

# Çift Kafesli Rotorda Alüminyum ve Bakırın Birlikte Kullanımının Asenkron Motor Verimine Etkisinin İncelenmesi

## Efficiency Analysis of Aluminum and Copper Filled Double Cage Rotor Induction Motors

id Mert Akçomak<sup>1,2</sup>, Sibel Zorlu Partal<sup>1</sup> id

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Ürün ve Projeler Tribe, WAT Motor San. ve Tic. A.Ş., Tekirdağ, TÜRKİYE

[mert.akcomak@wat.com.tr](mailto:mert.akcomak@wat.com.tr), [zorlu@yildiz.edu.tr](mailto:zorlu@yildiz.edu.tr)

ORCID:0000-0001-7138-6148, ORCID:0000-0003-13092090

**Özet**—Son yıllarda artan sanayileşme ve hızlı nüfus artışı sebebiyle elektrik enerjisinin kullanımı artmaktadır. Dünya üzerinde kullanılan elektrik enerjisinin büyük bir bölümü elektrik motorlarına aittir. Bu sebeple ülkemizde ve dünyada asenkron motor verim sınıfının yükseltilmesi amacıyla farklı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalara bir örnek olması amacıyla, bu makalede 7.5kW, 4 kutuplu, IE2 verim sınıfında, sincap kafesli bir asenkron motor referans alınmış ve 6 farklı çift kafesli rotor oluk geometrisi oluşturularak, alüminyum ve bakır iletkenleri birlikte kullanılıp, verim analizleri yapılmıştır. Çalışmada Ansys Maxwell programı kullanılarak, rotor oluk şekilleri modellenmiş ve her bir tasarımın sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizde; kalkış parametreleri, moment, akım, kayıplar vb. elde edilmiş, her bir tasarımın verim analizleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca motor tasarımları ağırlık ve maliyet yönünden de karşılaştırılmış ve sonuçta verim sınıfı yükseltilmiş optimum bir tasarım elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler**—verimlilik sınıfı, optimizasyon, asenkron motor tasarımı, sonlu elemanlar yöntemi, Ansys Maxwell

**Abstract**— Due to increasing industrialization and rapid population growth in recent years, the use of electrical energy has been increasing. A large part of the electrical energy used in the world belongs to electric motors. For this reason, different studies are carried out in order to increase the efficiency class of induction motors in our country and in the world. In order to set an example for these studies, within the scope of this study, a 7.5kW, 4-pole, IE2 efficiency class, squirrel-cage induction motor was taken as a reference and efficiency analysis was carried out by using aluminum and copper conductors in different double cage rotor slot geometries. In the study, using Ansys Maxwell program, different rotor slot shapes were modelled, and each design was analyzed with the finite element method. In analysis; starting parameters, efficiency, torque, current, losses etc. were analyzed and the results are given comparatively. In addition, motor designs were compared in terms of weight and cost, and as a result, an optimum design with an increased efficiency class was obtained.

**Key Words**—efficiency class, optimization, induction motor design, finite element method, Ansys Maxwell

### 1. Giriş

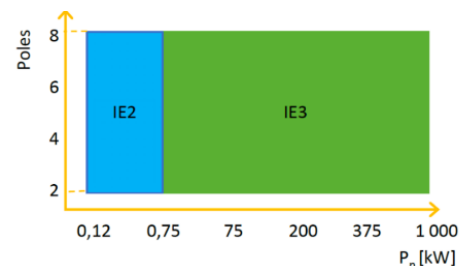
Günümüzde, artan sanayileşme ve ülkelerin nüfus oranlarındaki artışlar sebebiyle elektrik enerjisi kullanımı her geçen gün artmaktadır. Artan enerji tüketimine karşılık, enerji kaynaklarına ulaşmada yaşanan sıkıntılardan dolayı, son yıllarda mevcut enerjiyi daha verimli kullanmak üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar enerjide

meydana gelen kayıpların azaltılması ve verimin yükseltilmesi amacı ile yapılmaktadır. 2014 yılında yapılan bir araştırmaya göre dünya üzerinde tüketilen elektrik enerjisinin %53'ü elektrik motorlarına aittir [1]. 2015 yılında ülkemizde yapılan bir araştırmaya göre harcanan elektrik enerjisinin %36'sını elektrik motorları oluşturmaktadır. Endüstride kullanılan elektrik tüketiminin ise yaklaşık %70'i elektrik motorlarından kaynaklıdır [2]. Endüstride en yaygın kullanılan motorlar asenkron motorlar olduğundan, endüstriyel elektrik tüketiminde büyük paya sahiptirler. Bu sebeple asenkron motorların daha verimli tasarımlarının yapılması ve böylece enerji tasarrufunda elde edilecek kazanç, araştırmacıların ve endüstrinin üzerinde en çok çalıştığı konulardandır. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının bu konuda yaptığı çalışmaya göre, daha verimli motor kullanarak; basınçlı hava sistemlerinde %33, fan sistemlerinde %22 ve pompa uygulamalarında ise %22 iyileşme sağlanabilir [3].

IEC 60034-30:2008 standardına göre, 0,75 kW ile 375 kW arasındaki elektrik motorları için 4 temel verimlilik sınıfı tanımlanmıştır [3]:

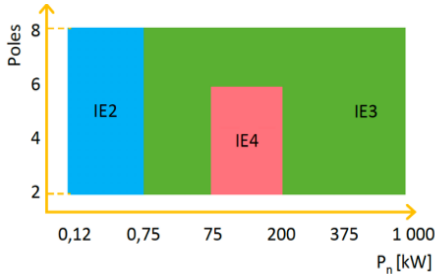
- IE1 - Standart Verimlilik
- IE2 - Yüksek Verimlilik
- IE3 - Premium Verimlilik
- IE4 - Süper Premium Verimlilik

1 Temmuz 2021 itibariyle yayınlanan regülasyona göre, 3 fazlı endüstriyel motorlarda 0,75 kW ve üzerindeki güçlerde IE2 verim sınıfı motorların sürücü ile kullanımı yasaklanmıştır. Bu regülasyon sonrası belirlenen motor verim sınıfları Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu regülasyonla, 0.12-0.75 kW güç aralığında en az IE2, 0.75-1000 kW aralığında ise en az IE3 verim sınıfına dahil motorların kullanılması zorunluluk haline getirilmiştir. Ayrıca 8 kutuplu elektrik motorları da ilk defa regülasyona dahil olmuştur.



Şekil 1: 1 Temmuz 2021 düzenlemesi sonrası motor verim sınıfları [4]

1 Temmuz 2023 itibarıyla yayınlanacak olan bir sonraki regülasyonda, 3 fazlı 2-4-6 kutuplu endüstriyel motorlarda, 2021 regülasyonuna ek olarak 75-200 kW arasındaki güçlerde IE4 verim sınıfına sahip olma zorunluluğu getirilecektir. Ayrıca daha önce hiç verim standardına tabi tutulmamış bir fazlı asenkron motorların da en az IE2 verim sınıfına dahil olmaları gerekecektir. Regülasyonlardan da görüleceği üzere elektrik enerjisinin daha verimli kullanımına olan önem giderek artmakta ve bunu sağlamak için de, yüksek verimli elektrik motor kullanımının yaygınlaşması gerektiği açıkça görülmektedir. Bu regülasyon ile planlanan motor verim sınıfları Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2:1 Temmuz 2023 düzenlemesinde planlanan motor verim sınıfları [4]

2012 yılında yapılan bir çalışmada motor verimliliğini etkileyen faktörler matematiksel ifadelerle açıklanmıştır. Kayıpları azaltmada kullanılacak yöntemlerin başında yeni oluk tasarımı ve boyutlandırmanın geldiği belirtilmiş, fakat yatırım masrafları, kalıp maliyetleri vb. gerekçe gösterilerek mevcut sistem üzerinde yapılabilecek iyileştirmeler üzerinde durulmuştur. Çalışmada, demir kayıplarını azaltmak amacıyla düşük kayıp katsayısına sahip çelik sacların kullanılması önerilmiştir. Sonuç olarak da, rotor çubukları arasında akan enine kaçak akımları azaltmak amacıyla rotor çekirdek mil grubuna ısıtılma işlemi uygulandığı ve ısıtılma sonrasında ek kayıplar ile rotor yüzey kayıplarında azalma meydana gelerek, verimin arttığı görülmüştür [5]. 2012 yılında yapılan bir diğer çalışmada ise düşük gerilimli, kutup sayısı 4 ve 6 olan üç fazlı sincap kafesli asenkron motorlar ele alınmıştır. Verimliliği arttırmada düşük maliyetli çözümler önerilerinin üzerinde durulmuştur. Mevcut motorların stator dış çaplarını arttırarak, verimlilik yükseltmeye çalışılmıştır [6]. 2014 yılında yapılan bir başka çalışmada motor kayıplarını azaltmaya yönelik teknikler incelenmiş ve rotor aktif malzemesinin, sargı doluluk oranının, paket boyunun, kullanılan çelik tipinin ve arttırılmış oluk alanlarının motor verimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, rotor olukları ve uç halkası için alüminyum yerine bakır kullanımının verim sınıfını IE4 seviyesine yükseltmede etkili olduğu belirtilmiştir. Ayrıca mevcut alüminyum rotor çubukları ve uç halkalarının kullanımını durumunda stator ve rotor oluk alanlarının arttırılmasıyla da verimin arttırılabileceği belirtilmiştir [7]. 2016 yılında yapılan bir çalışmada rotor oluk malzemesi olarak alüminyum ya da bakır kullanımı, daha büyük çerçeve kullanımı, daha ince ve kayıp katsayısı düşük olan çelik sacların kullanımı, stator ve rotor geometrisinin optimizasyonu, imalat süreçleri, soğutucu fanlar ve rulmanlar üzerinde durulmuştur. Üretim sürecindeki hassasiyetin bazı kayıpların azalmasını sağladığı belirtilmiştir. Örneğin hava aralığının minimuma indirilmesinin, kaçak yük kayıplarının azalmasında ve çelik sacların kesilme-işlenme aşamalarının da, demir kayıplarının azalmasında önemli etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır [8]. 2016 yılında yapılan diğer bir çalışmada ise rotor iletken yapısının, kullanılan iletken malzemenin, stator ve rotorda kullanılan manyetik

malzemenin, rotor uzunluğunun ve son olarak da stator oluk doluluk oranının, asenkron motor verimine etkileri incelenmiştir. Çalışmada farklı rotor oluk yapıları denenmiş ve direnç değerlerinin aynı kalması sebebiyle, sonuçların aynı verimlilik aralığında kaldığı, fakat deri etkisi vb. nedeniyle daha iyi kalkış momenti ve kalkış akımı elde edildiği belirtilmiştir. Rotor uzunluğunun arttırılması ile de, akım yoğunluğu ve akı yoğunluğunda azalma elde edilmiş ve kayıpların azalması sebebiyle verimde artış gözlenmiştir [9]. 2017 yılında yapılan bir çalışmada motor verimini arttırmaya yönelik tekniklerden olan stator sargı oluk doluluk oranını arttırma, rotor çubuk malzemesi olarak alüminyum ve bakır kullanımı, farklı laminasyon malzemelerinin kullanımı, çekirdek paket boyunun arttırılması, rotor çekirdek mil grubuna ısıtılma yapılması, verimli rulmanların kullanımı vb. üzerinde durulmuştur. Çalışmanın sonunda paket boyu artışının, verimli sacların kullanımının, verimli rulman kullanımının ve stator bakır miktarı artışının motor verimini yükselttiği belirtilmiştir. Ayrıca rotor çubuklarının ve uç halkasının bakırdan yapılması durumunda verimde önemli oranda artış olabileceği ifade edilmiştir. Sonuçta da stator ve rotor laminasyonlarında yapılabilecek iyileştirmelerle, verim seviyesinin yükseltilebileceği önerisinde bulunulmuştur [10][11].

Günümüzde asenkron motorlarda rotor iletkeni olarak çoğunlukla alüminyumun kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise bakır ve alüminyum birlikte kullanılmış ve farklı rotor oluk şekilleri tasarlanarak, her bir tasarımın verim üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Çalışmada 7.5 kW, 4 kutuplu, IE2 verim sınıfına sahip, sincap kafesli bir asenkron motor referans alınmıştır. Kayıp analizinde, asenkron motor kayıpları arasında önemli bir yere sahip olan rotor iletken kayıplarına odaklanılmıştır. Analiz için öncelikle 6 farklı çift kafesli rotor oluk şekli tasarlanmıştır. Daha sonra bu çift kafesli rotor oluklarının üst kısmına alüminyum, alt kısmına ise bakır iletken yerleştirilerek, farklı rotor oluk şekilleri ile alüminyum ve bakırın bir arada kullanılmasının rotor iletken kayıplarına, dolayısıyla da motor verimine etkisi detaylı olarak incelenmiştir.

## 2. Verim Artırma Yöntemleri

Yüksek verimli elektrik motoru tasarımı yapılırken motorda meydana gelen her bir kayıp detaylı olarak incelenmelidir. Asenkron motorlarda meydana gelen kayıplar ve bu kayıpların kendi içindeki dağılımı aşağıdaki gibi ifade edilebilir [12].

- Stator iletken kayıpları, %25-%40
- Rotor iletken kayıpları, %15-%25
- Demir (nüve) kayıpları, %15-%25
- Sürtünme ve rüzgâr kayıpları, %5-%15
- Kaçak yük kayıpları, %10-%20

Motorun tasarım ve üretim aşamasında kullanılabilecek farklı teknikler sayesinde motor verimi arttırılabilir ve böylece motor verim sınıfı yükseltilebilir. Motor veriminin arttırmak için ise, motor kayıpları olabildiğince azaltılmalıdır. Kayıpları azaltmak için, tasarım ve üretim aşamasında kullanılan tekniklerde amaç sadece motor verimini yükseltmek değil, aynı zamanda motor performansını etkileyen akım, moment, güç faktörü vb. parametreleri de dikkate alarak, optimum yöntemi elde etmektir. Ayrıca kullanılan yöntemlerin maliyetleri de yöntemin seçiminde önemli rol oynamaktadır. Yapılan geliştirme çalışmalarındaki asıl amaç minimum

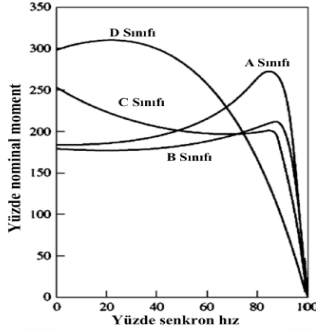
üretici maliyeti ile verimi yükseltilmiş bir motor ortaya çıkarabilmektedir. Motor verimini arttırmada sıklıkla kullanılan tekniklerden bazıları aşağıda verilmiştir [13]:

- Sargılarda %20-60 oranında daha fazla bakır kullanımı.
- Gövdede daha fazla çelik kullanımı.
- Daha ince çelik laminasyonların tercih edilmesi.
- Yüksek kalitede elektriksel çelik tercih edilmesi.
- Rotor oluk iletkeni olarak bakırın kullanımı.
- Daha verimli stator ve rotor oluklarının tasarlanması.
- Stator ve rotor arasındaki hava aralığının optimum seviyede tutulması.
- Nüve boyunun uzatılması.
- Sürtünme kayıpları azaltılmış rulman ve yağ kullanımı.
- Isıl şoklama yapılması.

Bu çalışmada yukarıda verilen verim artırma yöntemlerinden; farklı rotor oluk şekillerinin tasarlanması ile alüminyum ve bakırın rotorda birlikte kullanılması yöntemlerinin motor verimine etkisi analiz edilmiştir.

### 2.1. Farklı Rotor Oluk Şekillerinin Motor Tasarımına Etkisi

NEMA standartlarında dört farklı rotor oluk geometrisine sahip tasarım sınıfı mevcuttur. Bu standart tasarım sınıflarına ait hız-moment eğrileri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: NEMA tasarım sınıfları için hız-moment eğrileri [14]

Her bir standart tasarım sınıfının, farklı karakteristik özellikleri mevcuttur. Bu karakteristik özellikler tasarımların sahip olduğu farklı rotor oluk şekillerinden kaynaklanmaktadır. Standart tasarım sınıflarına ait rotor geometrileri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. NEMA tasarım sınıfları için rotor geometrileri [14]

A tasarım sınıfına ait motorlarda rotor olukları hava aralığına yakın ve büyüktür. Normal kalkış momentine ve düşük kaymaya sahip olmalarına rağmen, yüksek kalkış

akımları vardır. Bu tip motorlar genellikle fan, pompa, torna vb. uygulamalarda kullanılırlar [14].

B tasarım sınıfına ait motorlarda rotor olukları hava aralığına yakın, büyük ve derindir. Normal kalkış momentine, düşük kaymaya ve düşük kalkış akımına sahiptirler. Bu tip motorlar A tasarım sınıfı ile benzer uygulamalarda kullanılırlar. Düşük kalkış akımına sahip olması sebebiyle B tasarım sınıfı motorlar, A tasarım sınıfı yerine tercih edilmektedir [14].

C tasarım sınıfına ait motorlarda rotor olukları çift kafeslidir. Yüksek kalkış momentine, düşük kaymaya ve düşük kalkış akımına sahiptirler. Bu tip motorlar yüksek kalkış momenti gerektiren yüklü pompa, kompresör, taşıyıcı vb. uygulamalarda kullanılırlar [14].

D tasarım sınıfına ait motorlarda, rotor olukları hava aralığına yakın ve küçüktür. Çok yüksek kalkış momentine, yüksek kaymaya ve düşük kalkış akımına sahiptirler. Bu tip motorlar yüksek eylemsizliğe sahip kompresör, vinç ve fan gibi yüklerin ivmelendirilmesi uygulamalarında kullanılırlar [14].

### 2.2. Farklı Rotor İletken Malzemelerinin Motor Tasarımına Etkisi

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan sincap kafesli asenkron motorların rotorlarında iletken malzeme olarak çoğunlukla alüminyumun kullanıldığı bilinmektedir. Yüksek verimlilik istenen özel uygulamalarda ise alüminyum yerine bakır tercih edilmektedir. Motor tasarımında iletken olarak alüminyum ve bakır kullanımı tercihinde, farklı erime sıcaklıklarına sahip olmaları, iletkenliklerinin farklı olması, maliyetleri arasındaki farklar gibi birbirlerine göre üstün veya zayıf oldukları özellikleri gözönünde bulundurularak, tasarım optimizasyonu yapılabilir ve böylece daha verimli bir motor elde edilebilir. Bu sebeple literatürde, alüminyum ve bakırın olumlu özelliklerini birarada kullanmak amacıyla, rotor oluk iletkeni olarak her iki iletkenin birlikte kullanıldığı uygulamalar bulunmaktadır [15] [16].

Birim maliyetinin, erime sıcaklığının ve öz ağırlığının bakıra oranla daha düşük olması, endüstriyel uygulamalarda alüminyumun kullanımını yaygınlaştırmıştır. Bunda yüksek erime sıcaklığı nedeniyle bakırın eritilme ve rotora döküm proseslerinin, alüminyuma göre daha zorlayıcı ve maliyetli olmasının etkisi de büyüktür. Fakat yüksek verimliliğin istendiği uygulamalarda alüminyuma oranla düşük direnci ve yüksek iletkenliği ile rotor oluk iletkenlerinde bakırın kullanımı ön plana çıkmaktadır. Çizelge 1'de alüminyum ve bakır malzemelerinin bazı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1. Alüminyum ile bakırın karşılaştırılması [17]

Özellikler	Alüminyum	Bakır
Özgül ağırlık [g/cm <sup>3</sup> ]	2.70	8.96
Erime Sıcaklığı [°C]	660.32	1084.62
Direnç [Ω.m]	2.7 x 10 <sup>-8</sup>	1.7 x 10 <sup>-8</sup>
İletkenlik [S/m]	37 x 10 <sup>6</sup>	58 x 10 <sup>6</sup>
Maliyet [\$/ton]	3266	9955

Rotor oluklarına bakır, ya çubuk şeklinde ya da döküm yoluyla yerleştirilebilir. Birim maliyetinin yüksek olmasına karşın, bakırın çubuk halinde oluklara yerleştirilmesiyle döküm ve proses maliyetleri ortadan kalkmaktadır. Ancak işlemin bakır eritebilecek ve döküm proseslerini



gerçekleştirebilecek bir altyapısı var ise, bakırın rotora döküm işlemi, bakır çubukların kullanımına oranla daha az maliyetli olmaktadır. Sonuç olarak bakırın her iki kullanımında da direncinin alüminyuma göre düşük olması sebebiyle rotor iletken kayıplarında azalma meydana gelecek ve motor verimi yükselecektir. Ancak rotor direncinin azalması nedeniyle kalkış momentinde düşüş yaşanacaktır.

Yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı motorun hem kalkış anında iyi bir performans gösterebilmesi, hem de nominal çalışma durumunda yüksek verimlilik sağlayabilmesi için, rotor oluklarında alüminyum ve bakırın birlikte kullanılması optimum bir yaklaşım olarak düşünülebilir. Motorda kalkış anında deri etkisi nedeniyle akım, iletkende eşit bir şekilde dağılmayıp, iletkenin dış çeperinden, yani rotor oluklarının üst kısmından akmak isteyecektir. Bu sebeple çift kafesli rotor oluklarının üst kısmına yüksek dirençli alüminyumun yerleştirilmesiyle yüksek kalkış momenti elde edilebilecektir. Motor nominal çalışma durumuna geçtiğinde ise akım tüm rotor oluk yüzeyinden akmak isteyecek ve çift kafesli oluklarının alt kısmına yerleştirilen düşük dirençli bakır kısmı tercih edecektir. Akımın bakır kısım üzerinden yolunu tamamlamasıyla rotor iletken kayıplarında düşüş yaşanacak ve motor verimi yükselecektir [7].

Rotor oluklarında bakır ve alüminyumun birlikte kullanımı iki farklı şekilde yapılabilmektedir: İlk yöntem, bakır çubukların rotor oluklarına sabitlenmesi ve üzerine alüminyum döküm işleminin gerçekleştirilmesidir. Oluklarda var olan bakır çubukların iyi bir alüminyum döküme izin vermemesi, bakır çubukların kötü kaynak özelliğine sahip alüminyum uç halkaları tarafından kısa devreye alınmaması ve ortamdaki oksit varlığı sebebiyle alüminyum döküm ile bakır çubuklar arasında iyi bir elektriksel temasın oluşmaması, bu yöntemin dezavantajları arasındadır. Literatürde yapılan bir çalışmada, bakır çubuklara, oluklara yerleştirilmeden önce kimyasal bir kaplama uygulanarak bu olumsuzluk giderilmeye çalışılmıştır. Bu kaplama ile alüminyum ve bakır çubuklar arasında kristal bir yapı oluşturularak elektriksel olarak birbirlerine bağlanması sağlanmıştır. Bu yöntemde bakır çubukların kullanımı bakırın döküm maliyetini ortadan kaldırmaktadır [15]. Şekil 5’de bu oluk yapısı görülmektedir.

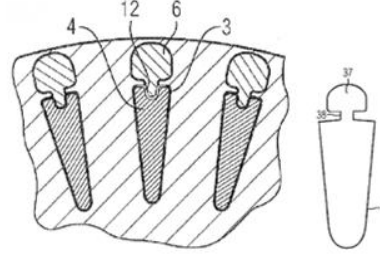


Şekil 5: Bakır çubuk üzerine alüminyum döküm yapılmış oluk yapısı [15]

Diğer bir yöntem ise rotor oluklarına önce bakırın daha sonra alüminyumun dökülmesi işlemidir. Bakır çubuk kullanımında yaşanan olumsuzluklara bu yöntemde rastlanmamıştır. Fakat bakırın eritme ve döküm prosesleri sebebiyle bu yöntem daha zahmetli ve maliyetli olmaktadır [16]. Şekil 6’da bakır döküm üzerine alüminyum döküm yapılmış oluk yapısı gösterilmiştir.

Bu çalışmada ise, motor veriminin artırılmasına yönelik açıklanan bu 2 yöntem birlikte kullanılmıştır. Bunun için farklı rotor oluk yapılarını içeren 6 farklı motor tasarımı

yapılmış, bu rotorlarda bakır ve alüminyum birlikte kullanılmış ve Ansys Maxwell’de SEY (Sonlu Elemanlar Yöntemi) ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak detaylı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 6: Bakır döküm üzerine alüminyum döküm yapılmış oluk yapısı [16]

### 3. Referans Motorun SEY Analizleri

Bu çalışmada 3 fazlı 7.5 kW gücünde bir sincap kafesli asenkron motor referans alınmış ve önce bu referans motorun Ansys Maxwell 2D programı kullanılarak, SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu motorun rotor oluk yapısı paralel diş şeklindedir ve rotorda iletken olarak alüminyum kullanılmıştır. Referans alınan bu 3 fazlı sincap kafesli asenkron motorun verimini arttırmak amacıyla daha sonra farklı rotor oluk yapılarını içeren ve bakırın ve alüminyumun birlikte kullanıldığı 6 farklı motor modeli oluşturulmuş, SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu modellerin motorun verimi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

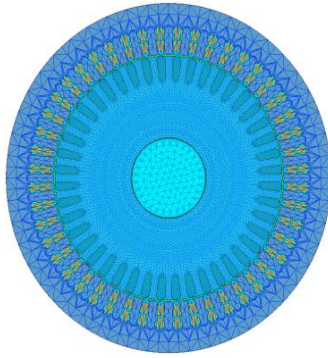
#### 3.1. Referans Asenkron Motorun Modellenmesi ve Analizi

Referans alınan 7.5 kW, 4 kutuplu sincap kafesli asenkron motorun öncelikle ANSYS RMxprt yazılımında analitik modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model, motora ait nümerik analizleri gerçekleştirebilmek amacıyla ANSYS Maxwell yazılımına aktarılmıştır. Çizelge 2’de referans motora ait parametreler görülmektedir.

Çizelge 2. Motor parametreleri

Elektriksel Parametreler	Değer
Güç [kW]	7.5
Gerilim [V]	380
Frekans [Hz]	50
Kutup Sayısı	4
Hız [d/d]	1452
Akım [A]	15.0
Moment [Nm]	48.7
Stator Direnci [ $\Omega$ ]	0.6491
Stator Kaçak Reaktansı [ $\Omega$ ]	0.6493
Rotor Direnci [ $\Omega$ ]	0.5242
Rotor Kaçak Reaktansı [ $\Omega$ ]	0.8244
Demir Kaybı Direnci [ $\Omega$ ]	837.03
Mıknatıslanma Reaktansı [ $\Omega$ ]	36.076
<b>Stator Parametreleri</b>	
Stator Oluk Sayısı	48
Stator Dış Çapı [mm]	210
Stator İç Çapı [mm]	148
Uzunluk [mm]	250
Çekirdek Malzemesi	M19 24G
<b>Rotor Parametreleri</b>	
Rotor Oluk Sayısı	44
Rotor Dış Çapı [mm]	147.3
Rotor İç Çapı [mm]	48
Uzunluk [mm]	250
Çekirdek Malzemesi	M19 24G
Rotor İletken Malzemesi	Alüminyum

Analitik modeli oluşturulan referans motorun, Ansys Maxwell'de sonlu elemanlar yöntemi ile elektromanyetik analizleri yapılmış ve manyetik devrede meydana gelen doymalar incelenmiştir. SEY ile analizleri yapılan referans motora ait ağ yapısı Şekil 7'de verilmiştir. Motorun Maxwell kullanılarak yapılan analizi sonucunda elde nominal akım, nominal moment, kayıplar, verim, güç faktörü vb. değerleri aşağıdaki Çizelge 3'de verilmiştir. Referans motorun nominal değerleri ile analizlerden elde edilen akım, moment gibi değerler karşılaştırıldığında, analiz için oluşturulan motor modelinde başarı sağlandığı ve motorun nominal değerlerine büyük oranda yakınsaklık sağlandığı görülmüştür. Bu da referans motorun verim sınıfının yükseltilmesi amacıyla oluşturulacak modeller için doğru ortamın elde edilmesi açısından önemlidir.

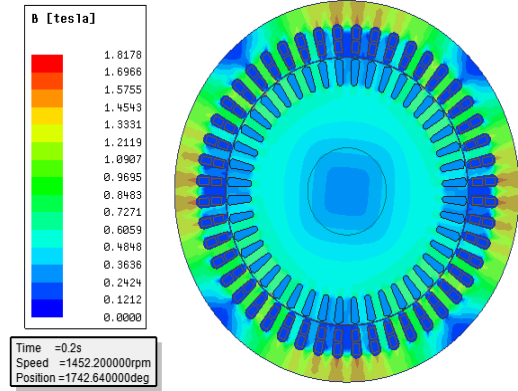


Şekil 7: Referans motorun SEY ağ yapısı

Çizelge 3. Referans motorun SEY sonuçları

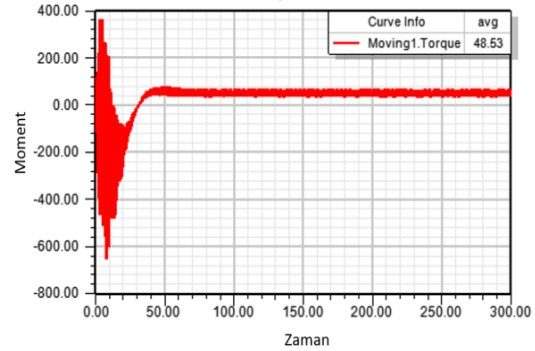
Parametre	Değer
Nominal Hız [d/d]	1452
Nominal Moment [Nm]	48.5
Nominal Akım [A]	14.9
Kalkış Momenti [Nm]	190.6
Kalkış Akımı [A]	138.0
Stator İletken Kayıpları [W]	453.2
Rotor İletken Kayıpları [W]	276.7
Demir Kayıpları [W]	124.0
Sürtünme ve Rüzgar Kayıpları [W]	40.0
Toplam Kayıplar [W]	893.9
Verim [%]	89.4
Güç Faktörü	0.85

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde elde edilen, manyetik akı yoğunluğu, motor çıkış momentini ve motor faz akımları değişimleri sırasıyla Şekil 8, 9 ve 10'da verilmiştir.



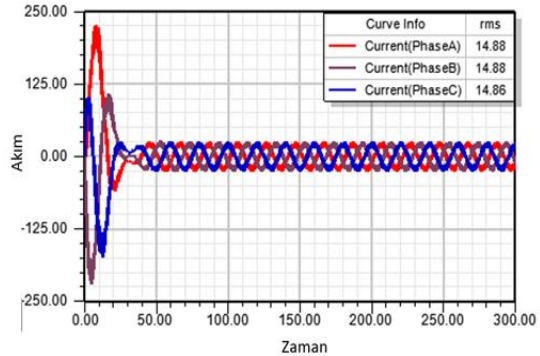
Şekil 8: Referans motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 8'de verilen manyetik akı yoğunluğu dağılımında; stator boyunduruk bölgesinde oluşan en yüksek manyetik akı yoğunluğu seviyesi 1.6 T, stator dış bölgesinde oluşan yüksek manyetik akı yoğunluğu seviyesi 1.25 T, rotor boyunduruk bölgesinde oluşan en yüksek manyetik akı yoğunluğu seviyesi 0.65 T, rotor dış bölgesinde oluşan en yüksek manyetik akı yoğunluğu seviyesi 1.7 T ve hava aralığında oluşan en yüksek manyetik akı yoğunluğu seviyesi de 0.55 T olarak bulunmuştur. Şekil 9'da verilen moment-zaman grafiğinde ise, motor çıkış momentinin 48.5 N.m olduğu görülmektedir.



Şekil 9: Referans motor moment-zaman grafiği

Şekil 10'da referans motora ait akım-zaman grafiği verilmiştir. Kalkış anından sonra motor akımının etkin (rms) değerinin 14.9 A olduğu görülmektedir.



Şekil 10: Referans motor akım-zaman grafiği

Yapılan SEY analizleri sonucunda referans alınan asenkron motorun %89.4'lük verim ile IE2 verim sınıfında olduğu, rotor iletken kayıplarının ise motora ait toplam kayıpların yaklaşık %30'unu oluşturduğu açıkça görülmektedir. Bu sebeple bu çalışmada farklı rotor oluk

şekilleri ve farklı rotor oluk iletkenleri birlikte kullanılarak motorun rotor iletken kayıpları azaltılmaya, motor verim sınıfı yükseltilmeye çalışılmıştır.

### 3.2. Referans Motorun Verim Sınıfının Yükseltilmesi

Bu çalışma kapsamında 7.5 kW, 4 kutuplu, IE2 verim sınıfı referans motorun veriminin artırılması için farklı rotor oluk şekilleri ve farklı oranlarda bakır ve alüminyumun birlikte kullanılmasını içeren tasarımlar yapılmış, her bir tasarım için verim analizi yapılmıştır. Bunun için ilk aşamada Çizelge 4'te verilen 6 farklı çift kafesli rotor oluk şekli tasarlanmıştır. Daha sonra çift kafesli bu rotor oluklarında, üst kafeste iletken malzeme olarak alüminyum, alt kafeste bakır kullanılarak, rotor oluk alanları ve iletken malzemesi optimizasyonu yapılmıştır. Rotor oluk alanları, referans motorun rotor oluk alanına kıyasla artırılmıştır. Her bir rotor oluk şeklinde farklı miktarlarda alüminyum ve bakır dolgu kullanılmıştır. Tüm tasarımlarda manyetik akı yoğunluğu dağılımı ile motorlara ait elektriksel parametreler incelenmiş ve sonuçlar, referans motor ile karşılaştırılarak, analiz edilmiştir. Referans motor ve tasarlanan 6 farklı rotor geometrisine ait rotor oluk alanları Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Rotor oluk geometrileri ve alan dağılımları

Tasarım No	Rotor Oluk Geometrisi	Rotor Oluk Alanları [mm <sup>2</sup> ]		
		Alüminyum	Bakır	Toplam
Referans		60.7	–	60.7
Tasarım 1		14.0	62.2	76.2
Tasarım 2		42.9	35.4	78.3
Tasarım 3		19.4	59.5	78.9
Tasarım 4		59.4	18.7	78.1
Tasarım 5		20.8	59.5	80.3
Tasarım 6		21.8	58.6	80.4

Çizelge 4'te, geliştirilen yeni rotor oluk tasarımlarında, referans motora göre rotor oluk alanlarının 1.25-1.33 kat artırıldığı görülmektedir. Rotor oluk alanlarındaki bu değişim ve rotor oluklarının alt/üst kafeslerinde farklı miktarlarda

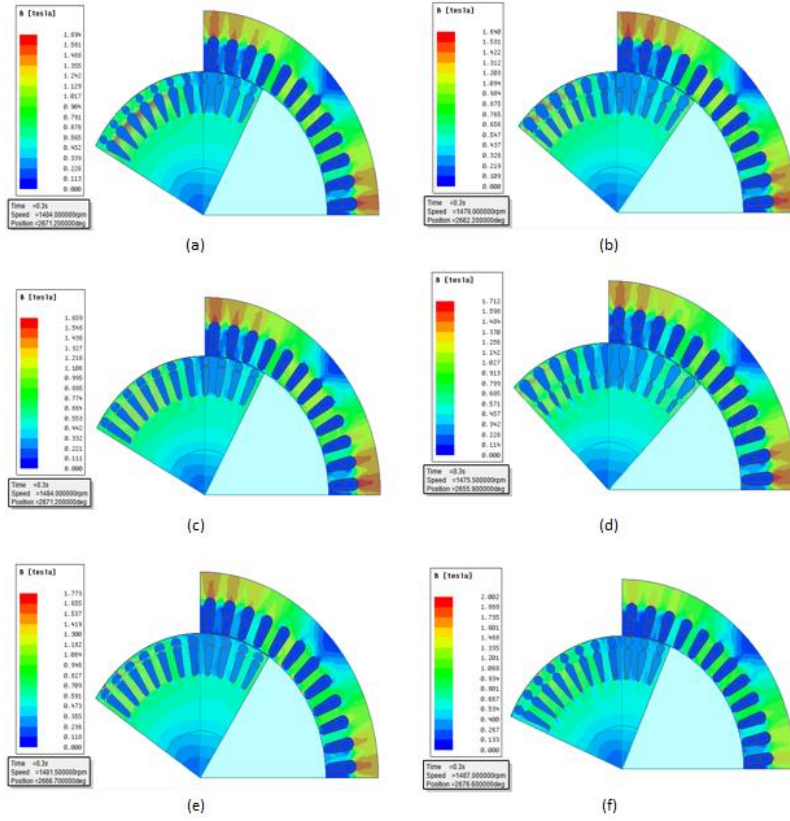
kullanılan alüminyum ve bakır malzemelerin oranları, motorun manyetik akı yoğunluğu, kalkış performansı ve verimi gibi elektriksel parametrelerinin şekillenmesinde doğrudan etkilidir. Bu sebeple her bir farklı tasarım için bu değerler ayrı ayrı incelenmiş ve sonuçlar aşağıda verilmiştir. Şekil 11'de, bu 6 farklı motor tasarımına ait manyetik akı yoğunluklarının dağılımı görülmektedir.

Referans motorda ve yapılan 6 farklı tasarımda çelik sac malzeme olarak M19 24G kullanılmıştır. Bu çelik sac malzeme yaklaşık 1.8T üzerinde doyuma girmektedir. Yapılan tasarımlara ait manyetik akı yoğunluğu dağılımları incelendiğinde stator boyunduruk bölgesi, stator dış bölgesi ve rotor çubukları etrafında oluşan maksimum manyetik akı yoğunluğu seviyeleri Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Tasarımlara ait maksimum manyetik akı yoğunluğu seviyeleri

Tasarım No	Stator Boyunduruk Bölgesi [T]	Stator Dış Bölgesi [T]	Rotor Çubukları Etrafı [T]
Referans	1.60	1.25	1.70
Tasarım 1	1.66	1.23	1.69
Tasarım 2	1.64	1.23	1.58
Tasarım 3	1.66	1.22	1.62
Tasarım 4	1.68	1.19	1.71
Tasarım 5	1.66	1.38	1.77
Tasarım 6	1.64	1.22	1.73

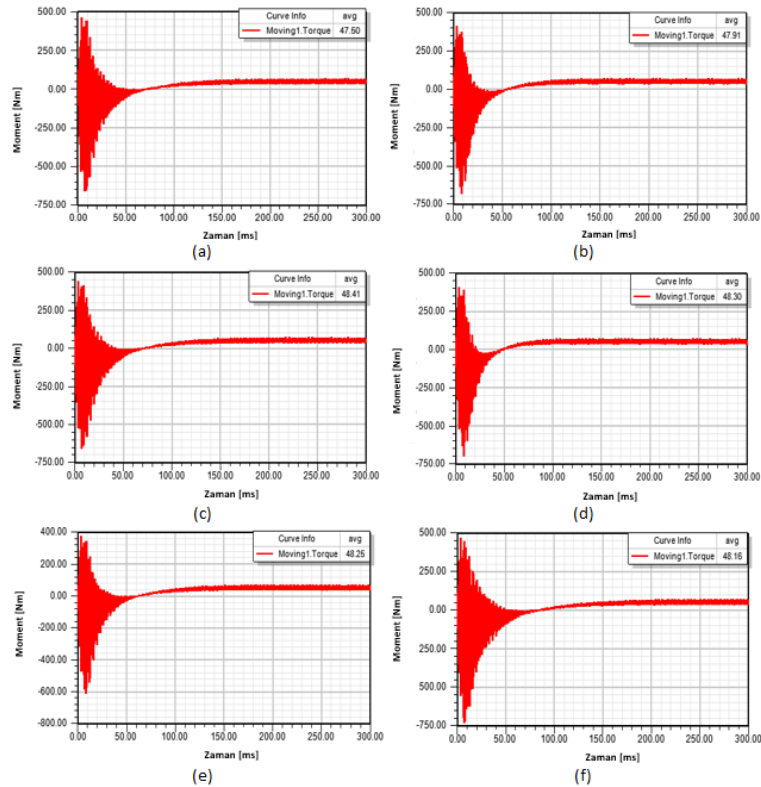
Çizelge 5'den görüleceği üzere, yapılan tasarımlarda stator ve rotor bölgelerinde oluşan maksimum manyetik akı yoğunluğu değeri 1.8T'yi aşmadığı için, kullanılan sac malzemenin doyumu söz konusu değildir. Referans motora ait stator oluk şeklinde herhangi bir değişiklik yapılmaması sebebiyle stator boyunduruk bölgesinde oluşan maksimum manyetik akı yoğunluklarının birbirine yakın olduğunu söyleyebiliriz. Fakat değişken rotor şekilleri sebebiyle rotor çubukları etrafında oluşan maksimum manyetik akı yoğunlukları arasında farklar bulunmaktadır. Hem rotor oluk alanı hem de alt kafesin şekli olarak birbirine benzeyen Tasarım 3 ve Tasarım 5 karşılaştırıldığında, Tasarım 3'ün rotor çubukları etrafında oluşan maksimum manyetik akı yoğunluğu 1.62 T iken, Tasarım 5'in üst kafesinin daha keskin hatlara sahip olması sebebiyle rotor çubukları etrafında oluşan maksimum manyetik akı yoğunluğu 1.77 T'ya kadar çıkmıştır. Endüstride yaygın olarak kullanılan çift kafesli rotor şekline benzeyen Tasarım 1 ve Tasarım 6 karşılaştırıldığında ise hem stator, hem de rotor bölgelerinde oluşan maksimum manyetik akı yoğunluklarının birbirine yakın olduğu söylenebilir. Şekil 12'de 6 farklı motor tasarımına ait moment-zaman grafikleri görülmektedir.



Şekil 11: Manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Tasarım 1 b) Tasarım 2 c) Tasarım 3 d) Tasarım 4 e) Tasarım 5 f) Tasarım 6

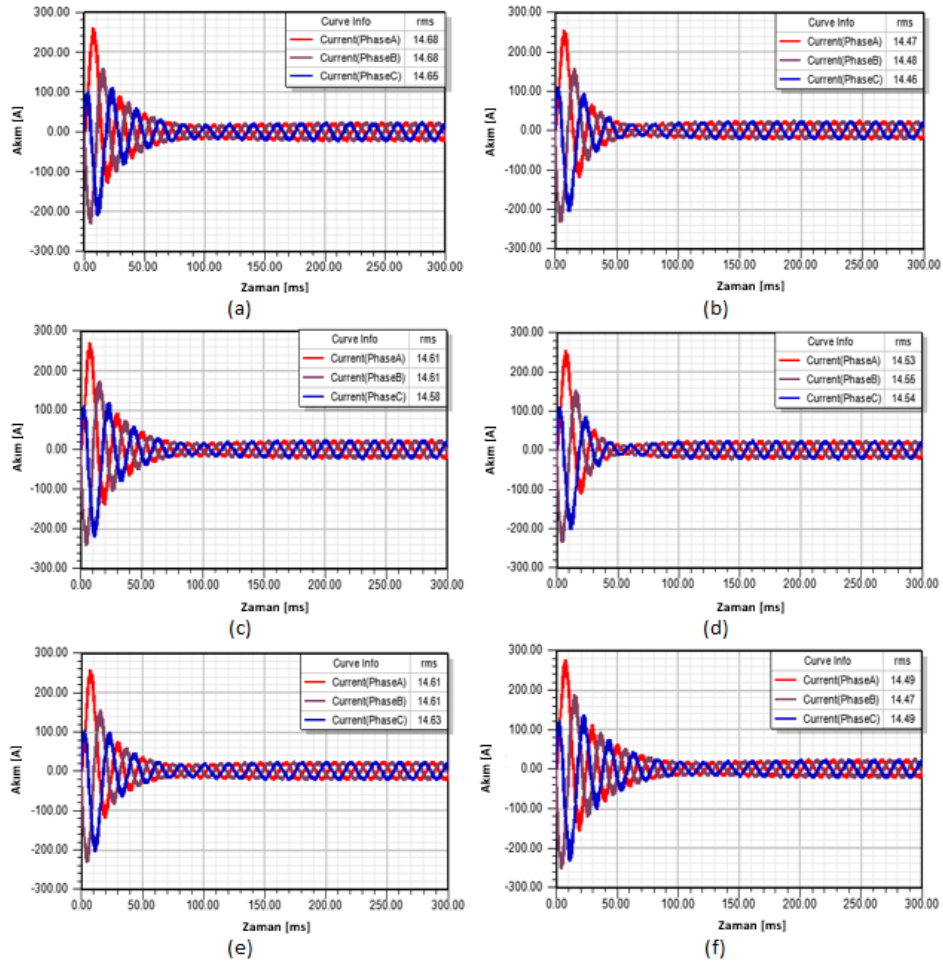
Referans motorun nominal momenti 48.5 Nm'dir. Yapılan 6 farklı motor tasarımı arasında en düşük nominal moment 47.5 Nm ile Tasarım 1'e, en yüksek nominal moment ise 48.4 Nm ile Tasarım 3'e aittir. Tasarımlara ait nominal momentler

arasındaki küçük değişimlerin sebebi ise motorlara ait net çıkış gücü ve devir sayıları arasındaki farklılıklardır. Şekil 13'te 6 farklı motor tasarımına ait akım-zaman grafikleri görülmektedir.



Şekil 12: Tasarımlara ait moment-zaman grafikleri a) Tasarım 1 b) Tasarım 2 c) Tasarım 3 d) Tasarım 4 e) Tasarım 5 f) Tasarım 6





Şekil 13: Tasarımlara ait akım-zaman grafikleri a) Tasarım 1 b) Tasarım 2 c) Tasarım 3 d) Tasarım 4 e) Tasarım 5 f) Tasarım 6

Referans motorun nominal momentinin 48.5 Nm olduğu bilinmektedir. Yapılan 6 farklı motor tasarımı arasında en düşük nominal moment 47.5 Nm ile Tasarım 1'e, en yüksek nominal moment ise 48.4 Nm ile Tasarım 3'e aittir. Tasarımlara ait nominal momentler arasındaki küçük değişimlerin sebebi ise motorlara ait net çıkış gücü ve devir sayıları arasındaki farklılıklardır. Şekil 13'te 6 farklı motor tasarımına ait akım-zaman grafikleri görülmektedir.

Referans motora ait nominal akım 14.9 A'dir. Çizelge 6 incelendiğinde, yapılan 6 farklı motor tasarımına ait nominal akımlarda da büyük değişimler olmadığı, yaklaşık olarak hepsinin 14 A civarında olduğu görülmektedir. Referans motora ait stator sargılarında herhangi bir değişiklik yapılmaması, yani tel-sipir sayısının aynı bırakılması sebebiyle stator direnci sabit kalmıştır. Bununla beraber stator akımı değerlerinde önemli değişiklik olmaması sebebiyle, stator bakır kayıplarında da büyük değişimler gözlenmemiştir. Stator iletken kayıplarındaki farklılıkların asıl sebebi ise motora ait stator ek kayıplarındaki değişimlerdir. Yapılan 6 farklı motor tasarımında rotor oluk alanlarının, rotor oluk şekillerinin ve rotor iletken malzemeleri olan alüminyum ve bakır miktarının birbirinden farklı olduğundan, motora ait elektriksel parametreler de farklı değerlerde elde edilmiştir.

Çizelge 6'da referans motor ve yapılan tasarımların hız, moment, akım, verim vb. parametreleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 6 incelendiğinde, yapılan tasarımlara ait rotor iletken kayıplarındaki azalma dikkat çekmektedir. Hem daha verimli rotor oluk şekillerinin tasarlanması, hem de rotor oluklarının alt kafesinde bakır iletken kullanılmasıyla, rotor iletken kayıplarında %33-%53 oranlarında azalma elde edilmiştir. Bu azalma miktarlarına bakıldığında, Tasarım 6'da en düşük rotor kayıpları elde edilmiş ve verimde %2.4 artış elde edilmiştir. Aynı zamanda motora ait ek kayıplar, stator ve rotor iletken kayıpları ile birlikte değerlendirildiğinde, geliştirilen yeni tasarımlardaki stator iletken kayıplarındaki azalmaların, motora ait ek kayıplarda da iyileştirme sağladığı görülmektedir. Tasarımlara ait rotor oluklarında bakır kullanılması sebebiyle rotor dirençleri düşmüş, kayma azalmış ve motorlara ait nominal hızlarda referans motora oranla yükselme gözlenmiştir. Sürtünme ve rüzgar kayıpları tüm tasarımlar için 40 W olarak sabit tutulmuştur.



Çizelge 6. Tasarımlara ait elektriksel parametrelerin karşılaştırılması

Parametre	Referans	Tasarım 1	Tasarım 2	Tasarım 3	Tasarım 4	Tasarım 5	Tasarım 6
Nominal Hız [d/d]	1452	1484	1479	1484	1475.5	1481.5	1487
Nominal Moment [Nm]	48.5	47.5	47.9	48.4	48.3	48.2	48.1
Nominal Akım [A]	14.9	14.7	14.5	14.6	14.5	14.6	14.5
Kalkış Momenti [Nm]	190.6	141.8	170.9	162.0	174.8	159.4	156.3
Kalkış Akımı [A]	138.0	122.5	135.5	130.8	140.8	127.6	123.3
Stator İletken Kayıpları [W]	453.2	418.7	408.0	414.7	410.9	415.1	407.1
Rotor İletken Kayıpları [W]	276.7	168.1	168.6	154.4	186.6	169.9	129.6
Demir Kayıpları [W]	124.0	120.3	121.4	121.6	121.5	122.4	121.9
Sürtünme ve Rüzgar Kayıpları [W]	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
Toplam Kayıplar [W]	893.9	747.1	738.0	730.7	759.1	747.4	698.7
Verim [%]	89.4	90.8	91.0	91.2	90.8	90.9	91.5
Güç Faktörü	0.85	0.82	0.83	0.84	0.84	0.83	0.84

#### 4. Tartışma

Referans motor üzerinde yapılan iyileştirmeler sonucunda, yapılan 6 adet tasarıma ait toplam kayıp, verim ve verim sınıfları bilgisi Çizelge 7’de verilmiştir. Çizelge 7 incelendiğinde bu 6 tasarımdan, IEC 60034-30-1 standardına göre 5 tasarımın IE3 verim sınıfında, 1 tasarımın da IE4 verim sınıfında olduğu görülmektedir. Motorların verim sınıfları, alt ve üst verim sınıfına yakınlık durumu göz önüne alınarak belirlenmiştir.

Farklı rotor oluk modelleri ve rotor oluklarında dolgu malzemesi olarak kullanılan alüminyum ile bakırın miktarı, motorların kalkış karakteristiklerinin şekillenmesinde etkili olmuştur. Çizelge 8’de motorlara ait kalkış karakteristiklerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 7. Tasarımların verimlerinin karşılaştırılması

Tasarım No	Toplam Kayıplar [W]	Verim [%]	Verim Sınıfı
Referans	893.9	89.4	IE2
Tasarım 1	747.1	90.8	IE3
Tasarım 2	738.0	91.0	IE3
Tasarım 3	730.7	91.2	IE3
Tasarım 4	759.1	90.8	IE3
Tasarım 5	747.4	90.9	IE3
Tasarım 6	698.7	91.5	IE4

Çizelge 8. Tasarımların kalkış karakteristiklerinin karşılaştırılması

Tasarım No	Kalkış Momenti [Nm]	Kalkış Akımı [A]
Referans	190.6	138.0
Tasarım 1	141.8	122.5
Tasarım 2	170.9	135.5
Tasarım 3	162.0	130.8
Tasarım 4	174.8	140.8
Tasarım 5	159.4	127.6
Tasarım 6	156.3	123.3

Çizelge 8 incelendiğinde yapılan tasarımlarda rotor oluk alanları referans motorun oluk alanına oranla arttırıldığı için, kalkış momentinde düşüşler meydana gelmiştir. Tasarımların bazılarında rotor oluklarında kullanılan bakır miktarının alüminyuma oranla çok daha fazla olması da kalkış momentinin düşmesine yol açmıştır. Fakat endüstriyel uygulamalarda kullanılan asenkron motorlarda kalkış momentinin, nominal momentin 2-2.5 katı olması istenir. Referans motorun nominal momentinin 2.5 katı ise yaklaşık 125 Nm’dir. 6 farklı motor tasarımının hepsinde kalkış momenti 125 Nm’nin üzerindedir. Yapılan tasarımların kalkış akımlarında ise, rotor şekline bağlı olarak düşüşler gözlenmiştir. Günümüzde değişken frekanslı sürücülerin yaygın olarak kullanması sebebiyle kalkış akımı bir problem olmaktan çıkmıştır ve motor tasarımları yapılırken sınırlayıcı bir parametre olarak görülmemektedir.

6 farklı motor tasarımı için son olarak ağırlık hesaplamaları yapılmış ve Çizelge 9’da bu ağırlıklar verilmiştir. Rotor oluklarında kullanılan alüminyum ve bakır dolgu miktarlarına bağlı olarak, 6 yeni tasarımın ağırlıklarında, referans motora göre artış olmuştur. Çizelgeden görüleceği üzere rotor oluklarında alüminyuma oranla, bakır miktarının daha fazla kullanıldığı motor tasarımlarında, motorun toplam ağırlığının da daha fazla olduğu görülmektedir.

Çizelge 9. Tasarımların ağırlıklarının karşılaştırılması

Tasarım No	Motor Ağırlığı [kg]
Referans	52.6
Tasarım 1	57.0
Tasarım 2	54.7
Tasarım 3	56.6
Tasarım 4	53.3
Tasarım 5	56.5
Tasarım 6	56.4

Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, farklı rotor oluk şekilleri kullanarak ve rotor oluk dolgu malzemesi olarak alüminyum ile bakır birlikte kullanılarak motor kayıpları azaltılmış, böylece motor verimi

yükseltilmiştir. Motor verim seviyesi öncelikli kriter olarak düşünüldüğünde IE2 verim sınıfında olan referans motor, yapılan tasarımlarla IE3 ve IE4 verim sınıflarına çıkarılmıştır.

Enerji verimliliğinin giderek önem kazandığı günümüzde, analizler sonucunda verimlilik sınıfı IE4'e yükseltilebilir. Ancak enerji verimliliği ile birlikte maliyet de dikkate alınmak istenirse, bu durumda motor ağırlığı değerlerine bakılıp, IE3 verim sınıfına sahip Tasarım 4 en uygun tasarım olarak tercih edilebilir.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada 7.5kW, 4 kutuplu, IE2 verim sınıfına sahip sincap kafesli bir asenkron motorun verim sınıfı yükseltmeye çalışılmıştır. Bunun için 6 farklı rotor oluk geometrisi modellenmiş ve bu oluklarda alüminyum ile bakır iletkenleri birlikte kullanılmıştır. Her bir tasarımın Ansys Maxwell'de analizleri yapılmış ve sonuçları elektriksel parametreler, maliyet ve ağırlık açılarından irdelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, rotor oluklarında, alüminyumun ile bakırın birlikte kullanılmasıyla rotor iletken kayıplarında azalma olduğu ve motor veriminin arttığı görülmüştür. Verimlilik referans alındığında, en başarılı tasarım, IE2 verim sınıfındaki referans motorun, IE4 verim sınıfına yükseltildiği Tasarım 6 olmuştur. Bununla birlikte kullanılan bakır miktarına bağlı olarak motor ağırlığında ve maliyetinde artış olmuştur. Bu sebeple sonuçlar maliyet ve verimlilik açılarından birlikte değerlendirilip, talebe göre en uygun tasarım seçilebilir.

Bu çalışmanın devamı olarak, rotor oluk alanları optimum değerlerde tutularak, daha düşük maliyetli ve daha yüksek kalkış momentine sahip tasarımlar elde edilebilir. Ayrıca, stator oluk doluluk oranının artırılması, nüve boyunun uzatılması, stator dış çapının artırılması vb. yöntemler de kullanılarak, motor verimi, maliyet kriteri de göz önünde bulundurularak artırılabilir.

## 6. Kaynaklar

[1] International Energy Agency (iea), (2016), World Energy Outlook 2016, France.

[2] Türkiye Cumhuriyeti Bilim, Sanayi, Teknoloji Bakanlığı Verimlilik Genel Müdürlüğü, (2015), Elektrik Motorlarında Enerji Verimliliği, Ankara.

[3] Zorlu Partal, S., Çayiroğlu, A., Kılınc, M., Gündoğar U.Y. (2022). IE4 Verimlilik Sınıfına Ulaşmak İçin Toroidal Sargılı Asenkron Motorun Tasarım Optimizasyonu. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (35), 177-186.

[4] Url-1

<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A2277&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

[5] Peter, I., (2012), "Induction motors with squirrel cage rotor, with IE2 efficiency level, up to 18.5 kW", 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Brasov, pp. 550-556.

[6] Torac, I., (2012), "A few aspects concerning the squirrel cage induction motors efficiency improvement", 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), pp. 440-444.

[7] Gallego, A. R., (2014), "Design and Optimization of an IE4, 4-pole, 7.5 kW Induction Motor", Master Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.

[8] Kotak, V., Jaiwal, N. K., Patel, S. N., (2016), "Improvising Strategies For Efficiency of IE4 SCIM 2.2 kW Through Simulation", 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), Chennai, pp. 3932-3936.

[9] Soygenç, O. C., Tap, A., v.d., (2016), "Üç Fazlı Sincap Kafesli Asenkron Motorda Verim Analizi", İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, pp. 334-338.

[10] Acar, Ç., (2017), "IE2 verim sınıfından IE4 verim sınıfına geçişte asenkron motor tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü.

[11] Acar, Ç., Soygenç, O.C., et.al, (2019), "Increasing the Efficiency to IE4 Class for 5.5 kW Induction Motor Used in Industrial Applications", International Review of Electrical Engineering (IREE), Vol:14, No:1, pp. 67.

[12] Url-2

[https://tr.wikipedia.org/wiki/Asenkron\\_motor](https://tr.wikipedia.org/wiki/Asenkron_motor)

[13] Ercan, A. A., (2014), "Elektrik Motorlarının Verimlilik Standartları", Journal of ETA Maritime Science, Vol:2, No:1, pp. 31-40.

[14] Chapman, S. J., (2005), Electric Machinery Fundamentals, 4th Edition, New York, McGraw-Hill.

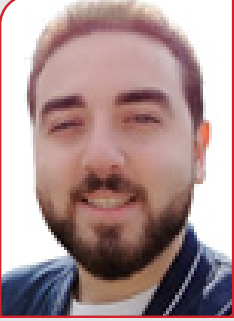
[15] Boglietti, A., Cavagnino, A., et.al., (2005), "No Tooling Costs Process for Induction Motors Energy Efficiency Improvements", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol:41, No:3, pp. 808-816.

[16] Büttner, K., Müller, M., et.al., (2011), "Squirrel Cage Rotor", International Patent 66 954.

[17] Url-3

<https://tr.prysmiangroup.com/tr/aluminyum-kablo-mu-yoksa-bakir-kablo-mu>

## Özgeçmişler



**Mert AKÇOMAK**, Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü lisans eğitimini 2021 yılında tamamladı ve devamında Elektrik Makineleri ve Güç Elektronikliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. Kasım 2021'den itibaren WAT Motor Sanayi şirketinde Ar-Ge Elektrik Tasarım Mühendisi olarak elektrik motorları teoremi ve tasarımı üzerinde çalışmalar yapmaktadır.



**SIBEL ZORLU PARTAL**, lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. 2006 yılında Clarkson Üniversitesi, NY, ABD'de, 2007 ve 2014'te de Syracuse Üniversitesi, NY, ABD'de post-doktora çalışmalarında bulunmuştur. Halen YTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Dr.Öğr.Üyesi olarak görev yapmakta ve elektrik makineleri ile güç elektronikliği alanlarında eğitim-öğretim ve araştırma faaliyetlerinde bulunmaya devam etmektedir. Ayrıca, YTÜ Teknopark'da yer alan, telekomünikasyon, akıllı enerji ve akıllı bina alanlarında sanayi ile işbirliği içinde Ar-Ge ve teknoloji projeleri geliştiren Radarcomm Enerji Sistemleri ve Yazılım Ar-Ge Ltd. Şti'nin kurucu ortağıdır.