



# IE4 Verimlilik Sınıfına Ulaşmak İçin Toroidal Sargılı Asenkron Motorun Tasarım Optimizasyonu

Sibel Zorlu Partal<sup>1\*</sup>, Aykut Çayıroğlu<sup>2</sup>, Muzaffer Kılınç<sup>3</sup>, Umut Yusuf Gündoğar<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Müh.Bölümü, İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-1309-2090), [zorlu@yildiz.edu.tr](mailto:zorlu@yildiz.edu.tr)

<sup>2</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Müh.Bölümü, İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-5698-8132), [aykut.cayiroglu@std.yildiz.edu.tr](mailto:aykut.cayiroglu@std.yildiz.edu.tr)

<sup>3</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Müh. Bölümü, İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-9024-2094), [muzaffer.kilinc@std.yildiz.edu.tr](mailto:muzaffer.kilinc@std.yildiz.edu.tr)

<sup>4</sup> NUMESYS İleri Mühendislik Hizmetleri A.Ş., İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-5245-275X), [umut.gundogar@numesys.com.tr](mailto:umut.gundogar@numesys.com.tr)

(İlk Geliş Tarihi 24 Şubat 2022 ve Kabul Tarihi 25 Mart 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1078324)

**ATIF/REFERENCE:** Zorlu Partal, S., Çayıroğlu, A., Kılınç, M., Gündoğar U.Y. (2022). IE4 Verimlilik Sınıfına Ulaşmak İçin Toroidal Sargılı Asenkron Motorun Tasarım Optimizasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (35), 177-186.

## ÖZ

Bu çalışmada, 1,8 kW gücünde, üç fazlı sincap kafesli, dağıtılmış tip sargı yapısına sahip bir asenkron motorun, verimlilik sınıfının IE2'den IE4'e yükseltilmesi ile ilgili bir tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Bu amaçla, referans asenkron motorun klasik yöntemle sarılmış sargı yapısı, küçük ve orta güçlü motorlar için daha avantajlı olan toroidal sargı kullanılarak yeniden modellenmiştir. Optimizasyon için, toroidal sargı yapısı kullanılarak yeniden modellenen asenkron motorun, farklı eksenel uzunluk ve farklı bakır miktarlarını içeren 8 motor modeli oluşturulmuştur. Bu motor modellerinin Ansys Maxwell'de Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak analizleri yapılmış ve sonuçlar; moment, verim ve manyetik akı yoğunluğu değerleri dikkate alınarak karşılaştırılmış olarak verilmiştir. Ayrıca, optimizasyon sonucunda, verimlilik sınıfının IE4'e yükseltildiği sonuçların elde edildiği motor modeli, daha sonra referans motor ile maliyet ve enerji tüketim değerleri açısından da karşılaştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Asenkron Motor Tasarımı, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Verimlilik Sınıfları, Toroidal Sargı, Ansys Maxwell

## Design Optimization of an Induction Motor with Toroidal Winding to Achieve IE4 Efficiency Class

### ABSTRACT

In this work, a typical IE2 efficiency class, 1,8 kW, 3-phase squirrel-cage distributed winding induction motor is considered and an optimization is performed to upgrade the efficiency to an IE4 class. For this purpose, the induction motor with conventional distributed winding is remodeled using toroidal winding, which is more advantageous for small and medium power motors. For the optimization, eight motor models with different axial lengths and different copper amounts are designed, using the toroidal winding by changing the winding structure of the reference induction motor. These motor models are analyzed using the Finite Element Method (FEM) in Ansys Maxwell tool and, the results are given comparatively considering the torque, efficiency and magnetic flux density. Furthermore, the motor model which was upgraded to IE4 efficiency class was then compared with the reference motor and the results are analyzed in terms of cost and energy consumption.

**Keywords:** Induction Motor Design, Finite Element Method, Efficiency Classes, Toroidal Winding, Ansys Maxwell

\* Sorumlu Yazar: [zorlu@yildiz.edu.tr](mailto:zorlu@yildiz.edu.tr)

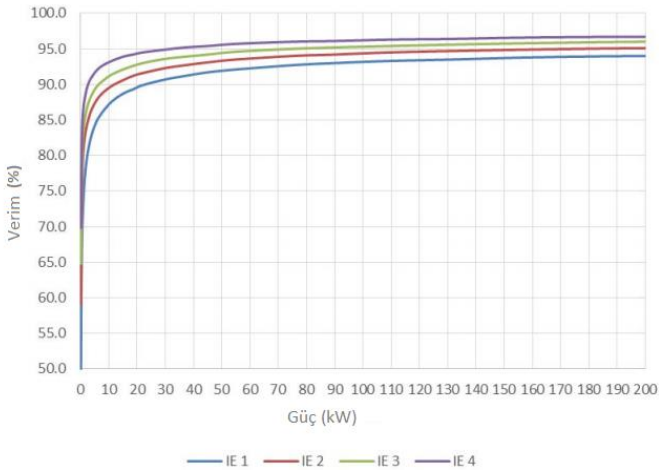
## 1. Giriş

Günümüzde enerji ihtiyacı, geçmiş yıllara nazaran hızla artmaktadır. Gelişen teknolojiyle beraber bu ihtiyacı gidermek amacıyla yeni çözümler aranmaktadır. Özellikle sanayileşmedeki artış, enerji ihtiyacının artmasında önemli bir rol oynamaktadır. Yapılan araştırmaya göre dünya genelinde elektrik enerjisinin %53'ü elektrik motorları tarafından harcanmaktadır (International Energy Agency, 2016). Ülkemizde ise sanayi elektriğin tüketiminin yaklaşık %70'i, toplam net elektrik tüketiminin ise %36'sı üç fazlı asenkron motor sistemlerinden kaynaklanmaktadır (T.C. Bil.,San. ve Tek. Bakanlığı, 2015). Bu sebeple, ülkemizde ve dünyada, özellikle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta olan asenkron motorların daha düşük kayıplı tasarımlar ile daha yüksek verimli hale getirilmesi üzerine yoğun çalışmalar yapılarak, enerji tüketiminde önemli miktarda azalma sağlanmaya çalışılmaktadır.

Elektrik Motorları 1998 Yılında CEMEP (European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics) tarafından hazırlanan dokümana göre, 1,1 kW ile 90 kW arasında 3 temel verimlilik sınıfında üretilmekte ve değerlendirilmekteydi. Yeni hazırlanan IEC 60034-30:2008 standardına göre ise elektrik motorları için verimlilik sınıfları 0,75 kW ile 375 kW arasına genişletilmiş olup, tanımlamaları aşağıdaki gibi yapılmıştır (T.C. Bil.,San. ve Tek. Bak., 2015).

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

Şekil 1, IEC 60034-30-1 standardına göre 50 Hz motorların IE1, IE2, IE3, IE4 sınıfları için sağlaması gereken verim değerlerini göstermektedir. IE4 en yüksek, IE1 ise en düşük verim seviyesini göstermektedir (Energy Efficiency Office, 2015)

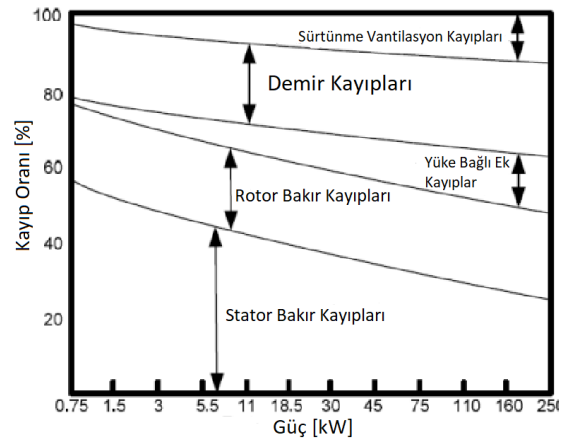


Şekil 1. Dört kutuplu ve 50 Hz ile çalışan bir asenkron motorun IE standardına ait minimum verimlilik değerleri (Figure 1). Minimum Energy Efficiency Requirement of IE Efficiency Class of 4 poles, 50Hz induction motor)

Elektrik motorlarında yapılacak verim iyileştirmesi, pek çok sistem üzerinde olumlu etki oluşturacaktır. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının verimlilik üzerine yaptığı çalışmaya göre; basınçlı hava sistemlerinde %33, fan sistemlerinde %22, pompa uygulamalarında ise %22 potansiyel iyileştirme imkânı vardır (T.C. Bil.,San. ve Tek. Bak., 2015).

Verimde yapılacak iyileştirme, elektrik makinasındaki kayıplara bağlıdır. Asenkron makinalarda bu kayıplar şu şekilde sıralanabilir: sargı iletkenlerinden kaynaklanan iletken kayıpları, nüve kayıpları (histerezis ve girdap akımlarının toplamı), sürtünme ve vantilasyon kayıpları ve yüke bağlı ek kayıplar. Elektrik makinalarında kayıplarının dağılımı büyük ölçüde makinanın gücüne bağlı olsa da, Şekil 2'de gösterildiği gibi, tüm güç seviyelerindeki en büyük kayıplar iletken ve nüve kayıplarıdır (Dorrell, 2014). Bu kayıpların azaltılması, elektrik makinalarında verimin artmasında çok önemli bir etkiye sahiptir. Bu kayıpların hesaplanabilmesi için, IEC 60034-2-1 standardında açıklanan yöntemlere uygun şekilde, anma yükü altında, farklı yük kademelerinde ve yüksüz çalışma durumu için çeşitli ölçümler yapılır. Yapılan test ve ölçümler sonucunda, motor güç kayıpları ile verime ilişkin sayısal veriler ve eğriler elde edilir. Bu bağlamda, IEC standardında belirtilen kriterlere uygun olarak elde edilen verim değerlerinin, 60034-30-1 standardına göre uluslararası verim sınıfı (IE) karşılığı olan yeri (IE1, IE2, IE3 ve IE4 olarak) belirlenir ve böylece asenkron motorun verimlilik sınıfı elde edilmiş olur (Acar vd., 2018).

Bu çalışmada 1,8 kW gücünde üç fazlı sincap kafesli bir asenkron motorun verimini arttırmak amacıyla, stator sarımında dağıtılmış sarım yerine, toroidal sarım denenerek, toroidal sarım şeklinin, verim ve moment üzerindeki etkileri incelenmiştir.

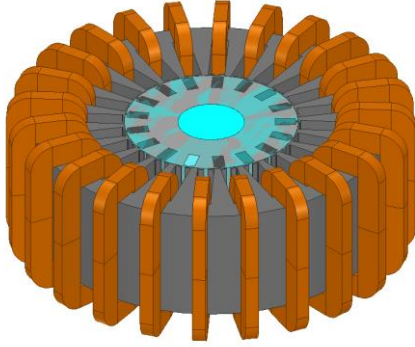


Şekil 2. Asenkron motordaki kayıpların dağılımı (Figure 2. Induction motor loss components)

## 2. Toroidal Sargı Yapılı Asenkron Motorun Tasarımı

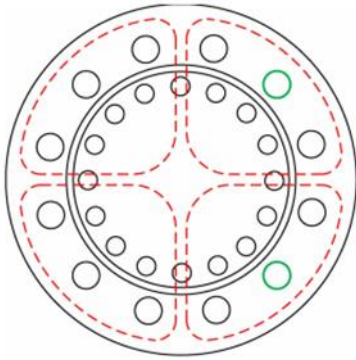
Sincap kafesli asenkron motorun statorunda genelde tek veya çift katmanlı olacak şekilde dağıtılmış tip sargı kullanılır. Bu sargı tipinin temel avantajı, birincil sargılar tarafından üretilen akının iyi bir sinüzoidal dalgaya sahip olmasının yanı sıra, gerilim dalgasındaki yüksek dereceli harmonikler azaltılması ve neredeyse mükemmel bir sinüzoidal akım dalgası sağlamasıdır. Bu avantajının yanında, bu sargıların, üst üste binen bobinler dolayısıyla stator oluk doluluk oranlarının düşük olması ve çok uzun sargı uç bağlantılarına sahip olmaları gibi dezavantajları vardır. Sargı uç bağlantısının çok uzun olmasının nedenlerinden biri, bu sargı tipinin büyük kutup adımlı tasarımlara sahip motorlarda kullanılmasıdır. Bahsedilen bu dezavantajları gidermek amacıyla toroidal sarım tekniği geliştirilmiş ve çeşitli uygulamaları yapılmıştır (Pourmoosa ve Mirsalim, 2015; Jensen vd., 2012; Sashidhar vd., 2018).

Toroidal sargı kavramı, dağıtılmış tip sargı ile eş merkezli sargı olan iki sargı türünün melezi bir sargıdır. Eş merkezli bir sargıya benzer şekilde, sargı sonu dönüş uzunluğu azaltmıştır. Ancak sargı, hava boşluğu çevresi etrafında dağıtılmış bir sargıya benzediği için, manyetomotor kuvvetin (MMF) dalga formunda harmonikleri yoktur (Sashidbar vd., 2018). Bu topolojide, asenkron motor stator sargısı, küçük ve orta büyüklükteki motorlarda yaygın olduğu şekilde eş merkezli olmaktan ziyade, Şekli 3’de gösterildiği gibi stator boyunduruk etrafına toroidal olarak sarılır (Jensen and Jack, 2010). Toroidal sarım kullanılmasının en önemli avantajı, sargı uç bağlantı uzunluğunun klasik dağıtılmış sargıya göre kısa olması sebebiyle, daha düşük stator direnci ve kaçak reaktans değerlerine sahip olmasıdır. Şekil 3’te üç boyutlu toroidal sargı gösterilmiştir (Sashidbar vd., 2018).

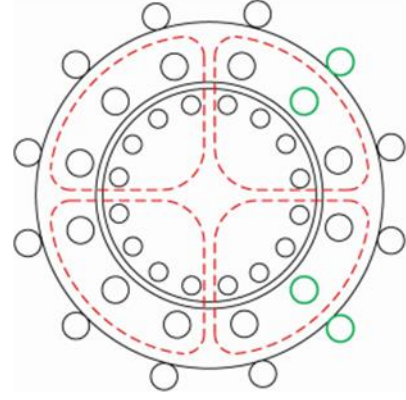


Şekil 3. Toroidal sarımın üç boyutlu görünümü (Figure 3. 3-D view of the toroid coil wound )

Toroidal stator sargısı, stator boyunduruk etrafına sarıldığı için, hava aralığı akısının yalnızca yarısını keser ve bu nedenle, bobin başına endüklenen elektromotor kuvvet (EMK), tüm hava boşluğu akısı kesildiğinde oluşacak olan EMK’nın yarısıdır. Şekil 4 ve 5’te sırasıyla dağıtılmış tip ve toroidal sargı için akı yolları gösterilmiştir (Jensen and Jack, 2010).

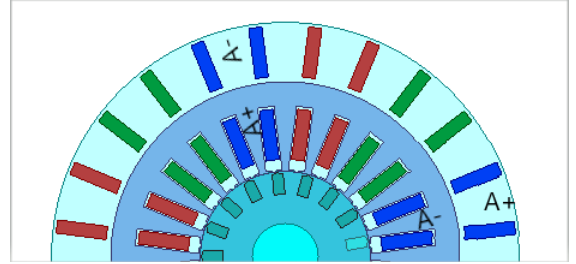


Şekil 4. Dağıtılmış tip sargılı asenkron motorun akı yolları (Figure 4. Flux path for distributed wound induction machine)



Şekil 5. Toroidal sargılı asenkron motorun akı yolları (Figure 5. Flux path of toroidally wound induction machine)

Bununla birlikte, geleneksel yöntemle sarılmış bir stator da iki oluk başına bir bobin var iken, toroidal olarak sarılmış bir stator da oluk başına bir bobin vardır. Sarım türlerinin yapısından kaynaklanan bu farklılıklardan dolayı, toroidal olarak sarılmış bir makinada, hava aralığında endüklenen akının değeri, geleneksel yöntemle sarılmış bir makinada hava aralığında endüklenen akı değerinin yarısı kadardır. Toroidal sarımda, sargı yapısından dolayı endüklenen akı değerinde oluşan bu kaybı telafi etmek için iki bobin ardışık kutuplarda seri olarak bağlanır. Sonuç olarak gerekli hava aralığı akı değeri elde edilerek, bu kayıp giderilmiş olur (Jensen and Jack,2010). Şekil 6’da Toroidal sargılı makina için seri bağlantı şekli gösterilmiştir.



Şekil 6. Toroidal sargılarda seri bağlantı: A fazı (Mavi), B fazı (Kırmızı) ve C fazı (Yeşil) (Figure 6. Series connection for toroidal windings: Phase A (Blue), Phase B (Red) and Phase C (Green))

Rotor akısı, stator nüvesinin dışındaki iletkenleri kesmediği için, stator boyunduruğu üzerindeki iletkenler sargı uç dönüşleri olarak kabul edilir. Yüksek çap/uzunluk oranına sahip motorlar için, toroidal sargı uç dönüşü oldukça kısa olur ve bu nedenle motorun sargı kayıpları önemli ölçüde azalır (Sashidbar vd., 2018). Ayrıca toroidal sargı tipinde stator bobinleri yukarıda da bahsedildiği gibi stator boyunduruğuna sarıldığından, stator boyunduruk kesitinin şekli de önemlidir. Belirli bir stator boyunduruk kesiti için en kısa aktif iletkeni sahip stator bobinleri, stator boyunduruk kesiti kare ise elde edilir (Jensen vd., 2012). Bir stator bobinin aktif iletkeni, stator oluğu içerisinde bulunan ve hava aralığında akı endüklenmesini sağlayan kısmı; pasif iletkeni ise stator oluğu dışına yerleşmiş olan faydalı akı katkısı yapmadığı kısımdır. Öte yandan, aktif ve pasif stator iletken oranını artırmanın daha önemli olduğu tasarımlarda, ekstenel olarak uzun ve ince bir makina tasarlanmak istenir. Bunun nedeni, stator boyunduruğunun şekli kare olması durumunda, aktif stator iletkenlerinin oranının 1/3 olacağıdır, çünkü karenin her kenarı aynı uzunluğa sahiptir. Fakat stator boyunduruğu ekstenel olarak uzun ve inceyse, böyle bir geometri, boyunduruğun derinliğinin

ihmal edilebilir olduğu varsayılırsa, aktif/pasif stator iletkenlerinin 1/1 oranında olmasıyla sonuçlanabilir. Bu iki geometri, bu topoloji için iki uç tasarım olarak düşünülebilir ve optimum bir tasarım da bu iki uç geometri arasında yapılabilir. Eksenel uzunluk ile stator boyunduruk yüksekliğinin birbirine eşit olduğu kare şeklindeki boyunduruk yapısında, sarımda kullanılan bakır tel için en kısa aktif iletken uzunluk değerine ulaşılmış olacaktır. Ancak eksenel olarak uzun ve stator boyunduruğun daha ince olduğu tasarıma sahip makinelerde ise, aktif/pasif iletkenlerin en iyi oranına ulaşılmış olacaktır (Jensen vd., 2010).

### 3. Toroidal Sargılı Asenkron Motorun Verim Optimizasyonu

Bu çalışmada dağıtılmış tip sargı yapısına sahip bir asenkron motor modeli referans alınmış ve bu referans motorun verimlilik sınıfının yükseltilmesi için sargı yapısı, toroidal sargı yapısına dönüştürülerek, yeniden modellenmiştir. Tablo 1’de referans alınan asenkron motorun parametreleri verilmiştir. Daha sonra toroidal sargı yapılı motor tasarımının verim optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon için, toroidal sargılı motorun, farklı eksenel uzunluk ve farklı bakır miktarlarını içeren 8 farklı motor modeli oluşturulmuştur. Verim optimizasyonu çalışmasında, önce referans asenkron motorun, Ansys Rmxprt programı kullanılarak modellenmesi yapılmış, daha sonra bu model, sonlu elemanlar yöntemi ile analizinin yapılması için Maxwell 2-D’ye aktarılmış ve iki boyutlu analizi yapılmıştır. Tablo 2’de bu analizden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Tablo 2’de;  $R_s$ , stator bakır direnci,  $X_{es}$ , stator bakır reaktans değeri,  $L_c$ , bakır kaçak endüktansı,  $I$ , stator sargı akımı,  $E_s$ , hava aralığında endüklenen gerilim,  $B_y$ , stator boyunduruğu akı yoğunluğu ve  $B_t$ , stator dışı akı yoğunluğunu göstermektedir. Tablo 3’te ise motorun yapısal analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 1. Referans motorun tasarım parametreleri (Table 1. Design parameters of the reference motor)

Güç (W)	1800	Stator Oluk Sayısı ( $N_s$ )	24
Gerilim (V)	400	Hava Aralığı (g, mm)	0,2
Bağlantı Şekli	Üçgen	Rotor Mil Çap (mm)	46,32
Kutup Sayısı	4	Rotor Oluk Sayısı ( $N_r$ )	17
Stator Dış Çapı ( $D_o$ , mm)	244,78	Oluk Başına İletken Sayısı	128
Stator İç Çapı ( $D_i$ , mm)	112,4	Stator İletken Kesiti ( $mm^2$ )	1,8
Eksenel Uzunluk (L, mm)	92,8	Elektriksel Çelik	M19_24G

Tablo 2. Referans motorun analiz sonuçları (Table 2. Analysis results of the reference motor)

$R_s$ ( $\Omega$ )	4,57
$X_{es}$ ( $\Omega$ )	6,4214
$L_c$ (H)	0,02044
I (A)	2,893

$E_s$ (V)	376,05
Verim (%)	83,19
Moment (Nm)	8,92
$B_y$ (T)	1,016
$B_t$ (T)	1,6

Tablo 3. Referans motorun yapısal analiz sonuçları (Table 3. Structural analysis results of the reference motor)

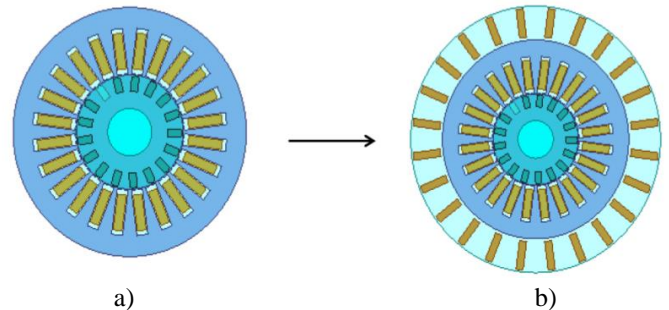
Bakır Miktarı (kg)	6,725
Stator Demir Nüve Miktarı (kg)	16,584
Rotor Demir Nüve Miktarı (kg)	4,216
Toplam Demir Nüve Miktarı (kg)	20,8

### 3.1. Farklı Eksenel Uzunluklara Göre Asenkron Motorun Tasarım Optimizasyonu

Dağıtılmış tip sargılı asenkron motor ile toroidal sargılı asenkron motoru karşılaştırmak için, ilk olarak dağıtılmış tip sargı Ansys Maxwell programı kullanılarak iki boyutlu düzlemde, toroidal sargıya dönüştürülmüştür. Toroidal sargının avantajlarından yararlanmak için motorun eksenel uzunluğunun, klasik sarımdaki kutup adımından kısa olması gerekir. Bunun için önce referans motorun kutup adımı Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem (1)’de stator iç çapı ( $D_i$ ) 112,4 mm ve tek kutup sayısı ( $2p$ ) dört olarak alındığında, kutup adımı 88,27 mm olarak bulunmuştur.

$$Kutup\ Adımı = \frac{\pi x D_i}{2p} \quad (1)$$

Bu sonuçtan da görüleceği üzere, toroidal sargılı tasarım için makinanın eksenel uzunluğunun 88,27 mm’den küçük olması gereklidir. Ayrıca yapılan bu çalışmada, karşılaştırması yapılan motor modellerinin yaklaşık olarak aynı rotor hacmine sahip olmaları için, stator dış çap değerleri sabit tutulup, hava aralığı değerleri aynı kalacak şekilde, stator iç çap değeri ile rotor dış çap değeri kullanılarak optimizasyon yapılmıştır.



Şekil 7. Referans motor ve toroidal sargılı motor modelleri  
a) Dağıtılmış tip sarıma sahip referans motor b) Toroidal sargılı motor (Figure 7. The reference and toroidal wound motors  
a) Distributed wound induction machine b) The proposed toroidal winding induction machine

Şekil 7’de, dağıtılmış tip sargıya sahip motorun toroidal sarıma sahip motora dönüşümü yapıldıktan sonra, sargı yapısında meydana gelen değişiklik gösterilmiştir. En iyi performansın elde

edildiği toroidal sarıma sahip tasarımı bulmak için, toroidal sarıma sahip beş farklı aksel uzunluktaki motorların, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Referans motorun 8,92 Nm olan moment değeri referans alınarak, bu beş farklı tasarımın moment değerleri karşılaştırılmış, 1.motor modelindeki moment değerinin, referans motorun moment değerinden düşük, diğer dört tasarımın moment değerlerinin de, referans motora göre yüksek olduğu görülmüştür. Ancak 5.motor tasarımındaki motorun moment değeri en yüksek değere ulaşmış olmasına rağmen, stator boyunduruğunda akı yoğunluğunun 1,848 T olmasından dolayı manyetik nüve doyuma gitmiştir. Diğer motor tasarımları olan 2, 3. ve 4. motor modelleri ise verim açısından karşılaştırıldığında, Tablo 4'den de görüleceği üzere en başarılı verim sonuçlarının, 2, ve 3.motor modellerinden elde edildiği görülmektedir. Bu iki tasarım ise kendi aralarında verim, moment ve kullanılan bakır miktarları açısından karşılaştırıldığında, 3. motor modelinin en iyi sonucu veren motor modeli olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 4. Toroidal sargılı asenkron motorun analiz sonuçları  
(Table 4. Analysis results of toroidally wound induction motor)

	1.TASARIM	2.TASARIM	3.TASARIM	4.TASARIM	5.TASARIM
L(mm)	88	82	80	78	70
D <sub>i</sub> (mm)	115,4	119,6	121,1	122,6	129,4
R <sub>s</sub> (Ω)	4,1989	3,9369	3,8480	3,7590	3,3903
X <sub>es</sub> (Ω)	6,7462	6,3453	6,2078	6,0702	5,4885
L <sub>e</sub> (H)	0,0215	0,0202	0,0198	0,0193	0,0175
I (A)	2,65	2,605	2,6531	2,75	4,86
E <sub>s</sub> (V)	378,15	379,51	379,52	378,94	365,09
Verim (%)	86,4	87,18	87,04	86,77	80,42
Moment (Nm)	8,86	9,3298	9,55	9,75	9,94
B <sub>y</sub> (T)	1,207	1,323	1,552	1,583	1,848
B <sub>t</sub> (T)	1,04	1,176	1,063	1,02	1,47
Bakır Miktarı (kg)	7,9439	7,3422	7,1380	6,9337	6,0870
Stator Demir Nüve Miktarı (kg)	15,3713	13,8833	13,38	12,8829	10,8567
Rotor Demir Nüve Miktarı (kg)	3,998	3,725	3,634	3,543	3,18
Toplam Demir Nüve Miktarı (kg)	19,3693	17,6083	17,014	16,4259	14,0367

### 3.2. Toroidal Sargılı Asenkron Motorun Farklı Bakır Miktarları İçin Optimizasyonu

Toroidal sargı yapısının kullanıldığı, farklı aksel uzunluk ve farklı rotor çap değerleri kullanılarak yapılan asenkron motor verim optimizasyonunda, en yüksek verim değerleri 2., 3. ve 4. motor modellerinde elde edilmişti. Bu üç tasarım arasında, bu defa da oluk başına düşen iletken sayısı artırılarak, yani aynı yapısal tasarım için motorun statorundaki bakır miktarı artırılarak, daha verimli bir motor elde etmek için, farklı motor modeli analizleri yapılmıştır. Bu analizler için, bir stator oluğundaki iletken sayısı 128 ile 142 arasında farklı değerlerde

alınarak, sonuçlar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, en başarılı sonuçların stator oluğundaki iletken sayısı 132 alındığında elde edildiği görülmüştür. İletken sayısı 132 alındığında bu sonuçların elde edilmesinin nedeni, stator direncinin ve sargısının uç bağlantılarından kaynaklanan reaktans değerinin fazla artmaması ve elde edilen kazanımların kaybedilmemesinden dolayıdır.

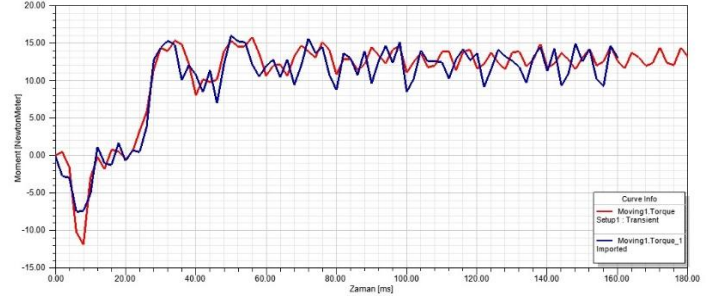
İletken sayısı ile ilgili yapılan bu optimizasyon sonuçlarından sonra, stator oluğundaki iletken sayısı 128 yerine 132 yapılmış ve daha önceki motor modellerinin iletken sayılarının değişmesi sebebiyle motor modellerinin isimleri değiştirilerek, 6, 7 ve 8 numaralı motor modelleri oluşturulmuştur. Bu üç motor modeli için Ansys Maxwell'de tekrar 2 boyutlu analizler yapılmış ve sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5 incelendiğinde, bu üç yeni tasarımın verim değerlerinin, 2, 3 ve 4 numaralı tasarımlara göre daha yüksek, ancak moment değerlerinin ise daha düşük olduğu görülmüştür. 6.motor modelinde moment değeri ilk referans alınan geleneksel yöntemle sarılmış motorun moment değerinin altında kaldığı için, en yüksek verim değerini vermesine rağmen değerlendirmenin dışına alınmıştır. 7.motor modeli ise verim ve moment değerleri açısından iyi sonuçlar vermesine rağmen, uç bağlantı uzunluğundan kaynaklanan kaçak endüktans değerinin, geleneksel yöntemle sarılmış referans motorun kaçak endüktans değeri olan 0,02044 H'nin üzerinde bir değere sahip olması sebebiyle, değerlendirme dışına alınmıştır. 8.motor modelinden ise, referans alınan geleneksel yöntemle sarılmış motora göre daha iyi bir verim ve moment elde edilmiştir. Her ne kadar uç bağlantı uzunluğundan kaynaklanan kaçak endüktans değeri düşürülmemiş olsa da, hemen hemen eşit kabul edilerek, bu üç tasarım içerisinde başarılı bir tasarım olarak kabul edilmiştir.

Tablo 5. Bakır miktarı artırılmış motor modellerinin analiz sonuçları  
(Table 5. Analysis results of motor models with increased copper)

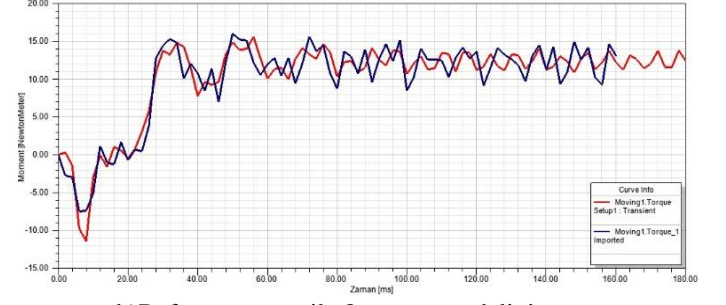
	6.TASARIM	7.TASARIM	8.TASARIM
L (mm)	82	80	78
D <sub>i</sub> (mm)	119,6	121,1	122,6
R <sub>s</sub> (Ω)	4,0599	3,9682	3,8765
X <sub>es</sub> (Ω)	6,7544	6,5973	6,4403
L <sub>e</sub> (H)	0,0215	0,021	0,0205
I (A)	2,36	2,4	2,47
E <sub>s</sub> (V)	380,48	380,5	380,15
Verim (%)	87,7	87,65	87,32
Moment (Nm)	8,75	8,97	9,16
B <sub>y</sub> (T)	1,3	1,383	1,373
B <sub>t</sub> (T)	1,2	1,11	1,15
Bakır Miktarı (kg)	7,5717	7,3610	7,1504
Stator Demir Nüve Miktarı (kg)	13,8833	13,38	12,8829
Rotor Demir Nüve Miktarı (kg)	3,725	3,634	3,543
Toplam Demir Nüve Miktarı (kg)	17,6083	17,014	16,4259

### 3.3. Motor Modellerinin Güç ve Moment Analizleri

Bir önceki bölümde farklı bakır miktarlarına göre motor modelleri oluşturulmuş ve kayıp analizi yapılmıştı. Bu sonuçlar, daha önce elde edilen sonuçlarla birlikte değerlendirilerek, daha yüksek verim ve momentin elde edildiği 3. ve 8. motor modelleri, bu defa da çıkış gücü ve moment değerleri açısından, referans motor modeli ile karşılaştırılmış ve sonuçlar aşağıda Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'de verilen grafiklerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, referans motorun çıkış gücü ile mukayese edildiğinde, 3. motor modelinin çıkış gücünde %5,57'lik bir artış ve 8. motor modelinin çıkış gücünde de %1,07'lik bir artış olduğu görülmektedir. Referans motora göre 3. motor modelinin %3,85, 8. motor modelinin ise % 4,13 daha verimli olduğu görülmektedir. Şekil 9'da ise referans motor ile 3. ve 8. motor modellerinin moment grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen sonuçlar incelendiği zaman referans modele göre, 3. motor modelinin moment değerinde %5,56'lık ve 8. motor modelinin moment değerinde ise % 1,07'lik bir artış olduğu görülmektedir. Ayrıca momentteki dalgalanma miktarları incelendiğinde, referans motorun moment dalgalanma miktarı ile karşılaştırıldığında, 3. motor modelinin moment dalga şeklinde %5,4781 daha az dalgalanma ve 8. motor modelinin moment dalga şeklinde ise %5,601 daha az dalgalanma olduğu görülmüştür.



a) Referans motor ile 3. motor modelinin moment değerlerinin karşılaştırılması ((a) Torque comparison between the reference motor and the 3rd motor model)



b) Referans motor ile 8. motor modelinin moment değerlerinin karşılaştırılması ((b) Torque comparison between the reference motor and the 8th motor model)

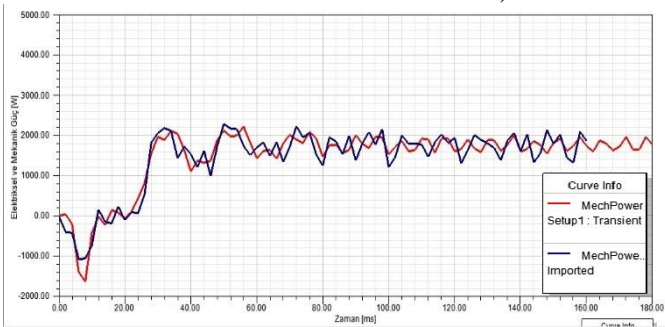
Şekil 9. Moment değerlerinin karşılaştırılması (Figure 9. Torque comparison)

### 3.4. Motor Modellerinin Akı Yoğunluğu ve Demir Kaybı Analizleri

Bu çalışmada yapılan motor tasarımlarında stator sac malzemesi olarak M19\_24G elektriksel çeliği kullanılmıştır. Şekil 10'da M19\_24G elektriksel çeliğinin B-H grafiği verilmiştir. Bu malzemenin doyuma gittiği akı yoğunluğu değeri 1,8 Tesla'dır. Şekil 11'de referans motor ile 3. ve 8. motor modellerinin akı yoğunluğu dağılımları verilmiştir. Akı yoğunluğu dağılım şekilleri incelendiğinde, referans motorun statorundaki akı yoğunluğu değerlerinin, stator dişlerinde yüksek, stator boyunduruğunda ise düşük olduğu görülmektedir. 3. ve 8. motor modellerinde ise, durum tam tersidir. Bu modellerde akı yoğunluk değeri stator dişlerinde düşük, stator boyunduruğunda ise yüksek değerdedir. Ortaya çıkan bu durumun nedeni; referans motorda kullanılan dağıtılmış tip sargının, statorun dişlerine sarılmasıdır. Bu nedenle bu sargı tipine sahip tasarımlarda stator dişlerinde akı yoğunluğu değeri yüksektir. Toroidal sargıda ise sargı, statorun boyunduruğuna sarılmaktadır. Bu yüzden bu sargı türünde stator boyunduruğunda akı yoğunluğu değeri yüksektir. Ayrıca toroidal sargının uygulandığı tasarımların stator demir nüve hacmi, referans motorun demir nüve hacmine göre daha azdır. Bu durumun sebebi, daha kısa sargı sonu uzunluğu olması için motorun aksel uzunluğunun kısaltılmasıdır.

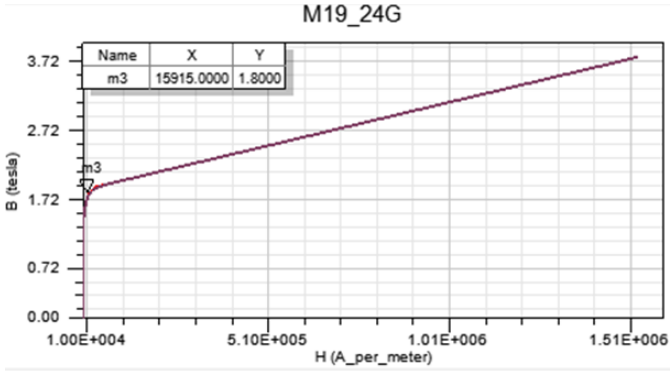


(a) Referans motor ile 3. motor modelinin güç değerlerinin karşılaştırılması ((a) Power comparison between the reference motor and the 3rd motor model)



b) Referans motor ile 8. motor modelinin güç değerlerinin karşılaştırılması ((b) Power comparison between the reference motor and the 8th motor model)

Şekil 8. Mekanik güç karşılaştırılması (Figure 8. Mechanical power comparison)



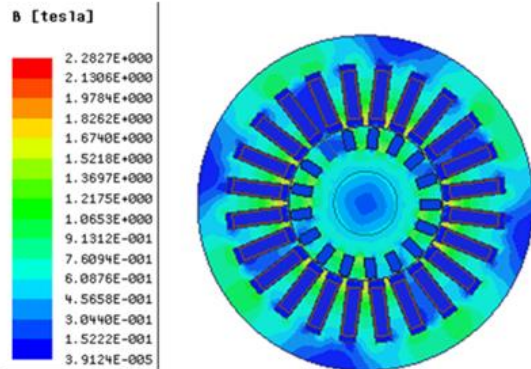
Şekil 10. M19\_24G çeliğinin B-H grafiği (Figure 10. B-H curve of M19\_24G steel)

Motorun aksel boyunun kısalmasına ek olarak, rotorun hacminin aynı kalabilmesi için, stator dış çap değeri sabit tutularak, rotorun dış çap değeri artırılmış, dolayısıyla statorun iç çap değeri azalmıştır. Sonuç olarak hem motorun aksel boyunun kısılması, hem de stator iç çap değerinin azalması sonucunda stator demir nüve hacmi azalmıştır. Toroidal sarımda stator boyunduruğunda akı yoğunluğu değerinin yüksek olmasının bir diğer nedeni de bu yapısal özelliğidir.

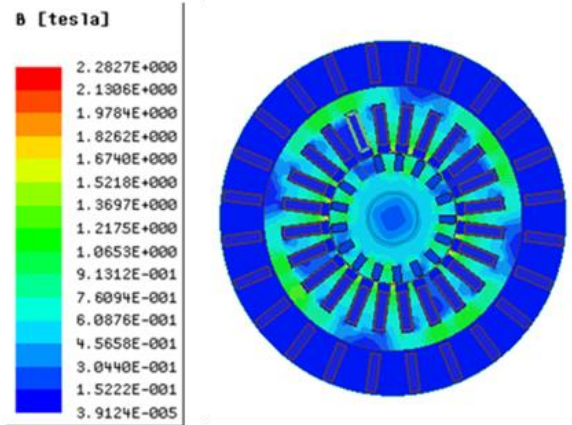
Tablo 6. Referans motor, 3.motor modeli ve 8.motor modeline ait akı yoğunluğu değerleri (Table 6. Magnetic flux density of the reference motor, 3rd motor model and 8th motor model )

Motorlar	Stator boyunduruk akı yoğunluğu (T)	Stator dış akı yoğunluğu (T)
Referans Motor	1,016	1,6
3. Motor Modeli	1,552	1,063
8. Motor Modeli	1,373	1,15

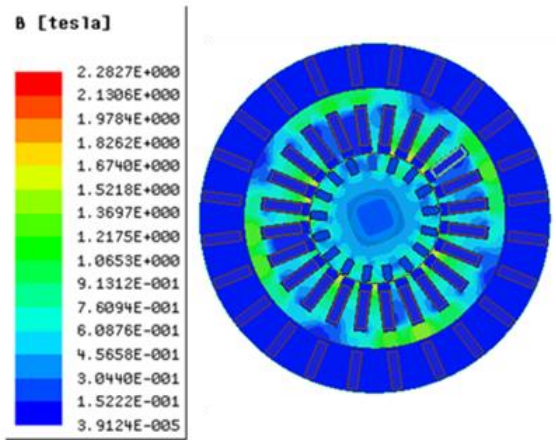
Tablo 6'da her üç motora ait hem stator dış akı yoğunluğu değerleri, hem de stator boyunduruğu akı yoğunluğu değerleri verilmiştir. Rotor için akı yoğunluğu analizi yapılmamasının nedeni her tasarım için rotor hacminin yaklaşık olarak aynı olmasından dolayıdır. Referans motor ile 3. ve 8.motor modellerine ait manyetik akı dağılımı grafikleri Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 12'de ise referans motor ile 3. ve 8.motor modellerinin demir kayıpları verilmiştir. Bu grafikler incelendiği zaman 3. motor modeli ile 8.motor modelinde, referans motora göre demir kayıplarının arttığı görülmüştür. Tablo 7'de bu üç motor için demir kayıpları; stator, rotor ve toplam demir kayıpları olmak üzere üç ayrı başlıkta verilmiştir.



a) Referans motora ait akı yoğunluğu dağılımı ((a) Flux density distribution of the reference motor)



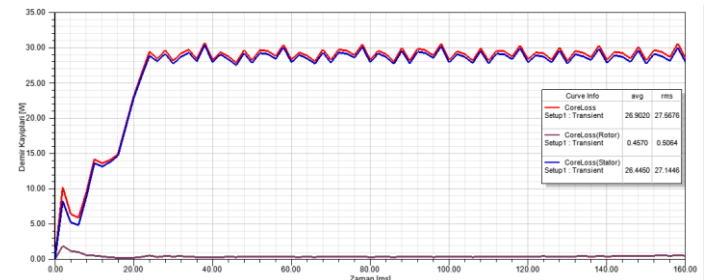
b) 3.motor modeline ait akı yoğunluğu dağılımı ((b) Flux density distribution of the 3rd motor model)



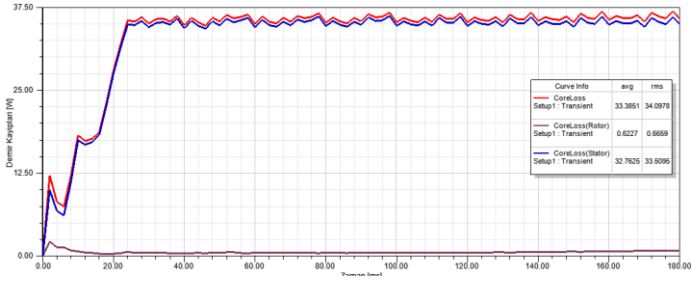
c) 8.motor modeline ait akı yoğunluğu dağılımı ((c) Flux density distribution of the 8th motor model)

Şekil 11. Akı yoğunluğu dağılımları (Figure 11. Flux density distribution)

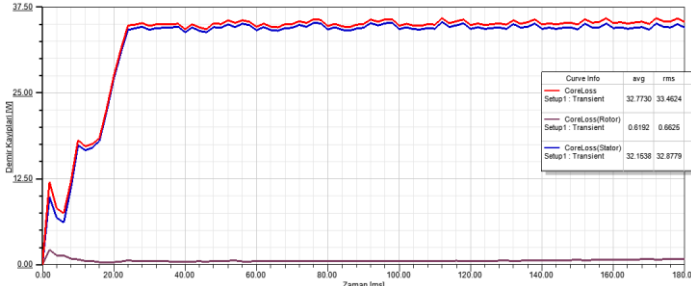
Tablo 7'de de görüldüğü gibi toroidal sarımın uygulandığı motorlarda stator demir kaybının artmasının nedeni, toroidal sarıma sahip olan motorlarda akı yoğunluğunun stator boyunduruğunda neden yüksek olduğunun açıklandığı yukarıdaki paragrafta da bahsedildiği gibi, stator demir nüvesinin hacminin azalmasından kaynaklanmaktadır. Yani toroidal sargılı 3. ve 8. motorların çıkış gücü değerlerinin, referans motorun güç değerinden yüksek bulunmasının yanında, bu güç değerlerine aynı zamanda referans motordan daha az stator demir nüve hacminde ulaşılmıştır. Ayrıca, demir kaybındaki artışa rağmen toroidal sarımın daha kısa sargı sonu uzunluğuna sahip olmasından dolayı bakır kaybındaki azalmadan dolayı verim değerleri, *Motor Modellerinin Güç ve Moment Analizleri* başlığı altında da bahsedildiği gibi, referans motorun verim değerinden daha yüksektir.



a) Referans motora ait demir kaybı ((a) Core losses of the reference motor)



b) 3.motor modeline ait demir kaybı ((b) Core losses of the 3rd motor model)



c) 8.motor modeline ait demir kaybı ((c) Core losses of the 8th motor model)

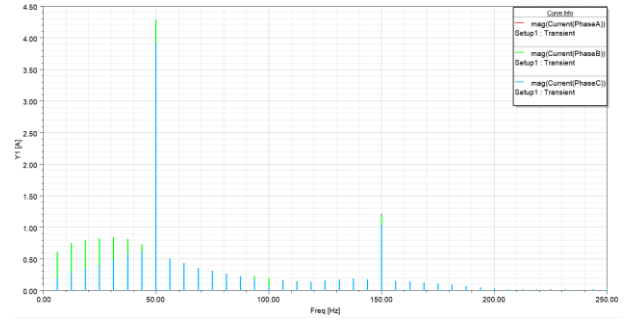
Şekil 12. Demir kayıpları (Figure 12. Core losses )

Tablo 7. Referans motor, 3.motor modeli ve 8.motor modeline ait demir kayıpları (Table 7. Core losses of the reference motor, 3rd motor model and 8th motor model)

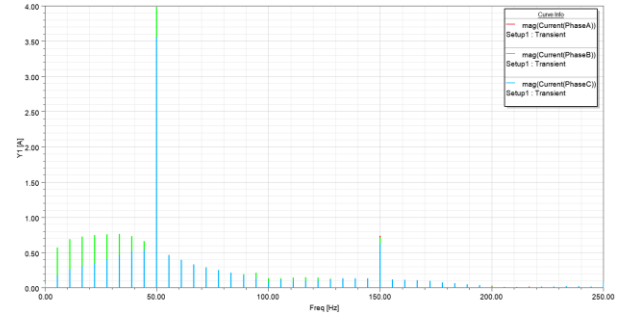
Tasarım	Stator Demir Kaybı [W]	Rotor Demir Kaybı [W]	Toplam Demir Kaybı [W]
Referans Motor	26,4450	0,4570	26,9020
3. Motor Modeli	32,7625	0,6227	33,3851
8. Motor Modeli	32,1538	0,6192	32,7730

### 3.5. Motor Modellerinin FFT Analizleri

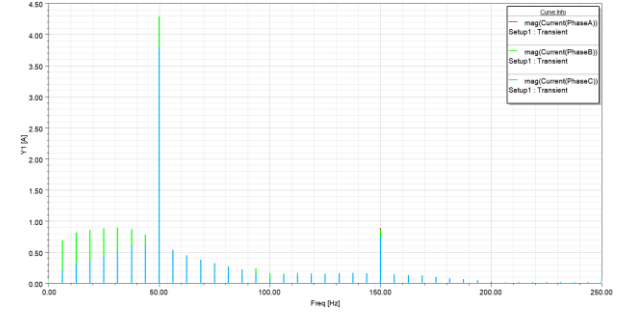
Bu çalışmada tasarlanan motor modellerinin daha sonra FFT analizleri yapılmış, akım ve endüklenen gerilimler için harmonikleri incelenmiştir. Şekil 13'de referans motor ile 3. ve 8. motor modellerine ait faz akımlarının FFT grafikleri ve Şekil 14'de de referans motor ile 3. ve 8. motor modellerinin endüklenen faz gerilimlerinin FFT grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde 3. ve 8.motor modellerinde, temel frekans ve diğer frekans değerlerinde, motorun performansına etki edebilecek yüksek bir harmonik değere rastlanmadığı görülmektedir.



a)Referans motor faz akımlarının FFT grafiği ((a) Phase current FFT spectra of the reference motor)



b) 3.motor modelinin faz akımları FFT grafiği ((b) Phase current FFT spectra of the 3rd motor model)



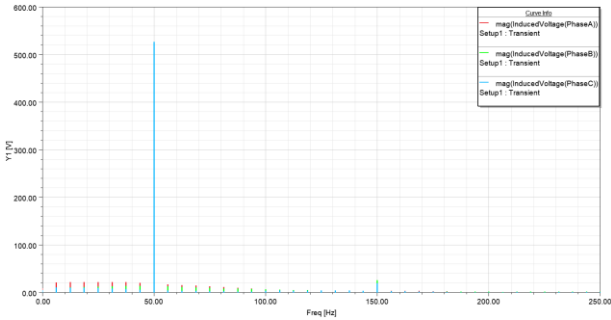
c) 8.motor modelinin faz akımları FFT grafiği ((c) Phase current FFT spectra of the 8th motor model)

Şekil 13. Faz akımları FFT grafikleri (Figure 13. Phase Current FFT spectra)

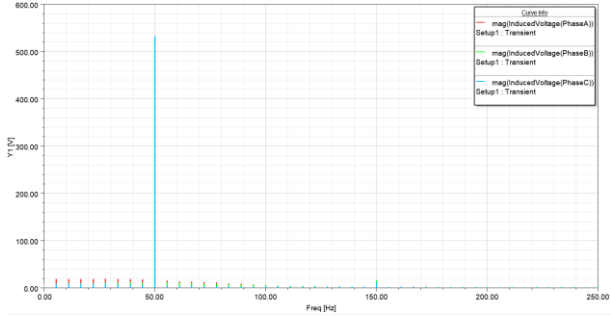
## 4. Maliyet ve Enerji Tüketim Analizi

Verim, moment ve manyetik akı yoğunluk değerleri dikkate alınarak yapılan asenkron motor tasarım optimizasyonda, 8.motor modeli, verim, demir kaybı ve moment dalgalanma miktarları açısından daha iyi sonuçları vermesine rağmen, bu optimizasyon çalışması sonucunda, toroidal sargı yapısının ana hedefi olan daha düşük değerde kaçak reaktans değerini karşılayan, bununla birlikte çıkış gücü ve moment değeri daha iyi olan 3. motor modeli daha başarılı bir motor modeli olarak seçilmiştir.

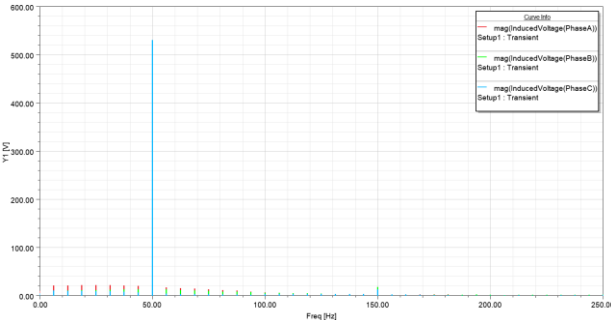




a) Referans motorun endüklenen faz gerilimleri FFT grafiği ((a) Induced phase voltage FFT spectra of the reference motor)



b) 3.motor modeli için endüklenen faz gerilimleri FFT grafiği ((b) Induced phase voltage FFT spectra of the 3rd motor model)



c) 8.motor modeli için endüklenen faz gerilimleri FFT grafiği ((c) Induced phase voltage FFT spectrum of the 8th motor model)

Şekil 14. Endüklenen faz gerilimleri FFT grafikleri (Figure 14. Induced phase voltage FFT spectra)

Referans motor ve 3.motor modelinin son olarak maliyet ve enerji tüketim değerleri açısından karşılaştırması yapılmıştır. Bakır maliyetleri açısından yapılan karşılaştırma sonuçları Tablo 8’de verilmiştir. Maliyet analizi yapılırken, motorun günlük çalışma süresi 18 saat alınmıştır. Hesaplamalarda TEİAŞ’dan (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi) alınan güncel veriler kullanılmış ve sanayi işletmeleri için birim elektrik maliyeti 65,6298 Kr/kWh olarak alınmıştır (TEİAŞ,2022) . LME (London Metal Exchange) sitesi üzerinden birim kg başına bakır maliyeti ise 85 ₺ alınmıştır (Londra Metal Borsası, 2022). 3.tasarımda kullanılan bakır miktarı 7,138 kg iken, referans motorda kullanılan bakır miktarı 6,725 kg’dır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, 3.motor modelinde % 6,14 oranında daha fazla bakır kullanıldığı görülmektedir. Daha sonra güncel bakır fiyatları referans alınarak, bu artışın maliyete yansması hesaplanmıştır. Bakırın kg fiyatı 85 ₺ alındığında, 3.motor modelinde kullanılan bakırın maliyeti 606,73 ₺ olmaktadır. Referans motor için bakır maliyeti ise 571,625 ₺’dir. Yeni motor tasarımının, kullanılan bakır miktarına göre maliyet açısından karşılaştırılması yapıldığında, 606,73-571,625=35,105 ₺ kadar referans motora göre daha pahalı olduğu görülmektedir.

Referans motor ile 3.motor modelinin aylık elektrik tüketim maliyetleri incelendiğinde; referans motor için aylık elektrik tüketim bedeli  $9329/12=777,416$  ₺ olarak ve toroidal sargılı motor için aylık elektrik tüketim bedeli  $8917/12=743,083$  ₺ olarak hesaplanmıştır. Böylece aylık elektrik tüketiminde;  $777,416-743,083=34,333$  ₺ tasarruf sağlanmıştır. Elektrik tüketiminde elde edilen bu aylık tasarrufla birlikte, 3.motor modelinin, referans motora göre alış maliyetindeki 35,105₺ olarak hesaplanan maliyet artışının, bir ay içerisinde karşılanabileceği görülmektedir.

Tablo 8. Referans motor ile 3.motor modelinin karşılaştırılması (Table 8. Comparison of the reference motor and the 3rd motor model)

Karşılaştırılan Değerler	Referans Motor	3. Motor Modeli
L(mm)	92,8	80
D <sub>i</sub> (mm)	112,4	121,1
Elektriksel Güç (W)	2163,7	2068
Yıllık Tüketim (GWh)	14,215	13,587
Yıllık Tüketim (₺)	9329	8917
Verim (%)	83,19	87,04
Moment (Nm)	8,92	9,55
Bakır Miktarı (kg)	6,725	7,138
Bakır Maliyeti (₺)	571,625	606,73
Demir Nüve Miktarı (kg)	20,8	17,014

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada 1,8 kW gücünde, üç fazlı sincap kafesli, dağıtılmış tip sargı yapısına sahip bir asenkron motorda, verimlilik sınıfının IE2’den IE4’e yükseltilmesi için, toroidal sargı yapısının kullanıldığı bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Referans motorun; sargı yapısı, ekselel uzunluk ve rotor çapı değiştirilerek sekiz farklı motor modeli oluşturulmuş ve bu modellerin Ansys Maxwell’de analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda, en iyi verim değeri, motorun ekselel uzunluğunun 80 mm olduğu 3.motor modelinde elde edilmiştir. Verim değerinde %3,85’lik, moment değerinde ise %7,06’lık artış; direnç değerinde %15,8’lik, uç bağlantı endüktans değerinde %3,13’lük ve motorda kullanılan demir nüve miktarında da %16,6’lık bir azalma; motorda kullanılan bakır miktarında ise %6,14’lük bir artış meydana gelmiştir. Bu motor modelinin daha sonra maliyet ve enerji tüketim analizleri yapılmış ve alış maliyetindeki fiyat artışının kısa sürede karşılanabildiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, toroidal sargı yapısının kullanılması durumunda motorun veriminin arttığı ve IE2 verim sınıfındaki referans motorun, IE4 verim sınıfına yaklaştığı sonucuna varılmıştır.

## Kaynakça

- Acar, Ç., Soygenç, O. C.,Ergenene, L. T., “Endüstriyel Uygulamalarda Kullanılan Asenkron Motorlarda IE2 Verim Sınıfından IE4 Verim Sınıfına Geçiş Amaçlı Bir Çalışma” Fırat Üniv. Fen Bilimleri Dergisi 30(1),59-65, 2018.
- Dorrell, D.G. “The Challenges of Meeting IE4 Efficiency Standards for Induction and Other Machines”, International Conference on Industrial Technology (ICIT '2014), Busan (South Korea), 2014, pp. 213-218.

- Energy Efficiency Office, "Report on Study on International Efficiency (IE) Efficiency Classes for Low Voltage AC Motors", 2015.
- International Energy Agency (IEA), World Energy Efficiency Outlook, Chapter 7, "Will Motors Drive Electricity Savings?", Paris, Fransa, (2016).
- Jensen, B. B., Jack, A. G. "Toroidally Wound Induction Machines", XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome.
- Jensen, B. B., Jack, A. G., Atkinson, G. J., Mecrow, B. C., "Performance of a Folded-Strip Toroidally Wound Induction Machine", IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 59, No. 5, May 2012.
- Londra Metal Borsası - Metal fiyatları  
<https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/LME-Copper#Trading+day+summary>
- Mohan, M., "A Comparative Study On Performance Of 3 kW Induction Motor With Different Shapes Of Stator Slots", International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), 2012.
- Pourmoosa A. A. and Mirsalim M., "Design Optimization, Prototyping, and Performance Evaluation of a Low-Speed Linear Induction Motor With Toroidal Winding", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 30, No. 4, December 2015.
- Sashidhar, S., Mathew, S. and Fernandes, B. G., "Novel Toroidal Winding for Efficiency Improvement of a Line-Start Induction Motor," IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2018, pp. 607-612, doi: 10.1109/IECON.2018.8591812.
- T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Verimlilik Genel Müdürlüğü, "Elektrik Motorlarında Enerji Verimliliği", Ankara, (2015).
- TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi), Enerji tüketim tarife bilgileri, 2022.  
[https://www.tedas.gov.tr/#!tedas\\_tarifeler](https://www.tedas.gov.tr/#!tedas_tarifeler)