

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ÜÇ FAZ ASENKRON MOTORLARDA SOĞUTMA YÖNTEMİNİN ISIL
BAŞARIMA ETKİLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
TESPİTİNE KATKILAR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan KAYA

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2026

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ÜÇ FAZ ASENKRON MOTORLARDA SOĞUTMA YÖNTEMİNİN ISIL
BAŞARIMA ETKİLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
TESPİTİNE KATKILAR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hasan KAYA
(504171063)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ

ŞUBAT 2026

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**CONTRIBUTIONS TO THE DETERMINATION OF THE EFFECTS OF
COOLING METHODS ON THE THERMAL PERFORMANCE OF THREE-
PHASE INDUCTION MOTORS USING FINITE ELEMENT METHOD**



M.Sc. THESIS

**Hasan KAYA
(504171063)**

Department of Electrical Engineering

Electrical Engineering Programme

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ

FEBRUARY 2026

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504171063 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hasan KAYA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÜÇ FAZ ASENKRON MOTORLARDA SOĞUTMA YÖNTEMİNİN ISIL BAŞARIMA ETKİLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE TESPİTİNE KATKILAR” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ İstanbul Teknik Üniversitesi	
Jüri Üyeleri :	Doç. Dr. Mehmet Onur GÜLBAHÇE İstanbul Teknik Üniversitesi	
	Prof. Dr. İbrahim ŞENOL Yıldız Teknik Üniversitesi	

Teslim Tarihi : 02 Ocak 2026
Savunma Tarihi : 03 Şubat 2026





Eşime ve aileme,



ÖNSÖZ

Lisans hayatım boyunca kendisinden çok şey öğrendiğim, yüksek lisans eğitim süresince de hiçbir zaman bilgisini ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ'a,

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince kendilerinden ders aldığım ve çok şey öğrendiğim İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine,

Altı senedir beraber çalıştığım WAT Motor Sanayi ve Ticaret A.Ş.'deki değerli ekip liderlerim Barış Tuğrul ERTUĞRUL, Erdem COŞKUN ve Evren SOYDAN'a,

WAT Motor Sanayi ve Ticaret A.Ş.'de her zaman destek olan değerli Ar-Ge ekip arkadaşlarım Erdiç YENİGÜL, İpek DÖKÜMCÜ ULU, Abdullah POLAT, Mert AKÇOMAK, Rafi SEZER ve Gökhan GENÇER'e,

Prototipleme ve testler konusunda destek olan Ar-Ge laboratuvar ekip arkadaşlarım Gökser GÖKTÜRK, Erhan KARA, Serdar VURAL ve Sinan IŞIK'a,

WAT Motor Sanayi ve Ticaret A.Ş.'de aynı ekipte olmasam bile her zaman desteğini hissettiğim Serhat GÜNERİ ve İlber Kaan ÜMİT'e,

İş dışında ve işte her zaman bana destek olan manevi abim Resul BALTA'ya,

Bugüne kadar maddi ve manevi yanımda olan eniştem Cem GERÇEK, ablam Demet KAYA GERÇEK, yeğenim Kıvanç GERÇEK, annem Nebiye KAYA ve babam Hüseyin KAYA'ya,

Bu yolculukta her zaman beni destekleyen ve yanımda olan canım eşim Tuğba KAYA'ya sonsuz teşekkürler.

Şubat 2026

Hasan KAYA
Elektrik Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Özeti	3
2. GENEL BİLGİLER.....	9
2.1 Üç Fazlı Asenkron Motor.....	9
2.1.1 Konstrüksiyon	9
2.1.2 Çalışma prensibi.....	10
2.1.3 Eşdeğer devre	10
2.1.4 Kayıplar ve verim.....	12
2.2 .Çalışma Biçimleri.....	14
2.3 Soğutma Biçimleri.....	15
2.4 Isı Transfer Methodları.....	15
2.4.1 İletim	15
2.4.2 Konveksiyon	16
2.4.3 Radyasyon	16
2.5 Isıl Model ve Isıl Eşdeğer Devre.....	17
2.5.1 Tek düğümlü toplu parametrelili ısı model	19
2.5.2 Çok düğümlü toplu parametrelili ısı model	19
2.5.3 Dağıtılmış parametrelili ısı model.....	20
2.5.4 Deneysel ısı model	20
2.5.5 Elektro-termal (Hibrit) ısı model	20
2.6 Sonlu Elemanlar Analizi	21
2.7 Standartlar	22
3. REFERANS MOTOR MODELİ ve İNCELENMESİ.....	23
3.1 Referans Motorun 2D Geometrisinin Oluşturulması	24
3.2 Sargı Parametrelerinin Oluşturulması	25
3.3 Elektromanyetik Model Malzeme Veri Girişi.....	27
3.4 Isıl Mekanik Modelin Kurulması	28
3.5 Isıl Model Malzeme Veri Girişi	30
3.6 Referans Model Sonlu Elemanlar Analizi.....	30
3.7 Laboratuvar Test Sonuçları ve SEA Test Sonuçları Karşılaştırma	38
4. SOĞUTMA SENARYOLARI	41
4.1 TENV Çalışma	41
4.1.1 2,2kW sabit güç altında.....	42
4.1.2 Sabit sıcaklık artışı altında	43

4.2 TEAO Çalışma	43
4.2.1 9 m/s hızla hava geçirilerek sabit güç altında	44
4.2.2 30 m/s hızla hava geçirilerek sabit güç altında	44
4.2.3 Cebri fan katalog verisiyle sabit güç altında	44
4.2.4 30 m/s hızla hava geçirilerek sabit sıcaklık artışı altında.....	45
4.2.5 Cebri fan katalog verisiyle sabit sıcaklık artışı altında	45
4.3 Sıvı Soğutma Çalışma	45
4.3.1 Sıvı soğutma 2,2kW sabit güç altında	46
4.3.2 Sıvı soğutma sabit sıcaklık artışı altında	46
5. SINIR KOŞULLARI ALTINDA SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	47
5.1 Sabit Güç Altında Analiz.....	47
5.1.1 TENV sabit güç ısı analiz	47
5.1.2 TEAO 9 m/s hızla sabit güç ısı analiz.....	49
5.1.3 TEAO 30 m/s hızla sabit güç ısı analiz.....	50
5.1.4 TEAO cebri fan sabit güç ısı analiz	51
5.1.5 Su soğutma sabit güç ısı analiz	52
5.1.6 Tüm soğutma tiplerinin sabit güç altında performans verileri	52
5.2 Sabit Güç Altında Sonuçların Yorumlanması	54
5.3 Sabit Sıcaklık Artışı Altında Analiz	54
5.3.1 TENV sabit sıcaklık artışı ısı analiz.....	55
5.3.2 TEAO 30 m/s hızla sabit sıcaklık artışı ısı analiz	56
5.3.3 TEAO cebri fan sabit sıcaklık artışı ısı analiz.....	57
5.3.4 Su soğutma sabit sıcaklık artışı ısı analiz.....	58
5.3.5 Tüm soğutma tiplerinin sabit sıcaklık artışı altında performans verileri ..	58
5.4 Sabit Sıcaklık Artışı Altında Sonuçların Yorumlanması.....	60
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	69

KISALTMALAR

2D	: İki Boyutlu
3D	: Üç Boyutlu
TEFC	: Totally Enclosed Fan Cooled
TENV	: Totally Enclosed Non Ventilated
TEAO	: Totally Enclosed Air Over
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
FEA	: Finite Element Analysis
IEC	: International Electromechanical Commission
NEMA	: National Electrical Manufacturers Association
EU	: European Union
CFD	: Computational Fluid Dynamics
VPI	: Vacuum Pressure Impregnation
PDIV	: Partial Discharge Inspection Voltage
PWM	: Pulse Width Modulation
IVIC	: Impulse Voltage Insulation Class



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : 500V çıkışlı sürücüye göre IVIC sınıfları IEC 60034-18-41 [31].	7
Çizelge 2.1 : Eşdeğer devre elemanları.	11
Çizelge 2.2 : Demir kayıpları elemanları.....	13
Çizelge 2.3 : Çalışma rejimleri IEC 60034-1.	14
Çizelge 2.4 : Elektrik ve ısı devre benzetimler.....	18
Çizelge 2.5 : Sonlu elemanlar adımları.....	21
Çizelge 2.6 : İlgili standartlar.	22
Çizelge 3.1 : Referans motor temel veri seti.....	23
Çizelge 3.2 : Referans TEFC motor SEA ve deney sonuç karşılaştırma.....	39
Çizelge 4.1 : Cebri fan akış hızı katalog datası [42].....	45
Çizelge 4.2 : Su akışkan verileri.	45
Çizelge 5.1 : Sabit güç altında farklı soğutma tiplerinin SEA performans sonuçları.....	53
Çizelge 5.2 : Sabit sıcaklık artışı altında farklı soğutma tiplerinin SEA performans sonuçları.	59



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : EU 2019/1781 regülasyonuna göre verim sınıfı zorunluluğu durumu [3].	1
Şekil 1.2 : Orijinal AC Tesla motoru British Science Museum [10].	3
Şekil 1.3 : Yalıtım katmanları üç faz asenkron motoru [13].	4
Şekil 1.4 : Yalıtım sınıfları [17].	5
Şekil 1.5 : Zorlanmış soğutma cebri pervane [24].	6
Şekil 1.6 : Sıvı soğutmalı motor örneği [32].	7
Şekil 2.1 : Motor alt parçaları [17].	9
Şekil 2.2 : Üç fazlı asenkron motorun eşdeğer devresi [18].	11
Şekil 2.3 : Statora indirgenmiş T eşdeğer devre [18].	11
Şekil 2.4 : Sankey diyagram ile kayıp akışı [18].	12
Şekil 2.5 : S1, S3 ve S6 rejim çalışma grafikleri [8].	14
Şekil 2.6 : Soğutma tipleri IC isimlendirme [20].	15
Şekil 2.7 : Üç fazlı asenkron motorun tek düğümlü toplu parametrelili eşdeğer devresi [38].	19
Şekil 2.8 : Üç fazlı asenkron motorun çok düğümlü toplu parametrelili eşdeğer devresi [39].	20
Şekil 3.1 : Radyal geometri Ansys Motor-CAD.	24
Şekil 3.2 : Eksenel geometri Ansys Motor-CAD.	25
Şekil 3.3 : Sargı parametreleri.	25
Şekil 3.4 : 24 oluk 3 faz 2 kutup sarım şeması.	26
Şekil 3.5 : Stator oluk içerisinde bakır tel konumları.	27
Şekil 3.6 : Elektromanyetik model malzeme verileri.	28
Şekil 3.7 : Referans motor B-H eğrisi.	28
Şekil 3.8 : Radyal ısı mekanik model.	29
Şekil 3.9 : Eksenel ısı mekanik model.	29
Şekil 3.10 : Referans ticari motor 3D model.	30
Şekil 3.11 : Isıl model malzeme verileri.	30
Şekil 3.12 : Referans model sonlu elemanlar yöntemi ağ yapısı.	31
Şekil 3.13 : Manyetik akı yoğunlukları.	32
Şekil 3.14 : Akım-zaman grafiği referans model 2D SEA.	33
Şekil 3.15 : Tork-hız grafiği referans model 2D SEA.	34
Şekil 3.16 : Verim-hız grafiği referans model 2D SEA.	35
Şekil 3.17 : Radyal sıcaklık artış haritası TEFC referans.	36
Şekil 3.18 : Eksenel sıcaklık artış haritası TEFC referans.	36
Şekil 3.19 : Çok düğümlü toplu parametrelili ısı eşdeğer devre TEFC referans.	37
Şekil 3.20 : Referans ticari motor IEC 60034-2-1 metod 2-1-2b laboratuvar test düzeneği.	38
Şekil 3.21 : Referans model doğrulama metodu.	39
Şekil 4.1 : TENV çalışma modeli [40].	41
Şekil 4.2 : TENV çalışma modeli eksenel model.	42
Şekil 4.3 : TEAO çalışma modeli açık ortam soğutma [40].	43
Şekil 4.4 : TEAO çalışma modeli cebri pervane soğutma [41].	43

Şekil 5.1 : Radyal sıcaklık artış haritası TENV 2100 W.	48
Şekil 5.2 : Eksenel sıcaklık artış haritası TENV 2100 W.	48
Şekil 5.3 : Radyal sıcaklık artış haritası 9 m/s TEAO 2200 W.	49
Şekil 5.4 : Eksenel sıcaklık artış haritası 9 m/s TEAO 2200 W.	49
Şekil 5.5 : Radyal sıcaklık artış haritası 30 m/s TEAO 2200 W.	50
Şekil 5.6 : Eksenel sıcaklık artış haritası 30 m/s TEAO 2200 W.	50
Şekil 5.7 : Radyal sıcaklık artış haritası TEAO cebri fan 2200 W.	51
Şekil 5.8 : Eksenel sıcaklık artış haritası TEAO cebri fan 2200 W.	51
Şekil 5.9 : Radyal sıcaklık artış haritası su soğutma 2200 W.	52
Şekil 5.10 : Eksenel sıcaklık artış haritası su soğutma 2200 W.	52
Şekil 5.11 : Radyal sıcaklık artış haritası TENV 1200 W.	55
Şekil 5.12 : Eksenel sıcaklık artış haritası TENV 1200 W.	55
Şekil 5.13 : Radyal sıcaklık artış haritası TEAO 30 m/s 2625 W.	56
Şekil 5.14 : Eksenel sıcaklık artış haritası TEAO 30 m/s 2625 W.	56
Şekil 5.15 : Radyal sıcaklık artış haritası TEAO cebri fan 2850 W.	57
Şekil 5.16 : Eksenel sıcaklık artış haritası TEAO cebri fan 2850 W.	57
Şekil 5.17 : Radyal sıcaklık artış haritası su soğutma 2950 W.	58
Şekil 5.18 : Eksenel sıcaklık artış haritası su soğutma 2950 W.	58

ÜÇ FAZ ASENKRON MOTORLARDA SOĞUTMA YÖNTEMİNİN ISIL BAŞARIMA ETKİLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE TESPİTİNE KATKILAR

ÖZET

Üç faz asenkron motorlar endüstride birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu uygulamalar havalandırma, kompresör, pompa, hidrolik, asansör, yenilenebilir enerji vb. şeklinde görülmektedir. Üç fazlı asenkron motorların performansını ve güvenilirliğini sürekli çalışma altında belirleyici etkilerden birisi de soğutma yöntemleri olarak görülmektedir. Motor çalışması sırasında ortaya çıkan kayıplar nedeniyle ısı oluşturulmakta ve bu ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılamaması durumunda motor üzerinde sıcaklık artışı olarak gözlemlenmektedir. Özellikle motor sargılarında oluşan sıcaklık artışı ile motor yalıtımı ve ömrü olumsuz bir şekilde etkileneceği öngörülmektedir. Rulman ömrü zamanla bu sıcaklık artışları tarafından azaltılmakta ve genişlemeyle beraber eksenel kaçıklıklara neden olabilmektedir. İlave olarak motor sıcaklık artışı ile stator ve rotor kayıpları artırılmakta ve motor veriminde de negatif sonuçlara neden olunabilmektedir.

Günümüzde artan enerji verimliliği gereksinimleri, regülasyonlar, maliyet baskıları ve kompakt motor tasarımlarına yönelik eğilim nedeniyle motorlarda daha yüksek güç yoğunluklarında çalışmanın zorunlu hale geldiği görülmüştür. Bu durum motorlarda oluşan ısı yüklemenin artmasına ve geleneksel soğutma yaklaşımlarının yeterliliği sorgulanmıştır. Dolayısıyla farklı soğutma yöntemlerinin motorun ısı davranışı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi tasarım ve uygulama aşamaları açısından önemli bir gereklilik haline geldiği bilinmektedir.

Bu tez çalışmasında asenkron motorlarda kullanılan farklı soğutma yöntemlerinin ısı performans, motor kayıpları ve motorun anma değerleri üzerindeki etkileri sonlu elemanlar yöntemi tabanlı hesaplama ve analizlerle sistematik bir yaklaşımla ele alınmıştır. Bu çalışma kapsamında TEFC (totally enclosed fan cooled), TENV (totally enclosed non-ventilated), TEAO (totally enclosed air over) ve sıvı soğutma şeklinde dört temel soğutma biçimi ele alınmıştır. TEAO çalışma kendi içinde iki farklı türde ele alınmıştır. İlk olarak belirli bir hava üfleme hızı olan bir ortamda iki farklı hız seçeneğinde inceleme yapılmıştır. İkinci olarak ise ticari uygulamalarda daha çok tercih edilen cebri (zorlanmış) fan ve pervane muhafazalı model ele alınmıştır. Her bir soğutma senaryosu için iki farklı sınır koşulunda çalışma gerçekleştirilmiştir. Sınır koşulları iki farklı durum şeklinde, sabit güç altında ve sabit sıcaklık artışı altında olarak belirlenmiştir. Bu sınır koşulları sonucunda anma değerleri, kayıplar, sıcaklık dağılımları, maksimum sıcaklıklar ve yüklenebilirlik parametreleri incelenmiştir.

Çalışmaya başlamadan önce kayıplar, çalışma biçimleri, soğutma biçimleri, ısı aktarım yolları, ısı model ve ısı eşdeğer devre konularında kapsamlı literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda motor içindeki ısının yayılımı, malzeme içi ısı iletimi, motor yüzeylerinden gerçekleşen doğal ve zorlanmış konveksiyon

değerlendirilmiştir. Özellikle soğutma metotlarının ısı aktarım metotlarıyla eş zamanlı yorumlanması ile sonlu elemanlar analizinde kolaylık sağlanmıştır.

Sayısal analizler sonlu elemanlar yöntemi tabanlı bir analiz yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ilk etapta 2,2 kW 2 kutup 50 Hz TEFC soğutma sistemine sahip ticari bir model referans motor olarak kabul edilmiştir. Referans model Ansys Motor-CAD yardımıyla motorun ısı ve elektromanyetik modelleri oluşturulmuştur. Buna göre radyal ve eksenel bileşenleri oluşturan stator, rotor, sargı, gövde ve diğer mekanik aksamı ayrıntılı bir şekilde tanımlanmıştır. İlave olarak tüm bu parçaların malzeme bilgileri girilmiştir. Elektromanyetik modülde elde edilen kayıplar ısı modülde ısı kaynağı olarak kullanılmıştır. Isıl modülde elde edilen sıcaklıklar da elektromanyetik modülde kayıp olarak kabul edilmiştir. Bu çalışma sonuçlar birbirine yakınsayana kadar devam edilmiştir. Isıl modelde doğal konveksiyon ve kendinden fanla soğutma parametresi aktif hale getirilmiştir. Daha sonrasında referans modelin laboratuvar koşullarında IEC 60034-2-1 metot 2-1-2b'ye göre performans deneyi ve ısınma deneyi gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar testi sonucunda kayıplar, sıcaklık artışı ve verim verileri elde edilmiştir. Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) sonuçları ve IEC laboratuvarında elde edilen deneysel sonuçlarından motor başarımında anma parametreleri, sıcaklık artışı ve kayıplar açısından çok benzer olduğu sonucuna varılmıştır. Bu şekilde TEFC çalışmada güvenilir bir elektromanyetik ve ısı model oluşturulmuştur. Bu çalışmada ısı model olarak çok düğümlü toplu parametrelili ısı model ile hibrit (ısı-elektromanyetik) model eş zamanlı olarak kullanılmıştır. İlave olarak deney sonuçları ile çok daha güvenilir olmasına katkı sağlanmıştır.

Isıl SEA TENV çalışma ile devam ettirilmiştir. TENV çalışmada herhangi bir soğutma etkisi olmadığı için sadece doğal konveksiyon metodu referans yazılımda uygulanmıştır. Isıl ve elektromanyetik tarafta sonuçlar yakınsayana kadar SEA devam ettirilmiştir. Buna göre TENV çalışmanın sabit güç altında referans güçte yalıtım ısı limitleri altında tam yükünde yüklenemediği gözlemlenmiştir. TEFC koşulun sıcaklık artışı olan değerde ise modelin referans değerden %50'den az yüklenemediği gözlemlenmiştir.

Isıl SEA TEAO çalışma dışarıdan hava üfleterek soğutma ve cebri fan soğutma ile gerçekleştirilmiştir. TEAO dışarıdan hava üfleme koşulunda iki farklı hız değerinde SEA gerçekleştirilmiştir. Cebri fan simülasyon durumunda ise Ansys Motor-CAD'de doğrudan böyle bir modül olmaması nedeniyle motor TEFC şeklinde geometrik olarak tasarlanıp sabit hava akışı altında SEA gerçekleştirilmiştir. TEAO çalışma sabit güç altında incelendiğinde, ısı ve performans açısından en verimli modelin cebri fanlı model olduğu gözlemlenmiştir. Dışarıdan hava üflemeli senaryoda motor gövde kanatlarının etkin kullanılamaması nedeniyle soğutmada verimsizlik gözlemlenmiştir. İlave olarak dışarıdan hava üflemeli senaryoda rotor kısmının yeterli soğumaması nedeniyle rotor kayıplarında artış ve devirde düşüş gözlemlenmiştir. TEAO cebri fan senaryosunda ise TEFC ile benzer davranışta fakat daha yüksek bir soğutma performansı stator ve rotor kayıplarına yansıdığı gözlemlenmiştir. TEAO cebri fan senaryosu 30 m/s dışarıdan hava akışlı senaryoya göre daha sıcak olmasına rağmen etkili rotor soğutması nedeniyle daha verimli olarak gözlemlenmiştir. Sabit sıcaklık artışı sınır koşulu altında incelendiğinde ise cebri fanlı TEAO çalışma modeli referans modelden %29,5 daha fazla yüklenebilir olarak gözlemlenmiştir.

Son senaryo olan sıvı soğutma senaryosu motor gövdesine eksenel su ceketleri eklenerek SEA gerçekleştirilmiştir. Su ceketli tasarımda akışkan olarak su seçilmiştir.

İlave olarak su ceketli mekanik tasarımı on altı kanal ile Ansys-Motor-CAD'de tasarlanmıştır. Sabit güç SEA altında su ceketli tasarım ısı olarak en soğuk sargı sıcaklığına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kendisine ısı olarak en yakın performans olan TEAO cebri fanlı senaryoya göre daha düşük sıcaklık artışına sahip olmasına rağmen verim olarak aynı seviyede kaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin ise su soğutmanın gövde üzerinde çok etkin soğutma sağlamasına rağmen rotor soğutmasının yetersiz kalması olarak görülmektedir. Su soğutma senaryosu daha düşük sargı sıcaklık artışı olmasına rağmen TEFC çalışmayla aynı rotor kaybına sahip olduğu raporlanmıştır. Son olarak ısı limitleri altında su ceketli tasarım üzerinde SEA gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak TEFC çalışmaya göre %34 daha fazla yüklenebildiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada temel anlamda üç fazlı asenkron motorda farklı soğutma türlerinin motorun anma değerlerine, kayıplarına, verimine, sıcaklık artışına ve sıcaklık dağılımına yönelik sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre TENV, TEAO cebri fan çalışma ve TEFC modellerinde motor üzerinde homojen bir ısı dağılımı elde edilmiştir. Bunun aksine TEAO hava üfleme koşulu ve su soğutma senaryolarında rotor ve gövde arasında ciddi sıcaklık farkları olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışma sonuçlarına göre TENV çalışmada sabit sıcaklık artışı sınır koşulunda soğutma kaynağı eksikliği nedeniyle motorda bir alt gövde büyüklüğünün gücü sağlanabilmiştir. Sıvı soğutma ve TEAO zorlanmış soğutma durumlarının motor stator dış çap kısıtı altında kompaktlık sağladığı ve neredeyse bir üst gövde büyüklüğünün gücüne eriştiği gözlemlenmiştir. Bu tarz soğutma şekillerinin özellikle düşük hızlarda değişken hızlı sürücüyle çalışmada yetersiz soğutmaya fayda sağlayabileceği konusunda kuvvetli destek verisi olarak elde edilmiştir. TEAO ve sıvı soğutmalı modellerdeki sabit soğutma etkisi ihtiyaca ve soğutma şiddetine göre tasarlanabilir olduğu tespit edilmiştir. Sürücüyle çalışmada motor yalıtımındaki tepeden-tepeye zorlanmaları ilave olarak dikkate alınması da soğutma etkisi kadar önemli olduğu ve yalıtım ömrünü uzatacağı öngörülmüştür.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında üç fazlı asenkron motorlarda kullanılan farklı soğutma yöntemleri ve ısı aktarım mekanizmalarının motor ısı performansları üzerindeki etkileri bütüncül bir yaklaşımla incelenmektedir. Elde edilen bulgular motor tasarımcıları ve uygulayıcılar için uygun soğutma yönteminin motor verimi, işletme güvenilirliği ve servis ömrü üzerindeki belirleyici rolü açıkça ortaya konulmaktadır. Ticari uygulamalarda geleneksel asenkron motor tiplerinin sadece soğutma şekli ve soğutucuya bağlı hız ve debi gibi ikincil değişkenler değiştirilerek farklı güçlerde çalışmasının sağlanabileceğine ve farklı endüstriyel uygulamalarda farklı kısıtlar altında kullanılabileceğine dair somut veriler elde edilmiştir. Ayrıca IEC standartlarına uygun deneysel yöntemlerle desteklenen bu çalışma sayısal ısı analizlerin motor tasarım ve doğrulama süreçlerinde etkin bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.



THE EFFECTS OF DIFFERENT COOLING METHODS ON THE THERMAL AND ELECTRICAL PERFORMANCE OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS

SUMMARY

Three-phase induction motors are used in many industrial applications. These applications include ventilation systems, compressors, pumps, hydraulic systems, elevators, and renewable energy systems. One of the determining factors affecting the performance, reliability, and continuous operation of three-phase induction motors is the cooling method. The losses that occur during motor operation cause heat generation. The inability to dissipate this heat effectively leads to temperature rise in the motor. The temperature increase negatively affects motor insulation and lifetime. In addition, this temperature increase over time reduces bearing lifetime and may cause axial misalignments due to thermal expansion. In addition, winding temperature rise leads to increased stator and rotor losses, and it results in negative effects on motor efficiency.

Currently, increasing energy efficiency requirements, regulations, cost considerations, and the tendency toward more compact motor designs have led motors to operate at higher power densities. This situation has resulted in increased thermal loading in motors. Questions regarding the adequacy of conventional cooling approaches have arisen. Therefore, the comparative investigation of the effects of different cooling methods on the thermal behavior of motors has become an important requirement and applies to both the design and application stages.

In this thesis, the effects of different cooling methods used in induction motors on thermal performance were examined using a systematic approach. Motor losses and rated motor values were also evaluated. Four main cooling methods were considered: TEFC, TENV, TEAO, and liquid cooling within the scope of this study. The TEAO operating condition was examined in two different forms. First, it was evaluated under two different air-blow conditions with a specified air velocity. Second, a forced fan and fan cover model that is more commonly preferred in commercial applications was considered. Analyses were performed under two different boundary conditions for each cooling scenario. These boundary conditions were defined as constant power operation and constant temperature rise operation. Rated values, losses, temperature distributions, maximum temperatures, and loadability parameters were investigated in these boundary conditions.

A comprehensive literature review was conducted on motor losses, working regimes, cooling methods, heat transfer methods, thermal models and thermal equivalent circuits at the beginning of the study. The simultaneous interpretation of cooling methods together with heat transfer mechanisms was performed. This enabled the effective implementation of the finite element software.

Numerical analyses were carried out using a finite element analysis based approach. A commercially available 2,2 kW, 2 pole, 50 Hz motor with a TEFC cooling system

was selected as the reference motor at the initial stage of the study. The thermal and electromagnetic models of the reference motor were developed within Ansys Motor-CAD. Stator, rotor, windings, housing, and other mechanical components were defined in detail as radially and axially. In addition, material properties of all these components were assigned. Losses obtained from the electromagnetic module were used as heat sources in the thermal module. Temperatures obtained in the thermal module were also transferred as inputs to the electromagnetic module. This iterative process was continued until convergence was achieved. Natural convection and self-ventilation cooling parameters were activated in the thermal model. Subsequently, performance tests and temperature rise tests of the reference motor were conducted under laboratory conditions in accordance with IEC 60034-2-1 method 2-1-2b. Losses, temperature rise, and efficiency data were obtained as a result of the laboratory test. It was concluded that the Finite Element Analysis (FEA) results and the IEC laboratory performance test results were in great harmony in terms of rated parameters, temperature rise, and losses. A reliable electromagnetic and thermal model was created for the TEFC operation. A multi-node lumped parameter thermal model and a hybrid (thermal and electromagnetic) model were used simultaneously as the thermal modeling approach in this study. In addition, the experimental results contributed to the reliability of the model.

Thermal FEA analyses were continued with the TENV operating condition. Since there was no active cooling in the TENV operation and only the natural convection was applied in the reference software, FEA was continued until convergence was achieved on both the thermal and electromagnetic models. It was observed that the TENV operation could not be loaded up to the rated power level within insulation thermal limits during constant power operation. Also, the model can be loaded up to less than 50% of the reference value under the constant temperature rise boundary condition.

TEAO FEA analyses were performed under external air-blow cooling and forced-fan cooling conditions. FEA was carried out at two different air velocity values in the external air-blow condition of TEAO. The motor was geometrically designed like a TEFC configuration and FEA was performed with a constant air flow due to lack of forced fan module in Ansys Motor-CAD. It was observed that the forced fan TEAO model was the most efficient model in terms of thermal and performance characteristics under constant power boundary conditions. Cooling inefficiency was observed due to the ineffective utilization of the motor housing fins in the external air-blow cooling scenario. An increase in rotor losses was observed due to insufficient cooling of the rotor region in the external air-blow scenario. A decrease in speed was also observed as a result of increased losses. A similar distribution but higher cooling performance compared to TEFC was reflected in stator and rotor losses in the forced fan TEAO scenario. Although the forced fan TEAO scenario was hotter even than the 30 m/s imaginary external air flow scenario, it was observed to be more efficient due to effective rotor cooling. It was observed that the forced fan TEAO operating model exhibited higher loadability compared to the reference model under constant temperature rise boundary condition.

Liquid cooling was analyzed by performing FEA with axial water jackets added to the motor housing in the last scenario. Pure water was selected as a fluid in the water jacket design. In addition, the mechanical design of the water jacket was created with sixteen channels using ANSYS Motor-CAD. The water jacket design exhibited the lowest stator winding temperature in terms of thermal performance under constant power

FEA conditions. Although it showed a lower temperature rise compared to the thermally closest forced fan TEAO scenario, it remained at the same efficiency level. Although water jacket design was highly effective on the motor housing, rotor region cooling appeared ineffective. So, the liquid cooling scenario resulted in a lower winding temperature rise but it exhibited the same rotor losses as the TEFC operation. Finally, FEA was performed on the water jacket design under constant temperature limit boundary conditions. As a result, it was observed that the loadability was 34% higher than that of the TEFC operation.

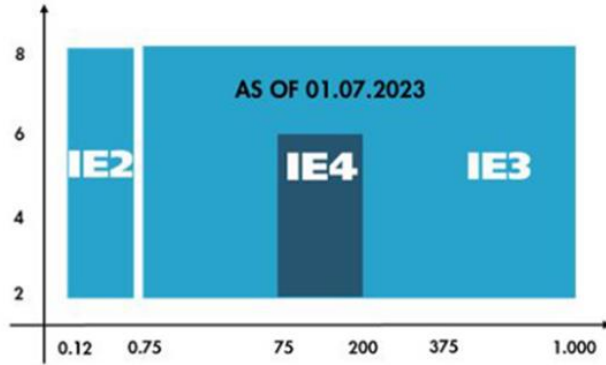
In this study, the results were obtained regarding the effects of different cooling types on the rated values, efficiency, temperature rise, and temperature distribution of three-phase induction motors. Accordingly, a homogeneous temperature distribution was achieved in the TENV, forced fan TEAO, and TEFC models. In contrast, significant temperature differences between the rotor and the housing were observed in the external air-blowing TEAO condition and the water jacket cooling scenario. The motor was able to deliver only the power of the next-lower-frame size due to the lack of a cooling source in the TENV operation under constant temperature rise constraint. Accordingly, it was observed that liquid cooling and forced TEAO cooling provided compactness under the constraint of the motor stator outer diameter. Water jacket and forced TEAO enabled operation at nearly the power level of the next higher frame size. TEAO and water jacket cooling methods could be beneficial in mitigating insufficient cooling in TEFC operation. Variable low-speed drive applications can be an example of such applications. The constant cooling effect in TEAO and water jacket models can be designed according to the required application needs and cooling effect. Considering peak-to-peak voltage stresses on motor insulation is as important as the cooling effect and it surely will contribute to extending insulation lifetime in variable speed applications.

In conclusion, this thesis study investigates the effects of different cooling methods and heat transfer mechanisms used in three-phase induction motors on motor thermal performance using a holistic approach with two different operational loading constraints. The obtained findings clearly demonstrate the decisive role of selecting an appropriate cooling method on motor efficiency, operational reliability, and service life for motor designers and practitioners. This study shows that numerical thermal analyses, supported by experimental methods in accordance with IEC standards can be effectively used. These analyses can be applied in motor design and validation processes.



1. GİRİŞ

Sürdürülebilirliğin çok önemli olduğu günümüzde enerji kaynaklarının kullanımına çok büyük önem arz verilmektedir. Düşük karbon emisyonu hedefleriyle birlikte Avrupa Birliği'nde çeşitli iyileştirme projeleri yürütülmektedir. Enerji verimliliği ile ilgili son regülasyon Eko-Tasarım EU 2019/1781 ile 2023'te yayınlanmıştır. Bu regülasyona göre 0,12 kW ile 0,75 kW arasındaki alternatif akım motorları IE2 (yüksek verimli) verim sınıfına sahip olunması zorunlu kılınmıştır. 0,75 kW dahil 75 kW'a kadar olan motorlar IE3 (premium verimli) verim sınıfında olması zorunlu tutulmuştur. 75 kW dahil 200 kW'a kadar olan motorlar da IE4 (süper premium verimli) verim sınıfına sahip olması zorunlu tutulmuştur [1]. EU 2019/1781 regülasyonuna göre verim sınıfı zorunluk durumu Şekil 1.1'de verilmiştir. Bunun da üzerinde IE5 verim sınıfı da taslak halinde IEC 60034-30-1:2014 standardında bahsedilmektedir. IE5 motorları IE4'e göre %20 daha az kayıpa sahip olarak tanımlanmaktadır [2].



Şekil 1.1 : EU 2019/1781 regülasyonuna göre verim sınıfı zorunluluğu durumu [3].

Bu hedeflerle beraber yüksek verimli motor topolojileri önem verilmektedir. Yüksek verimli motor üretimi konusunda kalıcı mıknatıslı senkron motorlara, senkron relüktans motorlara ve mıknatıs destekli senkron relüktans motorlara gelecek planları arasında büyük önem verilmektedir. Fakat bu motor topolojileri yüksek verimli olmasına rağmen yüksek işletme kurulum maliyetleri ve sürücüyü çalışma zorunluluğu nedeniyle sadece spesifik uygulamalarda kullanılmaktadır. İlave olarak

nadir mıknatısların tedarik zinciri zorluğu nedeniyle mıknatıslı motor topolojileri gelecekte bir kısıt görülmektedir. Senkron relüktans motorlarda düşük güç faktörleri nedeniyle tercih konusunda bir ikilem olarak görülmektedir [4]. Doğrudan şebekeden beslenebilmesi, daha ucuz ilk kurulum maliyeti ve kullanıcı dostu yapısı nedeniyle sanayide kurulu motor gücünün %80'i asenkron motorlar tarafından oluşturulmaktadır [5].

Motor topolojilerine ilave olarak yüksek verimli motorlar için daha düşük kayıplara verilen önem de artırılmaktadır. Üç fazlı asenkron motorlarda kayıplar temel anlamda stator kayıpları, rotor kayıpları, demir kayıpları, ek kayıplar, sürtünme ve vantilasyon kayıpları olarak tanımlanabilir. Giriş gücünden bu kayıpların toplamı çıkarıldığında çıkış gücü elde edilir. Motor verimi, çıkış gücünün giriş gücüne oranı şeklinde ifade edilmektedir. Kayıpların miktarı motor tasarımına, kutup sayısına, frekansa ve soğutma türüne bağlı olarak farklılık gösterdiği literatürde ortaya konulmaktadır [6]. Stator kayıplarının doğrudan motor akımının karesi ile faz dirençleri ile doğru orantılı olduğu bilinmektedir. Bu durum soğutma performansının faz dirençlerine olan etkisinden dolayı stator kayıplarında doğrudan etkili olduğu sonucuna varılmaktadır [7]. Motor sistemine doğrudan akupile soğutma methodlarında ventilasyon kayıpları dezavantaj olarak görülmektedir. Ventilasyon kayıplarını sıfıra indirmek için sıvı soğutma veya zorlanmış soğutma tipleri tercih edilebilmektedir.

1.1 Tezin Amacı

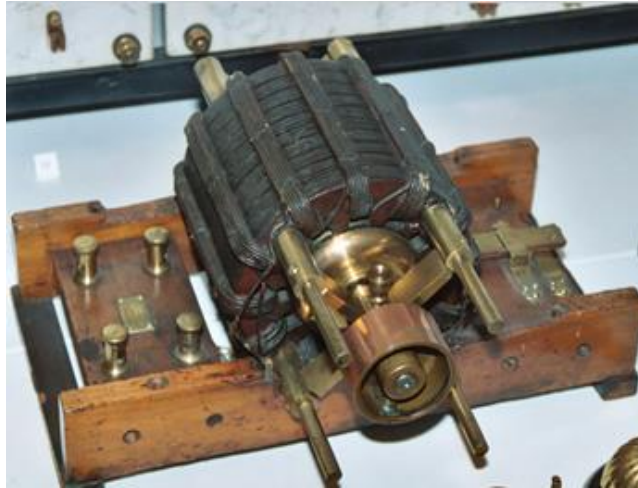
Bu çalışmada referans olarak ticari amaçla kullanılan 2,2 kW 50 Hz 2 kutup 90 gövde IE3 verim sınıfında tam kapalı ve fan soğutmalı (TEFC) bir elektrik motoru Ansys Motor-CAD yardımıyla elektromanyetik ve ısıl olarak modellenip sonlu elemanlar analiziyle analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar prototip olarak üretilen referans ticari motorun performans ve ısıl sonuçlarıyla kıyaslanacaktır. Elde edilen referans güvenilir modellerle beraber sabit güç altında üç farklı soğutma methodunda analizler Ansys Motor-CAD ile hem elektromanyetik hem ısıl olarak analiz edilecektir. Bu soğutma methodları TENV, TEAO ve sıvı soğutma ile analizler gerçekleştirilmiştir. Son olarak, ısı limit ve sabit güç altında farklı soğutma yöntemleri; ısıl performans, kayıplar, anma değerleri ve yüklenebilirlik açısından karşılaştırılmıştır. Literatürde tekil olarak farklı soğutma tipleriyle ilgili birçok çalışma olmasına rağmen farklı soğutma tiplerine ait karşılaştırmalı çalışmalar sınırlı olarak görülmektedir. Bu çalışmayla beraber ticari

referans bir motorda farklı soğutma tiplerinin ısı performans, ısı dağılım, kayıp, verim ve yüklenebilirlik anlamında karşılaştırılması ile literatürdeki boşluk doldurulmaya çalışılmıştır.

1.2 Literatür Özeti

Üç faz asenkron motorlar üzerinde akademik ve ticari olarak birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalar uygulamalara bağlı olarak performans iyileştirmeler ve çeşitli optimizasyonlar olarak ortaya konulmaktadır. Performans olarak değerlendirilirken anma gücü, anma akımı, anma torku, verim ve sıcaklık artışı gibi elektriksel ve ısı parametreleri ile tanımlanmaktadır. IEC 60034-1 standardına göre anma değerleri motorun belirli bir çalışma rejiminde güvenli ve sürekli çalışabileceği sınırlar olarak ifade edilmektedir [8].

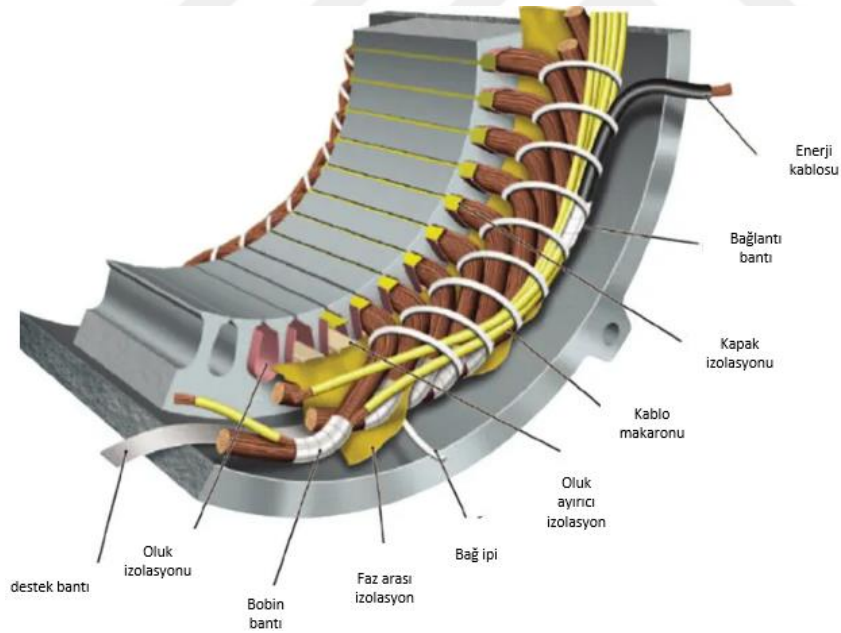
Üç fazlı asenkron motorlarının tarihçesi dönel manyetik alanın icadı ile başladığı görülmektedir [9]. Üç fazlı asenkron motorları manyetik alanın icadından günümüze doğru geldikçe tasarım, standartlaşma, güç elektroniği, vektör kontrol ve değişken hızlı sürücüler ile modern dönemde konumlandırılmıştır. Orijinal AC Tesla motoru görseli Şekil 1.2'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 1.2 : Orijinal AC Tesla motoru British Science Museum [10].

Üç fazlı asenkron motorlarının gelişiminde yalıtım malzemelerinin önemi çok büyük olduğu görülmektedir. Elektrik motorların yüklenebilirliğinde elektriksel ve mekanik limitler en önemli faktörler olarak görülse de, yalıtım malzemelerindeki teknolojik gelişmelerin optimal motor tasarımlarında büyük öneme sahip olduğu bilinmektedir. Motorların çalışabileceği maksimum sıcaklık, izolasyon sınıfları tarafından

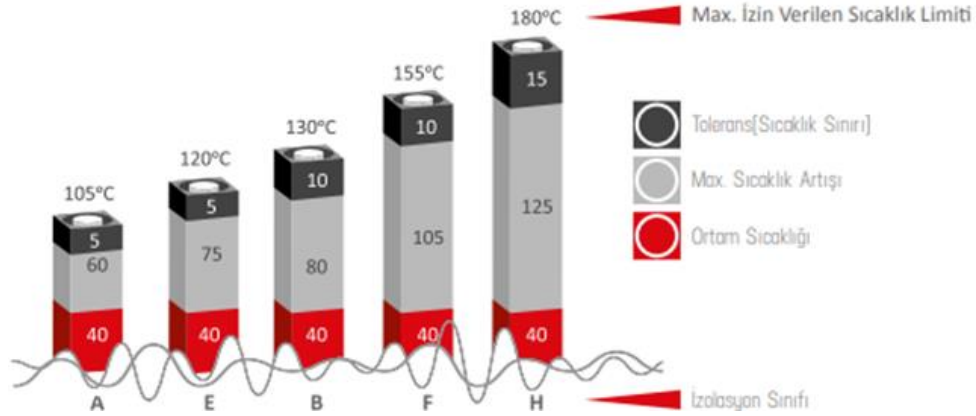
belirlenmektedir. Tarihte elektrik motorunda ilk yalıtım malzemeleri olarak pamuk, kâğıt, tekstil bantlar gibi doğal malzemeler kullanılmıştır [11]. Bunun devamında sentetik malzemeler, mika malzemeler, polimer filmler, polyester ve epoksi reçinler, lamine teknolojilerle beraber yalıtım teknolojisinin gelişimi günümüze kadar sürdürülmüştür [11]. İlave olarak motor verniğinde kullanılan basit epoksi reçinelerden sargı üzerinde en ufak hava kabarcığı bırakmayan vakumlu basınç emdirme (VPI) gibi yöntemler günümüze kadar geliştirilmiştir [11]. İzolasyon malzemeleri tek başına belirli sıcaklık dayanımlarına sahip olmakla birlikte, elektrik motorlarında yalıtım sınıfları bir bütün olarak sistem bazında değerlendirilir [12]. Sistem olarak oluk izolasyonları, faz arası yalıtımlar, vernik, bağ ipliği ve kablo bileşenlerinin bileşik etkisiyle yalıtım sınıfları belirlenmektedir. Örnek olarak B sınıfı bir yalıtım sınıfına sahip bir stator oluk yalıtkanını F sınıfı bir sistemde 200 C bir vernikle kullanımı mümkün kılınmaktadır. Burada stator oluk yalıtkanı vernik operasyonu ile beraber bir sistemin parçası olarak toplam yalıtım seviyesi de yukarıya çekilmektedir. Üç faz asenkron motordaki yalıtım tabakalaları Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3 : Yalıtım katmanları üç faz asenkron motoru [13].

IEC ve NEMA standartlarına göre yalıtım sınıfları A, E, B, F, H olarak sınıflandırılır [8,14] ve Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Endüstriyel motorlarda en sık F sınıfı 155 °C'ye uygun yalıtımlar kullanılmaktadır. F sınıfı yalıtım sınıfında 40 °C ortam sıcaklığında 10 °C güvenlik faktörüyle beraber 105 K sıcaklık artışına izin verilmektedir. Sargı sıcaklığındaki her 10 °C artışın yalıtım ömrünü yarıya azaltıldığı bilinmektedir.

Yalıtım seçimi yapılırken sürücü ile çalışma koşulu, mekanik titreşim, nem ve kimyasal ortam da değerlendirilmelidir [15, 16].



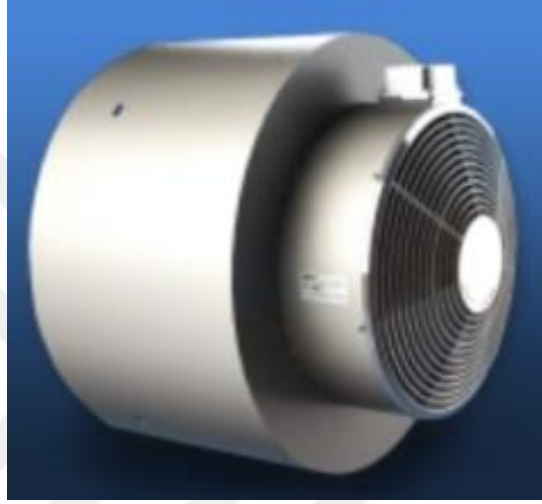
Şekil 1.4 : Yalıtım sınıfları [17].

Üç fazlı asenkron motorlarda elektriksel parametreler ile ısı davranış arasındaki ilişki motor kayıpları üzerinde büyük etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Stator bakır kayıpları, rotor bakır kayıpları, demir kayıpları, ilave kayıplar, sürtünme ve ventilasyon kayıpları motor üzerinde başlıca ısı kaynakları olduğu bilinmektedir. Sargı sıcaklık artışı ile stator bakır kayıpları en önemli kayıp olarak değerlendirilmektedir. Sargı sıcaklığındaki artış doğrudan stator sargı direncini artırdığı ve stator bakır kayıplarının artmasında büyük etkiye neden olduğu bilinmektedir [18]. Sargı sıcaklığındaki artış ile sistem giriş gücü yükselmektedir ve çıkış gücünün giriş gücüne oranından dolayı motor verimi düştüğü bilinmektedir. Bu da etkin bir ısıl yönetimin motor performansında büyük bir etkiye sahip olduğu gösterilmektedir [18].

Üç fazlı asenkron motorlarda soğutma yöntemleri motorların anma değerlerinde çalışmasını etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu bilinmektedir. Üç fazlı asenkron motorların ticari kullanımında en genel soğutma yöntemi olarak TEFC soğutma olarak kullanılmaktadır. Fakat literatürde yüksek güç yoğunluklu uygulamalarda TEFC soğutmanın sınırlı soğutma performansı nedeniyle anma değerlerini sınırladığı bahsedilmektedir [19,20]. Düşük hızlı sürücü uygulamalarda soğutma performansı da düştüğü için yeterli anma gücüne ulaşmakta ciddi olarak zorlandığı görülmektedir [21]. Yüksek hızlı sürücü uygulamalarında ise aynı pervane kullanımında yüksek ses değerleri sistem gürültüsü tarafında dezavantaja neden olduğu bilinmektedir [22].

Soğutma performansının aynı tasarımda artırılmak istenen durumlarda literatürde zorlanmış hava soğutma yöntemleri de tercih edilmektedir. Zorlanmış hava soğutma

harici bir pervane veya havalandırma ile hava debisi artırmak hedeflenmektedir. Literatürde bu yöntem özellikle değişken hızlı uygulamalarda düşük hızlarda motorun anma gücünü ve torkunu artırdığı ve ısıl performansı iyileştirdiği anlatılmaktadır [21]. Fakat havanın sınırlı hava taşıma kapasitesi nedeniyle çok daha yüksek güç yoğunluklarında yetersiz kaldığı bahsedilmektedir [23]. Zorlanmış soğutmada motorun açık bir ortamda bulunması, gaz türünün güvenlik nedenleriyle sınırlanmaktadır. Zorlanmış soğutmaya ait cebri pervane sistemi Şekil 1.5'te verilmiştir.



Şekil 1.5 : Zorlanmış soğutma cebri pervane [24].

Yüksek güç yoğunluğu gerektiren uygulamalarda öne çıkan bir diğer yöntem de su ceketli sıvı soğutmadır. Bu yöntemde motor gövdesi etrafına yerleştirilen kanallar aracılığıyla sıvı soğutma sağlanmaktadır. Sıvıların yüksek özgül ısı kapasitesi ve konveksiyon katsayısı sayesinde su ceketli soğutmanın hava bazlı yöntemlere kıyasla çok daha yüksek ısı atma kapasitesi sunduğu literatürde bahsedilmektedir [25]. Birçok çalışmada, su ceketli soğutmalı asenkron makinelerin stator sargısında en sıcak noktaların belirgin biçimde düştüğü ve aynı tasarıma sahip TEFC veya zorlanmış hava soğutmaya kıyasla daha yüksek sürekli güç, akım ve tork değerleriyle çalışabildiği gösterilmiştir [26, 27]. Ayrıca su ceketli soğutmanın, sıcaklık dağılımını daha homojen hâle getirerek yalıtım sisteminin ısıl olarak daha dengeli çalışmasına katkı sağladığı rapor edilmiştir [28]. Sıvı soğutmalı uygulamalarda sıvı olarak saf su, su-glikol karışımları, dielektrik sıvılar gibi sıvılar kullanılmaktadır [29]. Buradaki sıvı kullanımı güç yoğunluğu, ortam ve uygulamaya bağlı olarak değiştirilmektedir. Literatürde sıvı soğutma ile ilgili çalışmalarda CFD destekli sonlu elemanlar analizli çalışmaların daha doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir [30].

İnverter beslemeli asenkron makinelerde PWM gerilim darbeleri ve yüksek dv/dt (gerilim değişim hızı) değerleri yalıtım sistemi üzerinde ek elektriksel stresler oluşturulmaktadır. Bu stresler PDIV testleriyle tespit edilmektedir. PDIV test sonuçlarına göre IVIC sınıfları ortaya çıkarılmaktadır [31]. IVIC sınıfları yalıtımın anlık tepe-tepe gerilim darbelerine karşı dayanımına göre sınıflandırılmaktadır. 500 volt (V) çıkışlı sürücü için IVIC gerilim tablosu Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1 : 500V çıkışlı sürücüye göre IVIC sınıfları IEC 60034-18-41 [31].

IVIC Sınıfı	IVIC Katsayı	Güvenlik Faktörü	Faz-Faz Tepe-Tepe Test Gerilimi	Faz-Toprak Tepe-Tepe Test Gerilimi
A sınıfı	2,2	1,25	1857 V	1300 V
B sınıfı	3	1,25	2352 V	1772 V
C sınıfı	4	1,25	3376 V	2363 V
D sınıfı	5	1,25	4220 V	2954 V

Bu nedenle literatürde, özellikle su ceketli ve zorlanmış hava soğutmalı yüksek güç yoğunluklu motorlarda yalıtım sınıfının hem ısı hem de elektriksel dayanım açısından dikkatle seçilmesi gerektiği vurgulanmaktadır [8,31]. Su ceketli motor örneği Şekil 1.6’da verilmiştir.



Şekil 1.6 : Sıvı soğutmalı motor örneği [32].

Üç fazlı asenkron modellerde ısı davranışı incelemek amacıyla farklı model yaklaşımları bulunmaktadır. Bu model yaklaşımları sonlu elemanlar analizi, CFD ve eşlenik ısı-elektromanyetik modelleme yaklaşımları olarak sınıflandırılmaktadır [33].



2. GENEL BİLGİLER

Bu kısımda üç fazlı asenkron motoru, çalışma biçimleri, soğutma biçimleri, ısı transfer methodları, ısıl model, ısıl eşdeğer devre, sonlu elemanlar analizi ve standartlardan bahsedilmiştir.

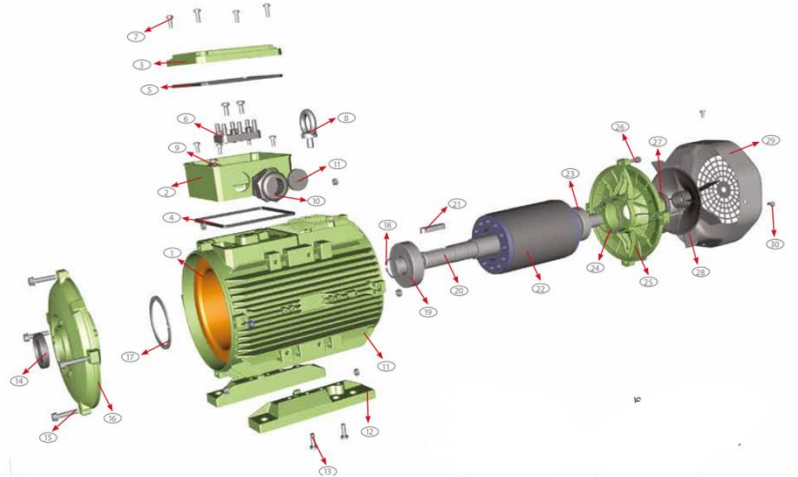
2.1 Üç Fazlı Asenkron Motor

Bu kısımda üç fazlı asenkron motorun konstrüksiyonu, çalışma prensibi, eşdeğer devresi, kayıpları ve verimden bahsedilmiştir.

2.1.1 Konstrüksiyon

Üç fazlı asenkron motor temel yapısı rotor ve stator olmak üzere iki temel kısım olarak tanımlanmaktadır. Temel anlamda stator lamine saclardan oluşan ve 120 derece faz açısıyla manyetik alanı oluşturan motor sargılarının yerleştirildiği kısım olarak tanımlanmaktadır. Rotor ise stator üzerinde oluşan manyetik alan ile dönme hareketini sağlayan ve tork oluşturan kısım olarak belirtilmektedir.

Geleneksel bir tam kapalı üç faz asenkron motor sargılı stator, rotor, mil, iki rulman, iki keçe, iki ayak, ön ve arka kapak, terminal kutusu, terminal kutu kapağı, bağlantı klemensi, faz kabloları, rakor, fan ve fan kapağından oluştuğu bilinmektedir. Motor alt parçaları Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 : Motor alt parçaları [17].

2.1.2 Çalışma prensibi

Asenkron (indüksiyon) motoruna ismi, endüklenmiş gerilim kavramından verilmektedir. Üç fazlı alternatif gerilim stator sargılarına uygulandığında statorda bir akım meydana gelmekte ve bu akım Ampere Yasası'na göre dönel bir manyetik alan (H) oluşmaktadır. Oluşan bu döner manyetik alan sonucunda, mevcut yüzey alanı üzerinde bir manyetik akı (ϕ) oluşturulmaktadır. Manyetik akının zamanla değişimi (Δt) Faraday Yasası gereğince rotor devresinde bir gerilim (ε) indüklenmesine neden olmaktadır. Endüklenen bu gerilim rotor direncinden dolayı rotor akımını doğurur ve böylece rotorda bir manyetik alan meydana gelmektedir. Biot Savart Yasası'na göre, manyetik alan (B) içerisinde yer alan ve üzerinden akım (I) geçen bir iletken manyetik alana dik doğrultuda bir kuvvetin (F) etkisi altında bulunmaktadır. Bu kuvvet rotor üzerinde bir elektromanyetik tork (τ) üretmekte ve motorun dönme hareketi bu tork sayesinde gerçekleştirilmektedir [34].

Ampere Yasası denklem 2.1'de verilmiştir.

$$\oint H \cdot dl = N \cdot I \quad (2.1)$$

İndüklenen gerilim formülü denklem 2.2'de verilmiştir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Kuvvet formülü denklem 2.3'te verilmiştir.

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{L} \times \vec{B}) \quad (2.3)$$

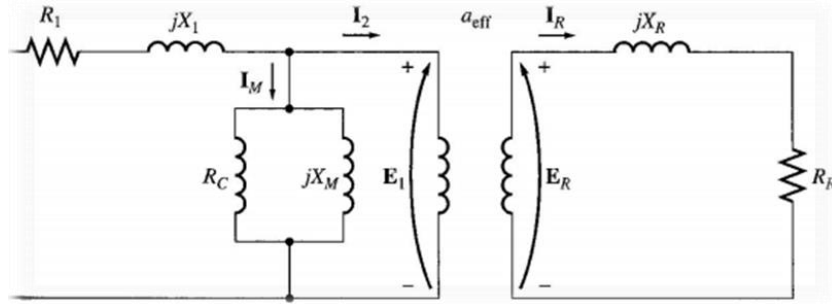
Tork formülü denklem 2.4'te verilmiştir.

$$\tau = F \cdot r \quad (2.4)$$

2.1.3 Eşdeğer devre

Eşdeğer devrenin amacı motorun fiziksel ve elektromanyetik davranışlarını bir elektrik devresi üzerinde basitleştirmek üzerine kurulu olduğu bilinmektedir. Motor performansı ve davranışlarının hem teorik hem de deneysel olarak incelenmesi bu yaklaşım sayesinde kolaylaştırılmaktadır. Temel anlamda elektromanyetik enerji

dönüşüm süreci temsil edilmektedir. Stator üzerinde indüklenen gerilim ve rotor tarafında oluşan akım trafo eşdeğer devresine benzetilmektedir. Bu nedenle üç fazlı asenkron motorun eşdeğer devre modelinin trafo modeli aşağıdaki Şekil 2.2'deki gibi gösterilmektedir.



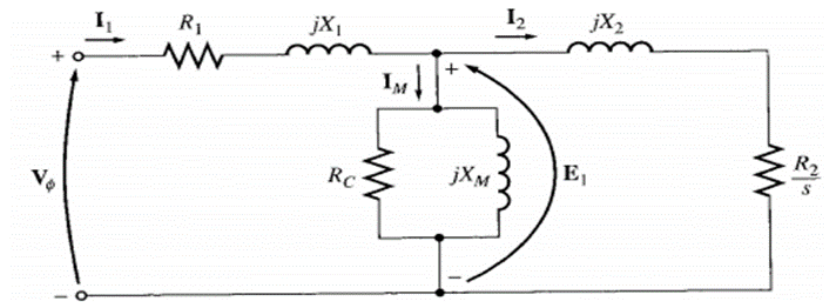
Şekil 2.2 : Üç fazlı asenkron motorun eşdeğer devresi [18].

Eşdeğer devreye ait tüm birimler Çizelge 2.1'de paylaşılmıştır.

Çizelge 2.1 : Eşdeğer devre elemanları.

Kısaltma	Tanım	Birim
I_2	Stator akımı	Amper
R_1	Stator direnci	Ohm
X_1	Stator reaktansı	Ohm
I_M	Manyetik akım	Amper
X_M	Manyetik reaktans	Ohm
R_c	Demir kaybı direnci	Ohm
V_p	Faz gerilimi	Volt
X_R	Rotor reaktansı	Ohm
I_R	Rotor akımı	Amper
R_R	Rotor direnci	Ohm
a_{eff}	Dönüşüm oranı	-

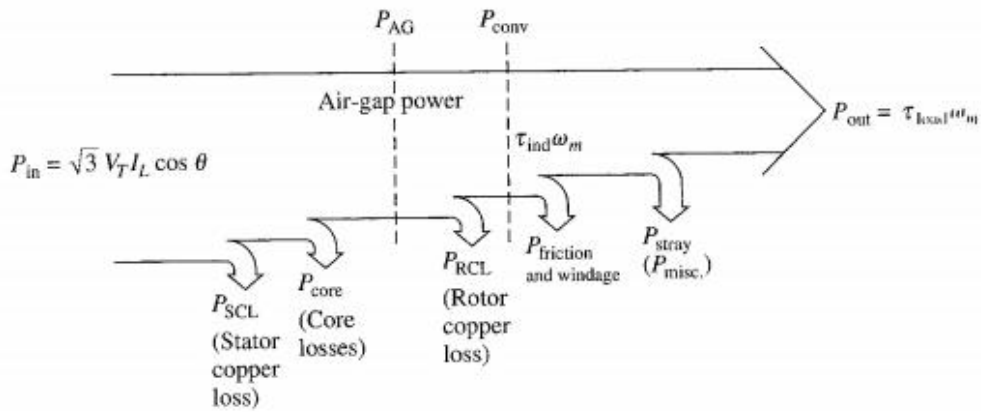
Eşdeğer devreyi daha kolay çözmek amacıyla devre stator tarafına indirgenebilir. Statora indirgenmiş T eşdeğer devre şekil 2.3'te verilmiştir. Üç fazlı asenkron motorda eşdeğer devre parametreleri boşa test, doğru akım testi ve kilitli rotor testlerinden elde edilmektedir.



Şekil 2.3 : Statora indirgenmiş T eşdeğer devre [18].

2.1.4 Kayıplar ve verim

Üç fazlı asenkron motor çeşitli kayıplardan meydana gelmektedir. Bu kayıplar stator bakır kayıpları, rotor bakır kayıpları, demir kayıpları, ilave kayıplar, sürtünme ve vantilasyon kayıpları olarak bölünmektedir. Giriş gücünden bu kayıplar çıkarıldığında motor çıkış gücü elde edilmiştir. Çıkış gücünün giriş gücüne oranı da verim olarak adlandırılmaktadır. Tüm kayıpların dağılımı Şekil 2.4'teki Sankey diyagramında verilmiştir.



Şekil 2.4 : Sankey diyagram ile kayıp akışı [18].

Stator bakır kaybı (P_{scl}) stator akımın karesi (I_1) ve stator direnci (R_1) ile doğru orantılıdır ve ilgili denklem 2.5'te verilmiştir.

$$P_{scl} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (2.5)$$

Rotor bakır kaybı (P_{rcl}) rotor akımın karesi (I_2) ve rotor direnci (R_2) ile doğru orantılıdır ve ilgili denklem 2.6'de verilmiştir.

$$P_{rcl} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (2.6)$$

Demir kaybı (P_{fe}) formülü Steinmetz modeline göre verilmiştir. Histerezis ve fuko kayıpları ile ifade edilmektedir. Demir kaybını tayin etmek için silisli sac malzeme verisinin kritik olduğu ifade edilmektedir. Buna göre formül denklem 2.7'de verilmiştir. Demir kayıpları formülündeki semboller ve açıklamalar Çizelge 2.2'de verilmiştir.

$$P_{fe} = k_h \cdot f \cdot B^n + k_e \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (2.7)$$

Çizelge 2.2 : Demir kayıpları elemanları.

Sembol	Açıklama	Birim
k_h	Histerezis kaybı katsayısı	$W/(Hz.T^n)$
k_e	Fuko kaybı katsayısı	$W/(Hz^2.T^2)$
f	Manyetik alan frekansı	Herz
B	Manyetik akı yoğunluğu	Tesla
n	Histerezis üssü	-

Sürtünme ve demir kayıpları ilave olarak IEC 60034-2-1 metod 2-1-2b’de deney metoduyla açıklanmıştır. Buna göre yüksüz deneydeki farklı gerilim aralıklarına göre sürtünme (P_{fw}) ve demir kayıpları(P_{fe}) bulunmaktadır. Demir kayıplarını bulmak için boşa çalışmada anma geriliminin %110’u ile %80’i arasında dört veya üzeri anma değerleri ölçülmelidir. Sürtünme ve ventilasyon kayıplarını bulmak için boşa çalışmada anma geriliminin %70’i ile %30’u arasında en az dört ölçüm alınmalıdır. Burada boşa çalışma başlangıcı ve bitişinde direnç ölçümü ile gerilim,akım ve boşa güç ölçümü yapılmalıdır [35]. Çalışmada ilave kayıplar, sürtünme ve ventilasyon kayıpları IEC 60034-2-1 metod 2-1-2b’ye göre alınan deney sonucunda Ansys Motor-CAD’e eklenmiştir. IEC 60034-2-1 metod 2-1-2b’ye göre ilave kayıpların (P_{stray}) formülü denklem 2.8’deki gibi ifade edilmiştir.

$$P_{stray} = 2. \pi. n. \tau. P_{fw} - P_{scl} \quad (2.8)$$

Giriş gücünden (P_{in}) stator bakır kaybı (P_{scl}), rotor bakır kaybı (P_{rcl}), demir kaybı (P_{fe}), sürtünme ve vantilasyon kaybı (P_{fw})ve ilave kayıplar (P_{stray}) çıkarıldığında çıkış gücü (P_{out}) elde edilmektedir ve ilgili denklem 2.9’daki gibi ifade edilmiştir.

$$P_{in} - P_{scl} - P_{rcl} - P_{fe} - P_{fw} - P_{stray} = P_{out} \quad (2.9)$$

Buna göre göre verim (η) çıkış gücünün (P_{out}) giriş gücüne (P_{in}) oranı formülü denklem 2.10’daki gibi ifade edilmiştir.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.10)$$

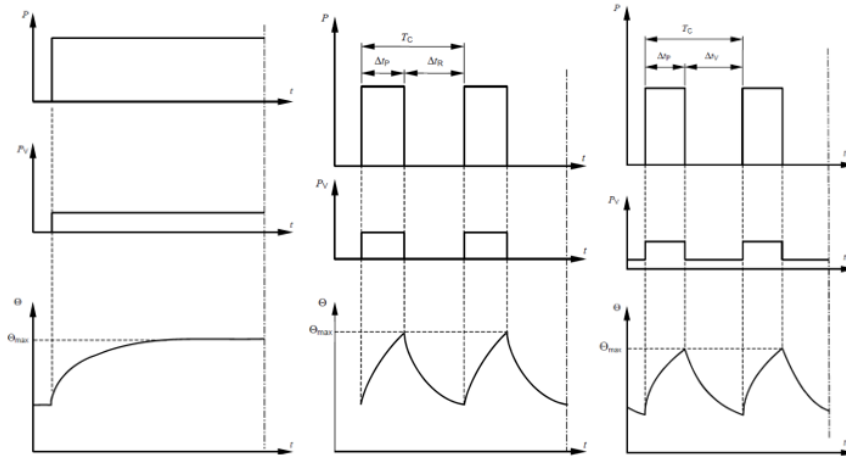
2.2 .Çalışma Biçimleri

Elektrik motorlarında çalışma şekilleri motorun ısınma ve soğuma davranışları temel alınarak tanımlanır ve ısı zaman sabitleri ile ilişkilidir [8]. IEC 60034-1 standardına göre çalışma şekilleri S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9 ve S10 olarak isimlendirilmektedir [8]. Çalışma rejimleri ve açıklamaları Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Çalışma rejimleri IEC 60034-1.

Çalışma Rejimi	Açıklama
S1	Sürekli çalışma.
S2	Kısa süreli çalışma.
S3	Aralıklı, periyodik çalışma.
S4	Kalkışlı aralıklı periyodik çalışma.
S5	Elektriksel frenlemeli aralıklı periyodik çalışma.
S6	Sürekli periyodik çalışma.
S7	Elektriksel frenlemeli sürekli operasyon periyodik çalışma.
S8	Yük ve hız değişiminde sürekli operasyon periyodik çalışma.
S9	Yük ve hız değişiminde periyodik olmayan çalışma.
S10	Ayrık sabit yük ve hız seviyelerinde çalışma.

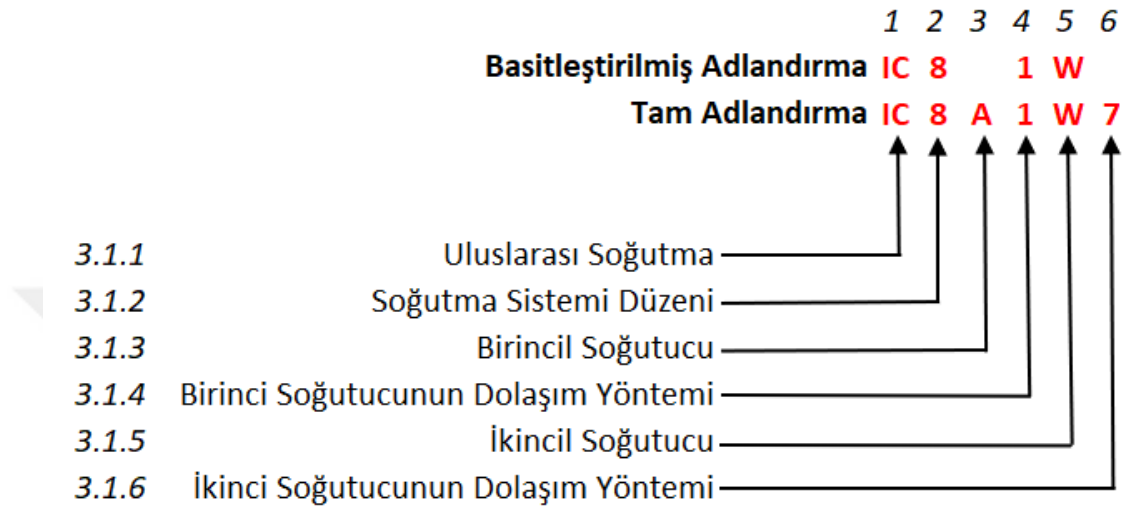
EU 2019/1781 regülasyonun kapsam içine aldığı en önemli çalışma rejimler S1, S3 ve S6 rejimleri olarak ifade edilmektedir. Buna göre regülasyon S1, $S3 \geq \%80$ and $S6 \geq \%80$ rejimlerine sahip motorlarda güç aralığına göre verim sınıfı aranmaktadır [1]. S1, S3 ve S6 rejimine ait çalışma grafikleri Şekil 2.5'teki gibi gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : S1, S3 ve S6 rejim çalışma grafikleri [8].

2.3 Soğutma Biçimleri

IEC 60034-6 standardına göre soğutma türleri IC sınıfları olarak tanımlanmıştır. Soğutma sınıfların isimlendirilmesi soğutucu malzeme ve soğutucu malzemenin dolaşım yöntemiyle ilgili olduğu ifade edilmektedir. Buna göre IEC 60034-6 standardındaki isimlendirme biçimi Şekil 2.6'daki gibi gösterilmektedir.



Şekil 2.6 : Soğutma tipleri IC isimlendirme [20].

Bu çalışmada basitleştirilmiş adlandırması IC 411 (TEFC), IC 410 (TENV), IC 418 (TEAO) ve IC 71W (su ceketli soğutma) soğutma yöntemleri uygulanacaktır.

2.4 Isı Transfer Methodları

Üç faz asenkron motorda radyasyon, iletim ve konveksiyon olmak üzere üç tip aktarım metodu bulunmaktadır. 2002 yılında F. Gürgöze'nin yapmış olduğu “*Kafesli Asenkron Motorların Dinamik Isıl Modeli*” çalışmasına göre makinenin katı aksamlarında ağırlıklı olarak iletimin yaygın olduğu ifade edilmektedir. Akışkanlarda ise konveksiyon yoluyla aktarım yapıldığı belirtilmektedir. Üç faz asenkron motorlarda radyasyon ihmal edilebilir düzeyde olduğu ifade edilmektedir [36].

2.4.1 İletim

Isıl iletimin temeli malzemeler arası sıcaklık farkı nedeniyle ısının malzemeler arası aktarım sürecine dayandırılmaktadır. Burada aktarım taneciklerin titreşimleri ve çarpışmaları yoluyla gerçekleşerek enerji transferi gerçekleştirilmektedir. Üç faz asenkron motorlarda iletim stator sargılarında oluşan stator kayıpları nedeniyle oluşan ısı iletim yoluyla motor gövdesine doğru iletilmektedir. Burada sargı, yalıtım grubu,

stator paketi ve motor gövdesine doğru ısı transferi gerçekleştirilmektedir. Burada kullanılan malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları ve yerleşimleri motorun iç sıcaklık dağılımı üzerinde etkili olduğu ifade edilmektedir. Isı iletimi Fourier Yasası ile açıklanmaktadır ve motor için sıcaklık dağılımlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Fourier yasasına göre ısı transfer hızı (Q_{iletim}) ısı iletim katsayısı (k), ısı transfer alanı (A) ve sıcaklığın (T) konuma (x) göre değişkenliğinin çarpımından meydana geldiği ifade edilmektedir. İlgili denklem 2.11’de verilmiştir.

$$Q_{iletim} = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.11)$$

2.4.2 Konveksiyon

Üç faz asenkron motorda ısı konveksiyon, motor yüzeyi ile çevredeki akışkan arasında gerçekleşen ısı enerji transferi ifade edilmektedir. Burada konveksiyon hem doğal yollarla hem de zorlanmış olarak konveksiyon şeklinde ortaya çıktığı belirtilmektedir. Doğal konveksiyon sıcaklık farkına bağlı yoğunluk değişimleri sonucu ortaya çıkarken, zorlanmış konveksiyon pervane sistemleri veya zorlanmış soğutma sistemleri yardımıyla oluşturulmaktadır. Konveksiyon yoluyla ısı transferini Newton’un soğuma yasası ile açıklanmaktadır. Buna göre konveksiyon katsayısı motorun soğutma performansını belirleyen temel parametrelerden biri olduğu belirtilmektedir. Newton’un soğuma yasasına göre konveksiyonla ısı taşınım hızı ($Q_{konveksiyon}$) formülü denklem 2.12’deki gibidir ve konveksiyon ısı transfer katsayısı (h), ısı transfer alanı (A) ve yüzey ile ortam sıcaklığı arası farkın ($T_s - T_\infty$) çarpımı ile hesaplanmaktadır.

$$Q_{konveksiyon} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.12)$$

2.4.3 Radyasyon

Üç faz asenkron motorda radyasyon elektromanyetik dalgalar aracılığıyla ısı transferi gerçekleştirilmektedir. İletim ve konveksiyona göre ihmal edilebilir seviyede olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda çalışan motorlarda ihmal edilmemesi gereken bir ısı transfer yöntemi olarak kabul edilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda radyasyon ile ısı transferi Stefan Boltzmann Yasası ile ifade edilmektedir. Buna göre radyasyonla ısı

geçiş hızı ($Q_{\text{radyasyon}}$) denklem 2.13'te verilmiştir. Buna göre yayınlılık (ε), Stefan Boltzman sabiti (σ), yüzey alanı (A) ve yüzey eksi ortam sıcaklığı arasındaki farkın ($T_s - T_\infty$) dördüncü kuvvetinin çarpımı ile denklemlleştirilmektedir.

Motor yüzey rengi, kaplaması ve yüzey pürüzlüğü radyasyon ısı aktarımını doğrudan etkilediği bahsedilmektedir. Özellikle koyu ve pürüzlü yüzeylerin radyasyon yoluyla daha fazla ısı aktarımı gerçekleştirildiği literatürde vurgulanmıştır.

$$Q_{\text{radyasyon}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2.13)$$

2.5 Isıl Model ve Isıl Eşdeğer Devre

Kararlı bir üç fazlı asenkron motorda ısıl modelin temeli enerji dengesine dayandırılmaktadır. Buna göre üretilen ısı ile kayıp olan ısı birbirine denk olduğu ifade edilmektedir. Kayıp olan ısıнын temel nedeni olarak ısıнын iletimi, konveksiyonu ve radyasyonu olduğu bilinmektedir. Elektrik motorunda olan bu kayıplar motorun sıcaklığını artırmakta ve performans ve yalıtım ömründe belirleyici olduğu bilinmektedir. Bu nedenle ısıl modellere, elektrik motorlarının ısıl davranışlarını çözümlenmesi ve sıcaklık değişimlerinin anlaşılması amacıyla büyük önem verilmektedir. Isıl model, ısıнын zamana bağlı nasıl yayıldığını ve çevreye nasıl aktarıldığını analitik biçimde ifade eden bir yaklaşım olarak ifade edilmektedir.

Isıl modelin temel denklemleri ısıl direnç (R_{th}) denklemi ile açıklanmaktadır. Bir ortamın ısı geçişine ne kadar direnç gösterdiği olarak tanımlanmaktadır. Buna göre ısıl direnç (R_{th}) formülü denklem 2.14'teki gibi ifade edilmiştir. Sıcaklık artışının (ΔT) ısı geçiş hızına (Q) bölümü ile hesaplanmaktadır.

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q} \quad (2.14)$$

Sistemdeki tüm ısıl dirençlerin toplamının (ΔT) sistemden geçen toplam ısı geçiş hızı (Q) ile çarpımı tüm sistemdeki sıcaklık artışı (ΔT) olarak ifade edilmektedir. Buna göre de ısıl direnç ağı formülü denklem 2.15'te verilmiştir.

$$\Delta T = \dot{Q} \cdot \Sigma R_{th} \quad (2.15)$$

Isıl dirençten yola çıkarak ısı devrelerinin elektrik devrelerine benzediğini söylenebilmektedir. Isıl her bir sembolün elektriksel devrede bir karşılığı bulunmaktadır. Buna göre benzetim sembolleri Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4 : Elektrik ve ısı devre benzetimler.

Termal Devre	Sembol	Birim	Elektriksel Devre	Sembol	Birim
Isı miktarı	Q_{th}	J	Yük	Q	C
Isı akışı hızı	$\dot{Q}_{th}$	W (J/s)	Akım	I	A
Isı akı yoğunluğu	q_{th}	W/m ²	Akım yoğunluğu	J	A/m ²
Sıcaklık	T	°C	Elektriksel potansiyel	V	V
Sıcaklık artışı	ΔT	K	Gerilim	U	V
Isıl iletkenlik	k	W/m.K	Elektriksel iletkenlik	σ	S/m
Isıl Direnç	R_{th}	K/W	Direnç	R	Ω
Isıl İletkenlik	G_{th}	W/K	Elektriksel İletkenlik	G	S
Isıl Kapasite	C_{th}	J/K	Kapasite	C	F

Elektrik devresinde olduğu gibi ısıl modelde de bir eşdeğer devre bulunmaktadır. Bu eşdeğer devre motor devresi motorun ilgili parçalarını içerecek şekilde literatürde toplanmış ısıl parametre ağı olarak ifade edilmektedir. Bu devre birbiri içinde etkileşim halindedir ve tüm parçalar birbirini etkilemekte ve sonunda ısıl olarak dengeye ulaşmaktadır. Bu devrede elektrik devresi gibi düğümlerden oluşur ve her düğüm tek sıcaklıkta kabul edilmektedir. Bu elektrik devresindeki her bir direnç ve kapasitenin ısıl olarak bir ısı kaynağı olarak düşünülebilir ve bu elemanların iletim, konveksiyon ve radyasyon olmak üzere hangi ısı transfer metodlarıyla tanımlanacağı belirlenmelidir [37]. Isıl kapasite (C_{th}) kütle (m) ve özgül ısı (c_p) çarpımından gelmektedir ve formülü denklem 2.16'daki gibi ifade edilmiştir.

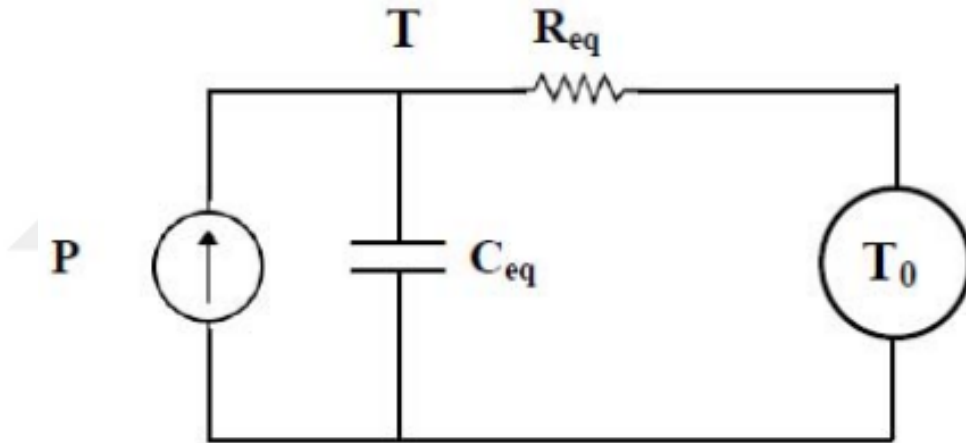
$$C_{th} = m \cdot c_p \quad (2.16)$$

Üç faz asenkron motorların literatürde farklı tipte ısıl model yaklaşımları bulunmaktadır. Bunlar tek düğümlü toplanmış parametrelili ısıl model, çok düğümlü

toplanmış parametrelili ısı model, dağıtılmış parametrelili ısı model, deneysel ısı model ve elektro-termal (hibrit) ısı model olarak açıklanmaktadır. Bu çalışmada çok düğümlü toplanmış parametrelili ısı model ve elektro-termal ısı model üzerinde çalışılmıştır.

2.5.1 Tek düğümlü toplu parametrelili ısı model

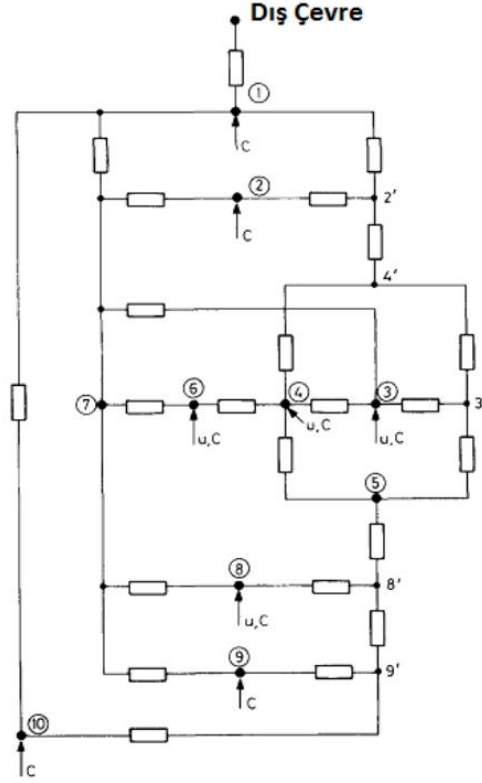
Bu modelde motorun tamamı homojen tek bir kütle bir olarak kabul edilmektedir. Tüm kayıplar bu kütlede oluşur ve motorun sıcaklığı tek bir değişken ile temsil edilmektedir. Bu modelde motorun iç yapısındaki sıcaklık dağılımı ihmal edilmektedir. Bu model tek başına en sıcak noktayı tayin etmede yetersiz olup ve farklı noktalardaki sıcaklık farkları gösterilememektedir. Termik rölelerde genelde bu yaygın olarak kullanılmaktadır. Üç faz asenkron motora ait tek düğümlü toplanmış ısı model eş değer devresi ağı Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7 : Üç fazlı asenkron motorun tek düğümlü toplu parametrelili eşdeğer devresi [38].

2.5.2 Çok düğümlü toplu parametrelili ısı model

Bu modelde birden fazla düğüm ile motorun farklı kısımları temsil edilmektedir. Üç faz asenkron motordaki ısı düğümleri gövde, boyunduruk, stator dişleri, stator sargısı, sargı başları, hava aralığı, kapak boşluğu havası, rotor sargısı, rotor demiri ve mil olmak üzere on kısım ile gösterilmektedir [39]. Her bir düğüm için enerji eşitliği denklemi hesaplanmaktadır. Bu model sayesinde motorun farklı noktalarındaki sıcaklık dağılımları daha gerçekçi biçimde hesaplanabilmekte ve en sıcak nokta belirlenebilmektedir. Üç faz asenkron motora ait çok düğümlü toplanmış ısı model eşdeğer devresi ağı Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8 : Üç fazlı asenkron motorun çok düğümlü toplu parametrelî eşdeğer devresi [39].

2.5.3 Dağıtılmış parametrelî ısı model

Bu modelde motor geometrisi uzaysal olarak bölünmekte ve sıcaklık dağılımları diferansiyel denklemler yardımıyla çözülebilir hale getirilmektedir. Bu modelde yaygın olarak sonlu elemanlar yöntemi ve sonlu hacimler yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir. Tek ve çok düğümlü toplu parametrelî ısı modellere kıyasla doğruluk oranı daha yüksek olduğu bilinmektedir. Sıcaklık haritası detaylı bir şekilde çıkarılabilir fakat hesaplama süresi çok uzun olduğu bilinmektedir.

2.5.4 Deneyisel ısı model

Bu model tamamen ölçüm verilerine dayandırılmaktadır. Sıcaklık, akım ve zaman ilişkisi üzerine kurulmaktadır.

2.5.5 Elektro-termal (Hibrit) ısı model

Hibrit model elektriksel model ile ısı modelin eş zamanlı çalışması üzerine kurulmaktadır. Elektriksel model kayıpların hesabı üzerine odaklanırken ısı model ise sıcaklık hesabı üzerine kurulmaktadır. Hibrit modelde kayıp ve sıcaklık eş zamanlı çalıştığı için doğruluk oranı yüksek olduğu bilinmektedir.

2.6 Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar analizi karmaşık geometrilere ve sınır koşullarına sahip problemlerin yaklaşık çözümünde yaygın olarak kullanılan sayısal bir yöntem olduğu bilinmektedir. SEA temeli diferansiyel operatörü (L) denklemine dayandırılmaktadır. Bilinmeyen alan değişkeni (u) ve kaynak (f)'den oluşmaktadır ve denklem 2.17'de verilmiştir.

$$L(u) = f \quad (2.17)$$

Karmaşık geometrilere diferansiyel denklemler doğrudan çözülmek yerine parçalar haline getirilerek daha küçük bir matematiksel bir denkleme dönüştürülmektedir. Bu amaçla en yaygın kullanılan yöntemlerden biri Galerkin yaklaşımıdır. Galerkin yaklaşımı deneme ve ağırlık fonksiyonlarının ayrı uzaydan seçilmesi esasına dayandırılmaktadır. Sonlu sayıda elde edilen denklemler birleştirilerek denklem 2.18'deki gibi sistem denklemi elde edilmektedir. Denklem global rijitlik matrisi ($[K]$), bilinmeyenler vektörü ($\{u\}$) ve yük vektöründen ($\{F\}$) ile ifade edilmektedir.

$$[K].\{u\} = \{F\} \quad (2.18)$$

Sonlu elemanlar analizi genel anlamda aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır ve Çizelge 2.5'te ifade edilmiştir.

Çizelge 2.5 : Sonlu elemanlar adımları.

#	İlgili adımlar
1	Geometrinin tanımlanması
2	Ağ oluşturulması
3	Malzeme özelliklerinin tanımlanması
4	Sınır ve başlangıç koşullarının belirlenmesi
5	Çözüm
6	Sonuçların değerlendirilmesi

2.7 Standartlar

Çalışmada temel anlamda IEC standartları kullanılmıştır. IEC 60034 ana motor standardıdır. Aşağıdaki alt standartlar bu çalışmada referans olarak kullanılmıştır. Çizelge 2.6’da diğer kullanılan standartlar verilmiştir.

Çizelge 2.6 : İlgili standartlar.

Standart	Tanım
IEC 60034-1	Dönel elektrik makineleri. Anma değerleri ve performans.
IEC 60034-2	Dönel elektrik makineleri. Kayıpların ve verimin belirlenmesi için deney yöntemleri.
IEC 60034-30	Dönel elektrik makineleri. Verim sınıfları (IE kodları).
IEC 60034-31	Döner elektrik makineleri – Bölüm 31: Değişken hızlı uygulamalar dâhil olmak üzere enerji verimli motorların seçimi – Uygulama kılavuzu.
IEC 60034-6	Dönel elektrik makineleri-Soğutma yöntemleri (IC kodları).
IEC 60034-18-41	Dönel elektrik makineleri. Kısmi deşarjlara dayanıklı tip 1 yalıtım sistemleri.

3. REFERANS MOTOR MODELİ ve İNCELENMESİ

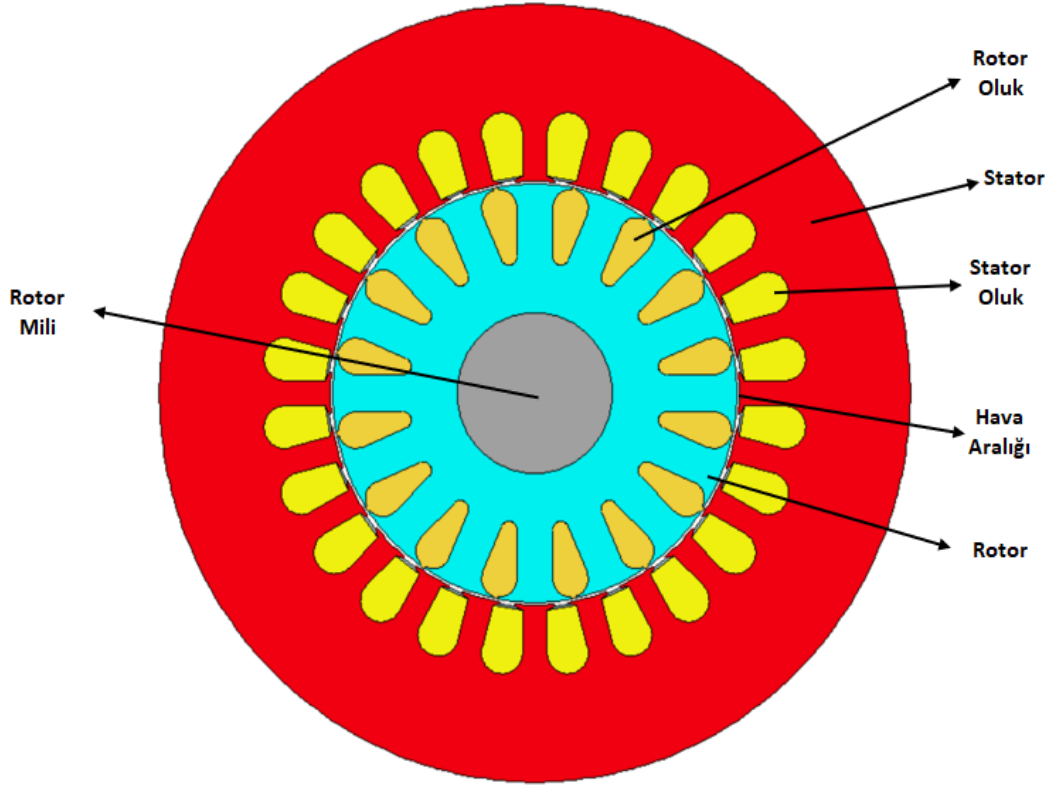
Referans ticari motor modeli için sonlu elemanlar analizi ANSYS Motor-CAD yardımıyla yapılmıştır. Referans motor ilk önce elektromanyetik modülde tasarlanıp, elektromanyetik modülde elde edilen sonuçlar IEC 60034-2-1 metod 2-1-2b'ye göre test edilen ticari motor datasıyla kıyaslanmıştır. Daha sonrasında bu karşılaştırmada elde edilen güvenli sonuçlarla elektromanyetik modüldeki kayıplar ısıl modüle aktarılmıştır. Isıl modülde gövde ve soğutma geometrileri de girildikten sonra ısıl modülde 2D sonlu elemanlar analizi ile çözüldükten sonra elde edilen sıcaklık dağılımı tekrardan elektromanyetik modüle aktarılmıştır. Bu işlem ısıl ve elektromanyetik arasındaki değerler yakınsayana kadar devam edilmiştir. Sırasıyla ticari motorun laminasyon geometrisi, sargı tasarımı, ısıl mekanik modelin oluşturulması ve sonlu elemanlar analizi şeklinde ilerlenmiştir. Referans motorun temel parametereleri Çizelge 3.1'de paylaşılmıştır. Referans motor modeli pervaneli ve pervane muhafazalı olarak (TEFC) olarak modellenmiştir.

Çizelge 3.1 : Referans motor temel veri seti.

Veri Tipi	Veri Seti
Karkas yüksekliği	90
Soğutma metodu	TEFC
Pervane tipi	Çift yönlü radyal fan
Güç	2,2 kW
Gerilim ve bağlantı tipi	230/400V
Bağlantı Tipi	Yıldız Bağlantı
Verim sınıfı	IE3
Frekans	50 Hz
Stator oluk sayısı	24
Rotor oluk sayısı	16
Gövde malzemesi	Alüminyum
Stator ve rotor paket boyu	105 mm
Kutup sayısı	2p=2
Mil çapı	30 mm
Sargı tipi	Dağınık sargı
Sargı tel çapı ve sipir sayısı	3x0,53mm / 41 sipir
Stator dış çapı	145 mm
Stator iç çapı	79 mm
Silisli sac sınıfı	M800A

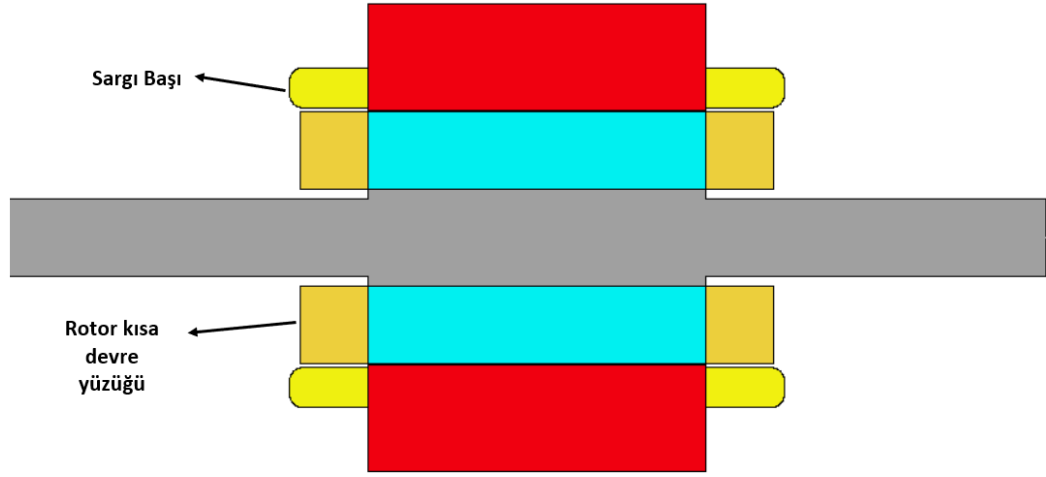
3.1 Referans Motorun 2D Geometrisinin Oluşturulması

İlk olarak referans olarak seçilen ticari motorun laminasyon izimi Ansys Motor-CAD'ın radyal geometri kısmında modellenmiştir. Radyal geometride stator, rotor, stator oluğu, rotor oluğu, mil ve hava aralığı olarak şekil 3.1'deki gibi görülmektedir.



şekil 3.1 : Radyal geometri Ansys Motor-CAD.

Radyal geometriden sonra referans motoru 2D olarak tamamlamak için eksenel parametreler tanımlanmıştır. Eksenel bileşenlerde en önemli parametreler sargı başı ve kısa devre yüzükleri ölçüleri olarak referans modele işlenmiştir. Sargı başı ölçüleri doğrudan stator direncine ve dolayısıyla stator kayıpları üzerinde etkilidir. Elektrik motor sargı prosesinde sargı başlarını eksenel olarak kısaltmak stator kayıplarını azaltmada ve bakır tüketimini azaltmada çok önemli olduğu bilinmektedir. Kısa devre ringi tasarımı da rotor direnci ile doğrudan ilişkili olup devir ve rotor kayıpları üzerinde doğrudan etkili olduğu bilinmektedir. İlave olarak eksenel olarak mil detayları girilmiştir. Buna göre eksenel geometri şekil 3.2'deki gibi görülmektedir.



Şekil 3.2 : Eksenel geometri Ansys Motor-CAD.

3.2 Sargı Parametrelerinin Oluşturulması

Radyal ve eksenel geometri entegrasyonundan sonra motorun sargı şeması ve sargı parametreleri girilmiştir. Ansys Motor-CAD'e girilen sargı parametreleri Şekil 3.3'teki gibi gösterilmektedir. Sargı tasarımı konsantrik yapıda hazırlanmıştır.

Coil Style:

Divider Type: Wedge Model:

Wdg Definition:

Wire Selection

Wire Type:

Wire Gauge:

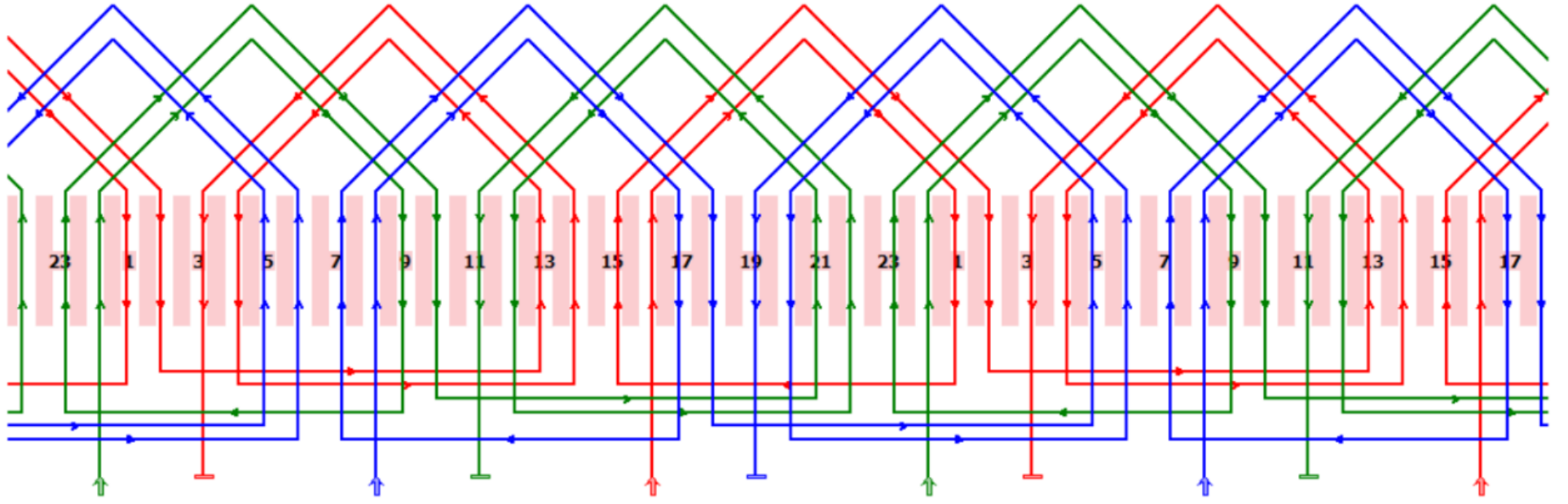
Number of Strands in Hand:

Input Parameter	Value
Wire Slot Fill	0,4621
EWdg Fill	0,9092
Liner Thickness	0,25
Copper Depth [%]	100
Conductor Separation	0,1

Input Parameter	Value
Number Of Wire Sizes	1
Conductors/Slot	123
EWdg MLT	381,76

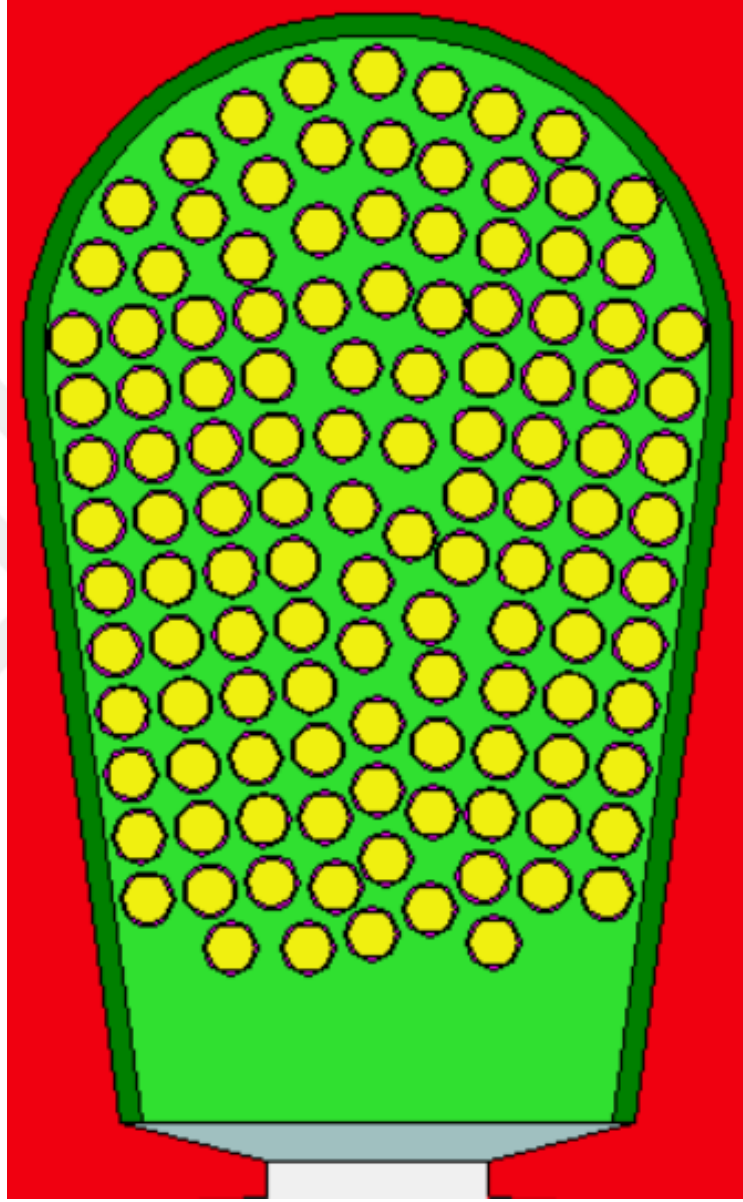
Şekil 3.3 : Sargı parametreleri.

Sargı şeması Şekil 3.4'teki gibi hazırlanmıştır.



Şekil 3.4 : 24 oluk 3 faz 2 kutup sarım şeması.

İlave olarak oluk içinde bakır tellerin pozisyonu modellenmiştir. Referans ticari motor normalden biraz daha fazla sıcak olacak şekilde tasarlandığı için oluk doluluğu düşük seviyelerde bırakılmıştır. Oluk içindeki bakır tellerin konumu Şekil 3.5’te paylaşılmıştır.



Şekil 3.5 : Stator oluk içerisinde bakır tel konumları.

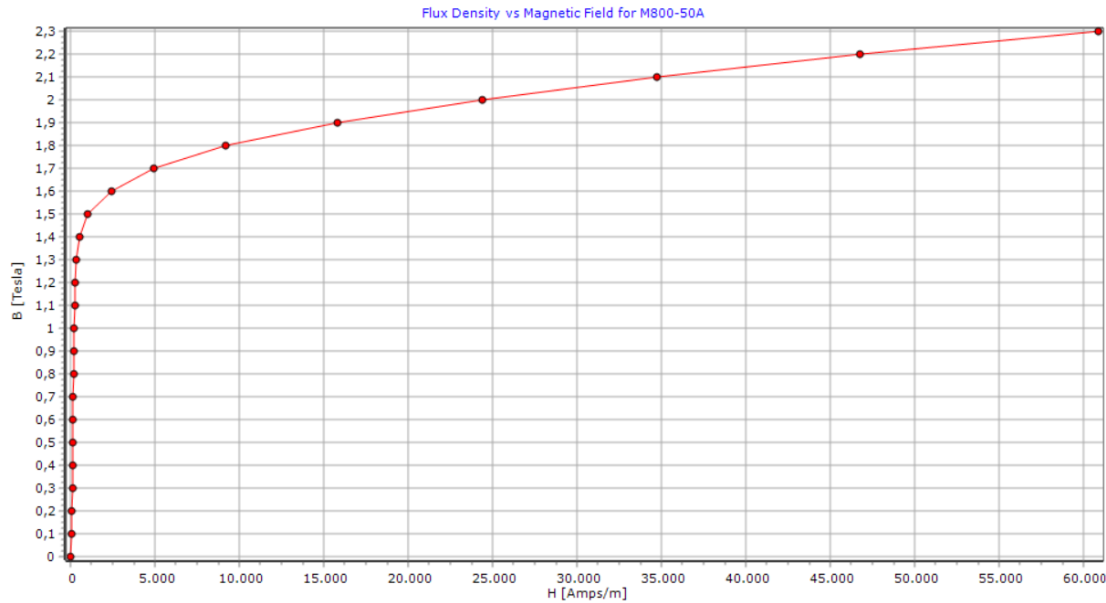
3.3 Elektromanyetik Model Malzeme Veri Girişi

Motor sarım parametreleri de girildikten sonra malzeme bilgileri tanımlanmıştır. Malzeme bilgileri eklenirken Ansys Motor-CAD kütüphanesinden yararlanılmıştır. Buna göre malzeme verileri Şekil 3.6’da gösterilmiştir. İlave olarak B-H eğrisi için

malzeme girişı için manyetik akı yoğunluğu (B) ve manyetik alan şiddeti (H) değeri girilmiştir. Buna göre B-H eğrisi Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

Component	Material from Database	Electrical Resistivity	Temp Coef Electrical Resistivity	Magnet Br at 20°C	Magnet Relative Permeability	Temp Coef Br	Density	Weight
Units		Ohm.m		Tesla			kg/m ³	kg
Stator Lam (Back Iron)	M800-50A	2.3E-07	0				7650	6.065
Stator Lam (Tooth)	M800-50A	2.3E-07	0				7650	1.381
Stator Lamination [Total]								7.446
Amature Winding [Active]	Copper (Annealed)	1.724E-08	0.00393				8933	0.6109
Amature EWdg [Front]	Copper (Annealed)	1.724E-08	0.00393				8933	0.5553
Amature EWdg [Rear]	Copper (Annealed)	1.724E-08	0.00393				8933	0.5553
Amature Winding [Total]								1.721
Slot Wedge							1000	0.004583
Rotor Lam (Back Iron)	M800-50A	2.3E-07	0				7650	0.9018
Rotor Lam (Tooth)	M800-50A	2.3E-07	0				7650	1.407
Rotor Lamination [Total]								2.309
Rotor Cage Top Bar	Aluminium (Cast)	4E-08	0.00375				2950	0.3415
Rotor Cage Top Bar Opening	Aluminium (Cast)	4E-08	0.00375				2950	0.001696
Rotor Cage (Front End)	Aluminium (Cast)	4E-08	0.00375				2950	0.2522
Rotor Cage (Rear End)	Aluminium (Cast)	4E-08	0.00375				2950	0.2522
Rotor Cage [Total]								0.8476
Shaft [Active]	Mild Steel	1.43E-07	0				7800	0.5789
Shaft [Front]	Mild Steel	1.43E-07	0				7800	0.4958
Shaft [Rear]	Mild Steel	1.43E-07	0				7800	0.3723
Shaft [Total]								1.447
Fan	Plastic (ABS)	1E12	0				1014	0.1022
Total Weight								13.88

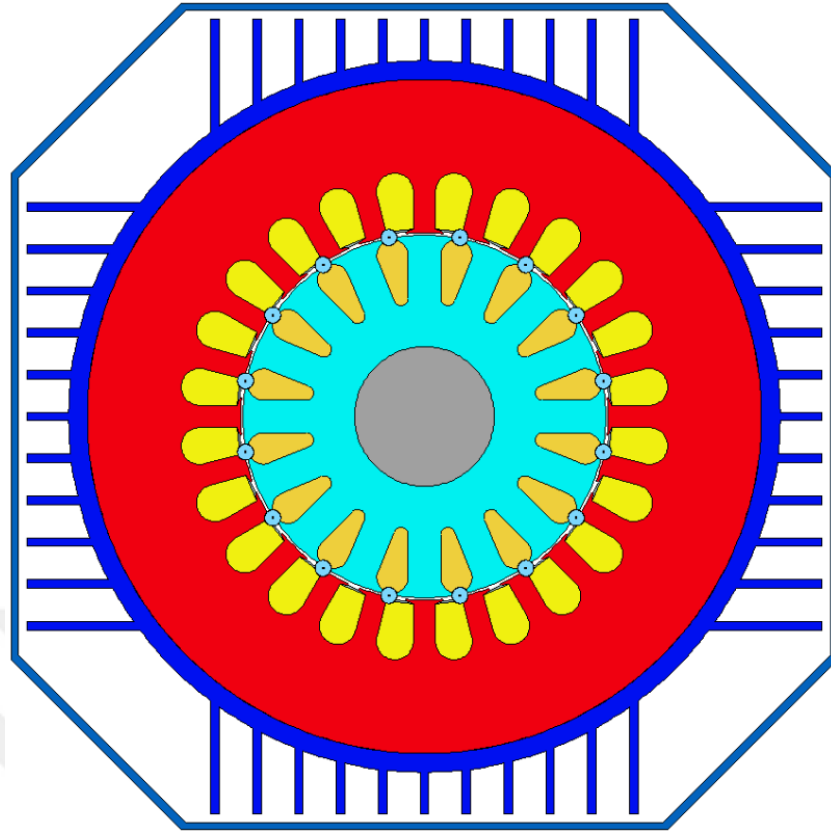
Şekil 3.6 : Elektromanyetik model malzeme verileri.



Şekil 3.7 : Referans motor B-H eğrisi.

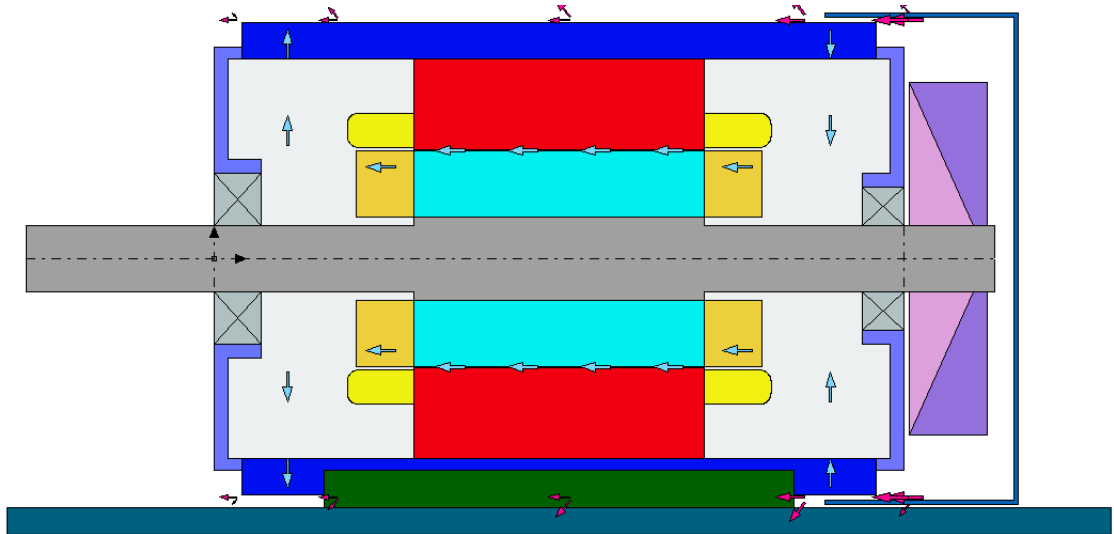
3.4 Isıl Mekanik Modelin Kurulması

Isıl mekanik model tasarımı için Ansys Motor-CAD’in ilk etapta ısıl modülüne giriş yapılmıştır. İlk olarak radyal verilerin girişı sağlanmıştır. Burada gövde fin tasarımı, fin sayısı, gövde kalınlığı, fin derinliği ve kalınlığı en önemli parametreler olarak görülmektedir. Radyal model Şekil 3.8’de verilmiştir.



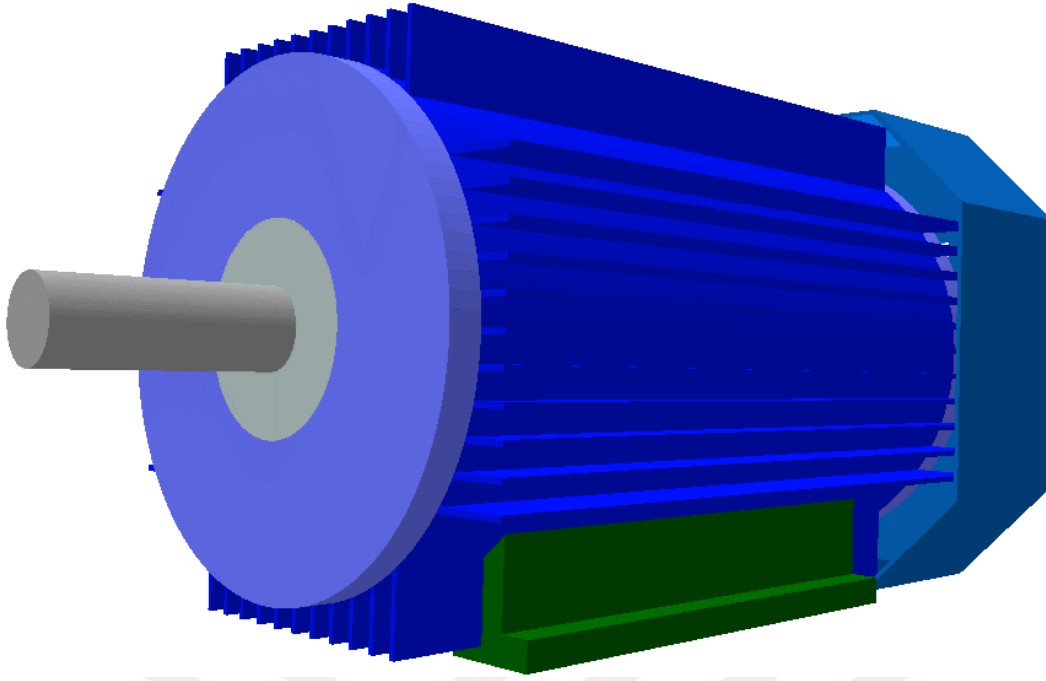
Şekil 3.8 : Radyal ısıl mekanik model.

Radyal ısıl mekanik tamamlanmasıyla beraber eksenel olarak detaylar modelde girilmiştir. Burada en kritik ölçüler pervane ölçüleri, fan kapağı kalınlık ve ölçüleri olarak belirlenmiştir. İlave olarak rulman detayları da bu kısımda giriş yapılmıştır. Buna göre Şekil 3.9’da verildiği gibi eksenel olarak modellenmiştir.



Şekil 3.9 : Eksenel ısıl mekanik model.

Isıl ve elektronmanyetik modüllerde tüm veri girişlerinin sağlanmasıyla referans model 3D olarak olarak modellenmiştir. 3D model görseli Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10 : Referans ticari motor 3D model.

3.5 Isıl Model Malzeme Veri Girişi

Sonlu elemanlar analizine başlamadan önce son olarak ısı mekanik modelde malzeme girişi tamamlanmıştır. Isıl modelde gövde malzemesi, pervane malzemesi ve pervane muhafazası malzemesi kritik malzemeler olarak belirlenmiştir. Malzeme bilgileri eklenirken Ansys Motor-CAD kütüphanesinden yararlanılmıştır. Malzeme bilgileri Şekil 3.11’de tanımlanmıştır.

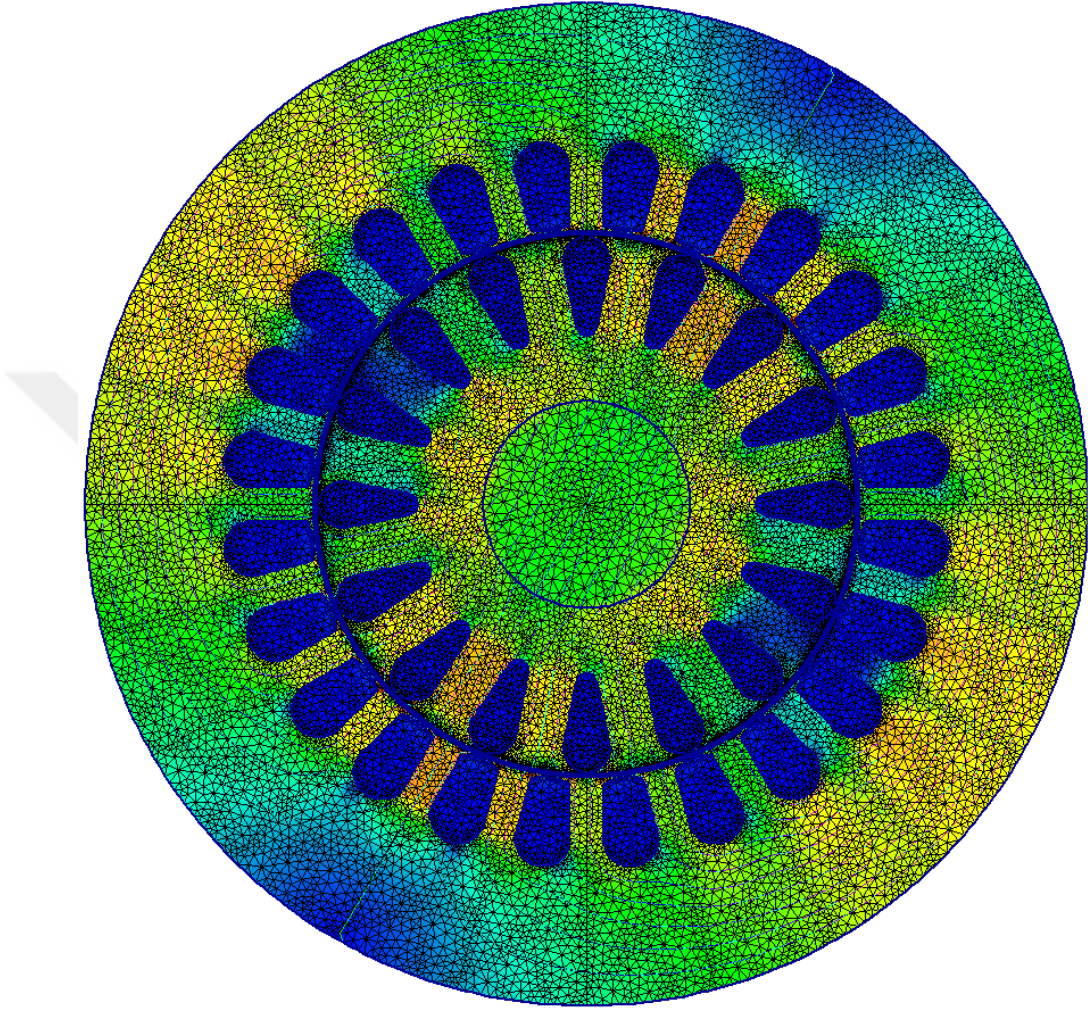
Component	Material from Database	Thermal Conductivity	Specific Heat	Density	Weight Internal	Weight Multiplier	Weight Addition	Weight Total
Units		W/m/°C	J/kg/°C	kg/m³	kg		kg	kg
Housing [Active]	Aluminium (Alloy 195 Cast) ▾	168	833	2700	0.8436	1	0	0.8436
Housing [Front]	Aluminium (Alloy 195 Cast) ▾	168	833	2700	0.5022	1	0	0.5022
Housing [Rear]	Aluminium (Alloy 195 Cast) ▾	168	833	2700	0.5022	1	0	0.5022
Housing [Total]					1.848			1.848
Endcap [Front]	Aluminium (Alloy 195 Cast) ▾	168	833	2700	0.2675	1	0	0.2675
Endcap [Rear]	Aluminium (Alloy 195 Cast) ▾	168	833	2700	0.2696	1	0	0.2696
Fan	Plastic (ABS) ▾	0.25	1260	1014	0.1022	1	0	0.1022
Bearing [Front]	▾	30	460	7800	0.3403	1	0	0.3403
Bearing [Rear]	▾	30	460	7800	0.1955	1	0	0.1955

Şekil 3.11 : Isıl model malzeme verileri.

3.6 Referans Model Sonlu Elemanlar Analizi

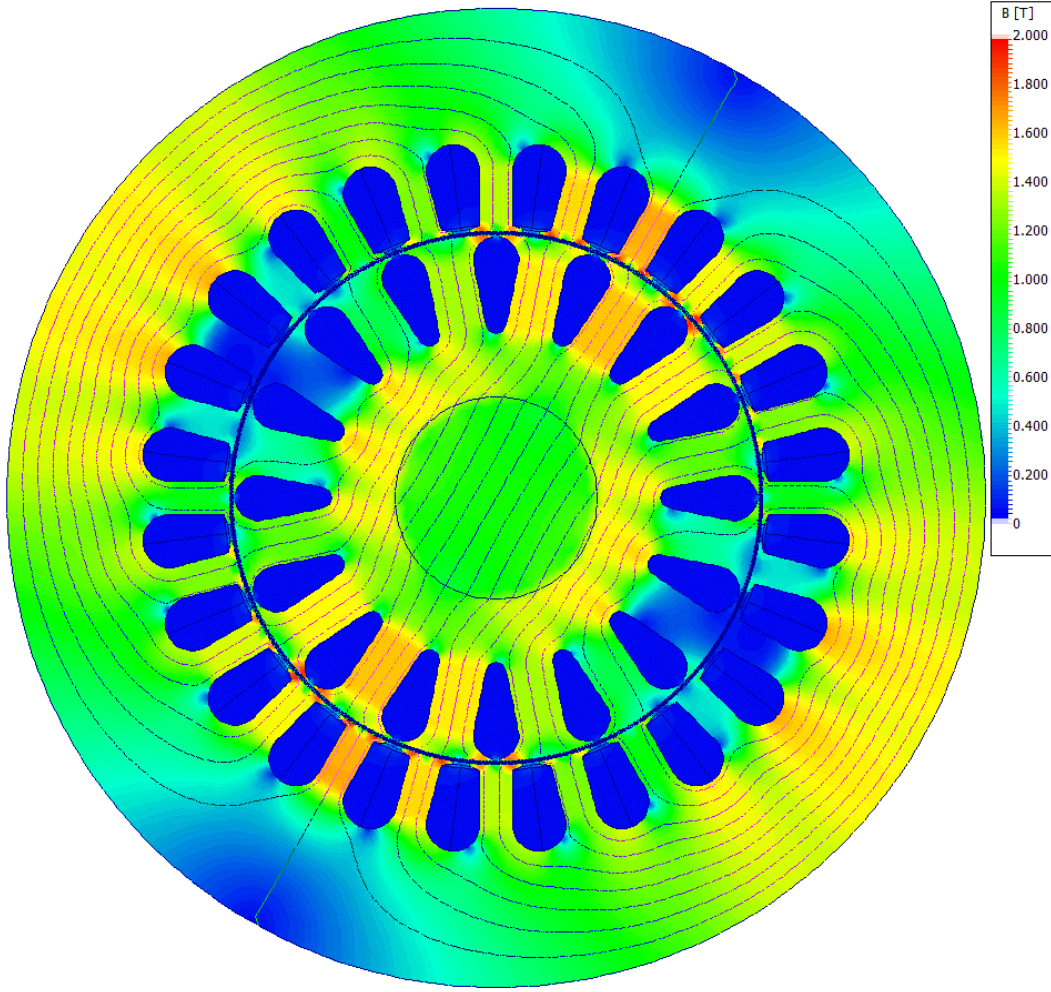
Referans model ilk olarak elektromanyetik modülde sonlu elemanlar yöntemiyle test edilmiştir. Test parametreleri 400 V 50 Hz yıldız bağlantı voltaj beslemeli olacak şekilde sonlu elemanlar analizinde ilk etapta satürasyon modeli hesaplanmıştır.

Satürasyon modeli satürasyon faktörü, demir kayıpları ve manyetik reaktansı hesaplamak için her defasında test edilmelidir. Daha sonrasında elektromanyetik modülde sonlu elemanlar analizi başlatılmıştır. Referans modelin ağ yapısı şekil 3.12’deki gibi oluşturulmuştur.



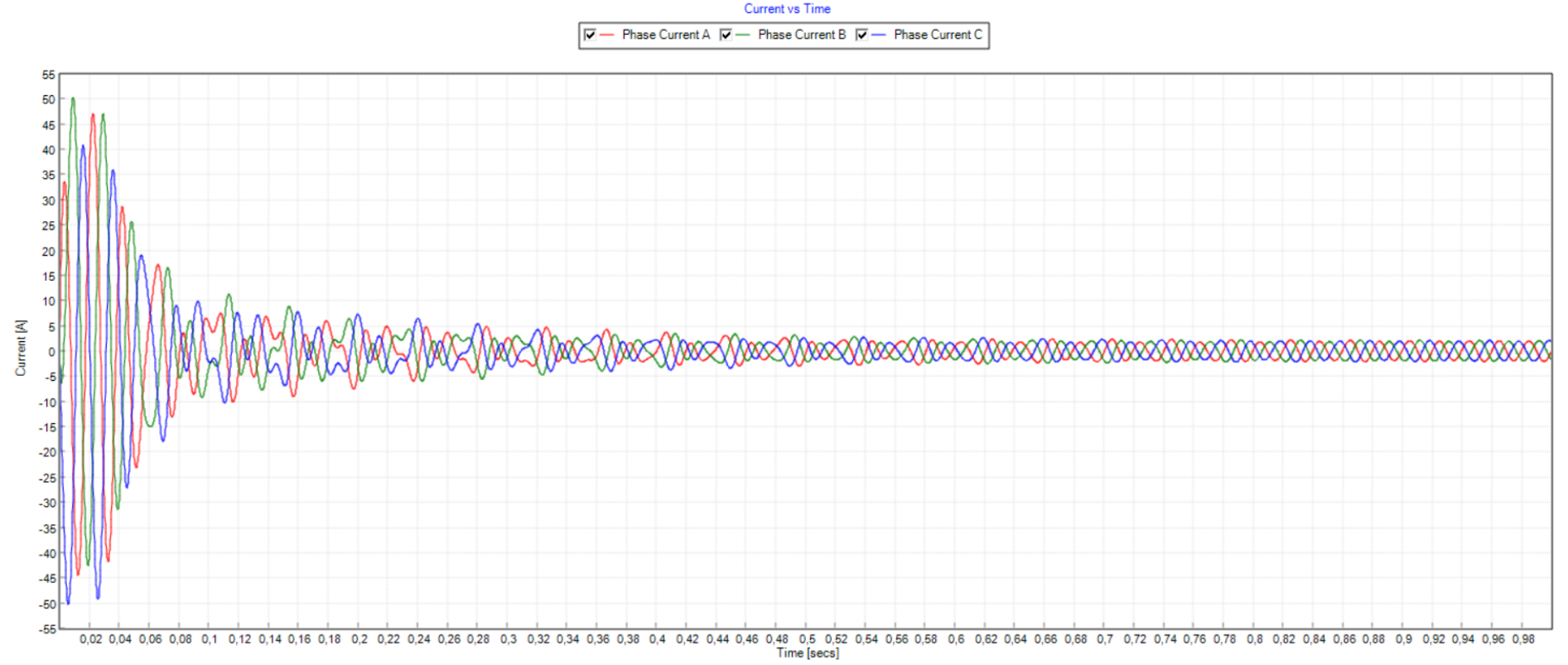
Şekil 3.12 : Referans model sonlu elemanlar yöntemi ağ yapısı.

Elektromanyetik kısımda sürtünme ve ilave kayıplar laboratuvarında yapılan IEC 60034-2-1 metod 2-1-2b testinden elde edilmiştir ve arayüze girilmiştir. Demir kayıpları ise tanımlanan M800 sac ile Steinmetz methodu yardımıyla hesaplanmıştır. Elektromanyetik kısımda ilave olarak manyetik akı yoğunlukları Şekil 3.13’te gösterilmiştir.

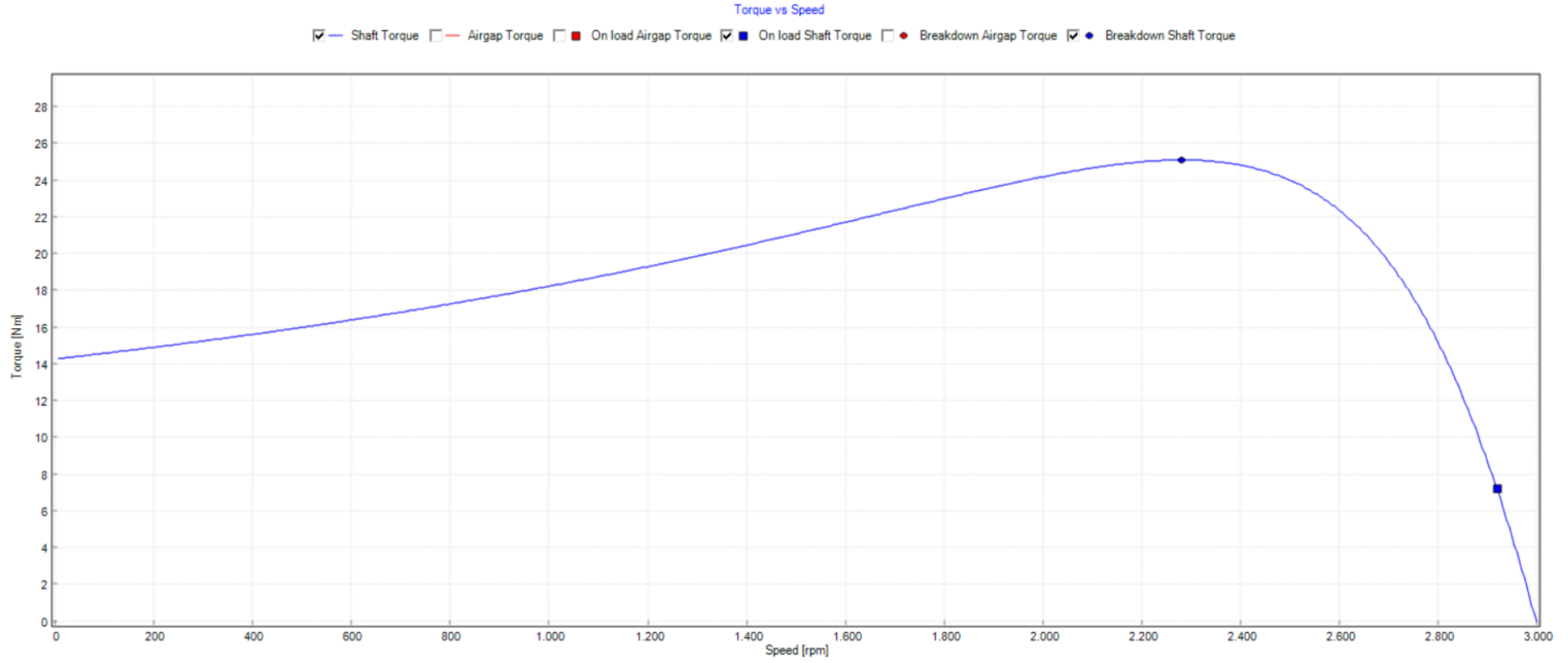


Şekil 3.13 : Manyetik akı yoğunlukları.

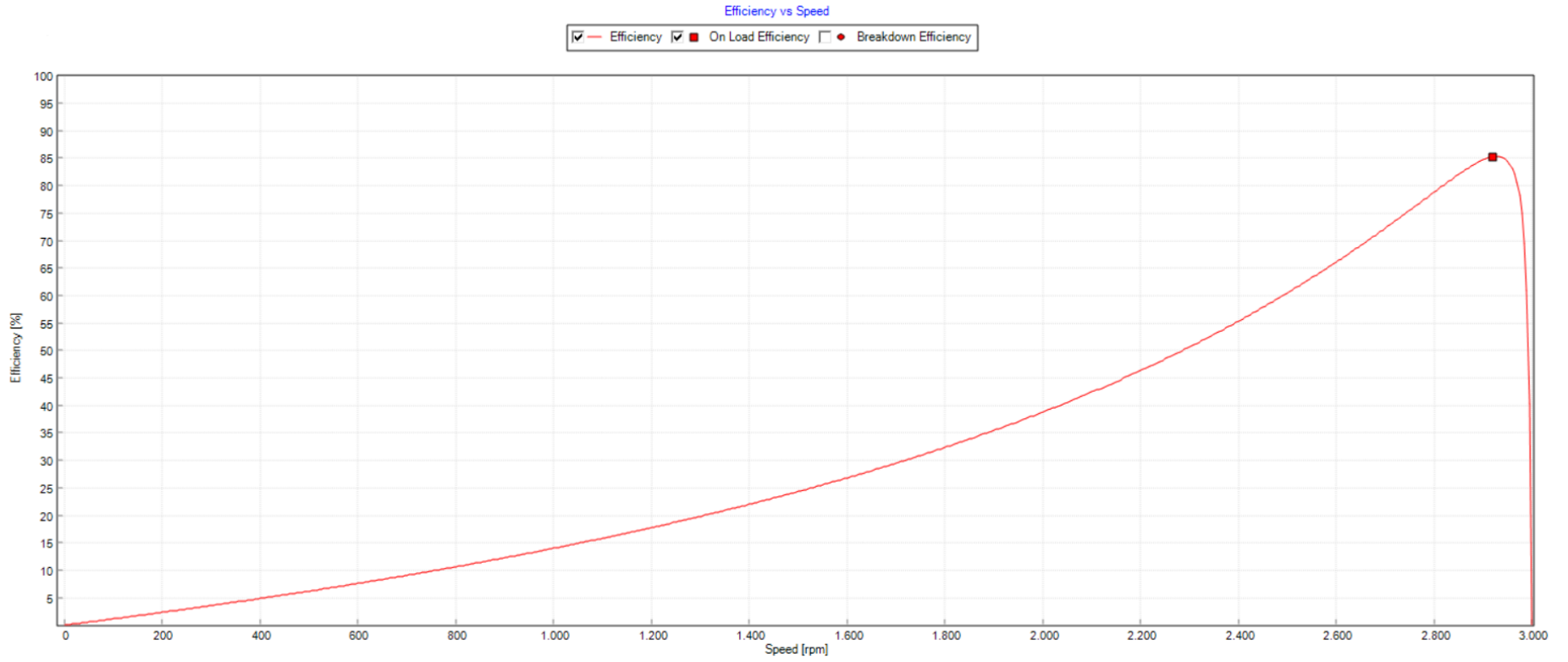
Elektromanyetik modülde elde edilen kayıplar ısıl modüle aktarılmıştır. Bu kayıplar üzerinden ısıl eşdeğer devredeki sıcaklıklar elde edilmiştir. Bu sıcaklıklar tekrardan elektromanyetik modele aktarılarak ilk etapta satürasyon modeli çıkarılmıştır. Daha sonrasında tekrardan 2D sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bu geçişler ısıl ve elektromanyetik kısımdaki sonuçlar yakınsayana kadar tekrar edilmiştir. Üç faz akımının zamana bağlı değişim Şekil 3.14'teki gibi oluşturulmuştur. Tork ve hız eğrisi Şekil 3.15'teki gibi oluşturulmuştur. Verim ve hız eğrisi de Şekil 3.16'daki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 3.14 : Akım-zaman grafiği referans model 2D SEA.

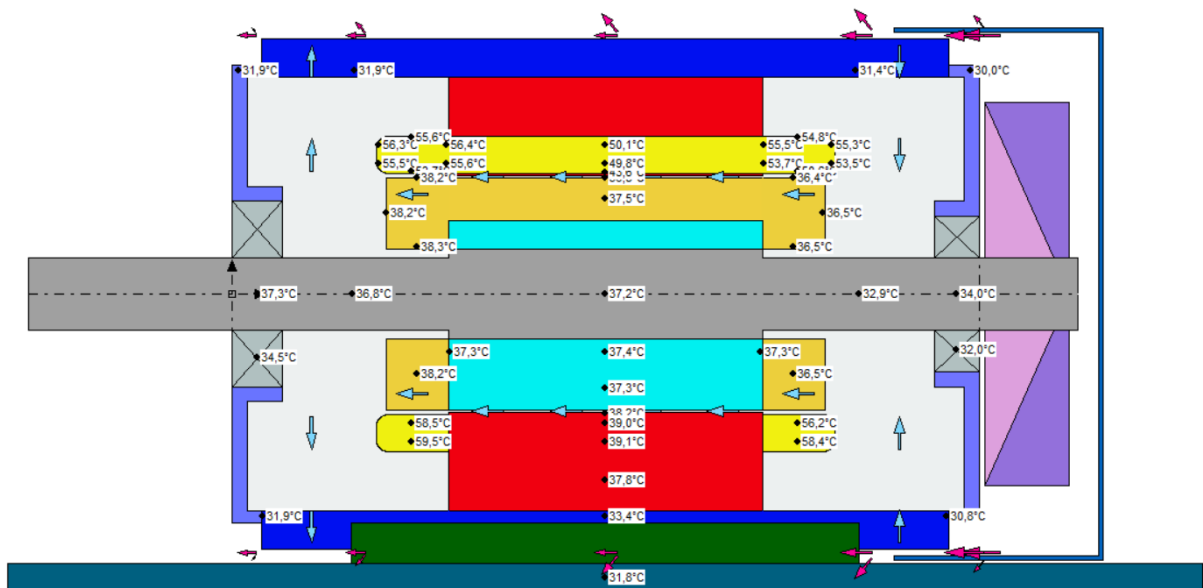


Şekil 3.15 : Tork-hız grafiği referans model 2D SEA.



Şekil 3.16 : Verim-hız grafiği referans model 2D SEA.

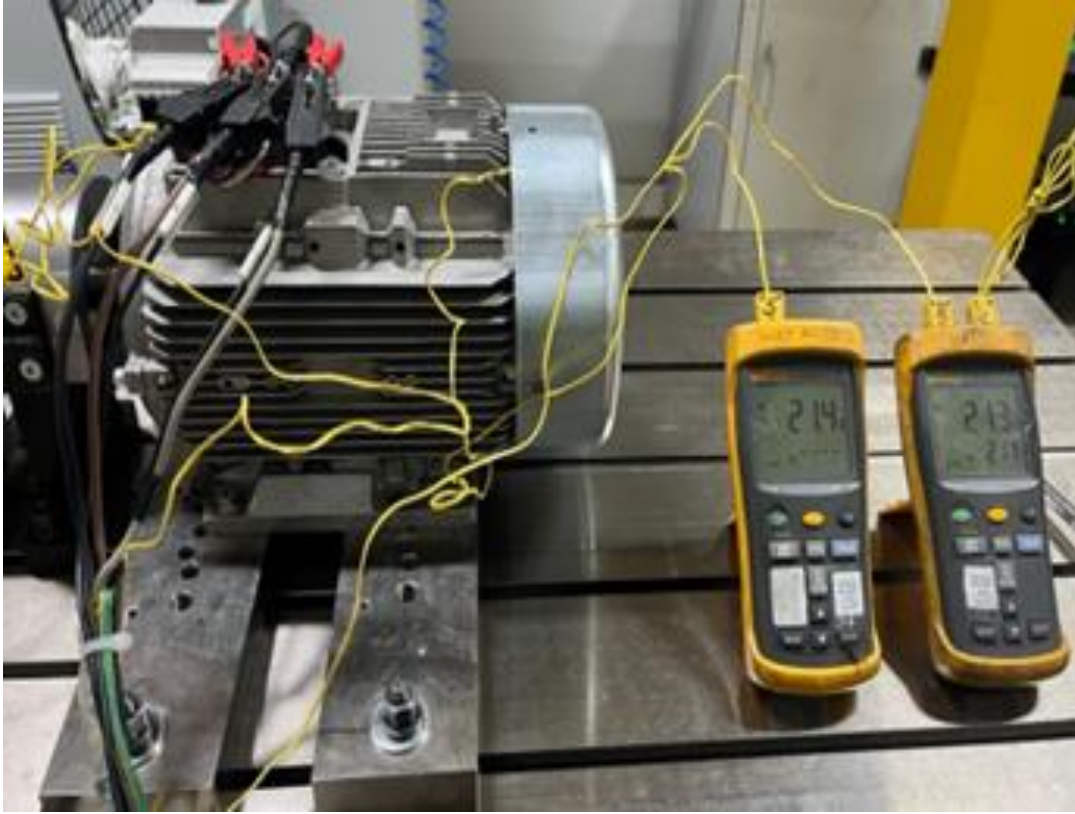
Eksenel sıcaklık artış haritası Şekil 3.18’de verilmiştir.



Toplu ısıl eşdeğer devre çizimi de şekil 3.19’da verilmiştir.

3.7 Laboratuvar Test Sonuçları ve SEA Test Sonuçları Karşılaştırma

Referans motorun IEC 60034-2-1 2-1-2b metoduna göre performans deneyi yapılmıştır. Bu performans deneyinde motorun sargı başına termokupl takılmıştır. İlave olarak ortam sıcaklığı gözlemlemek için ortam termokuplı da kullanılmıştır. Termokupllar motorun en sıcak olduğu düşünülen kısmı sargı başı içine yerleştirilmiştir. Elektrik motorlarında sıcaklık artışı ortam sıcaklığından bağımsız olduğu için kıyaslamayı kolaylaştırmakta ve sargıdaki en yüksek sıcaklık noktasına göre değerlendirme yapılmaktadır. IEC 60034-2-1 metod 2-1-2b göre referans motorun test düzeneği Şekil 3.20’teki gibi oluşturulmuştur.



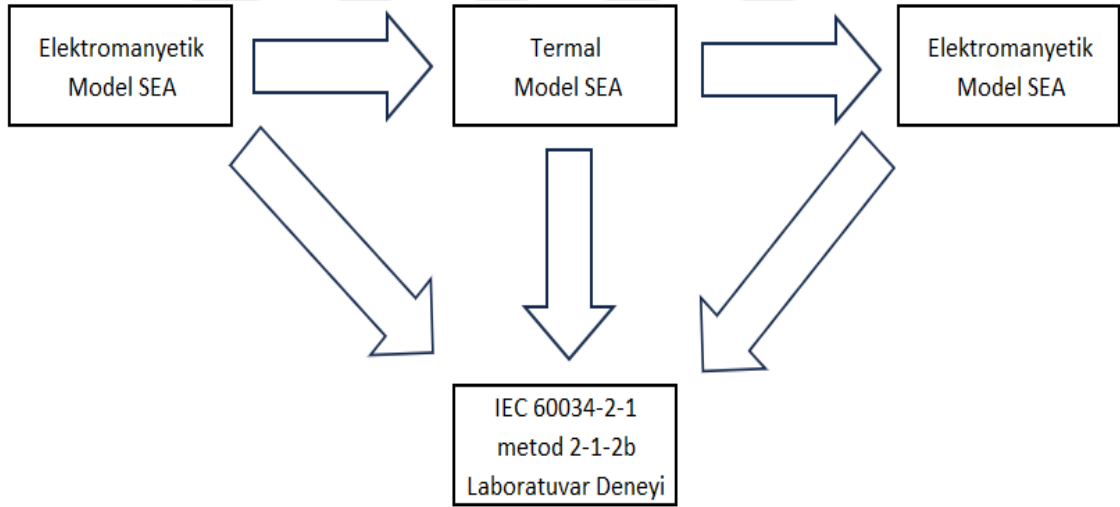
Şekil 3.20 : Referans ticari motor IEC 60034-2-1 metod 2-1-2b laboratuvar test düzeneği.

IEC 60034-2-1 metod 2-1-2b ve Ansys Motor-CAD sonlu elemanlar analizine göre referans motorun anma değerleri ve kayıpları analiz edilmiştir. Analiz ve deney sonuçlarına göre karşılaştırmalı tablo Çizelge 3.2’deki gibi hazırlanmıştır. TEFC modelde ilave test olmaması nedeniyle sürtünme ve vantilasyon kayıpları eşit olarak girilmiştir.

Çizelge 3.2 : Referans TEFC motor SEA ve deney sonuç karşılaştırma.

	Birim	SEA Sonuç	Deney Sonuç	% Fark
Hat Akımı	A	4,52	4,45	1,55
Hız	rpm	2919	2920	0,03
Tork	N.m	7,20	7,19	0,14
Verim	%	85,22	85,27	0,06
Sıcaklık artışı	K	59,5	59,4	0,17
Giriş gücü	W	2584,4	2582,0	0,09
Çıkış gücü	W	2202	2202	0,00
Güç faktörü	-	0,83	0,84	1,20
Stator kayıpları	W	186,3	188,5	1,18
Rotor kayıpları	W	62,7	62,6	0,16
Sürtünme kayıpları	W	16	16,25	1,56
Ventilasyon kayıpları	W	16	16,25	1,56
Demir Kaybı	W	67,8	64,6	4,72
İlave Kayıplar	W	33,1	32,2	2,72

Elektromanyetik model, ısı model ve deney modellerinin eşlenik bir şekilde çözümü ile güvenilir bir sonuç ortaya çıkarılmıştır. Şekil 3.21’de çalışma methodolojisi verilmiştir.



Şekil 3.21 : Referans model doğrulama metodu.

Bu güvenilir sonuçlarla diğer soğutma senaryoları sonlu elamanlar analizi ile Ansys Motor-CAD’de çözdürülmüştür.

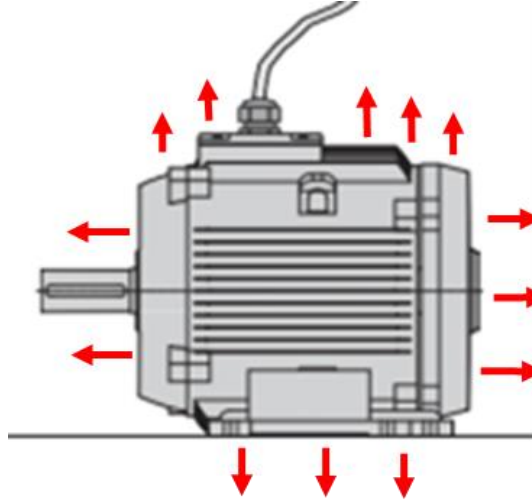


4. SOĞUTMA SENARYOLARI

Referans olarak TEFC olarak modellenen motor üzerine TENV, TEAO ve sıvı soğutma olmak üzere üç farklı soğutma senaryosu üzerinde analizler yapılmıştır. Soğutma senaryoları anma değerlerindeki farkları, kayıpları ve yüklenebilirliği anlamak amacıyla ilgili soğutma senaryolarında sabit güç ve sabit sıcaklık artışı sınır koşullarında sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sabit güç sınır koşulu 2,2kW belirlenirken sabit sıcaklık artışı sınırı TEFC çalışmadaki sıcaklık artışı olan 59,1 K olarak belirlenmiştir.

4.1 TENV Çalışma

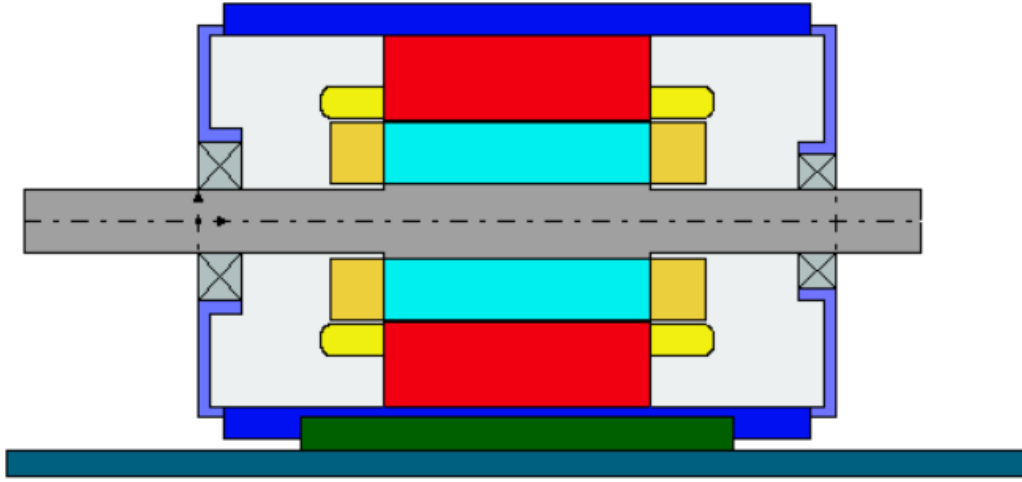
TENV modelde motor gövdesi doğal konveksiyon ile soğutulur. Motor gövdesi, kapaklar ve ayaklar üzerinden ortama ısı yayılmaktadır. Yani herhangi harici veya dahili bir soğutma kaynağı kullanılmamaktadır. TENV çalışma örnek Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : TENV çalışma modeli [40].

Güvenilir Ansys Motor-CAD referansı üzerinde TENV çalıştırmak için ısıl modelde pervane ve pervane muhafazası çıkarılmıştır. TENV çalışmanın eksenel görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir. İlave olarak dış soğutma opsiyonu doğal konveksiyon olarak

seçilmiştir. Herhangi harici veya dahili soğutma olmadığı için soğutma sistemi girişi yapılmamıştır.



Şekil 4.2 : TENV çalışma modeli eksenel model.

TENV çalışma motorun iç ısınmasını anlamak açısından kritiktir. TENV çalışmada motor doğal bir ısı kaynağı gibi davrandığı bilinmektedir. TENV çalışma sürtünme ve ventilasyon kayıplarını birbirinden ayırmak için kritiktir. TENV çalışmada fan olmadığı için sürtünme ve ventilasyon kayıpları ($P_{s\&v}$) doğrudan sürtünme kayıplarına ($P_{sürtünme}$) eşittir. Ventilasyon kayıpları ($P_{ventilasyon}$) sıfırdır. Referans ticari motor laboratuvar koşullarında fansız ve fan kapaksız test edilmiştir. Buna göre sürtünme kayıpları S1 testinde 12,9 watt olarak kaydedilmiştir. Bu da TEFC çalışmada ventilasyon kayıplarının 19,6 watt olduğu tespit edilmiştir. Denklem 4.1’de sürtünme ve ventilasyon kayıplarına ait denklem verilmiştir.

$$P_{s\&v} = P_{sürtünme} + P_{ventilasyon} \quad (4.1)$$

4.1.1 2,2kW sabit güç altında

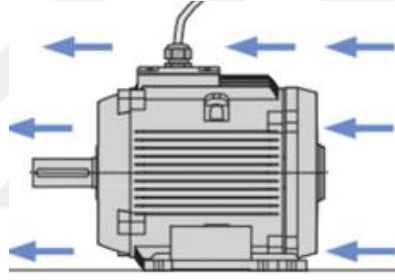
TENV çalışmada ilk olarak 2,2 kW sabit güç altında motor test edilmiştir. Herhangi bir soğutma olmadığı için simülasyon F sınıfı sıcaklık artışı ısı limitli olan 105K’ya denk gelen güç iterasyonlar sonucu tespit edilmiştir. Tespit edilen güçte elektromanyetik ve ısıl tarafta değerler yakınsayana kadar sonlu elemanlar analizi yapılmıştır.

4.1.2 Sabit sıcaklık artışı altında

İkinci senaryonda TEFC soğutmanın sahip olduğu 59,1 K sıcaklık artışına denk gelen güç iterasyon yardımı ile bulunmuştur. Bulunan güç elektromanyetik ve ısıl değerler yakınsayana kadar sonlu elemanlar yöntemi ile bulunmuştur.

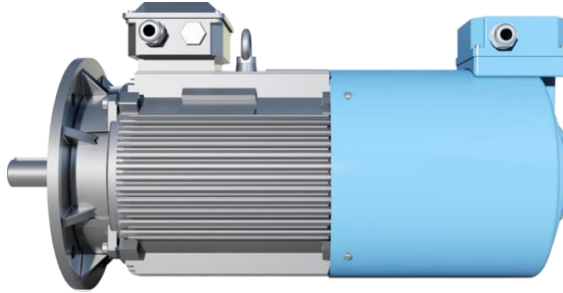
4.2 TEAO Çalışma

TEAO soğutma şekli bir çeşit zorlandırılmış soğutma biçimi olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada motor gövdesi üzerinden hava akışı sağlanarak motor soğutması sağlanmaktadır. Bu çalışma biçimi doğrudan hava akışı olan bir ortamda olabilmektedir. Bu durumda herhangi bir pervane muhafazası olmadan doğrudan üzerinden belirli bir hızda hava akışı geçirilmektedir. Bu yöntem hava akışı belirli bir fin aralığında akmadığı için soğutma verimsizliği yarattığı bilinmektedir. Şekil 4.3'te örnek görsel verilmiştir.



Şekil 4.3 : TEAO çalışma modeli açık ortam soğutma [40].

İlave olarak motor pervane muhafazasına harici eksenel fan motoru takarak da motor soğutması zorlanmış bir şekilde sağlanabilir. Bu motorun besleme gerilimi ana motordan bağımsız olup ve genelde sabit debi ile çalıştırılmaktadır. Bu çalışma türünde harici fan motoru pervane muhafazası içinde olduğu için gövde soğutma kanalları etkili bir şekilde kullanılmaktadır. TEAO çalışma cebri fan modeline ait görsel Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 : TEAO çalışma modeli cebri pervane soğutma [41].

Ansys Motor-CAD ısıl arayüzünde TEAO çalışma şeklinde çalışmak için TENV çalışmada olduğu gibi motor üzerindeki pervane ve pervane muhafazası çıkarılmıştır. İlave olarak dış soğutma opsiyonu yüzeyden hava üfleme olarak seçilmiştir. Sürtünme ve vantilasyon kayıpları TENV çalışmadaki gibi direkt sürtünme kaybına eşit olarak girilmiştir. TEAO çalışmada dört farklı senaryoda SEA yapılmıştır.

4.2.1 9 m/s hızla hava geçirilerek sabit güç altında

Bu çalışmada referans motor üzerinden 9 m/s hava geçirilerek 2,2 kW'da elektromanyetik ve ısıl olarak sonlu elemanlar analizi değerler yakınsayana kadar SEA yapılmıştır. Bu çalışmada motor üzerinde herhangi bir pervane muhafazası kullanılmamıştır. Motor gövde soğutması gövde üzerinden hava geçirme olarak seçilmiştir. İlave olarak motorda doğal konveksiyon parametresi açık bırakılmıştır.

4.2.2 30 m/s hızla hava geçirilerek sabit güç altında

Bu çalışmada referans motor üzerinden 30 m/s hava geçirilerek 2,2kW'da elektromanyetik ve ısıl olarak sonlu elemanlar analizi değerler yakınsayana kadar SEA yapılmıştır. Bu çalışmada motor üzerinde herhangi bir pervane muhafazası kullanılmamıştır. Motor gövde soğutması üzerinden gövde üzerinden hava geçirme olarak seçilmiştir. İlave olarak motorda doğal konveksiyon parametresi açık bırakılmıştır.

4.2.3 Cebri fan katalog verisiyle sabit güç altında

Ansys Motor-CAD'de doğrudan bir cebri fan tasarımı ile zorlanmış soğutma yapılamamaktadır. Bu nedenle bu simülasyonu tamamlamak için ilk etapta motor TEFC gibi pervaneli ve pervane muhafazalı tasarlanmıştır. TEFC çalışmada akış hızı fan hızı ile orantılı bir şekilde giriş yapılmıştır. TEAO çalışma için ise hava akış hızı sabit olarak seçilmiştir ve soğutma performansı motor devrinden bağımsızlaştırılmıştır. İlave olarak motorda doğal konveksiyon parametresi açık bırakılmıştır. Cebri fan verisi Çizelge 4.1'de belirtilen 0,0717 m³/s olarak 90 karkas yüksekliğine uygun seçilerek 2,2 kW'da SEA gerçekleştirilmiştir. 90 karkas yüksekliğinde en yüksek debiye sahip olan cebri fan tercih edilmiştir.

Çizelge 4.1 : Cebri fan akış hızı katalog datası [42].

Karkas Yüksekliği	400V 50Hz 2p (m ³ /s)	460V 60Hz 2p (m ³ /s)	400V 50Hz 4p (m ³ /s)	460V 60Hz 4p (m ³ /s)
63	0,015	0,0192		
71	0,0217	0,0275		
80	0,0356	0,0419		
90	0,06	0,0717	0,0303	0,0361
100	0,0772	0,0911	0,0392	0,0456

4.2.4 30 m/s hızla hava geçirilerek sabit sıcaklık artışı altında

TEFC ile aynı sıcaklığa sahip olacak güçte SEA gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sadece 30 m/s hızında hava geçirilerek sağlanan modelde yapılmıştır. 30 m/s hızda yüklenebilirlik açısından değerlendirmek için SEA gerçekleştirilmiştir. Pervane muhafazası olmayan durumlarda ortaya çıkan verimsiz hava akışından dolayı sadece 30 m/s hızda olan modeldeki yüklenebilirlik analizi gerçekleştirilmiştir.

4.2.5 Cebri fan katalog verisiyle sabit sıcaklık artışı altında

Son olarak TEFC ile aynı sıcaklığa sahip olacak güçte SEA gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma 0,0717 m³/s cebri fan akışı sağlanan modelde yapılmıştır.

4.3 Sıvı Soğutma Çalışma

Mevcut modeli sıvı soğutmalı versiyona çevirmek için ilk etapta gövde tipi eksenel su ceketli olarak seçilmiştir. Daha sonrasında ise su ceketli ile ilgili mekanik veri girişi sağlanmıştır. Soğutucu malzeme olarak su seçilmiştir. Suyu ait akışkan özellikleri Çizelge 4.2'deki gibi verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Su akışkan verileri.

Akışkan Özellikleri	Birim	Değer
Isıl İletkenlik	W/m/°C	0,5933
Özkütle	kg/m ³	998,2
Özgül ısı	J/kg/ °C	4182
Kinematik vizkozite	m ² /s	1,004.10 ⁻⁶
Dinamik vizkozite	-	0,001002
Prandtl sayısı	-	7,064

Daha sonra su ceketine ait kanal verileri Ansys Motor-CAD referans kütüphaneden oluşturulmuştur. 16 kanal olarak tercih edilmiştir.

Su ceketli çalışmada sıvı akış hızı $0,0002 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak tercih edilmiştir. Akışkan sıvı sıcaklığı $20 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak giriş yapılmıştır. Isı aktarım methodları olarak doğal konveksiyon seçilmiştir. Soğutma sistemi olarak su ceketli gövde seçimi yapılmıştır. TENV ve TEAO çalışmada olduğu gibi ventilasyon kayıpları sıfır kabul edilmiştir. Su soğutma çalışmada iki farklı senaryoda çalışma SEA yapılmıştır.

4.3.1 Sıvı soğutma 2,2kW sabit güç altında

2,2kW'da elektromanyetik ve ısıl arayüzde sonuçlar yakınsayana kadar analiz edilmiştir.

4.3.2 Sıvı soğutma sabit sıcaklık artışı altında

Son olarak TEFC ile aynı sıcaklığa sahip olacak güçte SEA gerçekleştirilmiştir.

5. SINIR KOŞULLARI ALTINDA SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

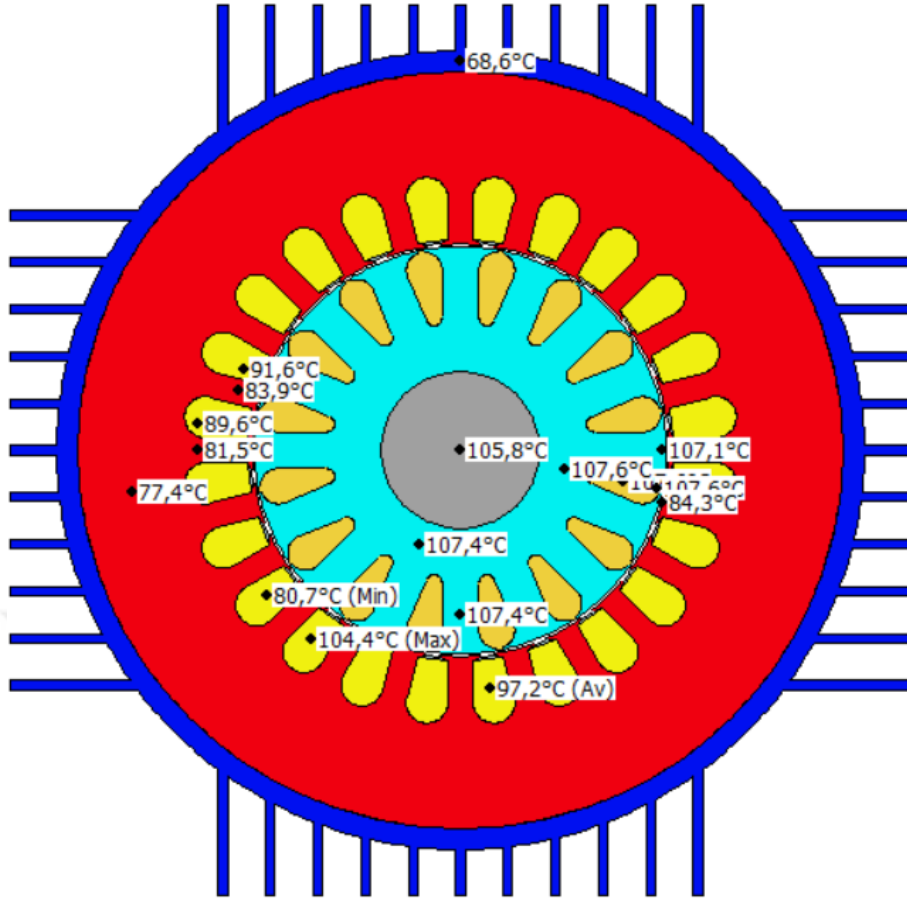
Referans ticari modeli TEFC analiziyle beraber TENV, TEAO ve su soğutma şeklinde dört farklı soğutma senaryosu gerçekleştirilmiştir. Anma değerlerini, verimi ve yüklenebilirliği anlamak için sonlu elemanlar analiz senaryoları sabit güç ve sabit sıcaklık artışı altında gerçekleştirilmiştir. Bu kısımdaki tüm sonuçlar ve kıyaslamalar Ansys Motor-CAD’de elde edilen güvenilir sonuçlar üzerinden sonlu elemanlar analizi ile yapılmıştır.

5.1 Sabit Güç Altında Analiz

Sabit güç altında çalışmada tüm soğutma modelleri 2,2kW çıkış gücünde analiz edilmiştir. Sabit güç altında çalışmanın amacı anma değerlerinin ve performansın değişimini gözlemleme amacıyla kurgulanmıştır.

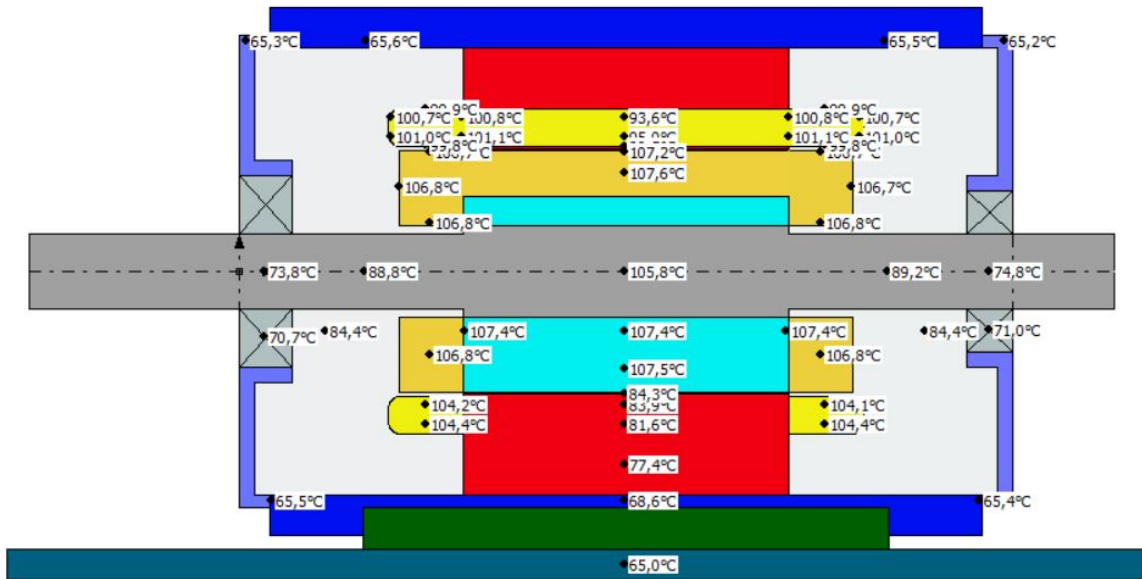
5.1.1 TENV sabit güç ısı analiz

TENV soğutma metodu 2,2kW çalışma altında ve yalıtım ısı sınırları altında tam yük durumuna gelemediği gözlemlenmiştir. TENV çalışmada motor yalıtım sıcaklık artışı limiti olan 105 K altında 2,1 kW’a kadar yüklenebildiği gözlemlenmiştir. Bu güçten daha fazla güçte yüklemek motorun yanmasına sebep olabilmesi nedeniyle termal limit olarak sınırlanmıştır. 2,1 kW’da TENV çalışma için SEA radyal sıcaklık artış haritası Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 : Radyal sıcaklık artış haritası TENV 2100 W.

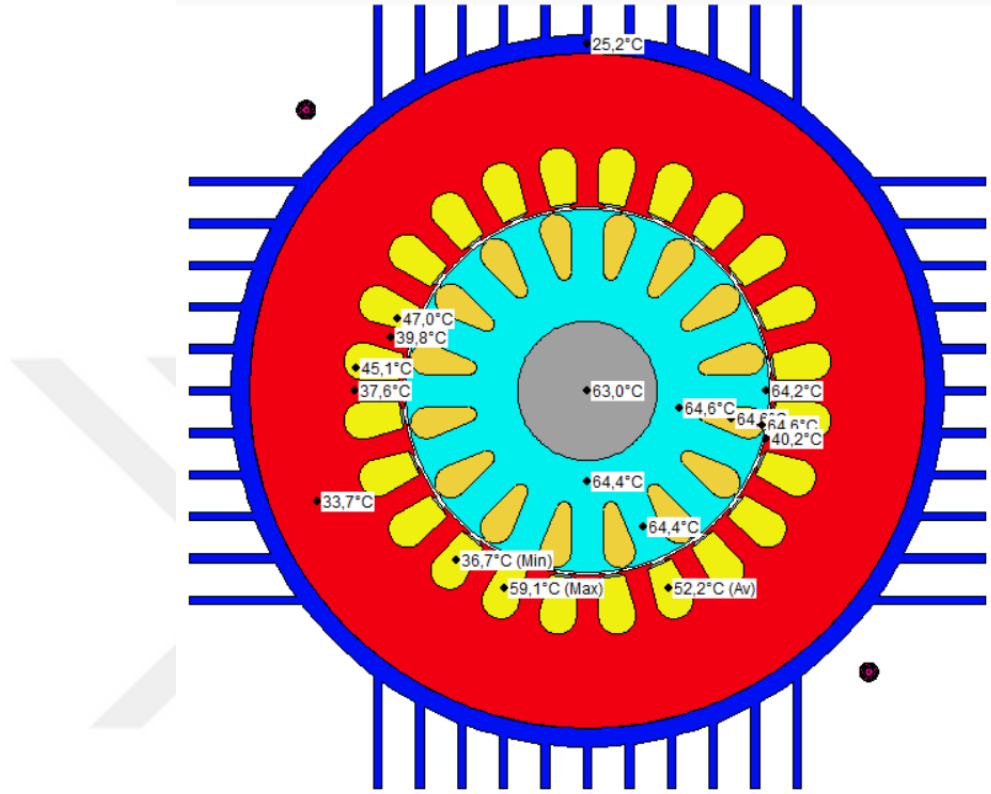
2,1 kW’da TENV çalışma için SEA eksenel sıcaklık artış haritası Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2 : Eksenel sıcaklık artış haritası TENV 2100 W.

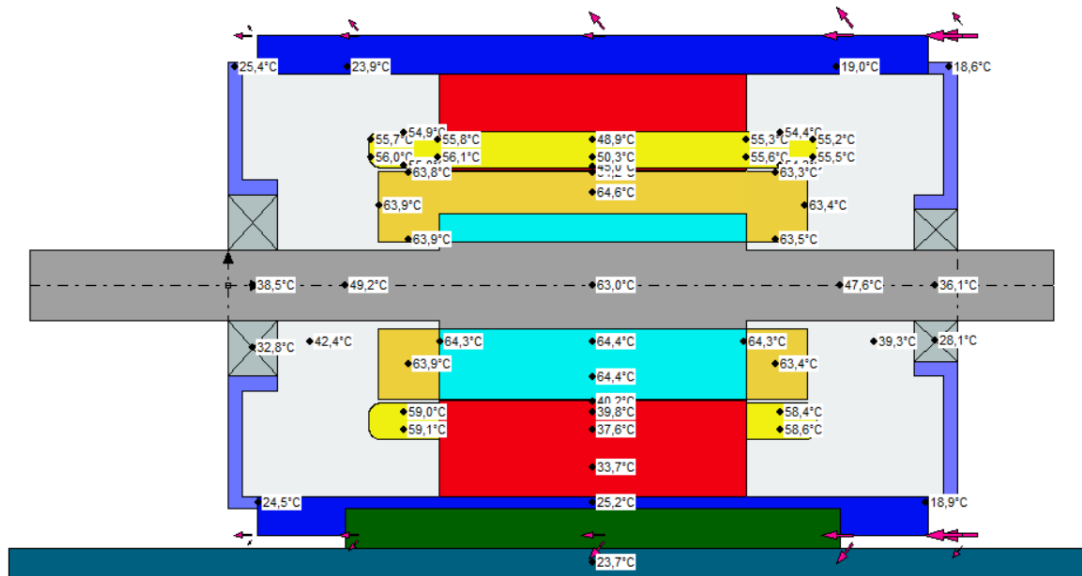
5.1.2 TEAO 9 m/s hızla sabit güç ısı analiz

TEAO çalışma 2,2 kW'da 9 m/s şiddetinde hava geçirilerek elektromanyetik ve ısı olarak değerler yakınsayana kadar SEA yapılmıştır. Şekil 5.3'te radyal sıcaklık artışı haritası verilmiştir. Sargı içerisinde sıcaklık artışı 59,1 K olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.3 : Radyal sıcaklık artışı haritası 9 m/s TEAO 2200 W.

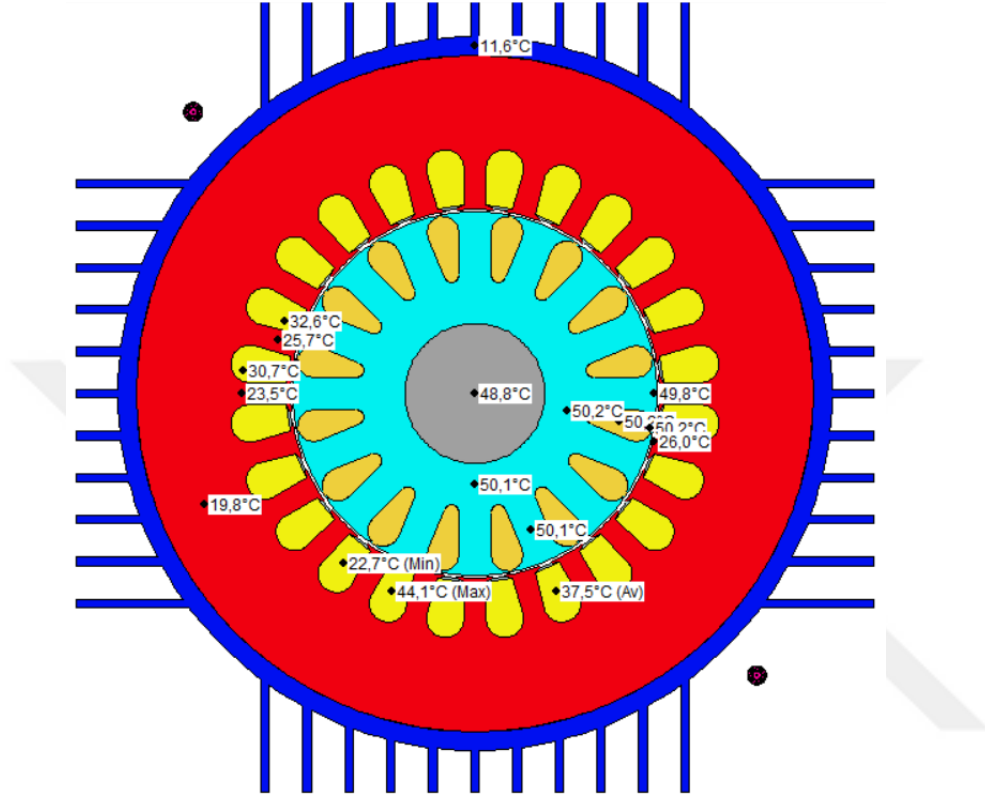
Şekil 5.4'te aksenal sıcaklık artışı haritası verilmiştir.



Şekil 5.4 : Aksenal sıcaklık artışı haritası 9 m/s TEAO 2200 W.

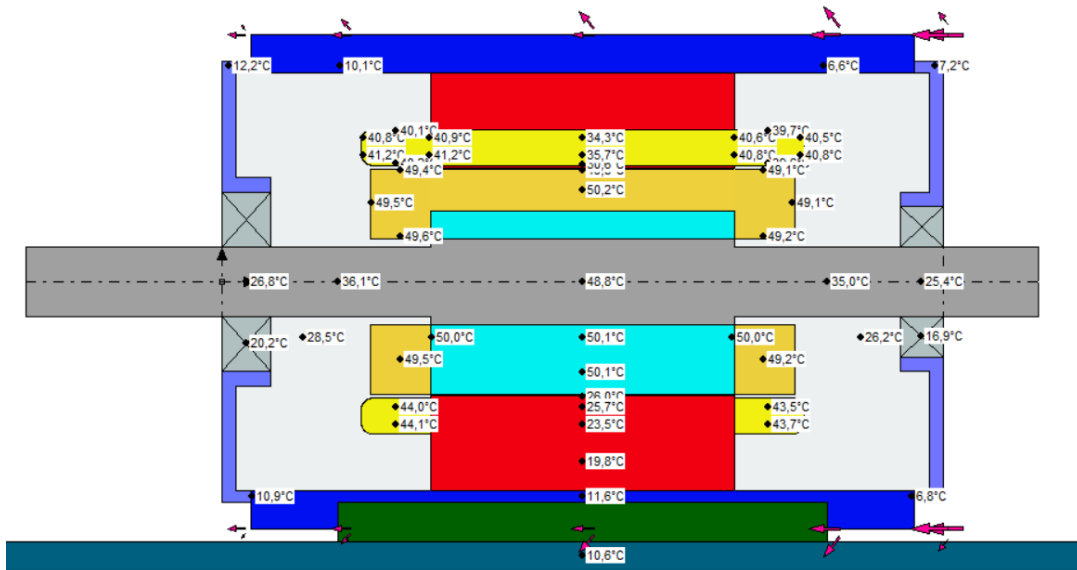
5.1.3 TEAO 30 m/s hızla sabit güç ısı analiz

TEAO çalışma 2,2 kW’da 30 m/s şiddetinde hava geçirilerek elektromanyetik ve ısı olarak değerler yakınsayana kadar SEA yapılmıştır. Şekil 5.5’te radyal sıcaklık artışı haritası verilmiştir Sargı içerisinde sıcaklık artışı 44,1 K olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.5 : Radyal sıcaklık artışı haritası 30 m/s TEAO 2200 W.

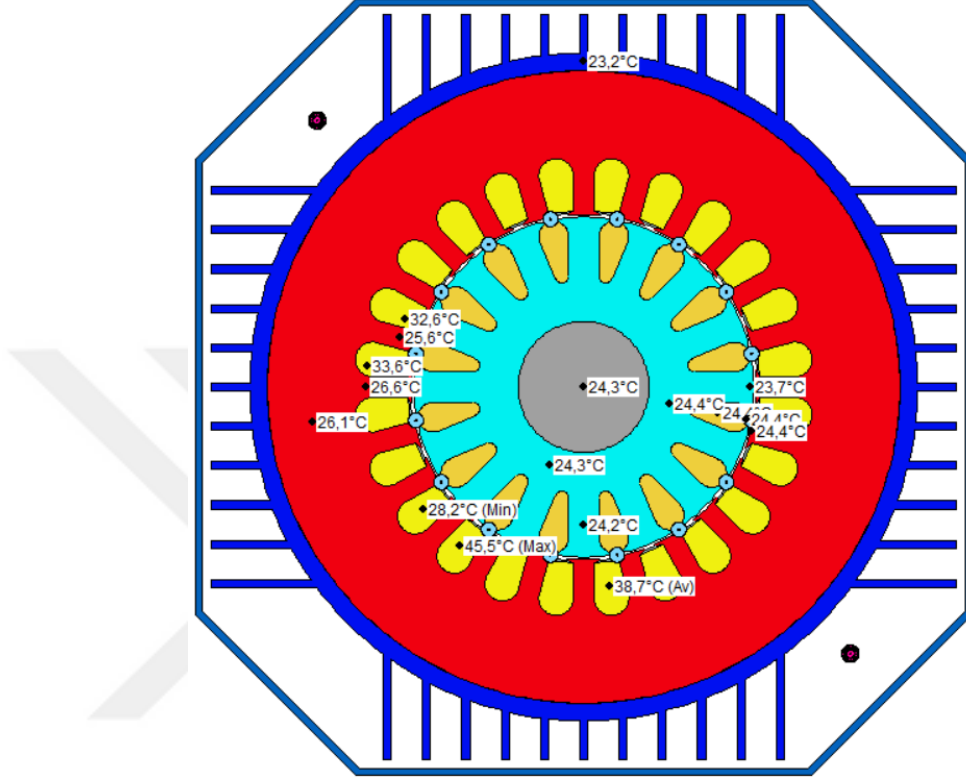
Şekil 5.6’da eksenel sıcaklık artışı haritası verilmiştir.



Şekil 5.6 : Eksenel sıcaklık artışı haritası 30 m/s TEAO 2200 W.

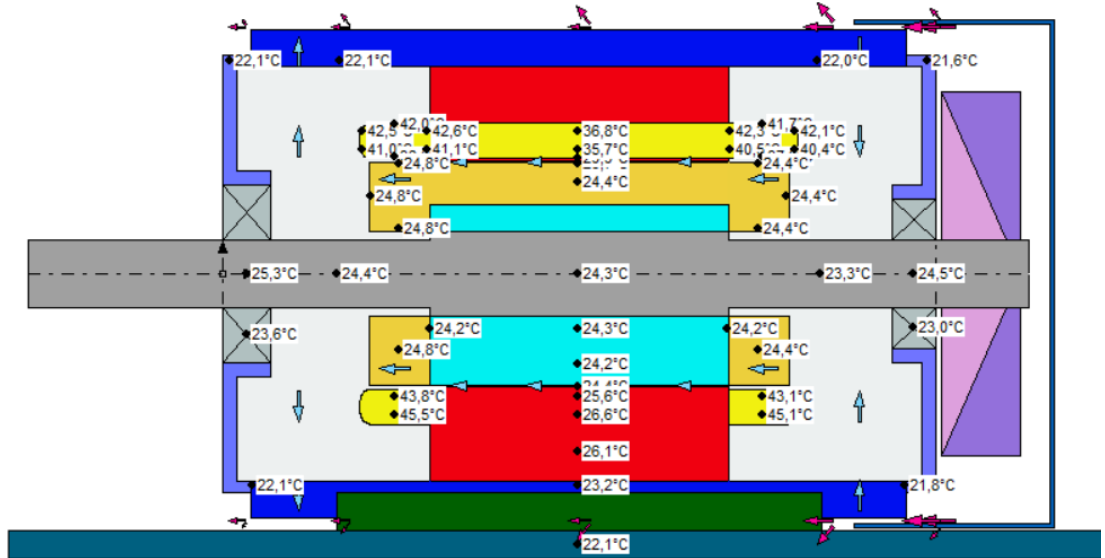
5.1.4 TEAO cebri fan sabit güç ısı analiz

TEAO çalışma 2,2 kW’da 0,0717 m³/s hava akışı sağlanarak elektromanyetik ve ısı olarak değerler yakınsayana kadar SEA yapılmıştır. Şekil 5.7’te radyal sıcaklık artışı haritası verilmiştir Sargı içerisinde sıcaklık artışı 45,5 K olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.7 : Radyal sıcaklık artış haritası TEAO cebri fan 2200 W.

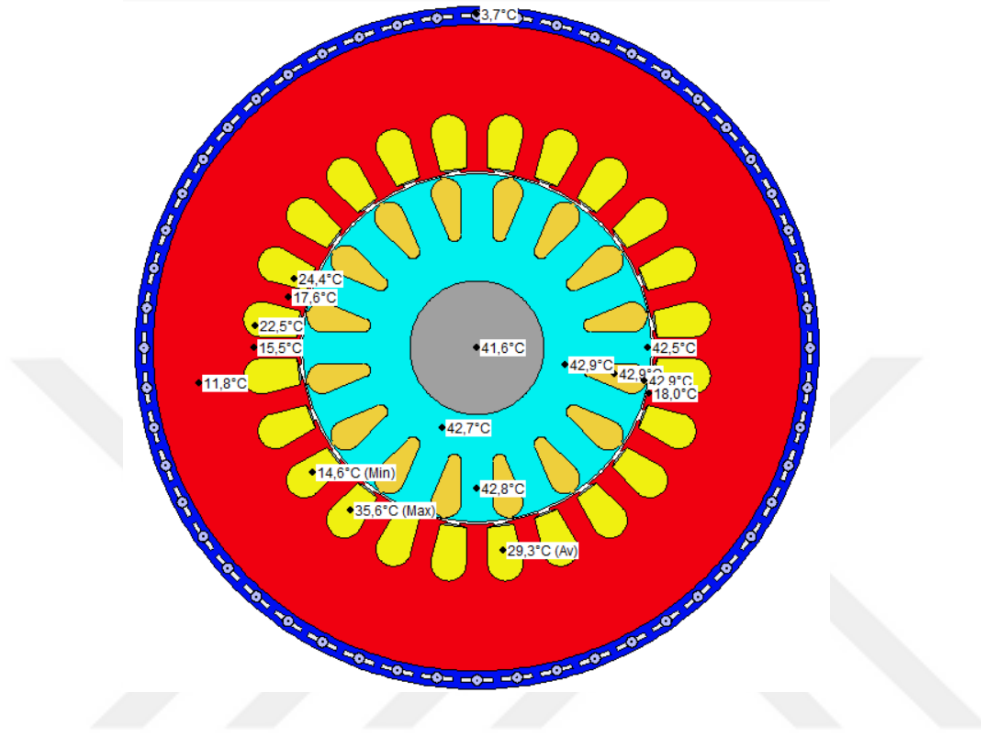
Şekil 5.8’da eksenel sıcaklık artışı haritası verilmiştir.



Şekil 5.8 : Eksenel sıcaklık artış haritası TEAO cebri fan 2200 W.

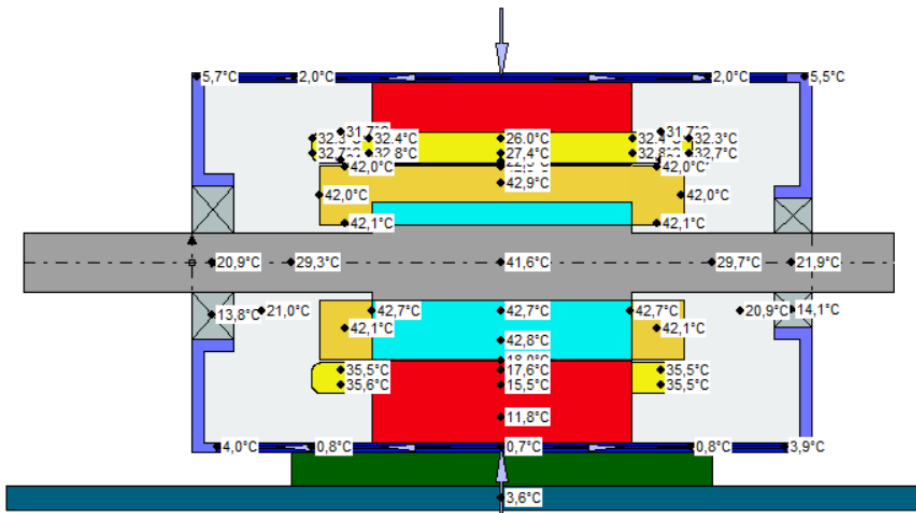
5.1.5 Su soğutma sabit güç ısı analiz

TEAO çalışma 2,2 kW’da 0,0002 m³/s su akışı sağlanarak elektromanyetik ve ısı olarak değerler yakınsayana kadar SEA yapılmıştır. Şekil 5.9’te radyal sıcaklık artışı haritası verilmiştir. Sargı içerisinde sıcaklık artışı 35,6 K olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.9 : Radyal sıcaklık artışı haritası su soğutma 2200 W.

Şekil 5.10’da eksenel sıcaklık artışı haritası verilmiştir.



Şekil 5.10 : Eksenel sıcaklık artışı haritası su soğutma 2200 W.

5.1.6 Tüm soğutma tiplerinin sabit güç altında performans verileri

Sabit güç altında performans verileri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Sabit güç altında farklı soğutma tiplerinin SEA performans sonuçları.

	Birim	TENV Soğutma	TEFC Soğutma	TEAO 9m/s Ortam Soğutma	TEAO 30m/s Ortam Soğutma	TEAO Cebri Fan Soğutma	Su Soğutma
Hat Akımı	A	4,35	4,52	4,49	4,49	4,49	4,49
Tork	N.m	6,90	7,20	7,21	7,20	7,19	7,20
Hız	rpm	2905	2919	2913	2917	2924	2919
Verim	%	84,7	85,22	85,76	86,16	86,35	86,38
Sıcaklık artışı	K	104,4	59,5	59,1	44,1	45,5	35,6
Giriş gücü	W	2480	2584,4	2565,7	2553,4	2550,4	2549,6
Çıkış gücü	W	2100	2202	2200	2200	2200	2200
Güç faktörü	-	0,82	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82
Stator kayıpları	W	198,5	186,3	184,5	175,4	175,7	170,8
Rotor kayıpları	W	70,2	62,7	67,2	63,8	58,43	62,3
Sürtünme kayıpları	W	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9
Ventilasyon kayıpları	W	0	19,1	0	0	0	0
Demir Kaybı	W	67,5	67,8	68,0	68,3	68,2	68,4
İlave Kayıplar	W	31,3	33,1	32,8	32,8	32,8	32,8

5.2 Sabit Güç Altında Sonuçların Yorumlanması

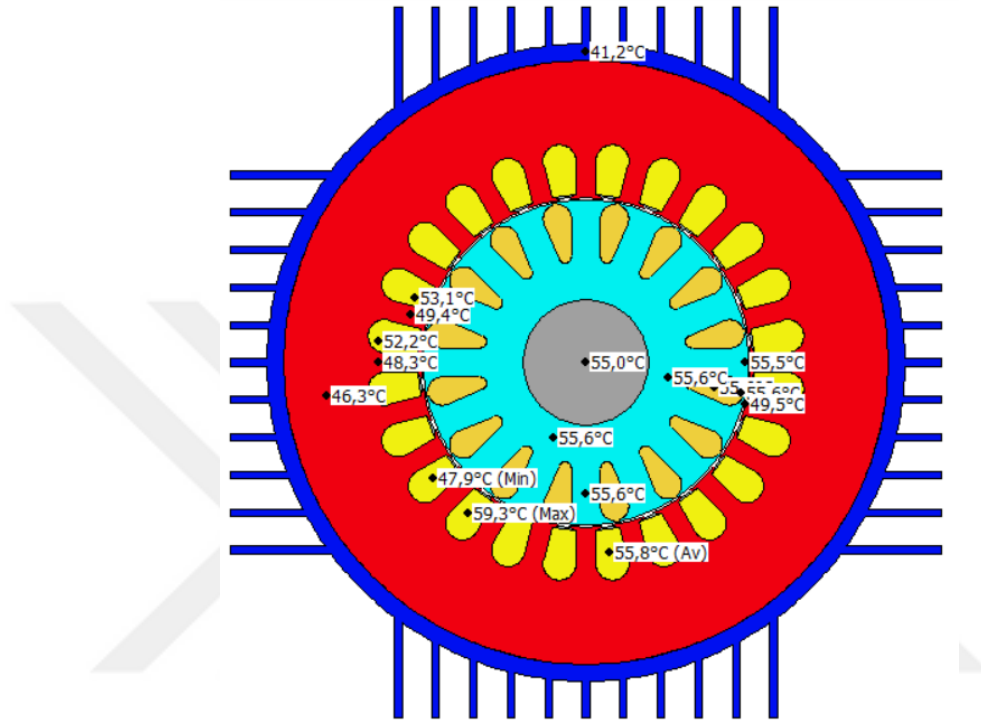
Sabit güç sınır koşulu altında toplamda altı farklı senaryo değerlendirilmiştir. Buna göre TENV model sınır koşulu olan 2,2 kW güce izolasyon termal sınırları içerisinde yükleme gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle kıyaslamaya dahil etmek doğru bulunmamıştır. TEAO soğutma 9 m/s ortam soğutma altında motor neredeyse TEFC kadar soğutma sağlanmıştır. Ventilasyon kayıpları sıfır olması nedeniyle TEFC'ye göre daha verimli sonuçlar elde edilmiştir. TEAO 30 m/s hız gerçekçi bir hava referansı olmamasına rağmen TEFC'ye göre 15,4 K daha az sıcaklık artışına sahip olunmuştur. TEAO ortam soğutmada gövde finlerinden geçen havanın dağılması nedeniyle efektif bir soğutma elde edilememiştir. İlave olarak rotor üzerinde de efektif bir soğutma sağlanamaması nedeniyle TEAO 30 m/s ortam soğutma olan koşul TEFC çalışmadan 1,1 W daha fazla rotor kaybı yaratılmıştır. TEAO cebri fan senaryosunda termal olarak TEFC ile benzer davranışta fakat daha efektif bir soğutma sağlanmıştır. TEAO cebri fan soğutma TEAO 30 m/s ortam soğutmaya göre 1,4 K daha fazla sıcaklık artışına sahip olmasına rağmen efektif rotor soğutması sayesinde daha verimli olarak gözlemlenmiştir. Bu durumda soğutma şiddetinin belirli bir yüzey alanı üzerinde efektif soğutma sağladığı düşüncesi ile desteklenmiştir. Son olarak su soğutmada kendisine en yakın TEAO 30 m/s ortam soğutmaya göre 8,5 K daha düşük sıcaklık artışı sergilenmiştir. Fakat su soğutmanın gövde üzerinde çok etkili olmasına rağmen motorun iç kısımlarına doğru verimsiz olduğu gözlemlenmiştir. Neredeyse TEFC çalışma kadar rotor kaybı sergilemesi nedeniyle verim, TEAO cebri fan senaryosuyla aynı seviyede sınırlanmıştır.

5.3 Sabit Sıcaklık Artışı Altında Analiz

Sabit sıcaklık artışı sınır koşulu için TEFC çalışmanın sıcaklık artışı olan 59,1K referans olarak alınmıştır. 59,1K'ya denk gelen güçler iterasyon yardımıyla bulunmuştur. Daha sonrasında ise elektromanyetik ve ısı sonlu elemanlar analizinde değerler yakınsayana kadar devam ettirilmiştir. Sabit sıcaklık altında karşılaştırmada TEFC, TENV, TEAO (30m/s), TEAO (cebri fan) ve su soğutma karşılaştırılmıştır. 9 m/s hızla hava üflemesi sağlayan TEAO model TEFC ile neredeyse aynı sıcaklık artışına sahip olduğu için kapsama dahil edilmemiştir. Isıl limit altında çalışma motorun yüklenebilirlik seviyesini anlamak için çok kritik olarak belirlenmiştir.

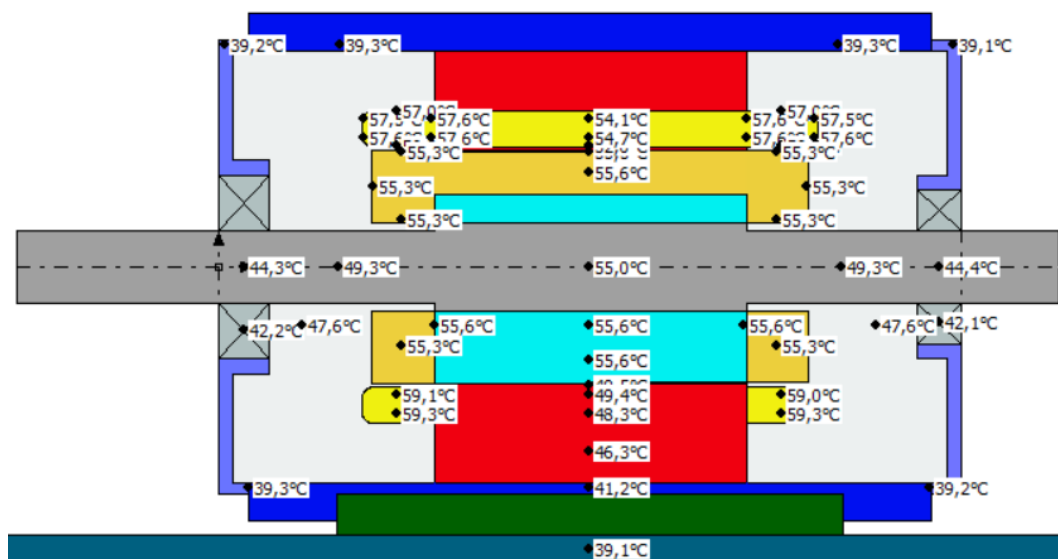
5.3.1 TENV sabit sıcaklık artışı ısı analiz

TENV soğutma metodu ile 59,1 K'ya denk gelen güç elektromanyetik ve ısı tarafta iterasyonlar yakınsayana kadar devam ettirilmiştir. Buna göre motor 1200 W çıkış gücünde 59,3 K sargı sıcaklık artışına ulaştığı görülmüştür. Radyal sıcaklık artışı haritası Şekil 5.11'da verilmiştir.



Şekil 5.11 : Radyal sıcaklık artış haritası TENV 1200 W.

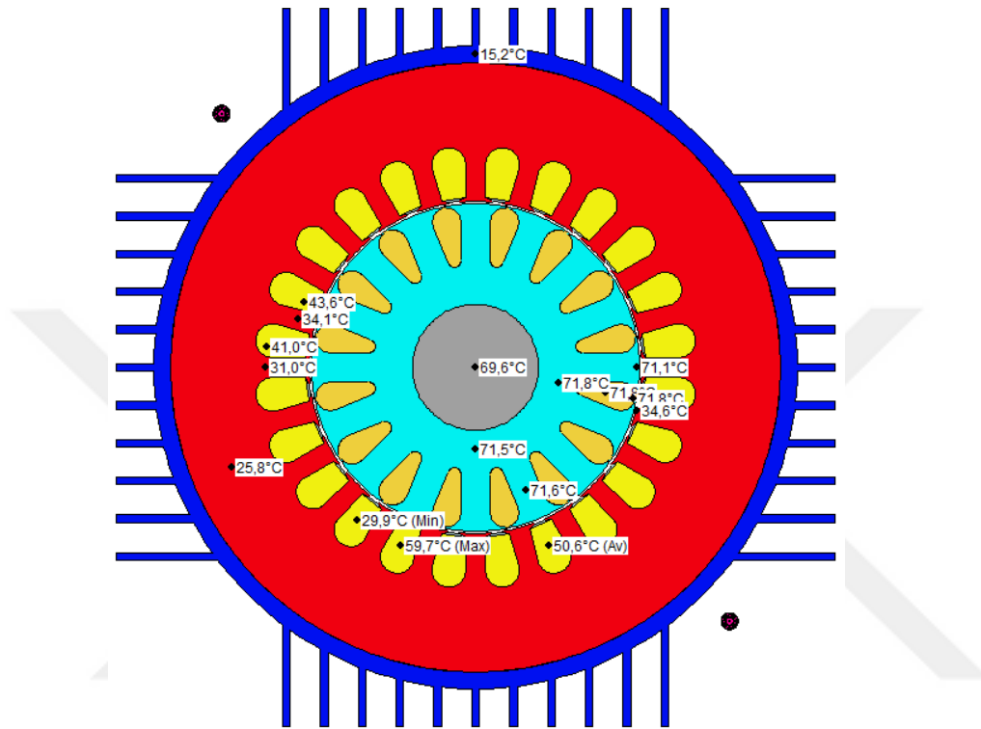
Şekil 5.12’da 1,2 kW’da aksel sıcaklık artışı haritası verilmiştir.



Şekil 5.12 : Eksenel sıcaklık artış haritası TENV 1200 W.

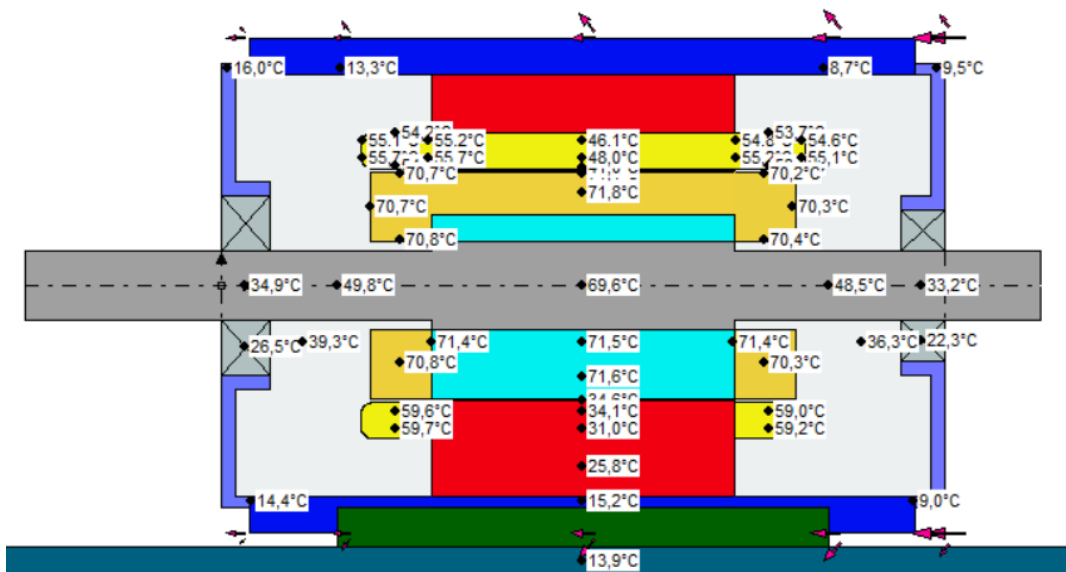
5.3.2 TEAO 30 m/s hızla sabit sıcaklık artışı ısıl analiz

TEAO 30 m/s soğutma metodu ile 59,1 K'ya denk gelen güç elektromanyetik ve ısı tarafta iterasyonlar yakınsayana kadar devam ettirilmiştir Buna göre motor 2625 W çıkış gücünde 59,7 K sargı sıcaklık artışına ulaştığı görülmüştür. Radyal sıcaklık artışı haritası Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.13 : Radyal sıcaklık artış haritası TEAO 30 m/s 2625 W.

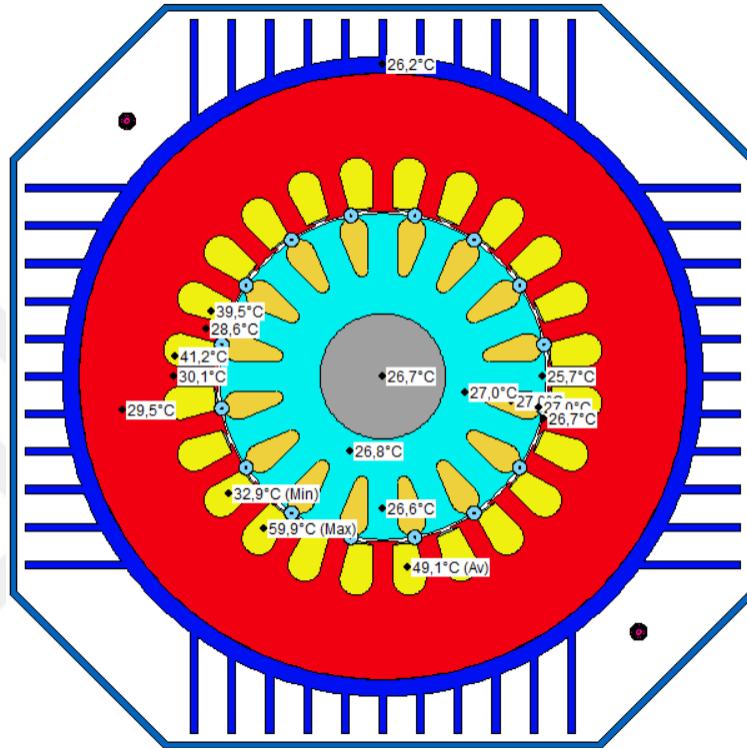
Şekil 5.14'te 2625 W'da eksenel sıcaklık artışı haritası verilmiştir



Şekil 5.14 : Eksenel sıcaklık artış haritası TEAO 30 m/s 2625 W.

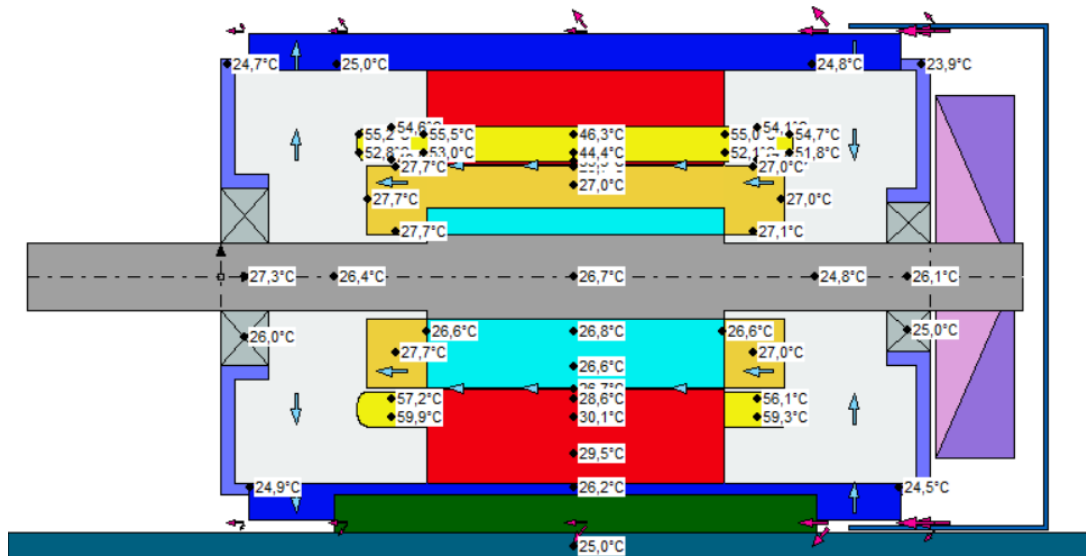
5.3.3 TEAO cebri fan sabit sıcaklık artışı ısı analiz

TEAO cebri fan 0,0717 m³/s hava akışı soğutma metodu ile 59,1 K'ya denk gelen güç elektromanyetik ve ısıt tarafta iterasyonlar yakınsayana kadar devam ettirilmiştir. Buna göre motor 2850 W çıkış gücünde 59,9 K sargı sıcaklık artışına ulaştığı görülmüştür. Radyal sıcaklık artışı haritası Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.15 : Radyal sıcaklık artış haritası TEAO cebri fan 2850 W.

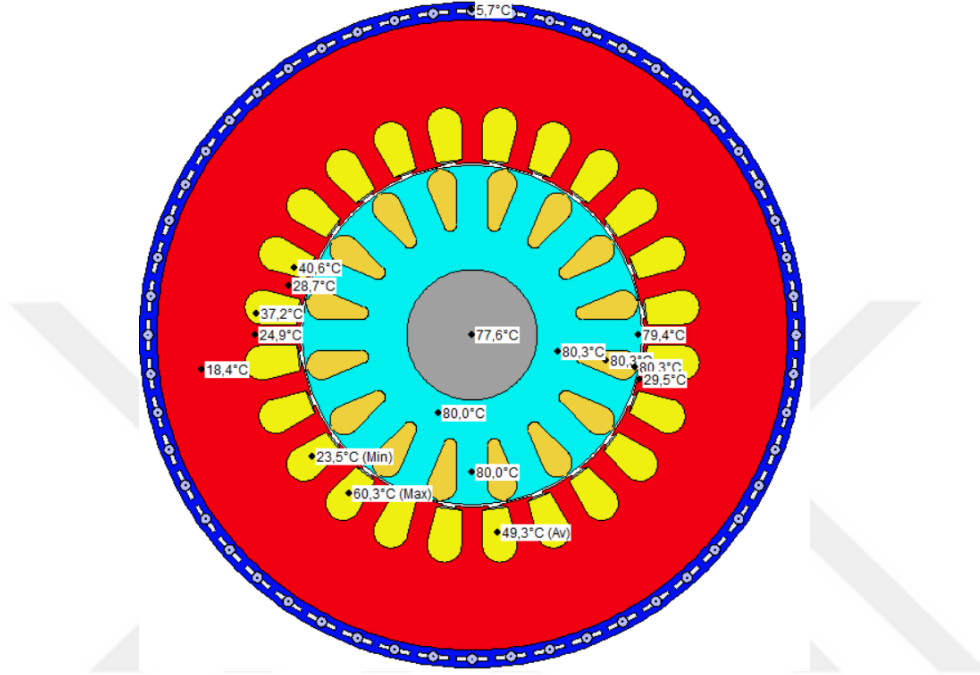
Şekil 5.16'te 2850 W'da eksenel sıcaklık artışı haritası verilmiştir.



Şekil 5.16 : Eksenel sıcaklık artış haritası TEAO cebri fan 2850 W.

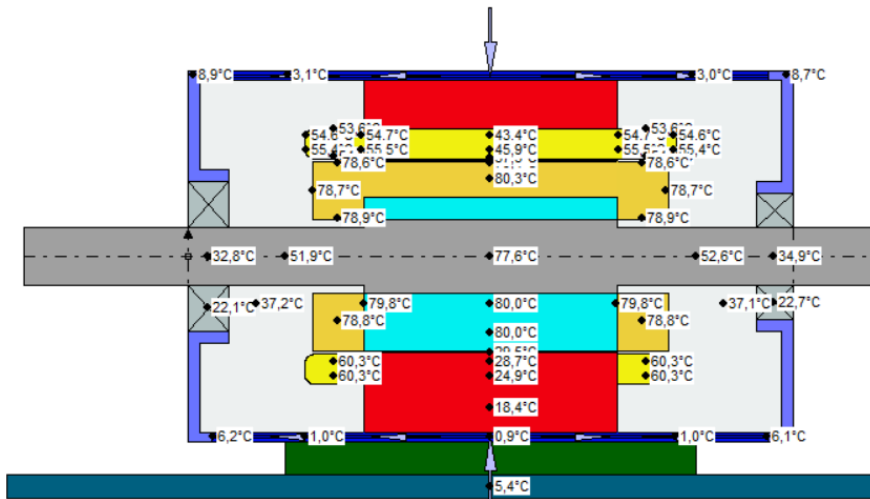
5.3.4 Su soğutma sabit sıcaklık artışı ısı analiz

Su soğutma 0,0002 m³/s sıvı akışı soğutma metodu ile 59,1 K'ya denk gelen güç elektromanyetik ve ısıl tarafta iterasyonlar yakınsayana kadar devam ettirilmiştir Buna göre motor 2950 W çıkış gücünde 60,3 K sargı sıcaklık artışına ulaştığı görülmüştür. Radyal sıcaklık artışı haritası Şekil 5.17'de verilmiştir.



Şekil 5.17 : Radyal sıcaklık artışı haritası su soğutma 2950 W.

Şekil 5.18'te 2950 W'da eksenel sıcaklık artışı haritası verilmiştir.



Şekil 5.18 : Eksenel sıcaklık artışı haritası su soğutma 2950 W.

5.3.5 Tüm soğutma tiplerinin sabit sıcaklık artışı altında performans verileri

Sabit sıcaklık artışı altında performans çalışmaları verileri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Sabit sıcaklık artışı altında farklı soğutma tiplerinin SEA performans sonuçları.

	Birim	TENV Soğutma	Referans TEFC Soğutma	TEAO 30m/s Soğutma	TEAO Cebri Fan Soğutma	Su Soğutma
Hat Akımı	A	3,26	4,52	5,17	5,52	5,73
Tork	N.m	3,88	7,20	8,68	9,40	9,81
Hız	rpm	2956	2919	2890	2896	2870
Verim	%	84,63	85,22	84,98	85,02	84,14
Sıcaklık artışı	K	59,3	59,5	59,7	59,9	60,3
Giriş gücü	W	1418,2	2584,4	3089,3	3352,3	3506,2
Çıkış gücü	W	1200	2202	2625	2850	2950
Güç faktörü	-	0,63	0,83	0,86	0,88	0,88
Stator kayıpları	W	98,3	186,3	243,3	275,8	297,4
Rotor kayıpları	W	18,2	62,7	102,0	104,7	135,9
Sürtünme kayıpları	W	13,1	12,9	12,8	12,8	12,7
Ventilasyon kayıpları	W	0	19,1	0	0	0
Demir Kaybı	W	70,4	67,8	66,9	66,1	66,1
İlave Kayıplar	W	18,0	33,1	39,09	42,4	43,9

5.4 Sabit Sıcaklık Artışı Altında Sonuçların Yorumlanması

Sabit sıcaklık artışı sınır koşulu altında toplamda beş farklı senaryo değerlendirilmiştir. Sabit sıcaklık artışı altında motorun yüklenebilirlik ve tork parametreleri kıyas açısından kritik olduğu bilinmektedir. TENV çalışmada motorun referans gücün %54,5'una yüklenebildiği gözlemlenmiştir. TEAO 30 m/s çalışma TEFC çalışmaya göre %19,3'lük bir güç artışı sağlanmıştır. TEAO cebri fanlı senaryoda ise motorun %29,5 daha fazla yüklendiği gözlemlenmiştir. Sabit güç altında TEAO 30 m/s soğutma TEAO cebri fan soğutmaya göre 1,4 K daha düşük sıcaklık artışı sergilemesine rağmen yüklenebilirlik olarak daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Su soğutma senaryosunda TEFC referansa göre %34'lük bir güç artışı sergilenmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada üç fazlı ticari tip geleneksel bir üç fazlı asenkron motorun dört farklı soğutma tipinde, sabit sıcaklık artışı ve sabit güç kısıtları altında, farklı akışkan hızlarında elektromekanik, mekanik ve ısıl başarımları hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmalı bir şekilde sunulmuştur.

Öncelikle günümüzde birçok avantajından dolayı popülaritesini koruyan referans bir üç fazlı asenkron motorun Ansys Motor-CAD'de elektromanyetik ve ısı analizleri TEFC olarak gerçekleştirilmiştir. İlave olarak IEC 60034-2-1 metod 2-1-2b laboratuvar deneyi gerçekleştirilmiştir. SEA ve laboratuvar sonuçlarının birbiri ile örtüşmesi sonucu Ansys Motor-CAD programı altında güvenilir bir elektromanyetik ve ısıl model oluşturulmuştur.

Güvenilir model üzerinden TENV, TEAO (ortam soğutma), TEAO (cebri fan) ve su soğutma senaryoları iki farklı sınır koşulunda elektromanyetik ve ısıl olarak değerler yakınsayana kadar SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. Standartlara göre sıcaklık artışı sargı içerisindeki en sıcak noktaya göre referans alınmıştır. Sıcaklık artışı cinsinden kıyaslamak ortam sıcaklığının ihmalı sağlanmıştır. Bununla birlikte analizler sırasında ortam sıcaklığı deneysel çalışma yapılan son ortam sıcaklığı olan 19,6 °C olarak girilmiştir.

İlk sınır koşulu olan sabit güç altında TEFC model referans alınarak tüm modeller 2,2 kW'da SEA yapılmıştır.

Buna göre TENV model soğutma kaynağından yoksun olduğu için 2,2 kW güce yalıtım ısı limitlerinden dolayı yüklem gerçekleştirilememiştir. 2,1 kW güç maximum güç olarak görülmüştür ve 104,4 K sıcaklık artışı elde edilmiştir. TENV senaryo referans güce yüklenemediği için performans olarak kıyaslama yapılmamıştır.

TEAO ortam soğutma senaryosunda 9 m/s hava akış hızında motor TEFC senaryosu kadar sıcaklık artışı sergilenmiştir. Verim olarak ise %0,54 daha verimli olarak gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni ise ventilasyon kayıplarının sıfır olmasından kaynaklanmaktadır. Rotor kayıplarının referans modele göre bir miktar yükseldiği

raporlanmıştır. Bunun nedeni olarak, rotor kısmında görülen ekstra ısınmadan kaynaklanmaktadır.

İkinci TEAO ortam soğutma senaryosunda 30 m/s hava akış hızında ise referans motora göre %0,94 verim artışı gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni stator kayıplarındaki azalma ve ventilasyon kayıplarının sıfır olmasından kaynaklanmıştır. Sıcaklık artışı olarak 15 K'lık bir azalma elde edilmiştir. Rotor kayıplarında ise TEFC model ile 1 W'lık bir fark olarak raporlanmıştır.

9 m/s ve 30 m/s hava akışı altında TEAO çalışmada TEFC'ye göre rotorun yeteri kadar soğutulamadığı net bir şekilde görülmüştür. Bu da belirli bir hız altında TEAO'da bir verimsizlik olarak gözlemlenmektedir. Bunun temel nedeninin havanın gövde üzerindeki finlerde tam akış sağlayamaması olarak görülmektedir.

Son TEAO senaryosunda ise harici bir motorlu cebri fan ve pervane muhafazası ile soğutma gerçekleştirilmiştir. Soğutma hava akış parametresi referans bir katalogdaki aynı karkas yükseliğine uygun bir cebri fan verisi kullanılmıştır. Cebri fan çalışması Ansys Motor-CAD'de buna uygun bir modül olmaması nedeniyle TEFC çalışma şekliyle aynı geometride fakat sabit hava akışı ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre TEAO 30 m/s çalışmaya göre 1 °C daha fazla sıcaklık artışına sahip olmasına rağmen %0,19 daha verimli olarak çalıştığı gözlemlenmektedir. Bunun nedeni ise aktif rotor soğutmasından kaynaklanmaktadır ve rotordaki 5,4 W'lık daha az kayıptan kaynaklanmaktadır. TEFC çalışmaya kıyasla ise 14 K'lık bir sıcaklık artışında düşüş elde edilmiştir.

Son olarak aynı güçte su ceketı tasarımı yapılarak su soğutma durumu için SEA yapılmıştır. Su soğutmada ise TEFC modele göre 23,9 K'lık bir sıcaklık artışı avantajı sağlandığı görülmüştür. Bu sıcaklık düşüşüne rağmen rotor kayıpları referans TEFC model kadar gerçekleştiği görülmüştür. Su ceketleri tamamen gövde yüzeyine etkili olduğu için sargı ve rotor arasında ciddi sıcaklık farkları gözlemlenmiştir. Motor verimi TEAO cebri soğutma ile hemen hemen aynı seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Su soğutma düzeneğinin stator sargılarında ciddi iyileştirmeler sağlamasına rağmen kayma parametresinde iyileşmenin sınırlı kaldığı tespit edilmiştir.

Son olarak sabit sıcaklık artışı sınırı koşulu altında SEA'lar TENV, TEAO (30 m/s), TEAO (cebri soğutma) ve su soğutma için gerçekleştirilmiştir. TEAO (9 m/s) hava akışı altında SEA TEFC ile neredeyse aynı sıcaklık artışına sahip olduğu için

kıyaslamaya dahil edilmemiştir. Sabit sıcaklık artışı sınır koşulu 59,1 K olarak belirlenmiştir. Sabit sıcaklık sınır koşulu ısı yüklenebilirlik ve tork değeri açısından kritik parametre olarak belirlenmiştir. Isıl bir çalışma olduğu için elektriksel yüklenebilirlik ihmal edilmiştir.

Buna göre TENV sadece konveksiyon ile ısı atımı yapabildiği için %46'lık bir güç düşümü yaşanmıştır.

TEAO 30 m/s hava hızı altında %19 daha fazla yüklenebilirlik elde edilmiştir. Tork olarak ise %20'lik bir tork artışı sağlanmıştır.

TEAO cebri soğutma hava akışı altında %29,5'luk bir güç artışı elde edilmiştir. TEAO 30 m/s hava hızı referanstan 2,2 kW güçte daha yüksek sıcaklık artışı olmasına rağmen daha efektif rotor soğutması nedeniyle TEAO 30 m/s hava hızında çalışmaya göre %8,5'luk daha fazla yüklenebilir olarak tespit edilmiştir.

Son olarak su ceketli tasarım referans motora göre %34 daha fazla yüklenabilir olarak raporlanmıştır.

Çalışma sonucu olarak referans sıcaklık artışı altında su soğutmalı model ve TEAO cebri fanlı çalışma neredeyse IEC'deki bir üst güç ve bir üst 100 karkas olan 3 kW'lık model kadar güç sağlayabildiği tespit edilmiştir. Bu da özel uygulamalarda bu soğutma modelleriyle ve aynı dış çap sınır koşullarında kompaktlık sağlanabileceği görülmektedir. İlave olarak sürücüyle düşük hızlarda çalışmada TEAO ve Su Soğutma modellerinin daha yüksek tork almalarını destekleyebileceği konusunda indikasyon sağlamaktadır. Düşük soğutma performansı olan uygulamalarda TEAO cebri fan ve sıvı soğutma senaryolarının önemi daha dramatik bir şekilde gözlemlenebilir. TENV çalışmada sabit sıcaklık artışı altında ise neredeyse IEC'deki bir alt karkas yüksekliğinin gücü olan 1,1kW'da çalışabilmektedir.

Sonuç olarak TEAO ve su soğutmalı modellerin gövde ve stator ısı performansını olarak iyi sonuçlar verdiği fakat rotor devri ve rotor kayıpları tarafında dezavantajlar sergilediği gözlemlenmiştir. Bunun aksine ventilasyon kayıplarının olmaması ve efektif gövde soğutma sayesinde daha düşük stator kayıplarının olması motor verimine olumlu olarak yansıdığı tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan akışkan, hava akışı, hava hızı ve tasarım parametreleri sonuçlar açısından kritik olduğu görülmektedir. Bu parametrelerin farklı olması daha iyi veya kötü soğutma performansları ortaya koyabilmektedir. Çalışmada uygulama bazlı çalışmalarda doğru soğutmanın

avantajları, dezavantajları ve performans çıktıları üzerine bilgi vermektedir. Literatürde tekil soğutma türleri çalışmaları mevcutken soğutma türlerinin karşılaştırmalı olarak çalışması literatürde sınırlı bulunmaktadır. Bu çalışmayla farklı soğutma türlerinin farklı işletme kısıtları altında başarımları elde edilerek ve sonuçlar karşılaştırmalı bir şekilde sunularak literatüre katkıda bulunulmuştur.



KAYNAKLAR

- [1] **European Commission.** (2023). *Commission Regulation (EU) No 2023/3 of 3 January 2023 amending Regulation (EU) 2019/1781 laying down ecodesign requirements for electric motors and variable speed drives.* Official Journal of the European Union, L 2, 1.
- [2] **International Electrotechnical Commission.** (2014). *Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)* (IEC 60034-30-1). Retrieved from <https://www.iec.ch>
- [3] **Url-1** <<https://www.lafert.com/en/news-list/6/products/6/eu-ecodesign-regulation-20191781-even-more-stringent-motor-efficiency-requirements>>, erişim tarihi 15.12.2025.
- [4] **Fratta, A., Vagati, A., & Villata, F.** (1992). Permanent magnet assisted synchronous reluctance drive for constant-power application: Drive power limit. In *Proceedings of the International Motion Europe Conference* (pp. 196–203). Nuremberg, Germany.
- [5] **Ferreira, F. J. T. E., Baoming, G., & de Almeida, A. T.** (2016). Reliability and operation of high-efficiency induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52 (6), 4628–4637.
- [6] **Kaya, H., & Kocabas, D. A.** (2025). Determination of the change in rated values of an induction motor in S1 continuous operation considering cooling effects using finite element analysis. *Proceedings of the 9th International Conference on Engineering Technologies (ICENTE 2025)*, Konya, Turkey, November 20–22.
- [7] **Zhu, Y., Xiao, M., Lu, K., Wu, Z., & Tao, B.** (2019). A simplified thermal model and online temperature estimation method of permanent magnet synchronous motors. *Applied Sciences*, 9 (15), 3158.
- [8] **International Electrotechnical Commission.** (2010). *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance (IEC 60034-1)*. Retrieved from <https://www.iec.ch>
- [9] **Url-2** <https://en.wikipedia.org/wiki/Rotating_magnetic_field>, erişim tarihi 14.12.2025.
- [10] **Url-3** <https://www.teslasociety.com/hall_of_fame.htm>, erişim tarihi 14.12.2025.
- [11] **Boulter, E.A., & Stone, G.C.** (2004). Historical development of rotor and stator winding insulation materials and systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 20, 25-39.
- [12] **Underwriters Laboratories.** (2012). *Standard for systems of insulating materials- General* (UL 1446). Retrieved from <https://www.ulstandards.com>

- [13] **Url-4** <<https://www.techbriefs.com/component/content/article/33919-the-heat-is-on-a-guide-to-specifying-insulation-materials>>, erişim tarihi 11.12.2025.
- [14] **National Electrical Manufacturers Association.** (2024). Motors and generators (ANSI/NEMA MG 00001-2024). Retrieved from <https://www.nema.org>
- [15] **Stone, G. C., Culbert, I., Boulter, E. A., & Dhirani, H.** (2014). Electrical insulation for rotating machines: Design, evaluation, aging, testing, and repair (2nd ed.). Hoboken, NJ: IEEE Press/Wiley. doi:10.1002/9781118820116.
- [16] **Fabiani, D., Montanari, G. C., & Simoni, L.** (2004). Aging acceleration of insulating materials for electrical machine windings supplied by PWM inverters. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 11(3), 393–403. doi:10.1109/TDEI.2004.1306721
- [17] **Url-5** <<https://www.wat.com.tr/resimler/katalog/wat-teknik-katalog.pdf>>, erişim tarihi 10.12.2025.
- [18] **Chapman, S. J.** (2011). *Electric machinery fundamentals* (5th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- [19] **Boldea, I.** (2016). *Electric machines: Steady state, transients, and design with MATLAB*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- [20] **International Electrotechnical Commission** (1991). *Rotating electrical machines – Part 6: Methods of cooling* (IC Code). (IEC 60034-6) Retrieved from: <https://www.iec.ch>
- [21] **International Electrotechnical Commission** (2021). *Rotating electrical machines – Part 31: Selection of energy-efficient motors including variable speed applications- Application guidelines*. (IEC TS 60034-31) Retrieved from: <https://webstore.iec.ch>
- [22] **Dong, X., Chen, S., Lei, Z., Zhu, Z., & Chen, Y.** (2023). Experimental study on fan aerodynamic noise variation characteristics under non-proportional variation law. *Sustainability*, 15 (3), 2025. doi:10.3390/su15032025
- [23] **Williams, B. W.** (2006). High performance cooling for power electronics (pp. 180–248). In *Power electronics: Devices, drivers, applications, and passive components* (Vol. 1). Retrieved from <https://personal.eee.strath.ac.uk/barry.williams/Book/Chapter%206.pdf>
- [24]. **Url-6** <<https://www.wistro.com/?cmd=products&co=en>>, erişim tarihi 25.12.2025.
- [25] **Incropera, F. P., & DeWitt, D. P.** (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [26] **Carriero, A., Locatelli, M., Ramakrishnan, K., Mastinu, G., & Gobbi, M.** (2018). *A review of the state of the art of electric traction motors cooling techniques*. Warrendale, PA, USA: SAE International.

- [27] **Gundabattini, E., Mystkowski, A., Idzkowski, A., Singh, R. R., & Solomon, D. G.** (2021). Thermal mapping of a high-speed electric motor used for traction applications and analysis of various cooling methods-A review. *Energies*, 14, 1472. doi:10.3390/en14051472
- [28] **Hubarek, S., Baratchi, S., Zhu, J. Y., Alshehri, M. A., Mitchell, A., Rebner, K., Karnutsch, C., & Khashayar Khoshmanesh, K.** (2019). Water jacket systems for temperature control of petri dish cell culture chambers. *Applied Sciences*, 9 (4),
- [29] **Url-7** <<https://www.boydcorp.com/blog/best-heat-transfer-fluids.html>>, erişim tarihi 28.12.2025.
- [30] **Zhao, A., Chen, H., Boßer, C., & Leksell, M.** (2024). FEM and CFD thermal modeling of an axial-flux induction machine with experimental validation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 53, 103879.
- [31] **International Electrotechnical Commission.** (2014). *Rotating electrical machines – Part 18-41: Partial discharge free electrical insulation systems (Type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters – Qualification and quality control tests.* (IEC 60034-18-41). Retrieved from <https://www.iec.ch>
- [32] **Url-8** <<https://www.abb.com/global/en/areas/motion/motors-generators/low-voltage-motors/iec-low-voltage-motors/process-performance-motors/water-cooled-motors>>, erişim tarihi 23.12.2025.
- [33] **Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D., Shanel, M., Mueller, M., & Mejuto, C.** (2009). Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(3), 871–882.
- [34] **Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D.** (2003). *Electric machinery* (6th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- [35] **International Electrotechnical Commission** (2024). *Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles).* (IEC 60034-2-1) Retrieved from: <https://webstore.iec.ch>
- [36] **Gürgöze, F.** (2002). *Kafesli asenkron motorların dinamik ısı modelini* (Yüksek lisans tezi). Retrieved from: <https://polen.itu.edu.tr/server/api/core/bitstreams/5ee660a5-0761-40a6-adc6-9294cb422aad/content>
- [37] **Ion Boldea.** (2010). Thermal modeling of electrical machines. CRC Press.
- [38] **A. Boglietti, E. Carpaneto, M. Cossale, A. Lucco Borlera, D. Staton and M. Popescu,** "Electrical machine first order short-time thermal transients model: Measurements and parameters evaluation," *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dallas, TX, USA, 2014, pp. 555-561, doi: 10.1109/IECON.2014.7048555.
- [39] **Salman, E.** (2011). *Üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun sıcaklık dağılımının çıkarılması* (Yüksek lisans tezi). Retrieved from: <https://polen.itu.edu.tr/server/api/core/bitstreams/7549b5c0-d632-4e3f-98d1-6e2951b9a0f8/content>

- [40] **Url-9** <<https://cms.elkmotor.com.tr/files/electric-motor-cooling-systems.pdf> >, erişim tarihi 23.12.2025.
- [41] **Url-10** <<https://stark-ventilation.com/>>, erişim tarihi 22.12.2025.
- [42] **Url-11** <https://www.wistro.com/media/volumen_2p4p_08-25.pdf>, erişim tarihi 22.12.2025.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Hasan KAYA

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği (İngilizce)

MESLEKİ DENEYİM:

- (2020 - şu an) WAT Motor Sanayi ve Ticaret A.Ş., Ar-GE Lider Mühendis
- (2017 - 2020) Omega Motor Sanayi ve Ticaret A.Ş., Ar-GE Mühendisi

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kaya, H., & Kocabas, D. A.** (2025). Determination of the change in rated values of an induction motor in S1 continuous operation considering cooling effects using finite element analysis. *Proceedings of the 9th International Conference on Engineering Technologies (ICENTE 2025)*, Konya, Turkey, November 20–22.