



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK VERİMLİ 7.5 KW ASENKRON MOTOR TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan ATAĞLI

DANIŞMAN

Prof. Dr. Yunus UZUN

AKSARAY, 2025

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 222363703 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Furkan ATAĞLI tarafından hazırlanan “**YÜKSEK VERİMLİ 7.5 KW ASENKRON MOTOR TASARIMI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Yunus UZUN

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Prof. Dr. Emre ARSLAN

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZDİL

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Tez Savunma Tarihi: 23/01/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Fazlıye KARABÖRK

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İmza

Furkan ATAĞLI

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında emeği geçen, desteklerini ve katkılarını esirgemeyen başta danışman hocam Prof. Dr. Yunus UZUN’a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmam boyunca bana manevi destek veren ve her zaman yanımda olan sevgili aileme, bu süreçte bilgi ve fikir alışverişinde bulunduğum değerli iş arkadaşlarıma ve meslektaşlarıma da teşekkür ederim.

Furkan ATAĞLI
AKSARAY, 2025



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	9
3. ASENKRON MOTOR YAPISI	12
3.1 Stator	12
3.2 Rotor	13
3.2.1 Sincap kafesli (Kısa devre rotorlu) asenkron motorlar.....	14
3.2.2 Bilezikli (Sargılı rotorlu) asenkron motorlar	15
3.2.3 Sincap kafesli ve rotoru sargılı asenkron motorların karşılaştırılması	16
4. ASENKRON MOTORUN ÇALIŞMA PRENSİBİ	17
4.1 Döner Manyetik Alan	19
4.2 Manyetik Alan	19
4.2.1 Manyetik akı	20
4.2.2 Elektromanyetik alanın üretilmesi	21
4.2.3 Manyetik akı yoğunluğu	22
4.2.4 Malzemenin manyetik geçirgenliği	22
4.3 Kayma	23
5. ASENKRON MOTORUN EŞDEĞER DEVRESİ	25
6. ASENKRON MOTOR VERİMİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER	29
6.1 Rotor Oluk Yapısının Motor Üzerindeki Etkileri.....	30
7. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	31
8. ASENKRON MOTOR TASARIMI	32
8.1 Tasarım Parametreleri ve Simülasyon Sonuçları	34
8.1.1 Tek oluklu rotor tasarımı	34
8.1.2 Çift oluklu rotor tasarımı	42
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	50
KAYNAKÇA	52
ÖZGEÇMİŞ.....	56

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK VERİMLİ 7.5 KW ASENKRON MOTOR TASARIMI

Furkan ATAĞLI

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Yunus UZUN

ÖZET

Dünyada hızla yükselen nüfus ve sanayileşmeye bağlı olarak çevre kirliliği artmaktadır. Bu durumun sebeplerinden biri de düşük verimli fosil yakıtlı motorlardır. Buna karşı gelişen yüksek verimli, çevre dostu, düşük maliyetli, bakım ihtiyacı az olan elektrik motorları gün geçtikçe önemini artırmakta ve giderek yaygınlaşmaktadır. Elektrik motorları otomobillerden asansör sistemlerine beyaz eşyalardan endüstri sektörüne kadar yaygın biçimde kullanılmaktadır. Geniş bir alanda kullanılan asenkron motorlar fosil yakıtlı motorlara göre yüksek verimli olmalarına rağmen bu oranlarının elektriksel açıdan teorik bir kısıtı yoktur. Sağlanan her bir verim artış oranı ülkelerin enerji ihtiyacını büyük ölçüde düşürmektedir. Bu durum elektrik motorlarının daha verimli olmaları için araştırma ve geliştirme çalışmalarına yön vermektedir.

Bu çalışma Asenkron motorun IE3 verimlilik sınıfında 7.5 kW, 4 kutuplu, 3 fazlı, sincap kafesli, tek oluklu rotor modelini referans alarak, aynı asenkron motorun çift oluklu rotor modellemesiyle Sonlu Elemanlar Yöntemi tasarlanarak verim ve kalkış momenti optimizasyonunu sağlamayı amaçlamaktadır. Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak tasarlanan motorda, rotor oluk şekli modellenmiş ve incelemesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemede; yol alma değerleri, moment, akım, kayıplar ve verim değerleri elde edilmiş, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda optimum bir tasarım elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Verimlilik Sınıfı, Çift Oluk, Optimizasyon, Asenkron Motor Tasarımı, Sonlu Elemanlar Yöntemi.

Ocak, 2025; 56 sayfa

M.Sc. THESIS

HIGH EFFICIENCY 7.5 KW ASYNCHRONOUS MOTOR DESİNG

Furkan ATAĞLI

Aksaray University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Yunus UZUN

ABSTRACT

Environmental pollution is increasing due to the rapidly increasing population and industrialization in the world. One of the reasons for this situation is low-efficiency fossil fuel engines. In response to this, highly efficient, environmentally friendly, low-cost, low-maintenance electric motors are increasing in importance day by day and are becoming increasingly widespread. Electric motors are widely used in automobiles, elevator systems, white goods and the industrial sector. Although asynchronous motors, which are used in a wide area, are highly efficient compared to fossil fuel motors, there is no theoretical limitation in terms of their efficiency. Each increase in efficiency achieved significantly reduces the energy needs of countries. This situation directs research and development efforts to make electric motors more efficient.

This study takes as reference the 7.5 kW, 4-pole, 3-phase, squirrel-cage, single-cage rotor model of the induction motor in the IE3 efficiency class. It aims to optimize the efficiency and starting torque of the same asynchronous motor by designing it in the Finite Element Method with double-cage rotor modeling. In the engine designed using the Finite Element Method, the rotor slot shape was modeled and examined. In the examination; Starting values, torque, current, losses and efficiency values were obtained and the results were compared. As a result, an optimum design was obtained.

Keywords: Efficiency Class, Double Cage, Optimization, Asynchronous Motor Design, Finite Element Method.

January, 2025; 56 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Elektrik motorlarında verimlilik uygulama takvimi.	5
Şekil 1.2. 4 kutuplu asenkron motorun verimlilik sınıfları grafiği.	7
Şekil 1.3. IEC 60034-30 (50 Hz)'e göre verimlilik sınıfı tabloları.....	8
Şekil 3.1. Üç fazlı sincap kafesli asenkron motor kesiti	15
Şekil 4.1. Manyetik akının izlediği yol.....	21
Şekil 5.1. Asenkron motor eşdeğer devresi (a) Tek oluk (b) Çift oluk.....	25
Şekil 5.2. Asenkron motorun güç akış diyagramı.....	28
Şekil 6.1. Rotor oluk modelleri.....	30
Şekil 8.1. Tasarlanan stator şekli.	35
Şekil 8.2. Tasarlanan tek oluk rotorun şekli.	36
Şekil 8.3. Tek oluklu tasarım için hız-tork grafiği.	37
Şekil 8.4. Tek oluklu tasarım için verim-çıkış gücü grafiği.	37
Şekil 8.5. Tek oluklu tasarım için verim-hız grafiği.....	38
Şekil 8.6. Tek oluklu tasarım için çıkış gücü- hız grafiği.....	39
Şekil 8.7. Tek oluklu tasarım için güç faktörü- hız grafiği.....	39
Şekil 8.8. Tek oluklu tasarım için faz akımı- çıkış gücü grafiği.....	40
Şekil 8.9. Tek oluklu tasarım için faz akımı- hız grafiği.	40
Şekil 8.10. Tek oluklu tasarım için akım-zaman grafiği.....	41
Şekil 8.11. Tek oluklu tasarım için tork- zaman grafiği.	41
Şekil 8.12. Tek oluklu tasarım için kayıp- zaman grafiği.....	42
Şekil 8.15. Tasarlanan çift oluk rotorun şekli.	44
Şekil 8.16. Çift oluklu tasarım için hız-tork grafiği.....	44
Şekil 8.17. Çift oluklu tasarım için çıkış gücü-verim grafiği.	45
Şekil 8.18. Çift oluklu tasarım için hız-verim grafiği.....	45
Şekil 8.19. Çift oluklu tasarım için çıkış gücü-hız grafiği.....	46
Şekil 8.20. Çift oluklu tasarım için güç faktörü-hız grafiği.....	46
Şekil 8.21. Çift oluklu tasarım için faz akımı-çıkış gücü grafiği.....	47
Şekil 8.22. Çift oluklu tasarım için faz akımı-hız grafiği.	47
Şekil 8.23. Çift oluklu tasarım için akım-zaman grafiği.....	48
Şekil 8.24. Çift oluklu tasarım için tork-zaman grafiği.	48
Şekil 8.25. Çift oluklu tasarımın kayıp-zaman grafiği.....	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 8.1. Faydalanma katsayıları (Esson sabiti) çizelgesi.	33
Çizelge 8.2. Tek oluklu motor parametreleri.	34
Çizelge 8.3. Tasarlanan stator ve stator oluk boyutları.....	35
Çizelge 8.4. Tasarlanan rotor ve rotor oluk boyutları.	36
Çizelge 8.5. Çift oluklu motor parametreleri.	43
Çizelge 8.6. Tasarlanan çift oluklu rotor ve rotor oluk boyutları.	43



SİMGELER VE KISALTMALAR

C	Esos Sabiti
D_i	Stator İç Çapı
I	Stator Akımı
I_2	Rotor Akımı
L	Sac Paket Uzunluğu
n_r	Rotor Dönüş Hızı
n_s	Senkron Dönüş Hızı
P_s	Sanal Güç
P_{scl}	Stator Bakır Kaybı
P_{ag}	Hava Aralığı Gücü
P_{in}	Giriş Gücü
P_{fe}	Stator Demir Kaybı
P_{rcl}	Rotor İletken Kayıpları
P_{conv}	Mekaniğe Dönüştürülen Güç
P_{out}	Çıkış Gücü
$P_{F\&w}$	Sürtünme ve Rüzgar Kayıpları
P_{misc}	Kaçak Kayıplar
R_1	Stator Direnci
R_2	Rotor Direnci
R'_{21}	Dış Rotor Oluğunun Direnci
R'_{22}	İç Rotor Oluğunun Direnci
R_{Fe}	Nüve Direnci
s	Kayma
V_1	Giriş Voltajı
Z_{eq}	Eşdeğer Devrenin Direnci
X_{d1}	Stator Reaktansı
X'_{d2}	Rotor Reaktansı
X'_{d21}	Dış Rotor Oluğunun Reaktansı
X'_{d22}	İç Rotor Oluğunun Reaktansı
X_μ	Nüve Reaktansı
//	Paralellik

1. GİRİŞ

Asenkron motorlar, endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmalarını sağlayan bir dizi teknik ve yapısal avantaja sahiptir. Bunların başında ekonomik olmaları gelir. Üretim süreçlerinde kullanılan malzemelerin nispeten ucuz olması ve karmaşık olmayan tasarımları, maliyetlerin düşük tutulmasını sağlar. Bunun yanı sıra, yüksek verimlilikleriyle dikkat çekerler. Elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünde düşük kayıplarla çalışmaları, enerji maliyetlerinin minimize edilmesine yardımcı olur.

Bu motorların yapısında fırça ve kollektör gibi aşınmaya yatkın parçalar bulunmadığı için bakım gereksinimleri oldukça düşüktür. Bu durum, işletmelerin bakım masraflarını ve duruş sürelerini azaltarak verimliliklerini artırır. Ayrıca, gelişmiş hız kontrol teknolojileriyle asenkron motorların çalışma hızlarının kolayca ayarlanabilmesi, onları birçok farklı uygulama için uygun hale getirir. Değişken frekanslı sürücülerle hızın hassas şekilde kontrol edilmesi, endüstriyel süreçlerde esneklik sağlar.

Sağlam yapıları, asenkron motorların başka bir önemli avantajıdır. Genellikle zorlu çevresel koşullarda çalışabilecek şekilde tasarlanmışlardır ve bu da onları hem uzun ömürlü hem de güvenilir kılar. Toz, nem ve sıcaklık gibi faktörlere karşı dayanıklı olmaları, özellikle ağır sanayi uygulamalarında büyük bir avantaj sunar.

Asenkron motorlar ekonomik, verimli, dayanıklı ve esnek yapıları sayesinde endüstriyel elektrik makineleri arasında önemli bir yere sahiptir. Teknik ve pratik avantajları, onları pek çok farklı sektörde vazgeçilmez bir seçenek haline getirmiştir [1]. Ayrıca endüstride tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık olarak % 75'i elektrik motorları tarafından tüketilmektedir [2]. Bunun yanı sıra asenkron motorların en büyük olumsuz tarafı verimlerinin kısmen düşük olmasıdır [3].

Enerji kaynaklarının sınırlı olması, artan enerji talebini karşılamayı giderek zorlaştırmaktadır. Bu durum, sadece enerji arz-talep dengesini değil, aynı zamanda ülke ekonomisini ve toplumsal refahını da olumsuz etkilemektedir.

Özellikle enerji ithalatına bağımlı ülkelerde, yüksek enerji maliyetleri ekonomik kalkınmayı yavaşlatırken, bireylerin yaşam standartlarını da düşürmektedir. 1970'li yıllarda dünya genelinde etkisini gösteren enerji krizi, bu sorunun ciddiyetini ortaya koymuş ve birçok ülkede enerji tasarrufu, verimlilik ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik farkındalığın artmasını sağlamıştır. Bu dönemde başlayan araştırma ve geliştirme faaliyetleri, günümüzde enerji verimliliğini merkezine alan bir tasarım anlayışının temelini oluşturmuştur.

Teknolojik ilerlemeler ve nüfus artışı, enerjiye olan talebin sürekli artmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, enerji verimliliği yalnızca ekonomik bir gereklilik değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da bir zorunluluk haline gelmiştir. Enerji tasarrufu sağlayan ve daha az tüketimle daha yüksek performans sunan ürünlerin tasarımı, modern ürün geliştirme süreçlerinin vazgeçilmez bir unsuru olmuştur. Özellikle sanayi, ulaşım ve konut sektörlerinde enerji verimli teknolojilere geçiş hem karbon emisyonlarının azaltılmasına hem de enerji maliyetlerinin düşürülmesine önemli katkılar sağlamaktadır [26].

Bu bağlamda, asenkron motorların daha verimli tasarımlarının geliştirilmesi, enerji tasarrufu sağlama potansiyeli nedeniyle hem araştırmacıların hem de endüstrinin en önemli çalışma alanlarından biri haline gelmiştir. Asenkron motorlar, sanayi ve ticaret sektörlerinde geniş bir kullanım alanına sahip olduklarından, bu makinelerde yapılacak küçük iyileştirmeler dahi toplam enerji tüketiminde önemli tasarruflar sağlayabilir [4].

Günümüzde uluslararası elektrik motorları pazarı, endüstrinin hemen her alanını etkileyen stratejik bir sektördür. Sanayiden otomasyona, ulaşım sistemlerinden enerji sektörüne kadar birçok alanda kullanılan elektrik motorları, üretim süreçlerinin temel unsurlarından biridir. Elektrik motorları pazarında, farklı endüstriyel ihtiyaçlara cevap verebilecek geniş bir ürün yelpazesi bulunmaktadır. Her bir motor türü, belirli bir uygulama veya performans gereksinimini karşılamak üzere tasarlanmıştır. Bu ürünler, uluslararası düzeyde kabul gören standartlar ve normlar çerçevesinde üretilmektedir [27].

Dünya genelinde enerji ihtiyacının 2050 yılına kadar iki katına çıkması beklentisi, enerji verimliliği konusundaki düzenlemelerin önemini artırmıştır. Bu durum, artan enerji talebinin karşılanmasında sürdürülebilir yöntemlere olan ihtiyacı açıkça ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, enerji verimliliği düzenlemeleri, endüstriyel işletmeler üzerinde önemli etkiler yaratmıştır. Yeni standartlara geçiş sürecinde, düzenlemelerin oluşturduğu ek maliyetler, başlangıçta işletmeler için önemli bir yük oluşturabilmektedir. Ancak bu geçiş süreci, belirli bir takvim doğrultusunda zamana yayılmıştır. Bu strateji, işletmelerin uyum sağlamasını kolaylaştırmak ve maliyet yükünü hafifletmek amacıyla uygulanmaktadır. Daha verimli motorların kullanımıyla enerji tüketiminin azalması, işletmelerin enerji maliyetlerini düşürmekte ve geçiş sürecinde yapılan yatırımların ekonomik açıdan geri dönüşünü sağlamaktadır [28].

Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın enerji verimliliğini artırmaya yönelik yaptığı çalışmalar, endüstride kullanılan motorların daha verimli hale getirilmesine odaklanmaktadır. Bakanlığın yaptığı araştırmalara göre, daha verimli motorların kullanılmasıyla çeşitli sistemlerde kayda değer enerji tasarrufları sağlanabilmektedir. Örneğin, basınçlı hava sistemlerinde % 33, fan sistemlerinde % 22 ve pompa uygulamalarında % 22 oranında enerji verimliliği iyileşmesi mümkün olabilmektedir. Bu rakamlar, enerji verimli motorların potansiyel katkısını açıkça ortaya koymaktadır.

1 Temmuz 2021 tarihinde yürürlüğe giren regülasyon, enerji verimliliği standartlarını daha da sıkılaştırmıştır. Bu düzenlemeye göre, üç fazlı endüstriyel motorlarda 0,75 kW ve üzerindeki güçlerde IE2 verim sınıfındaki motorların sürücü ile kullanımı yasaklanmıştır. Bu karar, daha yüksek enerji verimliliği sağlayan motor sınıflarının tercih edilmesini teşvik etmektedir. Regülasyona göre belirlenen yeni motor verim sınıfları, Şekil 1.1.'de belirtilmiştir.

Bu düzenlemeyle, motorların güç aralıklarına göre belirli verim sınıflarını karşılaması zorunlu hale gelmiştir:

- 0.12-0.75 kW güç aralığındaki motorlar için en az IE2 verim sınıfı,
- 0.75-1000 kW güç aralığındaki motorlar için en az IE3 verim sınıfı standartları uygulanmaktadır [5].

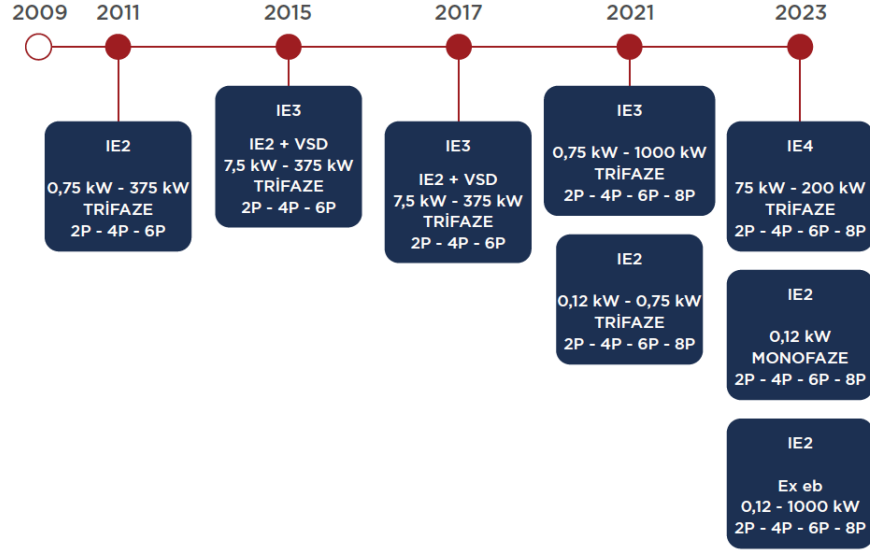
Yüksek verimlilik, genellikle motorun boyutlarında ve maliyetlerinde artışa neden olur. Bunun temel sebebi, daha yüksek verimlilik elde etmek için kullanılan malzemelerin kalitesinin artırılması ve motor tasarımında daha fazla malzeme kullanılmasıdır. Daha verimli motorlarda çekirdek kayıplarını azaltmak için düşük kayıplı manyetik malzemeler tercih edilir ve bu, motorun fiziksel boyutunun büyümesine yol açabilir. Ayrıca, daha fazla bakır kullanımı gibi üretim maliyetlerini artıran faktörler, motorun fiyatını yükseltir. Öte yandan, maliyetin düşük tutulması istenirse, verimlilik ve diğer performans kriterlerinden taviz verilmesi gerekebilir.

İndüksiyon motorlarının performansını anlamak ve optimize etmek için manyetik, elektrik ve ısı modeller gibi çeşitli analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu modeller, motorun temel değişkenlerinin performans üzerindeki etkilerini Motor tasarımında, performansı belirleyen temel unsurlardan biri motorun geometrisidir. Rotor ve stator boyutlarının, hava aralığının ve sargı düzeninin doğru bir şekilde tasarlanması, istenen performansın elde edilmesinde kritik bir rol oynar [6].

IE4 sınıfı asenkron motorlar, enerji verimliliği konusundaki ilerlemelerin bir sonucu olarak TS EN 60034-30-1:2014 standardında tanımlanmıştır. Bu motorlar, bir önceki sınıf olan IE3 motorlara kıyasla kayıpların % 15 oranında azaltılmasını hedeflemektedir. Bu hedef, daha verimli motorların geliştirilmesi için önemli bir teşvik oluşturmuştur. IE4 verimliliğinin sağlanması, özellikle kafes rotorların tasarımı ve kullanılan malzemelerde yenilikçi teknolojilerin uygulanmasını gerektirmektedir. Yeni malzeme ve tasarım teknikleri, kayıpları minimuma indirerek motorların daha yüksek performans ve enerji verimliliği sunmasını sağlar.

Enerji ile ilgili ürünlerin çevreye duyarlı tasarımına ilişkin yönetmelik, enerji verimli ürünlerin geliştirilmesini teşvik eden önemli bir düzenlemedir. Bu yönetmelik, 23 Haziran 2010 tarihli ve 2010/643 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile yürürlüğe girmiştir. Yönetmelik, enerji tüketen ürünlerin çevresel etkilerini azaltmayı hedeflerken, aynı zamanda enerji verimliliği standartlarının yaygınlaştırılmasını sağlamaktadır.

Yönetmeliğin uygulanmasına yönelik hazırlanan regülasyon takvimi, enerji verimliliği sınıflarına geçişin aşamalı bir şekilde gerçekleştirilmesini öngörmektedir. Bakanlığımızın yayınladığı takvim Şekil 1.1.'de sunulmuştur.



Şekil 1.1. Elektrik motorlarında verimlilik uygulama takvimi.

Daha verimli elektrik motorlarının kullanımını teşvik etmek amacıyla, Avrupa Elektrik Makineleri ve Güç Sistemleri Üreticileri Komitesi (CEMEP), motor üreticileri için bağlayıcı nitelikte olan EFF serisi verimlilik sınıflarını geliştirmiştir. Bu sınıflandırma, elektrik motorlarının enerji verimlilik seviyelerini standartlaştırmayı ve daha az enerji tüketen motorların tercih edilmesini sağlamayı hedeflemektedir.

EFF serisi, üç temel verimlilik sınıfından oluşmaktadır:

- **EFF1 (Yüksek Verimlilik):** En yüksek enerji verimliliği sağlayan motor sınıfıdır. Bu motorlar, enerji tüketimini minimuma indirgeyerek uzun vadeli işletme maliyetlerinde tasarruf sağlar ve çevresel etkileri azaltır.
- **EFF2 (Standart Verimlilik):** Orta düzey enerji verimliliği sunan motorları kapsar. Bu motorlar, daha düşük maliyetli bir alternatif olarak kullanılır ancak enerji tasarrufu açısından EFF1 motorlara göre daha az avantaj sunar.
- **EFF3 (Düşük Verimlilik):** En düşük enerji verimliliğine sahip motor sınıfıdır. Bu motorlar genellikle eski tasarımları temsil eder ve yüksek enerji tüketimi nedeniyle günümüzde tercih edilmemektedir [29].

2007 yılında Avrupa Birliği tarafından çıkarılan Enerji İstikrarı ve Güvenliği Yasası (EISA), enerji verimliliği konusunda önemli bir dönüm noktası olmuştur. Bu yasa, özellikle motorlar ve enerji ile ilgili diğer ürünler için verimlilik standartlarının belirlenmesinde temel bir rol oynamıştır. Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği (NEMA) ile yapılan ortak çalışmalar sonucunda, verimsiz motor sistemlerinin optimize edilmesi ve çevre dostu hale getirilmesi amacıyla çeşitli düzenlemeler önerilmiştir. Bu çalışmaların temel amacı, endüstriyel motorların verimliliğini artırmak ve çevreye duyarlı motor teknolojilerini teşvik etmektir.

Düzenlemelerle birlikte, motor verimlilikleri farklı sınıflara ayrılarak daha açık bir şekilde tanımlanmıştır:

- Standart Verimli Motorlar: Bu motorlar, genel kullanım için uygun olan ve enerji verimliliği açısından ortalama bir performans sergileyen motorlardır.
- Enerji Verimli Motorlar: Bu motorlar, standart verimli motorlara göre daha düşük enerji tüketimi sağlar. Çoğu endüstriyel uygulama için daha uygun ve tasarruf sağlayıcı seçeneklerdir.
- Premium Verimli Motorlar: En yüksek enerji verimliliğine sahip motorlardır. Yüksek maliyetleri olsa da uzun vadede enerji tasarrufu sağlayarak işletmeler için ekonomik avantajlar sunar ve çevresel etkileri minimize eder.

Yenilikçi motor teknolojileri ile her geçen gün daha verimli motorların üretilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu gelişmeler, motor tasarımındaki ilerlemeler ve kullanılan malzemelerdeki yenilikler sayesinde motor verimliliğini artırmakta ve daha sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Ayrıca, bu gelişmelerle paralel olarak, ilgili mevzuat ve standartlar da güncellenerek, teknolojinin en verimli şekilde kullanılmasını sağlamaktadır.

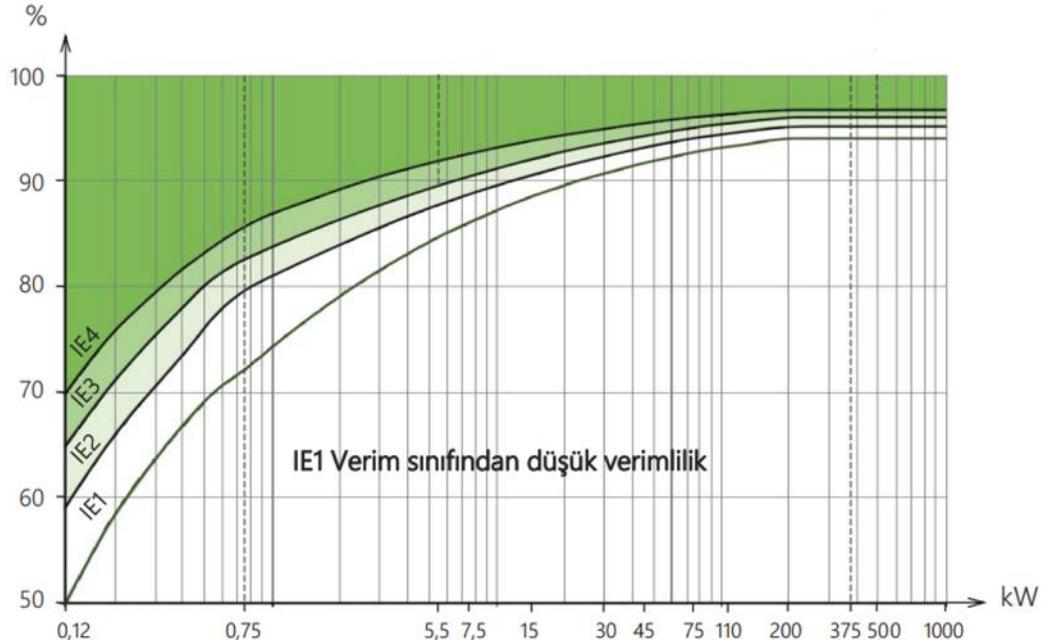
2009 yılında, başta AB ülkeleri olmak üzere dünya genelinde benimsenen IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) 60034 serisi standartları, motor verimlilik sınıflarını yeniden gözden geçirmiştir.

Bu güncellenmiş sınıflar, motorların verimlilik seviyelerini daha net bir şekilde tanımlar ve endüstriyel sektördeki motor üreticileri ve kullanıcıları için bir rehber oluşturur. Bu yeni sınıflandırmalar, aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- IE1 (Standart Verimlilik)
- IE2 (Yüksek Verimlilik)
- IE3 (Enerji Verimli)
- IE4 (Premium Verimli)

2014 yılında, IEC 60034-30-1 standardı, motor verimliliği sınıflarına IE4 sınıfını da dâhil ederek güncellenmiştir. Bu güncelleme, 0,12 kW ile 1000 kW arasındaki çıkış gücüne sahip elektrik motorlarının verimlilik seviyelerinde önemli düzenlemeler getirmiştir. Yeni düzenlemelerle birlikte, elektrik motorlarının enerji verimliliği daha sıkı standartlarla belirlenmiş ve endüstriyel motorların verimliliğini artırmaya yönelik ek adımlar atılmıştır [31].

Bu sınıfların verimlilik-çıkış gücü dağılımı Şekil 1.2.'de verilmiştir.



Şekil 1.2. 4 kutuplu asenkron motorun verimlilik sınıfları grafiği.

PN kW	50 Hz IE2			50 Hz IE3			50 Hz IE4		
	2/3000	4/1500	6/1000	2/3000	4/1500	6/1000	2/3000	4/1500	6/1000
0,12	53,6	59,1	50,6	60,8	64,8	57,7	66,5	69,8	64,9
0,18	60,4	64,7	56,6	65,9	69,9	63,9	70,8	74,7	70,1
0,2	61,9	65,9	58,2	67,2	71,1	65,4	71,9	75,8	71,4
0,25	64,8	68,5	61,6	69,7	73,5	68,6	74,3	77,9	74,1
0,37	69,5	72,7	67,6	73,8	77,3	73,5	78,1	81,1	78
0,4	70,4	73,5	68,8	74,6	78	74,4	78,9	81,7	78,7
0,55	74,1	77,1	73,1	77,8	80,8	77,2	81,5	83,9	80,9
0,75	77,4	79,6	75,9	80,7	82,5	78,9	83,5	85,7	82,7
1,1	79,6	81,4	78,1	82,7	84,1	81	85,2	87,2	84,5
1,5	81,3	82,8	79,8	84,2	85,3	82,5	86,5	88,2	85,9
2,2	83,2	84,3	81,8	85,9	86,7	84,3	88	89,5	87,4
3	84,6	85,5	83,3	87,1	87,7	85,6	89,1	90,4	88,6
4	85,8	86,6	84,6	88,1	88,6	86,8	90	91,1	89,5
5,5	87	87,7	86	89,2	89,6	88	90,9	91,9	90,5
7,5	88,1	88,7	87,2	90,1	90,4	89,1	91,7	92,6	91,3
11	89,4	89,8	88,7	91,2	91,4	90,3	92,6	93,3	92,3
15	90,3	90,6	89,7	91,9	92,1	91,2	93,3	93,9	92,9

Şekil 1.3. IEC 60034-30 (50 Hz)'e göre verimlilik sınıfı tabloları.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Asenkron motorlar ucuz maliyetli, verimli olmaları, sağlamlık ve bakım gerektirmemesiyle piyasada en çok tercih edilen motor türüdür. Bu kadar yaygın kullanılmasının sonucu olarak enerji tüketiminde en önde gelen motorlardan olmasını sağlamaktadır. Bu nedenle kaynak araştırması kısmında asenkron motorun verim, maliyet ve kalkış torku için optimum tasarım parametreleri üzerine yapılmış araştırmalar incelenmiştir.

Şal ve Ergene (2010), rotor oluk geometrisinin asenkron motor performansına etkisinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiş, motor kalkış performansının artırılması amacıyla standart oluk geometrisini derin oluk ve çift kafesli oluk geometrileri ile sonlu elemanlar yöntemiyle tasarlamış ve her bir tasarım için yapılan analizlerin sonucunda en yüksek kalkış moment değerinin çift kafesli oluk geometrisinde olduğunu gözlemlemiştir.

Akçomak ve Partal (2022), çift kafesli rotorda alüminyum ve bakır birlikte kullanarak motor verimi üzerine etkisi incelenmiştir. Bunun için 6 farklı rotor oluk geometrisi oluşturulmuş alüminyum ve bakır iletkenleri aynı rotorlarda kullanılmış her birini ayrı ayrı başlıklarda incelenmiş sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çalışmanın sonunda motor verim sınıfının yükseltildiği belirtilmiştir.

Acar (2017), verim sınıfı artırmaya yönelik yapılmış olan çalışmada birçok farklı tasarım yapılarak bakır sargıların artırılması, nüve boyutunun artırılması, yüksek kalite sac kullanılması, rüzgar ve sürtünme kayıpları için kaliteli rulman seçimi ve rotor iletkenlerinin bakır çubuklarla değiştirilerek verim artışının sağlanabileceğini yüksek lisans tezi olarak sunmuştur.

Al-Qoshachee (2017), bu yüksek lisans çalışmasında IE3 verim sınıfına ait 5.5 kW asenkron motorun tasarımına yönelik motor yapısı, parametreleri, fiziksel boyutları tasarım aşama ve hesaplarından bahsedilmiş sonlu elemanlar yöntemiyle tasarım gerçekleştirilmiş ve performans analizi sunulmuştur.

Kaygısız (2008), bu çalışmada asenkron motorların eşdeğer devre parametrelerini, performans analizini, nominal çalışma değerlerini, thevenin eşdeğer devresine göre moment ve hız grafiğini çizen Matlab aracılığıyla 3 alt program yazılmıştır.

Livadaru vd. (2008), doğrudan başlatmalı çift oluklu madencilik endüstrisine yönelik yüksek güçlü (630 kW) endüksiyon motoru sonlu elemanlar yöntemiyle tasarım ve analizi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu olan tasarımda gerekli olan şartlar kalkış akımı nominal akım oranı 3'ten büyük olmamalı kalkış torku nominal torkun 1.4 katı kadar olmalı ve nominal çalışma akımı 90 amperi geçmemelidir. bunun için 3 farklı tasarım yöntemi üzerinde çalışılmış ve çift oluk yapısı da kalkış akımını düşürmek için dış katmandaki oluklara çakılan manyetik demir çubuklarında tasarım için yeterli olmayacağı görülmüştür çözüm olarak ise yüksek kaliteli olan ferromanyetik laminasyonlu malzeme kullanılması saptanmıştır.

Gallego (2014), 7.5 kW asenkron motorun IE4 verimlilik sınıfında dizayn ve optimizasyonu adlı yüksek lisans tezinde referans aldığı IE2 sınıfı motorda stator dolum oranını ve laminasyonlu çeliğin kalitesini artırarak belirli bir oranda kayıpları azaltmış ve sadece bu yöntemlerle istenilen verim seviyesine ulaşamadığını görülmüştür. Stator çapı ve stator oluklarının geometrisini değiştirmeden sadece rotor iletkenlerini bakır iletkenlerle değiştirerek istenilen seviyeye ulaşamayacağını belirtmiş. Ardından rotoru alüminyum iletkenli tutmak için stator çapını ve rotor geometrisi artırarak aynı verim sınıfına ulaşılmasının mümkün olduğunu açıklamıştır.

Dems vd. (2020), asenkron motorlarda nüve saclarını kesme yönteminin parametreler üzerindeki etkisini inceledikleri bu çalışmada kesilme yönteminin sacın manyetik özelliklerinde değişikliğe neden olduğunu çeşitli frekans ve farklı büyüklükteki sac numuneleri için inceleme yapılmış tüm kesme yöntemlerinin sacın manyetik özelliklerinde bozulma meydana getirdiğini ancak lazer kesimin mekanik kesime göre daha fazla bozulmaya neden olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Verucchi vd. (2017), bu makalede asenkron motorların optimal tasarımı için kayıpları azaltmayı, verimliliği artırmaya odaklanılmıştır. Bunun için açık yuvalı stator oluklarını manyetik kama ile kapatarak manyetik kamaların boşta çalışma akımını manyetik nüvedeki kayıpları azalttığı görülmüştür. Farklı boyutlarda ve bağlı geçirgenlik değerlerinde manyetik kamalar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

Aybeniz vd. (2022), bu çalışmada IE3 verim sınıfına ait 5.5 kW gücünde 4 kutuplu motor referans alınarak motorun stator olukları genişletilmiş statordaki iletken çapı artırılmış, laminasyon sacı yüksek kalitedeki saca değiştirilerek motorun verimi IE4 verim sınıfına girecek bir değere yükseltilmiştir.

Sathishkumar vd. (2014), bu makalede otomotiv uygulamaları için 5 beygir alüminyum döküm rotor yerine bakır döküm rotorlu motorun tork, verimlilik ve kayıplar bakımından daha iyi hale getirerek elektrikli araçlar için daha uygun olduğu belirtilmiştir.

Tudorache vd. (2009), bu makalede motor ve jeneratör olarak çalışan bir endüksiyon makinesi referans alınarak geliştirilen sayısal modeller, makinenin uygun şekilde yeniden tasarlanması için yararlı sonuçlar sunmuştur. Bakır kafesle donatılmış endüksiyon makinesinin verimliliği, her iki durumda da motor veya jeneratör olarak alüminyum kafes kullanan benzer makinenin verimliliğinden daha üstündür. Ancak, bakır kafesli motorda alüminyum kafesli motora göre elde edilen daha küçük bir başlangıç torku, ilk dezavantajı temsil eder. Bu dezavantaj, makinenin uygun şekilde yeniden tasarlanmasıyla ortadan kaldırılmıştır. Bundan sonra, bakır kafesli motorun başlangıç torku, alüminyum kafesli motorunkine benzer hale gelir ancak daha yüksek enerji verimliliğine sahiptir. Alüminyum kafesli asenkron motor için elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel ölçümlerle doğrulanmıştır.

3. ASENKRON MOTOR YAPISI

Asenkron motorlar, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren, dayanıklı ve verimli yapısıyla geniş bir kullanım alanına sahip olan motor türleridir. Motorun yapısı, sabit kalan stator ve dönen rotor olmak üzere iki ana bölümden oluşur.

Stator, manyetik alanı oluşturan sabit parçadır ve genellikle ince silisli sac levhalardan imal edilen çekirdeği, bu çekirdek üzerinde yer alan olukları ve elektriksel sargıları içerir. Üç fazlı alternatif akım kaynağına bağlanan stator sargıları, rotorun dönmesini sağlayan döner bir manyetik alan oluşturur.

Rotor ise statorun oluşturduğu manyetik alanın etkisiyle dönen parçadır. Kafes tipi ve sargılı olmak üzere iki temel rotor tasarımı bulunur. Kafes tipi rotor, alüminyum veya bakır çubukların kısa devre halkaları ile birleştirilmesiyle oluşan basit ve dayanıklı bir yapıya sahiptir. Sargılı rotor ise daha karmaşık bir tasarıma sahip olup, dış devrelerle bağlantı yapılarak motorun kalkış momentinin kontrol edilmesine olanak tanır.

Stator ve rotor arasındaki hava aralığı, motorun verimli çalışması için kritik bir öneme sahiptir; bu aralık, manyetik akının etkinliği ve mekanik güvenilirlik açısından dikkatlice tasarlanır. Rotorun dengeli bir şekilde dönmesi, statorun iki ucuna yerleştirilen rulmanlarla sağlanırken, bu rulmanlar koruyucu kapaklarla dış etkenlere karşı korunur. Motorun soğutulması, arka kapakta yer alan bir fan aracılığıyla gerçekleştirilir ve motor gövdesinin girinti çıkıntılı tasarımı sayesinde soğutma verimliliği artırılır. Elektriksel bağlantılar, klemens kutusu üzerinden yapılır ve motorun teknik özellikleri, gövde üzerindeki etikette belirtilir. Asenkron motorların dayanıklı mekanik yapısı, etkili soğutma sistemi ve enerji verimliliği, bu motorları endüstriyel ve bireysel uygulamalarda vazgeçilmez bir seçenek haline getirmektedir [11,32].

3.1 Stator

Stator, bir elektrik motorunun sabit kısmını oluşturur ve alternatif akımla beslenen sargıları taşıyarak manyetik alanın oluşumundan sorumludur. Alternatif akımın kullanımı, histerezis ve fuko (eddy) akımlarından kaynaklanan enerji kayıplarını kaçınılmaz hale getirir.

Bu kayıpların minimum seviyeye indirilmesi için, statorda kullanılan malzeme büyük bir manyetik endüksiyon kapasitesine ve düşük histerezis kayıplarına sahip elektrik çeliği (silisyumlu sac) olmalıdır. Sac malzemeler, hassas kesim yapılabilmesi için özel presler ve kalıplar kullanılarak şekillendirilir. Ayrıca, sacın her bir katmanının yüzeyi elektriksel olarak yalıtılır. Bu yalıtım işlemi, sac katmanları arasında fuko akımlarının dolaşmasını engelleyerek enerji kayıplarını ve ısınmayı azaltır. Kesim işlemi tamamlandıktan sonra, bu saclar üst üste dizilerek pres yardımıyla sıkıştırılır ve bir stator sac paketi oluşturulur.

Oluşturulan sac paketi, motorun tasarımına uygun şekilde hazırlanan sargılarla donatılır. Bu sargılar, elektrik akımının geçtiği ve manyetik alanın üretildiği motorun aktif bileşenlerinden biridir. Sargılar yerleştirildikten sonra, kaçakların engellenmesi ve daha iyi yalıtım için stator grubu, verniğin içine batırılır. Vernikli stator grubu önceden ısıtılmış motor gövdesine presleme yöntemiyle sabitlenir. Bu ısıtma işlemi, gövdenin genişmesini sağlayarak statorun kolayca monte edilmesine olanak tanır. Gövde soğuduğunda, genişlemenin tersine dönmesiyle stator gövde içinde sıkıca sabitlenir ve hareket edemez hale gelir.

Montajın son aşamasında, statorun bulunduğu motor gövdesi motor kapakları ile kapatılır. Bu kapaklar, motorun mekanik hareketini destekleyen rulman yuvalarını içerir. Rulmanlar sayesinde rotorun dönmesi için gerekli mekanik altyapı hazırlanır. Böylelikle stator, rotor ve diğer bileşenler uyumlu bir şekilde çalışacak şekilde monte edilmiş olur [11].

3.2 Rotor

Alternatif akımın oluşturduğu histerezis ve fuko kayıplarını azaltmak için rotor sac paketlerden yapılır. İnce sac tabakalar manyetik kayıpları en aza indirmek amacıyla yalıtılmış şekilde üst üste yerleştirilir. Sac paketlerin üzerine rotor kanalları açılır ve bu kanallara erimiş alüminyum dökülerek rotor çubukları oluşturulur. Rotor, her iki ucundan alüminyum halkalarla kısa devre edilerek sincap kafes yapısı tamamlanır. Son aşamada, rotorun dış çapı, hesaplanan hava aralığına uygun şekilde işlenerek torna işleminden geçirilerek istenen ölçüye getirilir.

Ardından varsa balans almak için balans cihazında tarama yapılır. Bu üretim yöntemi, rotorun performansını artırırken enerji kayıplarını minimize etmeyi hedefler [11].

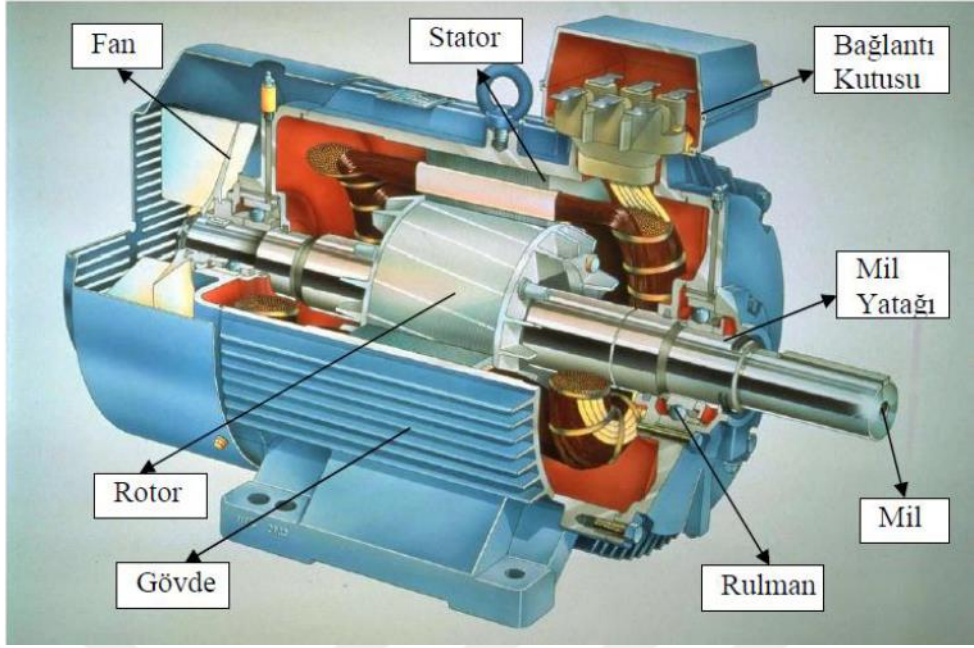
İki ana tip asenkron motor vardır. Bunlar;

- Sincap kafesli (Kısa devre rotorlu) asenkron motorlar
- Bilezikli (Sargılı rotorlu) asenkron motorlar

3.2.1 Sincap kafesli (Kısa devre rotorlu) asenkron motorlar

Rotor oluklarına bakır veya alüminyum çubuklar yerleştirilir ve bu çubuklar, her iki ucundan aynı iletken halkalarla kısa devre edilerek bir döngü oluşturur. Bu yapı, sincap kafesine benzediği için motor “sincap kafesli” olarak adlandırılır [13]. Küçük güçlü asenkron motorlarda, rotor sargısının üretimi genellikle alüminyumun enjeksiyon döküm yöntemiyle gerçekleştirilir. Bu yöntem, alüminyumun sıvı halde rotor oluklarına basınçlı şekilde püskürtülmesiyle uygulanır. Bu sayede rotor, homojen bir iletken yapıya sahip olur ve üretim süreci hem hızlı hem de ekonomik bir şekilde tamamlanır.

Rotor tasarımında dikkat çeken bir diğer özellik ise kısa devre çubuklarının eğimli olarak yapılmasıdır. Bu eğim, rotor-stator arasındaki hava aralığında oluşabilecek manyetik akı harmoniklerini azaltmayı hedefler. Harmoniklerin azaltılması, motorun daha sessiz çalışmasına, titreşimlerin minimuma indirilmesine ve tork dalgalanmalarının azaltılmasına katkıda bulunur. Bu tasarım detayı, motorun performansını ve verimliliğini artırırken, çalışma ömrünü de uzatır [33].



Şekil 3.1. Üç fazlı sincap kafesli asenkron motor kesiti [12].

3.2.2 Bilezikli (Sargılı rotorlu) asenkron motorlar

Üç fazlı olarak tasarlanan motorlarda rotor oluklarına yıldız bağlı rotor sargıları yerleştirilir. Yerleştirilen sargıların uçları, mil üzerindeki fırça-bilezik sistemi aracılığıyla dış devreye aktarılır. Bu yapı, motorun hız ve moment kontrolünün dış devrede yapılmasına olanak tanır. Dış devreye alınan rotor sargı uçlarına direnç eklenmesi veya bağımsız bir gerilim kaynağı bağlanması, motorun çalışma koşullarını ayarlamak için yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir.

Fırça-bilezik sistemi, rotor ile dış devre arasında elektriksel bağlantıyı sağlarken, çalışma sırasında ark oluşumu riski taşır. Bu arklar, özellikle yüksek akım veya aşırı yük durumlarında meydana gelebilir ve fırça-bilezik bileşenlerinde aşınmaya yol açabilir. Bu nedenle, bu sistemin düzenli bakımı ve doğru kullanımı, motorun güvenilirliğini ve ömrünü artırmak için kritik öneme sahiptir [33]. Bilezikli asenkron motorların rotorunda, devrenin direncini ayarlamak için kullanılan bilezikler bulunur. Rotor sargıları bu bilezikler üzerinden kısa devre edilir. Bu tasarım, motorun hız ve moment kontrolü için önemli bir esneklik sağlar. Motorun "bilezikli" ya da "sargılı rotor" olarak adlandırılmasının nedeni, bu bileziklerin ve rotor sargılarının tasarımındaki belirgin rolünden kaynaklanır [13].

3.2.3 Sincap kafesli ve rotoru sargılı asenkron motorların karşılaştırılması

Sincap kafesli motor daha basit bir yapıya sahiptir. Rotoru, genellikle alüminyum veya bakır çubukların oluklara yerleştirilip uç halkalarla kısa devre edilmesiyle oluşturulur. Daha az malzeme (özellikle bakır) kullanımı ve basit üretim süreçleri sayesinde daha ekonomiktir. Daha az hareketli ve aşınabilir parça içerdiğinden bakım ihtiyacı düşüktür. Dayanıklı ve uzun ömürlüdür. Sabit hız gerektiren uygulamalarda idealdir. Hız ve moment kontrolü sınırlıdır, çünkü dış devre bağlantısı yoktur. Endüstriyel fanlar, pompalar, kompresörler gibi sabit hız ve düşük bakım gerektiren uygulamalarda yaygındır [35].

Rotoru sargılı asenkron motorların daha karmaşık bir tasarımı vardır. Rotor sargıları, bilezikler ve fırçalar aracılığıyla dış devreye bağlanır. Bu nedenle yapısı daha detaylı ve bakımı daha zordur. Yapısındaki sargılar, bilezikler ve fırçalar nedeniyle maliyeti daha yüksektir. Fırça ve bileziklerin düzenli bakım gerektirmesi nedeniyle işletim masrafları daha yüksektir ve mekanik aşınma olasılığı fazladır. Hız ve moment kontrolü için geniş bir ayar aralığı sunar. Rotor devresine direnç eklenerek yol alma akımı azaltılabilir ve yol alma momenti artırılabilir. Bu özellik, motorun yavaş başlatma ve yüksek moment gerektiren uygulamalarda kullanılmasını sağlar. Yüksek moment ve hassas hız kontrolü gerektiren vinç, asansör ve ağır makinelerde tercih edilir [36].

4. ASENKRON MOTORUN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Elektrik makinelerinin çalışma prensibi, temel olarak Faraday, Amper ve Biot-Savart yasalarına dayanır.

- Amper Kanunu:

Bir iletkenin akım geçtiğinde, iletkenin etrafında bir manyetik alan oluşur. Bu manyetik alan, akımın büyüklüğüne ve iletkenin şekline bağlıdır. Akımın etkisiyle meydana gelen manyetik akı, elektrik makinelerinin manyetik devrelerinin temelini oluşturur.

- Faraday Kanunu:

Bir iletkenin zamana bağlı olarak değişen manyetik akı, bu iletkenin bir gerilim indüklenmesine neden olur. Faraday kanunu, jeneratörlerin ve transformatörlerin temel prensibidir ve elektrik enerjisinin üretimi ile doğrudan ilişkilidir.

- Biot-Savart Yasası:

Bir manyetik alan içinde bulunan ve üzerinden akım geçen bir iletken, manyetik alanla etkileşime girer ve üzerine bir kuvvet etkisi oluşur. Bu kuvvet, genellikle alan dışına doğru yönelir. Biot-Savart yasası, elektrik motorlarında rotorun hareket etmesini sağlayan kuvvetin temelini açıklar.

Bu yasaların birlikte çalışması, elektrik makinelerinin hem enerji üretiminde (jeneratör) hem de enerji dönüşümünde (motor ve transformatör) temel prensiplerini oluşturur.

Asenkron motorlarda stator ile rotor arasında doğrudan bir elektriksel bağlantı bulunmaz. Stator sargılarına uygulanan gerilimle, sargılardan bir akım akışı sağlanır. Bu akım, Amper Kanunu gereği, stator sargılarının çevresinde bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan, zamanla değişerek döner bir özellik kazanır ve buna döner manyetik alan denir.

Döner manyetik alan, statorun manyetik devresi üzerinden geçip rotoru keserek, rotor sargılarında bir gerilim indükler. Faraday Kanunu gereği, rotor sargılarında indüklenen bu gerilim, rotor üzerinden bir akımın akmasını sağlar.

Rotor üzerinden geçen akım, döner manyetik alanla etkileşime girer ve bu etkileşim sonucu, Biot-Savart Yasası gereği, rotor üzerinde bir elektromanyetik kuvvet oluşur. Bu kuvvet, rotor üzerinde bir elektromanyetik moment üreterek rotorun dönmesini sağlar.

Bu şekilde, statorda üretilen enerji, manyetik alan aracılığıyla rotora aktarılır ve mekanik enerjiye dönüştürülerek motor çalıştırılır. Bu bağlantısız enerji aktarımı, asenkron motorların temel çalışma prensibini oluşturur.

Asenkron motorlar bir, iki ve üç fazlı olarak üretilir ve farklı faz sayıları motorun yapısını ve kullanım alanını belirler:

Bir fazlı asenkron motorlar statorlarında, aralarında 90° elektriksel açı farkı bulunan iki sargı bulunur: ana sargı ve yardımcı sargı. Yardımcı sargı, genellikle motorun ilk hareketini başlatmak için kullanılır ve motor çalıştıktan sonra devreden çıkarılabilir. Bu motorlar, genellikle küçük güçlü cihazlarda kullanılır.

İki fazlı asenkron motorlar statorlarında, aralarında 90° elektriksel açı farkı olan iki sargı bulunur. Bu sargılar, aynı özelliklere sahiptir ve motorun döner manyetik alan üretmesini sağlar. İki fazlı motorlar, genellikle özel uygulamalarda veya eski sistemlerde tercih edilir.

Üç fazlı asenkron motorlar statorlarında, aralarında 120° elektriksel açı farkı olan üç adet faz sargısı bulunur. Bu sargılar, motorun döner manyetik alan oluşturmasını sağlar ve yüksek verimlilikle çalışır. Üç fazlı sargılar, yıldız veya üçgen bağlantı şeklinde bağlanabilir. Üç fazlı motorlar, sanayi ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

Faz sayısına bağlı olarak, motorların tasarımı, performansı ve uygulama alanları değişir. Bir fazlı motorlar küçük güç gereksinimleri için uygunken, üç fazlı motorlar yüksek güç ve verimlilik gerektiren endüstriyel uygulamalarda tercih edilir [14].

4.1 Döner Manyetik Alan

Döner manyetik alan, asenkron motorların çalışmasını sağlayan temel fiziksel olgulardan biridir. Bu alan, stator sargılarından geçen alternatif akımların etkileşimi sonucu oluşur ve motorun rotorunu döndüren kuvveti üretir.

Üç fazlı bir asenkron motorda, stator üzerindeki faz sargıları motor düzleminde 120°'lik elektriksel açı farkıyla yerleştirilmiştir. Her bir faz sargısından geçen alternatif akımlar da aynı şekilde aralarında 120°'lik faz farkına sahiptir. Bu akımların zamanla değişen büyüklükleri, stator sargılarında sürekli değişen bir manyetik alan üretir. Ancak bu değişim kaotik değil, düzenlidir.

Bu düzenli manyetik alan, statorun etrafında sabit bir hızla dönen bir alan oluşturur ve bu nedenle "döner manyetik alan" olarak adlandırılır.

Döner manyetik alan, stator ve rotor arasında bir enerji transfer mekanizması oluşturur. Alan, rotorun manyetik devresinden geçerken, rotor üzerinde bir gerilim indükler. Bu gerilim rotor sargılarından bir akım geçirir ve bu akım döner manyetik alanla etkileşime girerek rotorun dönmesini sağlar.

Döner manyetik alan, motorun hareket mekanizmasının temelini oluşturur. Sabit hız gerektiren birçok endüstriyel uygulamada döner manyetik alanın kararlılığı büyük önem taşır. Ayrıca, alanın oluşturulmasında statorun tasarımı, faz sayısı ve besleme akımlarının doğru faz farklarıyla sağlanması kritik rol oynar [34].

4.2 Manyetik Alan

Manyetik alan, elektrik makinelerinin ve elektromanyetik cihazların temel çalışma mekanizmasını sağlayan, fiziksel bir olgudur. Bir akım taşıyan iletken veya manyetik bir malzeme, çevresinde görünmez bir etkileşim bölgesi oluşturur; bu bölge, manyetik alan olarak tanımlanır. Manyetik alan, enerji dönüşümü ve hareket üretiminin anahtarıdır.

Bir mıknatıs örneğini ele alırsak, bir mıknatısın yakınına demir gibi bir malzeme yaklaştırıldığında, mıknatıs demir parçasını kendine doğru çeker. Bu, mıknatısın oluşturduğu manyetik alanın demir üzerinde bir kuvvet uyguladığını gösterir.

Bu kuvvetin etkisi, manyetik alanın yoğunluğu ve mesafesi ile ilişkilidir. Manyetik alanı göstermek için çizilen akı çizgileri, alanın yönünü ve yoğunluğunu ifade eder. Bu çizgiler, alanın kaynağından çıkar ve alanın etkilediği yerlere doğru uzanır.

Elektrik makinelerinde manyetik alan, enerji transferini ve dönüşümünü sağlar. Örneğin, bir motorun statorundaki döner manyetik alan, rotorun dönmesine neden olur. Jeneratörlerde ise bir iletken manyetik alan içinde hareket ettirildiğinde, iletken üzerinde bir gerilim indüklenir. Bu mekanizmalar, manyetik alanın elektrik enerjisiyle doğrudan etkileşimini ve bunun nasıl kontrol edilebileceğini gösterir.

Sonuç olarak, manyetik alan, fiziksel bir kuvvet alanı olmasının ötesinde, enerji dönüşümünün temel taşlarından biridir. Elektrik makinelerinde ve modern teknolojiye, manyetik alanın kontrollü şekilde kullanımı, verimli enerji üretimi ve hareket kontrolü için vazgeçilmezdir.

4.2.1 Manyetik akı

Manyetik akı, manyetik alanın gücünü ve etkisini ifade eden bir kavramdır. Bu akı, bir manyetik alanın içinden geçen toplam manyetik kuvvet çizgilerinin sayısını temsil eder ve Φ sembolüyle gösterilir. Birimi weber (Wb)'dir. Manyetik akı, hem alanın yoğunluğunu hem de alanın kapsadığı yüzeyi dikkate alarak manyetik etkileşimi anlamamıza yardımcı olur.

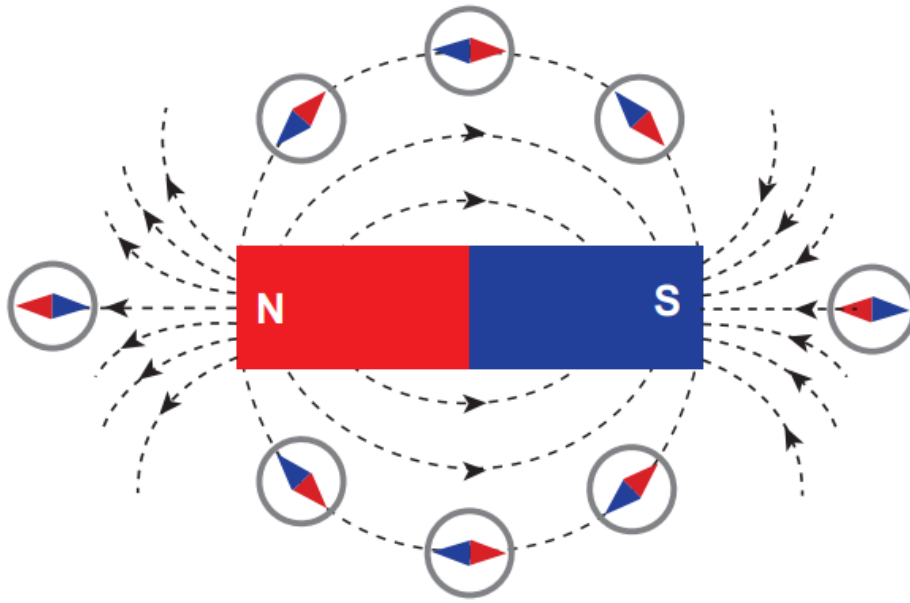
Mıknatıslar üzerinden düşünüldüğünde, manyetik akının yönü her zaman mıknatısın kuzey kutbundan çıkar ve güney kutbuna doğru ilerler. Ancak bu akı, yalnızca dışarıdan gözlemlenen bir hareket değildir; aslında kapalı bir döngü oluşturur ve mıknatısın içinden geçerek kuzey kutbuna geri döner. Bu özellik, manyetik akının her zaman bir kapalı devre şeklinde hareket ettiğini gösterir.

Manyetik akının büyüklüğü, manyetik alanın yoğunluğuna ve bu alanın etkilediği yüzeyin büyüklüğüne bağlıdır. Örneğin, bir alandaki manyetik kuvvet çizgileri sıklaşıyorsa, bu bölgedeki manyetik akı artar.

Manyetik akının yolundaki malzemeler de akının davranışını etkiler. Demir gibi manyetik malzemeler, manyetik akının geçişini kolaylaştırır ve akıyı kendi üzerinden

yönlendirir. Bu, demirin yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olmasıyla ilgilidir. Plastik gibi manyetik olmayan malzemeler, manyetik akının yolunu değiştirmez, çünkü bu tür malzemeler manyetik alanla etkileşime girmez.

Bu özellikler, elektrik makinelerindeki manyetik devrelerin tasarımında kritik bir rol oynar. Manyetik akının doğru bir şekilde yönlendirilmesi ve yoğunlaştırılması, motor, jeneratör ve transformatör gibi cihazların verimli çalışması için gereklidir. Özetle, manyetik akı, manyetik alanın görünmeyen ancak hayati bir bileşenidir ve enerji dönüşümünün temelini oluşturur [13].



Şekil 4.1. Manyetik akının izlediği yol.

4.2.2 Elektromanyetik alanın üretilmesi

İçinden akım geçen bir iletkenin çevresinde bir manyetik alan oluşur ve bu, elektrik ile manyetizmanın temel ilişkilerinden biridir. Akımın büyüklüğü arttıkça, oluşturulan manyetik alanın gücü de artar. Alanın yönünü belirlemek için sağ el kuralı kullanılır: Sağ elin başparmağı akımın yönünü gösterirken, parmakların kavrayışı manyetik alanın yönünü belirtir. Bu basit kural, manyetik alanların yönünü anlamayı ve uygulamayı kolaylaştırır.

Eğer bir iletken bir bobin şeklinde sarılırsa, her bir sargının oluşturduğu manyetik alanlar üst üste biner ve birleşerek daha güçlü bir toplam manyetik alan oluşturur. Bu durum, bobinlerin elektrik makinelerinde ve elektromanyetik cihazlarda neden sıkça kullanıldığını açıklar: Bobin, manyetik alanı belirli bir bölgede yoğunlaştırır ve daha güçlü bir etki sağlar.

Bobin manyetik nüveye sarıldığında, manyetik akı bu nüve üzerinden devresini tamamlar. Bu, akının kolayca geçiş yapmasını sağlar ve manyetik alanı yoğunlaştırır.

Demir gibi yüksek manyetik geçirgenlik özelliğine sahip malzemeler, manyetik alanın etkisini artırır ve cihazın verimliliğini yükseltir. Ampere Kanunu, manyetik alanların nasıl üretildiğini ve kontrol edildiğini anlamak için bir rehberdir [13].

4.2.3 Manyetik akı yoğunluğu

Manyetik akı yoğunluğu, bir manyetik alanın ne kadar güçlü olduğunu ve bu alanın belirli bir bölgedeki etkisini anlamamıza yardımcı olan temel bir kavramdır. Birim yüzey alanından dik olarak geçen toplam manyetik akının ölçüsü olarak tanımlanır. Bu büyüklük, manyetik alanın yoğunluğunu ifade eder ve B harfi ile sembolize edilir [13].

Manyetik akı yoğunluğu, SI birim sisteminde tesla (T) ile ölçülür. Örneğin, bir manyetik alanın yoğunluğu 1 tesla ise, bu alan bir metrekaresel bir yüzeyden bir weber'lık akı geçtiğini gösterir. Tesla birimi, elektromanyetizma alanındaki katkılarıyla tanınan Nikola Tesla'nın adını taşır. Alternatif olarak, CGS birim sisteminde gauss (G) kullanılır; 1 tesla, 10,000 gauss'a eşittir [37].

4.2.4 Malzemenin manyetik geçirgenliği

Manyetik geçirgenlik (μ), bir malzemenin manyetik alanı iletme kabiliyetini tanımlayan önemli bir fiziksel özelliktir. Basitçe ifade etmek gerekirse, bir malzemenin manyetik akıyı ne kadar kolay geçirebileceğini gösterir. Manyetik geçirgenlik değeri yüksek olan malzemeler, manyetik alanı daha etkili bir şekilde yönlendirebilir ve bu alanın malzeme içinde daha kolay oluşmasını sağlar.

Boşluk (veya vakum) için manyetik geçirgenlik, μ_0 sembolüyle ifade edilir ve sabit bir değere sahiptir: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m (henry/metre). Bu, evrensel bir sabit olarak boşluktaki manyetik alanın temel özelliklerini tanımlar.

Malzemenin geçirgenliği ile havanın geçirgenliği arasındaki oran, bağıl geçirgenlik (μ_r) olarak adlandırılır. Bu oran, malzemenin manyetik özelliklerinin boşluğa kıyasla ne kadar güçlü olduğunu ifade eder. Bağıl geçirgenliği yüksek bir malzeme, manyetik alanları daha etkin bir şekilde yönlendirir ve bu da malzemenin manyetik akıyı taşımada üstün olduğunu gösterir.

Elektrik makinelerinde genellikle çelik gibi manyetik özellikleri güçlü malzemeler kullanılır. Manyetik akının hava yerine çelik üzerinden 2000 ila 6000 kat daha kolay geçer. Bu durum, manyetik akı kayıplarını azaltarak makinelerin daha verimli çalışmasını sağlar [13].

4.3 Kayma

Kayma, asenkron motorların çalışma prensibini açıklayan temel bir kavramdır ve motorun davranışını anlamada önemli bir rol oynar. Bu motorlarda rotor, statordaki döner manyetik alanın oluşturduğu elektromanyetik kuvvet sayesinde döner. Ancak rotorun hızı hiçbir zaman döner manyetik alanın hızı olan senkron hıza tam olarak ulaşamaz.

Bu durumun sebebi, rotorun döner manyetik alan çizgilerini kesmesidir. Rotorun hızı arttıkça, bu manyetik alan çizgilerini kesme oranı azalır. Bu azalma, rotorda indüklenen gerilimi düşürür ve dolayısıyla rotorun oluşturduğu elektromanyetik kuvvet ve moment de azalır. Bu etki, rotorun senkron hıza erişememesine neden olur ve rotor her zaman döner alan hızının biraz gerisinde kalır [32,33].

Kayma (4.1) denklemi ile hesaplanır.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (4.1)$$

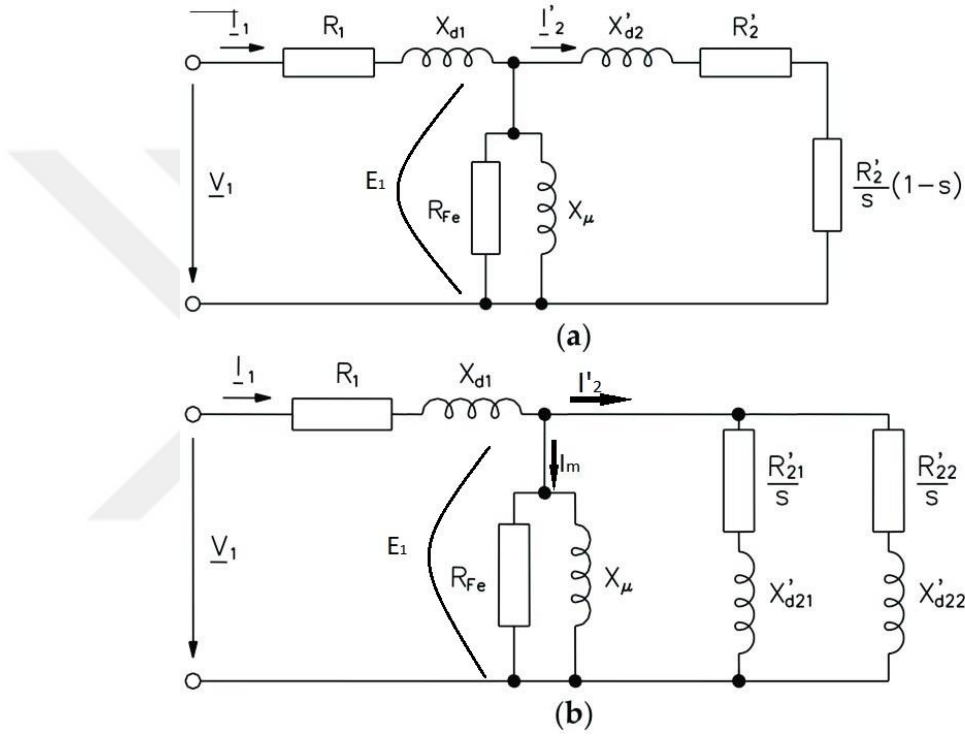
Kayma, rotor ile döner manyetik alan arasındaki hız farkını ifade eder. Bu fark, rotorda akımların indüklenmesi ve motorun moment üretebilmesi için zorunludur.

Eğer rotor hızı senkron hız ile tamamen eşit olsaydı, yani kayma sıfır olsaydı, rotorda indüklenen akım ve moment oluşmazdı. Bu nedenle kayma, asenkron motorların çalışması için hayati bir unsurdur [32].



5. ASENKRON MOTORUN EŞDEĞER DEVRESİ

Asenkron motorların eşdeğer devresi, motorun elektriksel ve manyetik davranışlarını analiz etmek için kullanılan bir modeldir. Bu devre, motorun karmaşık fiziksel yapısını daha basit elektriksel bileşenlerle temsil eder ve genellikle transformatör eşdeğer devresine benzer bir yapıdadır. Eşdeğer devre, stator (sabit kısım) ve rotor (dönen kısım) arasında enerji aktarımını ve kayıpları açıklamak için çeşitli elektriksel bileşenleri içerir [15].



Şekil 5.1. Asenkron motor eşdeğer devresi (a) Tek oluk (b) Çift oluk [16].

R_1 = stator direnci

X_{d1} = stator reaktansı

R'_2 = rotor direnci

X'_{d2} = rotor reaktansı

R'_{21} = dış rotor oluğunun direnci

X'_{d21} = dış rotor oluğunun reaktansı

R'_{22} = iç rotor oluğunun direnci

X'_{d22} = iç rotor oluğunun reaktansı

X_{μ} = nüve reaktansı

R_{Fe} = nüve direnci

s = kayma

Şekil (5.1.)' deki çift oluklu asenkron motorun eşdeğer devresinin toplam empedansı denklem 5.1'deki gibi hesaplanılabilir.

$$Z_{eq} = R_1 + jX_{d1} + \frac{1}{\left[(R_{Fe} // jX_{\mu}) // \left(\frac{R'_{21}}{s} + jX'_{d21} \right) // \left(\frac{R'_{22}}{s} + jX'_{d22} \right) \right]} \quad (5.1)$$

Buradan I_1 akımı denklem 5.2'deki gibi hesaplanır.

$$I_1 = \frac{v_1}{Z_{eq}} \quad (5.2)$$

Ardından 3 fazdaki stator sargılarındaki direnç kayıplarını, demir kayıpları ve rotor iletkeninin kayıpları bulunabilir.

$$P_{scl} = 3I_1^2 R_1 \quad (5.3)$$

Demir kayıpları;

$$P_{fe} = \frac{3E_1^2}{R_{Fe}} \quad (5.4)$$

Böylece hava aralığı gücü aşağıdaki gibi bulunur.

$$P_{ag} = P_{in} - P_{scl} - P_{fe} \quad (5.5)$$

Hava aralığı gücü aşağıdaki gibidir.

$$P_{ag} = 3I_2^2 \left(\frac{R'_{21}}{s} // \frac{R'_{22}}{s} \right) \quad (5.6)$$

İdeal bir transformatörün her iki ucundaki güç değişmediği için rotor bakır kayıpları aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P_{rcl} = 3I_2^2(R'_{21}/R'_{22}) \quad (5.7)$$

Tüm kayıplar motorun giriş gücünden çıkarıldıktan sonra kalan güç elektrikten rotor miline aktarılan güçtür. Mekanik güç olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{conv} = P_{ag} - P_{rcl} \quad (5.8)$$

$$P_{conv} = 3I_2^2(R'_{21}/R'_{22})(\frac{1-s}{s}) \quad (5.9)$$

(5.10) ve (5.7) denklemlerinden rotor bakır kayıplarının hava aralığı gücünün kayma ile çarpımına eşit olduğu görülür:

$$P_{rcl} = s P_{ag} \quad (5.10)$$

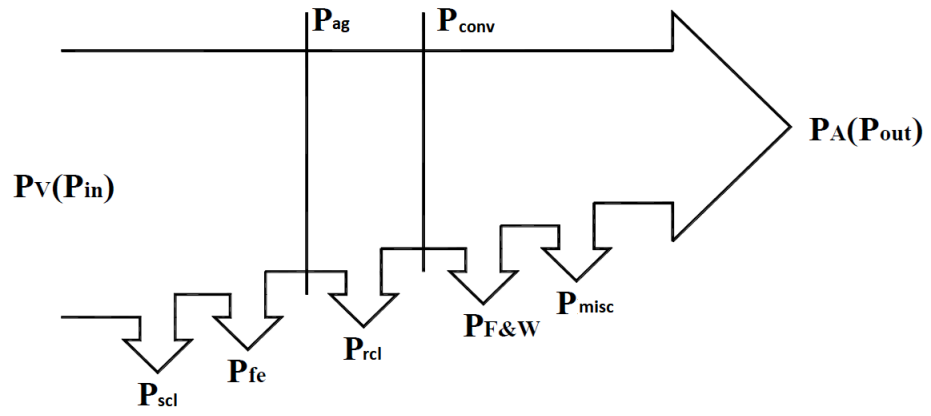
Asenkron motorlarda düşük kayma, rotor kayıplarını azaltır. Rotor dönmediğinde $s=1$ olur ve statordan aktarılan tüm enerji rotor sargılarında ısıya dönüşür.

(5.10)'daki denklem aşağıdaki denklemde yerine yazılırsa elektrikten mekanığe dönüştürülen güç arasındaki diğer bir ilişkiyi verir.

$$\begin{aligned} P_{conv} &= P_{ag} - P_{rcl} \\ &= P_{ag} - s P_{ag} \\ P_{conv} &= (1 - s)P_{ag} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Sürtünme ve rüzgar ile kaçak kayıpları bilinirse çıkış gücü aşağıdaki gibi hesaplanılabilir.

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc} \quad (5.12)$$



Şekil 5.2. Asenkron motorun güç akış diyagramı [13].

6. ASENKRON MOTOR VERİMİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Yukardaki eşdeğer devreden anlaşıldığı gibi motor verimine etki eden faktörler başlıca şunlardır:

Bakır kayıpları, stator ve rotor sargılarındaki elektrik direnci nedeniyle oluşur. Yüksek kaliteli iletken malzemeler kullanarak ve sargı tasarımını optimize ederek bu kayıplar azaltılabilir.

Demir kayıpları, motorun manyetik devresinde oluşan histerezis ve eddy akım kayıplarıdır. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip ve düşük kayıplı sac malzemeler kullanarak minimize edilebilir.

Mekanik kayıplar, rulman sürtünmesi ve havanın rotor çevresindeki sürtünmesi gibi mekanik dirençten kaynaklanır. Kaliteli rulmanlar ve aerodinamik tasarım mekanik kayıpları azaltır.

Boşta çalışma kayıpları, motor boşta çalışırken manyetik alanın oluşturulması için gereken enerji kaybıdır. Motor boyutunun ve yük karakteristiklerinin optimize edilmesi bu kayıpları düşürür.

Yük koşulları, motorun verimi tasarım yüküne ne kadar yakın çalıştığına bağlıdır. Çok düşük veya çok yüksek yüklerde verim düşer.

Hava aralığı, stator ve rotor arasındaki hava aralığının büyüklüğü, manyetik devrenin verimliliğini etkiler. Hava aralığının optimal tutulması, manyetik akı yoğunluğunu artırarak kayıpları azaltır.

Rotor kaymaları (kayma), rotor hızının senkron hızdan uzaklaşması verimi düşürür. Daha düşük kayma, daha az rotor kaybı ve daha yüksek verim sağlar.

Motorun soğutma sistemi motorun ısınması, direnci artırarak kayıpları yükseltir. Etkili bir soğutma sistemi, motorun termal kayıplarını sınırlar ve verimi artırır.

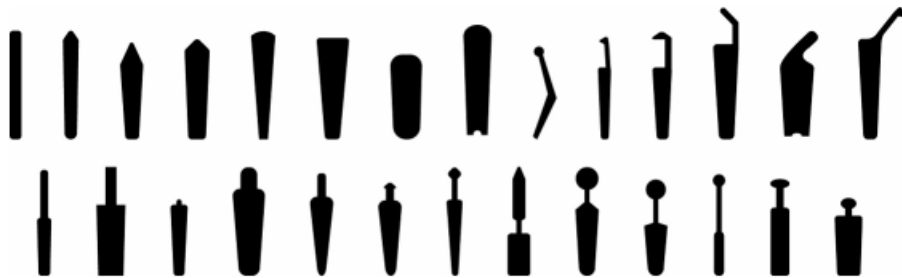
Enerji beslemesi gerilim ve frekans dengesizlikleri motorun verimini düşürür. Uygun enerji kalitesi ve sabit besleme koşulları, motorun en yüksek verimle çalışmasını sağlar [23,24].

6.1 Rotor Oluk Yapısının Motor Üzerindeki Etkileri

Asenkron motorlarda moment, gerilimin karesiyle, akım ise gerilimle doğrudan ilişkilidir. Bu durum, gerilim değişikliklerinin motor verimliliğinde kayıplara neden olabileceğini gösterir. Bu nedenle, motorun verimliliğini korumak ve performansını artırmak için aynı gerilim seviyesinde farklı rotor tasarımları üzerinde çalışmak etkili bir çözüm olabilir [7].

Rotor oluk yapısı, motor performansı üzerinde önemli bir rol oynar. Olukların şekli ve yerleşimi, manyetik akının hava aralığındaki dağılımını etkiler. Eğimli oluklar, harmonik kayıpları azaltarak daha sessiz ve titreşimsiz bir çalışma sağlar, ancak düz oluklar basit bir tasarım sunarken harmoniklerin artmasına neden olabilir.

Elektrik motorlarının tasarımında birçok farklı parametre yer alır ve bu parametreler birbirleriyle etkileşim halindedir. En iyi verimi sağlamak için, tasarım parametrelerinin bütünsel bir şekilde ele alınması önemlidir [8]. Daha önceki çalışmalar ve motor tasarım özellikleri, oluk yapısının motor performansı ve parametreleri üzerinde etkili olduğunu ortaya koymuştur. Derin oluk yapılarının kullanılmasıyla motor içindeki manyetik akının yönü değişebildiği için, bu yapıların performansa olan etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir [7].



Şekil 6.1. Rotor oluk modelleri [25].

7. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu eleman analizi (FEA), sonlu eleman yöntemi (FEM) ile yapılan hesaplamalara dayalı olarak bir nesnenin davranışını tahmin etme sürecidir. FEM matematiksel bir teknik olsa da, FEA, FEM'in sağladığı sonuçların yorumlanmasıdır. FEA, mühendislere karmaşık sistemler ve yapılar hakkında içgörüler sunarak daha bilinçli tasarım kararları almalarına yardımcı olur. FEM, karmaşık sistemleri daha küçük, daha basit parçalara ayırmak için matematiği kullanır. Daha sonra, bilgisayarların gücünü kullanarak, mühendislik problemlerini bölmek ve sonra çözmek için diferansiyel denklemleri her bir öğeye ayrı uygular.

FEA, FEM denklemlerinin uygulanmasıdır ve birçok simülasyon yazılımının temelidir. Gerçek dünya varlıklarının sanal modellerini oluşturarak tasarımları güvenli, hızlı ve ekonomik bir şekilde doğrulamak ve test etmek için kullanılır.

8. ASENKRON MOTOR TASARIMI

Elektrik makinelerinin tasarımında boyutların, manyetik özelliklerin ve elektriksel parametrelerin güce nasıl katkıda bulunduğunu anlatan 8.1'deki denklem kullanılmaktadır.

$$CD_i^2 L n_r = P_s \quad (8.1)$$

Asenkron motorların tasarımında, sanal güç (P_s) ve faydalanma katsayısı (C , aynı zamanda Esson sabiti olarak da bilinir), makinenin performansını ve boyutlarını belirlemede kritik öneme sahiptir. Esson sabiti, birim hacimdeki motorun bir dakikada üretebileceği enerji miktarını ifade eder ve bu değer genellikle daha önce üretilmiş motorların verilerine dayanılarak belirlenir. Bu sabit, motorun verimliliği ve enerji yoğunluğunu anlamak için kullanılır.

D_i : Rotorun iç çapı

L : Motorun manyetik yol uzunluğu (paket uzunluğu)

n_r : Rotor dönüş hızı

Çap ve uzunluk ayrımı çap (D_i) ve uzunluğun (L) ayrı ayrı hesaplanması için iki yöntem öne çıkar:

İç çap ve bağlı uzunluğun belirlenmesi daha önce üretilmiş motorların boyutları dikkate alınarak, faydalanma katsayısı (C) üzerinden iç çap (D_i) hesaplanır ve bu değere bağlı olarak uzunluk (L) belirlenir.

Paket oranı (λ) kullanımı statorun manyetik uzunluğunun kutup adımına oranı olan paket oranına dayanır. Paket oranı (λ) şu şekilde tanımlanır:

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \quad (8.2)$$

Paket oranı (λ), stator uzunluğunun kutup adımına oranı olup, motorun tasarımında önemli bir parametredir.

Bu oran, motorun maliyet, verim, güç faktörü gibi performans kriterlerini doğrudan etkiler. Literatürde λ 'nın farklı aralıklarında elde edilen avantajlar şu şekilde özetlenebilir:

$\lambda=1,5-2$: Bu aralık, minimum maliyetli tasarımlar için önerilir. Daha uzun stator uzunluğu ve daha az kutup adımı, üretim maliyetlerini düşürebilir.

$\lambda=1,5$: En iyi verimin elde edildiği bölgedir. Motorun enerji kayıpları minimize edilir, dolayısıyla daha yüksek verim sağlanır.

$\lambda=1,0-1,5$: Bu aralık, en iyi güç faktörü için tercih edilir. Güç faktörünün yüksek olması, motorun enerji kullanım etkinliğini artırır.

$\lambda=1,0$: Dengeli bir tasarım için uygundur. Verim, maliyet ve güç faktörü arasında optimal bir denge sağlar.

$\lambda \approx 0,6$: Küçük güçlü makinelerde paket oranı bu değere kadar düşebilir. Küçük motorların tasarımında bu oran, kompakt yapı ve maliyet etkinliği sağlar [6].

Çizelge 8.1. Faydalanma katsayıları (Esson sabiti) çizelgesi.

kW	2p=2	2p=4	2p=6	2p=8	2p=10	2p=12
0,1	0,90	1,00	1,03	1,05	1,08	1,10
0,2	0,93	1,03	1,05	1,08	1,10	1,13
0,3	0,95	1,05	1,08	1,10	1,13	1,15
0,4	0,98	1,08	1,10	1,13	1,15	1,18
0,5	1,00	1,10	1,13	1,15	1,18	1,20
0,6	1,06	1,14	1,17	1,20	1,23	1,26
0,7	1,12	1,18	1,22	1,25	1,29	1,32
0,8	1,18	1,22	1,26	1,30	1,34	1,38
0,9	1,24	1,26	1,31	1,35	1,40	1,44
1,0	1,30	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50
2,0	1,33	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80
3,0	1,36	1,50	1,63	1,75	1,88	2,00
4,0	1,40	1,70	1,85	2,00	2,15	2,30
5,0	1,46	1,90	2,03	2,16	2,28	2,41
6,0	1,53	1,98	2,12	2,25	2,39	2,53
7,0	1,59	2,06	2,20	2,35	2,49	2,64
8,0	1,65	2,14	2,29	2,45	2,60	2,75
9,0	1,71	2,22	2,38	2,54	2,70	2,86
10,0	1,78	2,30	2,47	2,64	2,81	2,98
15,0	1,84	2,55	2,68	2,82	2,95	3,09
20,0	1,90	2,80	2,90	3,00	3,10	3,20
25,0	1,95	3,00	3,08	3,16	3,24	3,32
30,0	2,00	3,10	3,18	3,27	3,35	3,43
30,0	2,00	3,10	3,18	3,27	3,35	3,43

Hava aralığının mm cinsinden 4 kutuplu 7.5 kW motor için;

$$\delta = 0,2 + \frac{D_i}{1000} \quad (8.3)$$

Motor tasarlanırken dikkat edilmesi gereken önemli parametrelerden biri de hava aralığıdır. (8.3)'deki denklem 4 kutuplu 7.5 kW motor için ideal hava aralığını belirtmektedir. Hava aralığının gerekenden düşük seçilmesi saclardan oluşmuş stator ve rotorun birbirine sürtmesine neden olabilir. Yüksek seçilmesinde ise motor güç ve verim kaybına uğrayacaktır.

8.1 Tasarım Parametreleri ve Simülasyon Sonuçları

8.1.1 Tek oluklu rotor tasarımı

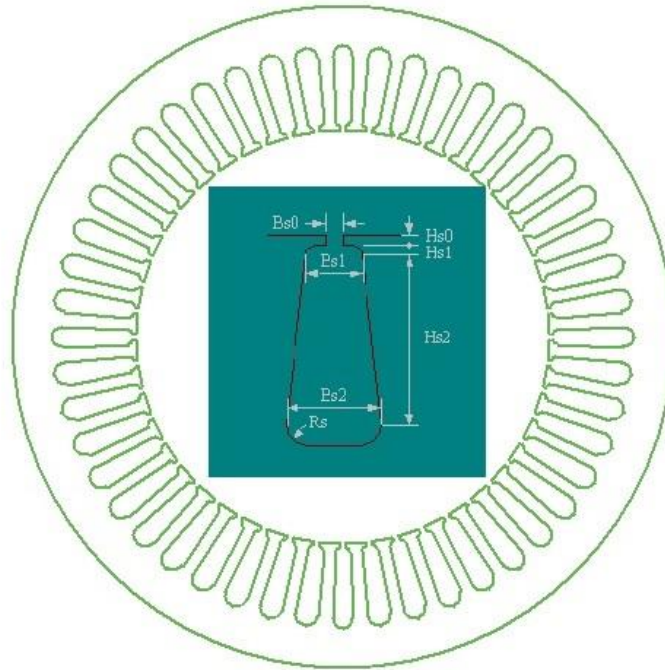
Tasarlanan motor parametreleri aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir. Motorun tasarımı yapılırken, gerek sonlu elemanlar analizi, gerekse de teorik formüller kullanılmıştır. Tek oluklu tasarlanan motora ait parametreler Çizelge 8.2.'de verilmiştir.

Çizelge 8.2. Tek oluklu motor parametreleri.

Motor Parametreleri	Değer
Nominal Güç	7.5 kW
Bağlantı Şekli	Yıldız
Stator Gerilimi	380 V
Nominal Akım	14.69 A
Nominal Moment	48.206 Nm
Frekans	50 Hz
Faz Sayısı	3
Güç Katsayısı	0.832
Verim	92.29

Çizelge 8.3. Tasarlanan stator ve stator oluk boyutları.

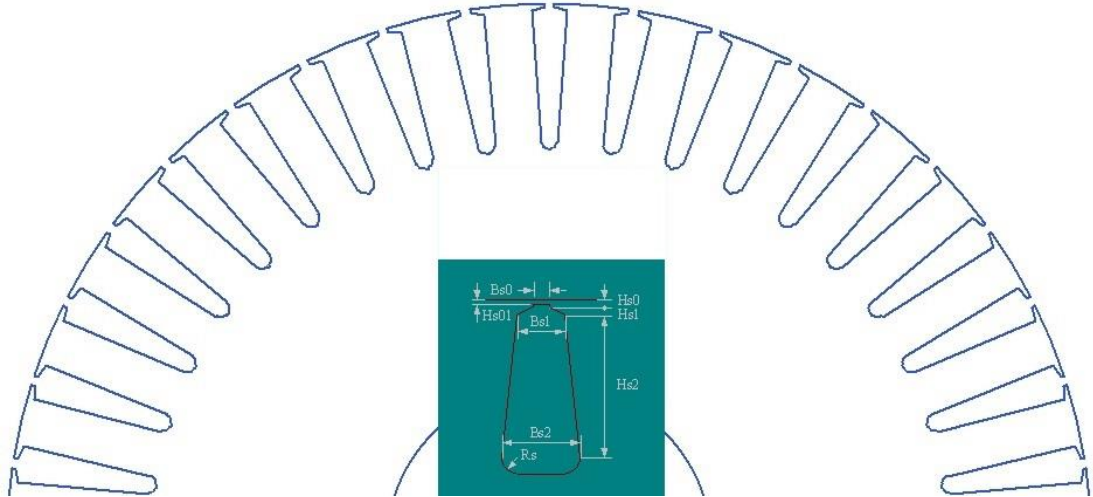
Stator Parametreleri	Değer
Slot Sayısı	48
Dış Çap	240 (mm)
İç Çap	150 (mm)
Stator Çekirdeği Uzunluğu	175 (mm)
Sıkıştırma Faktörü	0.95
Hs0	1.01 (mm)
Hs1	1.5 (mm)
Hs2	24 (mm)
Bs0	2.3 (mm)
Bs1	5.75 (mm)
Bs2	8.36 (mm)
Rs	4.08 (mm)



Şekil 8.1. Tasarlanan stator şekli.

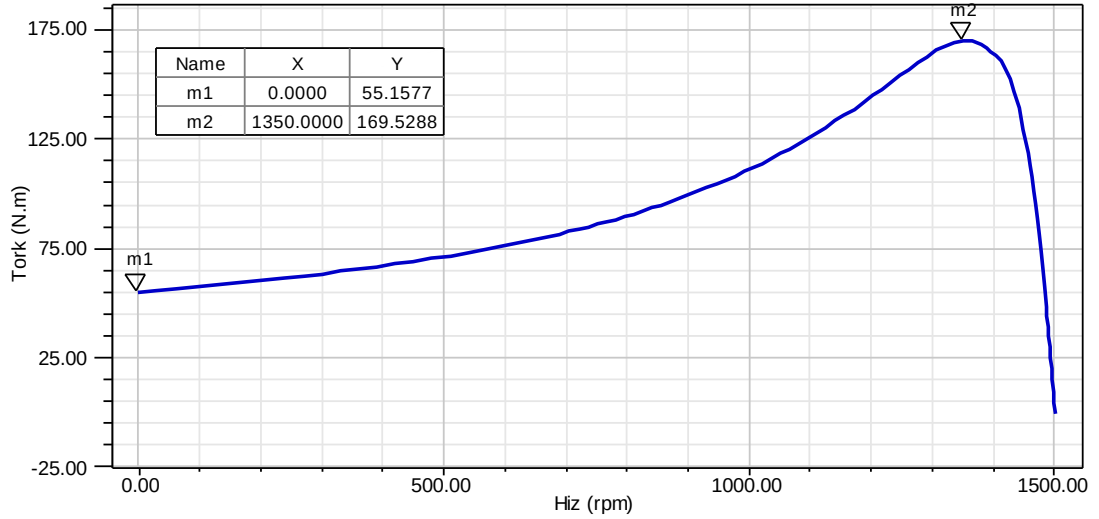
Çizelge 8.4. Tasarlanan rotor ve rotor oluk boyutları.

Rotor Parametreleri	Değer
Slot Sayısı	40
Hava Aralığı	0.35 (mm)
Dış Çap	149.3 (mm)
İç Çap	40 (mm)
Rotor Çekirdeği Uzunluğu	175 (mm)
Sıkıştırma Faktörü	0.95
Hs0	0.5 (mm)
Hs01	0 (mm)
Hs1	0.5 (mm)
Hs2	18 (mm)
Bs0	1.4 (mm)
Bs1	5 (mm)
Bs2	2.5 (mm)
Rs	1 (mm)



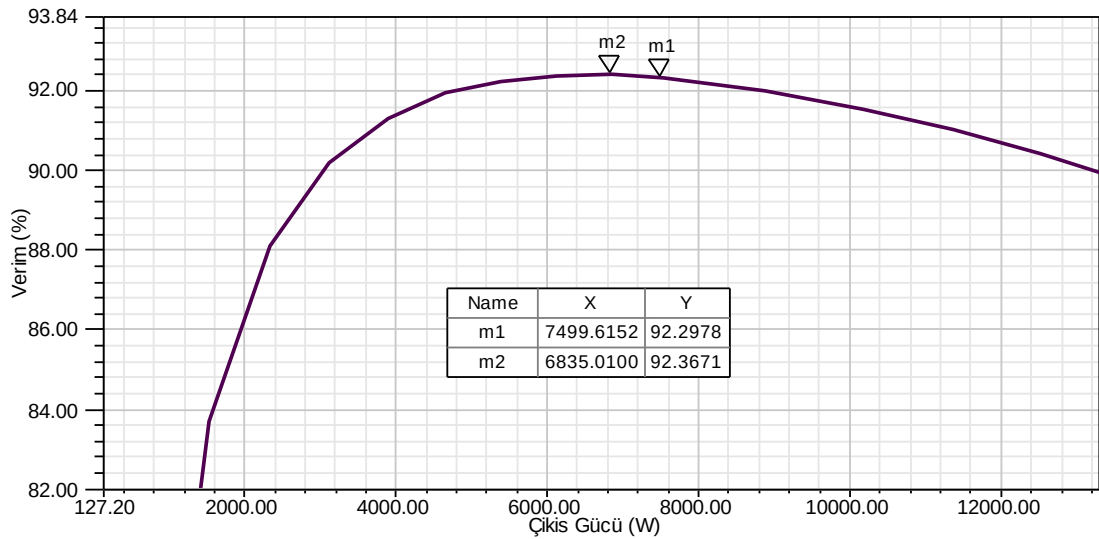
Şekil 8.2. Tasarlanan tek oluk rotorun şekli.

Motor tasarımının genel olarak stator ve rotor olmak üzere iki önemli aşaması vardır. Ancak detaylı olarak verimlilik, tork, harmonikler vb. açılardan motor tasarımını etkileyen birçok parametre vardır. Bunlardan bazıları oluk sayısı ve şekli, çekirdek laminasyon seçimi, sargı tipi ve şekli, tel kesiti ve sayısıdır. Stator ve rotor için oluk sayılarının belirlenmesinde herhangi bir kural yoktur. Ancak bu değerler motorun ağırlığı, maliyeti ve özellikleri dikkate alınarak iyi belirlenmelidir. Bu güç seviyeleri için 36 oluklu stator 28 oluklu rotor yapıları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada motorlar için önemli karakteristikler olan grafikler aşağıda incelenmiştir.



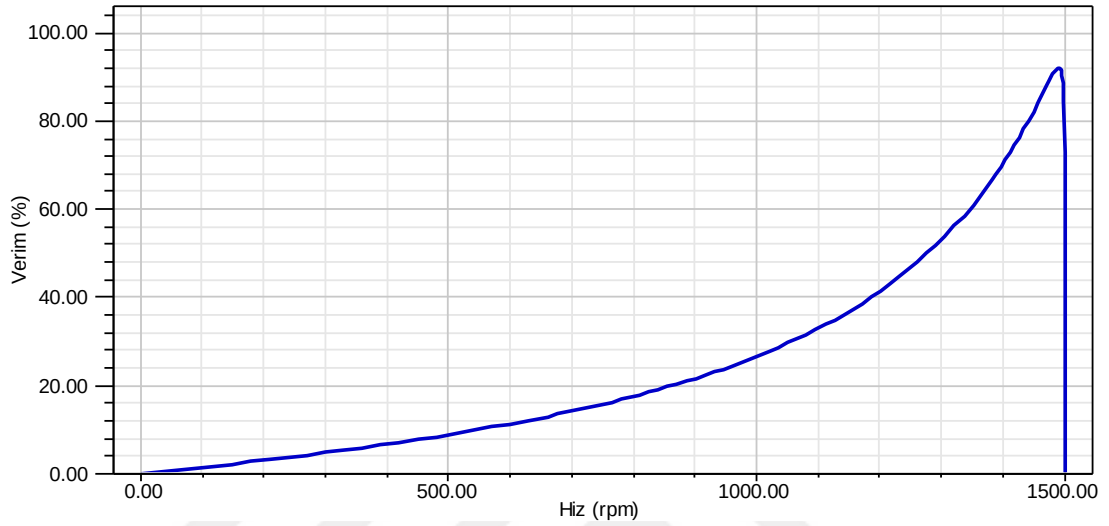
Şekil 8.3. Tek oluklu tasarım için hız-tork grafiği.

Şekil (8.3)'te motor torkunun motor hızına ne oranda bağlı olduğunu göstermektedir. Motorun başlangıç torku yaklaşık 55 Nm'dir. Nominal hızda tork 48 Nm olarak belirlenmiştir. Bu, motorun sadece fan tipi yük için değil, aynı zamanda yüksek başlangıç torku gerektiren yüklerde de kullanılabileceğini göstermektedir. Motorun devrilme momenti yaklaşık olarak 170 Nm'dir. NEMA tasarım sınıfındaki motorların ortalama olarak devrilme momenti nominal momentin 2-3 katıdır ve düşük kaymada (%20'den daha düşük) oluşur. Yol verme momentleri ise 5.5 kW üzeri motorlarda en az nominal momenttir. Grafik de tasarım sınıfına uyum göstermektedir.



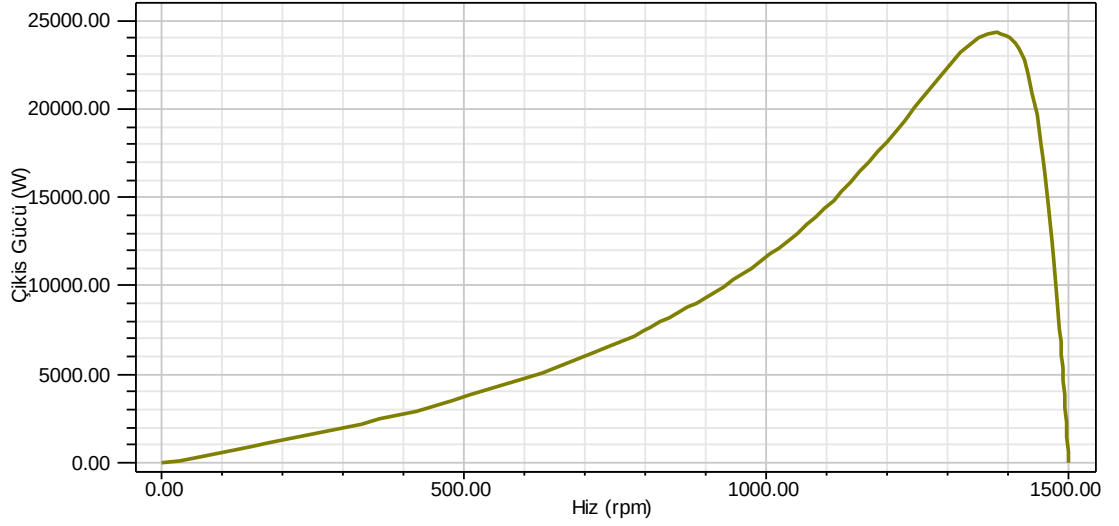
Şekil 8.4. Tek oluklu tasarım için verim-çıkış gücü grafiği.

Şekil (8.4)'te motorun veriminin çıkış gücüne bağlı olarak nasıl değiştiği görülmektedir. Motorun anma güç değerine yakın seviyelerde çalıştırıldığında verimi %92 civarındadır. Bu verim değeri bu güçteki bir motor için kabul edilebilir bir seviyedir. Ve verim sınıfı olarak IE3 sınıfına girmektedir. Ancak iyileştirilmesi gerekmektedir.



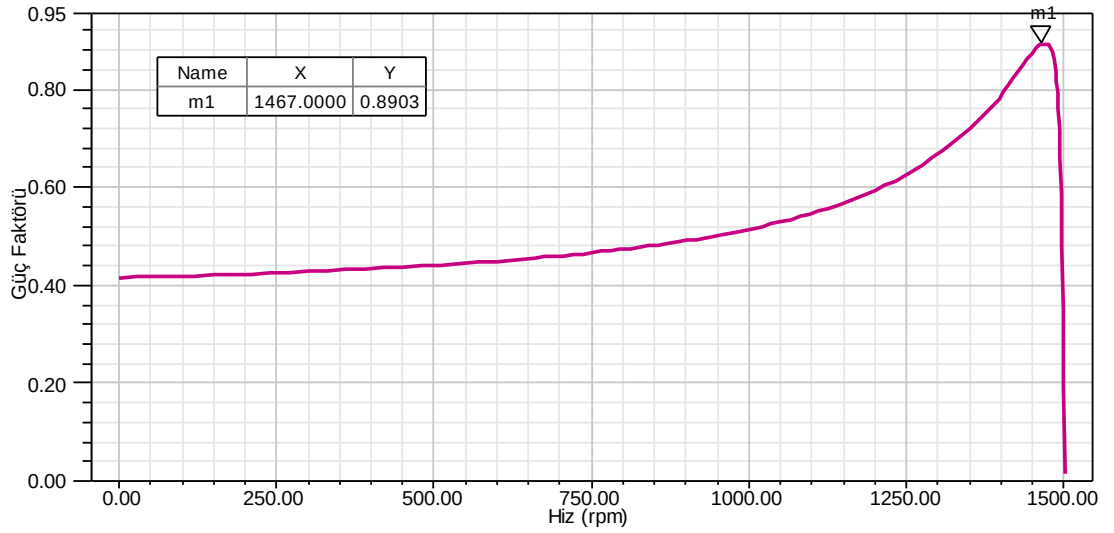
Şekil 8.5. Tek oluklu tasarım için verim-hız grafiği.

Şekil (8.5)'te görüldüğü gibi motorun verimi hıza bağlı olarak artmaktadır. Bunun temel nedenlerinden birisi kalkış anında yüksek akım çekmesi nedeniyle stator bakır kayıpları, kayma değeri (s) yüksek olduğundan rotor iletken kayıpları, motorun nüve kaybının düşük ve yüksek güç değerinde birbirine yakın olması ve sürtünme - rüzgar kayıplarının da tüm güç değerlerinde birbirine yakın olmasıdır.



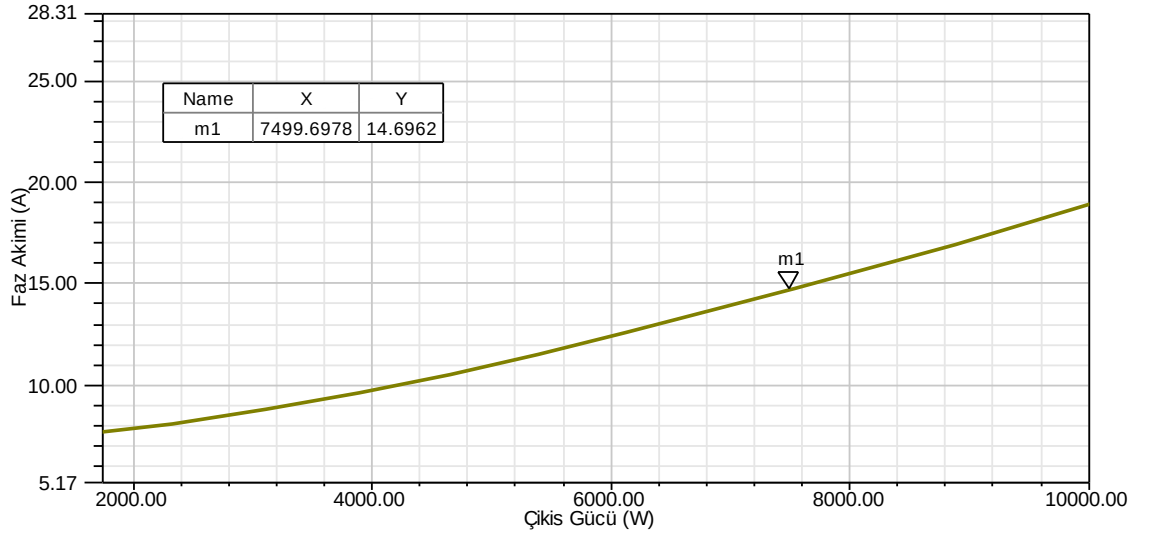
Şekil 8.6. Tek oluklu tasarım için çıkış gücü- hız grafiği.

Şekil (8.6)'da çıkış gücünün hıza bağlı grafiğinde motorun ulaşabileceği maksimum güç değeri ve güce bağlı hız aralığı görülmektedir. Maksimum yükte en yüksek kayma yaşanmaktadır. Ancak elektrik motorlarının nominal çalışma aralığında kullanılması önerilir. Verim ve oluşabilecek arıza riski bakımından en ideal aralık nominal çalışma aralığıdır.



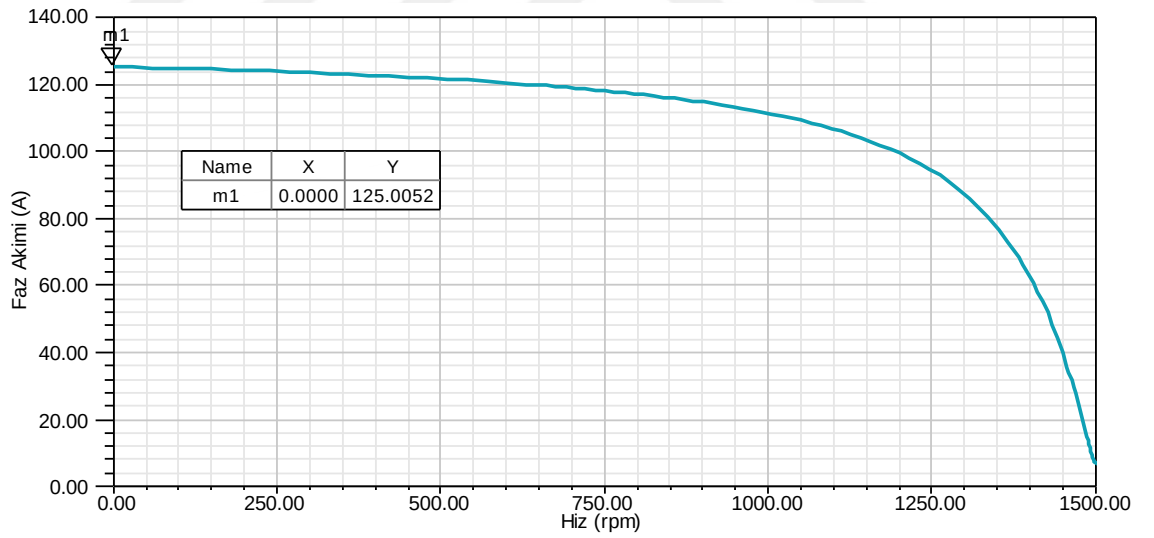
Şekil 8.7. Tek oluklu tasarım için güç faktörü- hız grafiği.

Şekil (8.7)'de güç faktörünün hıza bağlı grafiği aktif gücün görünür güce oranı anlaşılmaktadır. Artan bir grafik olması kalkış anında mıknatıslamaya bağlı olarak reaktif gücün yüksek ihtiyacıdır.



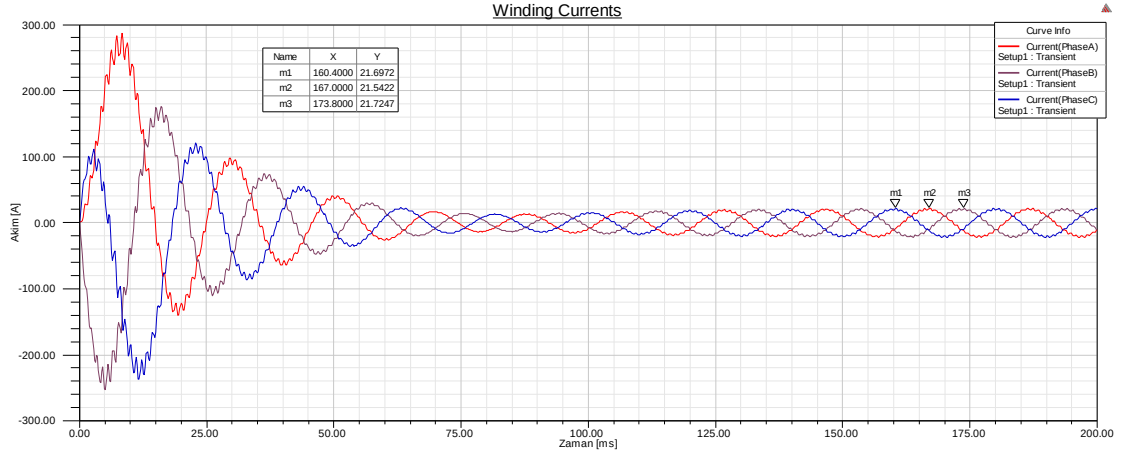
Şekil 8.8. Tek oluklu tasarım için faz akımı- çıkış gücü grafiği.

Şekil (8.8)'de nominal çalışma aralığındaki motorun akım değeri görülmektedir. Artan akıma bağlı olarak çıkış gücü de artmaktadır. Ancak bir noktadan sonra nüvenin manyetik doyumunun ve stator sargılarının kaldırabileceği akım değerinden fazla bir akım verilse de gücün artmadığı anlaşılmaktadır.



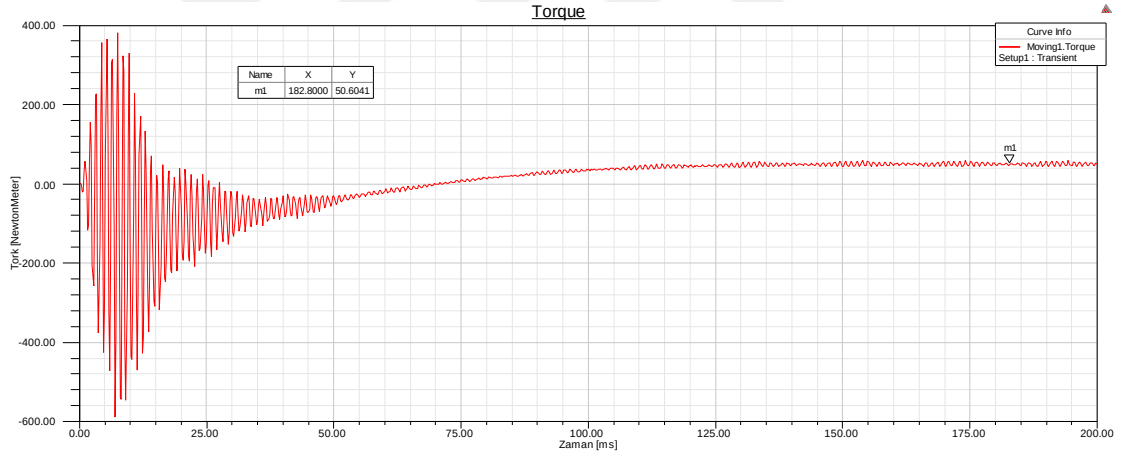
Şekil 8.9. Tek oluklu tasarım için faz akımı- hız grafiği.

Şekil (8.9)'daki grafikte bu tasarım sınıfına ait klasik yol alma akım değeri görülmektedir.



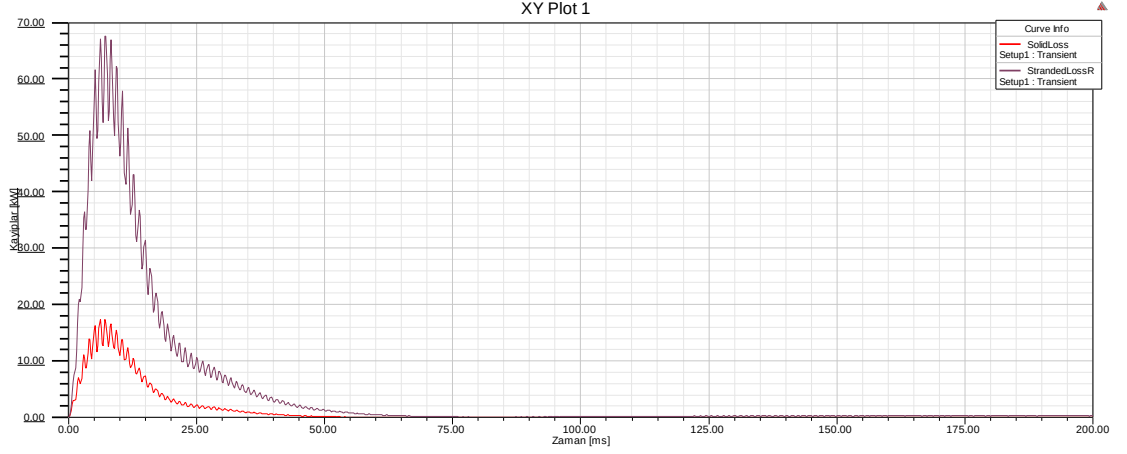
Şekil 8.10. Tek oluklu tasarım için akım-zaman grafiği.

Şekil (8.10) akımın zamana göre değişimini ifade eden bu grafikte sonuçlar etkin değerde gösterilmemektedir. Etkin değer m1 noktası için $21.7/\sqrt{2}=15.34(A)$ olarak hesaplanılabilir. Motorun kalkış anında ulaştığı maksimum değer ve her bir fazın akım değeri zamana bağlı sinüzoidal akım grafiğinden anlaşılmaktadır.



Şekil 8.11. Tek oluklu tasarım için tork- zaman grafiği.

Şekil (8.11) zamana bağlı tork grafiğinde şekil (8.3)'teki gibi kalkış anından itibaren önce yükselen, devrilme momentine ulaşıldığında ise azalarak kararlı bir şekilde nominal moment değeriyle devam ettiği görülmektedir.



Şekil 8.12. Tek oluklu tasarım için kayıp- zaman grafiği.

Şekil (8.12.)’de iki farklı kaybın grafiği görülmektedir. Kırmızı renkli olan nüve kaybını temsil etmektedir. Mor renkte ise sargıların bakır kaybı görülmektedir. Grafiğin kalkış akımı nedeniyle önce yükselen ardından normal seyrine ulaşır dengeli devam eden yapısı vardır.

8.1.2 Çift oluklu rotor tasarımı

Rotor direncinin küçük olması nedeniyle, motorda üretilen kalkınma torku düşük ve maksimum torkun meydana geldiği hız değeri yüksektir. Diğer taraftan, rotor direnci büyük ise, motorun kalkınma torku yüksek olurken, maksimum torkun meydana geldiği hız değeri düşüktür. Bu da kaymaya bağlı olan rotor bakır kayıplarının artması anlamına gelmektedir. Bunlara ilaveten motor tam yük altında anma hızında çalışırken, rotor direncinin düşük olması durumunda rotor kayması düşük, rotor direncinin büyük olması durumunda rotor kayması büyüktür. Bunun için yapılan bu çalışmada kalkınma torku, maksimum tork ve kayma optimize edilmeye çalışılmıştır.

Çift oluklu asenkron motorlar özellikle yüksek kalkış momenti gerektiren uygulamalarda tercih edilir [9,10]. Çift oluk kullanılan yapıda, rotor frekansı stator frekansına eşit iken, alt çubuğun reaktansının büyük olması nedeniyle, rotorun etkin direnci üst çubuğun direncine eşit olacaktır. Rotor frekansı hızın artmasıyla azalacaktır, dolayısıyla rotorun alt çubuğunun reaktansı da azalacağından, rotordaki toplam etkin direnç paralel bağlı üst ve alt çubukların eşdeğer direncine eşittir. Böylece kalkış anında daha yüksek tork değerine ulaşılabilir. Çift kafesli tasarlanan motora ait parametreler Çizelge 8.5.’te verilmiştir.

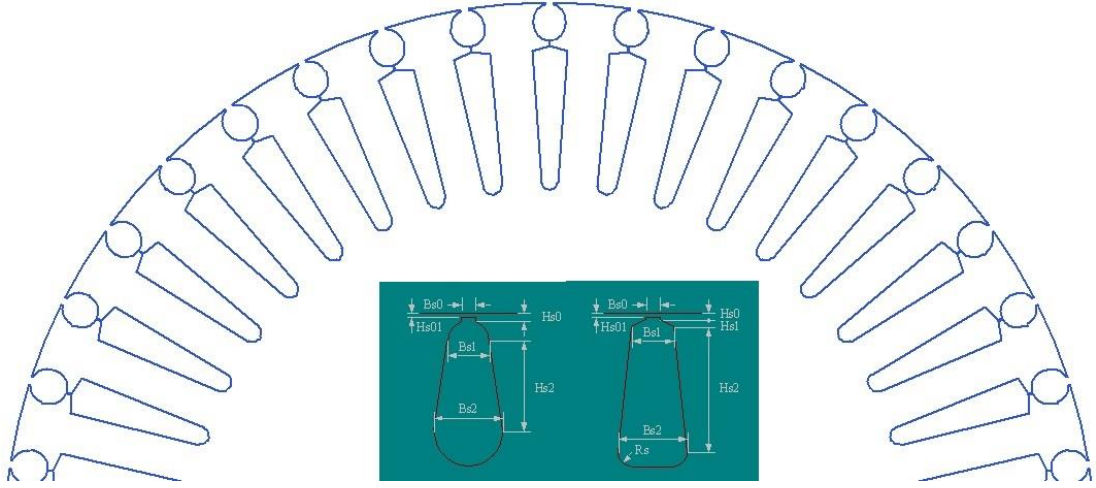
Çizelge 8.5. Çift oluklu motor parametreleri.

Motor Parametreleri	Değer
Nominal Güç	7.5 kW
Bağlantı Şekli	Yıldız
Stator Gerilimi	380 V
Nominal Akım	14.78 A
Nominal Moment	48.16 N.m
Frekans	50 Hz
Faz Sayısı	3
Güç Katsayısı	0.821
Verim	92.93

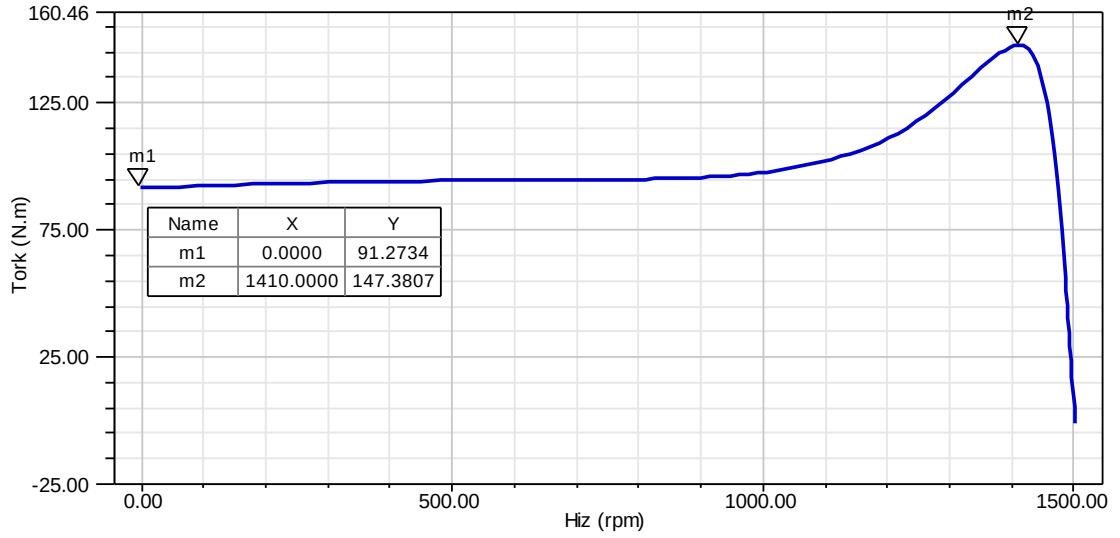
Stator tasarımı tek oluklu tasarımda kullanılan yapı ile aynı olup, Çizelge 8.3.'te verilmişti.

Çizelge 8.6. Tasarlanan çift oluklu rotor ve rotor oluk boyutları.

Rotor Parametreleri		Değer	
Slot Sayısı		40	
Hava Aralığı		0.35 (mm)	
Dış Çap		149.3 (mm)	
İç Çap		40 (mm)	
Rotor Çekirdeği Uzunluğu		175 (mm)	
Sıkıştırma Faktörü		0.95	
Birinci Oluk Parametreleri	Değer	İkinci Oluk Parametreleri	Değer
Hs0	0.2 (mm)	Hs0	0.6
Hs01	0 (mm)	Hs1	0.7
Hs2	0.5 (mm)	Hs2	18
Bs0	1.2 (mm)	Bs0	0.1
Bs1	5 (mm)	Bs1	5
Bs2	5 (mm)	Bs2	2.5
		Rs	1

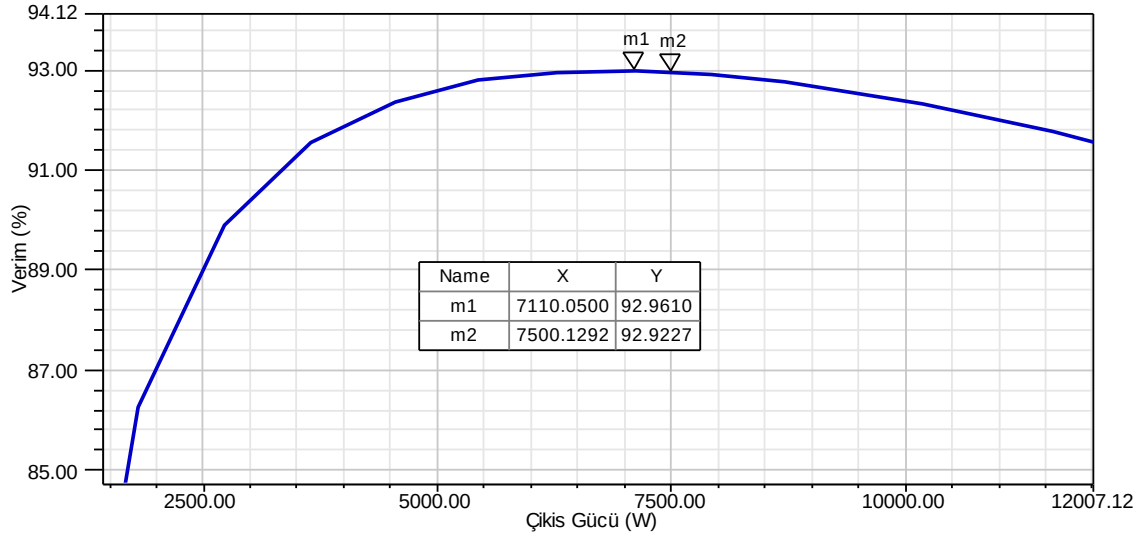


Şekil 8.13. Tasarlanan çift oluk rotorun şekli.



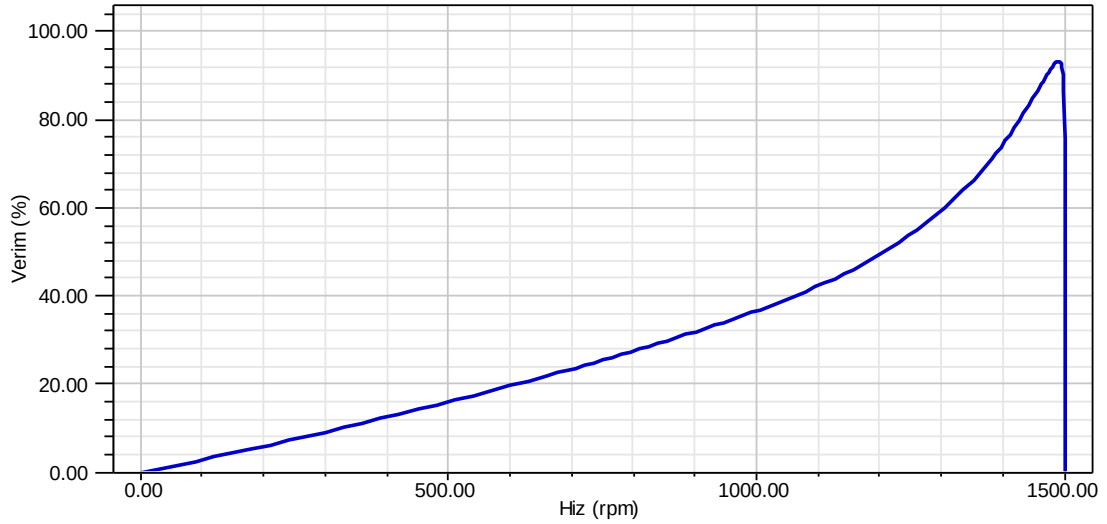
Şekil 8.14. Çift oluklu tasarım için hız-tork grafiği.

Şekil (8.16)'da tasarlanan çift oluklu rotor yapısına sahip motora ait hız-tork grafiği görülmektedir. Tek oluklu tasarımda motorun başlangıç torku yaklaşık 55 Nm iken, tasarlanan çift oluklu yapı sayesinde başlangıç torku yaklaşık 91 Nm değerine çıkmıştır. Bu da başlangıç torkunda yaklaşık olarak % 70 oranında bir artışa tekabül etmektedir. Bu tasarımda diğerine göre devrilme momenti azalırken, nominal çalışma momenti aynı seviyelerdedir.



Şekil 8.15. Çift oluklu tasarım için çıkış gücü-verim grafiği.

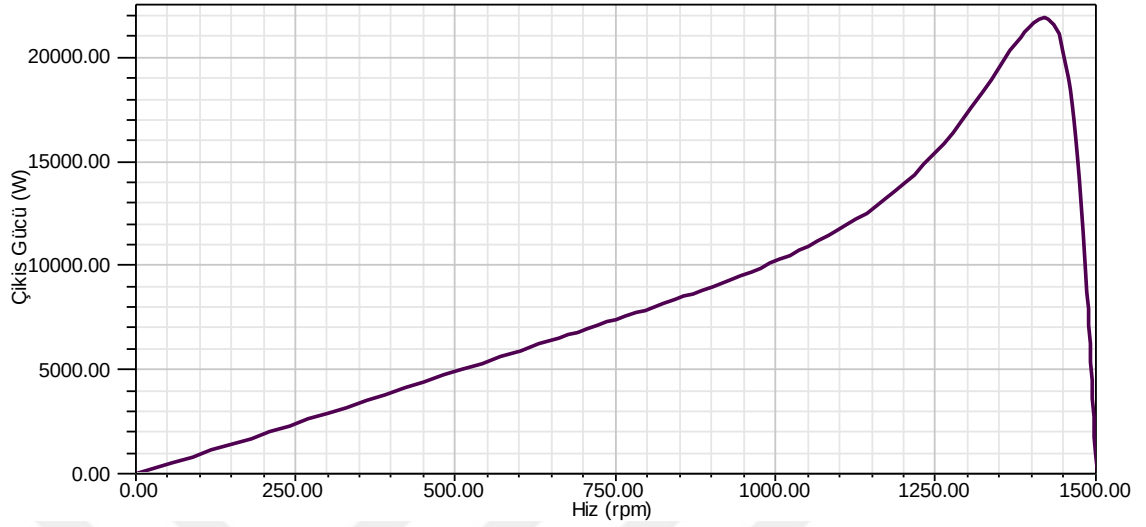
Şekil (8.17)'de çift oluklu tasarımda motor veriminin çıkış gücüne bağlı olarak değişimi görülmektedir. Motorun anma güç değerine yakın seviyelerde çalıştırıldığında verimi en yüksek seviyelerdedir. Elde edilen verim değeri tek oluklu tasarımdaki verim değerinden % 0,7 civarında yüksektir. Sağlanan bu artışla motor IE4 verim sınıfına girmektedir.



Şekil 8.16. Çift oluklu tasarım için hız-verim grafiği.

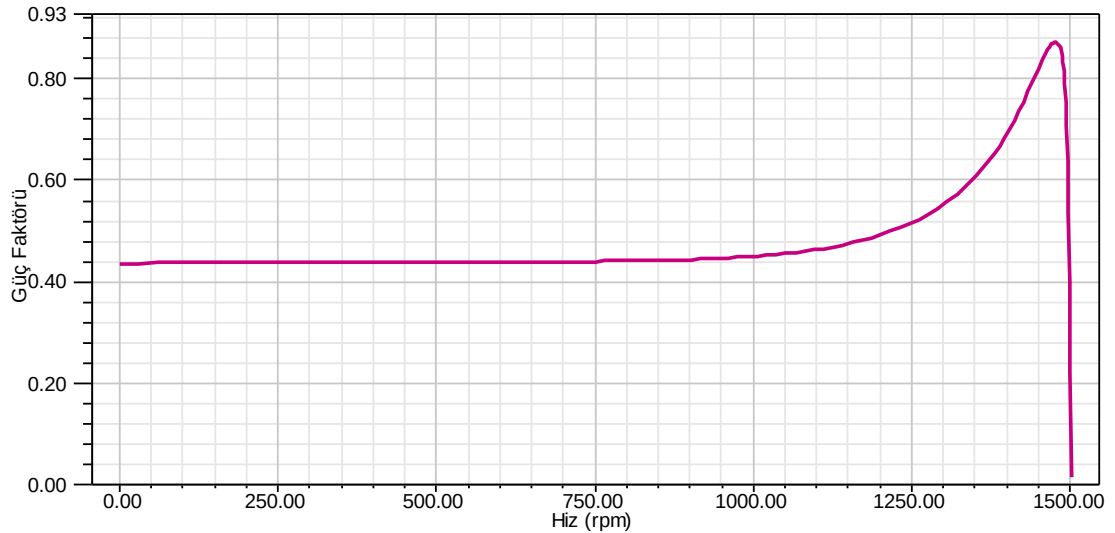
Şekil (8.18)'de çift oluklu rotor yapısı ile tasarlanan motorun veriminin hıza bağlı değişimi görülmektedir. Diğer tasarımda olduğu gibi bu tasarımda kalkış anında yüksek akım çekmesi nedeniyle stator bakır kayıpları kayma değeri (s) yüksek olduğundan rotor iletken kayıpları, motorun nüve kaybının düşük ve yüksek güç

değerinde birbirine yakın olması ve sürtünme-rüzgâr kayıplarının da tüm güç değerlerinde birbirine yakın olmasıdır.



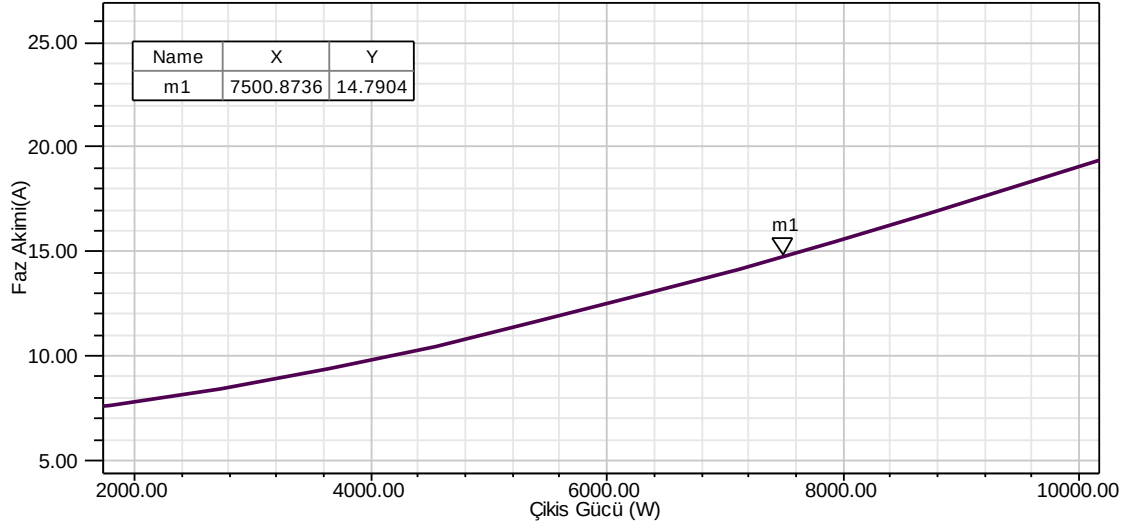
Şekil 8.17. Çift oluklu tasarım için çıkış gücü-hız grafiği.

Şekil (8.19)'da tek oluklu yapıya göre ulaşılabilecek maksimum gücün düştüğü görülmektedir. Ancak elektrik motorlarının verim ve oluşabilecek arıza riski nedeniyle nominal çalışma aralığında kullanılması gerektiğini tek oluklu yapının grafik açıklamasında belirtilmiştir.



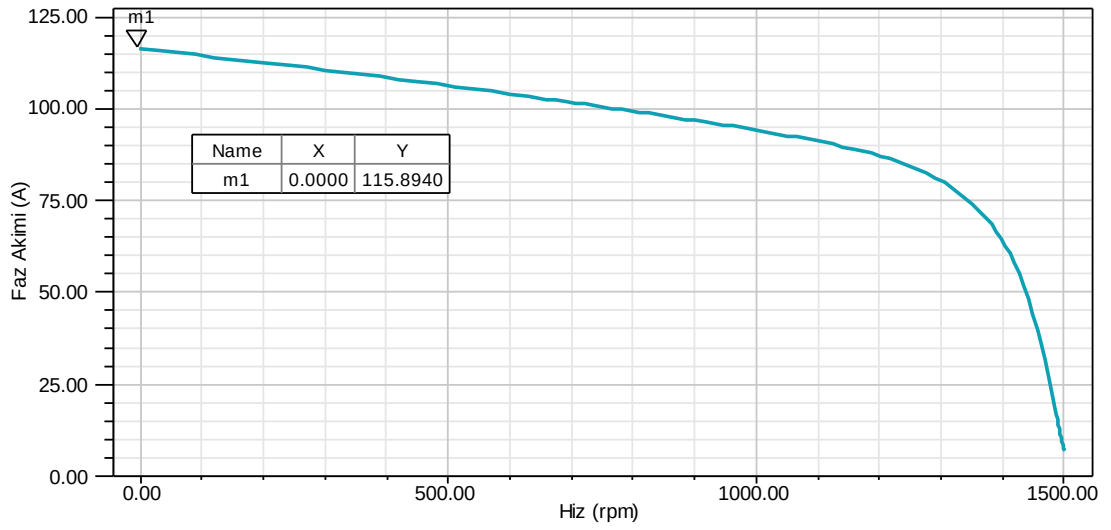
Şekil 8.18. Çift oluklu tasarım için güç faktörü-hız grafiği.

Şekil (8.20)'de tek oluklu yapıyla aynı grafik oluşmuştur. Artan bir grafik olması kalkış anında mıknatıslanmaya bağlı olarak reaktif gücün yüksek ihtiyacıdır.



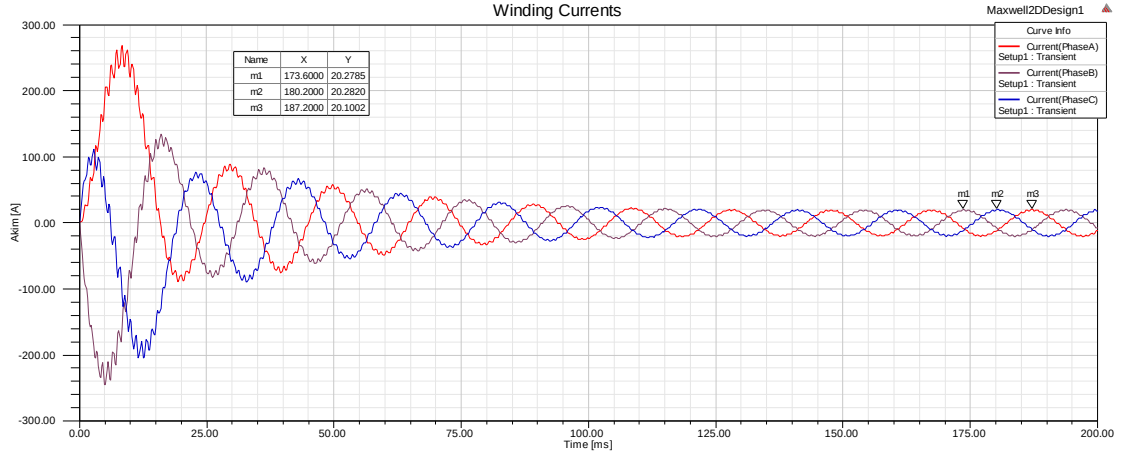
Şekil 8.19. Çift oluklu tasarım için faz akımı-çıkış gücü grafiği.

Şekil (8.21)'de nominal çalışma aralığındaki motorun akım değeri görülmektedir. Tek oluklu yapıya göre herhangi bir fark bulunmamakta olması da beklenilmemektedir.



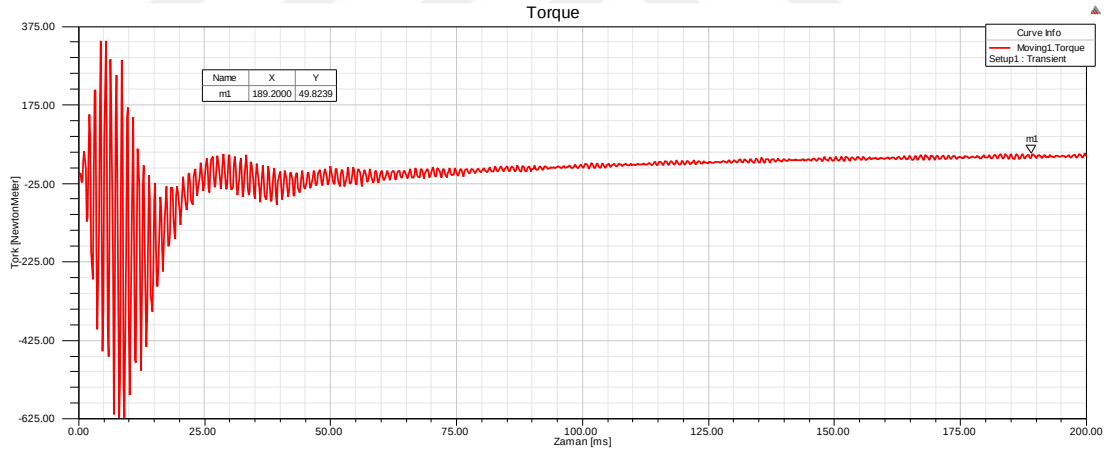
Şekil 8.20. Çift oluklu tasarım için faz akımı-hız grafiği.

Şekil (8.22)'de tek oluklu yapı grafiğine göre kalkış akımı düşürülmüştür. Buna karşın yol alma momentinin % 70 oranında artığı moment- hız grafiğinden görülmüştür.



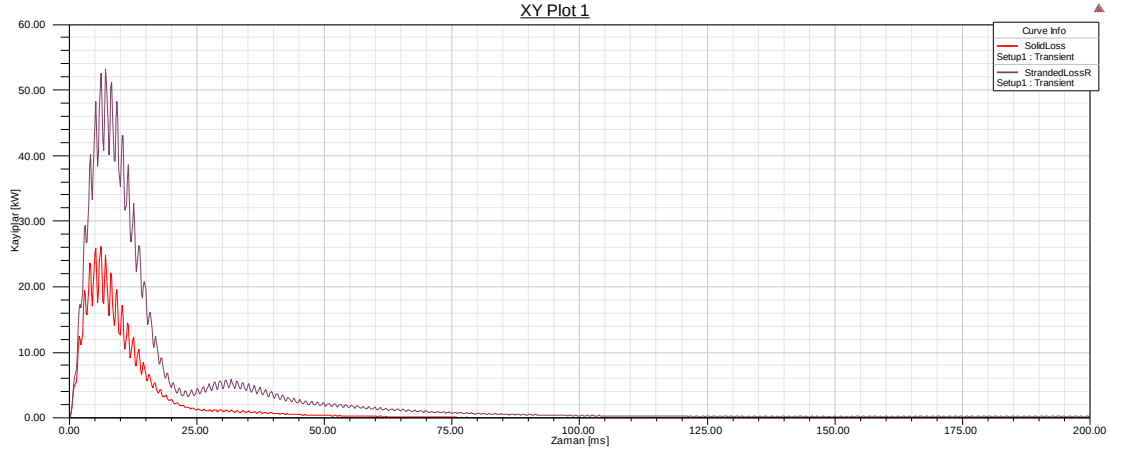
Şekil 8.21. Çift oluklu tasarım için akım-zaman grafiği.

Şekil (8.23) akımın zamana göre değişimini ifade eden bu grafikte şekil (8.10)'da olduğu gibi sonuçlar etkin değerde gösterilmemektedir. Etkin değer m1 noktası için $20.27/\sqrt{2}=14.33(\text{A})$ olarak hesaplanılabilir. Motorun kalkış anında ulaştığı maksimum değer ve her bir fazın akım değeri zamana bağlı sinüzoidal akım grafiğinden anlaşılmaktadır.



Şekil 8.22. Çift oluklu tasarım için tork-zaman grafiği.

Şekil (8.24)'de zamana bağlı tork grafiğinde tek oluklu tasarım için çıkan grafik Şekil (8.11)'e göre devrilme momentinin düşük, nominal momentin ise tasarım gücüne uygun şekilde ilerlediği görülmektedir.



Şekil 8.23. Çift oluklu tasarımın kayıp-zaman grafiği.

Şekil (8.25)'te şekil (8.12)'ye göre kayıpların maksimum noktasının düşük olmasının nedeni çift oluklu yapının kalkış akımının daha düşük olmasıdır. Bu da direkt olarak nüve ve bakır kayıplarının azalmasını sağlamaktadır.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 3 fazlı 7.5 kW 4 kutuplu IE3 verim sınıfına ait sincap kafesli asenkron motor maliyet fayda denklemi gözetilerek optimize edilmeye çalışılmıştır. Yapılan literatür taramasındaki çalışmalara göre verim artışı sağlamaya yönelik uygulanan metodlarda genellikle rotor iletkenlerinin bakır ile değiştirilmesi, stator çapının artırılması, stator oluk ağzına manyetik kama yerleştirilmesi ve stator sarım doluluk oranının artırılması uygulamaları yapıldığı saptanmıştır. İncelenen çalışmalara göre maliyet artışının önüne geçebilmek için rotorun geometrisini değiştirerek çift oluklu tasarım ile hem verim hem de kalkış torku iyileştirilmesi sağlanılmıştır.

Kaynak özetlerinde belirtilen Akçomak ve Partal (2022)'ın yapmış olduğu “Çift Kafesli Rotorda Alüminyum Ve Bakırın Birlikte Kullanımının Asenkron Motor Verimine Etkisinin İncelenmesi” adlı makalenin sonuçlarına göre 3-3.5 kg arasında daha az malzeme kullanılarak %1.5-2 oranında verim artışı gözlemlenmiştir. Yüksek manyetik geçirgenlikteki sac kullanılarak motor tek oluklu alüminyum döküm rotor modeliyle tasarlanmış olup sonuçlar Sonlu Elemanlar Analizinde elde edilmiş ve aynı asenkron motorun sadece kafes yapısı değiştirilerek çift oluk geometrisiyle verimde oluşan iyileşmeyle beraber IE4 verim sınıfına ulaşılmıştır. Ayrıca çift oluklu rotor modeliyle kalkış momenti artırılmış kalkış akımı azaltılmıştır. Buna bağlı olarak devrilme momenti, motorun ulaşabileceği maksimum güç değeri azalmıştır. Ancak bu beklenen bir durumdur. Çift oluk geometrisinin motor üzerindeki beklenen etkisidir.

IE3 verim sınıfındaki 7.5 kW asenkron motorun günlük 8 saat, yılda 250 gün çalışma süresi olduğu düşüncesiyle hareket edilirse yapılan çalışmalarla motor veriminin %2 iyileştiğini ve IE4 sınıfındaki başlangıç verim şartı olan %92.6 olduğu varsayımıyla hesaplama yapılacak olursa; verim iyileştirmesi yapılmadan şebekeden çekilen güç $7.5\text{kW} / 0.906 = 8.28\text{ kW}$ olacaktır. Verim artışı sağlandıktan sonra şebekeden çekilen güç ise $7.5\text{kW} / 0.926 = 8.10\text{ kW}$ şeklinde gerçekleşir. Çekilen güçlerin farkı alınır. Önce günlük çalışma saati ardından yıllık çalışma süresiyle çarpılırsa ortaya çıkan sonuç yıllık enerji tasarrufunu verir. Anlık çekilen güç farkı $8.28\text{ kW} - 8.10\text{ kW} = 0.18\text{ kW}$, yıllık sağlanan enerji tasarrufu $0.18\text{ kW} \times 8\text{ saat} \times 250\text{ gün} = 360\text{ kWh}$ olur.

Bu sonucu sanayide kullanılan elektriğin güncel kWh birim fiyatıyla çarptığımızda verim artışıyla sağlanan yıllık tasarruf miktarımızı verir. $360 \text{ kWh} \times 4.48 \text{ lira} = 1612.8$ Lira elektrik enerjisinden sağlanan yıllık tasarruf miktarıdır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının verisine göre Türkiye’de 2023 yılında 335.2 TWh (terawatt saat) elektrik tüketimi yapılmıştır.

Tedaş’ın sunduğu yıllık istatistik raporlarına göre Türkiye’de yıllık tüketilen elektrik enerjisinin sanayideki payı %45-48 arasındadır. Sanayide tüketilen elektriğin ise %75’inin elektrik motorlarında olduğunu giriş kısmında daha önce yapılan araştırmalardan edindiğimiz bilgilere dayanarak anlatmıştık.

Bu ölçekte düşünüldüğünde elektrik motorlarında yapılacak iyileşmenin ne kadar önemli olduğu daha iyi anlaşılmaktadır.

İleride yapılacak olan çalışmalarda nüve uzunluğunun ya da stator çapının artışına ve stator sarımının değişimine bağlı olarak kalkış akımının düşürülmesi verimin daha da iyileştirilmesi mümkün görünmektedir.

KAYNAKÇA

1. Doğruer, T., 2012. Evirici ile sürülen asenkron motorlarda rotor çubuğu kırık arızasının tespiti, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
2. Wilde, C. ve Brunner, U., 2011. Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems, International Energy Agency, Working paper.
3. Sprangers, R. L. J., Paulides, J. J. H., Boynov, K. O., Waarma, J. ve Lomonova, E. A., 2013. Design and optimization tools for high-efficiency three-phase induction motors, 15th European Conference on Power Electronics and Applications.
4. Grewal, G. S. ve Rajpurohit, B. S., 2016. Efficient energy management measures in steel industry for economic utilization, Energy Reports, 2, 267-273.
5. Akçomak, M. ve Partal, S. Z., 2022. Çift kafesli rotorda alüminyum ve bakırın birlikte kullanımının asenkron motor verimine etkisinin incelenmesi, EMO Bilimsel Dergi, 12, 2, 15-26.
6. Akman, O. ve Ürkmez, A., 2005. Asenkron motor tasarımının bilgisayar programı ile gerçekleştirilmesi, Selçuk Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Mühendislik-Mimarlık Fakültesi.
7. Soygenç, O. C., Tap, A. ve Ergene, L. T., 2016. Üç fazlı sincap kafesli asenkron motorda verim analizi, Ulusal Elektrik, Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, Eleco, 334-338.
8. Ünlükaya, E., Yetgin, A. G., Çanakoğlu, A. İ. ve Turan, M., 2014. Rotor oluk şekillerinin asenkron motor performansına etkileri, Eleco.
9. Mróz J. ve Poprawski W., 2019. Improvement of the thermal and mechanical strength of the starting cage of double-cage induction motors, Energies, 12, 4551.
10. Guru N., Mishra S.K. ve Nayak B., 2023. Indirect vector control of multi cage induction motor, International Journal of Computer Applications, 25-32.
11. Mergen A.F. ve Zorlu S., 2005. Elektrik makineleri 2 asenkron makineler, Birsan Yayınevi.
12. Mehmetoğlu, T., 2016. Sargılarının ısı miktarının ve bakır kayıplarının debye ve bloch-gruneisen yaklaşımlarına göre hesaplanması, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tokat, 6.
13. Chapman, S. J., 2005. Electric machinery fundamentals, 4th Edition, New York, McGraw-Hill.

14. Sarıoğlu, M.K., 1983. Elektrik makinalarının temelleri asenkron makinalar, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, Türkiye, 342.
15. Kaygısız,F., 2008. Asenkron makinaların matlab’da tasarımı ve analizi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Kütahya, 4.
16. Torrent, M. ve Blanqué, B., 2021. Influence of equivalent circuit resistances on operating parameters on three-phase induction motors with powers up to 50 kw, Energies, 14, 7130. URL Adres: <https://doi.org/10.3390/en14217130> Erişim tarihi:16.11.2024.
17. Şal,S. ve Ergene,L., 2010. Rotor oluk geometrisinin asenkron motor performansına etkisinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
18. Acar, Ç., 2017. IE2 verim sınıfından IE4 verim sınıfına geçişte asenkron motor tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
19. Al-Qoshachee, A.Z.S., 2017. Üç fazlı asenkron motorlarda IE3 verim sınıfına sahip motor tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
20. Kaygısız, F., 2008. Asenkron makinaların matlab’da tasarımı ve analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
21. Livadaru,L, Simion, A., Munteanu, A., Cojan, M. ve Dabija, O., 2013. Dual cage high power induction motor with direct start-up, Design and FEM Analysis, Gheorghe Asachi Technical University of Iaşi.
22. Gallego, A.R., 2014. Design and optimization of an IE4 4-pole 7.5 kw induction motor, Master Thesis, Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering, Electrical Energy Conversion, Stockholm.
23. Acar, Ç., Soygenç, O. C. ve Ergene, L. T., 2018. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan asenkron motorlarda IE2 verim sınıfından IE4 verim sınıfına geçiş amaçlı bir çalışma, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 59–65.
24. Aybeniz, Y.Y., Bekiroğlu, K.N., Keskin Arabul, F., Obdan, A.H. ve Arabul, A.Y., 2022. IE3 verim sınıfındaki 5,5 kw gücünde asenkron motorun IE4 verim sınıfına yükseltilmesine yönelik tasarım iyileştirmeleri, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 133-141.
25. Bonnett, A., 2008. Stator & rotor design considerations for integral hp motors, EASA Convention, Dallas.
26. Zöhra, B. ve Akar, M., 2019. Türkiye’de verimli elektrik motorlarına geçiş süreci ve şebeke kalkışlı sabit mıknatıslı senkron motorlar, 2, 236–242.

27. De Almeida, A. T., Ferreira, F. J. T. E., Fong, J. A. C. ve Brunner, C. U., 2008. Electric motor standards, ecodesign and global market transformation, Conf. Rec. - Ind. Commer. Power Syst. Tech. Conf., 1–9.
28. Schneider Electric, 2017. NEMA and IEC premium efficiency motors choosing the right motor control and protection components data bulletin, USA.
29. Siemens, 2009. Motors answers for industry. ABC of motors, 6.
30. Almeida, A. De., Fong J., Brunner C.U., Werle R. ve Werkhoven M.V., 2019. New technology trends and policy needs in energy efficient motor systems- a major opportunity for energy and carbon savings, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 115.
31. Siemens, Energy efficiency classes in accordance with IEC 61800-9-2. URL Adres: <https://124.im/3eSHtjG> Erişim tarihi: 18.08.2024
32. Sarioğlu, M.K., 1983. Elektrik makinalarının temelleri asenkron makinalar, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, Türkiye, 342.
33. Sarioğlu, M.K., Boğosyan, S. ve Gökaşan, M., 2003. Asenkron makinalar ve kontrolü, Birsan Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 392.
34. Onat, N., 2005. Mini hidroelektrik santraller için güneş pilleri ile uyarılan senkron generatör tasarımı, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul, 177.
35. Boduroğlu, T., 1988. Elektrik makinaları dersleri asenkron makinalar, Beta Yayınevi, İstanbul, 1-131.
36. Altunsaçlı, A. ve Alacacı, M., 1999. Alternatif akım elektrik makinaları ve laboratuvarı, 4-5.
37. Díaz, F.J.G., 2023. Basic electric and electromagnetic magnitudes and units, Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering, Elsevier, 513-520.
38. Dems, M., Komez, K., Kubiak, W. ve Szulakowski, J., 2020. Impact of core sheet cutting method on parameters of induction motors, Institute of Mechatronics and Information Systems, Lodz University of Technology.
39. Verucchi, C., Ruschetti, C., E Giraldo, E., Bossio, G. ve Bossio, J., 2017. Efficiency optimization in small induction motors using magnetic slot wedges, Electric Power Systems Research, 1-8.
40. Sathishkumar, G. K., Sivakumaran, T.S., Vimalraj, N. ve Bharathidasan, M., 2014. Design and analysis of squirrel cage die-cast copper induction motor using finite element method for electric propeller, Advances in Natural and Applied Sciences, 37.

41. Tudorache, T., Melcescu, L. ve Petre, V., 2009. High efficiency squirrel cage induction machines, Electrical Engineering Faculty, Electrical Machines, Materials and Drives Dept., University Politehnica of Bucharest, International Conference on Renewable Energies and Power Quality.



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Furkan ATAĞLI

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans :Aksaray Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü, 2013-2018

Yüksek Lisans :Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 2022-2025.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Samur Elektronik / Yaz Stajı
2. İştaş Asansör / 1 Yıl
3. Eker Asansör / 1 Yıl
4. Bozkır İlçe Milli Eğitim Müdürlüğü / 2 Yıl

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Makaleler

1. Yüksek Verimli 7.5 kW Asenkron Motor Tasarımı/ 9.Uluslararası Azerbaycan Fen,
Mühendislik, Matematik ve Uygulamalı Bilimler Kongresi