığı Tablo 4’de verilen veriler dikkate alarak değerlendirilebilir. Öncelikle, rotor ve mıknatıs boyutlarında herhangi bir boyutsal değişiklik yapılmadığından maliyet karşılaştırması açısından her iki sargı malzemesi için de aynı olmaktadır. Stator nüve hacmi, alüminyum sargılı motor modeline kıyasla bakır sargılı motor modelinde daha küçüktür. Alüminyum sargılı motor modelinde tasarlanan stator nüvesinin imal edilebilmesi için yaklaşık 7-8 kg daha fazla malzeme kullanılmasını gerektirmektedir. Diğer taraftan, aynı elektriksel parametrelere sahip sargı yapısının oluşturulması için bakır kullanılması durumunda, yaklaşık 3-3,5 kg daha malzeme kullanılmalıdır. Bu durum maliyet açısından karşılaştırıldığında 7-8 kg daha fazla sac malzeme kullanımı yaklaşık 7 USD kadar maliyet artışına neden olurken, 6-7 kg bakır yerine 3-3,5 kg

alüminyum kullanımı ise yaklaşık 64,5 USD kadar maliyet kazancı sağlamaktadır. Sonuç olarak alüminyum sargı kullanılması ile beraber motor imalat maliyeti % 12,33 oranında azaltılabilir (işçilik ve diğer aksesuarlar hariç tutulmuştur). Bu maliyet kazancının, elektrik makinaları içerisindeki sargı ağırlığı arttıkça daha da artacağı öngörülmektedir. Tablo 4’de verilen birim fiyatlar kullanılacak malzemenin özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Tablo 4. Sabit mıknatıslı senkron motor maliyet karşılaştırma tablosu

Parametreler	Birim Fiyat USD / kg		Kullanım Miktarı (kg)	Bakır Sargılı Motor Modeli	Alüminyum Sargılı Motor Modeli
Stator Nüve Paketi	0,9		50,1 – 58,5	45,09	52,65
Stator Sargı	10,8	2,2	6,7 – 3,6	72,36	7,92
Rotor Nüve Paketi	0,9		44,03	39,62	39,62
NdFeB Mıknatıs	95		3,21	304,95	304,95
Toplam Maliyet (TL)				462,02	405,14

IV. SONUÇ

Günümüz teknolojik gelişmeler, daha az enerji tüketimi ve daha verimli sistemlerin oluşturulmasının önünü açmaktadır. Gerek endüstriyel tesislerde gerekse de konutlarda yaygın olarak kullanılan asansör sistemleri de bu doğrultuda üzerine yoğun çalışmaların yapıldığı bir alandır. Yüksek güç ve moment yoğunluğuna sahip sabit mıknatıslı senkron motorların asansör sürme sistemlerinde kullanılmaya başlanmasıyla birlikte dişli sistemleri ortadan kaldırılarak daha verimli yapılar oluşturulmaktadır. Bu çalışmada, asansör sistemlerinde doğrudan sürüş için kullanılacak bir sabit mıknatıslı senkron motorun alüminyum sargılı olarak tasarlanması ile elde edilebilecek avantaj ve dezavantajlar karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur.

Alüminyum sargı kullanılması elektrik makinalarında sargı hacminin artmasına ve dolayısıyla stator nüve boyutunun büyümesine neden olmaktadır. 4,3 kW çıkış gücüne sahip önerilen senkron motorda alüminyum sargı kullanıldığında toplam motor hacmi yaklaşık olarak % 9 oranında büyümüştür. Stator nüvesinin büyümesi nüve ağırlığının artmasına neden olmuştur. Ancak, alüminyum malzeme kullanılması sargı hacminin artmasına neden olurken sargı ağırlığının ise azalmasını sağlamıştır. Toplam makine ağırlığı dikkate alındığında, stator nüve boyutunun büyümesine rağmen sargı ağırlığının azaltılması ile motor ağırlığı artmamakla beraber çok küçük miktarda azalmıştır. Bir diğer önemli nokta ise sargı malzemesinin motor imalat fiyatına olan etkisi ortaya konulmuştur. Stator nüve boyutunun artması ile maliyetinin artması bir dezavantaj olarak ortaya çıksa da, alüminyumun bakıra oranla çok daha ucuz olması nedeniyle toplam motor maliyetinde % 12,33 oranında kazanç sağlanmaktadır. % 9 oranındaki hacim artışının çok büyük bir dezavantaja neden olmadığı asansör sistemlerinde % 12,33 daha düşük maliyetle bir motorun imal edilmesi büyük önem taşımaktadır. Sabit mıknatıslı senkron motorlarda çıkış performansı aynı kalmak şartı ile daha düşük maliyetlerde imal edilebilmesi, rekabet gücünün geliştirilmesi açısından asansör sistemi üreticilerine avantaj sağlayacağı öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR: Filiz Makine ve Sayın Arif Filiz’e katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

V. KAYNAKLAR

- [1] M. Ayaz, K. Erhan, and E. Özdemir, "Harmonic effects of driver unit on gearless elevator systems and power grid," 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress, Adana, Turkey, 2016, pp. 4525-4529.
- [2] F. Adak, N. Duru and H. T. Duru, "Elevator simulator design and estimating energy consumption of an elevator system," *Energy and Buildings*, vol. 65, pp. 272-280, 2013.
- [3] K. Erhan, M. Ayaz and E. Özdemir, "Design consideration on flywheel energy storage system for new generation elevators," 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress, Adana, Turkey, 2016, pp. 2798-2802.
- [4] H. Yetiş, "Dişlisiz asansör sistemleri için ferrite tabanlı gömülü mıknatıslı senkron motor tasarımı," Yüksek lisans tezi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [5] M. Kimiabeigi, J. D. Widmer, R. S. Sheridan, A. Walton and R. Harris, "Design of high performance traction motors using cheaper grade of materials," 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Glasgow, UK, 2016, pp. 1-7.
- [6] K. Yin, J. Chen, F. Wang, X. Sun, W. Ren and Y. Wang, "Study on identification of winding material in distribution transformer based on computed tomography," IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference, Xi'an, China, 2016, pp. 1034-1037.
- [7] R. Wrobel, D. Salt, N. Simpson and P. H. Mellor, "Comparative study of copper and aluminium conductors – future cost effective PM machines," 7th IET International Conference on Power Electronics Machines and Drives, Manchester, UK, 2014, pp. 1-6.
- [8] J. C. Olivares-Galvan, F. De Leon, P. S. Georgilakis and R. Escarela-Perez, "Selection of copper against aluminium windings for distribution transformers," *IET Electric Power Applications*, vol. 4, no. 6, pp. 474-485, 2010.
- [9] M. Iorgulescu, "Study of single phase induction motor with aluminium versus copper stator winding," International Conference on Applied and Theoretical Electricity, Craiova, Romania, 2016, pp. 1-5.
- [10] S. Ayat, R. Wrobel, J. Baker and D. Drury, "A comparative study between aluminium and copper windings for a modular-wound IPM electric machine," IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami, USA, 2017, pp. 1-8.
- [11] J. D. Widmer, R. Martin and B. C. Mecrow, "Precompressed and stranded aluminum motor windings for traction motors," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 52, no. 3, pp. 2215-2223, 2016.
- [12] I. Lakatos, F. Szauter and D. Czeglédi, "Investigating the appliance of aluminum as a winding material with high efficiency electric motor," 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, Auckland, New Zealand, 2016, pp. 1-5.
- [13] X. Arrasate, S. Kaczmarczyk, G. Almandoz, J. M. Abete and I. Isasa, "The modelling, simulation and experimental testing of the dynamic responses of an elevator system", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 42, pp. 258-282, 2014.