



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**RANQUE-HILSCH VORTEKS TÜP SOĞUTMALI ÜÇ FAZLI
ASENKRON MAKİNEİN ELEKTRİKSEL
PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

İSMAİL CEBECİ

DANIŞMAN

DOÇ. DR. VOLKAN KIRMACI

BARTIN-2023



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**RANQUE-HILSCH VORTEKS TÜP SOĞUTMALI ÜÇ FAZLI ASENKRON
MAKİNEİN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İsmail CEBECİ

BARTIN-2023

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Volkan KIRMACI danışmanlığında hazırlamış olduğum “RANQUE-HILSCH VORTEKS TÜP SOĞUTMALI ÜÇ FAZLI ASENKRON MAKİNEİN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı doktora tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

15.06.2023

İsmail CEBECİ



ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanlarım Doç. Dr. Volkan KIRMACI ve Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜRKAN ile tezin incelenerek hataların düzeltilmesinde ve geliştirilmesinde değerli vakitlerini harcayan Prof. Dr. İlhan CEYLAN ve Dr. Öğr. Üyesi Mahir GÜLEN'e, çalışmalarım boyunca manevi desteklerini hep arkamda hissettiğim eşim Fatma'ya, çocuklarım Defne ve Hakan ile bugünlere gelmemi sağlayan Anneme, rahmetli Babama ve Yüce Türk Milletine sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

İsmail CEBECİ



ÖZET

Doktora Tezi

RANQUE-HILSCH VORTEKS TÜP SOĞUTMALI ÜÇ FAZLI ASENKRON MAKİNEİN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

İsmail CEBECİ

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Volkan KIRMACI

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜRKAN

Bartın-2023, sayfa: 78

Enerjinin etkin, verimli ve en az kayıpla kullanımı, dünya üzerinde yoğunlaşılacak önemli problem sahalarından biri haline gelmiştir. Üretilen enerjinin kullanım oranları incelendiğinde; büyük bir bölümünün sanayi sektöründe, sanayi sektöründeki kullanım oranları incelendiğinde ise enerjinin neredeyse yarıya yakınının elektrik motorları tarafından tüketildiği görülmektedir. Bu bilgilerden hareketle enerji verimliliğinde odak noktalarının başında sanayi sektörünün geldiğini, sanayi sektöründe ise elektrik motorlarının verimliliklerinin ön planda tutulması gerektiği açık bir şekilde görülmektedir.

Elektrik motorlarında; çalışma anında enerji dönüşümü ile sürtünme vb. nedenlerle meydana gelen yüksek sıcaklık, motorun ekonomik ömründe, etkinliğinde ve verimliliğinde azalmalara neden olmaktadır. Bu nedenlerden ötürü elektrik motorlarında çalışma anında meydana gelen ısıнын uzaklaştırılması önemli bir meseledir.

Bu çalışmada, elektrik motorundaki çalışma anında meydana gelen ısıнын azaltılarak, verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Çalışmada; 1,1 kW gücünde, elektriksel ve fiziksel

parametreleri bilinen, IE3 verimlilik sınıfında rotoru sincap kafesli bir asenkron motorun soğutulması için, karşıt akışlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüpü ilk defa kullanılmıştır.

Çalışmalar, deneysel ve benzetim olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmasında, ANSYS Motor-CAD yazılımından yararlanılarak, öncelikle boşta çalışma sonuçları ve ardından elektrik motorunun kapalı bir kabin içerisinde çalıştırıldığı ve kabin içi sıcaklığın vorteks tüpü vasıtasıyla soğutulduğu varsayılarak güç ve verim analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda; elektrik motoru alternatör ile akupple edilmiş, ortam sıcaklığı sırasıyla 25 °C, 20 °C, 15 °C, 10 °C, 5 °C ve 0 °C sıcaklıklara ayarlanmış, devir sayısı 95 rpm'den 950 rpm'e kadar 95'er rpm arttırılmış, yükleme %100, %75, %50 olacak şekilde çalıştırılmış ve 3 kez tekrarlanan deney sonuçları kaydedilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında; benzetim çalışmaları neticesinde, geleneksel fanlı soğutma ile önerilen soğutma sistemi karşılaştırıldığında, verimlilikte %1,22'lik artış elde edilirken, deneysel çalışmalar neticesinde %1,79'luk verimlilik artışı olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Karşıt akışlı Ranque-Hilsch vorteks tüp, elektrik makinaları, enerji verimliliği, ANSYS Motor-CAD.

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ELECTRICAL PARAMETERS OF RANQUE-HILSCH VORTEX TUBE-COOLED THREE PHASE ASYNCHRONOUS MACHINE

İsmail CEBECİ

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Volkan KIRMACI

Second Advisor: Assist. Prof. Dr. Serkan GÜRKAN

Bartın-2023, pp: 78

The effective, efficient, and loss-free use of energy has emerged as one of the world's most pressing issues. When the usage rates of the produced energy are examined, it is discovered that the majority of the energy is consumed in the industrial sector, and when the usage rates in the industrial sector are examined, it is discovered that electric motors consume nearly half of the energy. According to this information, it is clear that the industrial sector is the primary focus in terms of energy efficiency and that electric motor efficiency should be prioritized in the industrial sector.

High temperatures in electric motors caused by energy conversion, friction, and other factors during operation reduce the motor's economic life, efficiency, and reliability. As a result, it is critical to remove the heat generated during the operation of electric motors.

The goal of this research is to improve the efficiency of the electric motor by reducing the heating that occurs during operation. In the study, a counter-flow Ranque-Hilsch Vortex Tube was used for the first time to cool a 1,1 kW asynchronous motor with known electrical

and physical parameters and in the IE3 efficiency class.

The study was divided into two stages: experimental and simulation. In the simulation study, using ANSYS Motor-CAD software, the results of the idling operation were first analyzed, followed by power and efficiency analyses, assuming that the electric motor is operated in a closed cabinet and the temperature inside the cabinet is cooled by a vortex tube. In the experimental studies, the electric motor was coupled with the alternator, the ambient temperature was adjusted to 25 °C, 20 °C, 15 °C, 10 °C, 5 °C, and 0 °C, respectively, the speed was increased by 95 rpm from 95 rpm to 950 rpm, the loading was run at 100%, 75%, and 50%, and the results of the experiment were recorded three times.

Within the scope of the studies, when the conventional fan cooling and the proposed cooling system were compared, the simulation studies resulted in an increase in efficiency of 1,22%, while the experimental studies resulted in an increase in efficiency of 1,79%.

Keywords: Counter flow Ranque-Hilsch vortex tube, electric machines, energy efficiency, ANSYS Motor-CAD.

İÇİNDEKİLER

BEYANNAME	iii
ÖNSÖZ	v
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
3. RANQUE-HILSCH VORTEKS TÜP	17
3.1 Akış Biçimlerine Göre Vorteks Tüpler	17
3.1.1 Karşıt Akışlı.....	17
3.1.2 Paralel Akışlı	19
3.2 Tasarım Şekillerine Göre Vorteks Tüpler.....	19
3.2.1 Adyabatik Vorteks Tüpler	19
3.2.2 Adyabatik Olmayan Vorteks Tüpler.....	20
3.3 Ranque-Hilsch Vorteks Tüplerin Kullanım Alanları.....	20
4. ÜÇ FAZLI ASENKRON ELEKTRİK MOTORU.....	21
4.1 Rotoru Sincap Kafesli Üç Fazlı Asenkron Motorun Elektriksel Modeli.....	22
4.2 Rotoru Sincap Kafesli Üç Fazlı Asenkron Motorun Termal Modeli.....	24
4.2.1 Isı Transfer Mekanizmaları	24
4.2.1.1 İletimle Isı Transferi	25
4.2.1.2 Taşınım ile Isı Transferi	26
4.2.1.3 Işınım ile Isı Transferi.....	29
4.2.2 Termal Modelin Oluşturulması	30
4.3 Rotoru Sincap Kafesli Üç Fazlı Asenkron Motorlarda Verimlilik	36
4.3.1 Anma Yükünde Deney	39
4.3.2 Yükte Kayıplar	40
4.3.2.1 Stator Sargı Kayıpları ve Sıcaklık Düzeltmesi	40
4.3.2.2 Rotor Sargı Kayıpları ve Sıcaklık Düzeltmesi	41
4.3.3 Yük Eğrisi Deneyi	41

4.3.4 Boşta Deney	42
4.3.5 Sabit Kayıplar	42
4.3.6 Sürtünme Vantilasyon Kayıpları.....	43
4.3.7 Demir Kayıpları	43
4.3.8 Ek Yük Kayıpları.....	44
4.3.9 Verim Hesabı.....	46
5. MATERYAL VE METOT	47
5.1 Çalışmalarda Kullanılan Temel Bileşenler.....	47
5.1.1 ÜFAM.....	47
5.1.2 Karşıt Akışlı RHVT	48
5.1.3 Motor Sürücüsü.....	49
5.1.4 Veri Yakalama ve Sıcaklık Kontrol Sisteminin Tasarımı	49
5.2 Deneysel Düzenğin Tasarımı.....	51
5.3 Benzetim Çalışmalarına Esas Teşkil Eden ÜFAM Modelinin Oluşturulması..	52
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	54
6.1 Benzetim Çalışmaları	54
6.1.1 25 °C’de Benzetim Çalışmaları	54
6.1.2 0 °C’de Benzetim Çalışmaları	55
6.2 Verimlilik Ölçüm Deneyleri.....	57
6.2.1 Boşta Çalıştırma	57
6.2.2 Akuple Çalıştırma	58
6.2.3 Yüklü Çalıştırma.....	60
6.2.3.1 Fansız Çalışmada ÜFAM Verimliliğinin İncelenmesi	60
6.2.3.2 Karşıt Akışlı RHVT Destekli Soğutmada ÜFAM Verimliliğinin İncelenmesi.....	61
6.2.3.3 Fan ve RHVT Destekli Hibrit Soğutmada ÜFAM Verimliliğinin İncelenmesi.....	62
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR.....	74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
2.1: Gouws ve Jaarsveldt'in deneysel sistem şeması	3
2.2: Nollau ve Gerling tarafından kullanılan motor tasarımı	5
2.3: Fröb tarafından gerçekleştirilen deney düzeneğinin kesiti (Fröb, 2014)	5
2.4: Benzetim çalışmasında kullanılan motorun 3B detay resmi	6
2.5: Yüksek basınç altında stator-kasa termal temas direncini ve laminasyon düzlem içi termal iletkenliği ölçmek için deney düzeneği	8
2.6: Li vd. tarafından imal edilen prototipin temel yapısı	9
2.7: Zhu vd. tarafından geliştirilen deneysel sistem	10
2.8: Fujita vd. çalışmalarında belirttikleri motor soğutma yöntemleri.....	10
2.9: Motor-CAD ile oluşturulan motorun radyal ve eksenel şematik görünüşleri	11
2.10: Nominal çalışma koşulları altında yağ soğutma ve su soğutmanın motor benzetim sonuçları	12
2.11: Deneysel sistem	12
2.12: Motor ve soğutma ceketini için benzetim modeli	13
2.13: Isı borusu kullanılan soğutma sistemi şeması.....	14
2.14: Nanoakışkan kullanan soğutma sisteminin sıcaklık dağılımları	14
2.15: Test ünitesinin şematik gösterimi	15
3.1: Karşıt akışlı RHVT'nin şematik gösterimi	17
3.2: Karşıt akışlı RHVT'nin içindeki sıcak ve soğuk akışın hareketi.....	18
3.3: Paralel akışlı vorteks tüp	19
4.1: Alternatif akım elektrik motoru	21
4.2: Rotoru sincap kafesli asenkron motorun statora aktarılmış bir faz eşdeğer devresi.....	23
4.3: Düzlem duvarda iletimle ısı geçişi.....	25
4.4: Sıcak bir yüzeyden taşınım ile ısı transferi	27
4.5: Asenkron motorda ısı aktarımı.....	30
4.6: Rotoru sincap kafesli asenkron bir elektrik motorunun temel yapısı.....	31
4.7: Rotoru sincap kafesli motora ait toplu parametrelili ısı devre modeli.....	32
4.8: Elektrik motorları için IEC, NEMA ve CEMEP tarafından belirlenen verimlilik sınıflarının toplu gösterimi	37

4.9: IEC 34-6 elektrik motoru soğutma teknikleri	38
4.10: Korelasyon eğrisi	45
5.1: Çalışmalarda kullanılan ÜFAM'a ait görünüm	47
5.2: Çalışmalarda kullanılan ÜFAM'ın demonte görünümü	48
5.3: Çalışmada kullanılan karşıt akışlı RHVT'nin görünümü	48
5.4: ÜFAM kontrolünün sağlanacağı sürücü devresi	49
5.5: Veri yakalama ve sıcaklık kontrol sistemine ait devre şeması	50
5.6: Veri yakalama ve sıcaklık kontrol sistemine ait devre görünümü	50
5.7: Tasarlanan deney düzeneği	51
5.8: İmal edilen deney düzeneği	52
5.9: ANSYS Motor-CAD görüntüleri (a) radial görünüm (b) axial görünüm	52
6.1: 25 °C ortam sıcaklığında çalışan motorda oluşan sıcaklıkların dağılımı	54
6.2: 25 °C ortam sıcaklığında çalışan motorun verimlilik grafiği	55
6.3: 0 °C iç sıcaklığa sahip kabin içerisinde çalışan motorda oluşan sıcaklıkların dağılımı	56
6.4: 0 °C iç sıcaklığa sahip kabin içerisinde çalışan motorun verimlilik grafiği	56
6.5: Yüksüz durumdaki ÜFAM'ın giriş gücünün sıcaklık ve devir sayısına göre değişimi	58
6.6: ÜFAM ve alternatör akuple şekilde ÜFAM'ın giriş gücünün sıcaklık ve devir sayısına göre değişimi	59
6.7: ÜFAM'ın boşta çalışmaya göre alternatör ile akuple şekilde boşta çalışmada alternatör milinde harcanan güç değişimi	60
6.8: 25 °C için ÜFAM'ın yüklü çalışma güç değişimleri	64
6.9: 20 °C için ÜFAM'ın yüklü çalışma güç değişimleri	64
6.10: 15 °C için ÜFAM'ın yüklü çalışma güç değişimleri	65
6.11: 10 °C için ÜFAM'ın yüklü çalışma güç değişimleri	66
6.12: 5 °C için ÜFAM'ın yüklü çalışma güç değişimleri	67
6.13: 0 °C için ÜFAM'ın yüklü çalışma güç değişimleri	67
6.14: %100 yükleme için verimlilik değişimi	68
6.15: %75 yükleme için verimlilik değişimi	69
6.16: %50 yükleme için verimlilik değişimi	69
6.17: Anma gücü için benzetim ve deneysel verimlilik sonuçlarının karşılaştırılması	70

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
<u>No</u>	<u>No</u>
2.1 : RHVT ve su soğutmalı bir elektrik motorunun soğutma performansları.....	4
5.1: Çalışmalarda kullanılan ÜFAM’a ait temel elektriksel parametreler	48
5.2: Benzetimde kullanılan motora ait ANSYS Motor-CAD temel parametreleri.....	53
6.1: Boşta çalıştırmada elde edilen sayısal veriler	57
6.2: Akuple çalıştırmada elde edilen sayısal veriler	59
6.3: Fansız yüklü çalıştırmada elde edilen sayısal veriler	61
6.4: Karşıt akışlı RHVT desteği ile soğutmada elde edilen sayısal veriler	62



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ω	:	Açısal hız
R_s	:	Stator sargı direnci
X_s	:	Stator sargı reaktansı
X_r^1	:	Stator devresine aktarılmış eşdeğer devrede rotor reaktansı
R_r^1	:	Stator devresine aktarılmış eşdeğer devrede rotor direnci
s	:	Kayma
X_m	:	Mıknatıslanma reaktansı
R_c	:	Çekirdek kaybı bileşeni
E_s	:	Stator sargılarında endüklenen gerilim
V_s	:	Statora uygulanan gerilimi
P_s	:	Stator kayıpları
I_s	:	Statordan çekilen akım
R_s	:	Stator sargı direnci
P_{rk}	:	Rotor kayıpları
I_r^1	:	Rotor ve manyetik devreden geçen akımı karşıladığından stator akımı
R_r^1	:	Stator devresine aktarılmış eşdeğer devrede rotor direnci
R_{etk}	:	Etkin rotor direnci
P_{rc}	:	Bir faz için çekirdek kayıpları
T	:	Sıcaklık
T_s	:	Yüzey sıcaklığı
ΔT	:	Sıcaklık farkı
Δl	:	Kalınlık
A	:	Alan
A_s	:	Yüzey alanı
$\dot{Q}$	:	Isı transferi

K	:	İletimde ısı transfer katsayısı
T_{∞}	:	Atmosfer sıcaklığı veya yüzeyden yeter uzaklıktaki akışkanın sıcaklığı
H	:	Taşınımda ısı transfer katsayısı
T_s	:	Yüzey sıcaklığı
G	:	Yerçekimi ivmesi
L_c	:	Karakteristik uzunluk
ν	:	Kinematik viskozite
T_f	:	Film tabakası sıcaklığı
Ra_L	:	Rayleigh sayısı
Gr_L	:	Grashof sayısı
Pr	:	Prandtl sayısı
P	:	Yoğunluk
V	:	Hız
μ	:	Dinamik viskozite
L	:	Duvar kalınlığı
Re	:	Reynolds sayısı
R	:	Isıl direnç
Σ	:	Işınımda stefan – boltzman sabiti
P	:	Güç kaybı
C	:	Termal kapasitans
θ	:	Sıcaklık artışı
θ_{ka}, θ_{kb} ve θ_{kc}	:	Sabit ortam sıcaklığı
ρ	:	Malzeme yoğunluğu
C	:	Öz ısı
V	:	Hacim
t_{ilk}	:	İletkenin ilk sıcaklığı

R_{ilk}	: İletkenin ilk direnci
R_{son}	: İletkenin son direnci
t_{son}	: İletkenin son sıcaklığı
P_s	: Anma yük deneyinde stator kaybı
$P_{s,\theta}$	: Referans soğutucuya göre düzeltilmiş stator kaybı
k_θ	: Stator sargısı için sıcaklık düzeltme faktörü
θ_c	: Deney süresince soğutucu giriş sıcaklığı
θ_w	: Sargı sıcaklığı
P_1	: Motorun giriş gücü
P_{fe}	: Demir kaybı
n	: Motor devir sayısı
n_{sync}	: Senkron devir
p	: Motor kutup sayısı
f	: Motorun çalışma frekansı
$P_{r,\theta}$	: Düzeltilmiş rotor kaybı
s_θ	: 25 °C’de referans soğutucu sıcaklığına göre düzeltilmiş kayma
k_θ	: Sıcaklık düzeltme faktörü
$P_{1,\theta}$	: Referans soğutucu sıcaklığına göre düzeltilmiş motor giriş gücü
P_{fw}	: Sürtünme vantilasyon kaybı
γ	: Korelasyon katsayısı
η	: Verim

KISALTMALAR

RHVT	: Ranque-Hilsch Vorteks Tüpü
ÜFAM	: Üç Fazlı Asenkron Motor
BP	: British Petroleum (İngiliz Petrolü)

IEA	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
IEC	: International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
NEMA	: National Electrical Manufacturers Association (Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği)
CEMEP	: The European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics (Avrupa Elektrik Makineleri ve Elektronik İmalatçıları Komitesi)
STB	: Türkiye Cumhuriyeti Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
TEDAŞ	: Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü

1. GİRİŞ

Enerjiyi; nükleer enerji, kimyasal enerji, mekanik enerji ve elektrik enerjisi gibi farklı formlarda kendini gösterebilen ve bir sistemin iş yapabilme kapasitesi olarak tanımlamak mümkündür. Günümüzde; kömür, doğalgaz ve petrol gibi yenilenemeyen birincil enerji kaynakları, enerji üretiminde ilk sıralarda yer almaktadır. Özellikle de doğalgazın çevreye az zarar vermesi, doğalgazın kullanılan enerji üretimindeki payını gün geçtikçe arttırmaktadır. Dünyada enerji üretim kaynakları arasında petrol birinci sırada, ikinci sırada kullanımı giderek azalan maden kömürü ve üçüncü sırada ise üretimi ve tüketimi hızla artış gösteren doğalgaz bulunmaktadır.

Teknoloji ve sanayideki ilerleme ve insan nüfusundaki artış nedeniyle, yeryüzündeki enerji ihtiyacı da o oranda artmaktadır. Enerji kaynaklarının hızla azalmasına neden olan bu artış, enerji tüketen sistemlerin yeniden tasarlanarak, daha verimli bir hale getirilmesine yönelik çalışmalar üzerine yoğunlaşılmasına yol açmıştır.

Dünya üzerinde üretimi gerçekleştirilen enerjinin sektörlere göre dağılımı incelendiğinde; %32'sinin elektrik üretimi ve ısıtma alanında, %27'sinin ulaşırmada, %40'ının sanayide, %1'inin ise diğer alanlarda kullanıldığı görülmektedir.

Elektrik enerjisi dünyada arz edilen enerjinin %20'lik kısmını oluşturmaktadır. Üretilen elektrik enerjisinin %54'lük kısmı evsel ve ticari kullanım, %43'ünü sanayi kullanımı, %1,9'unu ulaşım kullanımı, %1,1 ini ise diğer kullanımlar oluşturmaktadır (IEA, 2021; BP, 2022). Ayrıca, 2021 yılında oluşan CO₂ emisyonlarının 1/3'ünden fazlasını elektrik üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları oluşturmaktadır (IEA, 2022). Enerji ihtiyacının ve CO₂ emisyonlarının her geçen yıl artış göstereceği ve enerji ihtiyacının 2050 yılında en az 3 kat artacağı öngörülmektedir. Diğer taraftan, elektrikli araç teknolojisindeki hızlı gelişmelere paralel olarak elektrik enerjisine olan ihtiyacın artacağı, sektörlere göre elektrik enerjisi tüketiminde de ulaşım payının artacağı öngörülmektedir (IEA, 2021; BP, 2022).

Elektrik motorunun çalışması anında açığa çıkan yüksek sıcaklık; ani sürtünme kayıplarına, erken aşınmaya ve termal çatlak gibi donanımsal hatalara neden olmaktadır. Yüksek ısıya sürekli maruz kalan üç fazlı asenkron motor (ÜFAM) elemanları, motor verimliliğini ve

performansını olumsuz yönde etkilemektedir (Liu vd., 2021). Bundan dolayı, yüksek ısıya maruz kalan ÜFAM'dan ısının uzaklaştırılması büyük bir öneme sahiptir. Asenkron motorlarda, verimlilikte elde edilebilecek küçük bir iyileştirmenin, giriş gücündeki kayıplarda önemli ölçüde azalma meydana getireceği saptanmıştır. Ayrıca, endüstriyel motorlarda verimlilikte elde edilebilecek küçük bir iyileştirmenin uzun vadede önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlayacağı bilinmektedir (Faiz vd., 2008; Croitorescu vd., 2013).

Tez kapsamında önerilen çalışmada; ÜFAM'ın yüklü çalışması esnasında, ısınma kaynaklı enerji kayıplarının azaltılması ile motor verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır. Motor sıcaklığının azaltılması için soğuk akışkan kullanılmış, soğuk akışkan elde etmek için ise karşıt akışlı RHVT kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde önerilen yöntem ile IE3 verimlilik sınıfındaki 1,1 kW gücündeki ÜFAM'ın verimliliğinde artış kaydedilmiştir. Bilinen elektrik motoru soğutma yöntemlerinde soğutma akışkanını elde etme yöntemlerinden farklı olarak, soğutmada karşıt akışlı RHVT'den elde edilen soğuk havanın kullanılması ve önerilen yöntemle motor verimliliğinde artış elde edilmesi çalışmanın özgün olduğunu göstermektedir.

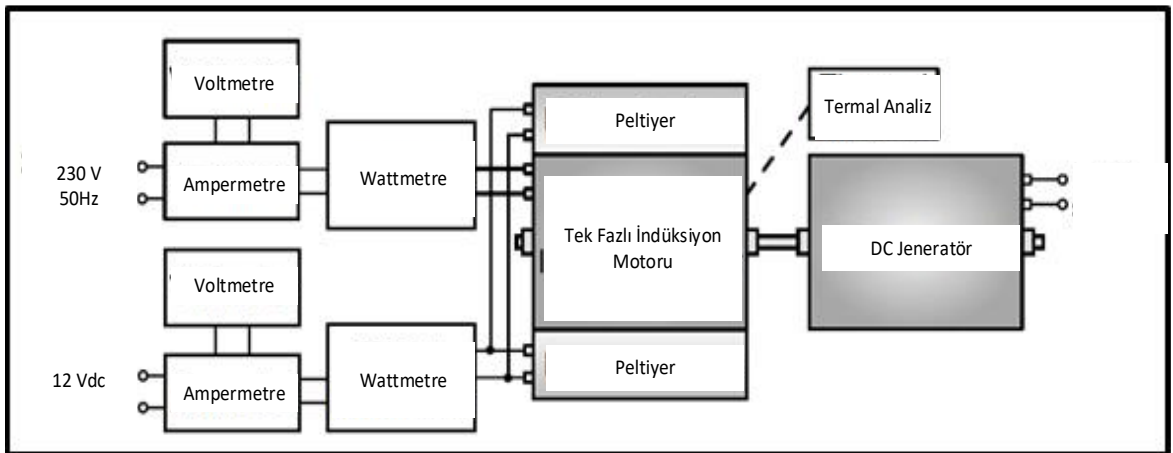
Bu çalışma; 7 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde konuya giriş yapılmış ve ikinci bölümde çalışmaya ilişkin literatür taraması yapılarak, elektrik motorlarında soğutma teknik ve yöntemleri ele alınmıştır. Üçüncü bölümde; çalışma kapsamında önerilen soğutma yönteminde soğuk akışkanı sağlayan Ranque-Hilsch vorteks tüpün çeşitleri ve çalışma prensibi incelenmiştir. Çalışmanın dördüncü bölümünde; üç fazlı asenkron motorun yapısı, rotoru sincap kafesli asenkron elektrik motorunun elektriksel ve termal modeli üzerinde durulmuştur. Beşinci bölümde, önerilen çalışmada kullanılan metot ve materyal ele alınmıştır. Altıncı bölümde, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar açıklanmış, son bölümde ise deneysel çalışma sonuçları irdelenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatür araştırması kapsamında; elektrik motoru soğutma yöntemlerine ilişkin özellikle son 10 yılda gerçekleştirilen çalışmalar ve sonuçları incelenmiştir. Elektrik motoru soğutmasında karşıt akışlı RHVT kullanımına ilişkin literatür taranmıştır. Bu kapsamda elde edilen literatür özeti aşağıda yer almaktadır.

Croitorescu vd. (2012) yaptıkları çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorunun enerji kayıplarını incelemek ve verimliliğini belirlemek için benzetim çalışmasından yararlanmışlardır. Çalışmada; rotor çekirdeği, stator çekirdeği ve motor gövdesinin soğutulması amaçlanmıştır. Termal dirençlere bağlı olarak, motorun farklı parçaları için dahili kayıpları hesaplamak üzere, termal bir ağ geliştirilmiş, benzetim kullanarak da hem motor hem de termal modeli incelemek için elektrik motoru, sanal bir hibrit elektrikli araca model olarak entegre edilmiştir. Benzetim sonucunda; sıcaklık artışı nedeniyle elektrik motorunda meydana gelen güç kayıpları analizi yapılmış ve elektrik motorunun geometrik modeli ile geometrik parametrelerin etkisinin sıcaklık artışına olan etkileri değerlendirilmiştir.

Gouws ve Jaarsveldt (2012) Şekil 2.1’de yer alan deneysel sistemde gerçekleştirdikleri çalışmada, geleneksel hava soğutma sistemine ilave olarak peltiyer kullanılan bir soğutma sistemi önermişlerdir. Yaptıkları benzetim çalışması sonucunda, elektrik motorunun verimliliğini %3,75 artırdıklarını ifade etmişlerdir.



Şekil 2.1: Gouws ve Jaarsveldt'in deneysel sistem şeması (Gouws ve van Jaarsveldt, 2012)

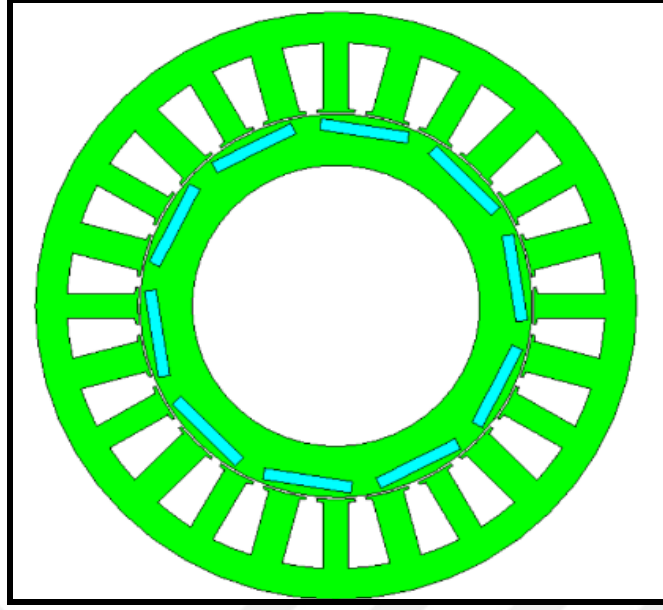
Nollau ve Gerling (2013), Şekil 2.2’de tasarımı yer alan hibrit / elektrikli araçlarda kullanılan sabit mıknatıslı doğru akım elektrik motorunun RHVT yardımıyla soğutulmasını su soğutma ile karşılaştıran bir modelleme çalışması yapmışlardır. Yalnızca modelleme sonuçlarının yer aldığı çalışmanın birinci aşamasında, stator üzerine üçgen soğutma kanalları açmışlar ve buradan soğutucu olarak vorteks tüp ile soğutulan havayı geçirerek analizler gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmanın ikinci aşamasında ise statoru alüminyum esaslı silindir ile oluşturulan bir su ceketini ile soğutarak analizler gerçekleştirmişlerdir.

Soğutucu olarak RHVT vorteks tüp yardımıyla elde edilen -40 °C sıcaklıkta havayı ve 30 °C sıcaklıkta suyu kullanmışlar ve 3000 rpm / 8000 rpm motor devirleri için benzetim çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonunda elde edilen veriler Tablo 2.1’de yer almaktadır.

Tablo 2.1 : RHVT ve su soğutmalı bir elektrik motorunun soğutma performansları (Nollau ve Gerling, 2013)

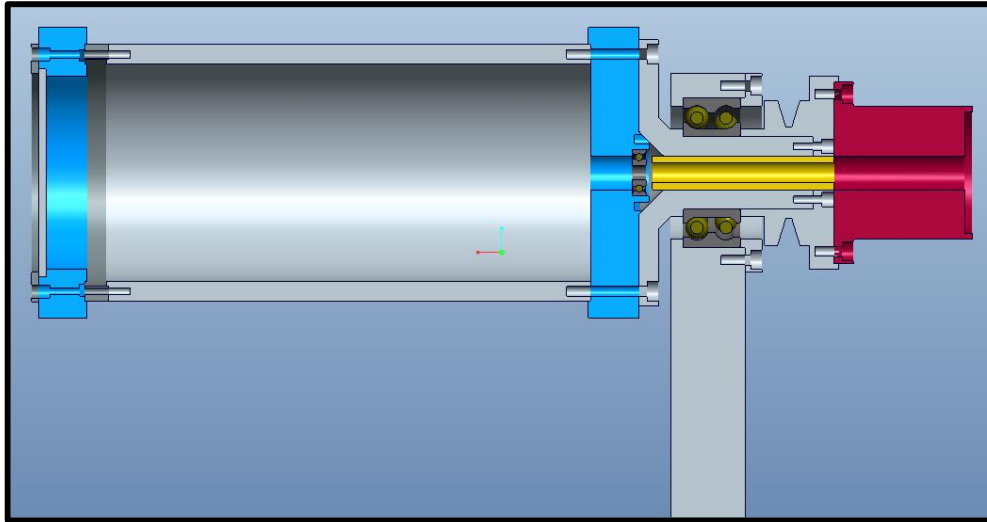
	Su Soğutmalı		RHVT Soğutmalı	
	3000 rpm	8000 rpm	3000 rpm	8000 rpm
Stator sargı	121,55 °C	140,26 °C	113,15 °C	170,55 °C
Stator dişleri (iç)	77,51 °C	95,65 °C	83,29 °C	144,84 °C
Stator dişleri (dış)	69,02 °C	86,37 °C	57,94 °C	111,94 °C
Stator boyunduruğu	48,38 °C	57,90 °C	41,49 °C	90,73 °C

Çalışmanın sonucunda; RHVT ile elektrik motoru soğutmanın ucuz ve etkili bir yol olabileceğini, düşük motor devirlerinde sargılardaki sıcaklık dağılımının eşit olduğunu ve stator sıcaklığının su soğutmalı bir motora göre %60'a kadar daha iyi düşürülebileceğini bildirmişlerdir. Ayrıca, su soğutmalı sistem ile yüksek ısı transferi koşuluna bağlı olarak, yüksek devirlerde motorun daha iyi soğutulduğunu bildirmişlerdir.



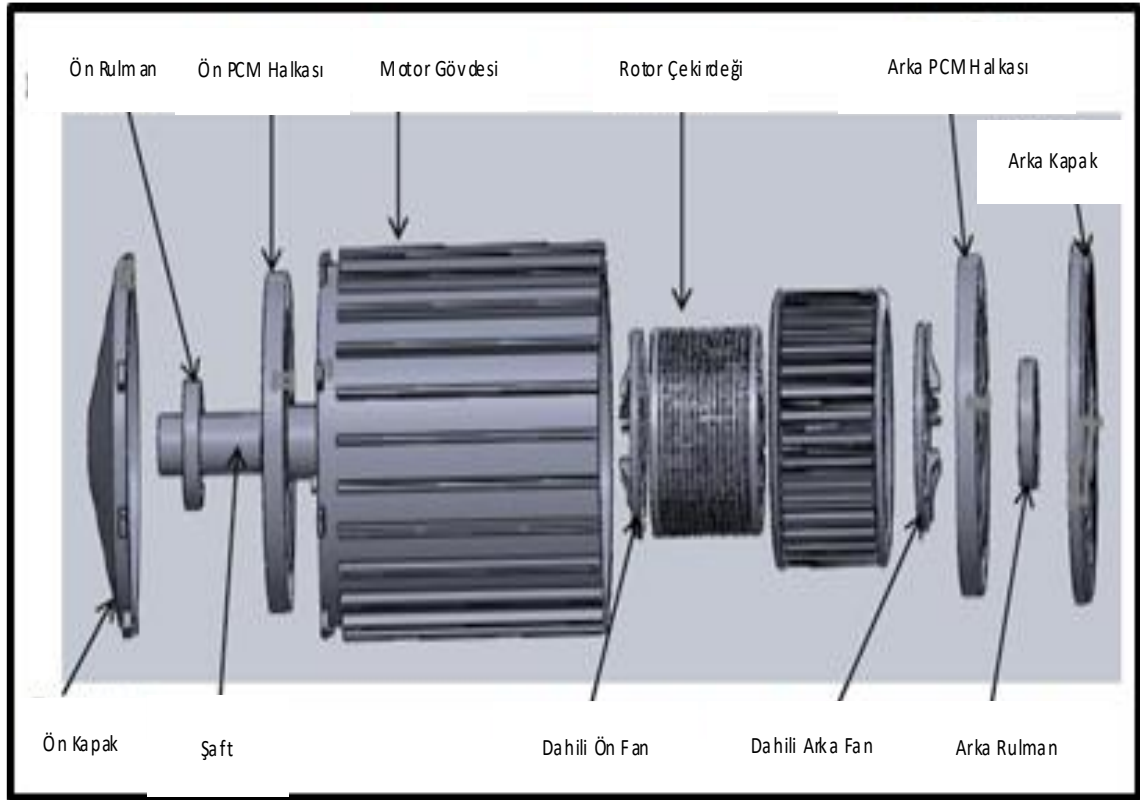
Şekil 2.2: Nollau ve Gerling tarafından kullanılan motor tasarımı (Nollau ve Gerling, 2013)

Fröb (2014) tarafından Şekil 2.3'te yer alan deneysel sistemde gerçekleştirilen çalışmada, elektrik motorunu güvenli bir çalışma sıcaklığında soğutmak, performansını artırmak ve ayrıca, üretim maliyetlerini azaltmak için elektrik motorunun soğutmasında yağ püskürtme tekniği kullanılmıştır. Çalışmada, rotor çekirdeği ve stator çekirdeği soğutulması amaçlanmıştır. Yağ püskürtmeli soğutma sistemi, elektrik motor rotorunun iç kısmına yağı püskürtmek için tasarlanmış ve yapılan analiz sonuçları, bir test düzeneğinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.3: Fröb tarafından gerçekleştirilen deney düzeneğinin kesiti (Fröb, 2014)
Rajapakshe (2014) tarafından Şekil 2.4'te yer alan deneysel sistemde yapılan çalışmada,

elektrik motorunun soğutulmasında faz değıştiren malzemelerin kullanılması araştırılmıştır. Bir duman havalandırma motorunun 3B modeli oluşturulmuş ve 350 °C'ye kadar varsayılan duman sıcaklıkları için termal analizler gerçekleştirilmiştir. Uç sargı bölgesi gibi bazı motor bileşenlerinin yüksek sıcaklık değerlerine ulaştığını belirtmiştir. Tüm ısı kaynaklarının ve tüm ısı iletim yöntemlerinin motor modeline dahil edilmesinin sonuçların doğruluğunu arttırdığını belirtmiştir. Ayrıca, rotor sargılarının, stator sargıları ve stator demir nüvesine göre daha düşük sıcaklıkta kaldığını belirtmiştir.



Şekil 2.4: Benzetim çalışmasında kullanılan motorun 3B detay resmi (Rajapakshe, 2014)

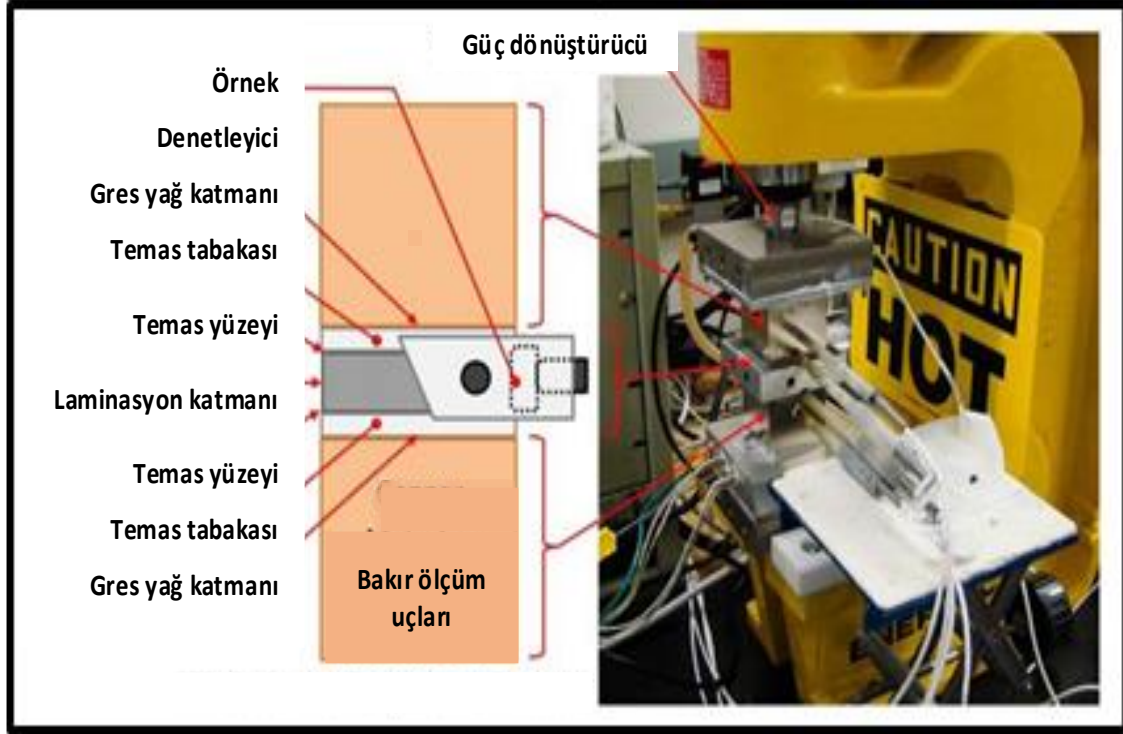
Chen ve Yang (2014) tarafından yapılan çalışmada; mikro-elektrikli araçlarda tekerlek içi motorun verimliliğini ve ömrünü artırmak için termal kayıp ve sıcaklık alanı hesaplanmış ve gerekli olan analizler gerçekleştirilmiştir. Termal kayıp ve sıcaklık alanının matematiksel modeli oluşturulmuş, stator sargısının eşdeğer modeli incelenmiş, konveksiyon ısı transfer katsayıları hesaplanarak tekerlek içi motorun ısı dağılım analizi gerçekleştirilmiştir. Isı kaynağı olarak sıcaklık alanına bağlanan sargı bakır kaybı, stator ve rotor çekirdek kaybı ve kalıcı mıknatısın girdap akım kaybı hesaplanmıştır. Ayrıca, sıcaklık alanının üç boyutlu

sonlu eleman modeli oluşturulmuş, statik ve geçici durum sıcaklıkları benzetim yapılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda; stator bölgesinin toplam sıcaklığının, rotor bölgesininkinden daha yüksek olduğunu, stator demir çekirdeği sıcaklığının yalıtkan filmin sıcaklığıyla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Üç boyutlu sonlu elemanlar yönteminin ölçüm sonuçlarının; nihai benzetim sonuçlarıyla uygun olması nedeniyle, tekerlek içi motoru optimize etmek için teorik bir temel sağlayabileceğini ve tekerlek içi motorun termal kaybını ve sıcaklık dağılımını analiz etmek için doğru ve uygulanabilir olduğunu bildirmişlerdir.

Zhou (2015) tarafından yapılan çalışmada, elektrik motoru içerisinde rotor ve stator arasında bulunan hava boşluğu ile sargı uçlarının soğutulması amaçlanmıştır. Elektrikli araç motorları için, araç aktarma organlarının tasarımı, optimizasyonu ve kontrolünde; kullanıma uygun, hesaplama açısından verimli ve doğru termal ve elektromanyetik modeller geliştirilmiştir.

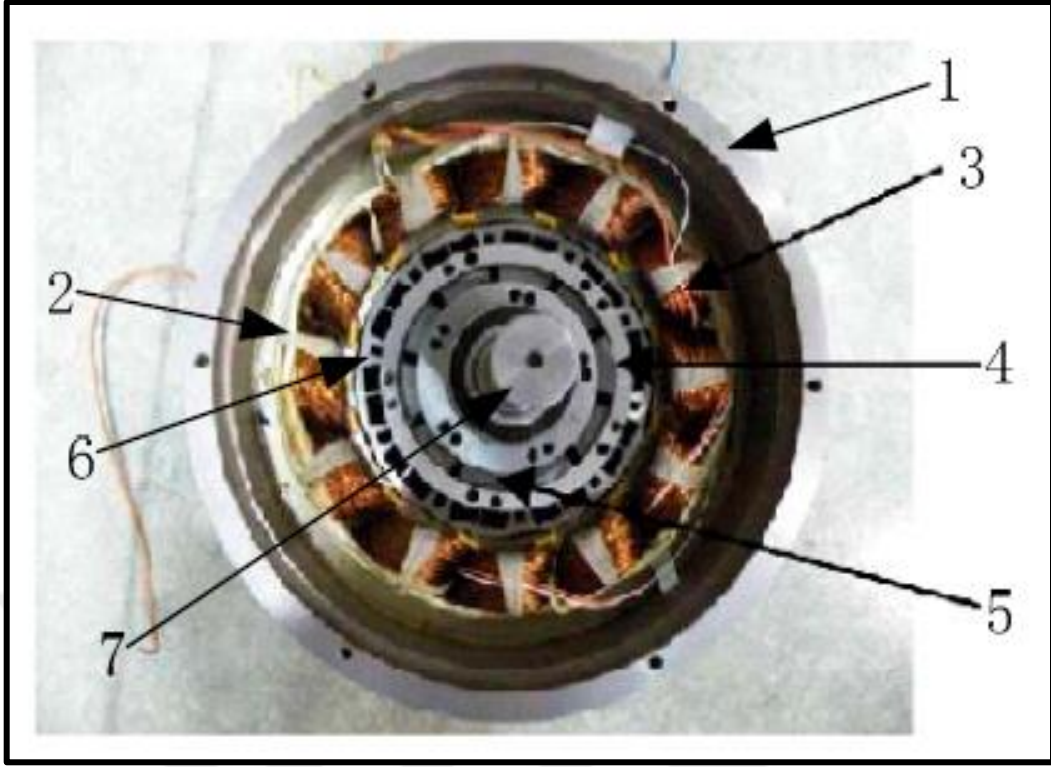
Kulkarni and Basavaraddi (2016) yaptıkları çalışmada, 160 kW gücünde hava soğutmalı alternatif akım indüksiyon motor gövde tasarımının termal, mekanik ve dayanıma etkilerini ANSYS programı kullanarak incelemişlerdir. Yeni tasarladıkları motor gövdesinde bulunan en yüksek sıcaklığı 145,9 °C hesaplarken, optimize edilmemiş olan motor gövdesinde bulunan en yüksek sıcaklığı 167,79 °C olarak bulmuşlardır. İki farklı motor gövde sıcaklığında elde edilmiş olan yaklaşık 22 °C'lik iyileşme neticesinde verimin ve gövde ömrünün artacağını belirtmişlerdir.

Bennion (2016) tarafından hazırlanan araştırma projesinde, endüstri talebinin desteklenmesi amacıyla, elektrik motorunun termal yönetimini iyileştirmek ve daha iyi anlamak için veri analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Çalışmada, motor termal yönetimi ile ilgili olarak pasif termal performans ve aktif konvektif soğutma yöntemleri ele alınmıştır. Pasif termal performans incelemesinde, elektrik motoru içindeki malzemeler arasındaki termal ilişkiler incelenmiştir. Bir elektrik motorunda termal temas dirençleri ve yöne bağlı termal iletkenlik için test yöntemleri incelenmiştir. Aktif konvektif soğutmada ise otomatik şanzıman sıvısı kullanarak, konvektif ısı transfer katsayılarının ölçülmesi hedeflenmiştir. Otomatik şanzıman sıvısı jetlerinin elektrik motorunu doğrudan soğutması için ortalama konvektif ısı transfer katsayılarına ilişkin veriler hesaplanmış ve ayrıca, otomatik şanzıman sıvısı jet soğutması için Şekil 2.4'te yer alan deneysel sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir.



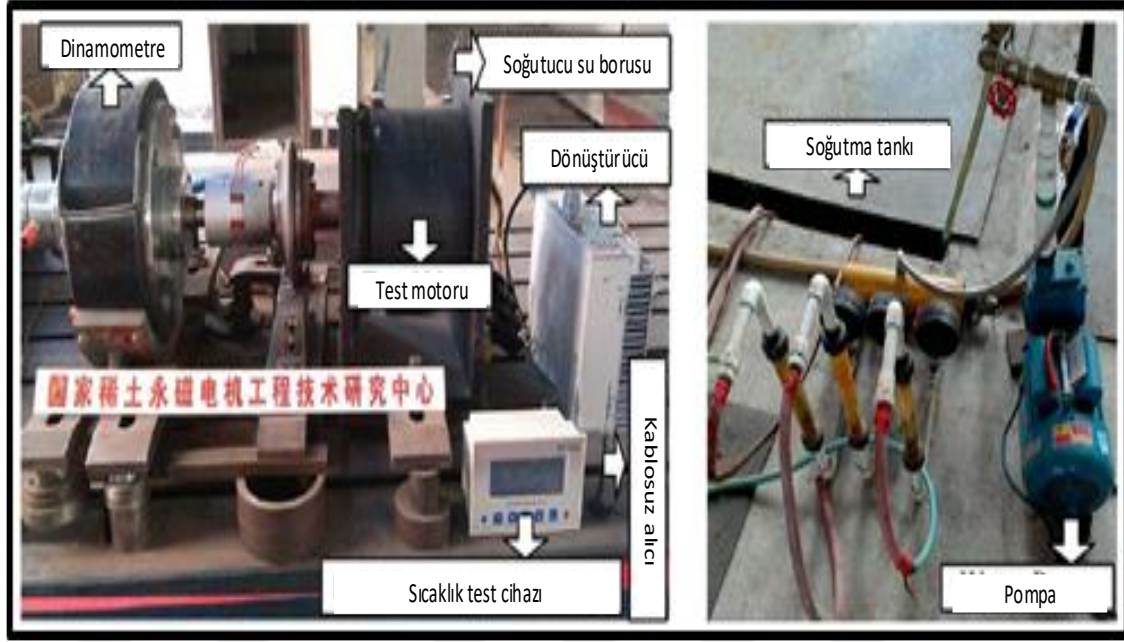
Şekil 2.5: Yüksek basınç altında stator-kasa termal temas direncini ve laminasyon düzlem içi termal iletkenliği ölçmek için deney düzeneği (Bennion, 2016)

Li vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada; elektromanyetik hesaplama ve analizler için üç boyutlu matematiksel model oluşturulmuş ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak motor kayıpları hesaplanmıştır. Kayıplar, termal hesaplama için ısı kaynağı olarak kullanılmış ve termal hesaplama için matematiksel model elde edilmiştir. Son olarak, endüvi sargısı ve eksenel alan sargısı geliştirilen elektrik motorunun, üç boyutlu elektromanyetik ve termal hesapları çözülerek, motor bileşenlerinin sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Kurulan modellerin doğruluğunu hesaplamak için Şekil 2.6’de yer alan prototip üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Ardından, makine bileşenlerinin farklı eksenel manyetik hareket kuvveti altındaki sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Son olarak, bakır tel kullanılan elektrik motoru ile süper iletken tel kullanılarak geliştirilen elektrik motorunun sıcaklık dağılım farkları belirtilmiştir. Yaptıkları çalışmanın süperiletken tel kullanılan bobinler ve kriyojenik soğutma sistem tasarımı için yararlı bir referans sağlayacağını belirtmişlerdir.



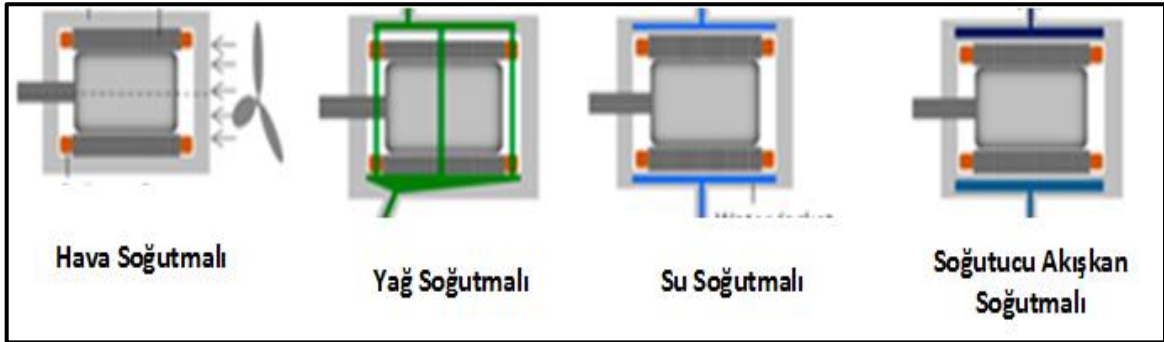
Şekil 2.6: Li vd. tarafından imal edilen prototipin temel yapısı (1-muhafaza, 2-stator çekirdeği, 3-armatür sargıları, 4-dış ferromanyetik halka, 5-iç ferromanyetik halka, 6-rotor çekirdeği, 7-mil) (Li vd., 2018)

Zhu vd. (2018) Şekil 2.7’de yer alan deneysel sistem ile yaptıkları çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan 10 kW gücündeki sabit mıknatıslı motorun soğutma işleminde su ve hava soğutma sistemini birlikte kullanmışlardır. Gerçekleştirdikleri çalışmada, termal analizler sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmış ve elde edilen sonuçlar, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yalnızca hava soğutmanın kullanıldığı geleneksel soğutma yöntemlerine alternatif olarak önerilen çalışmalarında, rotora açılan kanallardan hava geçirilerek daimî mıknatısın sıcaklığı 23,7 °K azaltılabilmektedir. Rotordaki hava soğutmaya ilave olarak boşluk bölgesinden su geçirilerek 7,4 °K’lık bir sıcaklık düşüşü daha sağlanmıştır. Böylelikle geleneksel hava soğutmasına göre 31,1 °K iyileşme sağlanmıştır.



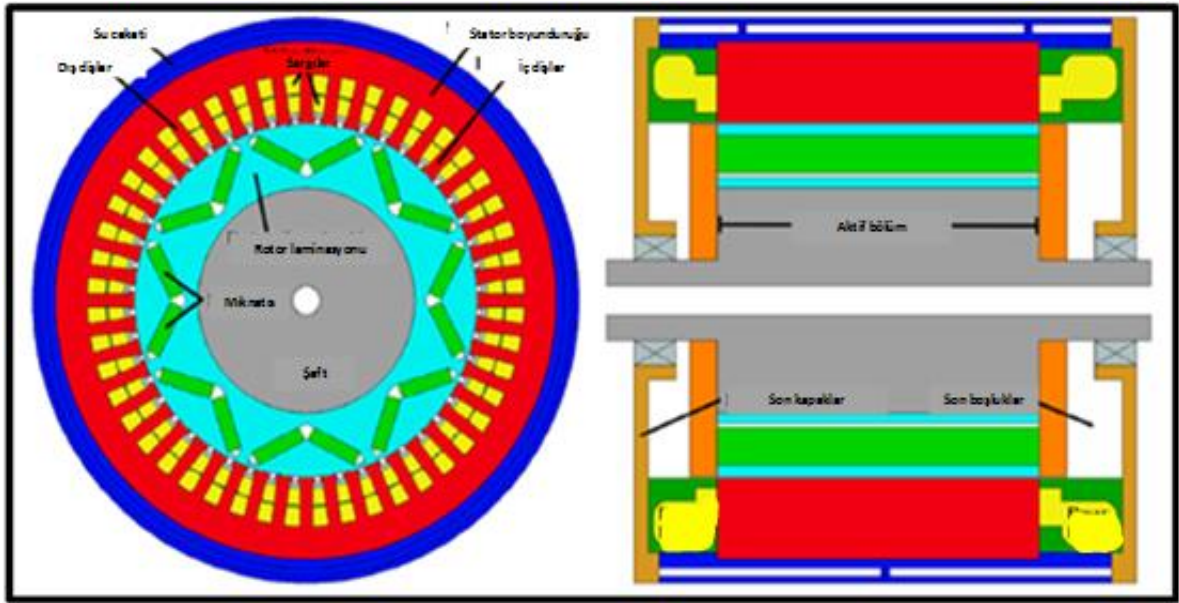
Şekil 2.7: Zhu vd. tarafından geliştirilen deneysel sistem (Zhu vd., 2018)

Fujita vd. (2019), benzetim ve deneysel olarak gerçekleştirmiş oldukları çalışmada, geleneksel su soğutmalı elektrik motoru ile soğutucu akışkan kullanılarak soğutulan elektrik motorunu karşılaştırmışlardır. Çalışmada; rotor çekirdeği, stator çekirdeği, motor gövdesi ve sargıların soğutulması amaçlanmıştır. Elde ettikleri veriler sonucunda; soğutucu akışkan kullanılarak soğutmanın, serpantin sıcaklığını ortam sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda tuttuğunu, nominal torkun %60 oranında ve ayrıca, maksimum torkta çalışma süresinin %34 oranında arttığını ortaya koymuşlardır. Soğutucu akışkan ile elektrik motorun soğutmasının geleneksel su soğutmalı elektrik motoru soğutmasından daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.



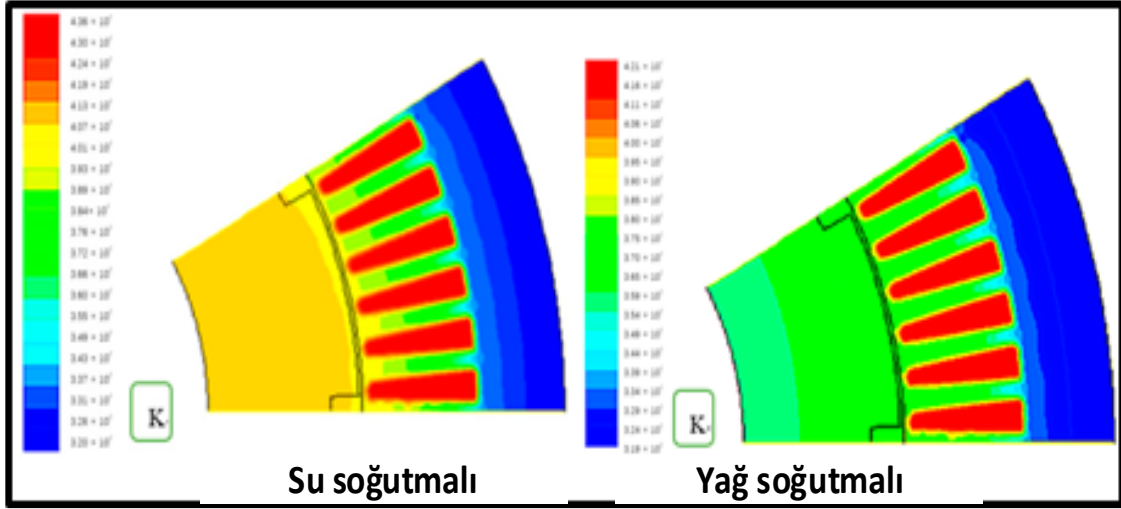
Şekil 2.8: Fujita vd. çalışmalarında belirttikleri motor soğutma yöntemleri (Fujita vd., 2019)

Cavazzuti vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; Formula E’de kullanılan elektrikli bir aracın motorunun termal yönetimi, analizi ve optimizasyonu ele alınmıştır. Su ceketli soğutmasına sahip yüksek performanslı fırçasız senkron elektrik motorunun termal analiz sonuçları verilmiştir. Analiz, motordaki en önemli termal yolların ve bunları etkileyen ana parametrelerin tanımlanmasına izin veren toplu parametre termal ağ yaklaşımı izlenerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, modelde sistematik duyarlılık analizlerini ve optimizasyonları gerçekleştirmek için harici girdiler kullanılmıştır. Optimize edilmiş geometri ile sargı sıcaklığında önemli bir azalma sağlanmış ve motor verimi ile gücün sargı sıcaklığı ile ters orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 2.9’da oluşturdukları motor modeli verilmiştir.



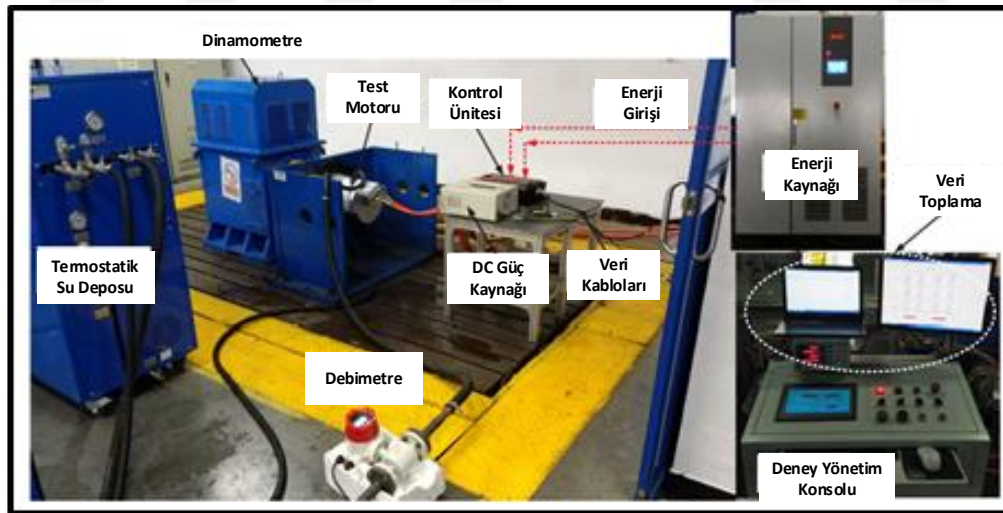
Şekil 2.9: Motor-CAD ile oluşturulan motorun radyal ve eksenel şematik görünüşleri (Cavazzuti vd., 2019)

Guo ve Zhang (2019) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada; elektrikli araçlarda kullanıma uygun daimî mıknatıslı senkron bir elektrik motoru için yağ soğutma tabanlı bir soğutma sistemi önerilmiştir. Gerçekleştirilen analiz ve hesaplamalar sonucunda, stator sargı sıcaklıklarında önemli ölçüde iyileşme meydana geldiğini ve bunun neticesinde de verimliliğin %2 - 3 oranında arttığını bildirmişlerdir. Ayrıca; yağ soğutmalı elektrik motoru sisteminde, su soğutmalı elektrik motoru sistemine göre rotor ve sargı sıcaklıklarında %15’lik bir düşüş olduğunu, bu düşüşünde verim ve motor ömrünü arttıracak olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmalara ait benzetim sonuçları Şekil 2.10’da verilmiştir.



Şekil 2.10: Nominal çalışma koşulları altında yağ soğutma ve su soğutmanın motor benzetim sonuçları (Guo ve Zhang, 2019)

Sun vd. (2019), elektrikli araçlarda kullanılan 53 kW gücünde olan sabit mıknatıslı senkron motorlarda sargı sıcaklığının ısı boruları yardımıyla ve silikon jelatinle yalıtılmış ısı boruları yardımıyla düşürülmesine ilişkin bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında kullanılan deneysel sistem tasarımı Şekil 2.11’de verilmiştir.

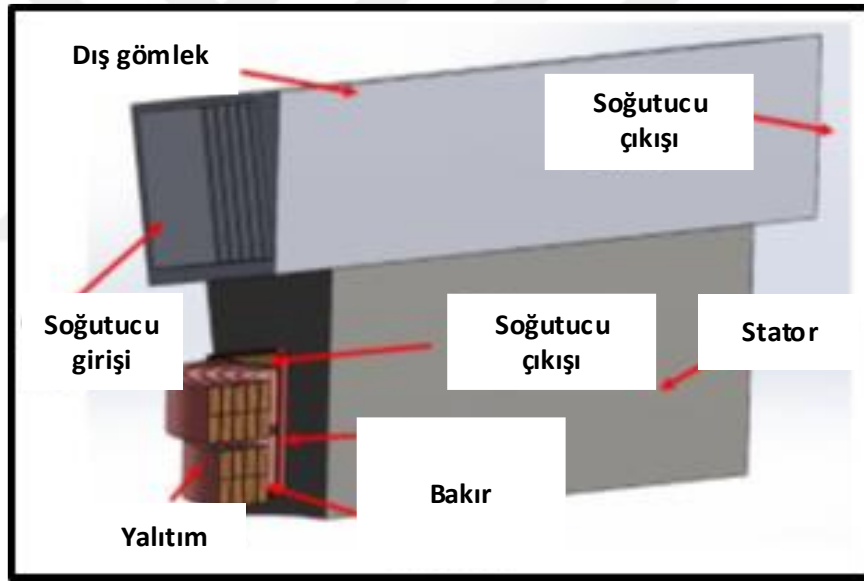


Şekil 2.11: Deneysel sistem (Sun vd., 2019)

Çalışmada, hava soğutma sisteminin düşük ısı uzaklaştırma kapasitesi nedeniyle yüksek güçteki motorlarda kullanılamayacağını belirtmişlerdir. Silikon jelatinle yalıtılmış ısı borusu ile soğutulan motor ile yalnızca ısı borusu yardımıyla soğutulan motora göre 22,9 °C daha düşük sıcaklık elde edildiğini, motor tam yükte çalışırken %50,6 daha fazla soğutma

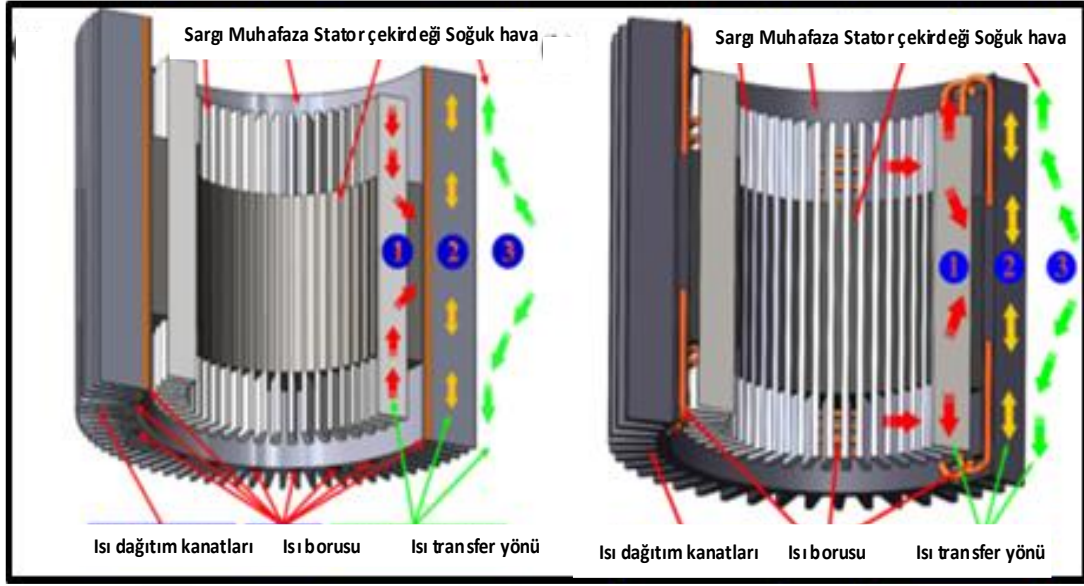
etkisinin bulunduğunu, ancak silikon jelatinle yalıtılmış ısı borulu sistemlerin üretim maliyetlerinin hava soğutmalı tipteki sistemlere göre çok daha fazla olduğunu bildirmişlerdir.

McCluskey vd. (2019), hibrit elektrikli uçak tahriki için akıllı bir elektrik motorunun termal yönetimine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Şekil 2.12’de yer alan model üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, büyük miktarlarda ısıyı aktarmak için kolay ve güvenilir bir yöntem olan dolaylı sıvı soğutmayı kullanmışlardır. Uçak tahrik motorunun statoru için bir soğutma ceketini tasarlanmış ve soğutma performansı 200 kW ve 1MW motorlar için simüle edilmiştir. Tasarlanan soğutma ceketinin; 200 kW’lık motoru önerilen maksimum çalışma sıcaklığının altında tutmak için yeterli olduğunu; ancak 1 MW’lık motor soğutmak için ek soğutma gerektiğini belirtmişlerdir.



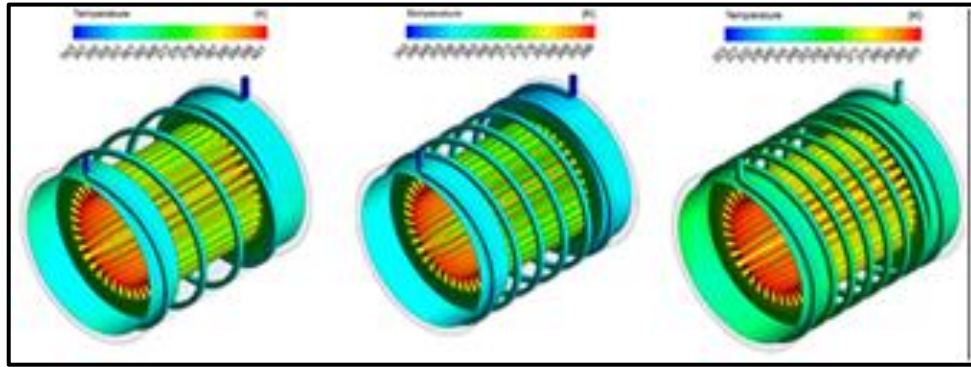
Şekil 2.12: Motor ve soğutma ceketinin benzetim modeli (McCluskey vd., 2019)

Fang vd. (2019) Şekil 2.13’te yer alan model üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada; elektrik motorunda stator sargılarının çevresine içerisinde hava dolaşan ısı borularını yerleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda, elektrik motorunda geleneksel fan soğutmalı sisteme göre stator sargısı sıcaklığında %22,3’e kadar iyileşme elde edildiğini ve bunun neticesinde de motor verimliliğinin %3,5 oranında artacağını bildirmişlerdir.



Şekil 2.13: Isı borusu kullanılan soğutma sistemi şeması (Fang vd., 2019)

Deriszadeh ve de Monte (2020) yaptıkları çalışmada; elektrik motorlarının soğutma sistemi için ileri soğutucular olarak, nanoakışkanların sıvı akışı ve ısı transfer özelliklerini incelemiştir. Spiral kanallı bir soğutma sistemi için sayısal analizler kullanılarak yapılan çalışmada, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve 3B akışkan hareketi analizi kullanmışlardır. Yapılan analizlere ait sıcaklık dağılımları Şekil 2.14’te verilmiştir.



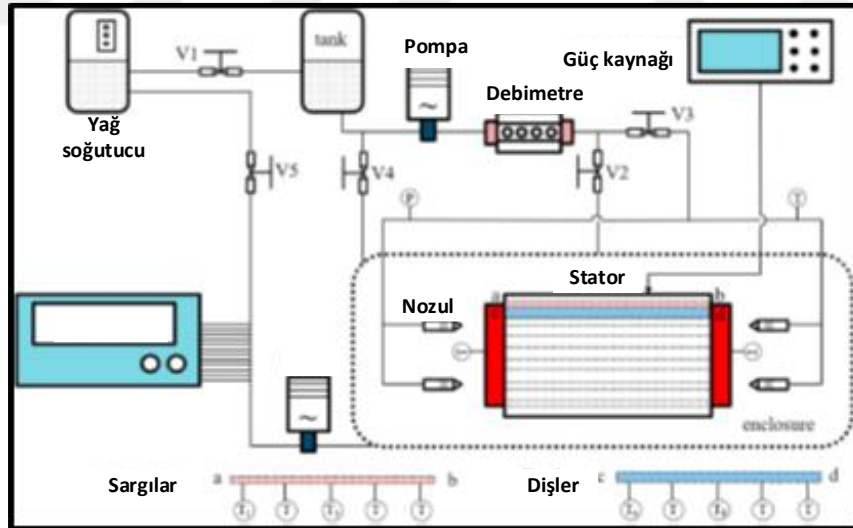
Şekil 2.14: Nanoakışkan kullanan soğutma sisteminin sıcaklık dağılımları (Deriszadeh ve de Monte, 2020)

Temel soğutma sıvısı olarak, laminar akışlı suyu kullanmışlar ve soğutma suyunun içerisine eklenen ve ısı transfer katsayısını arttıran nanoparçacıkların ısı transfer performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Yaptıkları benzetim çalışması sonucunda, hacim oranı %4 olan nanopartiküllerin soğutma suyuna eklenmesinin soğutma sisteminin ısı transfer

kabiliyetini %40'a kadar arttırdığını tespit etmişlerdir.

Gundabattini vd. (2021) gerçekleştirdikleri derleme çalışmasında; son yıllarda gerçekleştirilen elektrik motoru soğutma çalışmalarını ele almışlar ve sonuçları değerlendirmişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonuç bölümünde şu temel tespitlere yer verilmiştir:

Motorların verimliliğini arttırmak için yüksek sıcaklık süper iletken teknolojisi araştırılmalı, kayıpları azaltmak için elektrik motorunun vektör kontrolü üzerinde durulmalı ve elektrik motoru verimliliğini arttırmak için kriyojenik soğutma, hidrojen soğutma ve ısı borusu kullanarak soğutma konularında daha fazla araştırma yapılmalıdır. Yine; benzetim çalışmaları tamamlanmış olan darbe tüplü soğutma, termo iyonik soğutma, termo akustik soğutma ve manyetik soğutma gibi yeni soğutma sistemleri üzerinde de deneysel çalışmalar yapılarak doğrulamalar gerçekleştirilmelidir. Soğutmada akışkanların kullanıldığı yöntemlerde nanoparçacık etkisi incelenmelidir, elektrik motoru verimliliğini arttıran yeni teknolojiler üzerinde çalışmalar sürekli devam etmelidir.



Şekil 2.15: Test ünitesinin şematik gösterimi (Wang vd., 2022)

Wang vd. (2022), Şekil 2.15'te şematik görüntüsü verilen deney düzeneğinde, elektrik motorlarında ısı nedeniyle kaybolan enerjinin azaltılabilmesi için uç sargılara uygulanan yağ spreynin, soğutma performansı üzerine etkilerini incelemek maksadıyla, deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yapılan deney düzeneğinde, yağ akış hızı ve yağ sıcaklığının soğutma

performansı üzerine etkisini incelemişlerdir. Daha yüksek yağ sıcaklığı ve daha büyük yağ akış hızı ile daha düşük sarım ve dış sıcaklıklarının yanı sıra daha küçük sıcaklık gradyanlarının elde edildiğini göstermişlerdir. Ayrıca, deneysel verileri ilişkilendirmek ve uç sargılara uygulanan yağ spreynin ısı transfer performansını tahmin etmek için bir model geliştirmişlerdir.



3. RANQUE-HILSCH VORTEKS TÜP

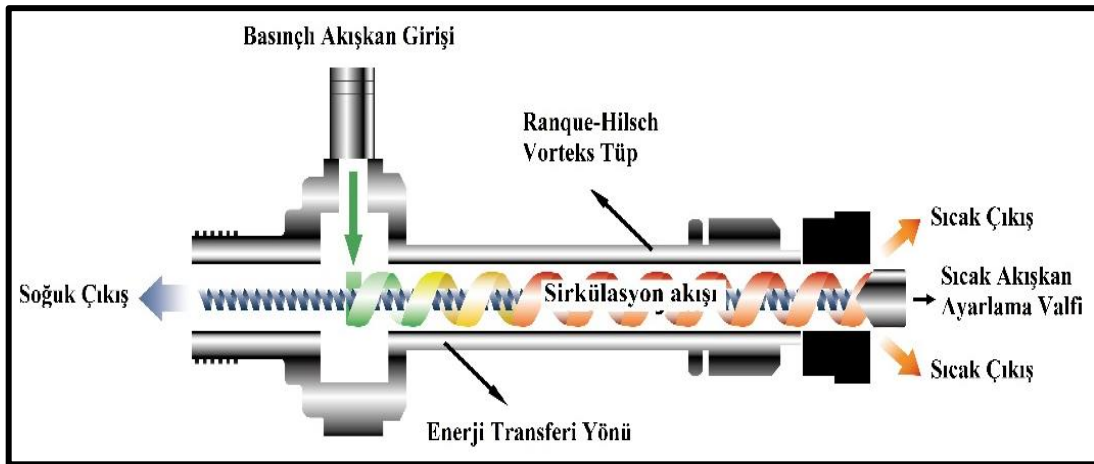
Vorteks tüp, herhangi bir hareketli parçası olmayan, yalnızca basınçlı akışkan yardımıyla aynı anda hem sıcak akışkan hem de soğuk akışkan üreten ve Fransız bilim insanı George Joseph Ranque tarafından keşfedilmiş ve Alman fizikçi Rudolph Hilsch tarafından geliştirilmiş bir sistemdir (Kınagu, 2015; Kırmacı, 2020). Ebatlarının küçük ve hafif olması, hızlı bir şekilde rejime ulaşması, kimyasal soğutucu akışkanlar gerektirmemesi ve ekolojik açıdan zararlı olmaması gibi birçok özelliği ile RHVT'ler günümüzde birçok soğutma ve ısıtma problemine çözüm olabilmektedirler (Guo ve Zhang, 2019; Kaya vd., 2019; Cebeci vd., 2022).

3.1 Akış Biçimlerine Göre Vorteks Tüpler

Vorteks tüpler, akış karakteristiklerine göre değerlendirildiğinde karşıt ve paralel olmak üzere iki ana başlık altında toplanmaktadır.

3.1.1 Karşıt Akışlı

Şekil 3.1' de Karşıt Akışlı RHVT'ye ait görünüm verilmiştir.



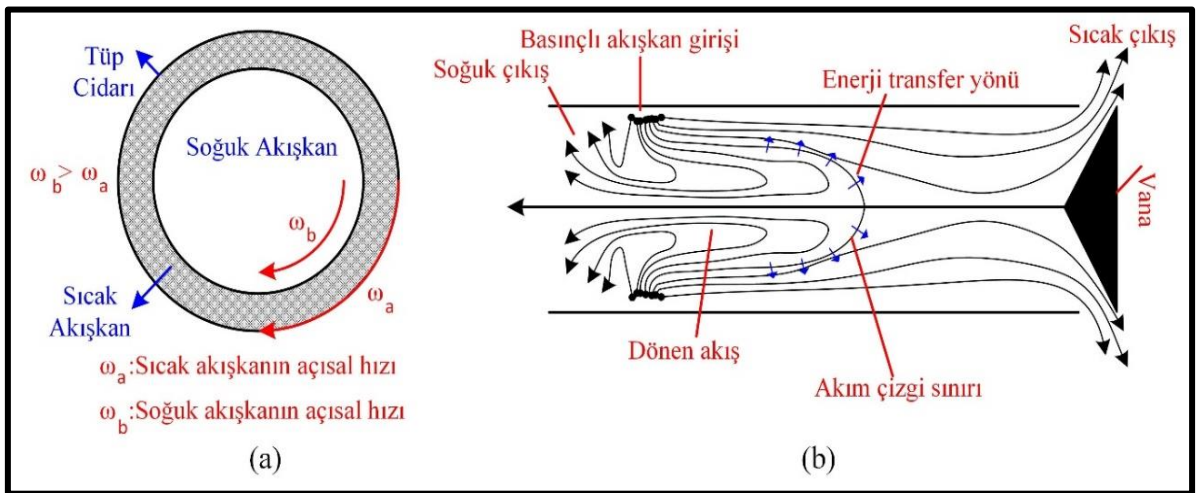
Şekil 3.1: Karşıt akışlı RHVT'nin şematik gösterimi (Kırmacı, 2017)

Karşıt akışlı RHVT'lerde farklı sıcaklıklarda bulunan iki akış elde edilmesinin temelinde, Şekil 3.2'de yer alan ve iki farklı açısal hıza sahip dönen akışlar arasında gerçekleşen

mekanik enerji transferi yer almaktadır.

Kaynaktan basınçlı olarak gelen akışkan, vorteks tüpün giriş kısmında bulunan nozuldan geçerek karşıt akışlı RHVT'ye teğetsel olarak girer. Vorteks tüpün girişinde bulunan nozul, basıncın düşürülerek akış hızının artmasını sağlamaktadır. Nozuldan geçen basınçlı akışkan, tüp yapısının silindirik olmasından dolayı dönmeye başlar. Çok büyük açısal hızla dönerek hareket eden merkezdeki akış, meydana gelen merkezkaç kuvvetinin etkisi nedeniyle vorteks tüpün duvarına doğru açılmaya zorlanır. Vorteks tüpün merkezinde yer alan akışkan ile tüp duvarındaki akışkan arasında basınç farkı meydana gelir (Kaya vd., 2019). Vorteks tüpün duvarı ile merkezi arasında oluşan basınç farkı nedeniyle de akış, vorteks tüp merkezinden duvarına doğru genişler. Açısal momentumun korunumu ilkesi gereği, vorteks tüpün merkezindeki akışın açısal hızı, vorteks tüpün iç duvarındaki akışın açısal hızından daha büyük değerlere ulaşır. Bu nedenden ötürü, vorteks tüp içerisinde farklı iki hızda dönen akış meydana gelir. Tüpün merkezinde yer alan akış hızı daha yüksek bir değere sahip olduğundan, duvardaki akışı ivmelendirmeye çalışır.

Bu nedenle, merkezde yer alan akıştan, duvardaki akışa mekanik enerji transferi gerçekleşir. Merkezdeki yer alan akış, mekanik enerjisinde azalma olduğu için soğuk akış olarak, tüp duvarında yer alan akış ise sürtünme etkisi ve tüp merkezindeki akıştan aldığı mekanik enerji nedeniyle sıcak akış olarak vorteks tüpü terk eder (Cebeci, 2013).

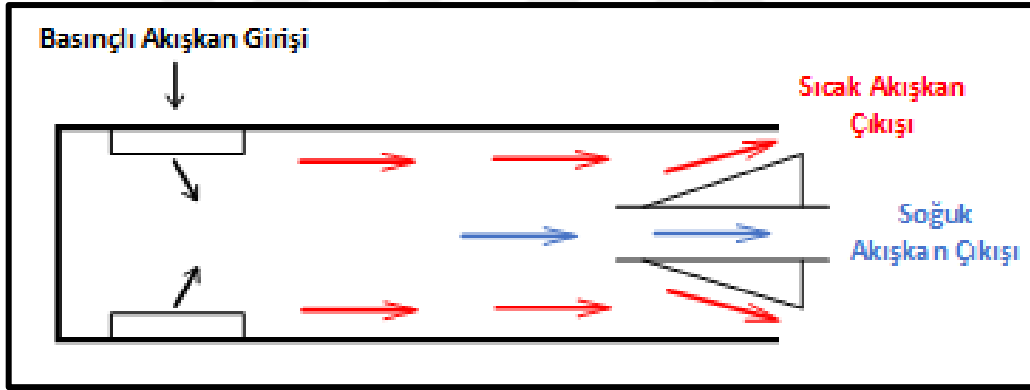


Şekil 3.2: Karşıt akışlı RHVT'nin içindeki sıcak ve soğuk akışın hareketi (a) sıcak ve soğuk akışın hareketi (b) akış (Cebeci vd., 2022)

3.1.2 Paralel Akışlı

Paralel akışlı vorteks tüpleri, karşıt akışlı vorteks tüplerden ayıran en önemli özelliği tek bir çıkışa sahip olmaları ve nozulların bulunduğu ucun kapalı olmasıdır. Şekil 3.3'te görüleceği üzere Sisteme giren basınçlı akışkan, diğer tarafta bulunan uçtan vorteks tüpü terk eder.

Akış esnasında meydana gelen sıcak akış kenarlardan, soğuk akış ise tüpün ortasından vorteks tüpün dışarısına çıkar. Sıcak akışkanın tüpü terk ettiği kesit alanın değiştirilmesi maksadıyla anılan uçta bir valf bulunur. Bu valf yardımıyla sıcak ve soğuk akış debilerinin ayarlanması sağlanmaktadır. Paralel akışlı vorteks tüplerde, sıcak ve soğuk akışın aynı yönde olması, akışkanların birbirlerine karışmasına neden olmaktadır. Karışmadan dolayı akış sıcaklıklarının olumsuz etkilenmesi bu tip vorteks tüplerin kullanımını kısıtlamaktadır (Cebeci, 2013).



Şekil 3.3: Paralel akışlı vorteks tüp

3.2 Tasarım Şekillerine Göre Vorteks Tüpler

Vorteks tüpler tasarım şekil ve özelliklerine göre, adyabatik vorteks tüpler ve adyabatik olmayan vorteks tüpler olarak iki ana aşlık altında ele alınmaktadır.

3.2.1 Adyabatik Vorteks Tüpler

Adyabatik vorteks tüpler; dış çeperinin yalıtımlı olması nedeniyle, dış çevre ile arasında ısı transferinin gerçekleşmediği varsayılan vorteks tüpler, olarak adlandırılır.

3.2.2 Adyabatik Olmayan Vorteks Tüpler

Adyabatik olmayan vorteks tüpler; dış çeperinden çevreye ısı transferinin gerçekleştiği vorteks tüpler olarak adlandırılır.

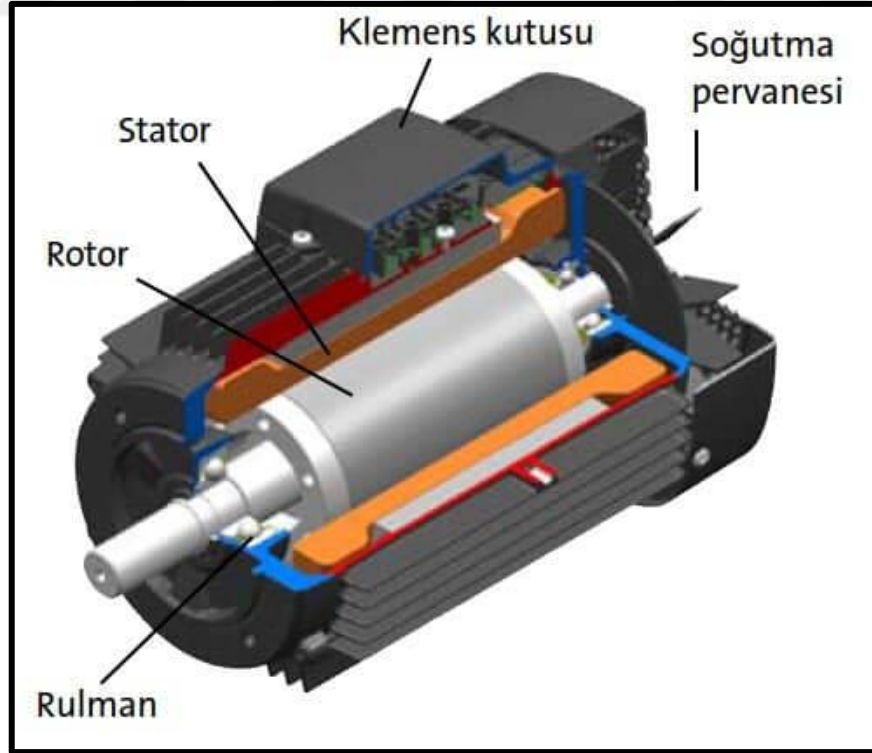
3.3 Ranque-Hilsch Vorteks Tüplerin Kullanım Alanları

Vorteks tüpler; düşük üretim maliyetleri, basit tasarım şekilleri vb. birçok nedenden dolayı oldukça fazla uygulama alanı bulmaktadır. Bu alanları; ısıtma ve soğutma, kimyasal endüstri uygulamaları, gaz karışımlarının ayrıştırılması, gazların sıvılaştırılması ve kurutulması, elektrik üretimi, medikal uygulamalar ve kar üretimi vb. ısıtma soğutma uygulama alanları olarak sıralamak mümkündür.

4. ÜÇ FAZLI ASENKRON ELEKTRİK MOTORU

Elektrik motorları, elektrik enerjisini öncelikle manyetik enerjiye ve sonrasında mekanik enerjiye dönüştüren cihazlardır. Elektromanyetizma, dönme hareketi üretmek için gerekli manyetik kuvvetleri üreterek elektrik motorunun çalışmasının temelini oluşturmaktadır. Dönen elektrik motorlarında, manyetik alanlar arasındaki etkileşim stator ve rotor arasında oluşmaktadır (Tong, 2014). Stator, sabit duran ve üzerinde döner manyetik alan sargılarını barındıran bölümdür. Rotor ise stator tarafından oluşturulan manyetik alanın etkisi ile üzerinde bulunan çubuk ya da sargılarda gerilim indüklendiğinde hareket eden bölümdür (Top, 2017). Dönen manyetik alan ve rotor alanı arasındaki etkileşim motor torkunu üretir ve bunun sonucunda motor, elde edilen tork yönünde döner (Kartal, 2018).

Alternatif akım (AC) elektrik motorları (Şekil 4.1), AC güç kaynağından alınan enerji ile çalışmak üzere tasarlanmış dönen elektrikli makinelerdir. Diğer elektrik motorlarında olduğu gibi alternatif akım motorlarında da stator adı verilen sabit bir bölüm ve aralarında hava boşluğu bulunan dönen bir rotor vardır (de Almeida vd., 2008; Tong, 2014).



Şekil 4.1: Alternatif akım elektrik motoru (URL, 2023)

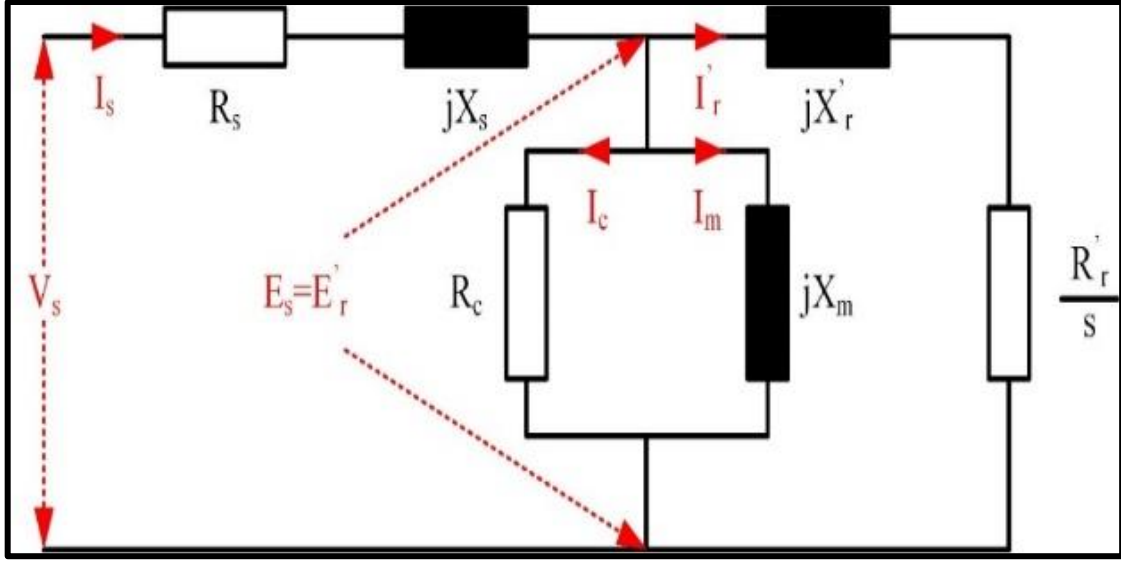
Alternatif akım motorlarında rotor yapısına göre iki farklı sınıflandırma vardır. Rotoru sargılı ve rotoru sincap kafesli.

Rotoru sincap kafesli alternatif akım motorları; basit imalat yapısı, bakım gereksiniminin az olması, yüksek hızlarda yüksek güvenilirlik ve farklı güçlerde yüksek verimlilik sunması, doğrudan şebekeye veya motor sürücü devresine bağlanabilmesi ve maliyetinin düşük olması nedenlerinden dolayı, sanayi sektöründe en fazla tercih edilen motorlardır (de Almeida vd., 2008). Rotoru sincap kafesli asenkron motorlarda devir sayısı yükte çok az değişiklik gösterdiğinden, sabit devirli motorlar sınıfında yer almaktadırlar (Tong, 2014; İmre, 2019).

4.1 Rotoru Sincap Kafesli Üç Fazlı Asenkron Motorun Elektriksel Modeli

Üç fazlı asenkron motorları; temel bileşen olarak, rotor ve rotor yatakları, stator, fan ve yan kapaklardan oluşan, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektrik makineleridir. Stator; üzerinde sargıların bulunduğu, motorun kutup sayısını belirleyen motor bileşenidir. Rotor ise sargılı ve kısa devre çubuklu olmak üzere iki şekilde imal edilebilir.

Rotoru sargılı motorlar üzerinde üç fazlı sargı barındırır ve bu sargılar bilezikler yardımıyla motor üzerinde bulunan bağlantı kutusuna aktarılır. Kısa devre çubuklu rotor ise rotoru sincap kafesli olarak bilinir ve rotor gövdesine açılmış olukların içerisine alüminyum çubuklar yerleştirilerek oluşturulurlar. Rotoru sincap kafesli asenkron motorlarda, statordan uygulanan elektrik enerjisi mekanik enerjiye çevrilir ve rotorun merkezine bağlı milden mekanik enerji elde edilir. Şekil 4.2’de rotoru sincap kafesli asenkron motorun faz eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 4.2: Rotoru sincap kafesli asenkron motorun statora aktarılmış bir faz eşdeğer devresi

Şekil 4.2’de; R_s : Stator sargı direnci [Ω], X_s : Stator sargı reaktansı [Ω], X'_r : Stator devresine aktarılmış eşdeğer devrede rotor reaktansı [Ω], R'_r : Stator devresine aktarılmış eşdeğer devrede rotor direnci [Ω], s : Kayma, X_m : Mıknatıslanma reaktansı [Ω], R_c : Çekirdek kaybı bileşeni [Ω], E_s : Stator sargılarında indüklenen gerilim [V], E'_r : Stator sargılarında indüklenen gerilim [V], V_s : Statora uygulanan gerilimi [V] ifade etmektedir.

Stator kayıpları R_s kaynaklıdır. Bu durumda; P_s = Stator kayıpları [W], I_s :Statordan çekilen akım [A], R_s : Stator sargı direnci [Ω] olmak üzere, stator kayıpları Eşitlik 1’de belirtilen şekilde hesaplanır.

$$P_s = 3 \cdot I_s^2 \cdot R_s \quad (1)$$

Rotor kayıpları R'_r kaynaklıdır. Bu durumda; P_{rk} : Rotor kayıpları [W], I'_r : Rotor ve manyetik devreden geçen akımı karşıladığından stator akımı [A], R'_r : Stator devresine aktarılmış eşdeğer devrede rotor direnci [Ω] olmak üzere, rotor kayıpları Eşitlik 2’de belirtilen şekilde hesaplanır.

$$P_{rk} = 3 \cdot I_r'^2 \cdot R_r' \quad (2)$$

Rotor bakır kaybı, rotor akımı ve etkin rotor direncine göre değişmektedir. Etkin rotor

direnci (R_{etk}) kayma ile değiştiğinden, rotor bakır kayıpları rotor akımı ve motor kaymasına göre değişir. Bu durumda; R_{etk} : Etkin rotor direnci [Ω], R_r^1 : Stator devresine aktarılmış eşdeğer devrede rotor direnci [Ω], s : kayma olmak üzere, etkin rotor direnci Eşitlik 3'teki gibi hesaplanır.

$$R_{etk} = \frac{R_r^1}{s} = R_r^1 + R_r^1 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (3)$$

Eşitlik 3'te R_r^1 rotor bakır kayıplarının, $R_r^1 ((1-s)/s)$ ise elektrik enerjisinden mekanik enerjiye dönüştürülen gücün kaynağıdır. Bu durumda; P_{rc} : Bir faz için çekirdek kayıpları [W], I_r^1 : Rotor ve manyetik devreden geçen akımı karşıladığından stator akımı [A], R_r^1 : Stator devresine aktarılmış eşdeğer devrede rotor direnci [Ω] olmak üzere, bir faz için çekirdek kayıpları (P_{rc}) Eşitlik 4'te belirtilen şekilde hesaplanır. Eşitlik 4'te verilen toplam ifadesinin ilk kısmı rotor kayıpları, ikinci kısım ise mile aktarılan güçtür.

$$P_{rc} = I_r^2 \frac{R_r^1}{s} = I_r^2 R_r^1 + I_r^2 R_r^1 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (4)$$

4.2 Rotoru Sincap Kafesli Üç Fazlı Asenkron Motorun Termal Modeli

Elektrik motorlarında ısı aktarımı iletim, taşınım ve radyasyonla ısı transferi aracılığıyla olur. Bu ısı iletimi, elektrik motorunun katı bileşenleri için iletim yoluyla, soğutucu akışkanların aktarımında ise taşınım yoluyla meydana gelmektedir. Ancak, elektrik motoru gövde sıcaklığının çok yüksek seviyelere ulaşmaması nedeniyle, radyasyon yoluyla ısı transferi ihmal edilebilir (Boglietti vd. 2006).

4.2.1 Isı Transfer Mekanizmaları

Birbirinden farklı sıcaklıklara sahip iki madde ya da sistem arasında var olan sıcaklık farkı nedeniyle transfer edilen enerjiye, ısı denir. Bu ikili arasındaki enerji transferi ısı transferi olarak adlandırılmaktadır. Bu enerji transferi iki madde arasında olabileceği gibi arasında etkileşim bulunan birden fazla sistem ya da ortam arasında da gerçekleşebilir. Termodinamiğin 2'nci Kanunu gereği, ısı transferi, daima yüksek sıcaklıktaki sistemden daha düşük sıcaklıktaki sisteme doğru gerçekleşir ve iki sistemin de sıcaklıkları eşik olana kadar devam eder (Incorpera vd., 2006; Eren, 2018). Temel ısı transferi mekanizmaları

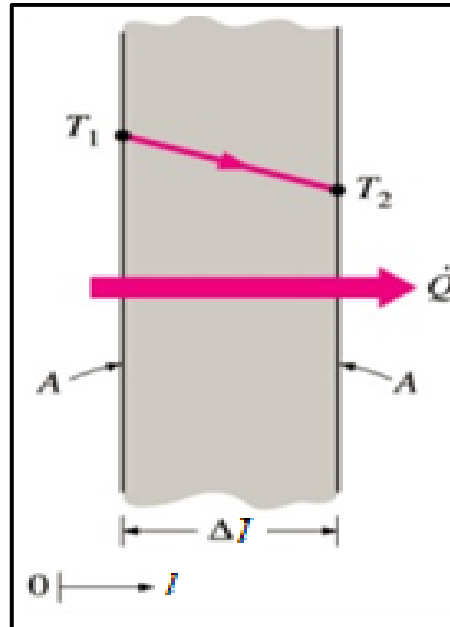
iletim, taşınım ve ışınlımla ısı transferi olmak üzere üçe ayrılır (Çengel ve Gahajar, 2019).

4.2.1.1 İletimle Isı Transferi

Sıcaklık farkından dolayı, katı ya da durgun akışkan ortamında gerçekleşen ısı aktarımına iletimle ısı transferi adı verilir. İletimle ısı transferi, katı maddelerde serbest elektronlar ile moleküllerin titreşimleri nedeniyle gerçekleşirken, durağan akışkanlarda ise moleküllerin serbest hareketleri esnasında çarpışmaları sonucunda gerçekleşir (Çengel ve Gahajar, 2019).

İki sistem arasındaki iletimle ısı geçişinin miktarı ve hızı, sıcaklık farkına, geometrisine, kalınlığına ve malzemelerin ısı iletim özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. İletimle ısı transferinin hızı, sıcaklık farkının, malzemenin ısı iletim katsayısının ve ısı iletim alanının artması ile doğru, ısı transferi gerçekleşen sistemin kalınlığı ile de ters orantılıdır (Eren, 2018).

İletimle ısı transferi, ilk kez Fourier tarafından 1822 yılında ifade edildiğinden, Fourier ısı iletim kanunu olarak da adlandırılmaktadır.



Şekil 4.3: Düzlem duvarda iletimle ısı geçişi (Çengel ve Gahajar, 2019)

Şekil 4.3'te bir düzlem duvardan iletim ile gerçekleşen ısı transferi, $\dot{Q}_{iletim}$: Birim

zamanda geçen ısı miktarı [W], k : ısı iletkenlik katsayısı [W/m°C], T_1, T_2 : Yüzey sıcaklıkları [°C], A : Yüzey alanı [m²], Δl : Duvar kalınlığı [m], dT/dl : Isı geçiş yönündeki sıcaklık değişimi [°C/m] olmak üzere; Fourier ısı iletim kanunu'na göre Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'daki gibi ifade edilir (Eren, 2018; Çengel ve Gahajar, 2019).

$$Q_{iletim} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta l} \quad (5)$$

Sıcaklık farkı $\Delta T = T_2 - T_1$ iken;

$$Q_{iletim} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta l}$$

$\Delta x \rightarrow 0$ durumunda

$$Q_{iletim} = -kA \frac{dT}{dl} \quad (6)$$

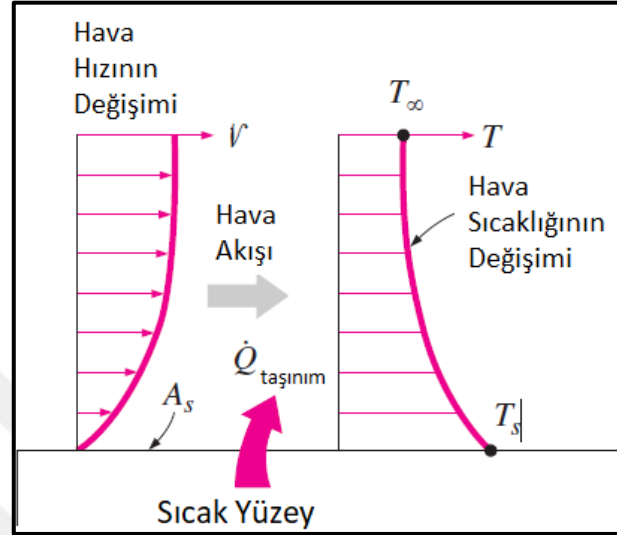
4.2.1.2 Taşınım İle Isı Transferi

Sıcaklıkları birbirinden farklı ve hareket halindeki akışkan bir madde ile temas halinde bulunduğu katı bir madde arasında gerçekleşen ısı transferine taşınım ile ısı transferi adı verilir. Taşınım ile ısı transfer mekanizmasında ısı transferi, akışkan hareketi ile doğru orantılı olarak hızlı gerçekleşir (Çengel ve Gahajar, 2019).

Taşınım ile ısı transferinde bilinmesi gereken başlıca olgu sınır tabaka kavramıdır. Herhangi bir akışkan, katı bir yüzey üzerine temas halinde hareket ederken, katı yüzey ile temas halinde bulunan akışkan, moleküllerin sürtünme ve viskoz etkilerden dolayı yüzeye yapışır.

Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, akışkanın hızı, temas ettiği yüzeye en yakın noktada 0 olurken, yüzeyden açıldıkça hız doğrusal olarak artacak ve belirli mesafe sonrasında akışkanın hızına (v) eşitlenecektir. Bu duruma bağlı olarak, gerçekleşen enerji transfer miktarı ile akışkan sıcaklığındaki değişim, yüzeye temas eden noktada en yüksek değerini alacak ve yüzeye doğrudan temas halindeki durağan akışkan moleküllerinin sıcaklıkları temas halinde bulunan yüzey sıcaklığına (T_s) eşit bir duruma gelecektir. Ancak, akışkan moleküllerinin

sıcaklıkları yüzey ile olan mesafe arttıkça azalacak ve belirli bir mesafe sonrasında serbest akışkan sıcaklığına (T_∞) eşit bir duruma gelecektir. Yüzey sıcaklığından serbest akış sıcaklığına gelinceye kadar yer alan bu gölgeye sınır tabaka adı verilir (Incorpera vd., 2006; Eren, 2018; Çengel ve Gahajar, 2019).



Şekil 4.4: Sıcak bir yüzeyden taşınım ile ısı transferi (Çengel ve Gahajar, 2019)

Taşınım ile ısı transferi, iletimle ısı transferine benzer şekilde, akışkanın hızına, özelliğine ve sıcaklık farkına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Eren, 2018).

Akışkan, sıcaklık farkı nedeniyle meydana gelen yoğunluk farkından dolayı olan hareketi hariç olmak üzere, cebri bir dolaşım aygıtı kullanmadan ısı transferi gerçekleştiriyorsa bu olay doğal ısı taşınımı olarak adlandırılmaktadır. Doğal taşınım da taşınım katsayısı; Nu : Nusselt sayısı, k : Isı iletim katsayısı, h : Taşınım katsayısı, g : Yer çekimi ivmesi, β : Hacimsel genleşme katsayısı, L_c : Karakteristik uzunluk, T_s : Yüzey sıcaklığı, T_∞ : Ortam sıcaklığı, ν : Kinematik viskozite, T_f Film sıcaklığı, Ra_L : Rayleigh, Gr_L : Grashof ve Pr : Prandtl sayıları olmak üzere, Eşitlik 7 – Eşitlik 10 arasında verilmiştir.

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} = C \cdot (Gr_L \cdot Pr)^n = C \cdot Ra_L^n \quad (7)$$

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1}{(T_f) + 273} \quad (9)$$

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (10)$$

Eğer akışkan cebri bir dolaşım ekipmanı ya da bunlarla eş görev yürütecek başkaca bir etki altında zorla harekete maruz kalıyorsa, bu olay zorlanmış ısı transferi olarak adlandırılmaktadır (Eren, 2018; Çengel ve Gahajar, 2019).

Zorlanmış ısı transferinde ısı taşınım katsayısı, akışın laminar ya da türbülanslı olması durumuna göre Eşitlik 11 - Eşitlik 13 arasında belirtildiği üzere farklı şekillerde hesaplanır (Incorpera vd., 2006; Çengel ve Gahajar, 2019).

Re: Reynolds sayısı, V: hız ve μ : dinamik viskozite olmak üzere,

$$Re = \frac{\rho V}{\mu} \quad (11)$$

$Re < 5.10^5$ olması durumunda akış laminardır ve

$$Nu = \frac{h L}{k} = 0,664 Re_L^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \quad (12)$$

olarak hesaplanabilir.

$Re > 5.10^5$ olması durumunda ise akış türbülanslıdır ve

$$Nu = \frac{h L}{k} = 0,037 \cdot Re_L^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \quad (13)$$

olarak hesaplanabilir.

Newton'un Soğuma Kanunu

Newton'un soğuma kanunu olarak da adlandırılan taşınım ile ısı transfer miktarı; h : Taşınım ısı transfer katsayısı [W/m^2C], T_s : Yüzey sıcaklığı [$^{\circ}C$], T_{∞} : Yüzeyden yeteri kadar uzaklıktaki akışkan sıcaklığı [$^{\circ}C$], A_s : Yüzey alanı [m^2], $Q_{Taşınım}$: Taşınım ile geçen ısı miktarı [W] olmak üzere, Eşitlik 14'te verilen şekilde hesaplanır.

$$Q_{Taşınım} = h.A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (14)$$

Formülde yer alan h taşınım ısı transfer katsayısı, akışın laminar ya da türbülanslı oluşuna, akışkanın hızına ve akışkanın viskozite, yoğunluk gibi özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

4.2.1.3 Işınım ile Isı Transferi

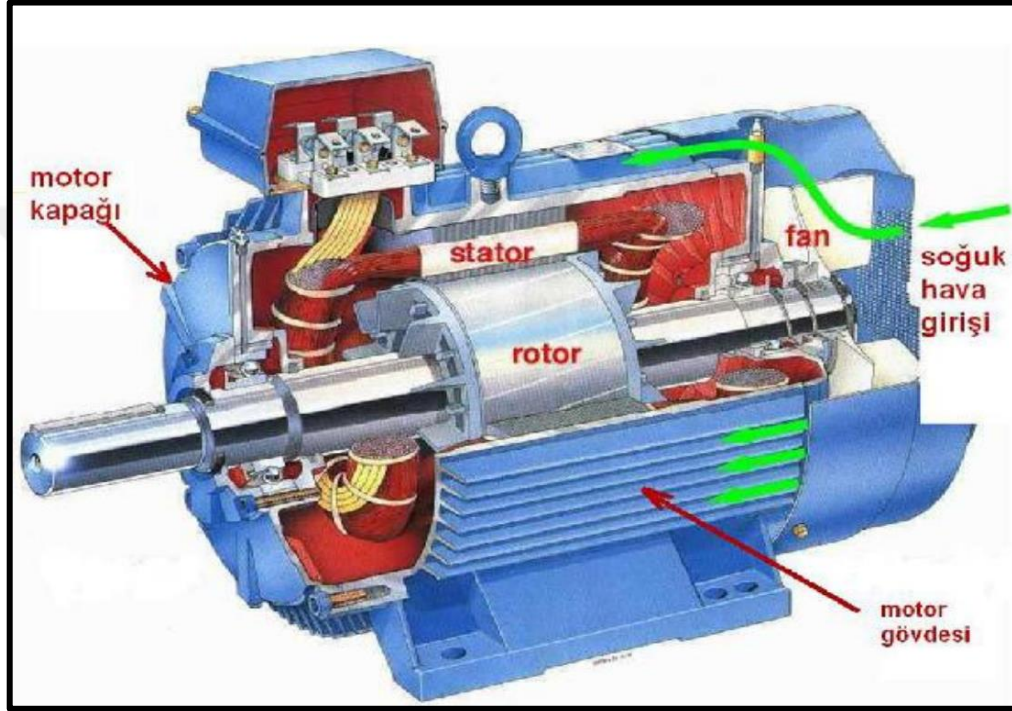
İletimle ve taşınım ile ısı transfer mekanizmasında, aralarında sıcaklık farkı bulunan ve etkileşim halinde olması gereken iki sistem bulunması gerekirken, ışınlama ile ısı transferi mekanizmasında, ısı elektromanyetik dalgalar yardımıyla yayılır (Incorpera vd., 2006; Çengel ve Gahajar, 2019).

$-273,15^{\circ} K$ 'den daha sıcak olan katı, sıvı ve gazlar ışınlama ile enerji açığa çıkarırlar. Ancak, çevresinden daha düşük sıcaklıklara sahip maddeler, ısı transfer yönünün sıcak ortamdan soğuk ortama doğru olması nedeniyle yaptıkları ışınlamadan daha fazlasını absorbe edeceklerdir. Bunun yanı sıra kaya vb. ışınlama geçirmeyen tür katı cisimler için ışınlama, yalnızca yüzey ışınlama şeklinde meydana gelir (Incorpera vd., 2006; Çengel ve Gahajar, 2019).

Bir madde yüzeyinden birim zamanda yayılan ışınlama, "Stefan – Boltzmann kanunu" ile tanımlanmıştır ve yüzeyin ışınlama yayma gücü ile birlikte yüzeyin sahip olduğu sıcaklığın dördüncü kuvveti ile orantılı olduğunu belirtmektedir. Bu bilgilerden hareketle, σ : Stefan – Boltzmann sabiti [$5,67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$], A_s : Yüzey alanı [m^2], T_s : Yüzeyin mutlak sıcaklığı [K], $Q_{yayılan}$: Yayılan ısı enerjisi [W] olmak üzere bir cisimde ışınlama ile açığa çıkan ısı enerjisi Eşitlik 15'de belirtilen şekilde hesaplanır.

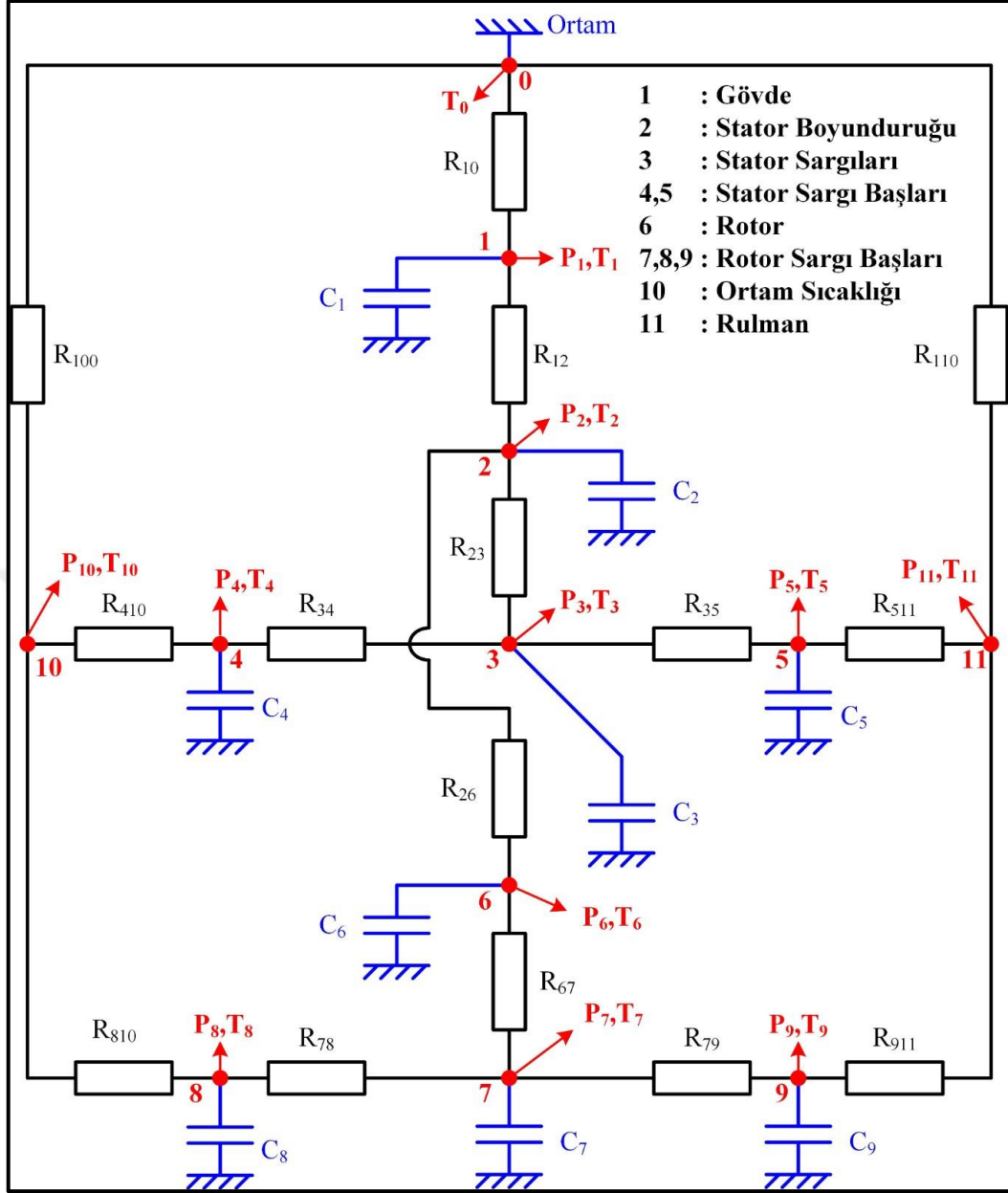
(Lumped Parameter Thermal Circuit Model) elektrik motorlarının ısıl modelinin elde edilmesinde sıklıkla tercih edilir (Rouhani vd., 2007; Jebahi vd., 2017).

Rotoru sincap kafesli asenkron bir elektrik motorunun termal ağ modeli, Kessler tarafından 1960 yılında bildirilen ilkelere dayanılarak geliştirilmiştir (Okoro, 2004). Rotoru sincap kafesli asenkron bir elektrik motorunun temel yapısı Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6: Rotoru sincap kafesli asenkron bir elektrik motorunun temel yapısı(MEB, 2011)

Termal ağ modelinin geliştirilmesinde, elektrik motoru temel elemanlarına ayrılır ve her bir eleman için termal kapasitans termal ağdaki bir düğüm tarafından tanımlanır. Rotoru sincap kafesli motora ait toplu parametreli ısıl devre modeli Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7: Rotoru sincap kafesli motora ait toplu parametrelili ısı devre modeli

Modelde elektrik motorunun statorunda stator demiri, stator sargısı ve uç sargıları için ağlar bulunmaktadır. Rotor sargısından hava boşluğu yoluyla ısı transferinin, stator dışları üzerinde ihmal edilebilir bir etki ile doğrudan stator sargısına gittiği varsayılmaktadır. Elektrik motorunun rotor kısmı ise rotor demiri, rotor sargısı ve uç halkalarına ayrılmıştır. Rotor, stator ve çevre için ağları birbirine bağlayarak termal ağ modeli oluşturulmuştur.

Geliştirilen termal ağ modelinin sırasıyla sabit ve geçici koşullar altındaki termal davranışını açıklayan cebirsel ve diferansiyel denklemler; R: termal direnç, P: güç kaybı, C: termal

kapasitans ve θ sıcaklık artışı olmak üzere; Eşitlik 16 – Eşitlik 26 arasında verilmiştir.

$$P_1 = C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{1}{R_{1b}} (\theta_1 - \theta_{kb}) + \frac{1}{R_{12}} (\theta_1 - \theta_2) \quad (16)$$

$$P_2 = C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{1}{R_{12}} (\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{R_{23}} (\theta_2 - \theta_3) + \frac{1}{R_{26}} (\theta_2 - \theta_6) \quad (17)$$

$$P_3 = C_3 \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{1}{R_{23}} (\theta_3 - \theta_2) + \frac{1}{R_{35}} (\theta_3 - \theta_5) + \frac{1}{R_{34}} (\theta_3 - \theta_4) \quad (18)$$

$$P_4 = C_4 \frac{d\theta_4}{dt} + \frac{1}{R_{34}} (\theta_4 - \theta_3) + \frac{1}{R_{410}} (\theta_4 - \theta_{10}) \quad (19)$$

$$P_5 = C_5 \frac{d\theta_5}{dt} + \frac{1}{R_{511}} (\theta_5 - \theta_{11}) + \frac{1}{R_{35}} (\theta_5 - \theta_3) \quad (20)$$

$$P_6 = C_6 \frac{d\theta_6}{dt} + \frac{1}{R_{26}} (\theta_6 - \theta_2) + \frac{1}{R_{67}} (\theta_6 - \theta_7) \quad (21)$$

$$P_7 = C_7 \frac{d\theta_7}{dt} + \frac{1}{R_{79}} (\theta_7 - \theta_9) + \frac{1}{R_{78}} (\theta_7 - \theta_8) + \frac{1}{R_{67}} (\theta_7 - \theta_6) \quad (22)$$

$$P_8 = C_8 \frac{d\theta_8}{dt} + \frac{1}{R_{78}} (\theta_8 - \theta_7) + \frac{1}{R_{810}} (\theta_8 - \theta_{10}) \quad (23)$$

$$P_9 = C_9 \frac{d\theta_9}{dt} + \frac{1}{R_{911}} (\theta_9 - \theta_{11}) + \frac{1}{R_{79}} (\theta_9 - \theta_7) \quad (24)$$

$$P_{10} = C_{10} \frac{d\theta_{10}}{dt} + \frac{1}{R_{410}} (\theta_{10} - \theta_4) + \frac{1}{R_{810}} (\theta_{10} - \theta_8) + \frac{1}{R_{10a}} (\theta_{10} - \theta_{ka}) \quad (25)$$

$$P_{11} = C_{11} \frac{d\theta_{11}}{dt} + \frac{1}{R_{511}} (\theta_{11} - \theta_5) + \frac{1}{R_{911}} (\theta_{11} - \theta_9) + \frac{1}{R_{11c}} (\theta_{11} - \theta_{kc}) \quad (26)$$

Eşitlik 16 – Eşitlik 26 arasında verilenlerin denklemlerin matris formu;

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \\ \dot{\theta}_7 \\ \dot{\theta}_8 \\ \dot{\theta}_9 \\ \dot{\theta}_{10} \\ \dot{\theta}_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\theta}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\theta}_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{\theta}_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\theta}_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\theta}_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\theta}_7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\theta}_8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\theta}_9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\theta}_{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\theta}_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_1 + \theta_{kb} * G_{1b} \\ P_1 \\ P_1 \\ P_1 \\ P_1 \\ P_1 \\ P_1 \\ P_1 \\ P_1 \\ \theta_{ka} * G_{10a} \\ \theta_{kc} * G_{11c} \end{bmatrix} - [C_t]^{-1} * \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \\ \theta_7 \\ \theta_8 \\ \theta_9 \\ \theta_{10} \\ \theta_{11} \end{bmatrix} \quad (27)$$

θ_{ka} , θ_{kb} ve θ_{kc} sabit ortam sıcaklıkları olduğu varsayılarak, G_t matrisinin girişleri Eşitlik 28 – Eşitlik 38’de verildiği gibidir.

$$G_{11} = G_{1b} + G_{12} \quad (28)$$

$$G_{22} = G_{21} + G_{23} + G_{26} \quad (29)$$

$$G_{33} = G_{32} + G_{35} + G_{34} \quad (30)$$

$$G_{44} = G_{43} + G_{410} \quad (31)$$

$$G_{55} = G_{53} + G_{511} \quad (32)$$

$$G_{66} = G_{62} + G_{67} \quad (33)$$

$$G_{77} = G_{78} + G_{79} + G_{76} \quad (34)$$

$$G_{88} = G_{87} + G_{810} \quad (35)$$

$$G_{99} = G_{97} + G_{911} \quad (36)$$

$$G_{1010} = G_{104} + G_{10a} + G_{108} \quad (37)$$

$$G_{1111} = G_{115} + G_{11c} + G_{119} \quad (38)$$

Benzer şekilde, önerilen termal ağdaki cebirsel sabit durum sıcaklık artışı Eşitlik 39'da verilmiştir (Okoro, 2004).

$$[\theta_t] = [G_t]^{-1}[P_{t1}] \quad (39)$$

Isıl devre modelindeki parametrelerin elde edilmesinin ardından motora ait geçici ve sürekli durumdaki sıcaklık artışları ve sıcaklıkların dağılımları, T_i ve T_j : i ve j numaralı düğümlerdeki sıcaklıklar, P_i : i numaralı düğümde meydana gelen kayıp, C_i : i numaralı düğümdeki ısı kapasite olmak üzere; Eşitlik 40'ın çözülmesiyle elde edilebilir.

$$C_i \frac{dT}{dt} = \frac{T_i - T_j}{R_{ij}} + P_i \quad i, j = 1, 2, \dots, 11 \quad (40)$$

C_i numaralı düğümdeki ısı kapasite, ρ : malzeme yoğunluğu, c : öz ısı, V : hacim olmak üzere; Eşitlik 41'deki gibi hesaplanabilir.

$$C_i = \rho c V \quad (41)$$

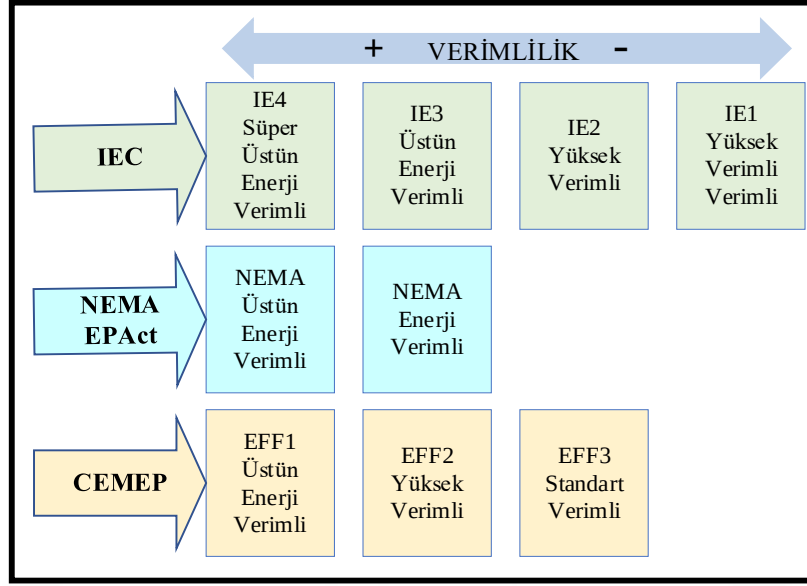
Isı akışına gösterilen direnç, L : ısı akışının aldığı yol, A : akışa dik kesit alanı, k : ısı iletkenlik olmak üzere; Eşitlik 42'deki gibi hesaplanabilir.

$$R_{ij} = \frac{L}{kA} \quad (42)$$

4.3 Rotoru Sincap Kafesli Üç Fazlı Asenkron Motorlarda Verimlilik

Piyasaya yeni arz edilen elektrik motorlarının yüksek verimlilikte olması veya ekonomik ömürlerini doldurmasından dolayı, kullanımları devam eden elektrik motorlarının verimliliklerinin iyileştirilmesi önemli hâle gelmektedir. Dünya üzerinde arz edilen elektrik enerjisinin önemli bir kısmını tüketen elektrik motorlarında standart belirleme ve bu standartları yayınlama görevlerini yerine getirmek üzere Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission (IEC)) ve Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği (National Electrical Manufacturers Association (NEMA)) faaliyet göstermektedir. IEC, Avrupa standartlarını belirlemek ve yayınlamak üzere çalışmalarını sürdürürken, NEMA, Amerikan standartlarını belirlemekte ve yayınlamaktadır.

IEC ve NEMA elektrik motorları için en önemli parametrelerden birisi olan motor verimlilik sınıflarını belirlemiştir. IEC 60034-30 ile yayınlanmış olan standarda göre elektrik motor verimlilikleri; IE1 (standart verimlilik), IE2 (yüksek verimlilik), IE3 (üstün verimlilik) ve IE4 (süper üstün verimlilik) olmak üzere dört sınıfa ayrılmıştır (Standart: IEC 60034-30-1, 2014). Amerika Birleşik Devletleri'nde 1992 yılında düzenlenen bir toplantıda elektrik motorlarında Enerji Politikası Yasası'nın (EPA) bir parçası olarak verimlilik sınıflarında bazı sınırlandırmalar getirilmiştir (ACEEE, 2019; Zöhra & Akar, 2019). NEMA, toplantıda alınan kararlar doğrultusunda, elektrik motor verimlilik sınıflarını; enerji verimli (energy efficient) ve üstün verimli (premium efficient) olarak belirlemiştir. IEC ve NEMA'nın yanı sıra, Avrupa Elektrik Makineleri ve Elektronik İmalatçıları Komitesi (The European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics (CEMEP)) tarafından elektrik motor verimlilikleri EFF3 (en verimsiz), EFF2 (orta verimli), EFF1 (en verimli) olacak şekilde belirlenmiştir (STB, 2015). CEMEP tarafından geliştirilen verimlilik sınıfları günümüzde kullanılmamasına karşın, IEC tarafından geliştirilen elektrik motor verimlilik sınıflarının temelini oluşturmaktadır. Elektrik motorlarının verimlilik sınıflarına ilişkin toplu gösterim Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8: Elektrik motorları için IEC, NEMA ve CEMEP tarafından belirlenen verimlilik sınıflarının toplu gösterimi

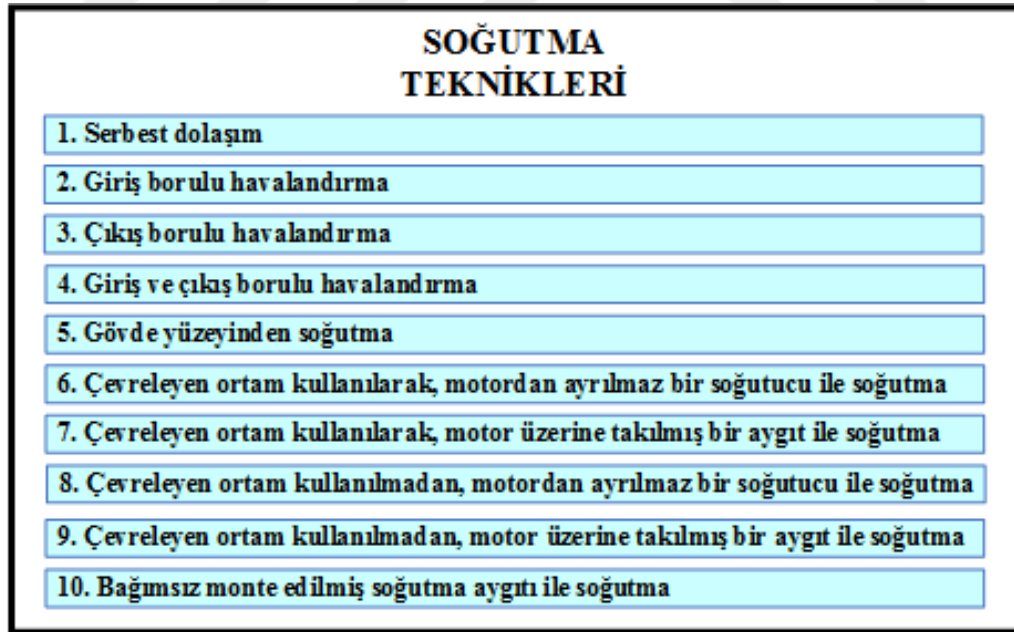
Alternatif akım motorları, Avrupa elektrik motorları pazar payının yaklaşık %96'lık kısmını oluşturmaktadır (Santiago, 2017). Hâlihazırda sanayide kullanılan elektrik motorlarının %87'si ise üç fazlı rotoru sincap kafesli asenkron elektrik motorlarıdır (de Souza vd., 2022). Elektrik motorları tarafından harcanan elektrik enerjisinin, dünyada tüketilen elektrik enerjisinin %43-45'ini oluşturduğu tahmin edilmektedir (Büyük, 2018). Türkiye'de arz edilen enerjinin %45'i sanayide tüketilmektedir (EPDK, 2020; TEDAŞ, 2021).

Türkiye'de elektrik motorlarının verimliliklerine ilişkin yayımlanan mevzuat incelendiğinde; 01 Temmuz 2021 tarihinden itibaren yükseltilmiş güvenlikli elektrik motorları hariç olmak üzere, 0,12 kW – 0,75 kW anma çıkış gücü aralığındaki üç fazlı elektrik motorları için verimlilik sınıfı IE2'ye, 0,75 kW-1000 kW anma çıkış gücü aralığındaki üç fazlı elektrik motorları için ise verimlilik sınıfı IE3 verimlilik sınıfına karşılık gelmesi gerekmektedir (STB, 2021).

Bu bilgilerden hareket ederek, Türkiye'de 2021 yılından itibaren 0,75 kW anma çıkış gücü üzerinde üretilen üç fazlı elektrik motorlarının en az IE3 verimlilik sınıfında olması gerektiği söylenebilir. Söz konusu mevzuatta yer alan hususlar, yalnızca piyasaya yeni arz edilecek elektrik motorlarını kapsamakta ve hali hazırda kullanılan elektrik motorlarını kapsamamaktadır.

Verimlilik Genel Müdürlüğü tarafından 2016 yılında yapılan bir çalışmada; Türkiye sanayi sektöründe, 7,5 kW ve üzeri alternatif akım motoru sayısının 4.306.622 adet olduğu ve bu motorların %65'inin IE1 verimlilik sınıfında, %27'sinin IE2 verimlilik sınıfında, %1'inin ise IE3 verimlilik sınıfında olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, yapılan tespitlere göre; ülkemiz sanayisinde tüketilen yıllık elektriğin yaklaşık %72'lik kısmı 7,5 kW ve üzeri AC motorlardan kaynaklanmaktadır (STB, 2016).

Ekonomik ömürlerini tamamlamamış olmaları ya da ilk yatırım maliyetlerinin fazla olması nedeniyle, başta IE1 verimlilik sınıfında bulunan düşük verimlilik değerlerine sahip elektrik motorlarının hız kontrol ekipmanları ile kullanımı veya mevcut koşullar altında verimliliklerinde artış sağlanması büyük öneme sahiptir. Elektrik motorları verimliliğinde sağlanmak istenen artış, soğutma için uygun koşulların oluşturulması ile sağlanabilir (Gundabattini vd., 2021). Literatürde, elektrik motorlarının soğutulmasına ilişkin 3 temel metot bulunmaktadır: Hava soğutma, su soğutma ve yağ soğutma (Fujita vd., 2019). Elektrik motorlarında soğutucunun dolaşım şekline göre soğutma, Şekil 4.9'da verildiği gibi on farklı metot ile yerine getirilebilir (IEC, 1991).



Şekil 4.9: IEC 34-6 elektrik motoru soğutma teknikleri

TS EN 60034-2-1'ye göre verim tespiti deneyi, moment ölçüm cihazı ya da dinamometre ile birlikte yük motorunun kullanılarak yapılmalıdır. Motorun moment ölçümü doğrudan motor

miline bağı moment sensörü yardımıyla yapılmalıdır.

TS EN 60034-2-1 Metot 2-1-1B'ye göre verimlilik için motorun demir kaybının, sürtünme vantilasyon kaybının, stator ve rotor bakır kayıplarının ve ek yük kayıplarının hesaplanması gerektiği belirtilmiştir.

Verim tespit deneyinde motor, anma yükünde deney, yük eğrisi deneyi ve boşta deney olmak üzere 3 temel deneye tabi tutulur (TSE, 2012; Büyük, 2018).

4.3.1 Anma Yükünde Deney

Anma yükünde deneye başlamadan önce moment sensörü durgun haldeyken doğrulaması yapılır ve sensör ilk olarak %0 yükte, daha sonrasında %100 yükte ve son olarak tekrar %0 yükte yüklenerek deneysel sistem yazılımında elde edilen verilere bakılır. Elde edilen verilerde, normal değerlerin %0,2'den fazlaca bir sapma varsa deney yapılamaz. Standartta moment sensörünün kabul edilebilir sapma değeri ile ilgili bir yer almazken, bu değer deneysel sistemde kullanılacak olan sensörün imalatçısı tarafından bildirilmektedir. Moment sensörünün olması gereken değerlerde ölçülmesini müteakip, deneye başlamadan önce motor sıcaklığı = çevre sıcaklığı yani ısıl denge halinde olduğu durumda motor sıcaklığı ile sargı dirençleri ölçülür. Motor sargı dirençlerinin ölçümünün kalibrasyonu yapılmış direnç ölçme aleti ile yapılması önem arz etmektedir. Müteakiben, ölçümün doğruluğunun teyidi için motor sargı dirençleri mili ohmmetre ile tekrar ölçülmelidir. Motor, ısıl olarak dengeye gelene kadar anma gerilimi ve anma gücünde çalıştırılır. Motor sıcaklığının 30 dakika içerisinde 1 °C'den daha az değişmesi durumunda, motorun ısıl dengeye geldiği kabul edilir. Motorun sıcaklığının hassas şekilde takip edilebilmesi maksadıyla, sıcaklık ölçümü stator sargılarına temas eden ısıl çiftler aracılığıyla yapılır. Ayrıca, bunun mümkün olmaması durumunda, asıl amacın motorun ısıl dengeye ulaştığının belirlenmesi olduğundan, motor dış muhafazası üzerinden de sıcaklık ölçümü yapılabilir.

Deney sırasında momentin, motorun giriş gücünün, frekansın, devir sayısının, ortalama hat akımının, soğutucu giriş sıcaklığının, ortalama uç geriliminin, anma yükünde sargı direncinin ve sargı sıcaklığı ölçülür. Motor devir sayısı ile motor moment moment sensörü vasıtasıyla akım, giriş gücü, frekans ve gerilim gibi temel elektriksel parametreler enerji

analizörü vasıtasıyla direnç ölçüm cihazıyla ise her bir faz için sargı dirençleri ölçülmektedir. Direnç değişimi metoduyla da sargı sıcaklıkları hesaplanır. Bu metod, direncin sıcaklıkla değişimi ilkesine göre; t_{ilk} : İletkenin ilk sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), R_{ilk} : İletkenin ilk direnci (Ω), R_{son} : İletkenin son direnci (Ω) , t_{son} : İletkenin son sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) ve 235: Bakır için sıcaklık katsayısı olmak üzere, iletkenin sıcaklığı Eşitlik 43 ile bulunabilir (TSE, 2012; Büyük, 2018).

$$t_{son} = \frac{R_{son}}{R_{ilk}} (235 + t_{ilk}) - 235 \quad (43)$$

4.3.2 Yükte Kayıplar

Yükte kayıplar referans soğutucu sıcaklığına göre düzeltilmiş olan stator ve rotor sargı kayıp değerlerinden oluşur.

4.3.2.1 Stator Sargı Kayıpları ve Sıcaklık Düzeltmesi

Anma yükünde düzeltilmemiş stator sargı kayıpları, P_s : Anma yük deneyinde stator kaybı (W), I : Ortalama hat akımı (A), R : Sargı direnci (Ω) olmak üzere Eşitlik 44 ile hesaplanır.

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R \quad (44)$$

Ancak, hesaplanan bu değerin 25°C referans soğutucu sıcaklığına göre düzeltilerek hesaplanması gerekir. Bu düzeltme; $P_{s,\theta}$: Düzeltilmiş stator kaybı (referans soğutucuya göre) (W), k_{θ} : Stator sargısı düzeltme faktörü, θ_w : Sargı sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), θ_c : Soğutucu giriş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), 235 (bakır için katsayı) olmak üzere; Eşitlik 45 ile elde edilir. Düzeltme katsayısı olan k_{θ} ise Eşitlik 46 ile hesaplanır (TSE, 2012; Büyük, 2018).

$$P_{s,\theta} = P_s \times k_{\theta} \quad (45)$$

$$k_{\theta} = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w} \quad (46)$$

4.3.2.2 Rotor Sargı Kayıpları ve Sıcaklık Düzeltmesi

Rotorda oluşan kayıplar; P_r : Rotor kaybı [W], P_1 : Motorun giriş gücü [W], P_s : Anma yük deneyinde stator kaybı [W], P_{fe} : Demir kaybı [W], s : Kayma, n : Motor devir sayısı [devir/dakika], n_{sync} : Senkron devir, p : Motor kutup sayısı, f : Motorun çalışma frekansı [Hz] olmak üzere, Eşitlik 47 ile elde edilir. Kayma ise Eşitlik 10 ile bulunur.

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \times s \quad (47)$$

$$s = \frac{n_{sync} - n}{n_{sync}} \quad (48)$$

Düzeltilmiş rotor kayıpları ise $P_{r,\theta}$: Düzeltilmiş rotor kaybı [W], P_{fe} : Demir kaybı [W], s_θ : 25 °C’de referans soğutucu sıcaklığına göre düzeltilmiş kayma, k_θ : Sıcaklık düzeltme faktörü olmak üzere düzeltilmiş stator kaybı değerlerinden faydalanılarak Eşitlik 49’daki gibi hesaplanır.

$$P_{r,\theta} = (P_1 - P_{s,\theta} - P_{fe}) \times s \quad (49)$$

Sıcaklığa göre düzeltilmiş olan motorun giriş gücü ise, $P_{1,\theta}$: Düzeltilmiş motor giriş gücü (referans soğutucu sıcaklığına göre) [W] olmak üzere Eşitlik 50 kullanılarak bulunur (TSE, 2012; Büyük, 2018).

$$P_{1,\theta} = (P_1 - (P_s - P_{s,\theta} - P_r - P_{r,\theta})) \quad (50)$$

4.3.3 Yük Eğrisi Deneyi

Yük eğrisi deneyi, motorun normal çalışma sıcaklığında ve anma yükü deneyinden hemen sonra yapılır. Motor deney esnasında, %125 yükte, %115 yükte, %100 yükte, %75 yükte, %50 yükte ve %25 yükte sırasıyla yüklenir. Motorda meydana gelecek olan sıcaklık değişimlerinin direnç değişimine neden olması dolayısıyla, yüklemeler mümkün olduğunca seri bir şekilde yapılmalıdır. Besleme frekansındaki değişimin her yük noktasında %0,1’den az olmasına dikkat edilmelidir. Yük eğrisi deneyinde, motor %125 yüklenmeden önce ve

%25 yükte yüklendikten sonra sargı direnci R ölçülür. Deneye başlamadan ölçülen direnç değeri, %100 yükte ve daha üstündeki yüklerde bulunan direnç değeri olarak kaydedilir. %100 yük değerinden az olan yüklerdeki direnç değerleri ise yük ile doğrusal olarak azalacak şekilde, %25 yükteki deney sonrası direnç ile %125 yükteki deney öncesi direnç arasında belirlenir. Her bir yük noktasındaki gerilim U [V], akım I [A], giriş gücü P_1 [W], devir sayısı n [devir/dakika], frekans f [Hz] ve moment T [Nm] değerleri kaydedilir. Her bir yük noktasına göre stator sargı kaybı P_s Eşitlik 6 ile bulunur. Hesaplama da kullanılacak olan I ve R değerleri her bir yük noktasında bulunan akım ve direnç değerleridir. Böylece %125 yükte, %115 yükte, %100 yükte, %75 yükte, %50 yükte ve %25 yükte P_s değeri bulunur. Rotor sargı kaybı P_r ise %125 yükte, %115 yükte, %100 yükte, %75 yükte, %50 yükte ve %25 yükte Eşitlik 9 kullanılarak elde edilir. Bu hesaplamada; anma yük deneyinden P_1 , n ve f değerleri, değişken yük deneyinden P_s değeri ve boşta deneyden P_{fe} değeri alınarak bulunan değerlerdir (TSE, 2012; Büyük, 2018).

4.3.4 Boşta Deney

Yük eğrisi deneyinin arkasından motor sıcaklığı mümkünse değişmeden yapılır. Gerçekleştirilen deneyde 8 farklı gerilim değerinde (%110, %100, %95, %90, %60, %50, %40 ve %30) sonuçlar takip edilmektedir. Elektrik motorunda meydana gelen demir kayıplarının tespiti için %110, %100, %95 ve %90, sürtünme vantilasyon kayıplarının tespiti için de %60, %50, %40 ve %30 gerilim seviyesi kullanılır. Yapılacak olan ölçümler, büyükten küçüğe doğru gerçekleştirilir. Her ölçüm noktası için motor giriş gücü P_0 , akım I_0 ve gerilim U_0 değerleri ölçülür. Ölçülen bu değerlere ilave olarak deney öncesi ve sonrasında direnç değerleri R_0 ölçülür. Deney öncesi ve sonrası ölçülen değerler arasında P_0 'a göre ara değer hesabı yapılarak, her bir gerilim noktasındaki direnç değeri R_0 tespit edilir (TSE, 2012; Büyük, 2018).

4.3.5 Sabit Kayıplar

Elektrik motorlarında meydana gelen sabit kayıplar, demir kayıpları ile sürtünme vantilasyon kayıplarının toplamına eşittir. Boşta deney giriş gücü ile boşta deney sargı kayıplarının farkının alınmasıyla ve P_c : Sabit kayıplar [W], P_0 : Boşta giriş gücü [W], P_{fw} : Sürtünme vantilasyon kaybı [W], P_s : Boşta deney sargı kaybı [W] olmak üzere Eşitlik 51

üzerinden elde edilir.

Bu hesaplama her bir gerilim noktası için tekrarlanır. P_s değeri ise $R_{II,0}$: Direnç değeri (Her bir gerilim seviyesindeki) $[\Omega]$, I_0 : Boşta akım (Her bir gerilim seviyesindeki) $[A]$ olmak üzere, Eşitlik 52 ile bulunur (TSE, 2012; Büyük, 2018).

$$P_c = P_0 - P_s = P_{fw} + P_{fe} \quad (51)$$

$$P_s = 1,5 \times I_0^2 \times R_{II,0} \quad (52)$$

4.3.6 Sürtünme Ventilasyon Kayıpları

Sürtünme ventilasyon kayıplarının hesaplanması için, %60, %50, %40 ve %30 gerilim seviyeleri için sabit kayıplar (P_c) ile gerilim değeri karesi (U_0^2) ile ilişkilendirilir. Buradan hareketle, sürtünme ventilasyon kaybının senkron devirdeki yaklaşık değeri, birinci mertebeden oluşturulan eğrinin gerilim ekseninde sıfır değeri kestiği nokta olarak bulunur (TSE, 2012; Büyük, 2018).

4.3.7 Demir Kayıpları

U_0 'a bağlı (%90 ve %110 gerilim için) P_{fe} grafiği çizdirilir. Buna bağlı olarak, demir kaybı Eşitlik 53 ile elde edilir.

$$P_{fe} = P_c - P_{fw} \times s \quad (53)$$

Anma yükünde demir kaybı, stator sargısındaki rezistif gerilim düşümü göz önünde bulundurularak hesaplanmaktadır. U : Yük eğrisi deneyinde ölçülen gerilim $[V]$, P_1 : Yük eğrisi deneyinde ölçülen giriş gücü $[W]$, I : Yük eğrisi deneyinde ölçülen akım $[A]$, R : Yük eğrisi deneyinde hesaplanan direnç $[\Omega]$ olmak üzere; iç gerilim U_i Eşitlik 54 kullanılarak hesaplanır. İç gerilim hesaplanırken kullanılacak olan $\cos \varphi$ ve $\sin \varphi$ Eşitlik 55 ve Eşitlik 56 ile hesaplanır.

$$U_i = \sqrt{\left((U - \frac{\sqrt{3}}{2} x I_x R_x \cos \varphi)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} x I_x R_x \sin \varphi\right)^2\right)} \quad (54)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} x U x I} \quad (55)$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \quad (56)$$

İnterpolasyonla U_0 'a bağlı P_{fe} grafiğindeki U_i noktasına denk gelen P_{fe} değeri anma yükündeki demir kaybını verir (TSE, 2012; Büyük, 2018).

4.3.8 Ek Yük Kayıpları

Ek yük kayıpları, P_{Lr} : Ek yük kayıpları [W], P_2 : Çıkış gücü [W] olmak üzere; giriş gücünden, düzeltilmemiş stator sargı kaybının, çıkış gücünün, sürtünme ve vantilasyon kaybının, demir kaybının ve kaymaya karşılık gelen düzeltilmemiş rotor kaybının çıkarılmasıyla hesaplanır. Bu hesaplama Eşitlik 57 ile yapılır. P_2 Eşitlik 58, P_{fw} Eşitlik 59 ile elde edilir. Kayma ise Eşitlik 60 ile bulunur.

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw} \quad (57)$$

$$P_2 = 2\pi x T x n \quad (58)$$

$$P_{fw} = P_{fw0} x (1 - s)^{2,5} \quad (59)$$

$$s = 1 - \frac{pxn}{f} \quad (60)$$

Ek yük kayıpları için T : Moment [Nm] olmak üzere; Eşitlik 61'e uygun olarak yük momentinin karesinin bir fonksiyonu olacak şekilde doğrusal regresyon analizi ile bir eğri oluşturulmalıdır.

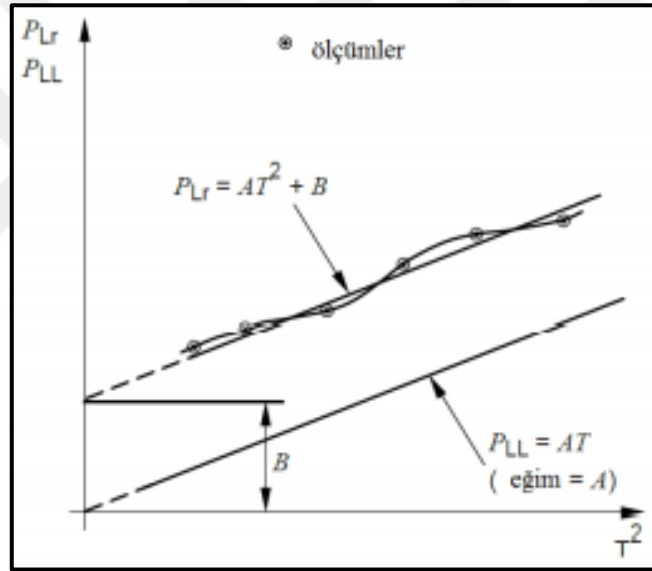
$$P_{Lr} = AT^2 + B \quad (61)$$

i : Toplanan yük noktalarının sayısı olmak üzere; A eğim ve B kesim noktaları Eşitlik 62 ve Eşitlik 63'e göre hesaplanır.

$$A = \frac{i \sum (P_{Lr} T^2) - \sum P_{Lr} \sum T^2}{i \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2} \quad (62)$$

$$B = \frac{\sum P_{Lr}}{i} - A \frac{\sum T^2}{i} \quad (63)$$

B noktası, Şekil 4.10'da görüldüğü üzere, anma momentinde ek yük kayıplarının az olmalıdır. Bu değer elde edilememesi halinde hatalı ölçüm yapıldığı anlaşılr. Korelasyon eğrisi için γ : korelasyon katsayısı Eşitlik 64 ile elde edilir.



Şekil 4.10: Korelasyon eğrisi (Sauer vd., 2015; Büyük, 2018)

$$\gamma = \frac{i \sum (P_{Lr} T^2) - (\sum P_{Lr})(\sum T^2)}{\sqrt{\{i \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2\} \times \{i \sum P_{Lr}^2 - (\sum P_{Lr})^2\}}} \quad (64)$$

Korelasyon katsayısının 0,95'ten küçük olması durumunda, en kötü nokta silinir ve regresyon analizi yeniden yapılır. Eğer korelasyon katsayısı 0,95'ten daha büyük bir değer çıkarsa ikinci regresyon kullanılabilir. Ancak, yeniden hesaplanan korelasyon katsayısının 0,95'ten küçük olması durumunda deney gözden geçirilerek tekrar edilmelidir. Korelasyon katsayısı $\geq 0,98$ olmalıdır. Eğim sabiti olan A değeri hesaplandıktan sonra, P_{LL} : Ek yük

kayıplarının her bir yük noktasındaki değeri Eşitlik 65 ile hesaplanabilir (TSE, 2012; Büyük, 2018).

$$P_{LL} = AT^2 \quad (65)$$

4.3.9 Verim Hesabı

Elektrik motorunda meydana gelen toplam kayıplar P_T , düzeltilmiş sürtünme ve vantilasyon kaybı, düzeltilmiş demir kaybı, yükte kayıplar ve ek yük kayıplarının toplamı şeklinde Eşitlik 66'daki gibi hesaplanır.

$$P_T = P_{fe} + P_{fw} + P_{s\theta} + P_{r\theta} + P_{LL} \quad (66)$$

Verim η ise Eşitlik 67'de verilen bağıntı ile ifade hesaplanır.

$$\eta = \frac{P_{1,\theta} - P_T}{P_{1,\theta}} \quad (67)$$

5. MATERYAL VE METOT

Çalışmalar benzetim ve deneysel olmak üzere iki safhada gerçekleştirilmiştir. Her iki safhada da öncelikle ÜFAM'ın geleneksel fanlı soğutma yöntemindeki davranışı incelenmiş, ardından soğutmada karşıt akışlı RHVT kullanılması durumunda motor verimliliğinde ortaya çıkan değişimler analiz edilmiştir.

5.1 Çalışmalarda Kullanılan Temel Bileşenler

5.1.1 ÜFAM

Verimlilik ile ilgili yasal düzenlemeler dikkate alınarak, Şekil 5.1'de görünümü, Tablo 5.1'de elektriksel özellikleri ve Şekil 5.2'de ise demonte görünümü verilen ÜFAM tercih edilmiş ve çalışmalarda bu ÜFAM'a ait elektriksel parametreler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, tercih edilen ÜFAM'dan birisi deney makinesi, diğeri ise alternatör olmak üzere 2 adet kullanılmıştır.



Şekil 5.1: Çalışmalarda kullanılan ÜFAM'a ait görünüm

Tablo 5.1: Çalışmalarda kullanılan ÜFAM'a ait temel elektriksel parametreler

Gerilim [V]	Frekans [Hz]	Akım [A]	Güç [kW]	cos ϕ	Devir [d/dak]
Δ 220	50	5,00	1,1	0,68	950
Y 380	50	2,9	1,1	0,68	950
Y 460	60	2,9	1,27	0,63	1140



Şekil 5.2: Çalışmalarda kullanılan ÜFAM'ın demonte görünümü

5.1.2 Karşıt Akışlı RHVT

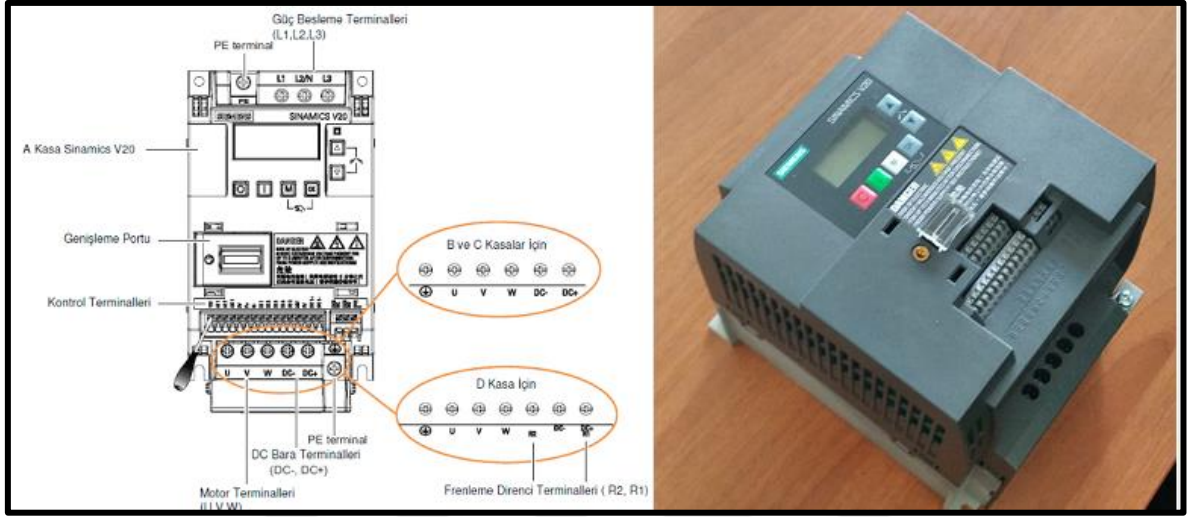
ÜFAM'ı soğutmak üzere ihtiyaç duyulan soğuk akışkanı üretmek üzere Şekil 5.3'te görünümü verilen karşıt akışlı RHVT kullanılmıştır. Kullanılan karşıt akışlı RHVT, orta boy sınıfta ve maksimum soğutma kapasitesi 6.9 bar basınç altında 2900 BTU/h özelliklerine sahiptir.



Şekil 5.3: Çalışmada kullanılan karşıt akışlı RHVT'nin görünümü

5.1.3 Motor Sürücüsü

ÜFAM'ın istenilen devirlerde çalışmasını sağlamak üzere Şekil 5.4'te görünümü verilen motor sürücü devresi kullanılmıştır. Tercih edilen motor sürücüsü, bir faz şebeke girişi ile beslenebilir, üç fazlı çıkışı sayesinde ÜFAM'ı besleyebilir ve 1,5 kW gücündedir.



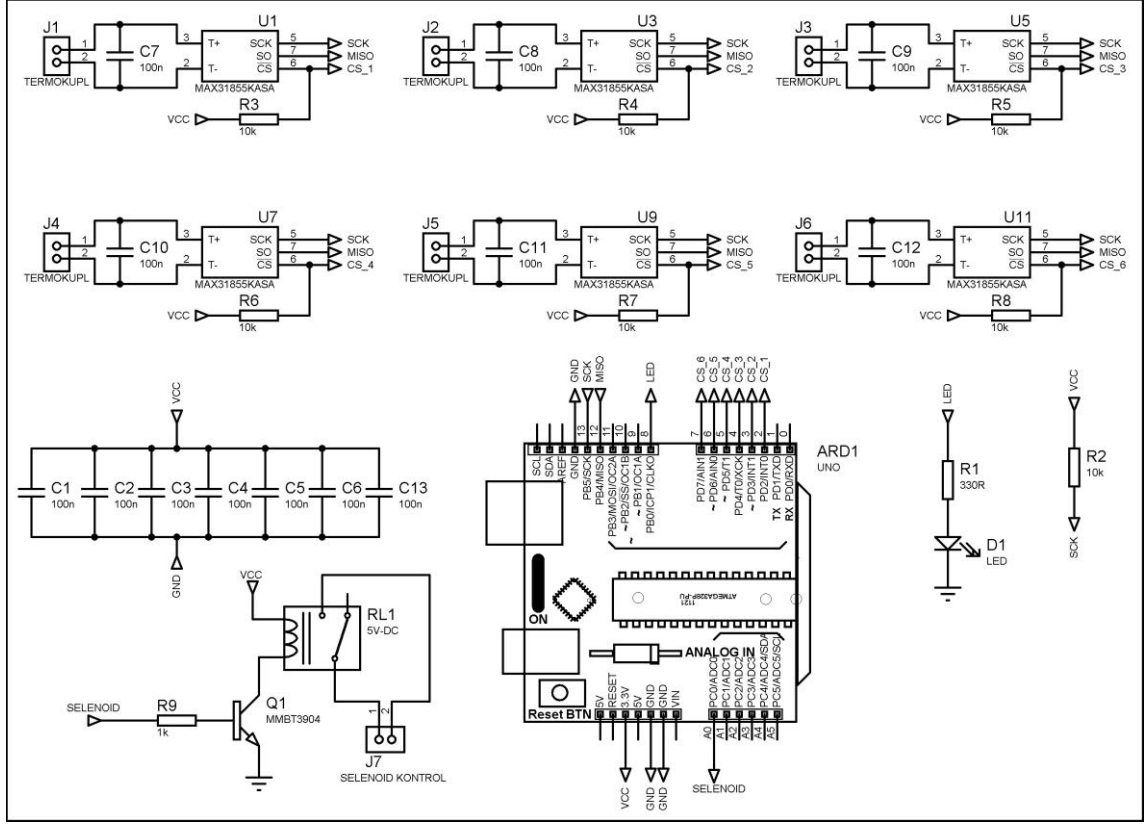
Şekil 5.4: ÜFAM kontrolünün sağlanacağı sürücü devresi

5.1.4 Veri Yakalama ve Sıcaklık Kontrol Sisteminin Tasarımı

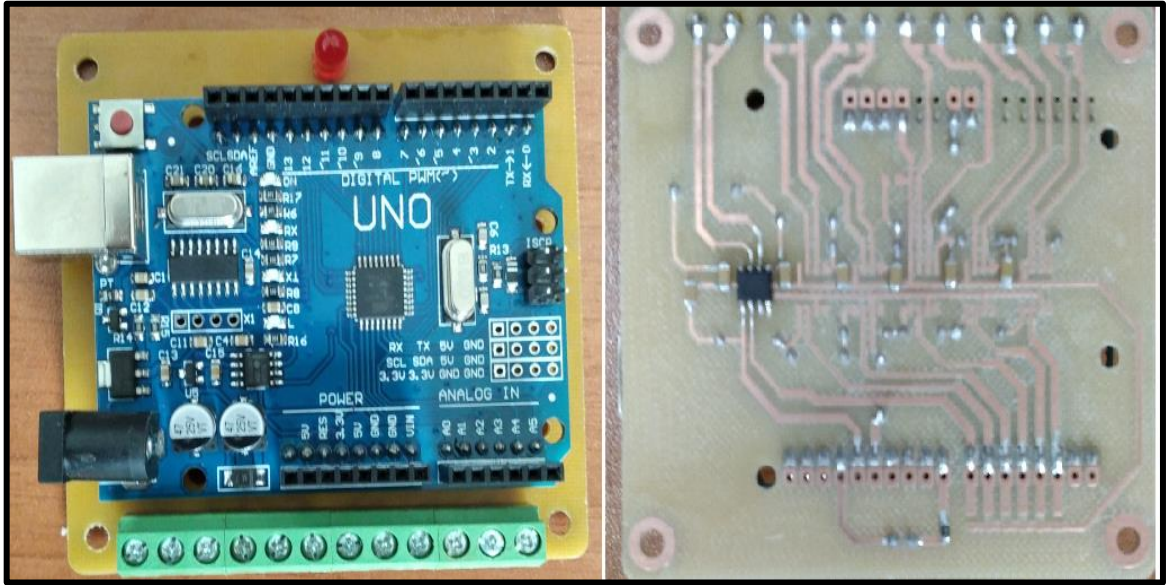
Deney düzeneğinde ölçümüne ihtiyaç duyulan sıcaklıkları ölçmek ve kabin içi sıcaklığı denetlemek üzere mikrodenetleyici tabanlı bir veri yakalama ve sıcaklık kontrol sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiş ve imal edilmiştir. Tasarlanan sisteme ait devre şeması Şekil 5.5'de imal edilen devreye ait görünüm Şekil 5.6'da verilmiştir.

Sistem, 6 sıcaklık ölçüm kanalının yanı sıra soğuk akışkanın kontrollü şekilde kabine uygulanabilmesi için 1 kanal selenoid vana kontrol çıkışına sahiptir. Sıcaklık kanallarından ölçülen sıcaklık değerleri bilgisayara aktarılabilir ve analizlerde kullanılabilir. Sıcaklık ölçümleri için K tipi termokupl kullanılmıştır. Termokupl sinyalinin mikrodenetleyiciye aktarılması için MAX31855 entegresi tercih edilmiştir. MAX31855, K tipi termokupl sinyallerini düşük gürültü oranları ile yükseltebilen, elde edilen sıcaklık verisini sayısal olarak mikrodenetleyiciye aktarabilen bir entegre devredir. Tasarlanan sistemde mikrodenetleyici olarak ATMEGA328 tercih edilmiştir. ATMEGA328 ile MAX31855

entegrelerinden toplanan veriler analiz edilir, selenoid vana çıkışı kontrol edilir, işlem sonuçları bilgisayara aktarılır.



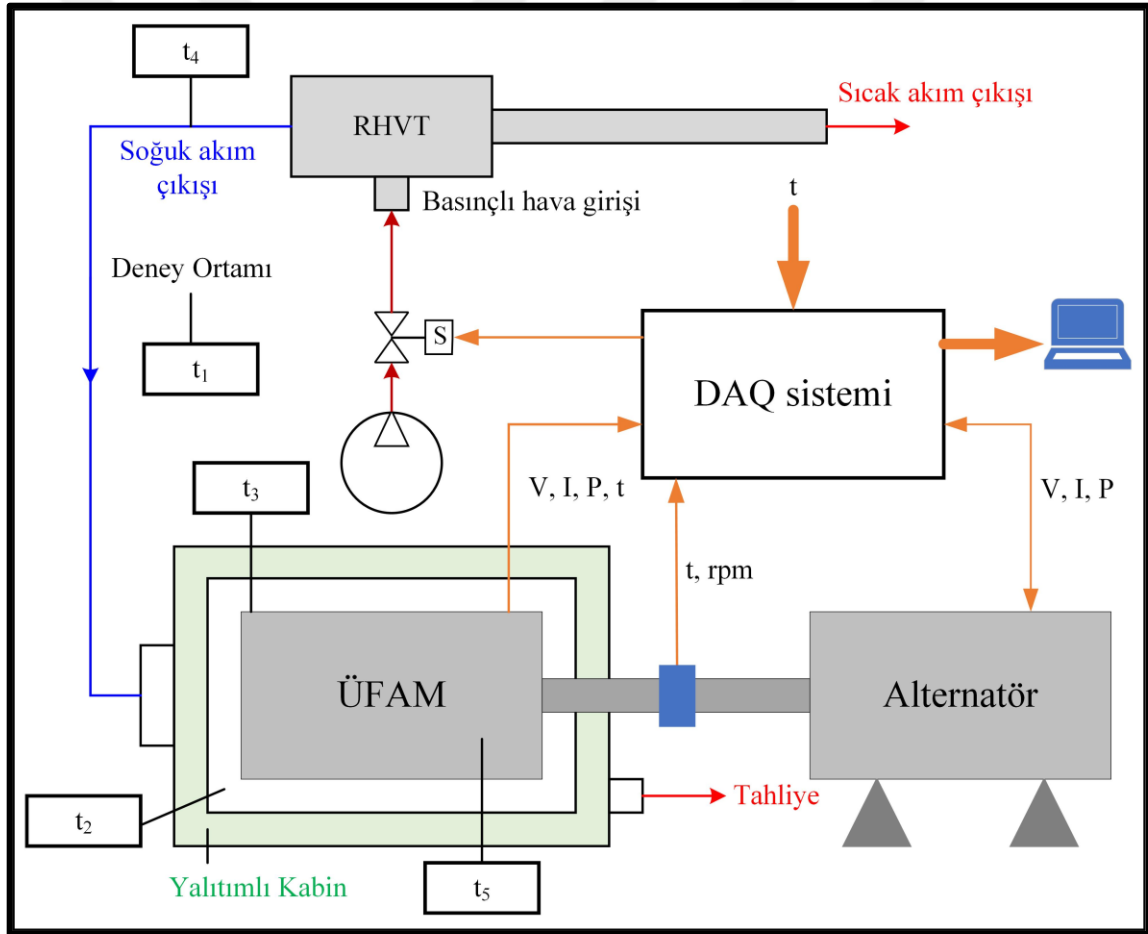
Şekil 5.5: Veri yakalama ve sıcaklık kontrol sistemine ait devre şeması



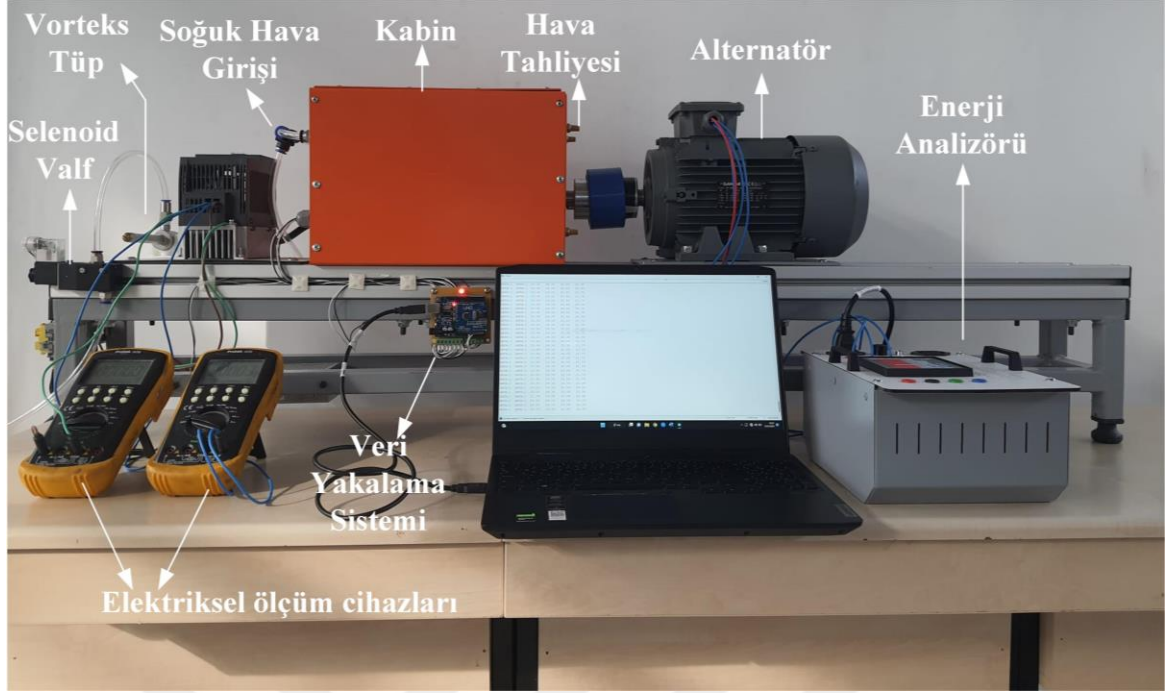
Şekil 5.6: Veri yakalama ve sıcaklık kontrol sistemine ait devre görünümü

5.2 Deneysel Düzeneğin Tasarımı

TS EN 60034-2-1 standardında, döner elektrik makinelerinde optimum çalışma çevre sıcaklık değerleri belirlenmiştir (TSE, 2012). TS EN 60034-1 standardında belirlenen optimum çalışma çevre sıcaklık değerlerinden hareketle; Şekil 5.7’de verilen deney düzeneği tasarlanmış ve Şekil 5.8’de görünümü verildiği şekilde imal edilmiştir. Önerilen ÜFAM soğutma sisteminde, ÜFAM yalıtımlı bir kabin içerisine yerleştirilmiş ve kabine karşıt akışlı RHVT entegre edilmiştir. ÜFAM’ın çalışması esnasında belirlenen noktalarındaki sıcaklıklar (ortam sıcaklığı, kabin içi sıcaklık, stator sıcaklığı, motor gövde sıcaklığı), motor akımı, motor gerilimi, motor gücü, motor devri ölçülmüş ve verimlilik analizleri gerçekleştirilmiştir.



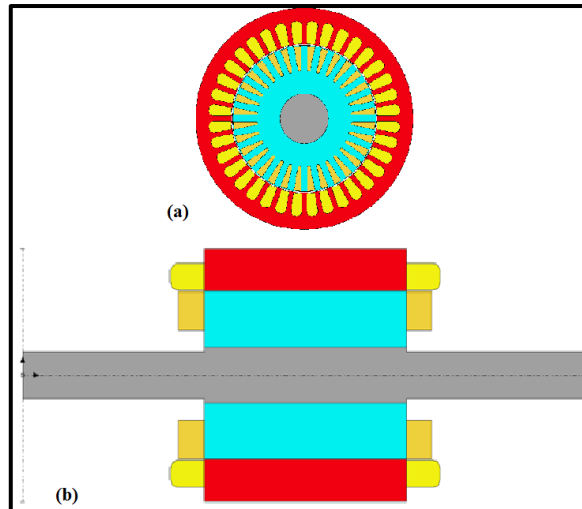
Şekil 5.7: Tasarlanan deney düzeneği



Şekil 5.8: İmal edilen deney düzeneği

5.3 Benzetim Çalışmalarına Esas Teşkil Eden ÜFAM Modelinin Oluşturulması

Benzetim çalışmalarına esas teşkil etmek üzere oluşturulan ÜFAM modelinde Şekil 5.1’de verilen temel elektriksel parametreler ve Şekil 5.2’de demonte görünümü verilen ÜFAM’ın fiziki ölçüleri ile elektriksel parametreleri kullanılmıştır. Bahsedilen değerlerin ANSYS Motor-CAD benzetim programında aktarılmasıyla ÜFAM modeli oluşturulmuştur.



Şekil 5.9: ANSYS Motor-CAD görüntüleri (a) radial görünüm (b) axial görünüm

Elde edilen modele ilişkin ANSYS Motor-CAD görünümüleri Şekil 5.9’da, ANSYS Motor-CAD temel parametreleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2: Benzetimde kullanılan motora ait ANSYS Motor-CAD temel parametreleri

Slot Number	36	Rotor Bars	32	Motor Length	335 mm
Stator Lamination Outer Diameter	135 mm	Pole Number	6	Stator Lam Length	120 mm
Stator Bore Diameter	90 mm	Bar Opening Depth [Top]	0,5 mm	Rotor Lam Length	120 mm
Tooth Width (Parallel Teeth)	3 mm	Rotor Tooth Width [Top]	5 mm	End winding axial overhang [Front]	20 mm
Slot Depth	14,5 mm	Bar Depth [Top]	15 mm	End winding axial overhang [Rear]	20 mm
Slot Corner Radius	3°	Bar Corner Radius [Top]	0,9°	Wdg Extension [Front]	0 mm
Tooth Tip Depth	0,5 mm	Airgap	0,521 mm	Wdg Extension [Rear]	0 mm
Slot Opening	3 mm	Shaft Diameter	30 mm	EndRing Thickness [F]	15 mm
Shaft Extension [Front]	0 mm	Shaft Extension [Rear]	0 mm	EndRing Add [Inner]	5 mm

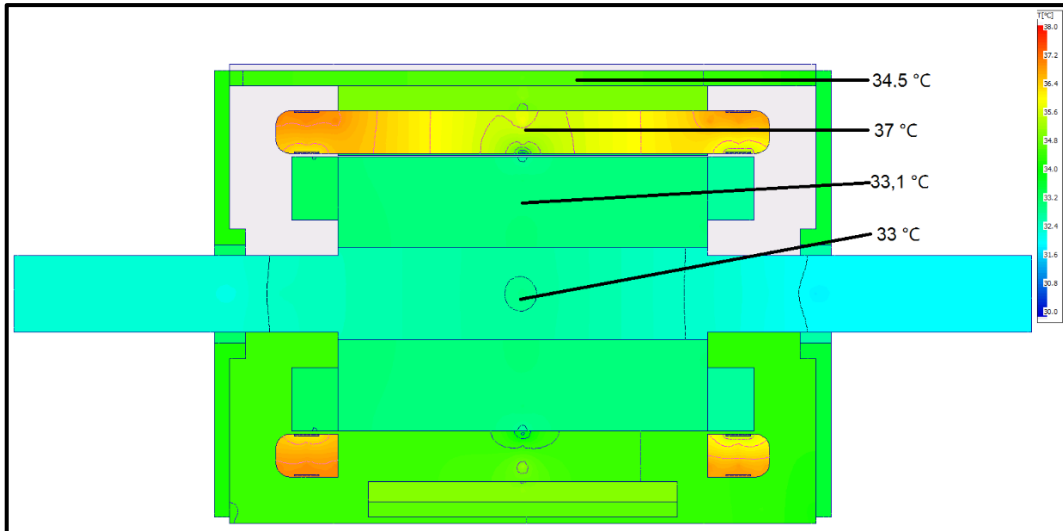
6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1 Benzetim Çalışmaları

Benzetim çalışmaları iki safhada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada IE3 verimlilik sınıfındaki ÜFAM'ın 25 °C sıcaklıkta çalıştığı kabul edilerek benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiş, verimlilik değeri elde edilmiştir. İkinci aşamada ÜFAM'ın Karşıt Akışlı RHVT ile soğutulan kabin içerisine yerleştirildiği ve kabin içerisinin 0 °C sıcaklıkta tutulduğu kabul edilerek benzetim çalışması gerçekleştirilmiş ve verimlilik değeri elde edilmiştir.

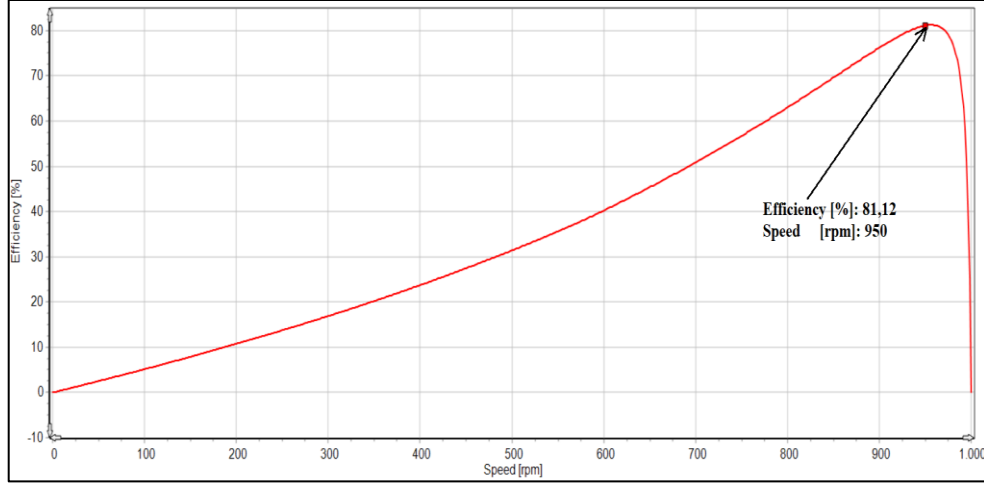
6.1.1 25 °C'de Benzetim Çalışmaları

Bu safhada; Şekil 5.9 ve Tablo 5.2'de verilen motor parametreleri kullanılmış, motorun yıldız 380 V modunda çalıştırıldığı, geleneksel fan soğutmasının kullanıldığı, motorun deniz seviyesinde çalıştığı, ortam sıcaklığının IEC 60034-1 standartları gereği 25 °C olduğu ve motorun anma gücünde çalıştığı varsayılmıştır. Gerçekleştirilen bu deney ile motorumuzun etiket değerleri elde edilmiş ve modelin uygunluğu ispat edilmiştir.



Şekil 6.1: 25 °C ortam sıcaklığında çalışan motorda oluşan sıcaklıkların dağılımı.

Analiz neticesinde, motor parçalarında oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 6.1'de, verimlilik grafiği Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.2: 25 °C ortam sıcaklığında çalışan motorun verimlilik grafiği.

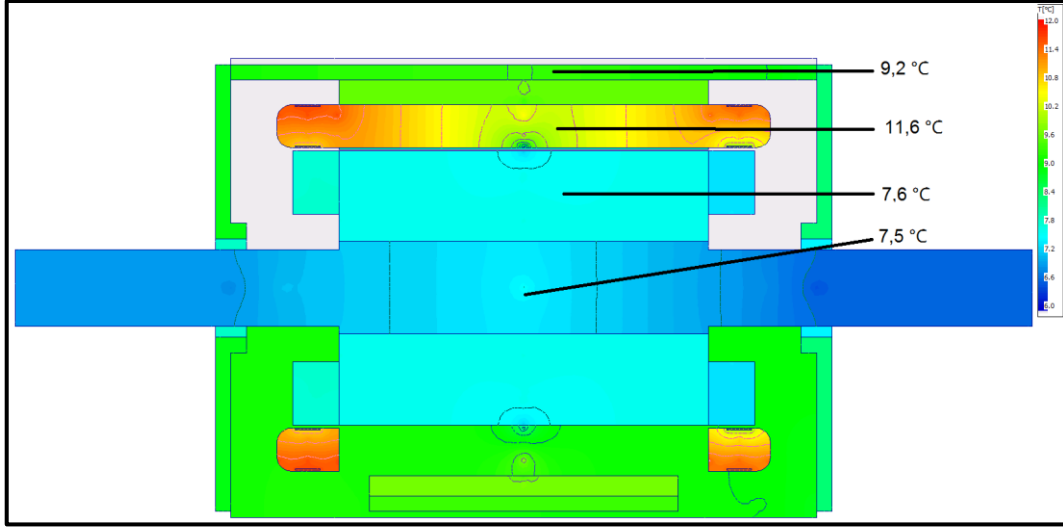
25 °C ortam sıcaklığında, referans elektrik motoru için anma gücünde yürütülen benzetim çalışmaları neticesinde elde edilen termal dağılımlar incelendiğinde; gövde sıcaklığının 34,50 °C'ye, stator boyunduruk sıcaklığının 35,20 °C'ye, stator sargı sıcaklığının 37 °C'ye, rotor sıcaklığının 33,10 °C'ye, şaft sıcaklığının 33 °C'ye kadar ulaştığı, verimliliğin ise % 81,12 olduğu görülmüştür.

6.1.2 0 °C'de Benzetim Çalışmaları

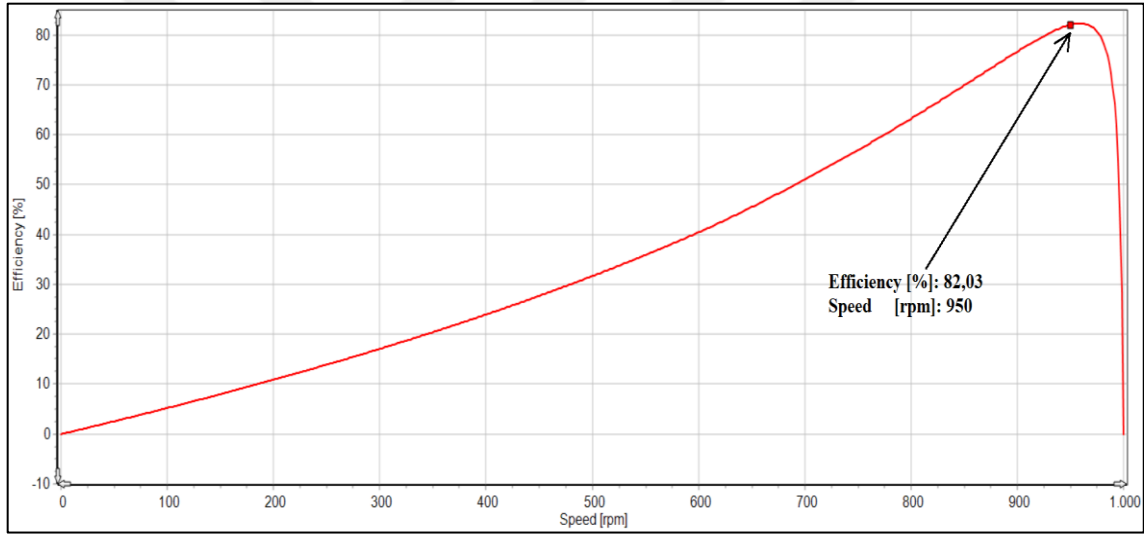
Bu safhada; Şekil 5.9 ve Tablo 5.2'de verilen motor parametreleri kullanılmış, motorun yıldız 380 V modunda çalıştırıldığı, geleneksel fan soğutmasına ilave olarak motorun RHVT ile soğutulan bir kabin içerisine yerleştirildiği, motorun deniz seviyesinde çalıştığı, kabin içi sıcaklığın 0 °C'de sabit tutulduğu ve motorun anma gücünde çalıştığı varsayılmıştır.

Analiz neticesinde, motor parçalarında oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 6.3'de, verimlilik grafiği Şekil 6.4'te verilmiştir.

0 °C ortam sıcaklığında, referans elektrik motoru için anma gücünde yürütülen benzetim çalışmaları neticesinde elde edilen termal dağılımlar incelendiğinde; gövde sıcaklığının 9,20 °C'ye, stator boyunduruk sıcaklığının 9,80 °C'ye, stator sargı sıcaklığının 11,60 °C'ye, rotor sıcaklığının 7,60 °C'ye, şaft sıcaklığının 7,50 °C'ye kadar ulaştığı, verimliliğin ise %82,03 olduğu görülmüştür.



Şekil 6.3: 0 °C iç sıcaklığa sahip kabin içerisinde çalışan motorda oluşan sıcaklıkların dağılımı



Şekil 6.4: 0 °C iç sıcaklığa sahip kabin içerisinde çalışan motorun verimlilik grafiği

Benzetim çalışmasının iki farklı safhasında elde edilen analiz sonuçları karşılaştırıldığında; kabin içerisine yerleştirilerek karşıt akışlı RHVT ile soğutulan motor parçalarında, geleneksel fanlı soğutma sistemi ile soğutulan motor parçalarına göre daha düşük sıcaklıklar elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Motor parçalarında meydana gelen sıcaklık iyileştirmesi, motor verimliliğinde de bir iyileşme ortaya çıkarmıştır.

Önerilen yöntem ile soğutulan motorda verimlilik %81,12'den, %82,03'e yükselmiştir. Bu artış %1,22'lik verimlilik artışına karşılık gelmektedir.

6.2 Verimlilik Ölçüm Deneyleri

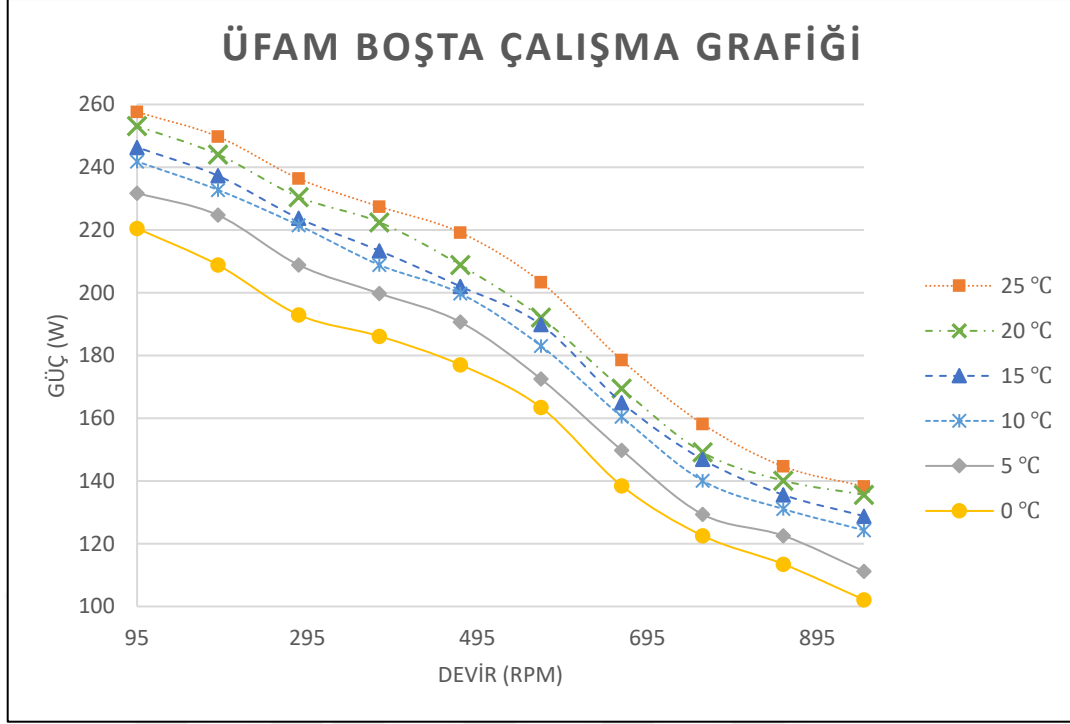
Verimlilik ölçüm deneyleri; boşa çalıştırma, akuple çalıştırma ve yükte çalıştırma olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirilmiştir.

6.2.1 Boşa Çalıştırma

ÜFAM; ortam sıcaklığı sırasıyla 25 °C, 20 °C, 15 °C, 10 °C, 5 °C ve 0 °C sıcaklıklarda ve devir sayısı 95 rpm’den 950 rpm’e kadar 95’er rpm arttırılarak boşa çalıştırılmış ve sonuçlar kaydedilerek deneyler 3 kez tekrarlanmıştır. Farklı çalışma sıcaklıkları ve devirler için gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen sayısal veriler Tablo 6.1’de grafiksel gösterim Şekil 6.5’te verilmiştir. Şekil 6.5 incelendiğinde, ÜFAM’ın anma gücünde güç tüketiminin en az olduğu görülürken, devir sayısının azalmasıyla güç tüketiminin arttığı görülmüştür. Grafik, ÜFAM’ın çalıştığı ortam sıcaklığı açısından değerlendirildiğinde, 0°C ortam sıcaklığında ve anma gücünde güç tüketiminin en az olduğu görülmüştür. Güç tüketimi, 25 °C ve 95 rpm için 257,6 W ile en yüksek seviyeye ulaşırken, 0 °C ve 950 rpm için 102,15 W ile en az düzeyde olmuştur. Elde edilen tüm sonuçlar ÜFAM’ın katalog verileri ile ve benzetim sonuçları ile uyumludur.

Tablo 6.1: Boşa çalıştırmada elde edilen sayısal veriler

	25 °C			20 °C			15 °C			10 °C			5 °C			0 °C		
rp m	V _{IN} v	I _{INV}	P _{IN} v	V _{IN} v	I _{INV}	P _{INV}	V _{INV}	I _{INV}	P _{INV}	V _{INV}	I _{INV}	P _{INV}	V _{INV}	I _{INV}	P _{INV}	V _{INV}	I _{INV}	P _{INV}
950	223	0,62	138	226	0,60	136	226	0,57	129	226	0,55	124	227	0,49	111	227	0,45	102
855	226	0,64	145	226	0,62	140	226	0,60	136	226	0,58	131	227	0,54	123	227	0,50	114
760	226	0,70	158	226	0,66	149	226	0,65	147	226	0,62	140	227	0,57	129	227	0,54	123
665	226	0,79	179	226	0,75	170	226	0,73	165	226	0,71	160	227	0,66	150	227	0,61	138
570	226	0,90	203	226	0,85	192	226	0,84	190	226	0,81	183	227	0,76	173	227	0,72	163
475	226	0,97	219	227	0,92	209	227	0,89	202	227	0,88	200	227	0,84	191	227	0,78	177
380	223	1,02	227	227	0,98	222	227	0,94	213	227	0,92	209	227	0,88	200	227	0,82	186
285	223	1,06	236	226	1,02	231	226	0,99	224	226	0,98	221	227	0,92	209	227	0,85	193
190	223	1,12	250	226	1,08	244	226	1,05	237	226	1,03	233	227	0,99	225	227	0,92	209
95	224	1,15	258	226	1,12	253	226	1,09	246	226	1,07	242	225	1,03	232	225	0,98	221



Şekil 6.5: Yüksüz durumdaki ÜFAM'ın giriş gücünün sıcaklık ve devir sayısına göre değişimi

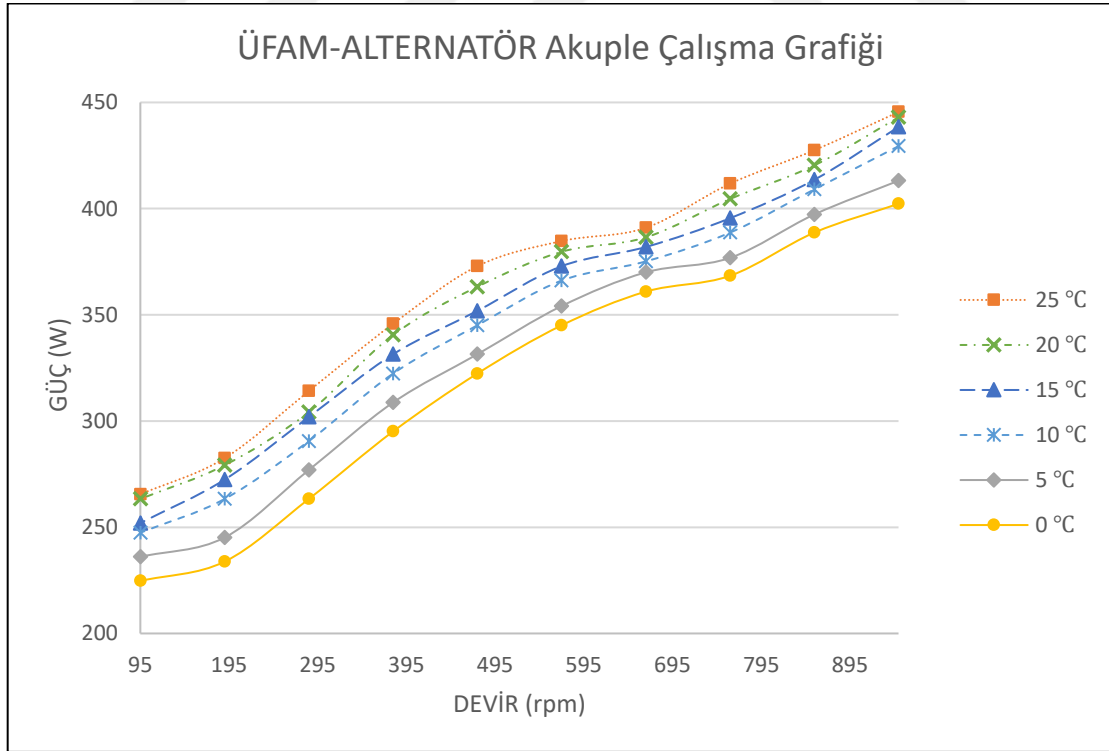
6.2.2 Akuple Çalıştırma

ÜFAM ve alternatör esnek bir kaplin yardımıyla birbirine akuple edilmiş, ortam sıcaklığı sırasıyla 25 °C, 20 °C, 15 °C, 10 °C, 5 °C ve 0 °C sıcaklıklarda ve devir sayısı 95 rpm'den 950 rpm'e kadar 95'er rpm arttırılarak birlikte çalıştırılmış ve 3 kez tekrarlanan deney sonuçları kaydedilmiştir.

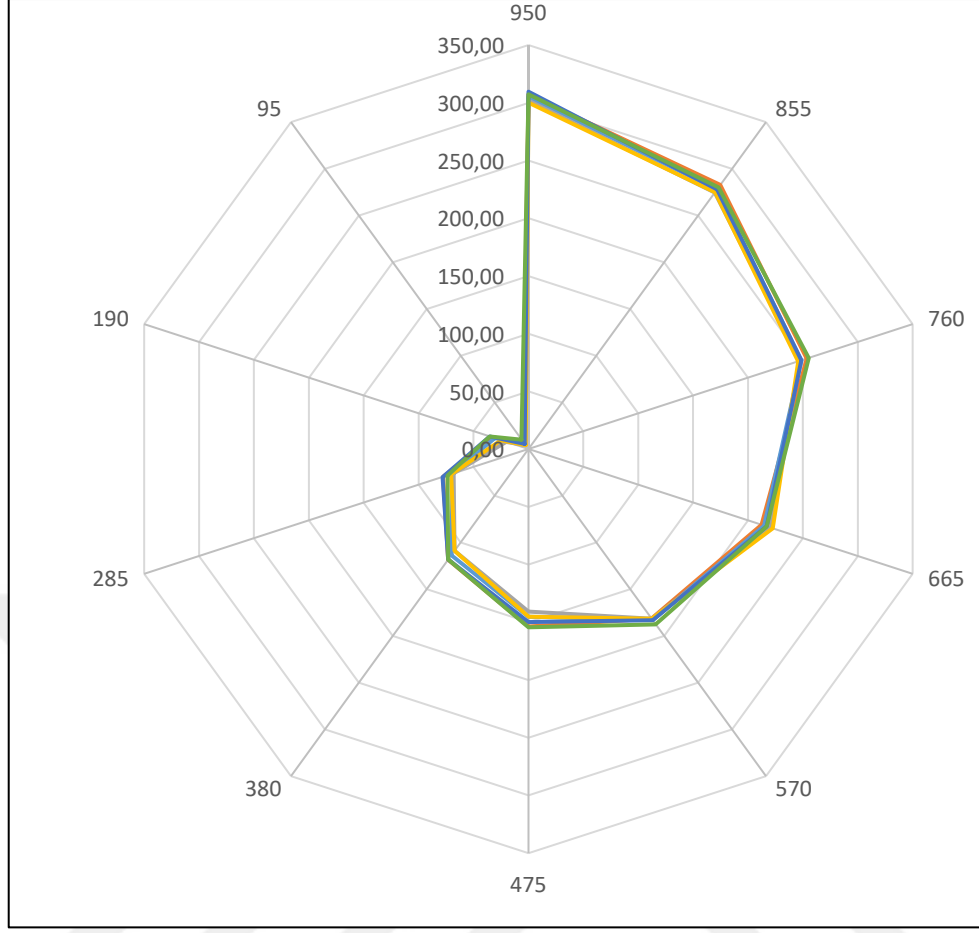
Farklı çalışma sıcaklıkları ve devirler için gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde sayısal veriler Tablo 6.2'de, grafiksel gösterim Şekil 6.6'da verilmiştir. Şekil 6.6 incelendiğinde, devir sayısı arttıkça kuplaj gücünün arttığı görülmektedir. Şekil 6.5 ve Şekil 6.6 birlikte ele alındığında; Şekil 6.5'te elde edilen sonuçlar tüketilen güç, Şekil 6.6'da elde edilen güç ise üretilen güçü temsil etmektedir. Dolayısıyla, Şekil 6.6 ile Şekil 6.5'te elde edilen sonuçların farkının alınmasıyla elde edilen Şekil 6.7 akuple çalışmada üretilen gücün incelenmesi için daha doğru sonuçlar verecektir. Şekil 6.7 incelendiğinde sıcaklıkla değişim gösteren boşta çalışma değerlerinin elimine edilmesi neticesinde, ÜFAM milinden üretilen gücün devir sayısı ile orantılı olarak değiştiği ve sıcaklıktan bağımsız olduğu görülmüştür.

Tablo 6.2: Akuple çalıştırmada elde edilen sayısal veriler

	25 °C			20 °C			15 °C			10 °C			5 °C			0 °C		
rpm	V _{INV}	I _{INV}	P _{INV}	V _{INV}	I _{INV}	P _{INV}	V _{INV}	I _{INV}	P _{INV}	V _{INV}	I _{INV}	P _{INV}	V _{INV}	I _{INV}	P _{INV}	V _{INV}	I _{INV}	P _{INV}
950	225	1,98	446	226	1,96	443	226	1,94	438	226	1,90	429	227	1,82	413	226	1,78	402
855	225	1,9	428	226	1,86	420	226	1,83	414	226	1,81	409	227	1,75	397	226	1,72	389
760	225	1,83	412	226	1,79	405	226	1,75	396	226	1,72	389	227	1,66	377	226	1,63	368
665	226	1,73	391	226	1,71	386	226	1,69	382	226	1,66	375	227	1,63	370	227	1,59	361
570	225	1,71	385	226	1,68	380	226	1,65	373	226	1,62	366	227	1,56	354	227	1,52	345
475	226	1,65	373	227	1,60	363	227	1,55	352	227	1,52	345	227	1,46	331	227	1,42	322
380	226	1,53	346	227	1,50	341	227	1,46	331	227	1,42	322	227	1,36	309	227	1,3	295
285	226	1,39	314	227	1,34	304	227	1,33	302	227	1,28	291	227	1,22	277	227	1,16	263
190	226	1,25	283	227	1,23	279	227	1,20	272	227	1,16	263	227	1,08	245	227	1,03	234
95	225	1,18	266	227	1,16	263	227	1,11	252	227	1,09	247	227	1,04	236	227	0,99	225



Şekil 6.6: ÜFAM ve alternatör akuple şeklinde ÜFAM'ın giriş gücünün sıcaklık ve devir sayısına göre değişimi.



Şekil 6.7: ÜFAM'ın boştaki çalışmaya göre alternatör ile akuple şekilde boştaki çalışmada alternatör milinde harcanan güç değişimi

6.2.3 Yüklü Çalıştırma

Referans ÜFAM yüklü çalışması üç aşamada ele alınmıştır. İlk aşamada ÜFAM'ın soğutulması için kullanılan fan demonte hale getirilmiş, ÜFAM'ın fansız çalışmadaki temel parametreleri elde edilmiştir. İkinci aşamada, ÜFAM'ın soğutulması için fan olmaksızın yalnızca karşıt akışlı RHVT desteği ile soğutma yapılmış ve ÜFAM'ın temel parametreleri elde edilmiştir. Son aşamada, fan ve karşıt akışlı RHVT desteği ile hibrit soğutma gerçekleştirilmiş ve ÜFAM'ın parametreleri incelenmiştir.

6.2.3.1 Fansız Çalışmada ÜFAM Verimliliğinin İncelenmesi

ÜFAM, alternatör ile akuple edilerek 25°C ortam sıcaklığında anma devrinde çalıştırılmış, %100, %75, %50 yükleme değerleri için verimlilik, stator sıcaklığı, gövde sıcaklığı, sargı

sıcaklığı ölçülmüştür. ÜFAM'ın fansız yüklü çalışmasında ÜFAM üzerinde kabin bulunmamaktadır ve gövde üzerinden ısı transferi doğal taşınım yoluyla gerçekleşmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar Tablo 6.3'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki fanın kullanılmaması anma gücü için %81 olan ÜFAM etiket verimlilik değerinin %77,26'ya düşmesine sebep olmaktadır. Bu bilgiden hareketle fan kullanımının ÜFAM etiket değerine göre %4,71 oranında verimlilik artışına sebep olduğu söylenebilir.

Tablo 6.3: Fansız yüklü çalıştırmada elde edilen sayısal veriler

Ortam Sıcaklığı [°C]	Yükleme [%]	Verimlilik [%]	Stator Sıcaklığı [°C]	Gövde Sıcaklığı [°C]	Sargı Sıcaklığı [°C]
25	100	77,26	96,72	88,73	98,33
	75	77,03	-	-	-
	50	74,12	-	-	-

6.2.3.2 Karşıt Akışlı RHVT Destekli Soğutmada ÜFAM Verimliliğinin İncelenmesi

ÜFAM; alternatör ile akuple edilerek 25 °C ortam sıcaklığında, 25 °C, 20 °C, 15 °C, 10 °C, 5 °C ve 0 °C kabin içi sıcaklıklarında anma devrinde çalıştırılmış, %100, %75, %50 yüklem değerleri için verimlilik, stator sıcaklığı, gövde sıcaklığı, sargı sıcaklığı ölçülmüştür. Karşıt akışlı RHVT desteği ile gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar Tablo 6.4'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; karşıt akışlı RHVT'nin kullanılması ile 25 °C ortam ve kabin içi sıcaklıkta, anma gücü ve anma devrinde ÜFAM verimliliğinin %78,23 olduğu görülmüştür. Bu sonuç %81 olan ÜFAM etiket verimlilik değerinin %3,41 altındadır. Bu sonuç fansız yüklü çalışma sonuçları ile karşılaştırıldığında, karşıt akışlı RHVT kullanımının motor verimliliğinde artış sağladığı görülmektedir.

Tablo 6.4: Karşıt akışlı RHVT desteği ile soğutmada elde edilen sayısal veriler

Ortam Sıcaklığı [°C]	Kabin İçi Sıcaklık [°C]	Yükleme [%]	Verimlilik [%]	Stator Sıcaklığı [°C]	Gövde Sıcaklığı [°C]	Sargı Sıcaklığı [°C]
25	25	100	78,23	91,16	82,72	92,12
		75	78,01	-	-	-
		50	75,19	-	-	-
	20	100	78,42	85,02	77,12	86,70
		75	78,12	-	-	-
		50	75,41	-	-	-
	15	100	78,82	76,12	69,67	78,02
		75	78,18	-	-	-
		50	75,62	-	-	-
	10	100	78,78	67,46	62,43	69,79
		75	78,53	-	-	-
		50	75,91	-	-	-
	5	100	79,09	59,42	55,75	62,02
		75	78,79	-	-	-
		50	76,11	-	-	-
	0	100	79,61	51,96	49,37	54,64
		75	78,51	-	-	-
		50	75,49	-	-	-

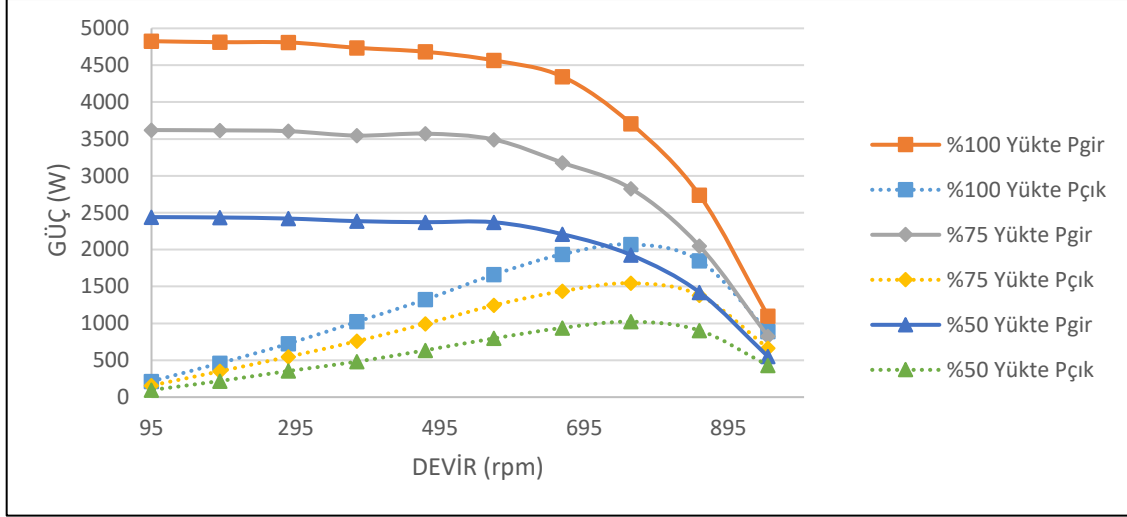
6.2.3.3 Fan ve RHVT Destekli Hibrit Soğutmada ÜFAM Verimliliğinin İncelenmesi

ÜFAM; alternatör ile akuple edilmiş, ortam sıcaklığı sırasıyla 25 °C, 20 °C, 15 °C, 10 °C, 5 °C ve 0 °C sıcaklıklarda, devir sayısı 95 rpm'den 950 rpm'e kadar 95'er rpm arttırılarak, yüklem %100, %75, %50 olacak şekilde çalıştırılmış ve 3 kez tekrarlanan deney sonuçları kaydedilmiştir. 25 °C sıcaklıktaki çalışmalar yalnızca fan desteği ile kabin dışında, 20 °C, 15 °C, 10 °C, 5 °C ve 0 °C sıcaklıklardaki deneyler ise kabin içinde ve hibrit soğutma ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler neticesinde elde edilen sayısal veriler Tablo 6.5'te verilmiştir.

Farklı çalışma sıcaklıkları, yük ve devirler için gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen ve Tablo 6.5'te yer alan değerlerden faydalanılarak hazırlanan grafikler Şekil 6.8 – Şekil 6.13'te verilmiştir.

Tablo 6.5: Yüklü çalıştırmada elde edilen sayısal veriler

Sıcaklık [°C]	Yükleme [%]	Ölçüm	Devir [rpm]									
			950	855	760	665	570	475	380	285	190	95
t=25	100	P _{gir}	1100	2738	3707	4345	4565	4682	4736	4809	4812	4826
		P _{ALT}	892	1849	2071	1938	1661	1324	1023	725	461	215
		η	0,8109	0,68	0,56	0,45	0,36	0,28	0,22	0,15	0,10	0,04
	75	P _{gir}	825	2048	2827	3178	3492	3572	3546	3606	3617	3621
		P _{ALT}	665	1381	1545	1437	1245	995	759	548	351	158
		η	0,8061	0,67	0,55	0,45	0,36	0,28	0,21	0,15	0,10	0,04
	50	P _{gir}	550	1421	1927	2209	2371	2372	2386	2421	2436	2441
		P _{ALT}	430	904	1023	939	797	636	481	355	219	97
		η	0,7818	0,64	0,53	0,43	0,34	0,27	0,20	0,15	0,09	0,04
t=20	100	P _{gir}	1100	2735	3706	4315	4556	4675	4726	4791	4796	4781
		P _{ALT}	894	1855	2078	1946	1664	1336	1027	727	466	218
		η	0,8127	0,68	0,56	0,45	0,37	0,29	0,22	0,15	0,10	0,05
	75	P _{gir}	825	2035	2812	3166	3472	3552	3534	3597	3596	3575
		P _{ALT}	665	1388	1547	1438	1247	996	762	554	353	160
		η	0,8061	0,68	0,55	0,45	0,36	0,28	0,22	0,15	0,10	0,04
	50	P _{gir}	550	1406	1923	2196	2351	2352	2372	2396	2426	2433
		P _{ALT}	431	907	1029	941	798	638	487	356	219	98
		η	0,7836	0,65	0,54	0,43	0,34	0,27	0,21	0,15	0,09	0,04
t=15	100	P _{gir}	1100	2718	3698	4306	4541	4646	4712	4786	4781	4751
		P _{ALT}	896	1860	2085	1951	1665	1345	1031	738	471	224
		η	0,8145	0,68	0,56	0,45	0,37	0,29	0,22	0,15	0,10	0,05
	75	P _{gir}	825	2032	2795	3156	3446	3535	3521	3583	3578	3567
		P _{ALT}	666	1396	1555	1439	1247	1001	766	559	358	161
		η	0,8073	0,69	0,56	0,46	0,36	0,28	0,22	0,16	0,10	0,05
	50	P _{gir}	550	1396	1902	2188	2346	2336	2357	2392	2402	2421
		P _{ALT}	433	908	1037	946	801	646	488	360	220	99
		η	0,7873	0,65	0,55	0,43	0,34	0,28	0,21	0,15	0,09	0,04
t=10	100	P _{gir}	1100	2705	3655	4245	4508	4626	4702	4745	4752	4745
		P _{ALT}	898	1863	2091	1955	1673	1347	1037	739	474	228
		η	0,8164	0,69	0,57	0,46	0,37	0,29	0,22	0,16	0,10	0,05
	75	P _{gir}	825	2030	2782	3131	3406	3523	3488	3577	3552	3531
		P _{ALT}	669	1401	1562	1446	1255	1007	773	561	361	168
		η	0,8109	0,69	0,56	0,46	0,37	0,29	0,22	0,16	0,10	0,05
	50	P _{gir}	550	1385	1895	2165	2325	2335	2352	2375	2382	2391
		P _{ALT}	434	911	1042	953	806	649	491	365	221	105
		η	0,7891	0,66	0,55	0,44	0,35	0,28	0,21	0,15	0,09	0,04
t=5	100	P _{gir}	1100	2658	3625	4170	4453	4596	4659	4690	4679	4681
		P _{ALT}	901	1866	2095	1957	1676	1350	1039	740	476	231
		η	0,8191	0,70	0,58	0,47	0,38	0,29	0,22	0,16	0,10	0,05
	75	P _{gir}	825	2025	2736	3106	3386	3488	3451	3552	3541	3512
		P _{ALT}	671	1403	1565	1449	1257	1009	774	562	361	169
		η	0,8133	0,69	0,57	0,47	0,37	0,29	0,22	0,16	0,10	0,05
	50	P _{gir}	550	1374	1875	2159	2298	2298	2330	2355	2351	2371
		P _{ALT}	435	914	1046	953	805	654	502	369	225	112
		η	0,7909	0,67	0,56	0,44	0,35	0,28	0,22	0,16	0,10	0,05
t=0	100	P _{gir}	1100	2655	3622	4167	4448	4591	4651	4661	4662	4645
		P _{ALT}	907	1868	2098	1960	1678	1351	1041	741	477	231
		η	0,8245	0,70	0,58	0,47	0,38	0,29	0,22	0,16	0,10	0,05
	75	P _{gir}	825	2021	2728	3088	3342	3421	3451	3498	3506	3481
		P _{ALT}	678	1406	1568	1451	1259	1011	775	563	361	169
		η	0,8218	0,70	0,57	0,47	0,38	0,30	0,22	0,16	0,10	0,05
	50	P _{gir}	550	1352	1864	2136	2270	2275	2310	2315	2306	2325
		P _{ALT}	437	916	1048	954	806	655	503	371	231	115
		η	0,7945	0,68	0,56	0,45	0,36	0,29	0,22	0,16	0,10	0,05

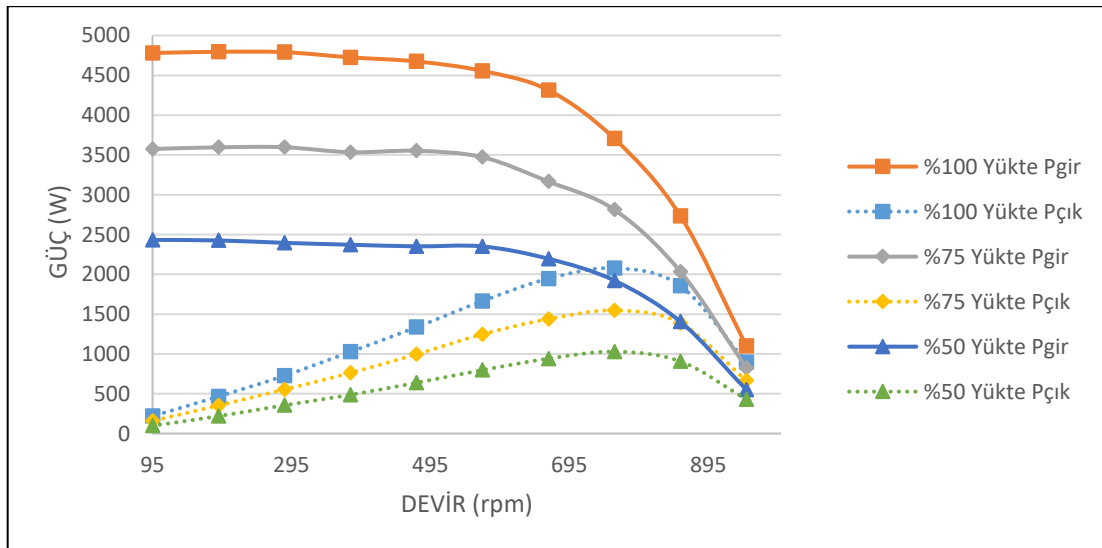


Şekil 6.8: 25 °C için ÜFAM'ın yüklü çalışma güç değişimleri

Şekil 6.8 incelendiğinde; ÜFAM'ın giriş gücünün devir sayısı 95 rpm'de en üst düzeyde olduğu görülürken devir sayısının artmasıyla giriş gücünün azaldığı görülmüştür. Çıkış gücünün ise yaklaşık 800 rpm'e kadar artış gösterdiği ve sonrasında azaldığı görülmüştür.

95 rpm için giriş gücü, %100 yükte 4826 W ile en yüksek seviyeye ulaşırken, %50 yükte 2441 W ile en az düzeyde olmuştur.

ÜFAM verimi ise 950 rpm devirde %100 yükte 0,8109, %75 yükte 0,8061 ve %50 yük değeri ise 0,7818 olarak bulunmuştur.

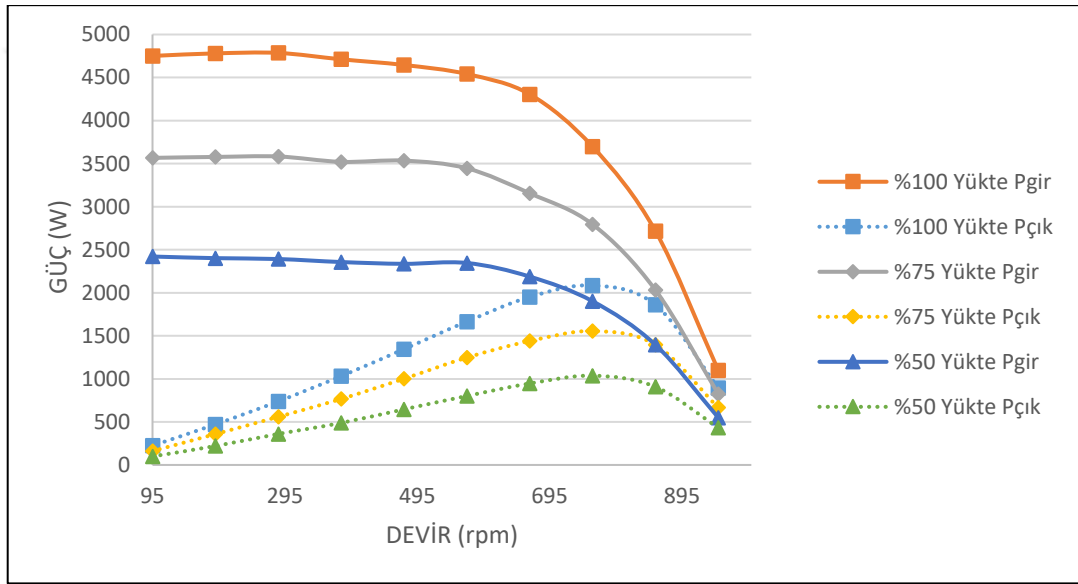


Şekil 6.9: 20 °C için ÜFAM'ın yüklü çalışma güç değişimleri

Şekil 6.9 incelendiğinde; ÜFAM'ın giriş gücünün devir sayısı 95 rpm'de en yüksek değerde olduğu görülürken devir sayısının artmasıyla giriş gücünün azaldığı görülmüştür. Çıkış gücünün ise yaklaşık 800 rpm'e kadar artış gösterdiği ve sonrasında azaldığı görülmüştür.

95 rpm için giriş gücü, %100 yükte 4781 W ile en yüksek seviyeye ulaşırken, %50 yükte 2421 W ile en az düzeyde olmuştur.

ÜFAM verimi ise 950 rpm devirde %100 yükte 0,8127, %75 yükte 0,8061 ve %50 yükte 0,7836 olarak bulunmuştur.

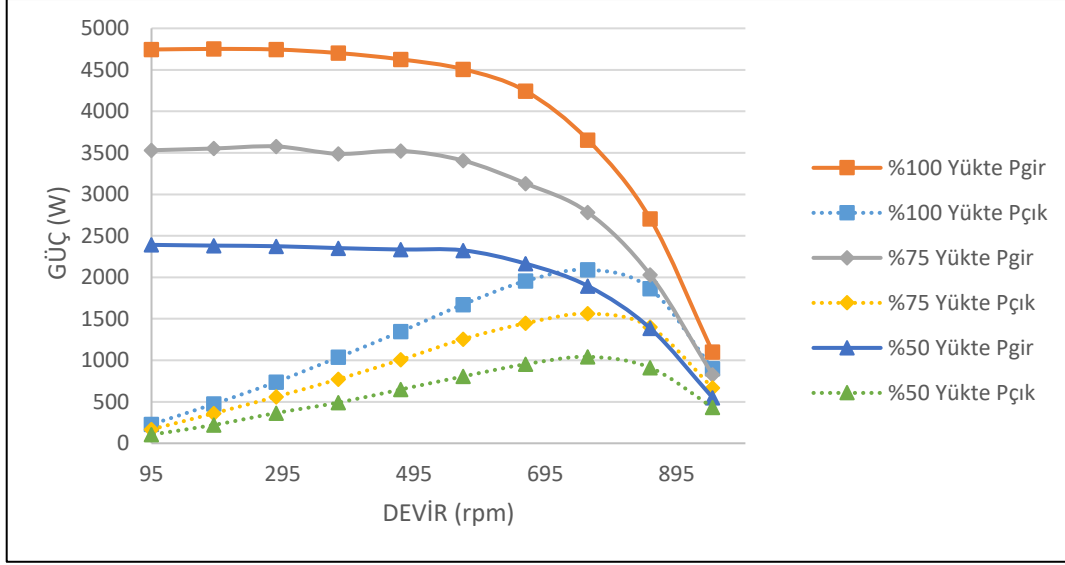


Şekil 6.10: 15 °C için ÜFAM'ın yüklü çalışma güç değişimleri

Şekil 6.10 incelendiğinde; ÜFAM'ın giriş gücünün devir sayısı 95 rpm'de en yüksek değerde olduğu görülürken devir sayısının artmasıyla giriş gücünün azaldığı görülmüştür. Çıkış gücünün ise yaklaşık 800 rpm'e kadar artış gösterdiği ve sonrasında azaldığı görülmüştür.

95 rpm için giriş gücü, %100 yükte 4751 W ile en yüksek seviyeye ulaşırken, %50 yükte 2458 W ile en az düzeyde olmuştur.

ÜFAM verimi ise 950 rpm devirde %100 yükte 0,8145, %75 yükte 0,8073 ve %50 yükte 0,7873 olarak bulunmuştur.



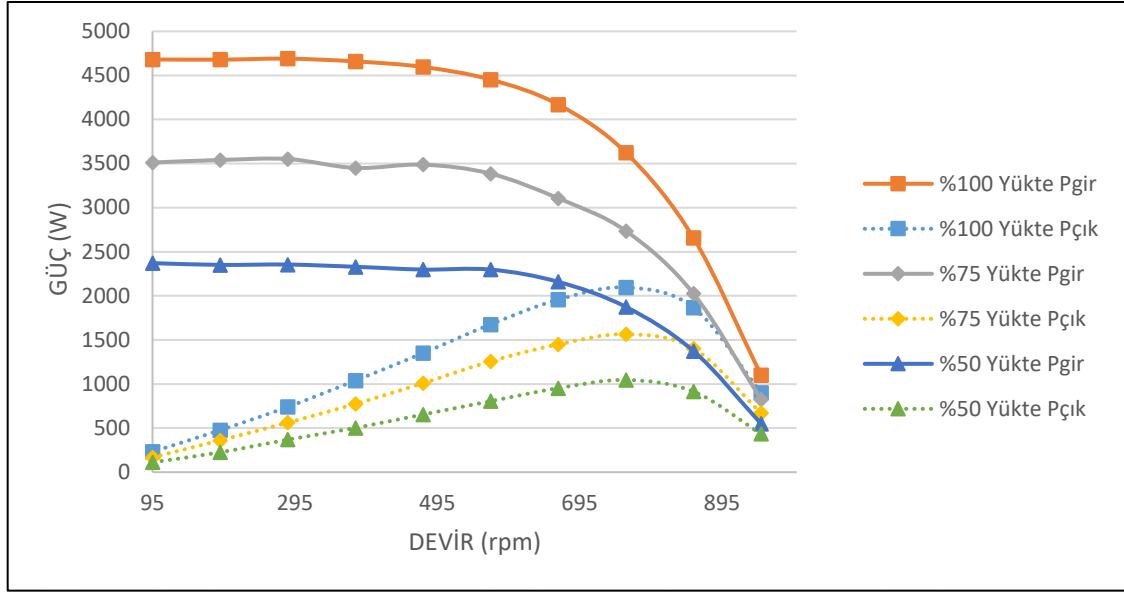
Şekil 6.11: 10 °C için ÜFAM'ın yüklü çalışma güç değişimleri

Şekil 6.11 incelendiğinde; ÜFAM'ın giriş gücünün devir sayısı 95 rpm'de en yüksek değerde olduğu görülürken devir sayısının artmasıyla giriş gücünün azaldığı görülmüştür. Çıkış gücünün ise yaklaşık 800 rpm'e kadar artış gösterdiği ve sonrasında azaldığı görülmüştür.

95 rpm için giriş gücü, %100 yükte 4745 W ile en yüksek seviyeye ulaşırken, %50 yükte 2391 W ile en az düzeyde olmuştur.

ÜFAM verimi ise 950 rpm devirde %100 yükte 0,8164, %75 yükte 0,8109 ve %50 yük değerinde ise 0,7891 olarak bulunmuştur.

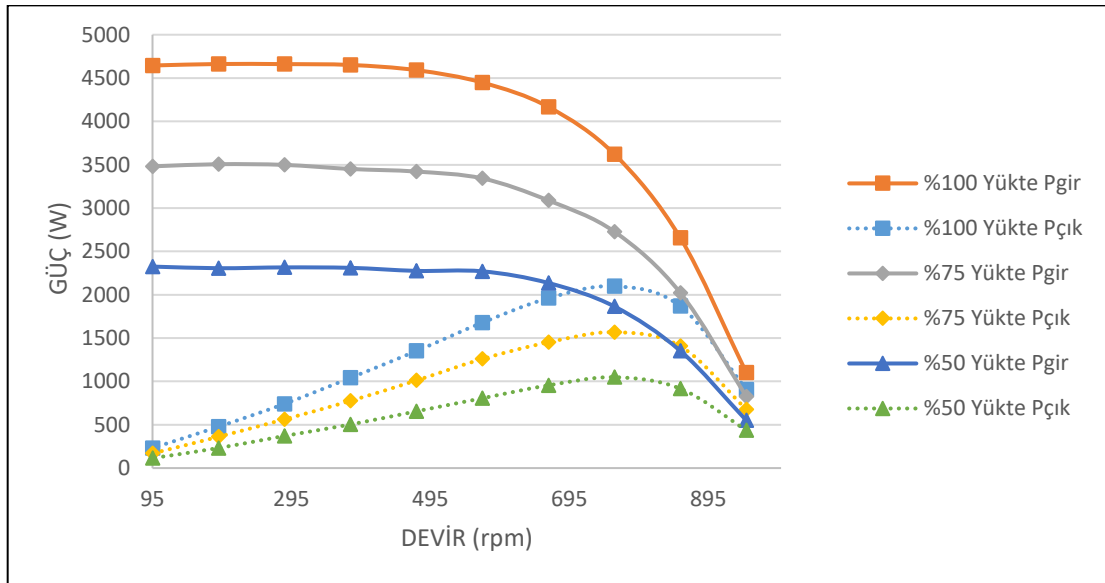
Şekil 6.12 incelendiğinde; ÜFAM'ın giriş gücünün devir sayısı 95 rpm'de en yüksek değerde olduğu görülürken devir sayısının artmasıyla giriş gücünün azaldığı görülmüştür. Çıkış gücünün ise yaklaşık 800 rpm'e kadar artış gösterdiği ve sonrasında azaldığı görülmüştür.



Şekil 6.12: 5 °C için ÜFAM'ın yüklü çalışma güç değişimleri

95 rpm için giriş gücü, %100 yükte 4681 W ile en yüksek seviyeye ulaşırken, %50 yükte 2371 W ile en az düzeyde olmuştur.

ÜFAM verimi ise 950 rpm devirde %100 yükte 0,8191, %75 yükte 0,8133 ve %50 yük değerinde ise 0,7909 olarak bulunmuştur.



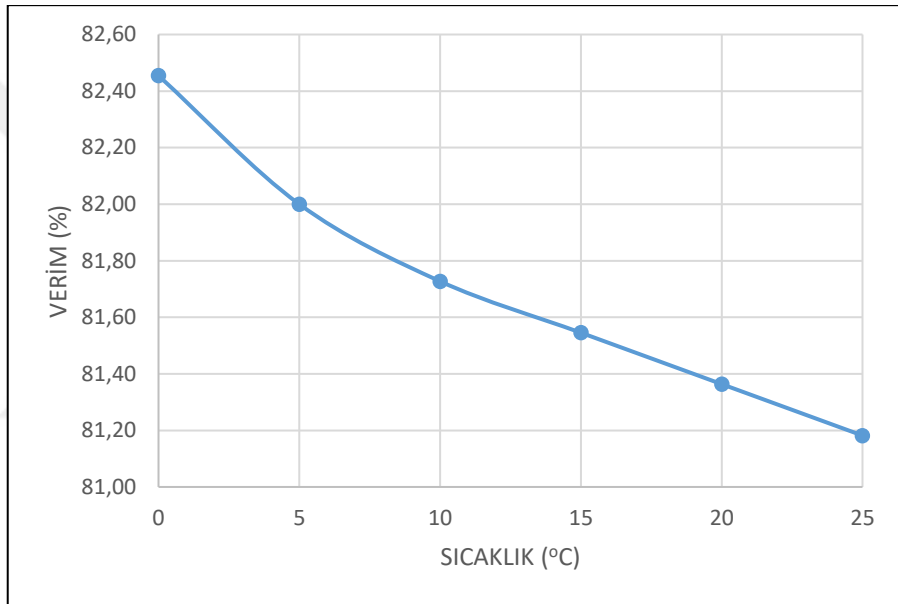
Şekil 6.13: 0 °C için ÜFAM'ın yüklü çalışma güç değişimleri

Şekil 6.13 incelendiğinde; ÜFAM'ın giriş gücünün devir sayısı 95 rpm'de en yüksek değerde

olduğu görülürken devir sayısının artmasıyla giriş gücünün azaldığı görülmüştür. Çıkış gücünün ise yaklaşık 800 rpm'e kadar artış gösterdiği ve sonrasında azaldığı görülmüştür.

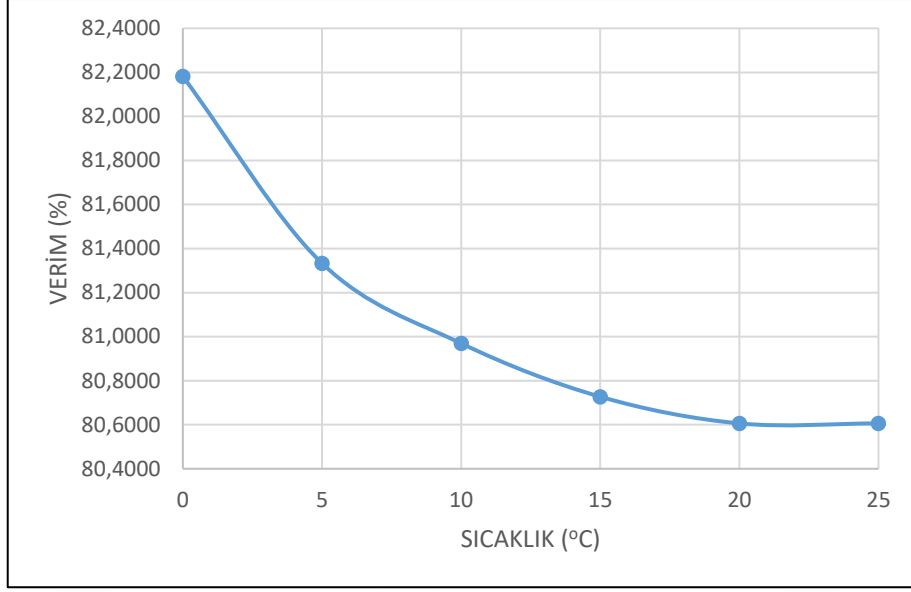
95 rpm için giriş gücü, %100 yükte 4645 W ile en yüksek seviyeye ulaşırken, %50 yükte 2325 W ile en az düzeyde olmuştur.

ÜFAM etiketlerinde yer alan verimlilik değerleri 4/4 (%100), 3/4 (%75) ve 2/4 (%50) yükleme durumları için verilmektedir. Farklı yükleme koşulları ve sıcaklıkları için verimlilikte elde edilen değişimler Şekil 6.14 – Şekil 6.16'da verilmiştir.



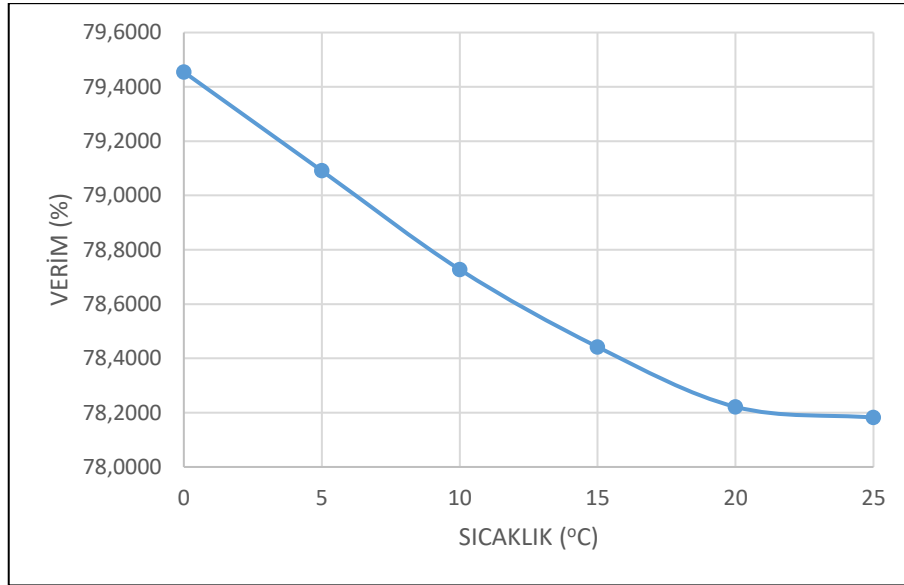
Şekil 6.14: %100 yükleme için verimlilik değişimi

Şekil 6.14 incelendiğinde %100 yüklemede klasik fan soğutmalı motorun anma gücü için verilen etiket verimlilik değerinin, önerilen yöntem ile %81'den %82,45'e yükseltildiği, bu artışın da %1,79'a karşılık geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Sonuçlar motor etiket değerleri üzerinden değil, deneysel sonuçlar üzerinden değerlendirildiğinde, anma gücü için elde edilen motor verimliliğinin %81,09'dan %82,45'e yükseltildiği, bu artışın %1,68'e karşılık geldiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 6.15: %75 yükleme için verimlilik değişimi

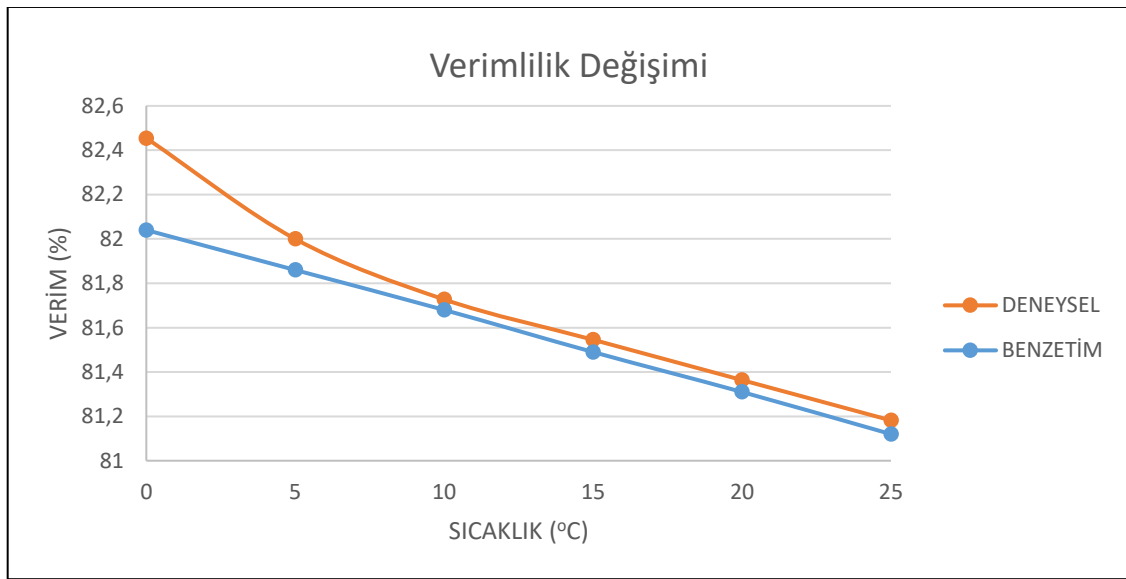
Şekil 6.15 incelendiğinde %75 yüklemede klasik fan soğutmalı motorun anma gücü için verilen etiket verimlilik değerinin, önerilen yöntem ile %81'den %82,18'e yükseltildiği, bu artışın da %1,46'ya karşılık geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Sonuçlar motor etiket değerleri üzerinden değil, deneysel sonuçlar üzerinden değerlendirildiğinde, anma gücü için elde edilen motor verimliliğinin %80,61'den %82,18'e yükseltildiği, bu artışın %1,94'e karşılık geldiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 6.16: %50 yükleme için verimlilik değişimi

Şekil 6.16 incelendiğinde %50 yüklemde klasik fan soğutmalı motorun anma gücü için verilen etiket verimlilik değerinin, önerilen yöntem ile %78'den %79,45'e yükseltildiği, bu artışın da %1,86'ya karşılık geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Sonuçlar motor etiket değerleri üzerinden değil, deneysel sonuçlar üzerinden değerlendirildiğinde, anma gücü için elde edilen motor verimliliğinin %78,18'den %79,45'e yükseltildiği, bu artışın %1,63'e karşılık geldiği sonucuna ulaşılmıştır.

ÜFAM anma gücü için benzetim ve uygulama verimlilik değerleri Şekil 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.17: Anma gücü için benzetim ve deneysel verimlilik sonuçlarının karşılaştırılması

Verimlilik değerleri karşılaştırıldığında, sonuçların birbirine çok yakın olduğu, uygulama sonuçlarının benzetim sonuçlarına göre nispeten fazla olduğu görülmüştür. Bu farkın motor fiziki verilerinin benzetim programına aktarılırken ortaya çıkan toleranslardan kaynaklandığı kıymetlendirilmektedir.

Gouws ve Jaarsveldt (2012) teorik olarak gerçekleştirdikleri çalışmada IE1 verimlilik sınıfındaki asenkron bir motoru stator boyunduruğunu peltier ile soğutmuşlar ve gerçekleştirdikleri benzetim çalışması ile verimliliği %3,73 arttırdıklarını belirtmişlerdir. Her ne kadar bu verimlilik artışı önerdiğimiz soğutma yönteminde elde edilen %1,79'luk verimlilik artışından fazla gibi görünse de önerdiğimiz yöntemin IE1 verimlilik sınıfındaki asenkron motora uygulanması sonucunda %3,86'lık verim artışı elde edilmiş olmasına

dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu açıdan değ erlendirildiğinde önerdiğimiz  FAM soğutma yöntemi Gouws ve Jaarsveldt (2012)'ın önerdikleri peltierli soğutma yöntemine göre nispeten daha fazla verimlilik artışı sağlamaktadır.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

ÜFAM'larda en önemli sabit güç kaybı stator sargılarından kaynaklıdır. Stator sargılarında açığa çıkan ısı önce stator sacına, ardından da gövdeye iletim yolu ile transfer edilir. Gövdenin etkin şekilde soğutulması motor verimliliğini arttırır. Bu bilgiden hareketle sanayide en çok kullanım alanına sahip üç fazlı rotoru sincap kafesli asenkron bir elektrik motorunun ANSYS Motor-CAD modeli oluşturulmuş, oluşturulan model üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde geleneksel fan soğutmasına ilave olarak karşıt akışlı RHVT kullanımının ÜFAM verimliliğine katkı sağladığı belirlenmiştir.

Benzetim çalışmalarına ek olarak gerçekleştirilen deneylerde yalnızca geleneksel fanlı soğutmanın verimliliğe katkısının %4,71 elde edildiği ve verimliliğin %81'e ulaştığı, yalnızca karşıt akışlı RHVT'nin kullanıldığı soğutmanın verimliliğe katkısının %3,41 elde edildiği ve verimliliğin %78,23'e ulaştığı görülmüştür. Bu aşamadaki deneysel sonuçlar göstermiştir ki yalnız başına karşıt akışlı RHVT'nin kullanımı, geleneksel fan soğutmaya göre verimlilik artışında daha az katkı sağlamaktadır.

Geleneksel fan desteği ve karşıt akışlı RHVT desteği ile hibrit soğutma gerçekleştirilmesi durumunda referans ÜFAM etiket verimlilik değerine göre %1,68 oranında verimlilik artışı elde edilmiştir. Enerji verimliliğinde çok küçük artışların bile çok önemli olduğu değerlendirildiğinde, önerilen yöntem ile elde edilen verimlilik artışı önem kazanmaktadır.

Tez kapsamındaki bütün çalışmalarda referans ÜFAM'da yapısal bir değişiklik meydana getirilmemesi, kabin içerisine yerleştirilerek karşıt akışlı RHVT desteği ile soğutulan ÜFAM'da verimlilik artışı elde edilmesi hedeflenmiş ve başarı sağlanmıştır. Yapılan çalışma ile ÜFAM'ın kabin içerisinde soğutulmasının, çalışma ortamından kaynaklı toz vb. zararlılara karşı ÜFAM'ı koruyacağı, gövde ve ÜFAM elemanlarının sıcaklıklarının düşük tutulması nedeniyle ısı kaynaklı termal çatlaklıkların önüne geçileceği, bunun sonucunda da ekonomik ömrünü uzatacağı önerilmektedir.

Yapılacak olan daha sonraki çalışmalarda, kabin içerisine gönderilen soğuk akışkanın motor gövdesi yerine doğrudan stator sargılarına veya rotora yönlendirilmesi ile verimlilik değişimleri incelenebilir. Ayrıca, farklı motor güçlerinde, farklı soğuk hava debileri için de

deneysel çalışmalar gerçekleřtirilebilir.

Diğerk taraftan önerilen yöntemin elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarındaki verimliliğek katkısının incelenmesinin ve soğuk iklim bölgeleri için RHVT'nin sıcak akım tarafından gelen sıcak akışkanın ÜFAM verimine etkisinin incelenmesinin faydalı olacağı n görülmektedir.



KAYNAKLAR

- American Council for an Energy Efficient Economy (Enerji Verimli Ekonomi için Amerikan Konseyi/ACEEE), (2019). *Motor Provisions in the Energy Policy Act of 1992*.
- Bennion, K. (2016). *Electric Motor Thermal Management R&D. NREL is a national laboratory of the U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, National Renewable Energy Laboratory, 2016 Annual Merit Review, USA*.
- Boglietti, A., Cavagnino, A., Parvis, M. ve Vallan, A. (2006). Evaluation of radiation thermal resistances in industrial motors. *Transactions on Industry Applications*, 42 (3): 688-693
- British Petroleum (BP), (2022). *BP Energy Outlook 2022 Edition*.
- Büyük, S. (2018). Elektrik Motorlarında Enerji Verimliliği Mevzuatının Türkiye Pazarına Etkisinin Analizi. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, İstanbul, 113 s.*
- Çabuk, A.S. (2020). Tekerlek içi fırçasız doğru akım motorlarının sıcaklık dağılımlarının toplu parametrelili devre modeli şeması ile incelenmesi. *International Journal of Advances in Engineering Pure Sciences*, 32(2): 128–136.
- Cavazzuti, M., Gaspari, G., Pasquale, S. ve Stalio, E. (2019). Thermal management of a formula e electric motor: analysis and optimization, *Applied Thermal Engineering*, 157(May): 1-10.
- Cebeci, İ. (2013). Karşıt Akışlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüpünde Hava ve Oksijen Akışkanlarının Farklı Nozullarda Enerji-Ekserji Analizlerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 81 s.*
- Cebeci, İ., Gürkan, S., Doğan, S. ve Kırmacı, V. (2022). A simulation study of the cooling of a three-phase induction motor with RHVT. *Hodja Akhmet Yassawi 6 th International Conference on Scientific Research Editor: The Proceedings Book*, pp308–315.
- Çengel, Y.A. ve Gahajar, A.J. (2019). *Isı ve Kütle Transferi*. 4. Basım, Palme Yayınevi, Ankara, 908 s.
- Chen, Q. ve Yang, X. (2014). Calculation analysis of thermal loss and temperature field of in-wheel motor in micro-electric vehicle. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(8): 3189–3195.
- Croitorescu, V., Vasiliu, N. M., Anthonis, J. ve Vasiliu, N. (2013). Thermal modeling of an electric motor used on road vehicle powertrain. *8th International Symposium on*

Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest, Romania, pp 1-6.

de Almeida, A.T., Ferreira, F.J.T.E., Fong, J. ve Fonseca, P. (2008). *EUP Lot 11 Motors Final Report.*, University of Coimbra, pp.137.

de Souza, D. F., Salotti, F. A. M., Sauer, I. L., Tatizawa, H., de Almeida, A. T. ve Kanashiro, A. G. (2022). A performance evaluation of three-phase induction electric motors between 1945 and 2020. *Energies*, 15(6): 1-31.

Deriszadeh, A., ve de Monte, F. (2020). On heat transfer performance of cooling systems using nanofluid for electric motor applications. *Entropy*, 22(1), 99.

T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) (2020). Elektrik Piyasası Sektör Raporu, Ankara.

Eren, H. (2018). Yolcu Taşımacılığı Yapan Araçlarda Işınım ile Isıtma Sisteminin Tasarımı, İmalatı Ve Performans Deneylerinin Yapılması. *Doktora Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 161 s.*

Faiz, J., Ebrahim, B. M., Akin, B., ve Toliyat, H. A. (2008). Finite-element transient analysis of induction motors under mixed eccentricity fault. *Transactions on Magnetics*, 44(1): 66–74.

Fang, G., Yuan, W., Yan, Z., Sun, Y. ve Tang, Y. (2019). Thermal management integrated with three-dimensional heat pipes for air-cooled permanent magnet synchronous motor. *Applied Thermal Engineering*, 152: 594–604.

Fröb, J. (2014). Advanced cooling of electric machine in a hybrid vehicle application. *Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, Göteborg, Sweden, pp 156.*

Fujita, H., Itoh, A., ve Urano, T. (2019). Newly developed motor cooling method using refrigerant. *World Electric Vehicle Journal*, 10(38): 1-10.

Gouws, R. ve van Jaarsveldt, H. (2012). Thermal and efficiency analysis of a single phase induction motor with peltier devices. *World Journal of Engineering*, 9(1): 63–70.

Gundabattini, E., Kuppan, R., Solomon, D.G., Kalam, A., Kothari, D. ve Bakar, R.A. (2021). A Review on Methods of Finding Losses and Cooling Methods to Increase Efficiency of Electric Machines. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1): 497–505.

Guo, F. ve Zhang, C. (2019). Oil-Cooling Method of the Permanent Magnet. *Energies*, 12(15): 1–11.

Gürgöze, F. (2009). Üç Fazlı Asenkron Motorlarda Sıcaklık Dağılımının Çıkarılarak Tasarım Optimizasyonunun Yapılması. *Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 170 s.*

- Gürgöze, F. ve Mergen, A.F. (2010). Üç fazlı asenkron motorlarda sıcaklık dağılımının çıkartılarak tasarım optimizasyonunun yapılması. *İTÜ D Mühendislik*, c.9(1): 36–44.
- İmre, M. (2019). Asenkron Motorlarda Sargı Yapısının Motor Performansına Etkisinin Deneyisel Olarak İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya*, 99 s.
- International Energy Agency (IEA) (2021). *World Energy Outlook 2021*, France.
- International Energy Agency (IEA) (2022). *World Energy Outlook 2022*, France.
- Incorpera, F., Dewitt, D.P., Bergman, T. L. ve Lavine, A.S. (2006). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th Edition, John Wiley & Sons Inc., Jefferson City/USA, pp 1048.
- Jebahi, R., Aloui, H. ve Ayadi, M. (2017). One-dimensional lumped-circuit for transient thermal study of an induction electric motor. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 7(4): 1714–1724.
- Kartal, M.Y. (2018). 3 Faz Asenkron Motor Verimlilik ve Yenileme Karlılık Analizi. *Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı, Muğla*, 107 s.
- Kaya, H., Uluer, O., Kocaoğlu, E. ve Kirmaci, V. (2019). Experimental analysis of cooling and heating performance of serial and parallel connected counter-flow Ranque–Hilsch vortex tube systems using carbon dioxide as a working fluid. *International Journal of Refrigeration*, 106: 297–307.
- Kınagu, H.M. (2015). Yüksek Enerji Ayırıştırma Etkisine Sahip Karşıt Akışlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüpü Tasarımı Geliştirilmesi ve Bilgisayar Destekli Optimizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa*, 136 s.
- Kırmacı, V. (2017). Karşıt akışlı Ranque-Hilsch vorteks tüplerde farklı uzunluk çapa oranındaki soğutma-ısıtma sıcaklık performanslarının deneysel olarak incelenmesi. *Cumhuriyet Science Journal*, 38(4): 813–821.
- Kırmacı, V. (2020). Paralel bağlı karşıt akışlı Ranque-Hilsch vorteks tüp sisteminde farklı çalışma akışkanı ve nozul malzemesi kullanımının performansa etkisinin deneysel incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8: 1204–1215.
- Kulkarni, P. ve Basavaraddi, S.R. (2016). Design optimization of electric motor frame and its study for thermal, dynamic and modal stability. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 03(05): 2915–2923.
- Li, D., Wen, Y., Li, W., Feng, B. ve Cao, J. (2018). Three-dimensional temperature field calculation and analysis of an axial-radial flux-type permanent magnet

- synchronous motor. *Energies*, 11, 1208.
- Liu, X., Shi, Y., Chu, J., Xue, S., Zhao, Q., Wu, X. ve He, M. (2021). A new phase-change cooling method for the frequent start-stop electric motor. *Applied Thermal Engineering*, 198,(117504): 1-9.
- McCluskey, F.P., Saadon, Y., Yao, Z. ve Camacho, A. (2019). Cooling for electric aircraft motors. *18th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, pp 1134–1139.
- Nollau, A. ve Gerling, D. (2013). A new cooling approach for traction motors in hybrid drives. *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, pp 456–461.
- Okoro, O.I. (2004). Thermal analysis of squirrel-cage induction machine. *European Power Electronics and Drives Journal*, 14(4): 31–36.
- Rajapakshe, P.C. (2014). Heat Storage Application In Electric Motor Cooling System Smoke Ventilation Motors. *Master Thesis, University of Gable Faculty of Engineering and Sustainable Development, Energy Engineering, Gable*, pp 105.
- Rouhani, H., Faiz, J. ve Lucas, C. (2007). Lumped thermal model for switched reluctance motor applied to mechanical design optimization. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(5–6): 625–638.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. Elektrik Motorlarının ve Değişken Hız Sürücülerinin Çevreye Duyarlı Tasarım Gerekliliklerine Dair Tebliğ. *T.C. Resmî Gazete*, 31468, 28 Nisan 2021.
- Santiago, F.E.P. (2017). Study of The Thermal Behavior of A Three-Phase Induction Motor Under Fault Conditions. *Master of Science Thesis, Universidade Da Beira Interior, Covilha*, pp 86.
- Sauer, I.L., Tatizawa, H., Salotti, F.A.M. ve Mercedes, S.S. (2015). A comparative assessment of Brazilian electric motors performance with minimum efficiency standards. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41: 308–318.
- International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)*, (1991). Standart: IEC 34-6 Rotating Electrical Machines - Part 6: Methods of Coolin Grotating Machinery.
- International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)*, (2014). Standart IEC 60034-30-1. Rotating electrical machines Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors.
- Sun, Y., Zhang, S., Yuan, W., Tang, Y., Li, J. ve Tang, K. (2019). Applicability study of the potting material based thermal management strategy for permanent magnet synchronous motors. *Applied Thermal Engineering*, 149: 1370–1378.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2015). Elektrik Motorlarında Enerji Verimliliği.

- Verimlilik Genel Müdürlüğü, Ankara, 40 s.*
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2016). *İmalat Sanayisinde Kullanılan Elektrik Motorları Envanteri Analiz Raporu*, Ankara, 88 s.
- Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. Genel Müdürlüğü TEDAŞ (2021). *2020 Yılı Türkiye Elektrik Dağıtım Sektör Raporu. Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara, 27 s.*
- Tong, W. (2014). *Mechanical Design of Electric Motors*. CRC Press Taylor & Francis Group, Radford, Virginia, pp 737.
- Top, H. N. (2017). Asenkron Motorun Isıl Modellemesi ve Hava Aralığındaki Akışın Isınma Üzerine Etkisinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 87 s.*
- Türk Standartları Enstitüsü (TSE) (2012). *TS EN 60034-1 Döner Elektrik Makineleri- Bölüm 1: Beyan Karakteristikleri ve Çalışma Karakteristikleri*, Ankara.
- URL (2023). *Alternatif Akım Elektrik Motoru*, <https://elektrikinfo.com/asenkron-motorun-parcalari/>, (02.03.2023).
- MEB (2011). *Rotoru Sincap Kafesli Asenkron Bir Elektrik Motorunun Temel Yapısı*, Milli Eğitim Bakanlığı, http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Kuvvet%20Tesislerinde%20Motor%20Ve%20C5%9Ealter%20Ba%C4%9Flant%C4%B1lar%C4%B1.pdf, (02.03.2023).
- Wang, X., Li, B., Huang, K., Yan, Y., Stone, I. ve Worrall, S. (2022). Experimental investigation on end winding thermal management with oil spray in electric vehicles. *Case Studies in Thermal Engineering*, 35(102082): 1-10.
- Zhou, K. (2015). Computationally-Efficient Finite-Element-Based Thermal and Electromagnetic Models of Electric. *Doctoral Thesis, University of Michigan Electrical Engineering: Systems, Michigan, pp 141.*
- Zhu, G., Zhu, Y., Tong, W., Han, X. ve Zhu, J. (2018). Double-circulatory thermal analyses of a water-cooled permanent magnet motor based on a modified model. *IEEE Transactions On Magnetics*, 54(3): 1-4.
- Zöhra, B. ve Akar, M. (2019). Türkiye’de verimli elektrik motorlarına geçiş süreci ve şebeke kalkışlı sabit mıknatıslı senkron motorlar. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 3(2): 236-242.

