



For different industrial applications: Outer rotor and low speed induction machine design

Hakan Çelik¹, Numan Sabit Çetin^{2*}

¹Department of Electronic and Automation, İzmir Vocational School, Dokuz Eylül University, 35390, Buca, İzmir, Türkiye

²Department of Solar Energy Institute, Ege University, 35030, Bornova, İzmir, Türkiye

Highlights:

- Outer rotor, low speed, high efficiency and torque valued induction machine design and optimization
- Analysis of outer rotor effects with different slot shapes and materials using Finite Element Method
- Achieving efficiency in IE2 and IE3 efficiency class according to IEC 60034-30-1 standard

Keywords:

- Induction machine
- Outer rotor
- Design
- Optimization
- Finite element method

Article Info:

Research Article

Received: 14.05.2021

Accepted: 25.09.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.937127

Correspondence:

Author: Numan Sabit Çetin
e-mail:
numan.sabit.cetin@ege.edu.tr
phone: +90 232 311 1222

Graphical/Tabular Abstract

Today, induction machines are used as motor and generator. Standard induction machines are generally produced with high speed and inner rotor. In this study, an outer rotor, low speed and high efficiency induction machine is designed. Analytical design, optimization and 2D Finite Element Analysis (FEA) of the machine are made using Ansys Maxwell program. Then, a 3D mechanical design is created based on the 2D machine geometry (Figure A).

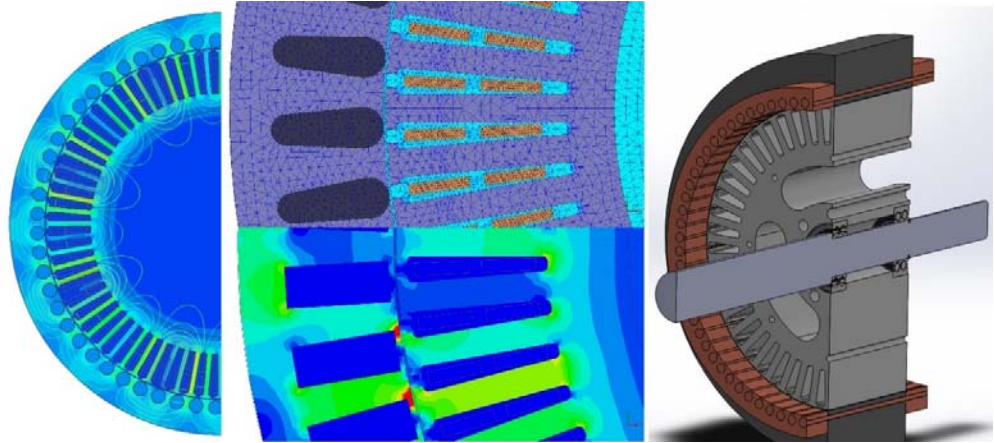


Figure A. Outer rotor induction motor mesh operation and 2D FEA

Purpose:

This study aims to design and optimize a three-phased, low-speed, high-torque and high-efficiency outer rotor induction machine to be used in different industrial applications such as motor/generator of electric vehicles, direct drive generator in wind turbine and hydroelectric applications, fan motors etc..

Theory and Methods:

Machine design, optimization and analysis of 1 kW, 16-pole, three-phase, outer rotor induction machine were performed. Three different rotor slot types, copper and aluminum cage materials and six different models were used in the design. The design, optimization and analysis of the models were carried out with Ansys Maxwell program. For maximum efficiency, stator and rotor basic sizes and slot dimensions were optimized using the RMxprt optimetrics module. The analytical models were verified using FEA and 2D electromagnetic analyzes.

Results:

As a result of the analysis of the engine area, the highest efficiency ($\% \eta = 78.38$) was obtained in the copper material with drop cage slot M3 model. Highest torque ($T_m = 27.36$ Nm), best power coefficient ($\cos \phi = 0.73$), lowest speed ($n_r = 348.99$ rpm) and efficiency ($\% \eta = 74.75$) was achieved in aluminum cage with round slot in the M2 model.

Conclusion:

The novelty of this study lies in its indication that high efficiency can be obtained with an outer rotor induction machine (ORIM) with a high pole number. It has been seen that a 16-pole 1kW ORIM can be manufactured with an efficiency above the efficiency limits of an 8-pole 1.1kW inner rotor induction machine (IRIM) of IE2 and IE3 efficiency class according to the IEC 60034-30-1 standard.



Farklı endüstriyel uygulamalar için: Dış rotorlu ve düşük devirli asenkron makine tasarımı

Hakan Çelik¹, Numan Sabit Çetin^{2*}

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 35390, Buca, İzmir, Türkiye

²Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, 35030, Bornova, İzmir, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Dış rotorlu, düşük hızlı, yüksek verim ve tork değerli asenkron makine tasarımı ve optimizasyonu
- Farklı oluk ve malzemeli dış rotor etkilerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analizi
- IEC 60034-30-1 standardına göre IE2 ve IE3 verimlik sınıfında verim elde edilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 14.05.2021

Kabul: 25.09.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.937127

Anahtar Kelimeler:

Asenkron makine,
dış rotor,
tasarım,
optimizasyon,
sonlu elemanlar yöntemi

ÖZ

Günümüzde gelişmekte olan yeni teknolojilerle birlikte asenkron makinelerin geleneksel kullanım alanlarına ek olarak motor ve generatör olarak kullanım alanları giderek genişlemektedir. Son yıllarda elektrikli taşıtlarda motor/generatör, rüzgar türbinlerinde ve mikro-hidroelektrik üretimi gibi alanlarda asenkron generatör olarak kullanımı yaygınlık kazanmıştır. Bu çalışmada dış rotorlu asenkron motor uygulamalarında ve tercihe bağlı olarak doğrudan tahrikli generatör olarak da kullanılabilir, düşük devirli ve yüksek tork değerli dış rotorlu asenkron makine tasarımı amaçlanmıştır. 16 kutuplu, 50 Hz frekanslı, 375 rpm senkron hızlı, 1 kW gücünde dış rotorlu asenkron makine tasarımı, optimizasyonu ve elektromanyetik analizi yapılmıştır. Analizler için altı farklı model geliştirilmiştir. Stator tasarımlarında tek oluk tipi ve 72 oluk, rotor tasarımıda 59 oluk ve üç farklı oluk tipi kullanılmıştır. Sincap kafesli rotor için Bakır ve Alüminyum malzeme tercih edilmiştir. Çalışma Ansys Maxwell elektromanyetik paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Rmxprt-optimetrics modülü ile en yüksek verim hedeflenerek, makine temel büyüklükleri, hava aralığı ve oluk ölçüleri optimize edilmiştir. Sonrasında Sonlu Elemanlar Yöntemi ile elektromanyetik analizleri yapılmıştır. Makinenin motor çalışma bölgesi için yapılan analizler sonucunda IEC 6003430-1'e göre, IE2 ve IE3 sınıfında 1,1 kW gücünde 8 kutuplu iç rotorlu asenkron motorların veriminin üzerinde bir verim elde edilmiştir. Bu sonuca göre dış rotorlu, düşük devirli ve yüksek torklu asenkron makine üretilebileceği ve motor olarak kullanılabilirliği görülmüştür.

For different industrial applications: Outer rotor and low speed induction machine design

H I G H L I G H T S

- Outer rotor, low speed, high efficiency and torque valued induction machine design and optimization
- Analysis of outer rotor effects with different slot shapes and materials using Finite Element Method
- Achieving efficiency in IE2 and IE3 efficiency class according to IEC 60034-30-1 standard

Article Info

Research Article

Received: 14.05.2021

Accepted: 25.09.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.937127

Keywords:

Induction machine,
outer rotor,
design,
optimization,
finite element
method

ABSTRACT

Today, with the developing new technologies, in addition to the traditional usage areas of asynchronous machines, their usage areas as motors and generators are gradually expanding. In recent years, the use of induction generator in areas such as motor/generator in electric vehicles, wind turbines and micro-hydroelectric generation has started to widespread. This study aims to design a low-speed and high-torque outer rotor induction machine that can be used in outer rotor induction motor applications and optionally as a direct-drive generator. The design, optimization and electromagnetic analysis of a 16-pole, 50 Hz frequency, 375 rpm synchronous speed, 1 kW outer rotor induction machine were carried out and six different models were developed for the analyses in this study. One slot type and 72 slot were used in the stator designs, 59 slot and three different slot types were used in the rotor design. Copper and Aluminum materials were preferred for the squirrel cage rotor and the study was carried out with the Ansys Maxwell electromagnetic package program. In the study, machine foundation sizes, air gap and slot dimensions were optimized to obtain the highest efficiency using the Rmxprt-optimetrics module. Afterwards, electromagnetic analyzes were performed using the Finite Element Method. As a result of the analyzes made for the motor operating area of the machine, an efficiency higher than the efficiency of 8-pole inner rotor asynchronous motors with 1.1 kW power in IE2 and IE3 classes according to IEC 60034-30-1 was obtained. According to this result, it was found that an outer rotor, low speed and high torque induction machine can be produced and used as a motor.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : hakan.celik@deu.edu.tr, numan.sabit.cetin@ege.edu.tr / Tel: +90 232 311 1222

1. Giriş (Introduction)

Yüz yılı aşan bir geçmişe sahip olan asenkron makineler günümüzde popüleritesini arttırarak varlığını sürdürmektedir. Kullanım alanları giderek genişlemekte olan asenkron makineler, endüstrinin birçok alanında yoğun bir şekilde motor ve generatör olarak kullanılmaktadır. Asenkron makineler yapısal olarak stator ve rotorun konumuna göre; İç Rotorlu Asenkron Makineler (İRAMAK) ve Dış Rotorlu Asenkron Makineler (DRAMAK) olarak iki şekilde imal edilmektedirler. Bu çalışmada DRAMAK üzerine yapılan çalışmalara odaklanılmış ve yeni bir DRAMAK modeli sunulmuştur. Üç fazlı sincap kafesli asenkron motorlar, düşük maliyetli, uygulama kolaylığı, esneklik ve zorlu ortamlarda güvenilirliği nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılan sağlam bir makinedir [1, 2]. Günümüzde geleneksel İç Rotorlu Asenkron Motorlar (İRAM) birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Dış Rotorlu Asenkron Motorlar (DRAM) ise ağırlıklı olarak soğutma amaçlı bir fazlı fan motorlarında kullanılmakta ve son yıllarda elektrikli taşıtlar için yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir.

DRAM'ın en eski ve bilinen kullanım alanı tavan soğutma fanlarıdır. Lenin vd. [3] tavan fanlarının dünü bugünü ve geleceği detaylı bir şekilde incelemiştir. DRAM'lar genellikle büyük çaplı ve kısa eksenel uzunluğa sahip makinelerdir. Düşük maliyetli olmalarının yanı sıra yüksek kayma ile çalışırlar ve performansları düşüktür. Rotoru dışarda dönmelerinin yüksek atalet ve değişken yükte yüksek stabiliteye sahip olmasını sağlar [4]. Genellikle bir fazlı olarak kullanılan fanların verimleri %25 civarındadır [5]. Bu durum önemli bir enerji kaybına neden olmaktadır ve bu konuda literatür de farklı tasarımlar ve topolojiler önerilmiştir. DRAM'un verimlilik, güç faktörü, giriş gücü, çıkış performansı, güç ve başlangıç torku performansını arttırmak amacıyla literatürdeki mevcut teorileri kullanarak performans hesaplamaları yapılmıştır [6]. Motorun kalkış torkunda iyileştirmeler sağlamak amacıyla, dış rotor üzerine metal bir kutu eklenerek rotor empedans değeri artırılmış ve kalkış torkunda iyileştirmeler sağlanmıştır [7]. Gyorg vd. DRAM ile ilgili bir dizi çalışma yapmıştır. Soğutma fanı olarak kullanılan bir DRAM için Genetik Algoritma tabanlı bir tasarım yaklaşımı ile makinenin verimliliği ve güç faktörü iyileştirilmiştir [8]. Evrimsel optimizasyon tekniği ile tam yük torku, makine kütlesi ve elektrik verimliliği artırılmıştır [9]. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak makinenin stator ve rotor kayıpları azaltılmıştır [10]. DRAM'da statik dönüştürücü kullanmadan farklı senkron hızlar elde edilebilmesi amacıyla stator yapısında halka sargı kullanılmış ve uygulanabilirliği gösterilmiştir [11]. Stator sargılarıyla ilgili başka bir çalışmada DRAM'larda yüksek tork yoğunluğu sağlayan, sargı uç uzunluğunu kısaltan ve hava aralığındaki harmonik seviyesini düşüren Kesirli Oluklu Konsantre Sargı tekniği önerilmiştir [12]. DRAM'ın elektrikli araç ve çekiş sistemlerinde uygulanabilmesi için farklı çalışmalar yapılmıştır. Elektrikli araçlar için diğer farklı motor türlerinin dezavantajlarını ortadan kaldırmak amacıyla Dalal vd. [13] faklı motor yapılarını ve dış rotor kavramını tartışarak çift rotorlu yeni bir model önermişlerdir. Tekerden çekişli sistemlerde DRAM sıklıkla kullanılır ve tekerlek içine monte edilir [14]. Sabit miktatsız senkron motora kıyasla asenkron motorun daha düşük manyetik akı yoğunluğu nedeniyle, yüksek güç yoğunluğuna ulaşmak zordur [15]. Bu sorunu aşmak için Cha vd. [16], elektrikli araç çekiş sistemleri için yüksek güç yoğunluğuna sahip DRAM'un optimal tasarımı yapmışlardır. Rotor

kafes yapılarında Bakır (Cu) kullanımı elektriksel iletkenlik, daha yüksek mekanik mukavemet ve daha iyi termal özellikleri ile Alüminyum (Al) kafese göre avantajlar sağlamaktadır [17]. Leonard vd. [18, 19] yaptıkları çalışmalarda, yüksek devirli, yüksek torklu dış rotorlu asenkron generatörler (DRAG), dahlender sargılı halka stator sargısı ile birlikte çekiş ve uçuş sistemleri için yüksek devirli ve yüksek torklu özel bir makinenin tasarımını ve SEY ile analizini yapmıştır. Hwang vd. [20] düşük hızlı ve yüksek torklu bir DRAM tasarımı hedefleyerek faklı kutup sayılarında geliştirilen modeller önermiş ve elektromanyetik analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

İç rotorlu asenkron generatörler (İRAG) yaygın olarak kullanılmakta olup, DRAG üzerine yapılan çalışmalar çok sınırlıdır. Henriksen ve Jensen [21], dış rotorlu doğrudan tahrikli (Direct Drive-DD) 3MW gücünde ve 15 rpm ile çalışan DRAG için geliştirdikleri model üzerinde elektromanyetik analizler yapmışlardır. Bu çalışmalarının sonucunda DRAG'ün sabit miktatsız ve çıkık kutuplu senkron generatörlere göre iyi bir seçenek oluşturabileceğini ifade etmişlerdir. Başka bir çalışmada küçük güçlü rüzgar türbinleri için dış rotorlu çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) modeli geliştirilerek 2D ve 3D olarak SEY ile analizlerini yapmışlar [22]. Bu çalışmada 50 Hz frekanslı, 16 kutuplu, 375 rpm senkron hızlı ve yüksek tork değerli üç fazlı DRAMAK modeli geliştirilmiş, makinenin boyu (L), çapı (D) ve stator-rotor oluk optimizasyonu ile birlikte SEY analizi yapılmıştır. Önerilen DRAMAK tasarımı farklı endüstriyel uygulamalarda ve elektrikli taşıtlarda DRAM olarak, küçük güçlü rüzgar türbinleri ile hidro-türbinlerde doğrudan tahrikli DRAG olarak kullanılabilir. Kullanım amacına göre gerekli değişiklikler yapılarak yeni sistemlere adapte edilebilecektir. Önerilen asenkron makinenin literatüre önemli ve inovatif bir katkı yapacağı düşünülmektedir. Asenkron makineler senkron hızın altında motor, senkron hızın üzerinde çalıştırıldıklarında generatör bölgesinde çalışmaktadır. Bu çalışmada DRAMAK'nın motor bölgesinde çalıştığı kabul edilmiş ve motor bölgesi analizleri yapılmıştır. Asenkron motorlarda kutup sayısı arttıkça verim düşüğü bilinmektedir [23]. Bu nedenle standart İRAM'lar en fazla 8 kutuplu olarak imal edilmektedirler. Bununla birlikte gerek 16 kutuplu İRAM ve DRAM için tanımlanmış bir üretim standardı bulunmamaktadır. Tablo 1'de, IEC 60034-30-1'e göre standart kafesli asenkron motorlar için kutup sayısı ve belirlenen minimum verim ilişkisi görülmektedir. Burada; IE1 standart verimli, IE2 yüksek verimli, IE3 çok yüksek verimli, IE4 süper çok yüksek verimli motorlar olarak tanımlanmıştır [24]. Çalışma sonuçları, IEC 60034-30-1 standardı baz alınarak, en yakın örnek olan 1,1 kW'lık 8 kutuplu İRAM ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

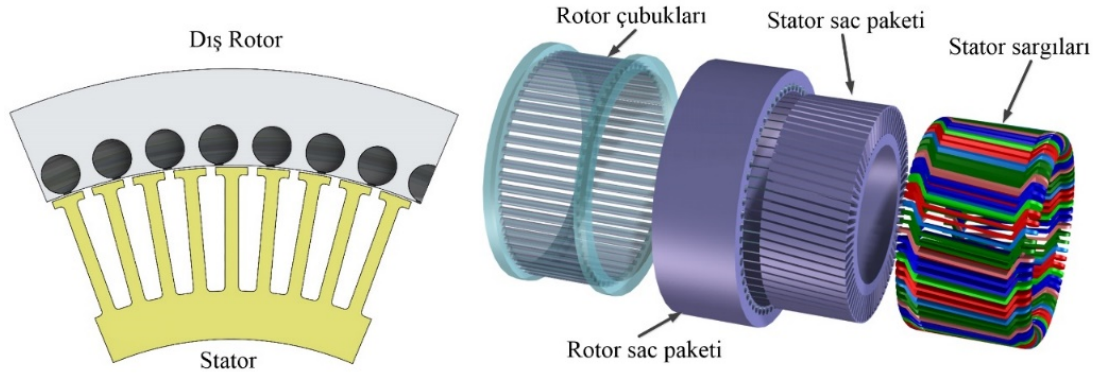
2. Dramak ve Tasarım Süreci (Outer Rotor Induction Machine and Design Process)

2.1. DRAMAK'nın yapısal özellikleri (Structural properties of outer rotor induction machine)

Geleneksel İRAMAK'larda stator dışta ve rotor içte yer alır. DRAMAK'da rotor, statoru tamamen çevreleyecek şekilde dışta yer alır (Şekil 1). Dış rotorlu tasarımın amacı ataleti ve rotor zaman sabitini arttırmaktır. DRAMAK tasarımında İRAMAK'lara göre 8-10 katına varan oranda atalet artışı söz konusudur [25]. DRAMAK'lar daha yüksek atalet, basitleştirilmiş stator sargı teknolojileri ve kısaltılmış sargı uçları nedeniyle farklı yüklerde daha yüksek bir

Tablo 1. IEC 60034-30-1'e göre üç fazlı kafesli indüksiyon motorları verimlilik sınıfları (50 Hz)
(Classes of three-phase cage induction motors 50 Hz according to IEC 60034-30-1)

Anma Gücü (kW)	IEC verimlilik sınıfı	Verim (%)			
		2 Kutup	4 Kutup	6 Kutup	8 Kutup
1,1	IE1	75	75	72,9	66,5
1,1	IE2	79,6	81,4	78,1	70,8
1,1	IE3	82,7	84,1	81,0	77,7
1,1	IE4	85,2	87,2	84,5	80,8



Şekil 1. DRAMAK, stator ve rotor görünüşü (M1) (Outer rotor induction machine, stator and rotor view M1)

kararlılığa izin verdiği için bazen küçük güç oranlarında daha avantajlı hale gelir. DRAMAK üretimi İRAMAK üretiminden daha zordur, ancak önemli avantajları vardır: fan uygulamalarında kanatlar doğrudan rotorun dışına takılabilir ve bu da makineyi daha kompakt hale getirir. Rotor içinde büyük oranda ısı üretilir, rotor dışarıda olduğu için daha kolay dağıtılabilir. DRAMAK standart İRAMAK'ya göre daha kompakt bir tasarıma izin veren daha geniş bir hava boşluğu yüzeyine sahiptir [26].

2.2. Tasarım ve Temel Boyutlandırılmalar (Design and Basic Dimensions)

DRAMAK tasarımı ile asenkron motor tasarım süreçleri benzerlik taşımaktadır. Tüm elektrikli makinelerde olduğu gibi, DRAMAK tasarım süreci çıkış katsayısı D^2L 'nin hesaplanmasıyla başlar. Burada D (m) stator hava boşluğu çapını, L (m) ise manyetik paketin boyunu gösterir. DRAMAK da rotor dışta yer aldığından hava aralığı rotor iç çapı (D_{ir}) ile hesaplanır. Tasarıma, hava boşluğu görünür gücü (S_{gap}) hesaplanarak başlanır. Hava aralığı görünür gücü, hava aralığı EMK değeri (E_1) ve üç faz stator faz akımı nominal değeri çarpımı ile hesaplanır (Eş. 1).

$$S_{gap} = 3E_1I_1 \quad (1)$$

Giriş görünür gücü Eş. 2 ile ifade edilir;

$$S_n = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 = \frac{P_n}{\eta_n \cos \phi_1} \quad (2)$$

E_1 hava aralığı kutup akısının bir fonksiyonu olarak yazılabilir (Eş. 3).

$$E_1 = 4 \cdot f_1 \cdot K_f \cdot W_1 \cdot K_{w1} \cdot \phi \quad (3)$$

Burada f_1 stator gerilimi frekansı, K_f dişlerdeki doyuma bağlı olarak $1,11 > K_f > 1,02$ aralığında değişen şekil faktörü, W_1 faz başına sarım sayısı, K_{w1} sargı faktörü ve ϕ kutup akısıdır. Eş. 4'de, α_i dişlerdeki manyetik doygunluğa bağlı akı yoğunluğu şekil faktörü, B_g hava aralığı akı yoğunluğudur [27]. Kutup adımı (τ) ve senkron hız (n_s) sırasıyla Eş. 5 ve Eş. 6 da verilmiştir.

$$\phi = \alpha_i \cdot \tau \cdot L \cdot B_g \quad (4)$$

$$\tau = \frac{\pi D_{ir}}{2p} \quad (5)$$

$$n_s = \frac{f_1 \cdot 60}{p} \quad (6)$$

Bu ifadelerin sonucunda hava aralığı görünür gücü (S_{gap}) yeniden düzenlenirse Eş. 7 elde edilir.

$$S_{gap} = K_f \alpha_i K_{w1} \pi^2 D_{is}^2 L \frac{n_1}{60} A_1 B_{av} \quad (7)$$

Burada A_1 (a.c/m) spesifik elektrik yükü ve B_{av} (T) spesifik manyetik yükü göstermektedir (Eş. 8 ve Eş. 9). Her iki değer de tasarım açısından dikkate alınması gereken önemli bir parametredir.

$$A_1 = \frac{6W_1 I_1}{\pi D_{ir}} \quad (8)$$

$$B_{av} = \frac{\phi}{\alpha_i \cdot \tau \cdot L} \quad (9)$$

Hacim kullanım faktörünü C_0 (Esson sabiti) Eş. 10 ile ifade edilebilir,

$$C_0 = K_f \cdot \alpha_i \cdot K_{w1} \cdot \pi^2 \cdot A_1 B_{av} = \frac{60 S_{gap}}{D_{is}^2 \cdot L \cdot n_s} \quad (10)$$

C_0 , (kVA.min/m³) makinenin birim hacminden bir dakikada alınabilecek enerjiyi verir. Bir anlamda malzemeden ne kadar faydalandığının ölçüsüdür [27].

D^2L çıkış katsayısı Eş. 1, Eş. 2 ve Eş. 9 kullanılarak yeniden düzenlenirse Eş. 11 elde edilir.

$$D_{ir}^2 L = \frac{1}{C_0} \frac{60}{n_s} \frac{K_E P_n}{\eta_n \cos \phi_{s_n}} \quad (11)$$

Paket oranı (λ), paket boyunun kutup adımına oranı ile elde edilir (Eş. 12).

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \quad (12)$$

λ 'nın hesaplamasında belirli kabullerden yararlanılır. λ değeri için; (1,5-2) minimum maliyet, (1,0-1,5) minimum güç faktörü, 1,5 en iyi verim ve 1,0 olması dengeli tasarımı gösterir [23].

Eş. 11 ve Eş. 12 kullanılarak stator (rotor) delik çapı Eş. 13 ile ifade edilir.

$$D_{ir} = \sqrt[3]{\frac{2p_1}{\pi \lambda} \frac{1}{C_0} \frac{p_1}{f_1} \frac{K_E P_n}{\eta_n \cos \phi_1}} \quad (13)$$

Bu formül stator iç çapının hesaplanmasına yardımcı olur, stator dış çapını ve makinenin toplam hacmini hesaplamak için geçmiş tecrübelerden yararlanılarak oluşturulmuş Tablo 2'den yararlanılır [27]. Bunlara ek olarak Demir ve Aküner [28] yaptıkları çalışmada, "nominal moment, maksimum moment, kalkış momenti, güç faktörü, nominal devri ve verim faktörleri için kritik parametrelerin; kutup sayısı, giriş gerilimi, frekans, iletken sayısı, teldeki damar sayısı ve tel çapı olduğunu" belirtmiştir.

2.3. Stator tasarımı (Stator design)

Stator üzerinde üç fazlı döner manyetik alanı oluşturacak şekilde sargılar yer alır. Bu sargılar stator üzerine açılmış olan oluklara yerleştirilirler. Stator oluklarının şekli, kullanılan manyetik malzeme ve oluk doluluk oranları motor performansı üzerinde etkilidir. Stator sac paket yapısı nüve kayıplarını azaltmak amacıyla 0,35 ve 0,50 mm kalınlığında laminasyonların paketlenmesinden meydana gelir. Stator tasarımına stator oluk sayısının seçimi ile başlanır. Stator oluklarının yarı kapalı stator oluk seçimi yüksek tork ve verimlilik sağlamak için sıklıkla kullanılır [29]. Seçilen oluk sayısı üç fazlı sargıların simetrik olarak yerleştirilmesine ve gerekli döner alanın oluşmasını sağlayacak şekilde olmalıdır. Buna göre, stator oluk sayısı 16 kutuplu döner alan oluşturabilecek şekilde 72 oluk olarak seçilmiştir. İki tabakalı sargılarda sargı adımında kısaltma yapıldığında harmoniklerin azaldığı görülmüştür. Stator ve rotor dişlerinde manyetik akı yoğunluğu manyetik doyuma neden olmaması için 1,4 – 1,7 (T) aralığında olması tavsiye edilir [23]. Sargı faktörü (K_w), dağıtım katsayısı (K_q) ve bobin adım katsayısı (K_y) kullanılarak hesaplanır (Eş. 14).

$$K_w = K_q \cdot K_y \quad (14)$$

Burada K_q sargı dağıtım, K_y bobin adım katsayısını ifade eder. Stator ve rotor sargı hesaplamalarının, oluk ölçülerinin (Şekil 2) ve sırt yüksekliğinin detaylı hesaplamalarında; Hamdi [23], Boldea [27] ve Lipo [30]'dan yararlanılmıştır.

2.4. Hava aralığı uzunluğu (Air gap size)

Hava aralığı uzunluğu (g) performans karakteristikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Uzun hava aralığı güç faktöründe ve verimde azalmaya neden olurken, mıknatıslanma akımını ve stator bakır kayıplarını arttırmaktadır. Bununla birlikte daha kısa hava aralığı oluklarda yüksek Eddy akımı kayıplarına ve oluk harmoniklerine neden olmaktadır. Bu nedenle daha iyi bir performans elde etmek için hava aralığı seçiminde dikkatli davranılmalıdır [31]. Lipo, [30] hava aralığı uzunluğu seçiminde 2-16 kutuplu makineler için Eş. 15'deki ampirik formülü önerilmiştir.

$$g = 3 \cdot 10^{-3} \left(\sqrt{\frac{p}{2}} \right) \tau_p \quad (15)$$

2.5. Dış rotor tasarımı (Outer rotor design)

Rotor tasarımında en önemli kararlardan birisi rotor oluk sayısının seçimidir. Stator ve rotor oluk kombinasyonunun uyumlu olması motor performansı üzerinde etkili olmaktadır. Farklı oluk kombinasyonları, döner manyetik alanın farklı dalga biçimlerinde oluşmasına neden olur ve bu nedenle, stator ve rotor akımlarında farklı harmonikler üretir. Akımlarında meydana gelen yüksek harmoniklerin etkilerinden birisi de ek ısı kayıplarıdır. Ayrıca istenmeyen parazitik yani titreşimli elektromanyetik torklar meydana gelir. Yanlış oluk kombinasyonu seçimi; gürültü, makine gövdesinde titreşim, tork-hız eğrisinde sapmalar gibi sorunlara neden olabilmektedir [32].

Rotor oluk sayısının belirlenmesinde bazı kurallar önerilmiştir. Aşağıda açıklanan bu kurallar doğru oluk seçiminde yardımcı olmaktadır.

- Rotor oluk sayısı (S_r), stator oluk sayısından (S_s) % 15 ila % 30 daha fazla veya daha az olmalıdır.
- Senkron çakışmalardan kaçınmak için $(S_s - S_r), \pm p, \pm 2p$ veya $\pm 5p$ 'ye eşit olmamalıdır.
- Manyetik kilitlemeyi önlemek için $(S_s - S_r), \pm 3p$ 'ye eşit olmamalıdır.
- Titreşim ve gürültüyü önlemek için $(S_s - S_r), \pm 1, \pm 2, \pm (p \pm 1), \pm (p \pm 2)$ 'ye eşit olmamalıdır [33].

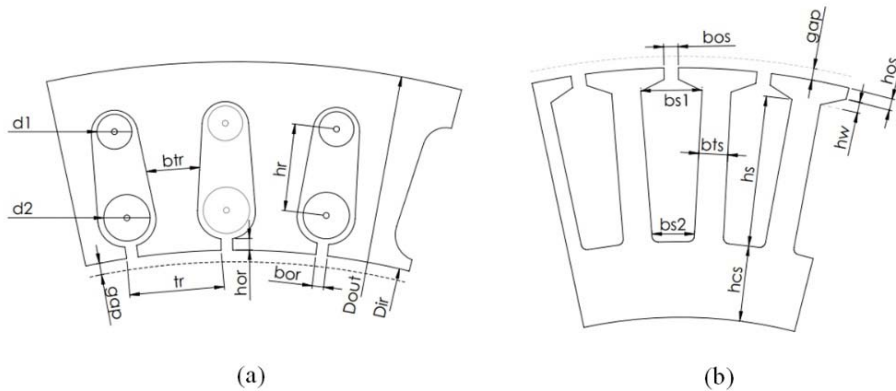
Bazı kaynaklarda [27, 29], 2-12 kutup sayısına kadar olan makine tasarımları için tecrübelerle elde edilmiş ve standartlaşmış stator-rotor oluk kombinasyonlarına yer verilmekle birlikte 16 kutuplu makineler için belirli bir kombinasyon bulunmamaktadır. Bu çalışmada öncelikle stator oluk sayısı (72) belirlenmiş ve rotor oluk sayısı için [33]'de özetlenen kurallara çerçevesinde motorun tork-zaman eğrisinde minimum titreşim sağlayan (59) oluk sayısı seçilmiştir. Yapılan çalışmalarda, farklı rotor oluk sayıları seçilmesi durumunda motorun tork-hız eğrisi üzerinde aşırı bir titreşim oluştuğu görülmüştür.

2.6. Eşdeğer Devre ve Motor Bölgesi Çalışması (Equivalent Circuit and Motor Region Operation)

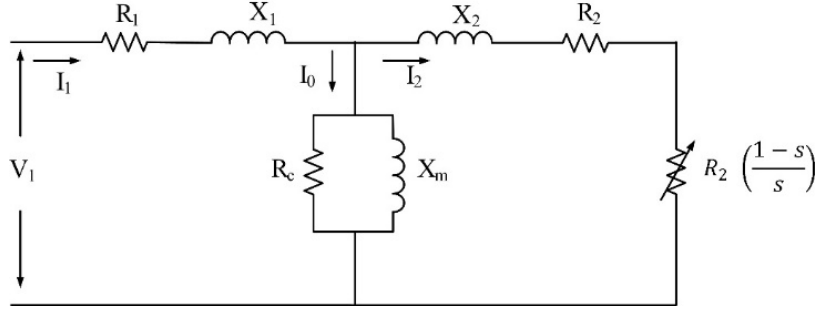
Asenkron makinanın, motor bölgesinde çalışmasının analizinde bir fazlı eşdeğer devre modelinden yararlanılır. DRAM eşdeğer devre modeli Şekil 3'de görülmektedir. Şekilde, R_1 ve R_2 stator ve rotor

Tablo 2. Dış ve iç çap oranları (Outer and inner diameter ratios)

2p	2	4	6	8	≥ 10
D_{out} / D_{is}	1,65-1,69	1,46-1,49	1,37-1,40	1,27-1,30	1,24-1,26



Şekil 2. Dış rotor ve stator oluk şekli (Outer rotor and stator slot shape)



Şekil 3. DRAM'un bir faz eşdeğer devresi (Outer rotor induction motor one phase equivalent circuit)

direncini (Ω), X_1 ve X_2 stator ve rotor kaçak reaktansını (Ω), R_c (Ω) boş çalışmada nüve kayıplarını, X_m (Ω) mıknatıslanma reaktansını göstermektedir. Eşdeğer devre parametreleri kullanılarak motorun çalışma değerleri ve performansı hesaplanır.

Motorun boş çalışma akımı (I_0), aktif (I_c) ve reaktif (I_m) iki bileşenden meydana gelir. Boş çalışmada nüve kayıpları küçük olduğu için I_c ihmal edilebilir. Bu durumda boşta çekilen akım mıknatıslanma akımı (I_m) olarak kabul edilir. Motor şebekeden yükte çektiği bir faz akımı (I_1) Eş. 16 ile hesaplanır. Burada (V_1) ve (Z_e) bir faz gerilimi ve eşdeğer devre empedansını göstermektedir.

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_e} \quad (16)$$

Kayma motorun senkron hızı (n_s) ve rotor hızı (n_r) arasındaki farkın bir oranıdır ve yüzde olarak ifade edilir (Eş. 17). Maksimum kayma, çalışma esnasında meydana gelen en yüksek kayma değeridir (Eş. 18).

$$\%s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \quad (17)$$

$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (18)$$

Motorda indüklenen tork Eş. 19 ile hesaplanır. Yol alma anında motor, kilitli rotorlu gibi davranır ve kayma $s=1$ 'dir. Bu anda oluşan tork başlangıç torku olarak isimlendirilir ve Eş. 19'da $s=1$ yazılarak hesaplanır. Motorda oluşan maksimum tork (devrilme) Eş. 20 ile hesaplanır. Eşitliklerde, (ω_s) senkron hızı, V_{th} , R_{th} ve X_{th} sırasıyla Thevenin gerilim, direnç ve reaktans değerlerini gösterir [34].

$$T_{ind} = \frac{3V_{th}^2 \frac{R_2}{s}}{\omega_s \left[\sqrt{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{th} + X_2)^2} \right]} \quad (19)$$

$$T_{max} = \frac{3V_{th}^2}{2\omega_s \left[R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2} \right]} \quad (20)$$

Motorda meydana gelen kayıplar, stator ve rotor bakır kayıpları ($P_{scu} + P_{rcu}$), boş çalışma mekanik kayıpları ($P_{W\&M}$), nüve kayıpları (P_{fe}) ve ek kayıplardan (P_{stray}) meydana gelir (Eş. 21).

$$P_k = P_{cu} + P_0 + P_{W\&M} + P_{stray} \quad (21)$$

Motor, giriş gücü Eş. 22 ve çıkış gücü Eş. 23 ile verim Eş. 24 ile hesaplanır. Motor giriş gücü bilindiğinde aynı zamanda güç faktörü ($\cos\phi$) de hesaplanabilir (Eş. 25).

$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos\phi \quad (22)$$

$$P_{out} = T_{ind} \cdot \omega_m \quad (23)$$

2014

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in} + P_{out}} \times 100 \quad (24)$$

$$\cos\phi = \frac{P_{in}}{3V_1 I_1} \quad (25)$$

3. Model Oluşturma, Optimizasyon ve Analiz (Creating Model Optimization and Analysis)

3.1. Model oluşturma (Creating the model)

Sincap kafesli DRAMAK tasarımına motor bölgesinde çalışma koşulları ve temel büyüklükleri belirlenerek başlanmıştır (Tablo 3). Makinanın; üç fazlı, çıkış gücü 1 kW, çalışma frekansı 50 Hz, çalışma gerilimi $V_n=380$ V, Y bağlı, 16 kutuplu, nominal yükte verim %70, faz açısı $\cos\phi=0,7$ olması hedeflenmiştir. Analitik tasarım ve hesaplamalar Ansys Maxwell programının RMxprt modülü ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. DRAM tasarım başlangıç özellikleri (ORIM design initial features)

Motor Gücü (kW)	1
Kutup Sayısı (2p)	16
Frekans (Hz)	50
Senkron Hızı (rpm)	375
Çalışma Gerilimi (V)	380 V / Y
Faz açısı ($\cos\phi$)	0,7
Verim (η)	% 70
Stator oluk sayısı (S_s)	72
Rotor oluk sayısı (S_r)	59

Rotor oluk geometrisinin ve rotor kafes malzemesinin motor performansı üzerindeki etkilerinin araştırılması için tasarımda altı farklı model oluşturulmuştur (Şekil 4a). Rotor sincap kafes yapısı için Bakır (Cu) ve Alüminyum (Al) malzeme kullanılmıştır. Model oluk tipi, kafes malzemesi, isimlendirmeleri ve kısaltmaları Tablo 4'de görülmektedir. Stator da tüm modellerde damla (Tip II) oluk şekli kullanılmıştır. Rotorda, yuvarlak (Tip I), damla (Tip II) ve dikdörtgen (Tip III) olmak üzere, üç farklı oluk şekli seçilmiştir. Model sayısı ve özellikleri belirlendikten sonra analitik tasarım, optimizasyon ve elektromanyetik analiz süreçlerine geçilmiştir (Şekil 4).

Tablo 4. Modeller ve özellikleri (Models and features)

Model	Kısaltma	Oluk tipi	Oluk şekli	Kafes malzemesi
Model 1	M1	Tip I	Yuvarlak	(Cu)
Model 2	M2	Tip I	Yuvarlak	(Al)
Model 3	M3	Tip II	Damla	(Cu)
Model 4	M4	Tip II	Damla	(Al)
Model 5	M5	Tip III	Dikdörtgen	(Cu)
Model 6	M6	Tip III	Dikdörtgen	(Al)

DRAMAK modelini oluşturmak için Ansys Maxwell programının RMXprt modülü için uygun makine modeli seçilmiştir. Başlangıç belirlenen tasarım kriterleri doğrultusunda modeller oluşturulmuştur (Şekil 4a). Daha sonra tasarım, optimizasyon ve analiz süreci her bir model için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu işlem süreçleri Şekil 4b’de görülmektedir.

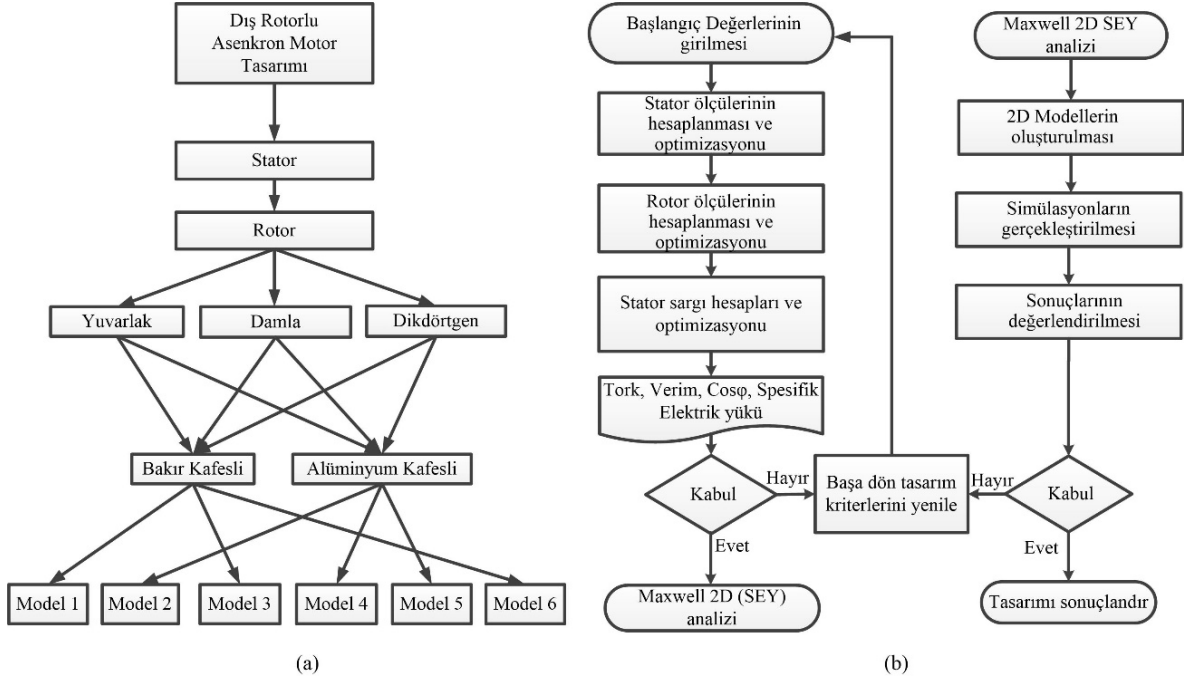
3.2. Optimizasyon (Optimization)

Optimizasyon aşamaları RMXprt içinde yer alan “Optimetrics” yazılımı kullanılarak, parametrik optimizasyon şeklinde gerçekleştirilmiştir. Optimizasyonlar her aşamada motorun en yüksek verimi hedeflenerek yapılmıştır. Birinci aşamada DRAMAK’nın stator ve rotor iç çap (D_{is} , D_{ir}), dış çap (D_{os}), ($D_{or}=D_{out}$) ve paket boyu (L) ve hava aralığı (g) gibi başlıca boyutları optimize edilmiştir. M1’e ait rotor iç çap (D_{ir}) değerine bağlı hava aralığı radyal uzunluğu değişiminin verimle ilişkisini gösteren optimizasyon eğrisi Şekil 5’de görülmektedir. İkinci aşamada stator ve rotor, oluk üst genişliği (b_1), oluk alt genişliği (b_2), oluk yüksekliği (h_{os} , h_s) gibi değerler optimize edilmiştir. Daha sonra iletken sayısı ve iletken kesitleri oluk doluluk limitleri gözetilerek hesaplanmıştır. Hesaplamalarda verim (η), tork (T_m), faz açısı ($\cos\phi$), spesifik elektrik (A_i) ve manyetik (B_{av})

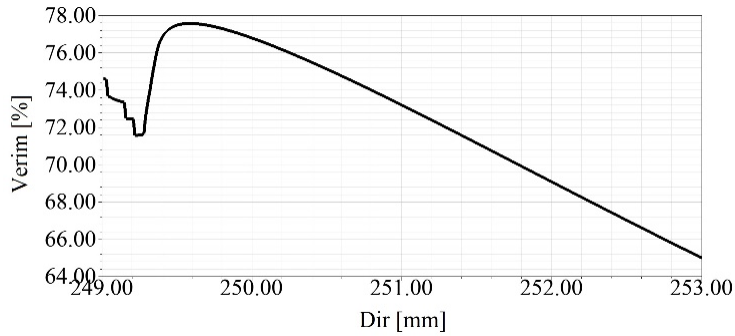
yüklerinin, stator ve rotor dış manyetik akı yoğunluklarının (B_{ts} , B_{tr}) kabul edilebilir sınırlar içinde ve verimin en yüksek noktada olduğu durumda geometrik ölçüler kesinleştirilmiştir (Tablo 5 ve Tablo 6). Son aşamada geometrik modelin doğrulanması için SEY ile 2D analize geçilmiştir.

3.1.1. Malzeme seçimi (Material selection)

Demir çekirdeği oluşturan sac malzeme seçilirken en iyi kalite sac malzemesi ile maliyeti arasında optimizasyon yapılması gerekmektedir. İyi kalite sac malzemesi kaybı düşük olan ve mümkün olan en az manyetik alan şiddetinde en büyük manyetik akı yoğunluğu oluşturan sac malzemesi olarak tanımlanabilir [35]. Bu durum dikkate alınarak stator ve rotor nüvesinde 0,5 mm² kalınlığında M530-50A silisli çelik sacdan elde edilen laminasyonlar kullanılmıştır. M530-50A sacının seçiminde, manyetik geçirgenlik, maliyet avantajı, sacın temin edilebilme kolaylığı ve elektrik makineleri tasarımında yaygın olarak kullanımı gibi hususlar dikkate alınmıştır. M530-50A’nın, 50 Hz’de, B-H eğrisi Şekil 6’da görülmektedir. $B=1,5$ (T) değerinde; $H=551$ A/m, $P_{fe}=4,53$ W/kg’dır. $B=1,5$ (T) değerinden sonra manyetik akı yoğunluğu eğrisinde doğrusallığın kaybolduğu ve manyetik doyum bölgesinin başladığı görülmektedir.



Şekil 4. a) Modellerin oluşturulma şeması, b) Tasarım ve optimizasyon akış şeması (a-Creation scheme of models, b- Design and optimization flow chart)



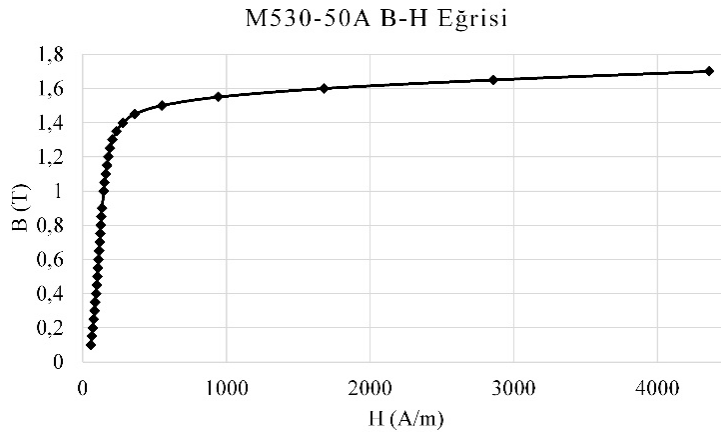
Şekil 5. M1 Hava aralığı-verim optimizasyon grafiği (M1 Air gap - efficiency optimization graph)

Tablo 5. Stator ölçüleri (Stator dimensions)

Model	M1–M2	M3–M4	M5–M6
Dış çapı (mm)	249	249	249
İç çapı (mm)	160	160	160
Uzunluk (mm)	100	70	70
Hs0 (mm)	2	2	2
Hs1 (mm)	1	1	1
Hs2 (mm)	28	32	25
Bs0 (mm)	2,5	2,5	2,5
Bs1 (mm)	7,1	5,10	5,10
Bs2 (mm)	4,67	2,30	2,92
Oluk alanı (mm ²)	180,64	130,17	112,47

Tablo 6. Rotor ölçüleri (Rotor dimensions)

Model	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6
Dış çapı (mm)	300	300	310	310	310	310
İç çapı (mm)	250	250	250	250	250	250
Uzunluk (mm)	100	100	70	70	70	70
Hava aralığı (mm)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Hs0 (mm)	0,5	0,5	0,1	0,1	1	1
Hs2 (mm)	0,05	0,05	15	15	20	20
Bs0 (mm)	2	2	2	2	2	2
Bs1 (mm)	10	10	8	8	8	8
Bs2 (mm)	10	10	6	6	8	8
Halka genişliği (mm)	15	15	20	20	20	20
Halka yüksekliği (mm)	18	18	25	25	25	25
Oluk alanı (mm ²)	78,16	78,16	143,97	143,97	163,99	163,99



Şekil 6. Stator ve rotor sacı M530-50A (Stator and rotor lamination M530-50A)

Stator sargıları bakır, rotor sargıları ise bakır ve alüminyum iletkenlerden oluşturulmuştur. Bakır ve alüminyum özgül ağırlığı sırasıyla $\gamma_{Cu}=8,933 \text{ gr/cm}^3$, $\gamma_{Al}=2,689 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Bakırın öz direnci $\rho=0,0172 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, Alüminyum'un ise $\rho=0,0278 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 'dir.

4. Bulgular (Results)

4.1. Analitik hesaplamalar ve sonuçları (Analytic calculations and results)

Tüm modellerin stator (72) ve rotor (59) oluk sayısı aynıdır. Stator sargısı olarak kısaltılmış tam kalıp sargı tercih edilmiştir. Kutup adımı $\tau = 48,87 \text{ mm}$, stator oluk adımı $\tau_s = 5,429 \text{ mm}$, sargı faktörü $K_w = 0,945214$ olarak hesaplanmıştır. Tablo 7'de stator ve rotor spesifik elektrik yükleri (A_1) görülmektedir. Stator üzerindeki elektrik yükleri M1 ve M2'de diğer modellere göre daha düşüktür. Rotorda ise stator değerlerinden daha düşük ve birbirine yakın değerler olduğu görülmektedir. Değerler genel olarak küçük güçlü motorlar için

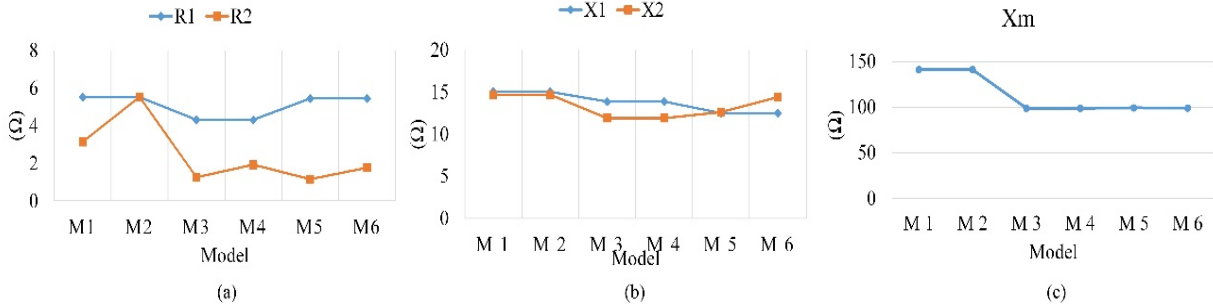
önerilen 2000 - 25000 A/m sınırları içindedir [23]. Tablo 8'de, nominal çalışma koşullarında hava aralığı ortalama akısı (B_{av}), stator (B_{ts}) ve rotor dış akı yoğunlukları (B_{tr}), stator (B_{hs}) ve rotor (B_{hr}) sırt akı yoğunlukları görülmektedir. Hamdi'ye [23] göre B_{av} 'nin 0,35-0,6 T aralığında, Liop'ya göre [30], $B_{ts}=2,1 \text{ T}$, $B_{tr}=2,2 \text{ T}$, $B_{hs}=1,7 \text{ T}$ ve $B_{hr}=1,7$ maksimum değerlerini geçmemesi tavsiye edilmiştir. Buna göre, B_{av} değerleri M1 ve M2 modellerinde en düşük değerde olup diğer modellerde tavsiye edilen sınırlar içindedir. Tasarımda kullanılan M530-50A sacının B-H eğrisine göre (Şekil 6) doyum noktası 1.5 (T)'dir. Analitik hesaplamalara göre, yukarıda belirtilen bölgelerde manyetik akı yoğunluğunun 1,5 T değerine ulaşmadığı ve M530-50A sacının manyetik doyuma girmedığı görülmüştür. Hesaplanan eşdeğer devre parametreleri Şekil 7'de verilmiştir. Stator direnci (R_1), M3 ve M4 modellerinde diğer modellerden daha düşük değerdedir. Rotor direnci (R_2) motorun torku üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. R_2 direnci, M2'de en yüksek M3'de en düşük değerdedir. Stator (X_1) ve rotor (X_2) kaçak reaktansları M1 ve M2 modellerinde en yüksek değerdedir. Miknatıslanma reaktansı (X_m),

Tablo 7. Spesifik elektrik yükü (A/m) (Specific electric load A/m)

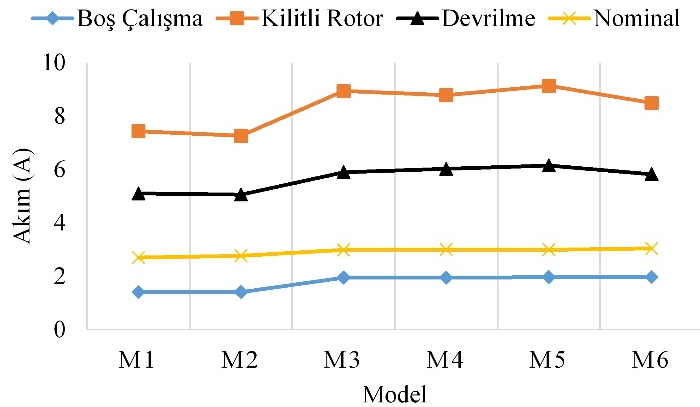
Model	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Stator	17389	17810	19234	19318	19254	19590
Rotor	13091	13516	12881	12976	12824	13009

Tablo 8. Manyetik akı yoğunlukları (Magnetic flux densities)

Model	B_{av} (T)	B_{ts} (T)	B_{tr} (T)	B_{hs} (T)	B_{hr} (T)
M 1	0,33	1,02	0,90	0,06	0,35
M 2	0,33	1,02	0,90	0,06	0,34
M 3	0,45	0,94	0,91	0,09	0,88
M 4	0,45	0,94	0,91	0,09	0,88
M 5	0,43	0,94	1,03	0,08	0,85
M 6	0,46	0,94	0,99	0,08	0,96



Şekil 7. Eşdeğer devre parametreleri; a) R1 ve R2, b) X1 ve X2, c) Xm (Equivalent circuit parameters a) R1 and R2, b) X1 and X2, c) Xm)



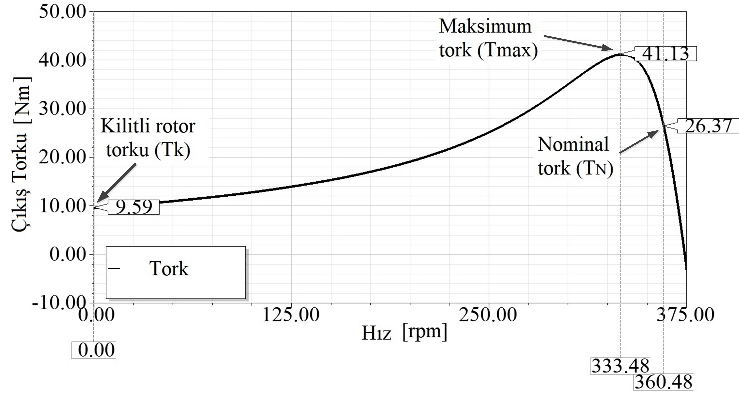
Şekil 8. Faz akımları (Phase current)

motorun boş çalışma akımı üzerinde belirleyici bir parametredir. X_m , M1 ve M2’de diğer modellerden daha yüksek değerdedir. Bir faz, boş çalışma (I_0), kilitli rotor (I_k), devrilme (I_{max}) ve nominal (I_1) akımları Şekil 8’de gösterilmiştir. M1 ve M2 modelleri tüm çalışma durumlarında diğer modellerden daha düşük akım çekmektedir. Başlangıç (kilitli rotor) akımı, M5’de en yüksek değerdedir. Boş çalışma akımı M1 ve M2’de düşük, diğer modellerde yüksek değerdedir. Şekil 9’da M1 modeline ait tork-hız eğrisi görülmektedir.

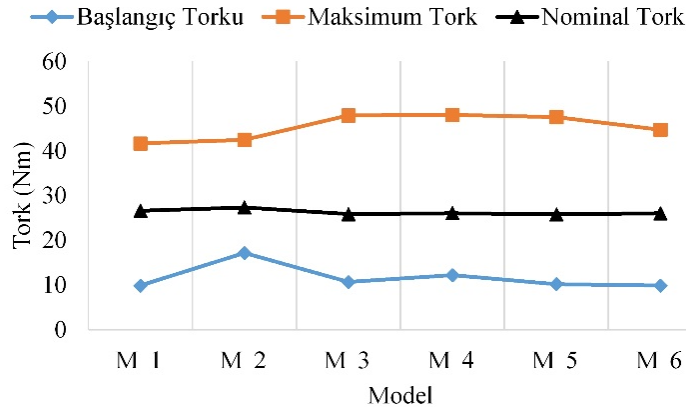
Eğri üzerinde kilitli rotor (T_k), maksimum (T_{max}) ve nominal tork (T_N) değerleri gösterilmiştir. Diğer modeller için hesaplanan tork değerleri Şekil 10’da verilmiştir. En yüksek T_k ve T_N değerleri M2’de, en yüksek T_{max} değeri M4’de elde edilmiştir. Tablo 9’da T_k , T_{max} ve T_N torklarının olduğu durumlar için; akım oranları I_k/I_1 , tork oranları T_k/T_N , T_{max}/T_N ve T_{max} anındaki maksimum kayma ($\%s_{max}$) değeri verilmiştir. Buna göre en yüksek değerler; $I_k/I_N=3,05$ (M5), $T_k/T_N=0,63$ (M2), $T_{max}/T_N=1,85$ (M3), $\%s_{max}= 0,19$ (M2) şeklinde

Tablo 9. Kilitli rotor ve maksimum tork oranları (Locked rotor and maximum torque ratios)

Model	Kilitli Rotor		Devrilme Torku	
	I_k / I_1	T_k / T_N	T_{max} / T_N	$\%s_{max}$
M 1	2,75	0,38	1,59	11
M 2	2,62	0,63	1,55	19
M 3	2,99	0,41	1,85	5
M 4	2,92	0,46	1,84	8
M 5	3,05	0,39	1,84	5
M 6	2,79	0,38	1,72	7



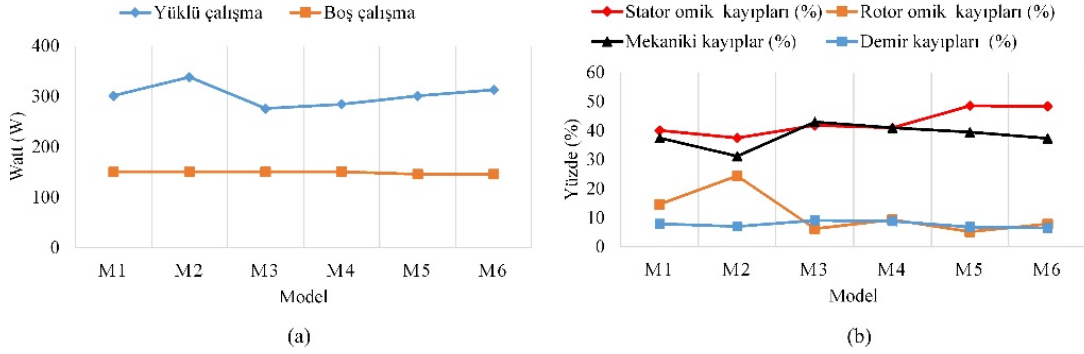
Şekil 9. M1 Tork-Hız eğrisi (M1 torque-speed graphic)



Şekil 10. Tork değerleri (Torque values)

Tablo 10. Tam yükte hız ve kayma değerleri (Speed and slip at full load)

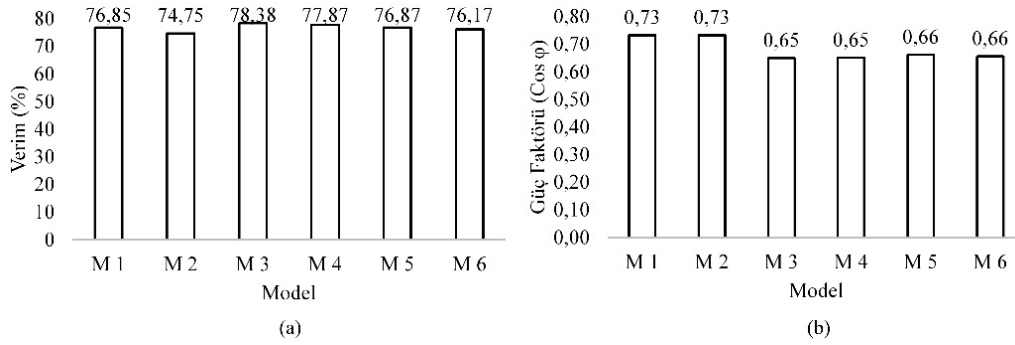
Model	M1	M2	M3	M4	M5	M6
n_r (rpm)	360,75	348,99	369,35	366,30	369,86	366,96
s (%)	3,80	6,93	1,50	2,31	1,36	2,14



Şekil 11. a) Toplam kayıplar, b) Detaylı kayıp oranları (a)Total losses, b) Detailed loss rates

Tablo 11. Stator ve rotor ağırlıkları (Stator and rotor weights)

Model	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Stator (kg)	16,90	16,90	14,09	14,09	13,74	13,74
Rotor (kg)	20,02	14,24	21,74	12,62	21,94	12,31
Toplam(kg)	36,92	31,14	35,84	26,72	35,68	26,05



Şekil 12. a) Verim b) Güç faktörü (a-Efficiency, b-Power factor)

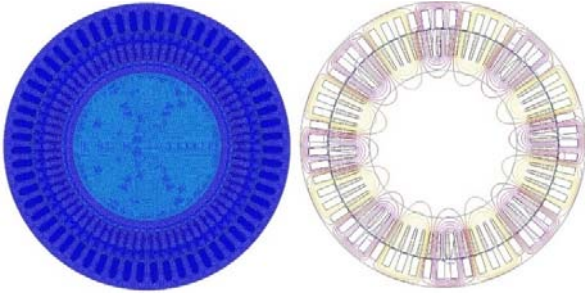
hesaplanmıştır. Tablo 10'da tam yükte hız ve kayma değerleri gösterilmiştir. En yüksek mil hızının 369,86 rpm (M5) ve en düşük mil hızının 348,99 rpm (M2) olduğu görülmüştür. Tam yük çalışma koşullarında en yüksek kayma değeri %s =6,93 (M2), en düşük %s =1,36 (M5) olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıplar ve yüzde cinsinden detaylı kayıplar Şekil 11a ve Şekil 11b'de gösterilmiştir. Toplam kayıplar boş çalışma ve yüklü çalışma kayıpları olarak iki şekilde incelenmiştir (Şekil 11a). Yüklü çalışmada en yüksek kayıp M2'de (337,85 W) en düşük kayıp M3'de (275,85 W) gerçekleşmiştir. Boş çalışma kayıplarına bakıldığında M1 ve M2 diğer modellere göre daha düşük değerdedir. Kayıpların detaylı analizinde stator ve rotor bakır kayıpları, mekanik kayıplar ve demir kayıpları gösterilmiştir (Şekil 11b). Tüm modellerde en yüksek kayıplar stator bakır kaybı ve mekanik kayıplar olarak gerçekleşmektedir. Rotor omik kayıpları ve demir kayıpları, diğer kayıplara oranla daha düşük düzeydedir. Makinanın stator ve rotor ağırlıkları Tablo 11'de gösterilmiştir. Stator ve rotor oluk şekilleri, rotor kafes malzemesi toplam ağırlık üzerinde etki etmektedir. Bakır malzemenin özgül ağırlığının (8,933 gr/cm³) Alüminyum'a (2,689 gr/cm³) göre 3,322 kat daha fazla olması nedeniyle aynı oluk içinde bakır kullanılması durumunda ağırlığı önemli ölçüde değiştirmektedir. Aynı zamanda oluk geometrilerinin farklı olması ve boşaltılan sac miktarı da modeller arasındaki ağırlık farkını oluşturan diğer bir etkidir. Stator ve rotor toplam ağırlığı en yüksek model 36,92 kg (M1) ve en hafif model 26,05 kg (M6)'dır. Stator ağırlıklarına göre M1 ve M2 16,90 kg ile en ağır modellerdir. Rotor ağırlıkları her modelde farklılık göstermektedir. En ağır rotor, 21,94 kg (M5) en hafif rotor 14,49 kg (M4) olarak hesaplanmıştır.

Tasarım başlangıç değerlerinde verimin $\eta = 70\%$ ve faz açısının $\cos\phi = 0,7$ olması hedeflenmiştir. Hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler Şekil 12'de görülmektedir. Verim (η) değerleri hedeflenen değerin üzerinde çıkmasına rağmen (Şekil 12a), $\cos\phi$ değeri sadece M1 ve M2 modellerinde hedeflenen değerin üzerine çıkabilmiştir (Şekil 12b).

4.2. 2D - SEY Analizleri (2D - Finite Element Analysis)

Ansys Maxwell RMXprt modülü ile tasarım ve optimizasyonu yapılan analitik modellerde tatmin edici sonuçlar elde edildikten sonra, tam geometriler üzerinde 2D olarak SEY ile analizi yapıldı. Analitik hesaplamalarla elde edilen sonuçlar elektromanyetik analiz sonuçları ile doğrulandı. Analizler her bir model için motorun tam yüklü olduğu koşullar altında ayrı ayrı yapıldı. Analiz süresi motor hızlarının kararlı bir hal aldığı bölge dikkate alınarak 1s'lik zaman dilimi için 0,0002 s adımlarla gerçekleştirildi. 2D analizde rotor çarpıtma açısının etkisi hesaplanamadığı için sonuçlar üzerinde etkisi gözlemlenemedi. Şekil 13'de M3 mesh yapısı görülmektedir. Stator mil boşluğu içinde mesh sayısı en az düzeyde olup hava aralığı ve oluk ağızlarına gidildiğinde yoğunlaşmaktadır. Aynı SEY analizi ile elde edilen M5'e ait manyetik akı dağılımı A (Wb/m) ve manyetik kutupların (16 kutup) oluşumu Şekil 13'de görülmektedir. Şekil 14'de Bakır kafesli (M1-M3-M5) ve Şekil 15'de Alüminyum kafesli (M2-M4-M6) modellerin manyetik akı yoğunlukları (B) görülmektedir. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu (B_g), stator (B_{ts}) ve rotor (B_{tr}) dişlerinde, stator (B_{hc}) ve rotor (B_{hr}) sırt bölgelerinde ve manyetik devrenin herhangi bir

noktasında 1,5 T değerini aşarak doyuma giden bölgeler bulunmamaktadır. Şekil 16a (M1-M2), b (M3-M4) ve c'de (M5-M6)'ya ait "Tork-Hız" grafikleri görülmektedir. M1-M2'de tork grafiğinin diğer modellere göre daha kararlı bir şekilde, diğer modellerin ise osilasyonlu bir şekilde kararlı duruma ulaştıkları görülmektedir. Şekil 16d (M1-M2), Şekil 16e (M3-M4) ve Şekil 16f (M5-M6)'de "Akım - Zaman" grafiği verilmiştir. M1-M2 modellerinde yol alma akımının maksimum değeri diğer modellere göre daha düşüktür. Bakır kafesli modellerde kalkınma akımının başlangıç değerleri daha yüksektir. Motor bölgesi tam yük "Hız-Zaman" grafiği Şekil 17'de görülmektedir. Modellerinin motor bölgesi hızlanma davranışlarında ve nominal hıza ulaşma sürelerinde farklılıklar görülmektedir. M1 ve M2 daha kararlı bir şekilde hızlanmakta fakat yüksek kayma ile çalışmaktadır. M3 ve M5 en yüksek hız değerine ulaşmakta fakat kararlı hız bölgesine osilasyon yaparak ulaşmaktadır. Kafes malzemesine göre, Bakır kafesli modeller (M1-M3-M5) Alüminyum kafesli (M2-M4-M6) modellere göre, rotor oluk şekline bakıldığında damla (M3-M4) ve kare (M5-M6), yuvarlak oluklu (M1-M2) modellere göre daha iyi daha hız performansı göstermektedir.



Şekil 13. M3 Mesh işlemi ve M5 Manyetik alan dağılımı (M3 Mesh operation and M5 magnetics field distribution)

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, üç fazlı, dış rotorlu, 1 kW gücünde, 16 kutuplu, 50 Hz frekanslı şebeke geriliminde $n_s=375$ rpm senkron hızlı sincap kafesli bir DRAMAK'ın tasarımı, optimizasyonu ve 2D SEY analizi yapılmıştır. Stator oluk sayısı (72) ve ölçüleri aynı, rotor oluk sayısı aynı (59), rotor oluk tipleri ölçüleri ve kafes malzemeleri farklı altı model için nominal güçte motor çalışma bölgesi analizleri yapılmış ve elde edilen değerler Tablo 12'de gösterilmiştir.

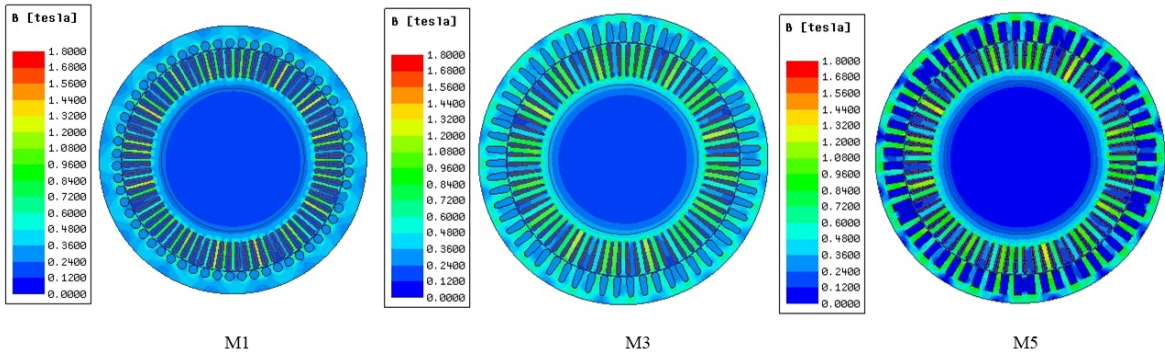
Verim (η): Tüm modellerde başlangıçta hedeflenen %70 değerinin üzerinde bir verim hesaplanmıştır. En yüksek verim M3 ($\eta=78,37$), en düşük verim M2 ($\eta=74,75$) modellerinde elde edilmiştir. M3 damla oluklu ve Bakır kafes yapı, M2 yuvarlak oluklu ve Alüminyum kafes yapıdır. Verim üzerinde rotor oluk şekli ve kafes malzemesi etkili olmaktadır.

Güç katsayısı ($\cos\phi$): En iyi güç katsayısı $\cos\phi=0,73$ ile M1 ve M2 modellerinde elde edilmiştir. Burada yuvarlak rotor oluk şeklinin etkisi görülmektedir.

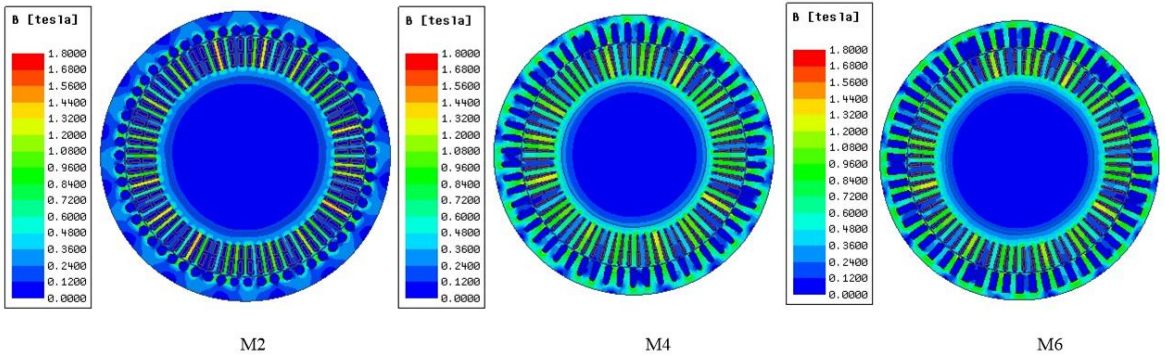
Tork (T_e): En yüksek tork M2 ($T_e=27,36$ Nm), en düşük tork M5 ($T_e=25,82$ Nm) modellerinde elde edilmiştir. Tork eğrisi üzerinde oluk şekli, oluk alanı ve kafes malzemesi etkilidir. Yuvarlak oluk şekli ile yüksek tork elde edilmiştir. Rotor oluk şekli ile birlikte rotor direncinin (R_2) tork üzerindeki etkisi burada görülmüştür.

Faz akımı (I_1): En düşük faz akımı M1'de ($I_1=2,7$ A), en yüksek faz akımı M6'da ($I_6=3,04$ A) görülmüştür. M6'da mıknatıslanma reaktansı en düşük seviyede ($X_{m6}=99,06\Omega$) ve mıknatıslanma akımı ($I_{m6}=1,96$ A) en yüksek seviyededir. Rotor oluk şeklinin ve malzeme yapısının etkisi akımlar ve kaçak reaktans üzerinde görülmektedir.

Hız (n_r) ve Kayma (%): En düşük rotor hızı ($n_r=348,99$ rpm) ve en yüksek kayma ($\%s=6,93$) değeri M2 modelinde, en yüksek rotor hızı



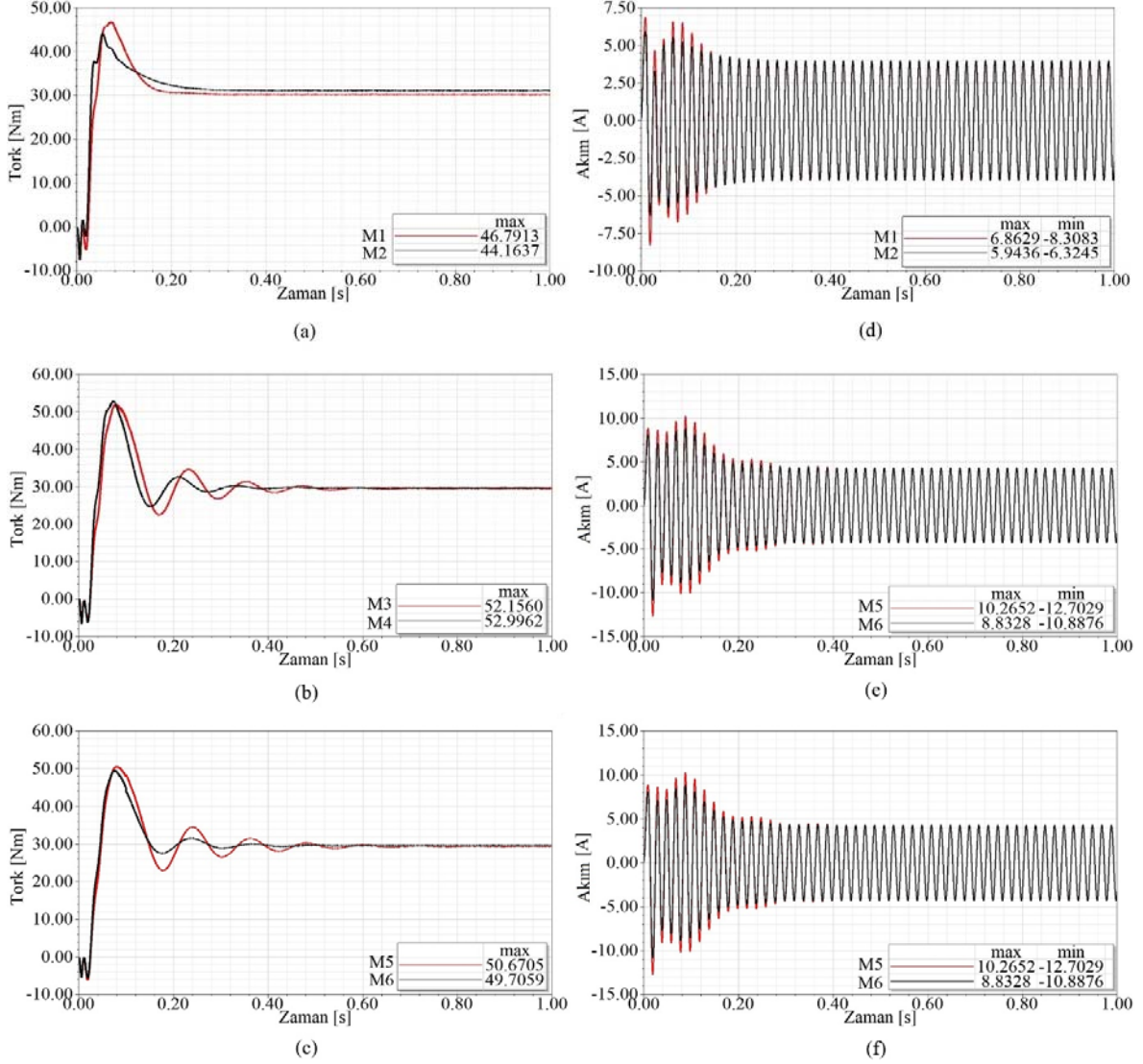
Şekil 14. Bakır kafesli modellerin manyetik akı yoğunluğu (Magnetic flux density of copper cage models in)



Şekil 15. Alüminyum kafesli modellerin manyetik akı yoğunluğu (Magnetic flux density of aluminium cage models)

($n_r=369,86$ rpm) ve en düşük kayma ($\%s=1,36$) M5 modelinde görülmüştür. Burada rotor direnci R_2 'nin etkisi görülmektedir. Bu sonuçlara göre, IEC 60034-30-1 standardında sincap kafesli İRAM'lar için tanımlanan en yakın güç (1,1 kW) ve kutup sayısı (8) baz alındığında, IE2 (%70,8) ve IE3 (%77,7) verimlilik sınıflarının alt limitlerinden daha yüksek verimlilikte ve düşük devirli (16 kutuplu)

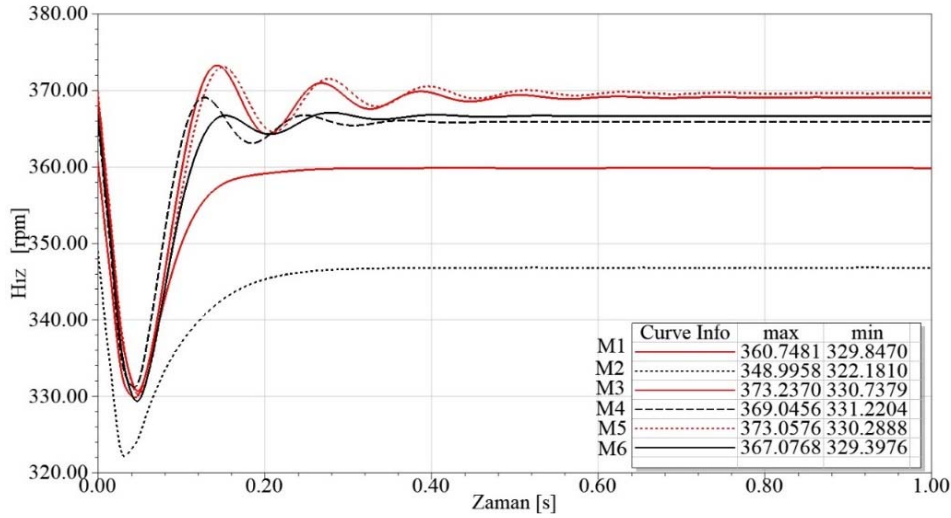
DRAMAK'nın üretilebileceği ve DRAM olarak kullanılabilirliği görülmüştür. Çalışmanın başlangıcındaki hedeflere uygun olarak tasarlanan DRAMAK'nın motor bölgesi analizlerinde makinanın başarılı bir şekilde çalışabileceği gösterilmiştir. Sonraki çalışmalarda DRAMAK'nın, dış rotorlu asenkron generatör (DRAG) olarak (generatör bölgesindeki) çalışması ve davranışları incelenecektir.



Şekil 16. Tork-zaman eğrisi; a) M1-M2, b) M3-M4, c) M5-M6, Akım zaman eğrisi; d) M1-M2, e) M3-M4, f) M5-M6 (Torque-time graphic; a) M1-M2, b) M3-M4, c) M5-M6, Current-time graphic; d) M1-M2, e) M3-M4, f) M5-M6)

Tablo 12. Nominal çalışma değerleri (Nominal operating values)

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Verim (η)	76,85	74,75	78,37	77,87	76,87	76,17
Cos ϕ	0,73	0,73	0,65	0,65	0,66	0,65
Tork (Nm)	26,63	27,36	25,85	26,07	25,82	26,02
Faz Akımı (A)	2,70	2,76	2,99	3,00	2,99	3,04
Hız (rpm)	360,75	348,99	369,35	366,30	369,86	366,96
Kayma (% s)	3,80	6,93	1,5	2,31	1,36	2,14



Şekil 17. Hız-Zaman eğrileri (Speed-time graphic)

Kaynaklar (References)

- Bortoni, E. C., Bernardes Jr, J. V., da Silva, P. V., Faria, V. A., Vieira, P. A., Evaluation of manufacturers strategies to obtain high-efficient induction motors, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 31, 221-227, 2019.
- Kabul A., Ünsal A., Diagnosis of simultaneous broken rotor bars and static eccentricity faults of induction motors by analyzing stator current and vibration signals, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (4), 2011-2023, 2021.
- Lenin N.C., Padmanaban S., Bhaskar M.S., Mitolo M., Hossain E., Ceiling fan drives—past, present and future, *IEEE Access*, 9, 44888-44904, 2021.
- Holik P.J., Dorrell D.G., Popescu M., Performance improvement of an external-rotor split-phase induction motor for low-cost drive applications using external rotor can, *IEEE Transactions on magnetics*, 43 (6), 2549-2551 2007.
- Shastri S., Sharma U., Singh B., Design of Fractional-slot concentrated winding consequent pole motor for ceiling fans, *IEEE 5th Int. Conference on Computing Communication and Automation*, New Delhi-India, 390-395, 30-31 October, 2020.
- Mohammed K.G., Ramli A.Q., Analyzing the performance of completed designed outer rotor single phase induction motor, *IEEE Student Conference on Research and Development*, Putrajaya-Malaysia, 238-242, 16-17 December, 2013.
- Popescu M., Dorrell D.G. and Holik P., Improving the starting torque in external-rotor induction motors using an outer can, *3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, Dublin- Ireland, 531-535, 4-6 April, 2006.
- György T., Biró K.A., Genetic algorithm based design optimization of a three-phase induction machine with external rotor, *2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP)*, 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION), Side-Turkey, 462-467, 2-4 September 2015.
- György T., Biró K.A., Co-evolutionary optimization design of a three-phase induction machine with external rotor, *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne-Switzerland, 1394-1398, 4-7 September, 2016.
- György, T., Biró K.A., Loss analysis of a low power induction machine with external rotor, *6.th International Conference on Modern Power Systems MPS2015*, Cluj Napoca-Romania, 117-122, 18-21 May 2015.
- Virlan B., Benelghali S., Simion A., Livadaru L., Outbib R., Munteanu A., Induction motor with outer rotor and ring stator winding for multispeed applications, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28 (4), 999-1007, 2013.
- Sundaram V. M., Toliyat H. A., A fractional slot concentrated winding (FSCW) configuration for outer rotor squirrel cage induction motors, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Coeur d'Alene- USA, 20-26, 10-13 May, 2015.
- Dalal A., Kumar P., Design, prototyping, and testing of a dual-rotor motor for electric vehicle application, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65 (9), 7185-7192, 2018.
- Cui S., Han S., Chan C.C., Overview of multi-machine drive systems for electric and hybrid electric vehicles, *IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Beijing-China, 1-6, 31 August - 3 September, 2014.
- Wang W., Chen X., Wang J., Motor/generator applications in electrified vehicle chassis—A Survey, *IEEE Trans. Transactions on Transportation Electrification*, 5 (3), 584-601, 2019.
- Cha A.H.R., Jeong B.T.W., Im C.D.Y., Shin D.K.J., Seo E.Y.J., Design of outer rotor type induction motor having high power density for in-wheel system, *15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sapporo-Japan, 1-4, 21-24 October, 2012.
- Popescu M., Riviere N., Volpe G., Villani M., Fabri G., Leonardo L.D., A copper rotor induction motor solution for electrical vehicles traction system, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Baltimore MD-USA, 3924-3930, September 29-October 3, 2019.
- Livadaru L., Munteanu A., Simion A., Cantemir C., Design and finite element analysis of high-density torque induction motor for traction applications, *9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest-Romania, 211-214, 7-9 May, 2015.
- Munteanu A., Livadaru L., Simion A., Virlan B., Single-tooth winding induction motor with external rotor for electric vehicle applications, *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, Iasi-Romania, 209-212, October 20-22, 2016.
- Hwang M.H., Lee H.S., Yang S.H., Cha H.R., Park S.J., Electromagnetic field analysis and design of an efficient outer rotor inductor in the low-speed section for driving electric vehicles, *Energies*, 12 (24), 4615, 2019.
- Matthew H., Jensen B.B., Induction generators for direct-drive wind turbines, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Niagara Falls Ontario-Canada, 1125-1130, 14-17 May, 2011.
- Mellah, H., Hemsas K.E., Design and analysis of an external-rotor internal-stator doubly fed induction generator for small wind turbine application by fem, *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2 (1), 1-11, 2013.
- Hamdi, E. S., *Design of small electrical machines*, John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 1994.
- Dorrell D. G., The challenges of meeting IE4 efficiency standards for induction and other machines, *IEEE International Conference on*

- Industrial Technology (ICIT), Busan-Korea (South), 213-218, 26 Feb.-1 March, 2014.
25. Kimball J. W., Amrhein M., IEEE Machine design considerations for the future energy challenge, Proceedings Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, Indianapolis-USA, 448-453, 24-26 October, 2005.
 26. Popescu M., Analysis and modelling of single-phase induction motor with external rotor for domestic applications, In Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy, Rome Italy, 1- 463-470, 8-12 October, 2000.
 27. Boldea, I., Induction machines handbook, CRC press Taylor & Francis Group, Boca Raton, A.B.D., 2010.
 28. Demir U., Aküner M.C., Design and optimization of in-wheel asynchronous motor for electric vehicle, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (4), 1517-1530, 2018.
 29. Purwanto W., Risfendra, Putra D S., Effect of stator slot geometry on high speed spindle motor performance, 2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT), Yogyakarta- Indonesia, 561-565, 6-7 March, 2018.
 30. Lipo T.A., Introduction to AC machine design, John Wiley & Sons, New Jersey, A.B.D, 2017.
 31. Gundogdu T., Zhu Z. Q., Mipo J. C., Farah P., Influence of air-gap length on rotor bar current waveform of squirrel-cage induction motor. 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) IEEE, Chiba-Japan,1-6, 13-16 November, 2016.
 32. Joksimović G., Kajević A., Mezzarobba M., Tassarolo, A., Optimal rotor bars number in four pole cage induction motor with 36 stator slots—part II: results, International Conference on Electrical Machines (ICEM) IEEE, Gothenburg-Sweden, 1, 509-514. 23-26 August, 2020.
 33. Babypriya B., Gomathi, S., Numerical analysis on impact of choice of number of rotor slots on performance of three phase induction motor, Materials Today: Proceedings (Article in press),1-7, 2020.
 34. Chapman, S., Electric machinery fundamentals, McGraw-Hill Education, New York, A.B.D, 2005.
 35. Araz H. K., Yılmaz M., Design procedure and implementation of a high-efficiency PMSM with reduced magnet-mass and torque-ripple for electric vehicles, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 1089-1109, 2020.

