



IE3 Verim Sınıfındaki 5,5 kW Gücünde Asenkron Motorun IE4 Verim Sınıfına Yükseltilmesine Yönelik Tasarım İyileştirmeleri

Yılmaz Yiğit Aybeniz¹, Kamuran Nur Bekiroğlu², Fatma Keskin Arabul³, Atiye Hülya Obdan⁴, Ahmet Yiğit Arabul^{5*}

¹ GAMAK Makina Sanayi A.Ş., İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-9794-9711), yigitaybnz@gmail.com

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0003-3814-7684), nbekir@yildiz.edu.tr

³ Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0002-9573-8440), keskin@yildiz.edu.tr

⁴ Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0002-6578-0293), obdan@yildiz.edu.tr

^{5*} Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0003-2058-6742), arabul@yildiz.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 28 Ocak 2022 ve Kabul Tarihi 23 Mart 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1064601)

ATIF/REFERENCE: Aybeniz, Y.Y., Bekiroğlu, K.N., Keskin Arabul, F., Obdan, A.H. & Arabul, A.Y. (2022). IE3 Verim Sınıfındaki 5,5 kW Gücünde Asenkron Motorun IE4 Verim Sınıfına Yükseltilmesine Yönelik Tasarım İyileştirmeleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (35), 133-141.

Öz

Asenkron motorlar endüstride en çok kullanılan elektrik motor türüdür. Bu sebeple enerji verimliliği asenkron motorlarda oldukça önemli noktadadır. Regülasyonlar neticesinde yüksek verimli asenkron motorların kullanımı zorunlu hale getirilmiştir, bu çalışmada IE3 verim sınıfına sahip asenkron motora aşamalar halinde verim artırma metotları uygulanarak IE4 verim sınıfına erişmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda referans olarak seçilen motor 5,5 kW gücünde, 4 kutuplu, 50 Hz, 1500 devir IE3 verim sınıfındaki motordur. Bu çalışma, temel olarak iki aşamada yürütülmüştür. Öncelikle referans motorun laboratuvar testleri ve Motor-Cad yazılımında benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Analizler için hem analitik hem sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Analitik sonuçlar ile standartlara uygun laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testlerin birbirleriyle tutarlı olduğu gösterilmiştir. İkinci aşamada ise IE3 motorda verim artırma metotları temel alınarak gerçekleştirilen tasarımlar ile motorun IE4 verim sınıfına erişmesi hedeflenmiştir. Bunun için öncelikle teorik olarak asenkron motorun tasarım parametreleri, parametrelerin motorun verimliliğine etkileri, denklemleri ifade edilmiştir. Ardından 5,5 kW gücündeki IE3 verim sınıfına sahip asenkron motorun stator olukları genişletilmiştir akabinde statordaki iletken çapı artırılmıştır bu sayede iletkenin direncinin azalması sağlanarak stator bakır kayıplarının azalması hedeflenmiştir. Sonraki aşamada manyetik akı yoğunluğunun azalması demir ve bakır kayıplarını azaltabilmek için motorun paket boyu uzatılmış olup sarım sayısı azaltılmıştır. Üçüncü aşamada laminasyon sacı değiştirilerek demir kayıplarının azalması sağlanmıştır ve dördüncü aşamada motor %91,62 verim ile IE4 verim sınıfına ulaşmıştır. Son olarak ise IE4 verim sınıfına sahip motorun rotor olukları genişletilerek rotor iletken kayıplarının azalması hedeflenmiştir ve asenkron motorun verimi %91,75'e yükselmiştir. Tüm aşamalar Motor-Cad programında benzetimi gerçekleştirilerek tüm tasarımların karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motor, Verimlilik sınıfları, Enerji verimliliği, Motor Tasarımı.

Design Improvements for Upgrading an IE3 Efficiency Class 5.5 kW Induction Motor to IE4 Efficiency Class

Abstract

Induction motors are the most widely used motor type in the industry thus energy efficiency becomes important topic. In order to reduce the energy consumption, the efficiency classes have been defined. In this study, it is aimed to reach IE4 efficiency class by applying

* Sorumlu Yazar: arabul@yildiz.edu.tr

efficiency increase methods step by step to the motor in IE3 efficiency class. In this context, the motor has chosen as a reference 5.5 kW, 4-pole, 50 Hz, 1500 rpm IE3 motor. The thesis has been basically prepared in two stages. Initially the motor has been tested in laboratory then the motor has been simulated. Analytical and finite element methods have been used in analyses. Both results have shown that the analytical results and the tests in the laboratory accordance with the standards are consistent with each other. Then in design process, the stator slots have been widened and to increase conductivity the diameter of the conductor has been increased, so that the resistance has been reduced to decrease copper losses. In next step, to reduce magnetic flux density, length of the motor has been extended and turns have been reduced. Then, the electrical steel has changed to reduce the iron losses, and in fourth stage, the motor reached IE4 efficiency class with 91.62% efficiency. Finally, in order to reduce rotor conductor losses, rotor slots of IE4 motor have been widened then efficiency of the motor has reached 91.75%. All stages have been simulated in Motor-Cad, and a comparative analysis of all five designs have been carried out.

Keywords: Induction motor, Efficiency classes, Energy efficiency, Motor Design.

1. Giriş

Günümüzde fosil temelli enerji kaynaklarının hızla tükendiği görülmektedir. Buna rağmen enerji kullanımı oldukça yüksek seviyelerde seyretmektedir. Bu sebeple dünyanın üzerinde durması gereken en önemli stratejik konulardan biri enerjiyi daha verimli kullanmaktır. Gelişen teknoloji ve nüfusun artışı ile gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de elektrik enerjisi tüketimi önemli bir oranda artmaktadır. Teknoloji ve nüfusun gelişimi yaşam standartlarını da yükseltmiş ve insanların daha rahat yaşamaları için konforlu ortamların oluşmasını sağlamıştır. Bu durumun sağlanmasının ana kaynağı sanayi sektörümüzdür. Gelişen teknolojinin ihtiyaçlarına sanayi sektörü Makine üreticileri firmalarında artmasıyla cevap vermeye çalışmaktadır. Sanayi sektörünün gelişimi ve üretimin artması en büyük maliyet kalemlerinden olan elektrik enerjisi maliyetinin artmasına neden olmuştur. Gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de elektrik enerjisi tüketiminde en büyük pay sahibi sanayi sektörü olmaktadır. Elektrik Mühendisleri Odası'nın çalışmalarına göre dünyada elektrik tüketiminin yaklaşık %40'ı alçak gerilim (AG) ve orta gerilim (OG) elektrik motorlarından ötürüdür. Sanayi sektörü düşünüldüğünde bilhassa ısıtma ve soğutma sektöründe başlıca uygulamalar olan fan, pompa, kompresör uygulamalarının yanı sıra asansör, vinç vb. uygulamaları asenkron motorların en çok kullanıldığı alanlardır ve elektrik tüketiminin %65'ini asenkron motorlar oluşturmaktadır (De Almeida et al., 2014). Türkiye'de elektrik motorlarında kullanılan elektrik enerjisinin %90'ı asenkron motorlar tarafından tüketilmektedir. Ulusal toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %36'sı, sanayi elektrik tüketiminin ise yaklaşık %70'i asenkron motorlar tarafından tüketilmektedir (Koca & Ünsal, 2017).

Bu sebeple, asenkron motorlar keşfedilmesinden bugüne kadar boyutsal ve verimsel bağlamda ciddi değişimler geçirmiştir (De Almeida et al., 2014; Tabora et al., 2020). Verim sınıfları konusunda ilk olarak Avrupa Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği İmalatçıları Komitesi tarafından 1998 yılında 1,1 kW ile 90 kW arasındaki elektrik motorları için aşağıdaki enerji verim sınıfları belirlenmiştir.

EFF1 yüksek verimli > EFF2 verimi arttırılmış > EFF3 düşük verimli

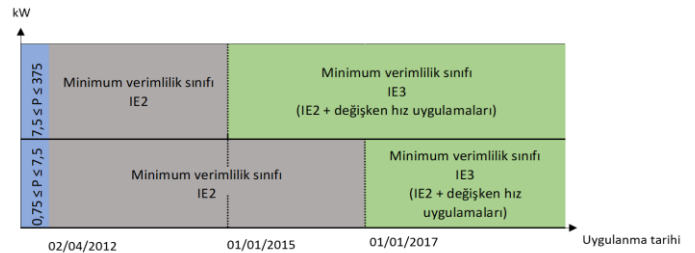
2008 yılında ise IEC tarafından IEC 60034-30:2008 standardı ile birlikte enerji verimliliği üzerine yasal düzenleme 0,75 kW-375 kW güç aralığındaki motorlar için genişletilmiş olup verim sınıflarına ilişkin yeni tanımlamalar yapılmıştır. IEC 60034-30 standardında verim sınıfları frekans, güç, kutup sayısına göre düzenlenmiş olup aşağıda belirtilmiştir (Enstitüsü, 2012).

- IE4 Süper Premium Verimli Motorlar
- IE3 Premium Verimli Motorlar

- IE2 Yüksek Verimli Motorlar
- IE1 Standart Verimli Motorlar

Enerji verimliliği adına yürürlüğe giren yeni düzenlemeler motor üreticilerini IE3 ve IE4 verim sınıfına sahip motorların tasarımları hususunda Ar-Ge çalışmalarına itmiştir.

Nüfusun hızla artışı ve hızlı sanayileşme kuşkusuz artan elektrik tüketimini beraberinde getirmektedir (Donolo et al., 2020). Bu sebeple ABD ve Avrupa Birliği ülkeleri başta olmak üzere bu enerji tüketimini minimum hale getirebilmek adına çeşitli çalışmalar ve yasal düzenlemeler gerçekleştirmiştir. IEC tarafından IEC 60034-30:2008 standardına göre yayınlanan verim sınıfları doğrultusunda 1998 yılından 2011 yılına kadar ABD'de minimum IE2 verimlilik sınıfında, 2011 yılından itibaren de minimum IE3 verimlilik sınıfında motorların satın alınıp kullanılmasına izin verilmiştir. AB ve Çin'de ise 2011-2015 yılları arasında IE2 verim sınıfı motorlar, 2015 sonrasında ise IE3 verim sınıfı motorlar zorunlu hale getirilmiştir. Türkiye'de ise 2012 yılında IE2 verim sınıfına geçiş zorunlu hale gelmiş olup, 2015 yılında IE3 zorunlu hale gelmiş ve IE2 motorların yalnızca sürücü ile kullanılmasına izin verilmiştir (Enstitüsü, 2012, 2014; Keskin Arabal et al., 2020).



Şekil 1. Türkiye'de verimlilik regülasyonunun uygulanması

Şekil 1'de sunulan düzenlemeler göz önüne alındığında, motor üreticilerinin yüksek verimli motorlar üretme zorunluluğu doğmuştur. Bu çalışmada IEC standartlarına göre üretilen 5,5 kW, 132 gövde, 50 Hz, 1500 d/d, IE3 ve IE4 verim sınıfındaki motorların tasarımı ve karşılaştırılmalı analizi planlanmıştır. Öncelikle IE3 verim sınıfında referans olarak belirlenen asenkron motorun laboratuvar ortamında testleri (Yük testi, boşa çalışma, kısa devre) yapılmıştır. Ardından IE3 verim sınıfına sahip motorun benzetimi gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları ile benzetim sonuçlarının tutarlı olduğu görülmüştür. Ardından IE3 verim sınıfına sahip motorun aşama aşama verimi arttırmaya yönelik tasarımlarla IE4 verim sınıfına erişmesi hedeflenmiştir. Bu hususta sıra ile şu aşamalar izlenmiştir.

- İlk olarak referans motorun stator iletkenlerin kesit alanını arttırabilmek adına stator olukları genişletilmiştir.

- Tasarım 2 motorda ise iletken çapı 0,78 mm'den 0,90 mm'ye arttırılmıştır bu sayede stator bakır kayıplarının azalması hedeflenmiştir.
- Tasarım 3'te ise motorun paket boyu 120 mm'den 150 mm'ye arttırılmış olup sarım sayısı 41'den 39'a düşürülmüştür bu sayede manyetik akı yoğunluğunun azalarak stator bakır ve demir kayıplarının azalması amaçlanmıştır.
- Tasarım 4'te demir kayıplarını azaltabilmek amacıyla laminasyon sacı M350-50A yerine kayıp katsayısı daha düşük M235-35A sac kullanılarak stator ve rotor demir kayıplarının azalması hedeflenmiştir.

Ardından asenkron motorun verimini daha da arttırabilmek adına Tasarım 5 motorda ise rotor bakır kayıplarını azaltabilmek amacı ile rotor oluk alanı genişletilmiştir.

Çalışmada bilhassa son dönemde getirilen regülasyonlar ve ürünlerinde asenkron motor kullanan pompa ve kompresör üreticilerinin talepleri doğrultusunda kullanımı günden güne artan yüksek verimli (IE3, IE4) asenkron motorların tasarımı amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikli olarak 5,5 kW, 4 kutuplu, IE3 verim sınıfındaki asenkron motorun laboratuvar ortamında testleri yapılmış, benzetimi gerçekleştirilmiştir. Ardından IE3 motor referans motor olarak kullanılarak çalışmada detaylı şekilde sunulan verim artırma metotları aşama aşama uygulanarak beş ayrı tasarım yapılarak kayıplar azaltılmış ve Motor-Cad'te gerçekleştirilen benzetimler sonucunda asenkron motorun Tasarım 4'te %91,75 verim ile IE4 verim sınıfına eriştiği saptanmıştır. Tasarlanan IE4 verim sınıfına sahip motorun rotor oluk alanları arttırılıp rotor iletken kayıpları azaltılarak verimi %91,75'e yükselmiştir. Bu çalışma kapsamında tasarlanan ve benzetimleri gerçekleştirilen asenkron motorlar sayesinde IE3 verim sınıfından IE4 verim sınıfına geçişte %2,5'lik bir verim artışı sağlanmıştır.

2. Metodoloji

Asenkron motorun verimi, mekanik olarak üretilen gücün yani milden alınan gücün şebekeden çekilen yani giriş gücüne oranı ile bulunur.

Toplam kayıp;

$$P_T = P_{fe} + P_{sv} + P_{cus} + P_{cur} + P_{LL} \quad (1)$$

$$Verim = \frac{P_{çıkış}}{P_{giriş}} \quad (2)$$

Asenkron motorlarda verim sınıfları IEC60034-30 standardına göre belirlenmiş olup Tablo 1'de 4 kutuplu asenkron motorların verim değerleri ve verim sınıfları kW bazında sunulmuştur.

2.1. Verim Sınıfları

2010 yılına kadar elektrik motorlarının verim ölçümleri IEC (Uluslararası Elektroteknik komitesi) IEC 60034-2:1996 sayılı standardı ile yapılmaktaydı. Ardından IEC 60034-2-1:2007 standardı yürürlüğe girmesi ile 2010 yılı itibari ile verim ölçümleri bu standart ile devam etti. Uluslararası verim sınıflarını standart hale getirebilmek adına Uluslararası Elektroteknik Komitesi tarafından IEC 60034-30:2008 olarak IE1 (standart), IE2 (yüksek verimli), IE3 (premium) ve IE4 (süper premium) verim sınıfları tanımlanmıştır. Son olarak IEC 60034-30-1

standardında 2014 senesinde yapılan revizyon neticesinde ise motor gücü sınırı 1000 kW'a yükseltilmiştir. Tablo 1'de referans olarak belirlenen 5,5 kW çıkış gücündeki 4 kutuplu asenkron motorun verim sınıflarına göre verim değerleri belirtilmiştir. Tablo 1'de görüldüğü üzere 4 kutuplu referans asenkron motorun IE1 verim sınıfında olabilmesi için verim değerinin %84,7, IE2 verim sınıfında olabilmesi için %87,7, IE3 verim sınıfında olabilmesi için %89,6 ve IE4 verim sınıfında olabilmesi için %91,9 olması gerekmektedir (Boglietti et al., 2011; IEC-Governments & International Organizations, Examples by Industry Sector: Electric Motors-Measuring Efficiency, n.d.; IEEE, 2018).

Tablo 1. 5.5 kW Motor için enerji verim sınıfları

Çıkış Gücü	IE1	IE2	IE3	IE4
5,5 kW	%84,70	%87,70	%89,60	%91,90

2.2. Asenkron Motor Verim Arttırma Yöntemleri

Asenkron motorlardaki kayıplar Bölüm 2.3'te ifade edildiği gibi stator ve rotordaki bakır kayıpları, demir kayıpları, mekanik kayıplar ve ek kayıplardır. Bu kayıplardan ilki olan bakır kayıplarını azaltabilmek adına statordaki olukların çapı arttırılarak iletkenlerin öz direnci azaltılarak bakır kayıpları azaltılabilir. Öte yandan motorun paket boyu uzatılarak demir taraftaki akı yoğunluğu azaltılmış olur bu sayede sargılardaki akım yoğunluğu da azalmış olacağından bakır kayıpları ve aynı zamanda demir kayıpları da azaltılmış olacaktır (Acar et al., 2018; Rodriguez Gallego, 2014). Rotordaki bakır kayıplarını azaltabilmek için ise bazı motor üreticilerinin patentli olarak kullandığı DCR metodu olarak bilinen rotorda iletkenliği alüminyuma göre daha fazla olan bakır kullanılarak rotordaki kayıplar azaltılabilir. Demir kayıplarını oluşturan girdap ve histerezis kayıplarını azaltabilmek için ise stator ve rotorda kullanılan sac kalınlıkları inceltiler ya da sacın kalitesi arttırılarak manyetik kayıpları daha az olan bir sac kullanılabilir. Rotor ve statordaki olukların şekilleri değiştirilerek bakır ve demir kayıpları azaltılabilir ayrıca birçok motor üreticisinin tercih ettiği gibi motordaki hava kanallarının ve soğutma pervanesinin tasarımını değiştirerek motorda daha iyi soğutma sağlayarak kayıplar azaltılabilir (Kobelev et al., 2020; Kondo et al., 2016; Sadali et al., 2021).

- Statordaki Kayıpların Azaltılması
- Rotor Kayıplarının Azaltılması
- Demir Kayıplarının Azaltılması
- Mekanik Kayıplarının Azaltılması
- Ek Kayıpların Azaltılması

2.3. Asenkron Motor Tasarımı

Üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun tasarımı konusunda göz önünde bulundurulması gereken birçok argüman mevcuttur (Alberti & Troncon, 2021). Çıkış gücü, kutup sayısı, verim sınıfı, şebeke gerilimi ve frekansı bilinen motor için IEC standardına göre üretilecek motorun stator ve rotor oluk sayısının hesaplanıp oluk şeklinin en optimum şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Motorun stator sargılarında kullanılacak iletkenin kesiti, sarım sayısı, stator oluğundaki doluluk oranı ve motorun paket boyu maliyet kısıtı göz önünde bulundurularak optimum şekilde arzu edilen verim sınıfına uygun olarak tasarlanır (Carbonieri & Bianchi, 2020; Das & Sozer, 2019; Dianati et al., 2019; Rodger et al., 1997; Valtonen et al., 2006).

3. Benzetim Çalışmaları

Bölüm 3'te ifade edilen sincap kafesli asenkron motor tasarım aşamaları izlenerek referans motor olarak belirlenen 5,5 kW, 1500 d/d, 50 Hz çalışma frekansında IE3 verim sınıfındaki asenkron motorun testlerinin gerçekleştirilmesi ve benzetim gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Öncelikle belirlenen asenkron motorun laboratuvar ortamında testleri (Boşta çalışma, kısa devre testi ve yük testi) gerçekleştirilmiş olup ardından asenkron motorun Motor-Cad üzerinde benzetimi yapılmıştır.

3.1. Referans Motor Detayları

Referans motorun testi sırasında öncelikle boşta çalışma deneyi gerçekleştirilmiştir, bu hususta motor anma değerinde yüksüz olarak çalıştırılmış, motor çalışırken şebekeden çekilen faz akımı, faz gerilimi ve şebekeden çekilen toplam güç ölçülmüştür. Rotor bakır kayıpları çok küçük olduğundan ihmal edilir, şebekeden çekilen toplam güç, stator bakır kayıpları, demir kayıpları ve sürtünme vantilasyon kayıplarının toplamını verir (Gürdal, 2015). Boşta çalışma deneyi ile motorun mıknatıslanma direnci (R_c) ve manyetik devre reaktansı (X_m) hesaplanmıştır. Ardından kısa devre deneyini gerçekleştirmek amacıyla asenkron çalıştırılıp akabinde motorun mili kitlenerek rotorun dönmemesi sağlanır, motorun akımı anma akımına erişinceye kadar gerilim artırılır, akım anma değerine eriştiğinde gerilim kaydedilir (GAMAK, 2021). Test sırasında şebekeden çekilen toplam güç motorun stator ve rotor bakır kayıpları ile demir kayıplarının toplamına eşit olur (Sathyan et al., 2020). Kısa devre deneyi ile asenkron motorun rotor faz direnci ile rotor kaçak reaktansı (X_r) hesaplanmıştır. Testin gerçekleştirildiği test düzeneği ve referans motor Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Referans motorun test halinde görünümü

Referans motorun faz direnci $2,072 \Omega$, mıknatıslanma direnci 2663Ω , stator kaçak reaktansı $2,48 \Omega$, manyetik devre reaktansı $103,2 \Omega$, rotor reaktansı $3,89 \Omega$, kaymaya bağlı rotor direnci ise $73,1 \Omega$ dur.

3.1.1. Referans Motor Parametreleri

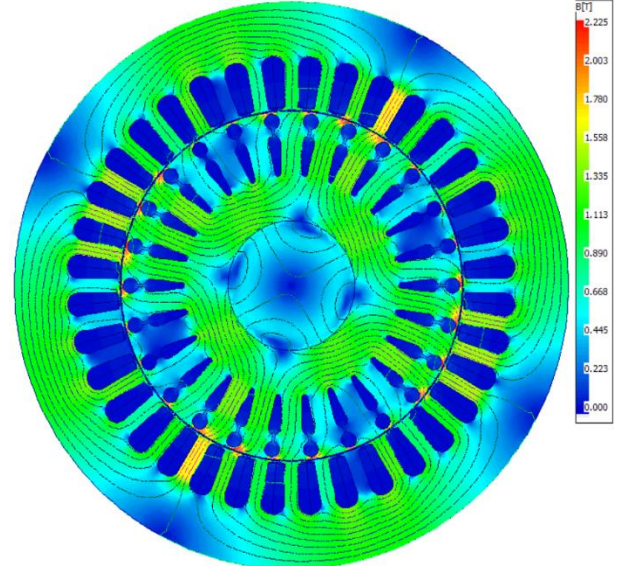
5,5 kW, 132 gövde, 4 kutup, 50 Hz, 1500 d/d IE3 verim sınıfında tasarlanan referans motorun Motor-Cad programında benzetim sonucu motorun performans verileri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Motorun karşılaştırmalı performans verileri

	Benzetim Sonuçları	Test Sonuçları
Besleme gerilimi (V)	400	401,42
Şebeke frekansı (Hz)	50	50
Senkron hız (d/d)	1500	1500
Nominal hız (d/d)	1460	1463
Kayma	0,03	0,02
Anma hat akımı (rms) (A)	11,32	11,60
Yüksüz hat akımı (rms) (A)	7,44	6,65
Kalkış hat akımı (rms) (A)	85,3	74,6
Devrilme mil hızı (d/d)	1095	1101
Devrilme torku (Nm)	131,5	115,2
Nominal tork (Nm)	35,98	35,83
Mekanik çıkış gücü (W)	5500,6	5493,9
Kalkış akımı/Hat akım	7,48	6,43

3.1.2. Referans Motor Manyetik Akı Yoğunlukları

Şekil 3'te referans motora ait manyetik akı yoğunlukları dağılımı verilmiştir. Motorun akı yoğunlukları dağılımı incelendiğinde stator boyunduruğu bölgesinde oluşan tepe akı yoğunluğu değeri $1,44 \text{ T}$, stator dışlarında oluşan tepe akı yoğunluğu ise $1,68 \text{ T}$ mertebesindedir. Rotor çubukları çevresinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun tepe değeri ise $1,56 \text{ T}$ mertebelerindedir. Sacın B-H eğrileri incelendiğinde akı yoğunlukları değerlerinin sacı doyma noktasına götürmediği gözlemlenmiştir.



Şekil 3. Referans motora ait akı yoğunlukları dağılımı

3.1.3. Referans Motor Kayıpları

Referans motorun kayıpları Tablo 3'te Motor-Cad programı ve laboratuvar testleri ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Kayıpların ışığında motorun verim ve güç çarpanı da aşağıda belirtilmiştir. Motorun toplam kaybı benzetim üzerinde $645,45 \text{ W}$, laboratuvar testlerinde ise 634 W 'tır. Tasarlanan asenkron

motorun verimi benzetim üzerinde %89,49 laboratuvar testlerinde ise %89,60'dır. Motor IE3 verim sınıfındadır.

Tablo 3. Motorun karşılaştırmalı performans verileri

	Benzetim Sonuçları	Test Sonuçları
Stator bakır kayıpları (W)	269	266,5
Rotor bakır kayıpları (W)	152	139,7
Kaçak yük kaybı (W)	37,66	50,5
Stator demir kayıpları (W)	160,5	152
Rotor demir kayıpları (W)	1,59	1,6
Sürtünme ve vantilasyon kayıpları (W)	24,7	24,7
Toplam kayıp (W)	645,45	635
Verim	%89,49	%89,60
Güç katsayısı	0,8	0,83

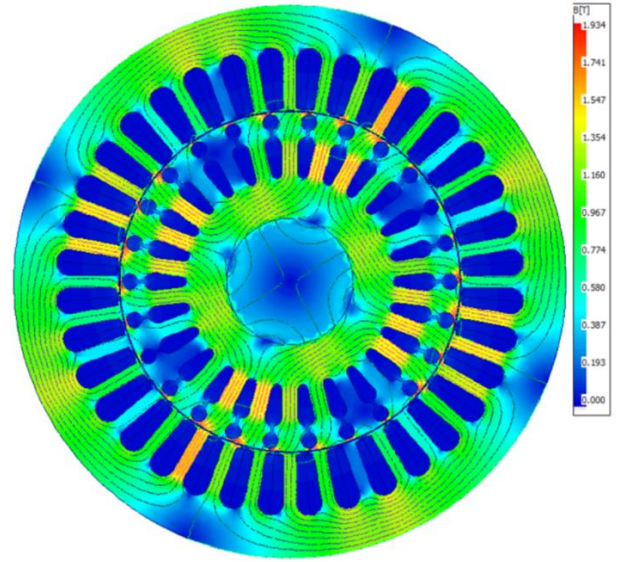
Laboratuvar testinde elde edilen sonuçlar ile benzetim sonucu elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde stator, rotor bakır kayıplarının, demir kayıplarının, ek kayıpların örtüşüğü görülmekte olup her iki sonuçta asenkron motorun IE3 verim sınıfına sahip olduğunu doğrulamaktadır.

3.2. Motor Verim İyileştirmeleri

Referans motor olarak kullanılan 5,5 kW, IE3 verim sınıfına sahip sincap kafesli asenkron motora verim artırma metotları uygulanarak IE4 verim sınıfına sahip motor tasarlanması hedeflenmiştir. Bunlar gerçekleştirilirken öncelikle IE3 motorda stator oluk alanı artırılarak tel kesitinin artırılabilmesi sağlanmıştır, ardından iletkenin çapı artırılarak iletkenliğin artması, sargı direncinin azalması sağlanmıştır böylelikle stator bakır kayıplarının azalması hedeflenmiştir. Ardından motorun paket boyu uzatılarak manyetik akı yoğunluğunun azalması bu sayede stator bakır ve demir kayıplarının azalması hedeflenmiştir. Akabinde stator ve rotorda kullanılan M350 laminasyon sacı yerine kayıp katsayısı daha küçük M235 laminasyon sacı kullanılarak demir kayıplarının azalması hedeflenmiştir. Son olarak rotor oluk alanı artırılmıştır bu sayede rotorda iletkenliğin artırılarak rotor bakır kayıplarının azaltılması ve bu sayede motorun IE4 verim sınıfına erişmesi hedeflenmiştir. Yapılan değişiklikler aşama aşama detaylı olarak aşağıda ifade edilmiştir.

3.2.1. Tasarım 1

Tasarım 1 gerçekleştirilirken stator iç ve dış çapı sabit tutulmuş olup stator dış genişliği 6,4 mm'den 6 mm'ye indirilmiştir. Stator oluk derinliği 20 mm'den 24 mm'ye çıkarılmıştır. Tasarım 1'e ait sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Tasarım 1 motorun akı yoğunluğu dağılımı

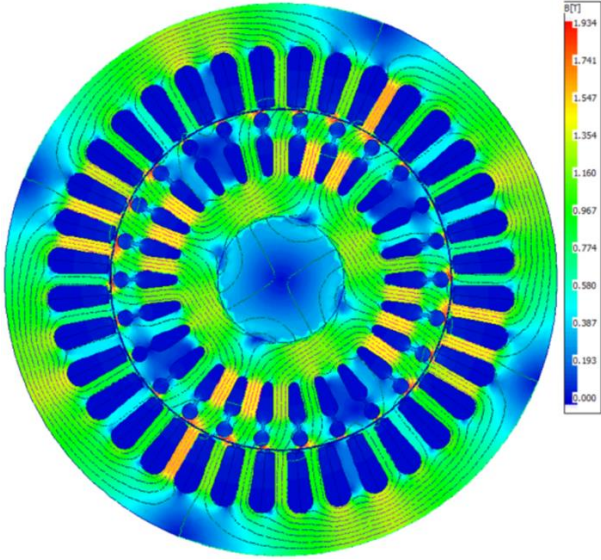
Şekil 4 analiz edildiğinde motorun akı yoğunlukları dağılımı incelendiğinde stator boyunduruğu bölgesinde oluşan tepe akı yoğunluğu değeri 1,64 T, stator dışlarında oluşan tepe akı yoğunluğu ise 1,70 T Rotor çubukları çevresinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun tepe değeri ise 1,56 T mertebelerindedir. Stator çapının aynı kalması dolayısı ile stator oluk alanı büyütüldüğünden stator boyunduruk ve dış bölgesinde akı yoğunluğunun arttığı görülmüştür.

Sonuçlar incelendiğinde artan manyetik akı yoğunluğundan ötürü akımın artışı, bu sebeple stator, rotor bakır kayıplarının ve demir kayıplarının artışı gözlemlenmiştir.

3.2.2. Tasarım 2

Tasarım 2 gerçekleştirilirken doluluk oranı artırılarak yani kesit alanını artırarak iletkenin direncini azaltabilmek adına Tasarım 1 motorun iletken çapı 0,78 mm'den 0,90 mm'ye artırılmıştır. Bu sayede motorun faz direnci 2,07 Ω 'dan 1,58 Ω 'a düşmüştür. Motorların maliyeti incelendiğinde Tasarım 2 Motordaki stator iletken çapı artırıldığından kullanılan bakır ağırlığı artmış olup motorun maliyeti Tasarım 1 Motor'a göre %19 oranında artmıştır.

Tasarım 2 ye ait sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 5'te sunulmuştur.



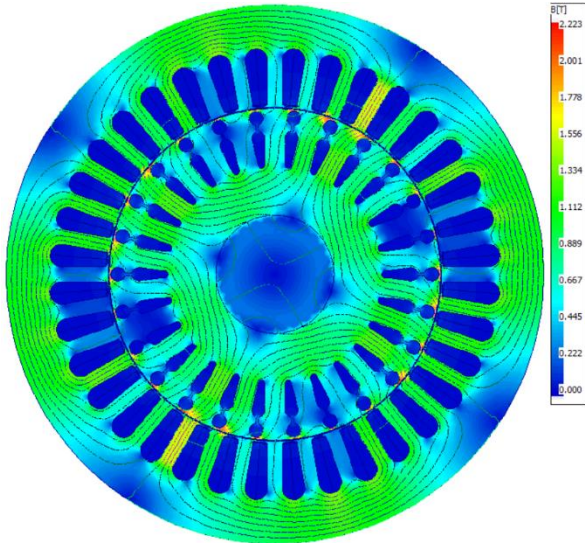
Şekil 5. Tasarım 2 motorun akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 5 analiz edildiğinde motorun stator boyunduruğu bölgesinde oluşan tepe akı yoğunluğu değeri 1,65 T, stator dişlerinde oluşan tepe akı yoğunluğu değeri 1,71 T mertebesindedir. Rotor çubukları çevresinde oluşan akı yoğunluğu 1,57 T mertebesindedir.

Tasarım 2 motor ile IE3 referans motor karşılaştırıldığında artan iletken çapı ile iletkenliğin arttırıldığı (Direncin azaldığı) görülmüştür bu sayede stator bakır kayıplarının azalması sağlanmıştır. Tasarım 1 e göre verim %87,52'den %88,98'e yükseltilmiştir.

3.2.3. Tasarım 3

Tasarım 3 gerçekleştirilirken Tasarım 2 motorun paket boyu 120 mm'den 150 mm'ye uzatılmıştır. Artan paket boyu ile motorun hacmi artacağından ötürü manyetik akı yoğunluğu azalmıştır. Bu sayede demir kayıpları ve stator bakır kayıplarının azalması beklenecektir, Tasarım 2'ye göre artan paket boyundan ötürü sac miktarı artacağından demir kaybının bir miktar artması beklenecektir. Artan paket boyundan ötürü motorun yüklenebilirliğini arttırabilmek adına motorun sarım sayısı 41'den 39'a düşürülmüştür.



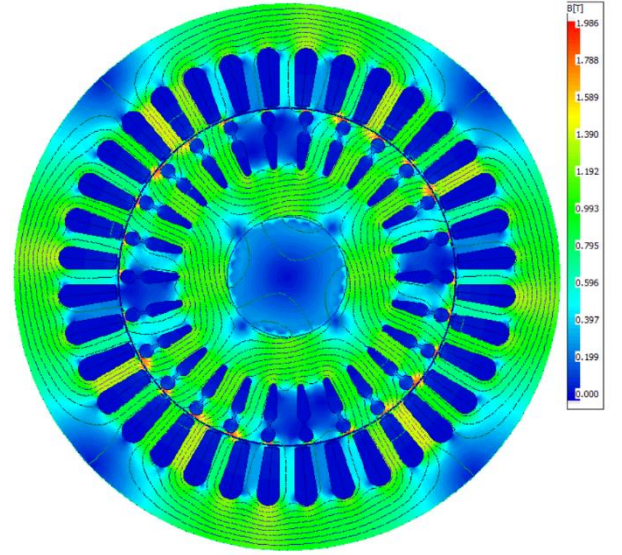
Şekil 6. Tasarım 3 motorun akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 6 analiz edildiğinde motorun stator boyunduruğu bölgesinde oluşan tepe akı yoğunluğu değeri 1,24 T, stator dişlerinde oluşan tepe akı yoğunluğu değeri 1,52 T mertebesindedir. Rotor çubukları çevresinde oluşan akı yoğunluğu 1,26 T mertebesindedir. Görüldüğü üzere paket boyunun artması ile motorun hacmi artacağından ötürü manyetik akı yoğunluğunun Tasarım 2 ye göre azaldığı görülmüştür.

Analiz incelendiğinde sarım sayısının azalmasından ötürü Tasarım 2'ye göre Tasarım 3'te akımın artması beklenirken paket boyunun 120 mm'den 150 mm'ye uzatılması ile manyetik akı yoğunluğunda meydana gelen düşüş dolayısı ile akımın azaldığı stator ve rotor bakır kayıplarının azaldığı görülmüştür.

3.2.4. Tasarım 4

Tasarım 4 gerçekleştirilirken Tasarım 3 motorda stator ve rotorda kullanılan elektriksel sac M350-50A yerine kayıp katsayısı daha düşük M235-35A sac kullanılması ile stator ve rotor demir kayıplarının azalması hedeflenmiştir.



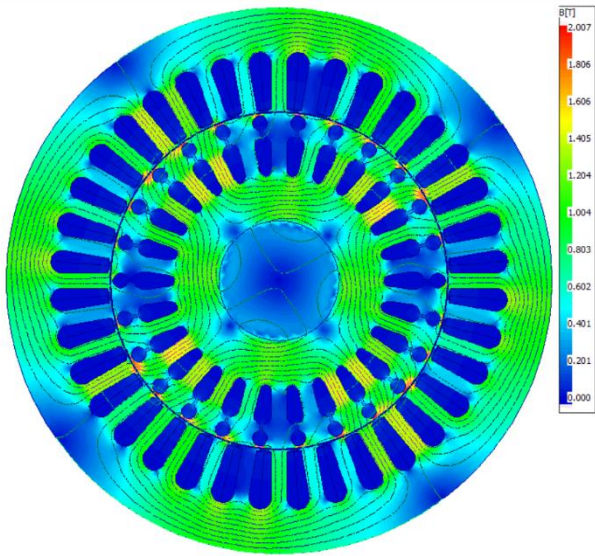
Şekil 7. Tasarım 4 motorun akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 7 analiz edildiğinde motorun stator boyunduruğu bölgesinde oluşan tepe akı yoğunluğu değeri 1,25 T, stator dişlerinde oluşan tepe akı yoğunluğu değeri 1,50 T mertebesindedir. Rotor çubukları çevresinde oluşan akı yoğunluğu 1,25 T mertebesindedir.

Tasarım 4 motor ile IE3 verim sınıfına sahip referans motorun analiz edildiğinde laminasyon sacının M350-50A yerine kayıp katsayısı daha düşük M235-35A ile değiştirilmesi sonucu stator ve rotor demir kayıplarının ciddi oranda düştüğü görülmüştür. Bu sayede asenkron motorun verimi %91,62'ye ulaşarak motor IE4 verim sınıfına erişmiştir.

3.2.5. Tasarım 5

Tasarım 5 gerçekleştirilirken IE4 verim sınıfına erişen Tasarım 4 asenkron motorun rotor olukları genişletilerek rotordaki iletkenliğin arttırılarak rotor kayıplarının azalması hedeflenerek IE4 verim sınıfında verimin biraz daha artması hedeflenmiştir.



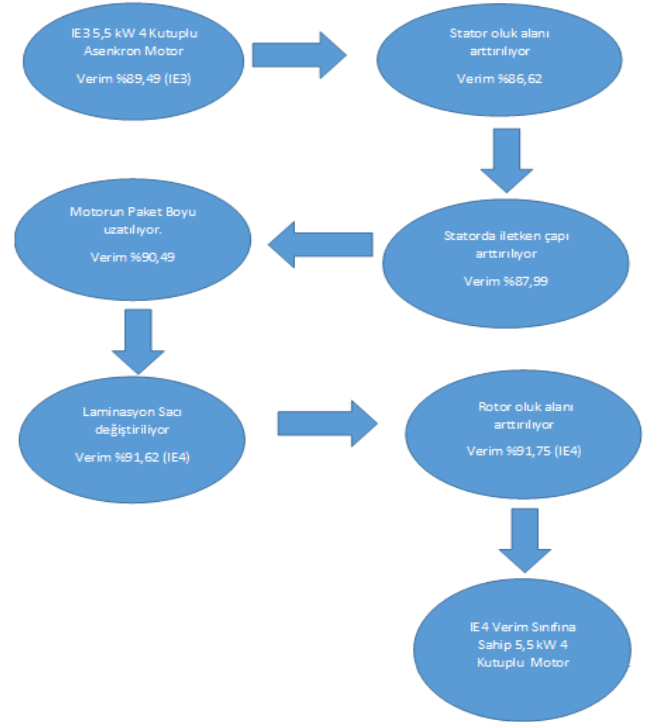
Şekil 8. Tasarım 5 motorun akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 8 analiz edildiğinde motorun stator boyunduruğu bölgesinde oluşan tepe akı yoğunluğu değeri 1,19 T, stator dişlerinde oluşan tepe akı yoğunluğu değeri 1,47 T mertebesindedir. Rotor çubukları çevresinde oluşan akı yoğunluğu 1,46 T mertebesindedir.

Analiz edildiğinde rotordaki direncin azalması, iletkenliğin artırılması ile rotor bakır kayıplarının azalması sağlanmıştır. Bu sayede IE4 verim sınıfına sahip asenkron motorun verimi daha da artarak %91,62'den %91,75'e erişmiştir.

3.2.6. İyileştirme Çalışmaları Değerlendirmesi

Verimi arttırabilmek adına aşama aşama tasarımlarda iyileştirmeler gerçekleştirilen izlenen yol özetle Şekil 9'da sunulmuştur. Öncelikle statorda iletken çapını arttırarak iletkenliği arttırabilmek adına Tasarım 1'de statordaki olukların alanı arttırılmıştır, hemen ardından iletkenliği arttırabilmek adına iletken çapı 0,78 mm'den 0,90 mm'ye arttırılmıştır. Tasarım 3'te ise motorun paket boyu 120 mm'den 150 mm'ye arttırılıp sarım sayısı 41'den 39'a düşürülmüştür bu sayede manyetik akı yoğunluğunun azalarak stator bakır ve demir kayıplarının azalması sağlanmıştır. Tasarım 4'te ise laminasyon sacı M350-50 A yerine kayıp katsayısı daha düşük M235-35A sac kullanılarak stator ve rotor demir kayıplarının azalması sağlanmıştır bu tasarımda motor %91,62 verime ulaşarak IE4 verim sınıfına erişmiştir. Ardından son tasarım olan Tasarım 5 de asenkron motorun verimini daha da arttırabilmek adına motorun rotor olukları genişletilip rotor bakır kayıplarının azalması hedeflenmiş olup neticesinde motorun verimi %91,75'e yükselmiştir.



Şekil 9. Motor tasarımları akış diyagramı

Tüm iyileştirmeler göz önüne alınarak asenkron motorun maliyet değişimi düşünüldüğünde 5,5 kW gücündeki 4 kutuplu asenkron motorun IE3 verim sınıfından IE4 verim sınıfına erişmesi esnasında %36,4'lük maliyet artışı meydana gelmiş olup asenkron motorun verimi %2,5 yükselmiştir.

5. Sonuç

Günümüzde Dünya'da hızla yükselen nüfus artışı, gelişen sanayi, hızla gelişen teknoloji şüphesiz enerjiye talebi hızla arttırmıştır, kaynaklarının hızla tüketilmesi sebebi ile enerji tasarrufu kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu sebeple uygulamaya konulan zorunlu regülasyonlar asenkron motorlarda yüksek verimli motorların kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Tüm bu gelişmeler neticesinde bu çalışmada enerji tüketimini azaltabilmek ve endüstrinin artan taleplerine karşılık verebilmek amacı ile yüksek verimli (IE3 ve IE4 verim sınıfına sahip), yüksek performanslı asenkron motorlar tasarlanmış olup karşılaştırmalı analizleri gerçekleştirilmiştir. Uluslararası regülasyonlar gereği 1 Temmuz 2021 tarihi itibari ile Türkiye'de ve Avrupa'da 0,75 kW – 1000 kW güç aralığındaki üç fazlı asenkron motorlarda minimum verim sınıfı IE3, 0,12 kW – 0,75 kW güç aralığındaki üç fazlı asenkron motorlarda ise minimum IE2 verim sınıfı motor kullanımının zorunlu hale getirilmesinden ötürü çalışmada referans olarak tasarlanacak üç fazlı asenkron motor 5,5 kW gücünde 4 kutup, IE3 verim sınıfına sahip olarak seçilmiştir. Çalışma boyunca öncelikle teorik hesaplamalar gerçekleştirilmiş olup, tasarımların benzetimleri ve sonlu elemanlar çözümleri Motor-Cad programında gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamda, ilk olarak IE3 verim sınıfına sahip 5,5 kW çıkış gücüne sahip asenkron motorun laboratuvar ortamında testleri gerçekleştirilmiştir. Ardından motorun benzetimi Motor-Cad üzerinde gerçekleştirilmiş olup, akı yoğunlukları, performans verileri analiz edilmiştir. Motorun tasarım parametreleri ve sonuçları detaylı olarak ifade edilmiştir. Ardından laboratuvar test

sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların oldukça benzer olduğu görülmüştür.

Sonraki bölümde referans olarak belirlenen IE3 verim sınıfındaki motor temel alınarak verim artırma metodları adım adım ayrı tasarımlar halinde uygulanıp, benzetimleri gerçekleştirilip, her aşamada karşılaştırmalı olarak sunulurken verimi arttırılmaya çalışılmıştır. Bu bağlamda öncelikle motorun stator oluk yapısı genişletilip çapı büyütülecek iletkene uygun alan hazırlanmıştır. Tasarım 2’de ise iletken tel çapının arttırılmış olup bu sayede direncin azalması neticesinde bakır kayıpları azaltılmıştır. Sonraki aşama olan Tasarım 3’te ise manyetik akı yoğunluklarını azaltıp bakır ve demir kayıplarını azaltabilmek maksadı ile motorun paket boyu uzatılmıştır. Tasarım 4’te ise ilaveten laminasyon sacları kayıp katsayıları daha düşük yani daha az kayıplı saclarla değiştirilerek demir kayıpları azaltılmıştır bu sayede motorun verimi %91,62’ye ulaşarak motor IE4 verim sınıfına erişmiştir. Akabinde IE4 verim sınıfına sahip tasarım olan Tasarım 4 motorun verimi biraz daha yükseltmek istenmiştir bu amaçla rotordaki iletkenliği arttırabilmek, rotordaki

bakır kayıplarını azaltabilmek maksadı ile motorun rotor olukları genişletilmiş, rotor bakır kayıpları azaltılmıştır. Motorun verimi %91,75’e ulaşmış olup IE4 verim sınıfındaki motorun verimi Tasarım 5’te Tasarım 4’e göre daha da yükselmiştir.

Her beş tasarımın da kayıpları detaylı analiz edilmiştir. Tüm tasarımlar gerçekleştirilirken karşılaştırmalı olarak bir önceki tasarımın tasarım parametreleri, performans verileri ve kayıpları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, paket boyunun uzatılması, laminasyon saclarının değiştirilmesi, stator bakır miktarının arttırılması asenkron motorlarda verimi arttırmaktadır. Tüm bunların yanında verimi çok daha yüksek seviyeye taşıyabilmek için vantilasyon kayıplarını azaltabilmek adına özel pervaneler, sürtünme kaybını azaltabilmek için ise sürtünme kaybı daha düşük rulmanlar kullanılabilir. Rotor iletken kayıplarını biraz daha azaltabilmek adına ise DCR metodu olarak bilinen rotorda alüminyum yerine iletkenliği alüminyuma göre daha yüksek olan bakır kullanılabilir.

Kaynakça

- Acar, Ç., Soygenç, O. C., & Ergene, L. T. (2018). Endüstriyel Uygulamalarda Kullanılan Asenkron Motorlarda IE2 Verim Sınıfından IE4 Verim Sınıfına Geçiş Amaçlı Bir Çalışma. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(3), 59–65. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/fumbd/issue/39229/461952>
- Alberti, L., & Troncon, D. (2021). Design of Electric Motors and Power Drive Systems According to Efficiency Standards. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(10), 9287–9296. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3020028>
- Boglietti, A., Cavagnino, A., & Vaschetto, S. (2011). Induction motor EU standards for efficiency evaluation: The scenario after IEC 60034-2-1. *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2786–2791. <https://doi.org/10.1109/IECON.2011.6119753>
- Carbonieri, M., & Bianchi, N. (2020). Induction motor rotor losses analysis methods using finite element. *2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 187–192. <https://doi.org/10.1109/ICIT45562.2020.9067209>
- Das, S., & Sozer, Y. (2019). Design and analysis of an axial flux doubly fed induction generator for wind turbine applications. *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2019*, 442–447. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2019.8913146>
- De Almeida, A. T., Ferreira, F. J. T. E., & Baoming, G. (2014). Beyond induction motors - Technology trends to move up efficiency. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(3), 2103–2114. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2288425>
- Dianati, B., Kahourzade, S., & Mahmoudi, A. (2019, October 1). Analytical design of axial-flux induction motors. *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2019 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/VPPC46532.2019.8952172>
- Donolo, P. D., Chiacchiera, E., Pezzani, C. M., Lifschitz, A. S., & De Angelo, C. (2020). Economic Barriers to the Application of Energy Efficient Motors in Industry. *IEEE Latin America e-ISSN: 2148-2683*
- Transactions, 18(10), 1817–1825. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9387673>
- Enstitüsü, T. S. (2012). *TS EN 60034-30, Döner elektrik makinaları - Bölüm 30: Tek hız kademeli, üç fazlı kafesli endüksiyon motorlarının verimlilik sınıfları (IE kodu)*.
- Enstitüsü, T. S. (2014). *TS EN 60034-30-1, Döner elektrik makineleri - Bölüm 30-1: Şebeke tarafından beslenen a.a motorlar için verimlilik sınıfları (IE kodu)*.
- GAMAK. (2021). *Teknik Katalog*. <https://www.gamak.com/Uploads/Document/TR-Katalog.pdf?v=63754506874000000>
- Gürdal, O. (2015). *Elektrik Makinalarının Tasarımı*. Bursa Orhangazi Üniversitesi Yayınları. https://www.researchgate.net/publication/335700632_Elektrik_Makinalarının_Tasarımı
- IEC-Governments & International Organizations, Examples by industry sector: Electric motors-measuring efficiency. (n.d.). Retrieved March 18, 2020, from https://www.iec.ch/perspectives/government/sectors/electric_motors.htm
- IEEE. (2018). IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. *IEEE Std 112-2017 (Revision of IEEE Std 112-2004)*, 1–115. <https://doi.org/10.1029/2010gb003772>
- Keskin Arabul, F., Senol, I., & Oner, Y. (2020). Performance Analysis of Axial-Flux Induction Motor with Skewed Rotor. *Energies*, 13(19), 4991. <https://doi.org/10.3390/EN13194991>
- Kobelev, A., Rozanov, D., & Makarov, L. (2020, October 4). Performance Analysis of Traction Induction Motors of Various Designs for Low-Floor Light Rail Vehicles. *2020 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2020 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICEPDS47235.2020.9249357>
- Koca, Y. B., & Ünsal, A. (2017). Asenkron Motor Arızalarının Değerlendirilmesi. *Teknik Bilimler Dergisi*, 7(2), 37–46. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tbed/issue/30206/300598>
- Kondo, M., Miyabe, M., Ebizuka, R., & Hanaoka, K. (2016).

- Design and Efficiency Evaluation of a High-Efficiency Induction Motor for Railway Traction. *Electrical Engineering in Japan*, 194(2), 15–23. <https://doi.org/10.1002/EEJ.22771>
- Rodger, D., Coles, P. C., Allen, N., Lai, H. C., Leonard, P. J., & Roberts, P. (1997). 3D finite element model of a disc induction machine. *IEE Conference Publication*, 444, 148–149. <https://doi.org/10.1049/cp:19971056>
- Rodriguez Gallego, A. (2014). *Design and Optimization of an IE44-pole 7.5 kW Induction Motor* [Royal Institute of Technology]. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-160702>
- Sadali, Y., Kondo, K., Aiso, K., Fujimoto, K., Makishima, S., Nakashima, Y., & Yamaguchi, T. (2021). Identifying the Optimal Induction Motor Design for Increased Power Density in Commuter Railway Use through Loss Analysis. *Proceedings of the Energy Conversion Congress and Exposition - Asia, ECCE Asia 2021*, 1187–1192. <https://doi.org/10.1109/ECCE-ASIA49820.2021.9479178>
- Sathyan, S., Aydin, U., & Belahcen, A. (2020). Acoustic Noise Computation of Electrical Motors Using the Boundary Element Method. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 245, 13(1), 245. <https://doi.org/10.3390/EN13010245>
- Tabora, J. M., De Lima Tostes, M. E., De Matos, E. O., Bezerra, U. H., Soares, T. M., & De Albuquerque, B. S. (2020). Assessing voltage unbalance conditions in IE2, IE3 and IE4 classes induction motors. *IEEE Access*, 8, 186725–186739. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029794>
- Valtonen, M., Parviainen, A., & Pyrhönen, J. (2006). Electromagnetic field analysis of 3D structure of axial-flux solid-rotor induction motor. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006, 2006*, 174–178. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2006.1649766>