



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ASENKRON MOTORLAR İÇİN SOĞUTUCU FAN TASARIMI VE ANALİZİ

SÜMEYYE SAĞLAM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Prof. Dr. AHMET FENERCİOĞLU

Aralık- 2021

Her hakkı saklıdır.

T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ASENKRON MOTORLAR İÇİN SOĞUTUCU FAN TASARIMI VE ANALİZİ

SÜMEYYE SAĞLAM

TOKAT

Aralık- 2021

Her hakkı saklı

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.



Sümeyye SAĞLAM

27 Aralık 2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ASENKRON MOTORLAR İÇİN SOĞUTUCU FAN TASARIMI VE ANALİZİ

SÜMEYYE SAĞLAM

Yüksek Lisans, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. AHMET FENERCİOĞLU

Aralık 2021,88 Sayfa

Günümüzde endüstride kullanılan motorların yaklaşık %80 den fazlası asenkron motorlardır. Asenkron motorların fazlasıyla tercih edilen bir motor olmasının başlıca sebepleri verimli olması, maliyetinin düşük olması ve endüstride kolaylıkla bulunmasıdır. Bu projede, 2.2 kW gücünde, 4 kutuplu, 3 fazlı, sincap kafesli bir asenkron motor için bir soğutucu eksenel fan tasarımı analitik olarak yapılmıştır. Tasarım modeli sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile analiz edilerek tasarım doğrulaması sağlanmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve termal analizi tamamlandıktan sonra 3B yazıcıda, tasarlanan eksenel fanın baskısı alınmıştır. Laboratuvar da hazırlanan test düzeneği ile motor termal testleri yapılmıştır. Testler üç aşamada ve aynı şartlar altında tamamlanmıştır. İlk olarak asenkron motor fansız olarak çalıştırılarak sıcaklık artışı termal kamera ile takip edilmiştir. İkinci aşamada asenkron motor radyal fan ile test edilerek sıcaklık artışı aynı periyotlar ile takip edilmiştir. Son aşamada ise tasarlanan eksenel fan ile aynı şartlar altında ve düzenli periyotlar ile test edilmiştir. Tüm veriler termal kamera ile kontrol edilmiştir. Öngörülen eksenel fanın daha iyi soğutma yaptığı analiz ve test sonuçlarına göre doğrulanmıştır. Motorun nominal yükündeki çalışma şartları altında öngörülen eksenel fan ile orijinal fana göre ortalama değer olarak 2.8°C derece daha fazla soğutma yapmıştır. Bu durumda eksenel fanın yaklaşık % 4.4 soğutma performansını artırdığı görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: ASENKRON MOTOR, SOĞUTUCU FAN, CFD, TERMAL ANALİZ

ABSTRACT

COOLANT FAN DESIGN AND ANALYSIS FOR ASYNCHRONOUS MOTORS

SAĞLAM, SÜMEYYE

MASTER’S THESIS, DEPARTMENT OF MECHATRONICS ENGINEERING

SUPERVISOR:PROF.DR. AHMET FENERCİOĞLU

About 80% of the motors used in the industry today are asynchronous motors. The reasons why this engine is preferred are that its efficient, its cost is low and it is easily available in the industry. In this project, a cooling axial fan design will be made for a 4-pole, 3-phase, squirrel-cage asynchronous motor with a power of 2.2 kW. The design model will be analyzed by finite element method (FEM) and design verification will be provided. After the CFD and thermal analysis is completed, the designed axial fan will be printed on the 3d printer. Motor thermal tests will be carried out with the test setup prepared in the laboratory. The tests will be completed in three stages and under the same conditions. First, the asynchronous motor will be operated without a fan, the temperature increase will be monitored with a thermal imager. In the second stage, the asynchronous motor will be tested with a radial fan, and the temperature increase will be followed by the same periods. At the final stage, it will be tested under the same conditions as the designed axial fan and with regular periods. All data will be checked with a thermal camera. It will be verified according to analysis and test results thaht the proposed axial fan provides better cooling. Under the operating conditions at the rated load of the motor, the axial fan provided an average of 2.8°C more cooling than the original fan. In this case, it was observed that the axial fan increased the cooling performance by approximately 4.4%.
2021,88

KEYWORDS: ASYNCHRONOUS MOTOR, COOLANT FAN, CFD, THERMAL ANALYSIS

TEŐEKKÖR

Bu alışmanın ortaya ıkmasında fikir, g r ş ve  nerileri ile bana destek olan ve benden katkısını esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU hocama teőekk rlerimi sunarım.

Hayatım boyunca benden desteklerini hi esirgemeyen babam Mehmet SAĞLAM’a, annem Asya SAĞLAM’a, kardeşlerim Muammer ve Merve Nur SAĞLAM’a sonsuz teőekk r  borç bilirim.



S meyye SAĞLAM

27 Aralık 2021

İÇİNDEKİLER

İçindekiler

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
1.GİRİŞ	1
2. FANLAR.....	2
2.1 Fan Çeşitleri	2
2.1.1 Eksenel fanlar	3
2.1.2 Radyal fanlar.....	4
2.2 Fan Performans Karakteristikleri	5
2.2.1 Süreklilik eşitliği.....	5
2.2.2 Bernoulli eşitliği	5
2.3 Fan Kanunları.....	6
2.4 Fan Seçiminde Kullanılan Parametreler	7
2.4.1 Mutlak basınç.....	7
2.4.2 Basma yüksekliği.....	7
2.4.3 Fan gücü ve verimi	8
3. ASENKRON MOTORLAR.....	9
3.1 Asenkron Motorların Yapısı.....	10
3.1.1 Rotor	10
3.1.2 Stator	11
3.1.3 Gövde ve kapaklar	11
3.1.4 Yatak ve rulmanlar.....	12
3.1.5 Soğutma pervanesi	12
3.2 Asenkron Motorların Çalışma Prensibi	12
3.3 Asenkron Motorlarda Kayıplar	14
3.3.1 Bakır kayıpları	14
3.3.2 Demir kayıpları	15
3.3.3 Rüzgâr ve sürtünme kayıpları	15
3.4 Asenkron Motorlarda Verim	15
3.4.1. Motor etiket değerinden verim hesaplanması	16
3.5 Asenkron Motorlarda Soğutma.....	18
3.5.1 Asenkron motor soğutma yöntemleri	19
3.5.2 Motor standartları hakkında genel bilgiler.....	19
3.5.3 Soğutma şekilleri IEC	19
3.5.4 Motorların pervane ve muhafaza kapağı ile soğutulması	20
3.6 Asenkron Motorlarda Sıcaklık	21

3.6.1 Kondüksiyon.....	23
3.6.2 Konveksiyon	23
3.6.3 Radyasyon.....	24
3.7 Asenkron Motorlarda Soğutucu Fan	25
3.8 Soğutucu Pervanenin Yapıldığı Malzeme.....	26
3.9 Asenkron Motor Yapı Biçimleri.....	27
4. LİTERATÜR İNCELEMESİ	28
5. MATERYAL ve YÖNTEM	44
5.1 Proje de Kullanılan Asenkron Motor Özellikleri	44
5.1 Projede Kullanılan Kızılötesi Kamera	46
5.2 Fan Tasarımı	47
5.2.1 Fan çizimi	48
5.2.2 Tasarlanan eksenel fanın 3 boyutlu baskısı	50
5.3 Akış Analizi	51
5.3.1 Geometri	51
5.3.2 Mesh	52
5.3.3 Setup	57
5.3.4 Results	58
5.4 Termal Analiz.....	59
5.5 Termal Yükleme Testleri	60
5.5.1 Fansız çalıştırılan motor ile sıcaklık testi	61
5.5.2 Radyal fan ile motor sıcaklık testi	64
5.5.3 Tasarlanan eksenel fan ile motor sıcaklık testi	65
6. BULGULAR.....	66
6.1 Analiz Sonuçları.....	66
6.2 NEMA Standartlarında İzin Verilebilir Sıcaklıklar İçin Analiz.....	67
6.3 Termal Test Sonuçları.....	70
6.3.1 Fansız çalıştırılan motor ile sıcaklık test sonucu	70
6.3.2 Radyal fan ile motor sıcaklık test sonucu	73
6.3.3 Eksenel fan ile motor sıcaklık test sonucu	77
7. SONUÇ	81
8.KAYNAKLAR	85
9.ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
p	Basınç (Pa)
ρ	Özgöl Ağırlık (kg/m^3)
v	Hız (m/s)
z	Yükseklik (m)
D	Dış Çap (m)
n	Devir Sayısı (d/d)
ρ	Hava Yoğunluğu (kg/m^3)
L	Gürültü Seviyesi (dBA)
H	Basma Yüksekliği (mmSS)
ρ_{su}	Suyun Yoğunluğu ($998,3 \text{ kg/m}^3$)
g	Yerçekimi İvmesi ($9,81 \text{ m/s}^2$)
Q	Havanın Hacimsel Debisi (m^3/s)
ΔP_t	Basınç Farkı
P_v	Verilen Güç
P_A	Alınan Güç
P_{KA}	Kayıplar
U	Fazlar Arası Gerilim
I	Hat Akımı
$\cos\varphi$	Motor Güç Katsayısı
k	Isı İletim Katsayısı
q	Isı Akısı
∇T	Sıcaklık Farkı
q	Birim Zamanda Isı Transfer Miktarı
h	Taşınım Isı Transfer Katsayısı n
A	Isı Transfer Yüzey Alanı
T_y	Yüzey Sıcaklığı
T_h	Akışkan Sıcaklığı
σ	Stefan-Boltzman Sabit

Kısaltmalar**Açıklama**

CFD	Computational Fluid Dynamics
FEM	Finite Element Method
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IEC	International Electrotechnical Commission
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
TEFC	Tam Kapalı Fan Soğutmalı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
VSD	Değişken Hız Sürücüsü

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Asenkron motor eksenel fan örneği.....	3
Şekil 2.2. Asenkron motor radyal fan örneği.....	4
Şekil 3.1. Asenkron motor yapısı.....	10
Şekil 3.2. Motor yüzeyini genişletme amacıyla yapılan kaburgalar.....	11
Şekil 3.3. Lorentz kuvvet kanunu sol el kuralı	13
Şekil 3.4. Noktasal q yüklü parçacık	13
Şekil 3.5. Üç fazlı 2.2 kW lık asenkron motorun etiketi	17
Şekil 3.6. Pervane kapağının kaburgalara hava yöneltme boşlukları	21
Şekil 4.1. Karşılaştırmaları yapılan radyal ve eksenel fan tipleri	28
Şekil 4.2. Radyal fan ile hava akışı (Madej & Bedkowski, 2013).....	29
Şekil 4.3. Eksenel fan ile hava akışı (Madej & Bedkowski, 2013)	29
Şekil 4.4. Radyal fan kullanıldığında motor tarafının sıcaklık profili	30
Şekil 4.5. Eksenel fan kullanıldığında motor tarafının sıcaklık profili.....	30
Şekil 4.6. Bıçak sayısının maksimum akış katsayısı üzerine etkisi	31
Şekil 4.7. Roffi ve ark. (2017) fan tasarımları	33
Şekil 4.8. Asenkron motorlar ve soğutma fanları (Roffi & Ferreira, 2017)	34
Şekil 4.9. CFD akış diyagramı radyal fan (Roffi & Ferreira, 2017).....	34
Şekil 4.10. CFD akış diyagramı eksenel fan (Roffi & Ferreira, 2017).....	35
Şekil 4.11. Duman testi radyal fan (orta), eksenel fan (sağ).....	35
Şekil 4.12. C.Jang ve ark. fan tasarımları (C. Jang, 2019)	37
Şekil 4.13. Box-Behnken metodolojisi (Min Seok Kim, 2020).....	38
Şekil 4.14. Soğutma fanı faktörü (Min Seok Kim, 2020).....	38
Şekil 4.15. TEFC asenkron motorunun hava akış yolları (Ying Huai, 2003)..	40
Şekil 4.16. Asenkron motorunun sıcaklık dağılımı (Ying Huai, 2003).....	41
Şekil 5.1. Asenkron motor genel yapısı	44
Şekil 5.2. Projede kullanılan kızılötesi kamera.....	46
Şekil 5.3. Tasarlanan eksenel fanın asenkron motor üzerindeki montajı	47
Şekil 5.4. Tasarlanan eksenel fan teknik resmi.....	48
Şekil 5.5. Tasarlanan eksenel fanın perspektif görünümü	49
Şekil 5.6. Eksenel fan kanat açısı	49
Şekil 5.7. Eksenel fan kanat yüzey alanları	50
Şekil 5.8. Tasarlanan eksenel fanın 3d baskısı	50
Şekil 5.9. Asenkron motor üzerinde oluşturulan rüzgar tüneli	52
Şekil 5.10. Asenkron motor hava giriş çıkış yönü	53
Şekil 5.11. Motor duvarlarının wireframe görüntüsü	55
Şekil 5.12. Mesh görüntüsünden kesit	56
Şekil 5.13. Motor üzerindeki soğutma faktörleri	57
Şekil 5.14. Enerji (Scaled Residuals) Grafiği	58
Şekil 5.15. Motor üzerindeki hava temas noktaları	59
Şekil 5.16. Hazırlanan test düzeneği.....	60
Şekil 5.17. Fansız olarak çalıştırılan motor test düzeneği	61
Şekil 5.18. Motor başlangıç sıcaklığının termal kamera ile görüntüsü	62
Şekil 5.19. Test kontrol ekranı	63
Şekil 5.20. Test başlangıcındaki akım	63

Şekil 5.21. Test bitişindeki akım değerleri	63
Şekil 5.22. Radyal fan ile motor sıcaklık test düzeneği.....	64
Şekil 5.23. Tasarlanan eksenel fan için test düzeneği.....	65
Şekil 6.1. CFD analiz sonucu motor termal sıcaklığı	66
Şekil 6.2. Motor üzerindeki hava akış çizgileri	67
Şekil 6.3. Sıcaklık 80°C için termal analiz	68
Şekil 6.4. Sıcaklık 90°C için termal analiz	68
Şekil 6.5. Sıcaklık 105°C için termal analiz	69
Şekil 6.6. Sıcaklık 125°C için termal analiz	69
Şekil 6.7. Fansız olarak çalıştırılan motor sıcaklık grafiği	70
Şekil 6.8. Test bittiğinde fansız motor sıcaklığı	72
Şekil 6.9. Radyal fan sıcaklık grafiği.....	74
Şekil 6.10. Test bittiğinde radyal fanlı motor sıcaklığı.....	75
Şekil 6.11. Test bittiğinde eksenel fanlı motor sıcaklığı.....	77
Şekil 6.12. Eksenel fan sıcaklık grafiği	78
Şekil 6.13. Eksenel fan ve radyal fan maks. sıcaklık grafiği	80
Şekil 7.1. Termal yükleme grafiği	82

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Galloni E. ve ark. tasarladıkları fan çeşitleri ve özellikleri	32
Çizelge 4.2. Michele Roffi ve Ark. tasarladıkları fanların özellikleri	32
Çizelge 4.3. Box-Behnken Tasarımı	39
Çizelge 4.4. Anma yükü için elde edilen sonuçlar	42
Çizelge 4.5. Yüksüz durum için elde edilen sonuçlar	43
Çizelge 5.1. Projede kullanılan motor özellikleri	45
Çizelge 5.2. Fan Kalite Değerleri	56
Çizelge 6.1. Fansız motor sıcaklık değerleri	71
Çizelge 6.2. Fansız çalıştırılan motor güç değerleri	73
Çizelge 6.3. Radyal fan güç değerleri	76
Çizelge 6.4. Eksenel fan güç değerleri	79
Çizelge 7.1. İzin verilebilir sıcaklıklar için analiz	81
Çizelge 7.2. Termal yükleme test sonuçları	83

1.GİRİŞ

Endüstride sıklıkla kullanılan asenkron motorların aşırı ısınması motorların verimliliğini etkilemekte ve zarar görmesine neden olmaktadır. Isınmanın sebebi kontrol edilerek mutlaka sorunun giderilmesi gerekmektedir. Eğer teknik olarak bir sorun yoksa motorun yeterli seviyede soğutulmadığı göz önünde bulundurulmalıdır. Soğutma devresinin mutlaka kontrol edilmesi gerekir. Asenkron motorlarda genellikle radyal tip fan kullanılarak motorun soğutulması sağlanmaktadır. Çift yönlü çalıştırılan motorlarda radyal fanlar her iki yönde soğutma sağladığı için daha fazla tercih edilmektedir.

Asenkron motorlarda soğutma şekilleri uluslararası soğutma (IEC- International cooling) standartları doğrultusunda gerçekleşmektedir. Asenkron motorların soğutulmasında soğutma devresinin düzeni ve soğutucu gücün beslenme yöntemi esas alınmaktadır. En çok kullanılan soğutma devre düzeni; çevreleyen ortam kullanılarak motoru motordan ayrılmaz bir soğutucu ile soğutma yöntemidir. Soğutucu gücün beslenme yönteminde sıklıkla tercih edilen standart ise havalandırma motordan ayrılmaz olan bağımsız bir düzen ile sağlanmasıdır.

Yapılan literatür araştırmasında asenkron motorların soğutulmasında radyal fana göre eksenel fanın daha iyi soğutma sağladığı görülmüştür. Madej ve ark. (2013) yapmış oldukları çalışmada eksenel fanın radyal fana göre 5°C derece daha iyi soğuttuğu sonucuna varılmıştır. Eksenel fanın oluşturduğu hava debisi radyal fanın oluşturduğu hava debisinden yüksektir. Galloni ve ark. (2018) yapmış oldukları çalışmada asenkron motorların soğutucu fanlarında kanat sayısının etkisini araştırdılar. Yapılan araştırma sonucunda kanat sayısının çekilen hava debisiyle orantılı olduğu kanat sayısı arttıkça çekilen hava debisinin arttığı ve dolayısıyla daha iyi soğutma sağladığı sonucuna varılmıştır.

Yapılan bu çalışmada 30 ° derece kanat açıklığına sahip eksenel fan tasarlanarak CFD ve termal analizleri yapılarak motor üzerindeki soğutma etkileri incelenmiştir. Laboratuvar da hazırlanan test düzeneği ile motor üzerinde termal testleri gerçekleştirilerek termal kamera ile sıcaklık ölçümleri yapılarak soğutma performansı doğrulanmıştır.

2. FANLAR

Fanlar akışkanları, hava ve benzeri gazları basınçlandırarak belirli bir yerden başka bir yere akış yolu içinde hareket etmesini sağlayan turbo makinelerdir (Bulgurcu, 2015). Fanlar kullanım yerine göre ortamdaki havayı değiştirebilir; ortama yeni havanın girmesini sağlayabilir ya da ortamda oluşan zararlı olabilecek gazları uzaklaştırmak için kirli havayı tahliye edebilir. Fanların kullanımındaki bir diğer amaç ise yüzeyler de soğutma işlemidir. Fanlar yüzey üzerinden hava akımı geçirerek ısıнын uzaklaşmasını sağlamaktadırlar. İyi bir fan sisteminden beklenen kriterler; az enerji tüketmesi ve yüksek verim ile çalışabilmesi ayrıca düşük gürültü seviyesinde ve az maliyetli olmasıdır. Yapılan bir araştırmaya göre İngiltere’de üretilen elektrik enerjisinin %40’ı elektrik motorları tarafından tüketilmektedir. Endüstriyel motor enerji tüketiminin %22’si ise fanlar aracılığıyla gerçekleştirilir (Tuncay, 2013).

2.1 Fan Çeşitleri

Fanlar, kullanım amacına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Birçok çeşidi bulunan fanların bu bölümde endüstride en çok tercih edilen elektrik motorlarında kullanılan iki fan türü incelenecektir. Bu fan türleri eksenel (aksiyel) ve radyal (santrifüj) fanlardır. Genel olarak motorlarda en çok tercih edilen fanın radyal fanlar olduğu görülmüştür ve bunun sebebi ise çift yönlü çalışma özelliğine sahip motorlarda mile bağlı çalışan fanı değiştirmeksizin motorun tam verimle soğutulmasıdır. Motor çalışma yönü hangi yön olursa olsun mile bağlı olan fan iki dönüş yönü içinde soğutma sağlamaktadır. Eksenel fanlarda ise kanat açısının profiline bağlı olarak soğutma sağladığından tek yönlü soğutma sağlayabilmektedir bu özellikte radyal fanları avantajlı kılmaktadır.

2.1.1 Eksenel fanlar

Fan çarkı ile havanın aynı eksen üzerinde yön değiştirmeden, havanın veya akışın hareket ettiği fanlardır. Düşük basınç şartlarında yüksek debi sağlar. Eksenel fanlar yüksek hava debileri ve düşük basınç sınıfına göre uygun fan sistemleridir. Eksenel fanlarda havanın hareketi basınç farkı oluşturulduğunda kanat formuna göre hareket ettirildiği için eksenel yöndedir. Eksenel fanı radyal fan sistemlerinden ayıran en önemli özelliği akışkanın eksenel yönde hareket ederek fandan ayrılmasıdır. Akışkan radyal fanlarda ise merkezkaç kuvveti doğrultusunda sistemi terketmektedir. Eksenel fanlar radyal fanlara göre daha yüksek debi özelliğine sahip olmasına rağmen eksenel fanlarda akış yönü fanın kanatlarına bağlı olduğu için tek taraflı dönme ile çalışabilmesi eksenel fanların çalışma alanını kısıtlamaktadır. Eksenel fanlar, radyal fanlar kadar yüksek basınç elde edemezler. Ancak hava debisi fanın devir sayısı ile doğru orantılı olarak artırılabilir. Özel amaçlı üretilen motorlarda soğutma verimini yükseltebilmek için kullanılabilmektedirler. Eksenel fan kanatlarında açı ayarı yapılarak istenilen debi ve basınç elde edilebilir. Bu durumda eksenel fanlar da sınırsız tasarım yapabilme imkanı sağlamaktadır. Şekil 2.1’de asenkron motorlarda kullanılan eksenel fan örneği görülmektedir.



Şekil 2.1. Asenkron motor eksenel fan örneği

2.1.2 Radyal fanlar

Asenkron motorlarda en çok kullanılan fan çeşitidir. Radyal fanlar da basınç farkı oluşturarak çekilen hava debisinin merkezkaç kuvvet doğrultusunda hareket ettirilmesidir. Bu sistemde akışkan mil eksenine dik açı ile yönlendirilmektedir. Akışkan kanatları teğet olarak terketmektedir. Radyal fanlar düşük debi koşullarında, yüksek basınç sağlamaktadır. Kanatlar fan çarkına 90° derece olacak şekilde tasarlandığı için motor çalışma yönü farketmeksizin çift taraflı çalışma özelliğine sahiptir. Bu özelliği radyal fanların daha avantajlı olmasını sağlamaktadır. Bu nedenle standart çalışma özelliğine sahip motorlarda sıkça tercih edilen fan türüdür. Şekil 2.2’de radyal fan örneği görülmektedir.



Şekil 2.2. Asenkron motor radyal fan örneği

2.2 Fan Performans Karakteristikleri

Fan mekanik hareket ile elektrik motorunun bir birleşimidir, fanın verimi elektrik motoruna giren güç ile pervaneden çıkan güce göre hesaplanmalıdır. Eğer, kullarımdaki fanın kontrolü için değışken hız sürücüsü (DHS) gibi kontroller eklenecekse, bu da fan sistemine kayıp olarak eklenmelidir ve fan sisteminin belirlenen verimi düşecektir (Tuncay, 2013).

Fanlar akışkanın basıncını yükselterek bir yerden bir başka yere iletmesi şu ilkeleri ile açıklanabilir;

2.2.1 Süreklilik eşitliği

Akış esnasında hava debisi değışmeyip sabit olursa ve akış boyunca kaçak veya herhangi bir kayıp olmadığı varsayılırsa debi şu şekilde yazılabilir:

$$\text{Debi} = \text{Hız} \times \text{Kesit}$$

$$\sigma = v \times A \quad (2.1)$$

Hava akış debisi sabit olduğu için akış yolu kesitinin daha küçük olduğu yerde hava hızı daha yüksek (giriş), akış yolu kesitinin daha büyük olduğu yerde hız daha düşüktür (çıkış) (Bulgurcu, 2015).

2.2.2 Bernoulli eşitliği

Bernoulli eşitliği enerji korunumunu ile açıklanır; bir akışkan parçacığının bir akım çizgisi boyunca sürtünme kaybının olmadığı varsayımıyla daimi akışı sırasında akış enerjilerinin, potansiyel ve kinetik enerjilerin toplamının sabit kaldığını ifade eder. Bernoulli denklemi “mekanik enerjinin korunumu ilkesi” olarak da ifade edilebilir. Bernoulli eşitliğine göre akış yolunun iki noktasında aşağıdaki eşitlik ile gösterilebilir (Bulgurcu, 2015).

$$p_1/\rho + v_1^2/2g + z_1 = p_2/\rho + v_2^2/2g + z_2 \quad (2.2)$$

Burada;

p : Basınç (Pa)

ρ : Özgöl ağırlık (kg/m^3)

v : Hız (m/s)

z : Referans çizgisinden olan yükseklik (m)

Bernoulli eşitliğine göre her durumda toplam enerji sabit olacak ancak bir noktada basınç düşük ve hız yüksek, diğer noktada basınç yüksek ve hız düşük iken mümkün olacaktır. Tüm akış kanallarında toplam enerjinin aynı olması sebebi akış sırasında her kütle başına sahip olunan toplam enerjinin her yerde aynı olmasıdır.

2.3 Fan Kanunları

Fan kanunları referans alınarak elde olan verilerden hareketle ve yoğunluk, devir sayısı, rotor çapı gibi parametrelere bağlı olarak yeni bir durumdaki debi, basınç, güç, gürültü değerleri hesaplanabilmektedir (Endüstriyel Fanlar, Aralık-2008). Fan kanunları ise şu şekildedir:

- ✓ Debi kanunu; Fanların debi oranları devir oranları ile çapların birbirine oranının kübü ile orantılıdır;

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \times \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad (2.3)$$

- ✓ Basınç kanunu; Fanların basınç oranları, hava yoğunluklarının oranı ile devir oranlarının ve çap oranlarının karesine eşittir;

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \times \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \times \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \quad (2.4)$$

- ✓ Güç kanunu; Fanların güç oranları, hava yoğunluklarının oranı ile fan çaplarının birbirine oranının 5. kuvveti ve devir oranlarının küpü ile doğru orantılıdır;

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 \times \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \times \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \quad (2.4)$$

- ✓ Gürültü kanunu; Gürültü düzeyindeki değişme ise fan çaplarının birbirine oranı ile devirlerinin birbirine oranına bağlı olarak değişmektedir;

$$L_1 - L_2 = 50 \log_{10} \left(\frac{D_1}{D_2} \right) + 50 \log_{10} \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \quad (2.5)$$

Burada;

D =Dış Çap (m)

n = Devir Sayısı (d/d)

ρ =Hava Yoğunluğu (kg/m³)

L =Gürültü Seviyesi (dBA)

2.4 Fan Seçiminde Kullanılan Parametreler

2.4.1 Mutlak basınç

Mutlak basınç, atmosferik basınç ve etkin (efektif) basıncın toplamı olarak ifade edilir:

$$P = P_{atm} + P_e \quad (2.6)$$

P_{atm} üzerindeki atmosfer boyunca hava tabakasının ağırlığı tarafından oluşur. Etkin basınç P_e ise atmosferik basınç etkisinde olan akışkan ile başka dış kuvvet uygulanarak basınç oluşur (Bulgurcu, 2015).

2.4.2 Basma yüksekliği

Bir sistemin iki noktası arasındaki basınç farkına karşı gelen yüksekliğe basma yüksekliği denir (Bulgurcu, 2015).

$$\frac{\rho_{su} \times g \times H}{1000} = \Delta P_{st} + \Delta P_d + \Delta P_z \quad (\text{Pa}) \quad (2.7)$$

Burada;

H = Basma yüksekliği (mmSS)

ρ_{su} = Suyun yoğunluğu (998,3 kg/m³)

g = Yerçekimi ivmesi (9,81 m/s²)

2.4.3 Fan gücü ve verimi

Fanın teorik gücü havanın hacimsel debisi ve fanın giriş çıkışı arasındaki toplam basınç farkı ile hesaplanır. Fanın teorik gücü şu şekilde ifade edilebilir (Bulgurcu, 2015).

$$N = Q \times \Delta P_t \quad (\text{kW}) \quad (2.8)$$

Q : Havanın hacimsel debisi (m³/s)

ΔP_t : Fanın giriş ve çıkışı arasındaki toplam basınç farkı (Pa)

3.ASENKRON MOTORLAR

Asenkron motor stator sargılarının döner manyetik alanının, rotor çubuklarında indüksiyon prensibi ile akım üreterek Lorentz yasasına göre tork üreten bir alternatif akım (AC) elektrik motordur. İndükleme prensibine göre çalıştıkları için indüksiyon motoru olarak da isimlendirilmektedir. Asenkron motorların ana avantajları basit mimarisi, kolay bakımı, düşük kurulum maliyeti ve yüksek güvenilirliğe sahip olmasıdır (Qinghua, 2005).

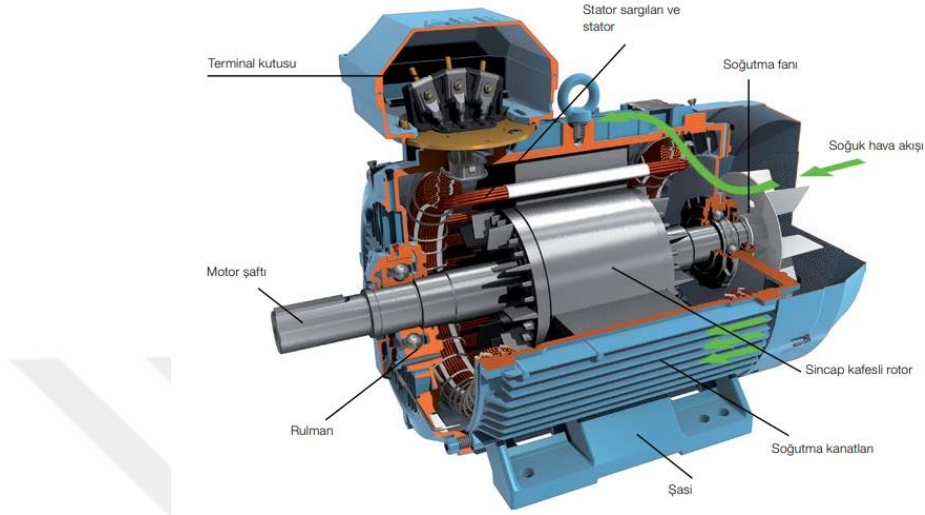
Asenkron motorların maliyetinin düşük olması, çalışma sırasında ark oluşturmaması, fazla bakım gerektirmemesi, büyük güçlerde imal edilebilmeleri, farklı fazlarda yapılabilmesi gibi birçok etmenlerden dolayı endüstride en çok tercih edilen elektrik motorudur. Bir asenkron motorunun ömrü mekanik ömür ve elektriksel ömür faktörlerinden kısa olan faktör tarafından belirlenmiş olur. Burada mekanik ömür rulmanların ya da şaft, fan ve gövde gibi mekanik kısımların ömrüdür. Toz nem gibi ortam şartlarına titreşime ve yağlanmaya bağlı olarak ömrü değişir.

Aşırı mekanik yükleme sargıda çok yüksek seviyede akımların akmasına ve bu stator ve motor sargılarında aşırı ısınmaya neden olur. İyi bir bakım ve muayene motor ömrünü uzatır. Elektriksel ömür ise stator sargısı, yalıtım rotor sargısı ve kablo uçları gibi elektrikli kısımların ömrüdür. Sargıların ve yalıtımın aşırı sıcaklığa maruz kalmaması sağlanarak elektriksel ömrü uzatılabilir. Asenkron motorlarda aşırı sıcaklığın nedeni aşırı yükleme ya da iki fazda çalıştırmadan kaynaklanabilir (Bodur & Metin, 2010).

Endüstriyel uygulamalarda üç fazlı asenkron motorları makineler için hareket ettirici cihazlardır. Bu motorun kullanım alanı genellikle sürücüler, fanları, kompresörleri, mikserleri, harç makinaları, haddehaneleri, konveyörleri, kırma makinalarını, makine araçlarını, vinçleri sürmeyi kapsar. Asenkron motorunun sıklıkla tercih edilmesi motor tipi, basit, güvenilir ve ucuz olmasıdır (Bodur & Metin, 2010).

3.1 Asenkron Motorların Yapısı

Asenkron motorları genel olarak stator, rotor, gövde, yataklar, kapaklar, pervane (fan) yapılarından oluşmaktadır. Şekil 3.1’de asenkron motor yapısı görülmektedir.



Şekil 3.1. Asenkron motor yapısı

3.1.1 Rotor

Motorlar da dönen kısımlar rotor ya da endüvi olarak isimlendirilmektedir. Asenkron motorlarda ise dönen kısım rotor bölümüdür. Rotor elektromanyetik sistemin hareketli bileşenidir. Rotorun dönmesi kendi eksenini ve sargıların etrafında tork üreten manyetik alanlar arasındaki etkileşime bağlıdır. Asenkron motorlarda statorun oluşturduğu döner manyetik alanın içinde dönen ve mekanik enerjinin alındığı kısımdır. Asenkron motorun rotoru bilezikli rotor (sargılı) ve kısa devreli rotor (sincap kafesli) olmak üzere iki çeşittir.

Bilezikli (Sargılı) Rotor

Rotor oyuklarına sargılar yerleştirilir. Sargıların uçları üç bakır bileziğe bağlanır. Sargı uçlarının dışa taşınması için bileziklerle akım devresi arasında bağlantı kömür fırçalar ile sağlanır.

Kısa Devreli Rotor (Sincap Kafesli)

Sincap kafesli asenkron motorlarda rotor sac paketinin dış yüzeyine açılan oyukların içine pres döküm ile eritilmiş alüminyum veya bakır konulur. Çubuklar manyetik harmonikleri azaltmak için eğik bir yapıya sahiptir. Çubukların her iki tarafı da kısa devre edilir. Ayrıca soğutucu görevi için her iki tarafa kanatcıklar konmuştur.

3.1.2 Stator

Alternatif gerilimli motorlarda döner manyetik alan oluşturmak için sargıların bulunduğu bölümdür. Stator 0,35-0,8 mm'lik silisyum katkılı yalıtılmış ve iç yüzeyine oluklar açılmış sacların pres edilerek paketlenmesidir.

3.1.3 Gövde ve kapaklar

Dış etkilere karşı ve korozyona dayanıklı olması için alüminyum demir ya da demir alaşımlarından üretilir. Rotorun stator içinde merkezi olarak yataklanması da kapaklar sayesinde gerçekleşir. Şekil 3.2'de motor yüzeyini genişletme amacıyla yapılan kaburgalar görülmektedir.



Şekil 3.2. Motor yüzeyini genişletme amacıyla yapılan kaburgalar

Asenkron motorlarda kullanılan malzemeler performans değerleri, sıcaklık değerleri, yalıtım sınıfı, gövde boyutları, mil boyutları, soğutma türü, çalışma sınıfı gibi parametreler uluslararası standartlar tarafından (NEMA, EU, IEEE, IEC vb.) belirlenmiştir. Bu standartlar üretici firmaları ve tasarımcıları sınırlamakla birlikte ekonomik açıdan kabul görmüş durumdadır (Yetgin, 2017).

3.1.4 Yatak ve rulmanlar

Yatak ve rulmanlar rotorun kolayca dönmesini sağlayan mekanik parçalardır. Büyük güçlü motor yataklarında rulmanlar, küçük güçlü motorlarda bilezik biçimli yağlanmış yataklar (burc) kullanılır.

3.1.5 Soğutma pervanesi

Asenkron motorlar genellikle soğutucu bir fan yardımıyla üzerindeki istenmeyen fazla ısıyı dışarı aktarır. Motor miline bağlanan plastik ya da metal fan gövdenin üzerinde oluşturduğu akış etkisi nedeniyle sıcaklığı motordan uzaklaştırarak motorun soğutulmasını sağlar. Tam kapalı fan soğutmalı (TEFC) motorlarda soğutucu fan ile soğutma işlemi sağlanmaktadır.

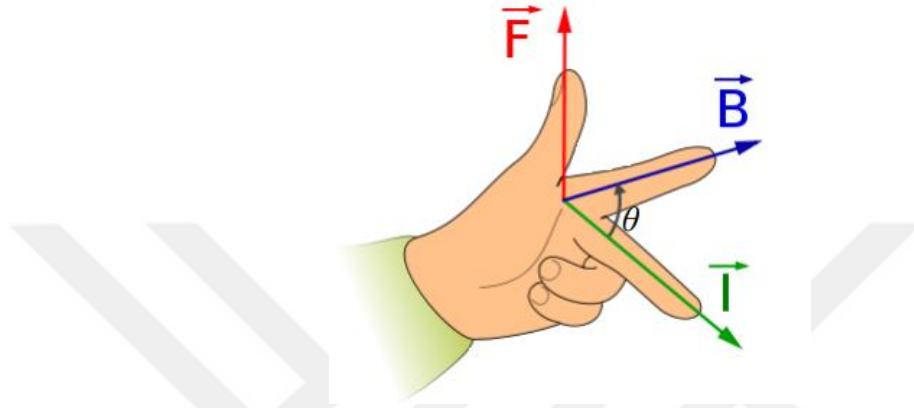
3.2 Asenkron Motorların alışma Prensibi

Asenkron motorların çalışması alternatif akımın uyguladığı stator sargılarında dönen manyetik alan, içerisinde bulunan iletkenler akım geçirilirse o iletken manyetik alanın dışına doğru itilmesi, aynı kutupların birbirini itmesi zıt kutupların birbirini çekmesi prensiplerine dayanmaktadır.

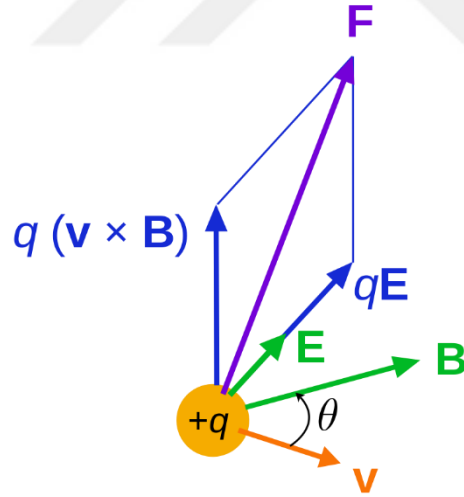
Elektrik akımının manyetik etkisini inceleyen araştırma alanı elektromanyetizmadır. Elektrik makinalarının çalışmasını açıklayan elektromanyetizma kanunları ise şunlardır; Amper kanunu; akım taşıyan bir iletkenin etrafında akımdan dolayı manyetik alan oluşur. Faraday indüksiyon kanunu; zamanla değişen manyetik alana maruz kalan iletken gerilim indüklenir ve sabit manyetik alana maruz kalan iletken hareket ettirildiğinde iletken gerilim indüklenir.

Lorentz kuvvet kanunu; manyetik alan içinde akım taşıyan iletkende bir kuvvet indüklenir. İndüklenen kuvvetin (F) yönü, sol el kuralı ile bulunur (bkz. Şekil 3.3). i akımı taşıyan B manyetik alanına maruz kalan l uzunluğundaki iletkende kuvvetin değeri aşağıdaki formül ile hesaplanır (Hasırcı, 2006).

$$F = B \cdot i \cdot l \cdot \sin\theta \quad (3.1)$$



Şekil 3.3. Lorentz kuvvet kanunu sol el kuralı



Şekil 3.4. Noktasal q yüklü parçacık

Lorentz kuvveti elektromanyetik alanların noktasal yük üzerinde oluşturduğu elektrik ve manyetik kuvvetlerin bileşkesidir (bkz. Şekil 3.4). Eğer q yük içeren bir parçacık bir elektriksel E ve B manyetik alanın var olduğu bir ortamda v hızında ilerliyorsa bir güç hissedecektir. Üzerinde q yük bulunan, dışsal E elektriksel ve B manyetik alanların etkileri nedeni ile anlık olarak v hızına sahip, bir parçacık üzerinde etkili olan F yükü aşağıdaki denklemle verilmektedir. (Vikipedi, 2021)

$$F = q(E + v \times B) \quad (3.2)$$

Asenkron motorlar indükleme esasına göre çalıştığından, asenkron prensibine göre; dönen bir manyetik alan içinde bulunan iletkenlerde gerilim indüklenir. Stator sargılarına uygulanan üç fazlı alternatif akımlar stator hava boşluğunda dönen bir manyetik alan meydana getirir. Bu manyetik alan rotor çubuklarını keserek çubuklarda elektromotor kuvvet (emk) indükler. İndüklenen bu emk'dan dolayı kısa devreli rotor çubuklarından idüksiyon akımı geçer. Bu akımlar rotor sargılarında kutuplar meydana getirir. Dönen stator kutupları rotorun kutuplarını etkileyerek rotoru bir yönde döndürür (Çolak, 2001).

3.3 Asenkron Motorlarda Kayıplar

Tüm sistemlerde olduğu gibi asenkron motorlarda da çeşitli kayıplar meydana gelmektedir. Bakır kayıpları, demir kayıplar, rüzgar ve sürtünme kayıpları gibi. Asenkron motorlarda meydana gelen bu kayıplar motorlarda ısınmaya neden olmakta ve motorun verimini etkilemektedir (Üstünel, 2012).

3.3.1 Bakır kayıpları

Asenkron motorlarda, stator ve rotor omik dirençlerinden dolayı $I_1^2 \cdot R_1$ ve $I_2^2 \cdot R_2$ değerlerinde kayıplar meydana gelir. Bakır kayıpları, sargı dirençleri sabit olduğu için yük akımları I_1 ve I_2 'nin karesiyle değişir ve bu kayıplar aynı zamanda yüklerle değişen kayıplardır. Akım dirençlerin bilinmesi için rotor ve stator kayıpların bilinmesi gereklidir (Üstünel, 2012).

3.3.2 Demir kayıpları

Stator ve rotor saclarından meydana gelen histerezis ve fuko (eddy) kayıplarıdır. Demir kayıplar frekans ve manyetik indüksiyon ile orantılıdır. Asenkron motorun demir kayıpları motorun boş çalışma deneyinden bulunur. Stator frekansı sabit olduğu için stator demir kayıpları değişmemektedir. Sadece rotor demir kayıpları rotor frekansı ile değişir. Fakat boş ve yüklü çalışmada rotor frekansı çok küçüktür bu nedenle rotor demir kayıpları çok küçük olur ve ihmal edilebilir. Bir asenkron motorun demir kayıpları stator demir kayıplarına eşittir denilebilir. Stator frekansı sabit olduğundan demir kayıplarında bütün yükler için sabittir (Üstünel, 2012). Isı üretimine neden olan demir kayıpları nispeten küçüktür ve motorun gövdesine hızlı bir şekilde yayılır (Bodur & Metin, 2010).

3.3.3 Rüzgâr ve sürtünme kayıpları

Asenkron motorlarda sürtünme ve rüzgar kayıpları sabit kabul edilebilir devir sayısı ile çok az değişse bile bu değişim sabit kabul edilmektedir. Boş çalışma deneyinde sürtünme ve rüzgar kayıpları demir kayıpları ile birlikte bulunur. Demir kayıpları ile rüzgar ve sürtünme kayıplarına sabit kayıplar denir (Üstünel, 2012).

3.4 Asenkron Motorlarda Verim

Dünyanın en çok enerji tüketen elektrik makineleri olan asenkron motorlarının verimliliğini artırmak, enerji tasarrufuna büyük katkı sağlıyor (Yoon & Jeon, 2002). Verim; bir makineden alınan mekanik gücün, makineye verilen elektrik gücüne oranı olduğuna göre;

$$Verim = \frac{\text{Mekanik Güç}}{\text{Elektriksel Güç}} \quad \eta = \frac{P_M}{P_E} \text{ 'dir.} \quad (3.3)$$

P_E = Asenkron motora verilen güç (Elektriksel güç)

P_M = Asenkron motordan alınan güç (mekanik güç)

P_K = Kayıplar

Böylece;

$$\eta = \frac{P_M}{P_M + P_K} \quad (3.4)$$

3.4.1. Motor etiket değerinden verim hesaplanması

Üç fazlı bir asenkron motorda elektriksel güç;

$$P_E = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (3.5)$$

Motordan alınan mekanik güç ise; motor etiketindeki değer P_A olduğuna göre:

Bu formüllerde;

U = Fazlar arası gerilim

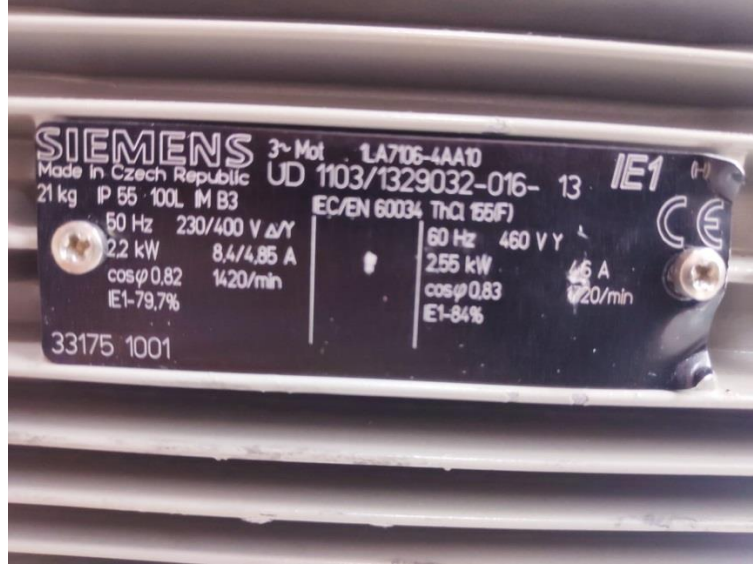
I = Hat akımı

$\cos\varphi$ = Motorun güç katsayısıdır.

Motorun verimi;

$$\eta = \frac{P_M}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi} \text{ , dir.} \quad (3.6)$$

Bu projede kullanılan 2.2 kW lık motorun etiket değerleri Şekil 3.5'te görülmektedir ve verimi ise şu şekilde hesaplanır:



Şekil 3.5. Üç fazlı 2.2 kW lık asenkron motorun etiketi

Motor yıldız bağlandığına için gerilim 380 V, hat akımı 4,85 A, etiketteki güç motorda alınan güç olup 2.2 kW' ır.

Buna göre;

$$\eta = \frac{P_M}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} \quad (3.7)$$

$$\eta = \frac{2200}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 4,85 \cdot 0,82} = \frac{2200}{2614}$$

$$\eta = 0,84 \quad \eta = \%84$$

Yük altında verimin bulunması motora verilen ve motordan alınan güçler doğrudan doğruya ölçülerek verim hesaplanır. Motor devresine bağlanan bir ampermetre, voltmetre ve cosfi metre ile motora verilen elektriksel güç $P_E = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$ formülünden bulunur. Motordan alınan mekanik gücü bulmak için motor bir fren veya dinamometre ile yüklenir. Motorun momenti fren ile devir sayısı da turmetre ile ölçülür (Üstünel, 2012). Motorun torku hesaplanacak olursa eğer denklem 3.5 de ki formül ile;

$$P_M = T \times \omega \quad (3.8)$$

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} \quad (3.9)$$

$$\omega = 6,28 \frac{1420}{60} = 148,62 \text{ R/s}$$

$$T = \frac{P_M}{\omega} \quad (3.10)$$

$$T = \frac{2200}{148,62} = 14,80 \text{ Nm}$$

P_M : Mekanik güç

T: Tork

ω :Açısal hız

3.5 Asenkron Motorlarda Soğutma

Endüstride motorların aşırı ısı ile karşılaşmadan ve tam verim ile çalışması beklenir. Motorun çalışma ömrü motorun sıcaklığı ile doğrudan bağlantılıdır. Motorlarda aşırı ısınma motor ömrünün kısılmasına sebep olan en önemli etkidir. Motor yüzeyi ısı nedeniyle zamanla yüzeyinde oksitlenmeler meydana gelerek deforme olmaya başlar ve mekanik dayanımını ve yalıtkan özelliğini kaybeder. Elektrik motorlarının soğutulması bu nedenlerden dolayı üretim aşamasındayken önemli yer tutar. Motor sıcaklığının artmasının önüne geçilmesi, motor ısısının alınarak soğutulması motor yüzey alanına bağlıdır. Bu sebeple motor hacmi arttıkça soğutma da güçleşir. Asenkron motorlarda stator ve rotorun her ikisi de ısındığından dolayı soğutmaya ihtiyaç duyulması motorun kullanım alanlarını sınırlamaktadır (Yang, 2015).

3.5.1 Asenkron motor soğutma yöntemleri

Elektrik motorlarında ısıdan dolayı kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıplar nedeniyle motorun sargıları ve manyetik nüveleri zamanla ısınır. Motorlarda artan sıcaklığın azaltılabilmesi için uygun soğutma şekilleriyle motorun fazla sıcaklığının havaya aktarılması gerekir. Fanlar genellikle elektrik motorlarını soğutmak için kullanılır. Doğrudan elektrik motor miline monte edilebilirler basit ve ucuz soğutma yöntemi sağlar. Fan boyutu güvenli çalışma sıcaklığı sağlamak için önemlidir (Gallonia & ark., 2018). Makinanın herhangi bir dönüş yönünde çalışmasını sağlamak için kullanılan fanlar genellikle çift yönlüdür ve güçlü plastik malzemeden, alüminyumdan imal edilir. Motorun dış yüzeyi ısının yayılması için yüzey alanını genişletmek amacıyla soğutucu kanatçıklar ile çevrelenmiştir (Bodur & Metin, 2010).

3.5.2 Motor standartları hakkında genel bilgiler

Elektrik motorlarının standartlarını belirleyen ve yayınlayan IEC ve NEMA olmak üzere iki kurum vardır. International Electrotechnical Commission (IEC) Avrupa kuruluşudur. National Electrical Manufacturers Association (NEMA) Amerikan kuruluşudur. Bu bölümde açıklanan motor soğutma yöntemleri IEC standartlarına dayanılarak hazırlanmıştır. Türkiyede ise motor soğutma standartları Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından IEC'ye dayanılarak düzenlenmiştir. Rotor kanatçığı, rotor pervanesi, gövde kaburgaları gibi motor parça tasarımları IEC standartları göz önüne alınarak ve bütün kısımları soğutmayı kolaylaştıracak şekilde imal edilir.

3.5.3 Soğutma şekilleri IEC

IC harfleri ile belirtilen kodların ilk iki karakteri International Cooling'in kısaltması olan IC harflerinden oluşur. Sonrasında 1.rakam soğutma devresinin düzeni, 2.rakam ise soğutucu gücün beslenme yöntemini ifade eder. Çizelge 3.1'de IEC elektrik motorlarının soğutma şekilleri gösterimi ve açıklamaları görülmektedir.

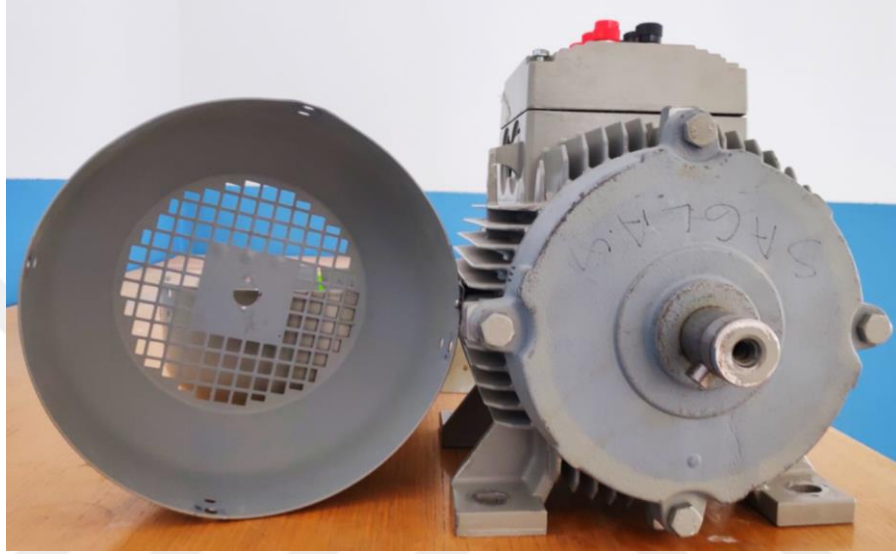
Çizelge 3.1. IEC elektrik motorlarının soğutma şekil açıklamaları

İlk Rakam	İkinci Rakam
Soğutma Devresinin Düzeni	Soğutucu Gücün Beslenme Yöntemi
0-Serbest dolaşım	0-Serbest yayılımlı
1-Giriş borulu havalandırma	1-Kendinden dolaşım
2-Çıkış borulu havalandırma	2-Havalandırma motordan ayrılmaz olan ve ayrı bir mile bağlanmış aygıt ile sağlanmış
3-Giriş ve çıkış borulu havalandırma	3-Havalandırma motor üzerine takılmış bağımlı bir düzen ile sağlanmış
4-Gövde yüzeyinden soğutma	4-Kullanılmıyor
5-Çevreleyen ortam kullanılarak motoru motordan ayrılmaz bir soğutucu ile soğutma	5-Havalandırma motordan ayrılmaz olan bağımsız bir düzen ile sağlanmış
6-Çevreleyen ortam kullanılarak motoru, motor üzerine takılmış bir aygıt ile soğutma	6-Havalandırma motorun üzerine takılmış bağımsız bir düzen ile sağlanmış
7-Çevreleyen ortam kullanılmadan motoru motordan ayrılmaz bir aygıt ile soğutma	7-Havalandırma motordan bağımsız ve ayrı bir aygıt ile sağlanmış
8-Çevreleyen ortam kullanılmadan motoru motor üzerine takılmış bir aygıt ile soğutma	8-Havalandırma bağıl bir yer değiştirme ile sağlanmış
9-Bağımsız monte edilmiş soğutma aygıtı ile havalandırma	

3.5.4 Motorların pervane ve muhafaza kapağı ile soğutulması

Motorlarda pervaneyi koruyan muhafaza kapağı aynı zamanda hava sirkülasyonunun yönünü de belirleyerek motorun asıl ısınmış olan sıcak bölgeye doğru hava akımının iletilmesinde yardımcı olmaktadır. Bu sayede motorlarda etkin bir şekilde yüzey soğutması sağlanmış olur.

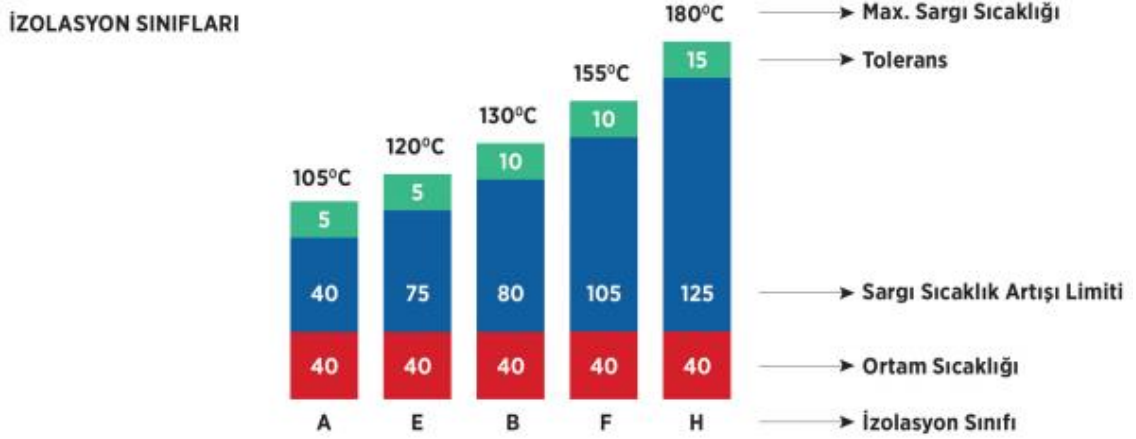
Ayrıca motor muhafaza kapağı olmadan motor çalıştırılması sakıncalıdır. Motor miline takılan pervane havayı içine çekerek mile paralel olacak şekilde motorun üzerinde yer alan kanatçıkların (kaburga) üzerine doğru hava akımı gerçekleştirilir. Hava akımı yardımıyla kanatçıklar üzerinden dış yüzeye bir ısı akışı gerçekleştirmiş olur ve motorda soğuma başlar. Şekil 3.6’da pervane kapağının kaburgalara hava yöneltme boşlukları ve pervane kapağı görülmektedir.



Şekil 3.6. Pervane kapağının kaburgalara hava yöneltme boşlukları

3.6 Asenkron Motorlarda Sıcaklık

Günümüzde asenkron motorlar avantajlarından dolayı kullanım alanı oldukça artmaktadır. Kullanım kolaylığı ve artan malzeme fiyatlarından kaynaklı motor yapıları daha küçük tasarlanmaktadır. Fakat küçük boyutlarda tasarlanması motorlarda aşırı ısınmaya ve verimin düşmesine neden olmaktadır. Motorlarda mekanik kayıplar ve elektriksel kayıplar da ısı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle asenkron motorların çalışma veriminde sıcaklık önemli bir etki oluşturmaktadır. Sıcaklık artışı motor ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Aşırı sıcaklık manyetikliği ve sargı yalıtımlarını bozabilir. Yapılan termal analizler sayesinde motorlarda oluşabilecek hasarların, tahribatların önüne geçilmesine, motor veriminin artırılmasına ve motorun sorunsuz çalışmasına fayda sağlar.



Şekil 3.7. Asenkron motor izolasyon sınıfları

Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği (NEMA) belirlemiş olduğu standartlar da motor çalışma sıcaklıkları izolasyon sınıf gruplarına (bkz. Şekil 3.7) göre 60°C, 75°C, 80°C, 105°C ve 125°C’dir. Ortam sıcaklığı en yüksek 40°C ‘ye kadar izin verilebilir tolerans kabul edilmektedir.

İzolasyon sınıflarına göre sırasıyla tolere edilebilecek sıcaklıklar ise sırasıyla 5°C, 5°C, 10°C, 10°C, 15°C dolayısıyla bir motorun ulaşabileceği en yüksek sıcaklıklar izolasyon sınıfına göre şu şekildedir 105°C, 120°C, 130°C, 155°C, 180°C’dir.

Motorlarda aşırı ısınma, yetersiz havalandırma, yanlış besleme gerilimi, yanlış bağlantı, motorun aşırı yük altında çalıştırılması, kısmi kısa devre, fazların dengesizliği gibi birçok nedenden kaynaklanabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan elektrik motoru IC 411 standardında yüzeyden soğutma yöntemi ile motor üzerinden hava akımı geçirilerek soğutma sağlanır. Fan tarafından çekilen hava öncelikle üzerinde bulunan fan güvenliği ve koruması olan bir kafesin dışından içeri alınır sonrasında motor üzerinde karkasların arasından geçirilerek taşınım ile soğutma sağlanmış olur.

Fan dış yüzeyinde bulunan kafes belirli aralıklarla delinerek havanın girmesi sağlanır, kafes köşeleri ise genellikle yuvarlatılmış olarak tasarlanır buradaki amaç içeri alınan havanın basınçlandırılarak doğrudan motor üzerine göndermektir. Aksi takdirde fazla

olan delikler ya da tasarımından dolayı hava akışında kayıp meydana gelir ve verimli soğutma elde edilemez.

3.6.1 Kondüksiyon

Asenkron motorlarda ısı transferi üç yolla mümkündür bunlar kondüksiyon (iletim), konveksiyon (taşınım), ve ışıınım (radyasyon)'dır. Motor içerisinde katı parçalar arasında ısı transferi söz konusudur. Stator ve rotor da sıcaklık farkından dolayı kondüksiyon ile ısı aktarımı olur. Bu ısı aktarım Fourier yasası ile açıklanabilir (Eş.3.11).

$$q = -k\nabla T \quad (3.11)$$

Burada;

k : ısı iletim katsayısı

q : ısı akısı

∇T : iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı

k sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kabul edilmektedir.

Bazı malzemelerin ısı iletim katsayısına örnek verecek olursak; demir 58 W/m K, plastik 0,2 W/m K, alüminyum 222 W/m K'dir. Asenkron motor da soğutma işlemi harici fan ile gerçekleştirildiği için soğutma konveksiyona neden olur ve zorlanmış taşınım ile soğutma gerçekleşir.

3.6.2 Konveksiyon

Katı yüzeyden hareketli bir akışkanın çevreleyerek enerji geçişinin sağlanmasına konveksiyon ya da taşınım denir. Eğer yüzey üzerinden akışkan cebri bir şekilde hareket ettiriliyorsa zorlanmış taşınım, cebri bir durum yoksa yüzey üzerinden kendiliğinden bir soğuma gerçekleşiyorsa doğal taşınım söz konusudur. Asenkron motorlarda fan kullanıldığı için motorun soğutulması zorlanmış taşınım ile yapılmaktadır.

$$q = h \times A \times (T_y - T_h) \quad (3.12)$$

Burada;

q : birim zamanda ısı transfer miktarı

h : taşınım ile ısı transfer katsayısı

A : ısı transfer yüzey alanı

T_y : yüzey sıcaklığı

T_h : akışkan sıcaklığı

Taşınım ısı transfer katsayısı h ampirik bağıntılar yardımıyla bulunabilir ve bu değer yüzey geometrisine akışkan hareketin tabiatına, akışkanın viskozitesine, geometrisine, hızına bağlıdır. Bazı taşınım ısı transfer katsayısının özgün değerleri şu şekildedir; gazların doğal taşınımı 2-25 W/m² K, sıvıların doğal taşınımı 10-1000 W/m² K, gazların zorlanmış taşınımı 25-250 W/m² K, sıvıların zorlanmış taşınımı 50-20000 W/m² K, kaynama ve yoğuşma 2500-100000 W/m² K ‘dir.

3.6.3 Radyasyon

Isı transferinde enerji bir ortam olmaksızın elektromanyetik dalgalar (fotonlar) ile yayılması radyasyon ya da ışıınım olarak adlandırılır. Maddenin tüm halleri ışıınım ile yayar, soğurur ve geçirirler.

Asenkron motorlarda ısının bir kısmı ışıınım ile dışarı aktarılmaktadır. Isınan motor etrafındaki havanın sıcaklığından dolayı yayınım ile birlikte dışarıya ısı aktarımı gerçekleştirmeye başlar ve bu durum Stefan- Boltzman yasası ile şu şekilde tanımlanır;

$$q = \varepsilon \sigma T^4 A \Delta T \quad (3.13)$$

Burada σ Stefan-Boltzman sabitidir ve değeri 5,67.10⁻⁸ W/m²K⁴ ‘dür. Yayınım katsayısı ε 0 ile 1 arasında değişen emissivite değeridir.

3.7 Asenkron Motorlarda Soğutucu Fan

Asenkron motorlarda aşırı ısınma motorların verimini ve ömrünü önemli ölçüde etkilemektedir. Isınmanın nedenleri araştırılarak bu sebeplerin önüne geçip motor verimini artırıp ömrü uzatılabilir. Asenkron motorların ısınmasının birçok sebebi bulunmaktadır. Bu sebeplere dikkat ederek önlem alınmalıdır.

Asenkron motorun tolerans değerlerinin üzerinde ısınmasının sebepleri şunlar olabilir; yüksek sıcaklığa sahip ortam da çalıştırılmış olabilir, motor boyutu uygulama için küçük olabilir. Kullanılan motorun amacı çevre ve görev döngüsü için uygun olmayabilir. Motorun çalışma kapasitesini bilmek ve bu seviyeyi korumakta motorun ısınmasını engelleyecektir. Seviye korunmadığında küçük bir motor ısıyı dağıtamaz aşırı ısınmaya sebep olur. Motor çalışma standartlarının üstündeki bir sıcaklıkta çalıştırılırsa soğutma veriminin düşmesine sebep olur. Kesintili aralıklı çalışan motoru sürekli çalıştırmakta soğutma verimini etkileyecektir. Motorun yüksek verimle çalışabilmesi için belirlenen aralıklarda tamamen soğuması gerekir. Motor olması gereken çalışma aralığından daha sık çalıştırılırsa hem tamamen soğumadığı için hem de yeni var olacak sıcaklıklardan dolayı motorun aşırı ısınmasına neden olacaktır.

Yüksek veya düşük gerilim kaynağı da verimin değişmesine neden olur. Yanlış gerilim kaynağı motorun çalışma performansını etkileyeceği için aşırı ısınmasına da neden olacaktır. Motor çalışma şartlarından çok daha yüksek irtifalarda çalıştırılması gerekiyor ise motor ona uygun şekilde derecelendirilmelidir.

Bloke havalandırma delikleri de motor performansını etkilemektedir. Havanın yer değiştirebilmesi için havalandırma deliklerinin açık ve yeterli sayıda olması gerekir. Aksi takdirde gerekli soğutma debisi çekilemez motorda yeterli soğutma sağlanamaz ve aşırı ısınmaya sebep olur.

Soğutucu pervane, rotor mili çıkışına takılır. Koruyucu kapak soğutucu pervaneyi korumak ve içeri çekilen havayı motorun gövdesine yönlendirmek amacıyla mutlaka pervane ile birlikte kullanılmalıdır. Ayrıca motor üzerinde bulunan kanatçıklar gövdenin daha iyi soğutulması ve gövde yüzeyini genişleterek soğumanın kolaylaşmasını sağlayan bir diğer önemli etkidir.

3.8 Soğutucu Pervanenin Yapıldığı Malzeme

Soğutucu pervaneler genellikle yüksek nitelikli termoplastik malzemelerden yapılır. Polyamide 6 adlı, yüksek nitelikli plastik malzemelerden akıtma yöntemiyle imal edilir. Termoplastik malzemelerin ısıya karşı dayanımı yüksektir. Motorun sürekli çalışması esnasında +100 °C ile – 40 °C aralığındaki sıcaklıklardan etkilenmemektedir.

En yaygın olarak AC asenkron motorları için soğutucu hava, genellikle rotor mili üzerine monte edilmiş bir veya daha fazla fan tarafından dahili ve harici olarak sirküle edilir. Makinenin her iki dönme yönünde çalışmasına izin vermek için fanlar genellikle çift yönlü tiptedir ve güçlü bir plastik malzemeden, alüminyumdan veya çelikten yapılır. Ek olarak, motorun dış çerçeveleri genellikle ısı radyasyonu için yüzey alanını artırarak soğutma kanalları ile donatılmıştır. Bunlar hava akışını motorun yüzeyine tüm uzunluğu boyunca yakın tutarak, soğutma ve kendini iyileştirmek için tasarlanmıştır. Bu amaçla kaburgalar ve fan kapağı arasında genellikle bir hava boşluğu bırakılır.

Motor soğutma fanları, motor içinde ortaya çıkan aşırı ısıyı dağıtmak için kullanılan motor soğutma sisteminin temel bir bileşenidir. Bu proje de, soğutucu fan tasarlanarak, termal analizini ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımı ile etrafındaki havanın akışı analiz edilmiştir. Fanlarda türbülans oluşmasının sebebi, akışın kanat üzerinde ilerlemesi sırasında, bir bölümünün kanat profilini izlemeyerek yüzeyden ayrılmasıdır. Uygun kanat profilleri kullanılarak yüksek aerodinamik becerinin yanı sıra düşük gürültülü çalışma koşulları Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği teknikleriyle en uygun şekilde tasarımı gerçekleştirilebilir. Ayrıca CFD, verimlilik, hız vektörleri, basınç hatları, çıkışta akış düzgünlüğü, dolaşım, ayrılma bölgeleri gibi kritik noktalar üzerine bilgi sağlar. Bu motorların daha serin çalışmasını sağlamak için yaygın bir yöntem, cıvatalı fanların boyutunu artırmaktır. Diğer bir seçenekte hava akışını zıplayarak ya da fan kanatlarını dönüş yönü için açılı tutarak arttırmaktır. Mesela tasarım eksenel olarak rotorun içine hava çekiyorsa, kanatları dönme yönüne doğru eğmek gerekir.

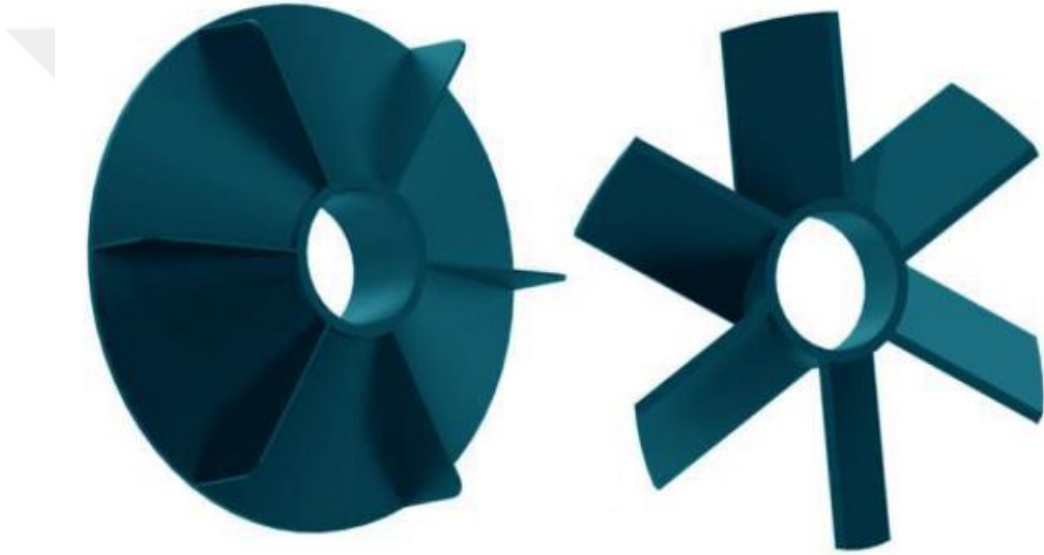
3.9 Asenkron Motor Yapı Biçimleri

Asenkron motor yapı biçimleri TS 3211 EN 60034-7'ye göre standartlaştırılmıştır. En çok tercih edilen yapı biçimleri ise ayaklı, ayaklı flanşlı ve ayaksız flanşlı biçimleridir. Yapı biçimleri ise şu şekildedir:

- Ayaklı tipler
- Ayaklı ve flanşlı tipler (B35 ve B34)
- Ayaksız ve flanşlı tipler (B5 ve B14)
- Ayaklı, ön kapaksız tipler (B15)
- Ayaksız ön kapaksız tipler (B9)

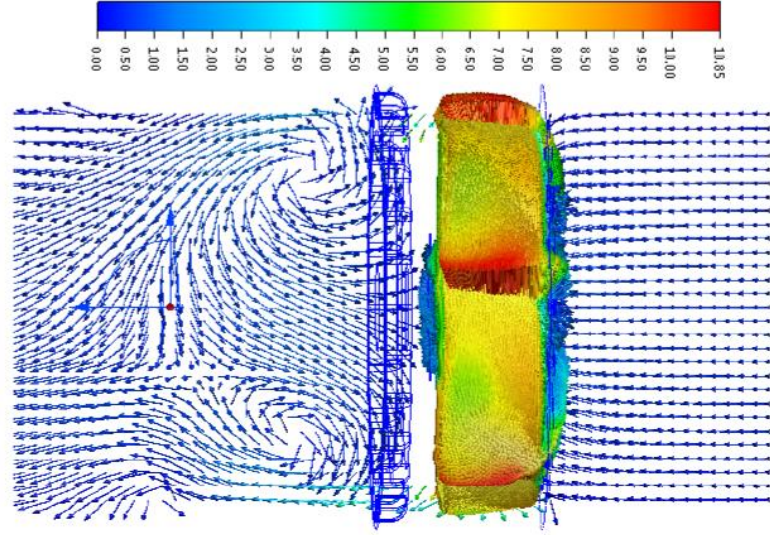
4. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Madej ve Bedkowski (2013) yapmış oldukları çalışmada elektrik motorlarından hava akımı analizi yaparak en uygun tasarımı gerçekleştirip soğutma verimini artırmışlardır. İki farklı tipteki soğutma fanlarının hava akımının sayısal hesaplamaları yapılarak bu analiz sonuçlarına göre radyal yerine eksenel fan sabit dönüş yolu olan makineler için daha iyi bir çözüm olduğuna ulaşmışlardır. Eksenel fan için aynı durumda motor sıcaklığı yaklaşık 5° derece daha düşük olduğu görülmüştür. Şekil 4.1’de karşılaştırmaları yapılan radyal ve eksenel fan tipleri görülmektedir (Madej & Bedkowski, 2013).

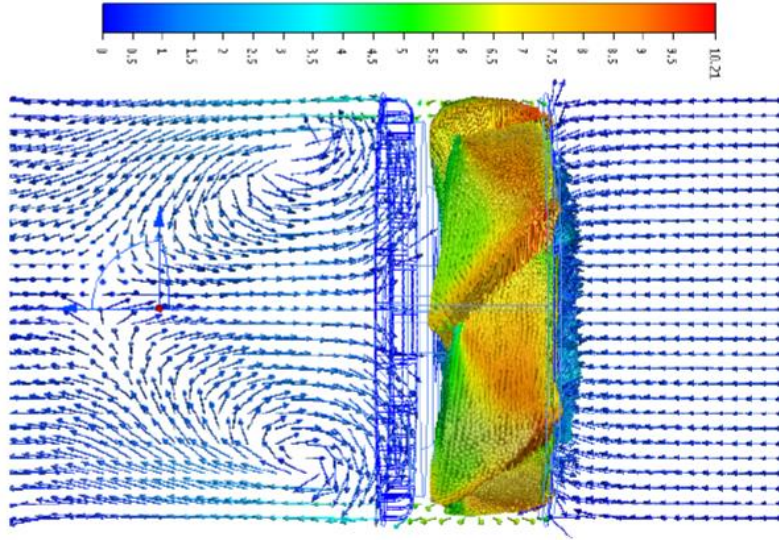


Şekil 4.1. Karşılaştırmaları yapılan radyal ve eksenel fan tipleri

(Madej & Bedkowski, 2013)

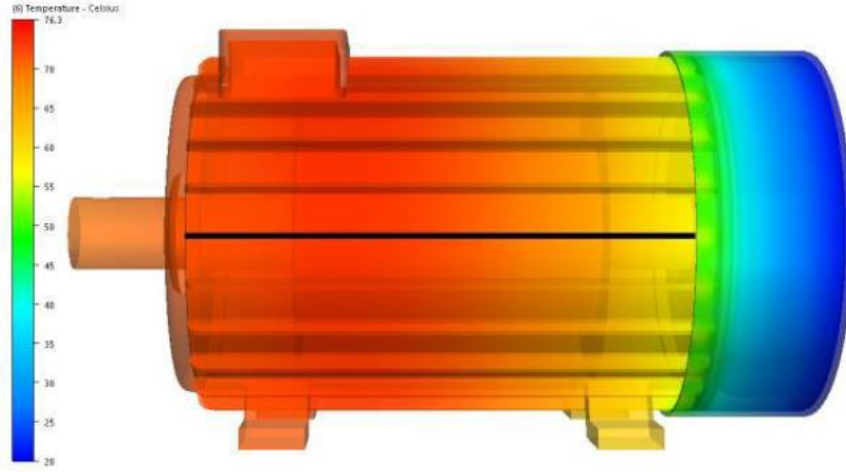


Şekil 4.2. Radyal fan ile hava akışı (Madej & Bedkowski, 2013)

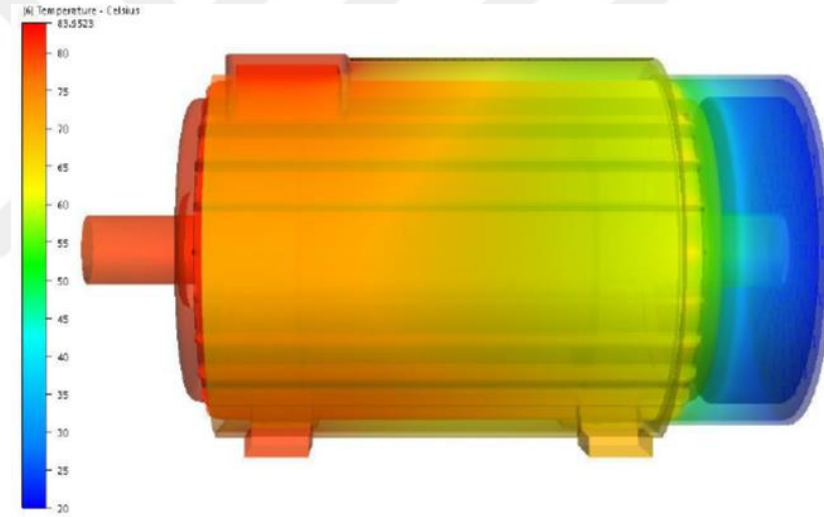


Şekil 4.3. Eksenel fan ile hava akışı (Madej & Bedkowski, 2013)

Her iki fan tipi için hava akışı sonuçları Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Yapılan hesaplamalar göstermiştir ki radyal tip fan $5.5 \times 10^6 \text{ mm}^3/\text{s}$ hava debisi, eksenel tip fan ise $6.7 \times 10^6 \text{ mm}^3/\text{s}$ hava debisi oluşturmuştur. Motor üzerindeki sıcaklık etkisi Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 üzerinde gösterilmiştir (Madej & Bedkowski, 2013).



Şekil 4.4. Radyal fan kullanıldığında motor tarafının sıcaklık profili
(Madej & Bedkowski, 2013)

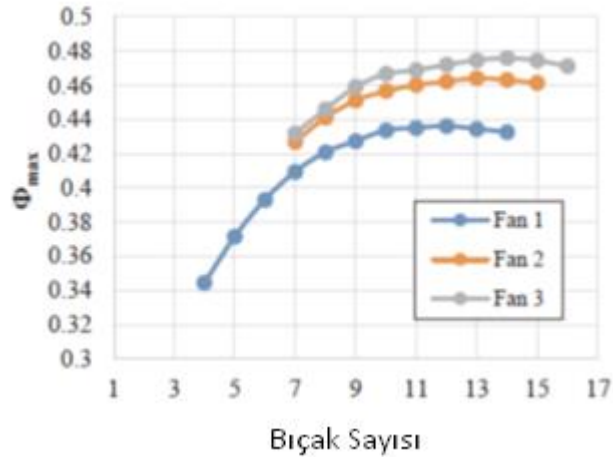


Şekil 4.5. Eksenel fan kullanıldığında motor tarafının sıcaklık profili
(Madej & Bedkowski, 2013)

Elektrik motorlarında soğutma verimliliği kullanılan soğutma fanının tipine bağlıdır. Yapılan çalışmalar neticesinde elektrik motorlarında yaygın olarak kullanılan birinci tip fan çift yön çalışan motorlar için uygundur.

İkinci tip fan türleri motor üzerinde sıcaklığı azaltmada daha etkili olduğu görülmüştür. Yapılan bu çalışma doğrultusunda 2,2 kW'lık motorda soğutma verimini artırabilmek için motorun içine aldığı hava debisinin yüksek olması sebebiyle motorun tek yön çalışmasında ikinci tip fan tercih edilecektir. Ön görülen çalışma için eksenel fan tasarımı yapılacaktır.

Galloni, E. ve ark. (2018) elektrikli motorlarda soğutma için radyal fanların bıçak sayısının akış üzerindeki etkisini inceleyerek CFD analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bıçakların sayısı hem performansını hem de verimliliği etkilediği görülmüştür. Bıçak sayısının akış üzerinde etkisi ise Şekil 4.6'da görülmektedir. Çizelge 4.1'de Galloni E. ve ark. (2018) tasarladıkları fan çeşitleri ve özellikleri verilmiştir. Hava debisinin bıçak sayısı ile orantılı olduğu görülmüştür. Bıçak sayısı artıkça çekilen hava debisinin arttığı gözlemlenmiştir (Gallonia & ark., 2018).



Şekil 4.6. Bıçak sayısının maksimum akış katsayısı üzerine etkisi

(Gallonia & ark., 2018)

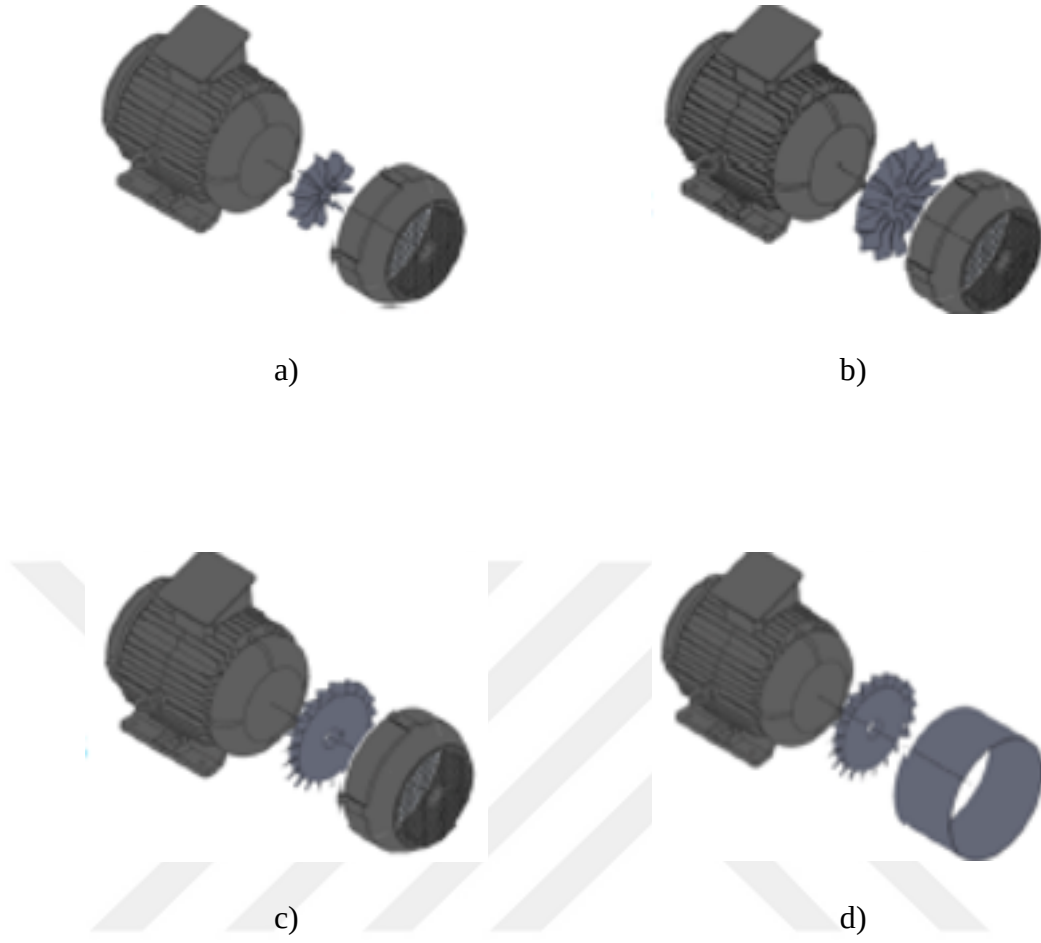
Çizelge 4.1. Galloni E. ve ark. tasarladıkları fan çeşitleri ve özellikleri (Gallonia & ark., 2018)

Değerler Fanlar	Dış Çap (mm)	Yükseklik (mm)	Bıçak Sayısı	Akış Katsayısı
Fan 1	165	40	12	0.436
Fan 2	330	80	13	0.464
Fan 3	495	120	14	0.476

Michele Roffi ve arkadaşları (2017) yapmış oldukları çalışmada elektrik motorları için farklı soğutma fan tasarımlarını karşılaştırmışlardır. Yapılan gözlemlere göre tasarım Fan 3 olarak isimlendirilen fanın motor için en uygun fan olduğu ve motor verimliliğini artırdığı sonucuna varılmıştır. Fan 3 dış çap 495 mm, yükseklik 120 mm, bıçak sayısı 14 ve akış katsayısı 0,476 özelliklerine sahiptir. Fan 3'ün bıçak sayısının fazla olması fanın daha verimli çalışması sağlamaktadır. Roffi ve ark. (2017) bu fanın enjeksiyon kalıp ile sert bir plastikten yapılarak ekonomik ve basit bir üretim yoluyla elde edebileceklerini söylemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmanın IE3-sınıfı, 4 kutuplu, 7.5 kW, TEFC, dört farklı fan tasarımı için ilgili veriler Çizelge 4.2' de gösterilmiştir (Roffi & Ferreira, 2017).

Çizelge 4.2. Michele Roffi ve Ark. tasarladıkları fanların özellikleri (Roffi & Ferreira, 2017)

Değerler Fan Çeşitleri	Fan Performansı (1483d/d)		Motor Performansı (%58 yük)		
	V_{hava} (m/s)	P_{fan} (w)	$P_{toplam-kayıp}$ (w)	η (%)	$\Delta\theta_{çerçeve}$ (K)
Küçük Radyal	4.4	7	606	87.8	19
Büyük Radyal	7	16	615	87.6	18
Eksenel Tasarım C	5.1	7	600	87.9	18
Özelleştirilmiş Tasarım	5.4	9	604	87.8	17



Şekil 4.7. Roffi ve ark. (2017) fan tasarımları

a) Küçük radyal b) Büyük radyal c) Eksenel tasarım C d) Özelleştirilmiş tasarım

Şekil 4.7.c Eksenel Tasarım C olarak isimlendirilen fan motor üzerinde hiçbir değişiklik yapılmaksızın doğrudan motora uygulanabileceğini tek sabit dönüşlü motorları güçlendirmek ve potansiyelini artırmak için yedek parça olarak üretilebileceğini belirtmişlerdir.

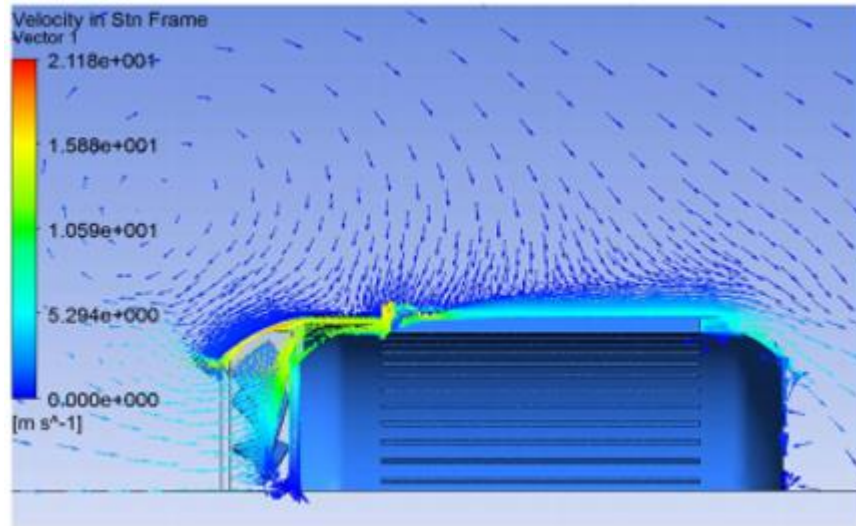
Fan gücünü azaltabilmek için tercih edilen en yaygın yöntemlerden biri de Şekil 4.7.a küçük radyal fanda görüldüğü gibi fanın çapını küçültmektir. Fan çapı küçültülürken asıl tasarımda değişiklikler yapılmaz.

Dış fan çapının azaltılması daha düşük hava akış hızına neden olmaktadır bununla birlikte kayıplar ne kadar düşük olursa gerekli soğutma hava akışı o kadar düşük olur. Fan çapının küçültülmesinde ki amaç kayıpları en aza indirmektir (Roffi & Ferreira, 2017).

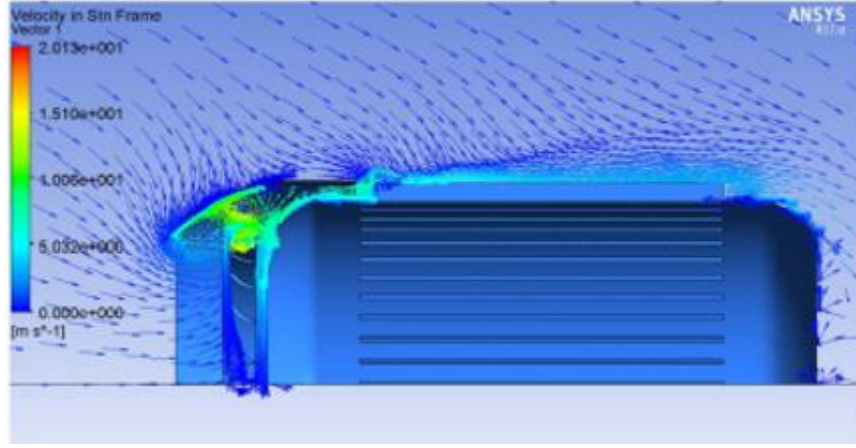


Şekil 4.8. Asenkron motorlar ve soğutma fanları (Roffi & Ferreira, 2017)

Tek yön uygulamalı motorlarda eksenel fanlar tercih edilmektedir ve radyal fanlar ise çift yönlü olarak kullanılması avantajlı olduğundan endüstride en çok tercih edilen fan türüdür. Şekil 4.8’de farklı verimliliklere sahip asenkron motorları ve soğutma fanları görülmektedir (Roffi & Ferreira, 2017).



Şekil 4.9. CFD akış diyagramı radyal fan (Roffi & Ferreira, 2017)



Şekil 4.10. CFD akış diyagramı eksenel fan (Roffi & Ferreira, 2017)

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da CFD analizi yapılan eksenel ve radyal fanın oluşturdukları hava akımı incelenmiştir. Eksenel fanın motor çerçevesine daha fazla bağlı olduğu ve kapak yakınındaki devridaimin azaldığı gözlemlenmiştir. Radyal fan ise oluşan hava akımı motor yüzeyinden ayrılma bölgeleri oluşturmaktadır. Bu durum Şekil 4.11’de duman testi ile deneysel olarak doğrulanmıştır (Roffi & Ferreira, 2017).



Şekil 4.11. Duman testi radyal fan (orta), eksenel fan (sağ)

(Roffi & Ferreira, 2017)

Ambdekar ve Barve (2014) motor soğutma fanın tasarımı ve analizi adlı çalışma yaparak bir fan tasarımı yapmışlardır. Başarılı bir fan tasarımı elde edebilmek için fan içindeki karmaşık hava akışının önemli olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu gözlem sayesinde motor içindeki hava akımının yönünü iyileştirerek soğutma veriminde artış sağlamışlardır. CFD yaklaşımı kullanılarak yapının mukavemeti analiz edilmiştir.

Fan içerisinde karmaşık akış alanı CFD ile etrafındaki hava akışını analiz etmişlerdir (Ambdekar & Barve, 2014).

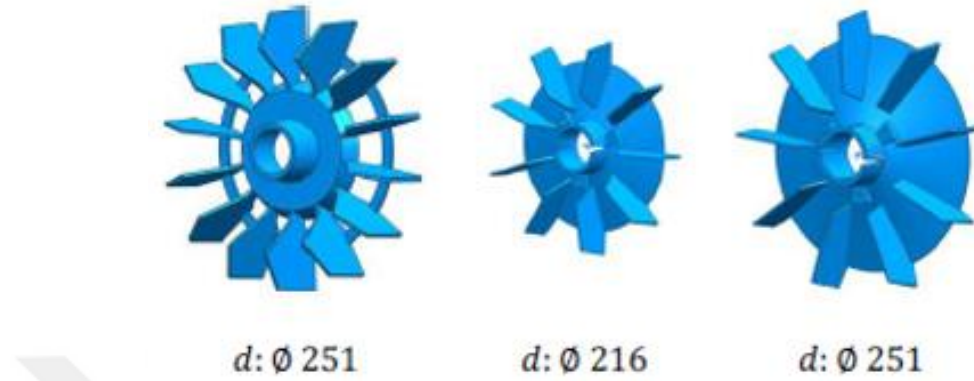
Behzadmehr ve Mercadier (2006) geriye eğilimli bir santrifüj fanın çalışması ve giriş bölgesi parametresinin ağırlığını ve etkilerini anlamak için çalışma yapmışlardır. Böylece radyal fanın verimliliği üzerine motorun kapağı giriş yarıçapı, etkilerini ve etkileşimleri incelemişlerdir. Bu çalışma da fan verimliliği üzerinde olumlu bir etki bölgesi kurulduğunu gözlemlemişlerdir (Behzadmehr & Mercadier, 2006).

D. Maestre ve diğerleri (2019) bir pervane geçidindeki akış, bir k-w SST türbülans modeli kullanılarak incelemişlerdir. Bu çalışmada şu değerler elde edilmiştir: ± 3000 rpm dönme hızında en iyi verimlilik noktası $\eta = 94,822$ hacimsel akış hızına karşılık gelir $Q = 0,8641$ kg/s, akış hızı katsayısı $\phi = 0.3099$ ve toplam basınç artışı $\Delta p_T = 3019$ Pa ve basınç katsayısı $\psi = 1.0791$. Akış analizinin sonuçlarından, kanat geçitlerinde akış ayrımı ile önemli enerji kaybı olduğunu gözlemlemişlerdir. Radyal fanın performansı, kanat geçişindeki akış kaybı nedeniyle yaklaşık %1-2 oranında azalır ve verim düşer (Maestre & Ramirez, 2019).

Günümüzde asenkron motorların geçmişe göre motor hacmi, motor parçaları, motor malzemeleri gibi birçok ögesi teknolojiyle birlikte değişime uğramıştır. Bu değişim aynı zamanda enerji verimliliğinde ki hassasiyet ile standart asenkron motor yerine daha verimli asenkron motor kullanılmaya yöneltmiştir. Gök ve arkadaşları (2015) standart verimli ve yüksek verimli sincap kafesli asenkron motorların fiziksel boyutlarını ve performans değerlerinin analizlerini yaparak karşılaştırmalarını yapmışlardır (Gök & ark., 2015).

Gürgöze (2010) yapmış olduğu çalışmada asenkron motorlarda sürekli halde sıcaklık dağılımını ve ısıl geçici rejimi belirlemek üzere akım kaynaklı elektriksel devre benzeşimine dayanan bir ısıl model oluşturulmuştur. Isıl modeli oluşturmakta kullanılan kritik parametreler belirlenmiş ve bu parametrelerin hesabı incelenmiştir. Farklı yükleme durumları için elde edilen sonuçlar deneysel yolla elde edilen verilerle kıyaslanarak modelin doğruluğu gösterilmiştir (Gürgöze & Mergen, 2010).

Chungman Jang ve arkadaşları (2019) yapmış oldukları çalışmada alçak gerilim motoru için orijinal fanı ile karşılaştırmak üzere iki farklı fan tasarımı yaparak CFD analizleri ve türbülanslı akış olacağı için k- ϵ türbülans modeli üzerinde hesaplamaları yapmışlardır. Şekil 4.12’de Chungman Jang ve arkadaşlarının (2019) fan tasarımı görülmektedir.

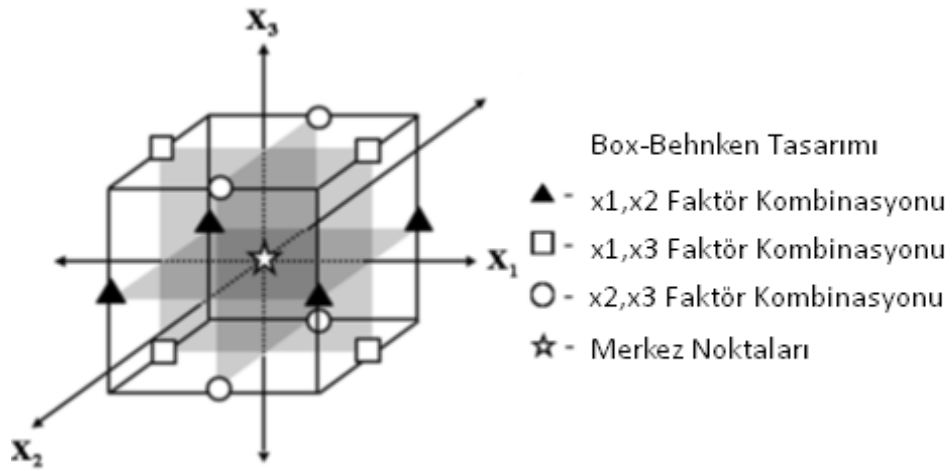


Şekil 4.12. C.Jang ve ark. fan tasarımları (C. Jang, 2019)

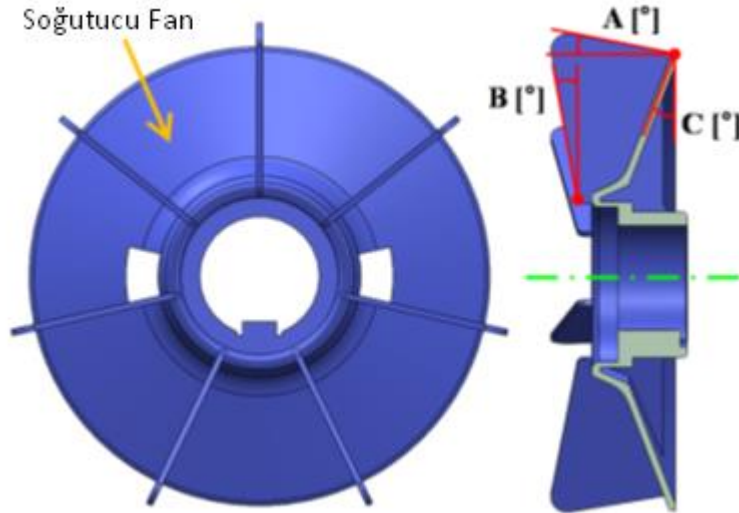
Ø 251 için yapılan tasarımda mevcut fanın dış çapından yaklaşık %25 daha küçük çap ve daha az kanat sayısı ile tasarlandı. Ø 216 için ise dış çap orijinal fan ile aynı olacak şekilde tasarlandı sadece kanat sayısı azaltılıp kanatlar arasındaki plaka tam kapalı olacak şekilde düzenlendi. Tasarlanan fanların akış hızları mevcut akış hızına göre azaldığı gözlemlenmiştir. Kanat dış çapları, kanat sayıları ve enine kesit alanlarında ki azalmalar akış hızını düşürdüğü kararla varılmıştır ve hava akışının azalmasından dolayı sarım sıcaklıklarının arttığı gözlemlenmiştir. Tasarım Ø 216 da mekanik hasarın %16 azaldığı ve verimliliğin %0.18 arttığı görüldü. Bu sonuçlar doğrultusunda tasarım Ø 216 hedef model için en uygun soğutma fanı olduğunu belirlemişlerdir (C. Jang, 2019).

Min-Seok Kim ve arkadaşları (2020) ‘Üç Fazlı Asenkron Motor Deneysel Yöntemi ile Optimum Soğutma Fanı Tasarımı’ adlı çalışma yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada 7.5 kW gücünde ki asenkron motor için optimum ölçülerde olabilecek en uygun fan tasarım modeli sunulmuştur. Yapılan bu çalışma için Box-Behnken yöntemi ile tasarım modellenmiştir. Box-Behnken tasarımı ile düşük deneysel maliyetle optimizasyon analizini sağlar.

Bu çalışmada ise fan kanat tasarımında yüzeyini analiz etmek için kullanıldı. Şekil 4.13'te Box-Behnken metodolojisinin istatistiksel modeli görülmektedir (Min Seok Kim, 2020).



Şekil 4.13. Box-Behnken metodolojisi (Min Seok Kim, 2020)



Şekil 4.14. Soğutma fanı faktörü (Min Seok Kim, 2020)

Soğutma fanın kanat tasarımını değiştirmek için Şekil 4.14'de gösterildiği gibi faktör A°, faktör B° ve faktör C° üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çizelge 4.3'de Box-Behnken Tasarımında kullanılan faktörlerin değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.3. Box-Behnken Tasarımı (Min Seok Kim, 2020)

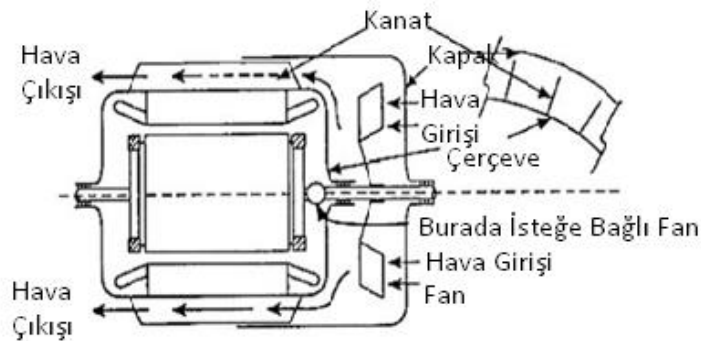
<i>Fan Numarası</i>	<i>Kodlanmış Faktör</i>			<i>Kodlanmamış Faktör</i>			<i>Amaç Fonksiyonu</i>	
	X_1	X_2	X_3	A	B	C	Rüzgar Hızı	Rüzgar Kaybı
	-	-	-	[°]	[°]	[°]	[m/s]	[w]
1	-1	-1	0	0	5.2	21	6.90	4.30
2	+1	-1	0	21.4	5.2	21	8.11	7.23
3	-1	+1	0	0	15	21	7.04	4.48
4	+1	+1	0	21.4	15	21	8.59	8.05
5	-1	0	-1	0	10.1	12	6.71	3.68
6	+1	0	-1	21.4	10.1	12	6.96	4.85
7	-1	0	+1	0	10.1	30	6.63	3.18
8	+1	0	+1	21.4	10.1	30	9.01	8.43
9	0	-1	-1	10.7	5.2	12	7.52	4.58
10	0	+1	-1	10.7	15	12	7.20	4.17
11	0	-1	+1	10.7	5.2	30	7.87	5.16
12	0	+1	+1	10.7	15	30	8.70	6.44
13	0	0	0	10.7	10.1	21	7.54	4.05
14	0	0	0	10.7	10.1	21	7.47	4.05
15	0	0	0	10.7	10.1	21	7.50	4.13

Box-Behnken tasarımı kapsamında birden fazla fan tasarımı yapılmıştır. En küçük bıçak alanına sahip model 5, orta bıçak alanına sahip model 13 ve en büyük bıçak alanına sahip model 8 için sıcaklık doygunluğu testleri yapılmıştır.

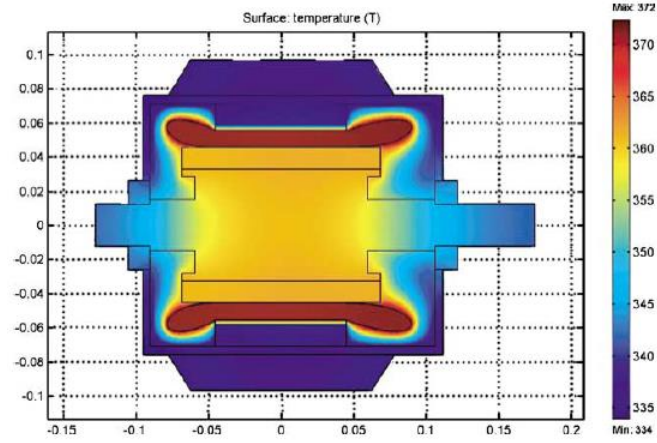
Test sonucunda en uygun boyutlara sahip A° faktörü için 10.7, B° faktörü için 10.1° ve C° faktörü için 21° e sahip model 13 olduğu görülmüştür.

Takafumi Nakamaha ve arkadaşları (2006) büyük kapasiteli açık tip motorlar için düşük havalandırma direncine sahip bir yapı elde etmek için eksenel fan üzerinde birtakım iyileştirmeler yaparak soğutma performansını büyük ölçüde artırmışlardır. Bu çalışma üç fazlı, 900 kW, 2p, 3000 V, 60 Hz değerinde ki asenkron motoru için uygulanmıştır. İleri süpürülmüş ve eğimli kanatlara sahip eksenel fanların soğutma performansı iyileştirilmiştir. Elektrik motorunun içindeki havalandırma direnci azaltılıp ve öne eğimli kanatlara sahip eksenel fan kullanılarak çalışma tamamlanmıştır. Çalışma da rüzgâr tüneli deneyi ile akış hızının, mevcut havalandırma yapısına göre arttığı gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda soğutma havasının akış hızının mevcut hıza göre %80 arttığı ve stator sargılarının ortalama sıcaklığında %30 azalma olduğu görülmüştür (Takafumi Nakahama, 2006).

Ying Huai ve arkadaşları (2003) asenkron motorlarda termal olayları ve kayıpları açıklayan simulink tabanlı kontrol döngüsü geliştirmişlerdir. 1.5 kW standart sincap kafesli asenkron motoru üzerinde bir dizi çalışma koşulu için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada motor sıcaklığı dağılımının mevcut çalışma koşulları tarafından belirlenen girdi parametrelerin bir fonksiyonu olarak hesaplanmasına, modeli uygulamaya ve hesapların sonuçlarını deneysel ölçümlerin sonuçlarıyla karşılaştırmasına olanak sağlayan matematiksel model geliştirilmiştir. Bu model elektrik motorlarının termal hasarları ön görmek ve bu hasarlara engel olabilmek için tasarlanmıştır. Şekil 4.15'te TEFC asenkron motorunun soğutma hava akış yolları görülmektedir (Ying Huai, 2003).



Şekil 4.15. TEFC asenkron motorunun hava akış yolları (Ying Huai, 2003)



Şekil 4.16. Asenkron motorunun sıcaklık dağılımı (Ying Huai, 2003)

Şekil 4.16’da Ying Huai’nin (2003) çalıştığı asenkron motorunun aksel kesitindeki sıcaklık dağılımı görülmektedir. 1.5 kW gücünde sincap kafesli asenkron motorun sıcaklık dağılımında en yüksek sıcaklığın uç sargı alanında olduğu gözlemlenmiştir. Uç sargılar termal hasara karşı en hassas alanlardır. Geliştirilen modelde birden fazla girdi için uç sargılardaki değerler baz alınmıştır (Ying Huai, 2003).

Şimşek ve Mergen (2021)‘3 Fazlı Asenkron Motorda Sıcaklık Artışı ve Dağılımının Elektriksel Benzeşim ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Hesaplanması’ adlı çalışma da 3 fazlı, 2.2 kW, 380 V, 4P, tamamen kapalı tipte asenkron motor için sürekli çalışmada sıcaklık artışını ve dağılımını belirlemek üzere az sayıda düğüm ve elemandan oluşan kendisini oluşturan elemanların değerlerindeki değişime karşı hassasiyeti düşük, yüksek doğrulukta bir model tasarlamışlar ve bu modeli 2D sonlu elemanlar analizi ile test ederek ölçümlerden elde ettikleri veriler ile karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada asenkron motorun sürekli halde sıcaklık dağılımını ve ısıl geçici rejimi belirlemek üzere akım kaynaklı elektriksel devre benzeşimine dayanan bir ısıl model oluşturulmuştur.

Çizelge 4.4. Anma yükü için elde edilen sonuçlar (Şimşek & Mergen, 2021)

	Isıl Model (°C)	Ölçülen(°C)	SEA(°C)
Gövde	80.49	79	79
Stator	94.9	95.4	94.67
Boyunduruğu			
Stator Dışleri	97.244	-	101
Stator Oluk Sargı	113.59	112.16	113.57
Stator Sargı Başı	122.46	123.34	-
Rotor Kısa Devre	151.74	-	154.94
Kafesi			
Rotor	150.57	-	154.94
Boyunduruğu			

Isıl modelin kurulması için asenkron motor, yük ve çevre koşullarının fiziksel bir modeli oluşturulur. Oluşturulan bu fiziksel model matematiksel olarak ifade edilerek ve sayısal çözüm ile çözümlenmiştir.

Elektriksel benzeşim mühendislik problemlerinde kullanılan etkili ve basit matematiksel modelleme yöntemidir. Isıl analizi yapılan motorun her bir parçasının ısı akışına karşı gösterdiği ısı direnç ve ısı kapasitesi elektriksel direnç ve kondansatör elemanlarının bağlı bulunduğu düğümlerle temsil edilir (Şimşek & Mergen, 2021).

Çizelge 4.5. Yüksüz durum için elde edilen sonuçlar (Şimşek & Mergen, 2021)

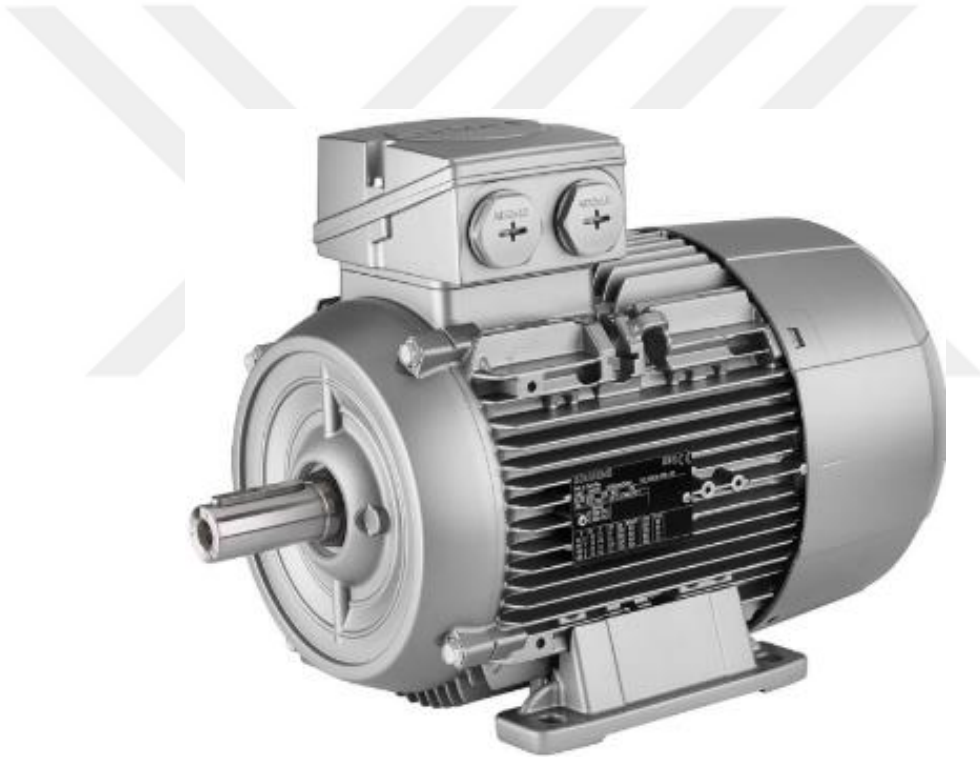
	Isıl Model (°C)	Ölçülen(°C)	SEA(°C)
Gövde	43.38	43	43.79
Stator	51.28	51	50.49
Boyunduruğu			
Stator Dişleri	52.05	-	52.58
Stator Oluk Sargı	58.01	58.03	58.78
Stator Sargı Başı	60.95	60.67	-
Rotor Kısa Devre	56.26	-	55.56
Kafesi			
Rotor	56.22	-	55.5
Boyunduruğu			

Bu çalışmada motor gövdesi, stator boyunduruğu, stator dişleri, stator oluk sargısı, stator sargı başı, rotor kısa devre kafesi, rotor boyunduruğu referans alınarak ölçümler yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.4’de anma yükü için elde edilen sonuçlar, çizelge 4.5’te yüksüz durum için elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak verilmiştir (Şimşek & Mergen, 2021).

5. MATERYAL ve YÖNTEM

5.1 Proje de Kullanılan Asenkron Motor Özellikleri

Proje de kullanılan motorda soğutma, delikli muhafaza kapağı içerisinde motor miline bağlı plastik bir radyal fan yardımıyla hava akışı sağlanarak, motor üzerinden sıcaklığın uzaklaştırılmasıyla sağlanmaktadır (IC411). Yapılan çalışmada asenkron motoru 2.2 kW, 1420 d/d, 50 Hz frekansta, üç fazlı sincap kafesli, toza karşı koruma ve tüm yönlerden gelen fişkıran suya karşı koruma (IP55), 4 kutuplu, 21 kg ağırlık özelliklerine sahiptir. Diğer teknik özellikleri ise çizelge 5.1’de verilmiştir. Projede kullanılan asenkron motor genel yapısı Şekil 5.1’de görülmektedir.



Şekil 5.1. Asenkron motor genel yapısı

Çizelge 5.1. Projede kullanılan motor özellikleri

Voltaj	220-230VD / 380 -400VY
Enerji verimliliği	IE1, Standart, EFF2
Montaj	B3 (ayak)
Gövde	Alüminyum
Mil uzunluğu	60 mm
Kama genişliği	8 mm x uzunluğu 50 mm
Dişli mil deliği	M10
Mil yüksekliği B3'e montajlı	100 mm
Genişlik ayak delikleri B3 montajlı	160 mm
Uzunluk ayak delikleri L	140 mm x çap ayak delikleri: 12 mm
Dış çap flanş	B5/V1/B35/V3: 250 mm
Çap kenarı	B5/V1/B35/V3: 180mm
Çap flanş delikleri	B5/V1/B35/V3: 14,5 mm
Hatve delikleri flanş	B14/B34/V18/V19: 130 mm
Dişli flanş delikleri	B14/B34/V18/V19: M8
Dış çap flanş	B14/B34/V18/V19: 160 mm
Suya karşı koruma	IP55
Ağırlık	21 kg
Adım flanş delikleri	B5/V1/B35/V3: 215 mm flanş delik sayısı: 4 adet

5.1 Projede Kullanılan Kızılötesi Kamera

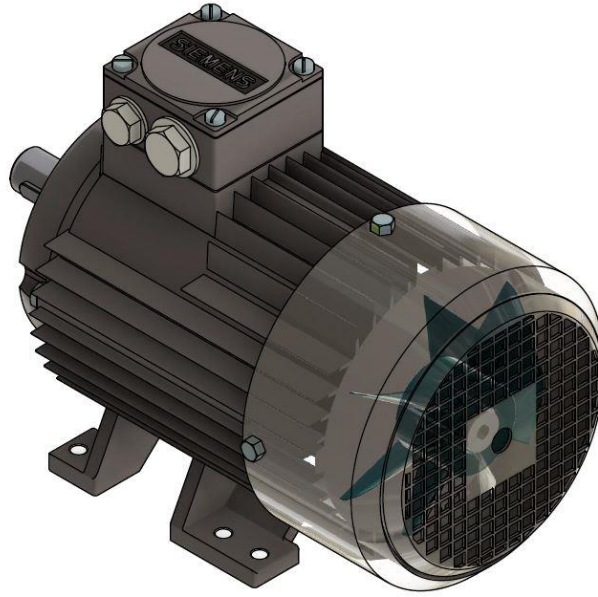
3D baskısı tamamlanan aksenal fanın tasarım doğrulaması tamamlamak amacıyla test edilmesi gerekmektedir. Yapılacak olan testlerde Fluke Ti95 kızılötesi kamera kullanarak motor sıcaklıkları ölçülmüştür. Kablosuz bağlantı, 8GB çıkarılabilir SD kart ve 3,5 inç LCD'de 80x60 çözünürlüklü görüntüleme özellikleri ile motor sıcaklıkları ölçülerek kaydedilmiştir. Projede kullanılan termal kamera Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2. Projede kullanılan kızılötesi kamera

5.2 Fan Tasarımı

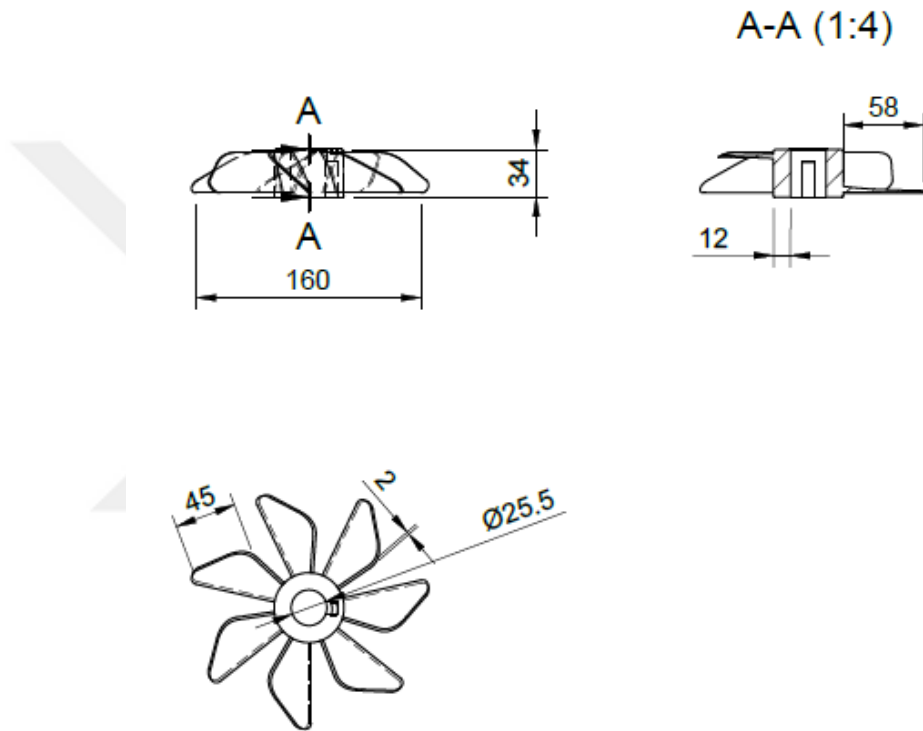
Yapılan her yeni tasarımın mutlaka test edilerek performans karakteristikleri ölçülmelidir. Günümüzde bu testler teknolojinin ilerlemesi ile birlikte bilgisayar ortamlarına taşınmasına olanak sağlamıştır. Yapılan birden fazla tasarım için her defasında yeniden üretim yapıp test edilirse hem zaman hem de maliyet açısından oldukça deavantaj olacaktır. Bunun yerine CFD analizleri sayesinde bilgisayar üzerinden yapılan simülasyonlar ile gerçekte yapılacak testler yaklaşık olarak aynı sonuçları verebilmektedir. Bu da daha fazla tasarım yapılmasına ve en iyi performansa sahip ürünün seçilmesine olanak sağlar. Bu çalışma da 2.2 kW, 1420 d/d, üçfazlı, sincap kafesli, 4 kutuplu asenkron motor için yapılan fan tasarımının sonlu elemanlar yöntemi ile zamandan bağımsız (steady state) olarak akış analizi ve termal analizi incelenmiştir. Şekil 5.3'te tasarımı yapılan fanın asenkron motor üzerindeki montajı görülmektedir.



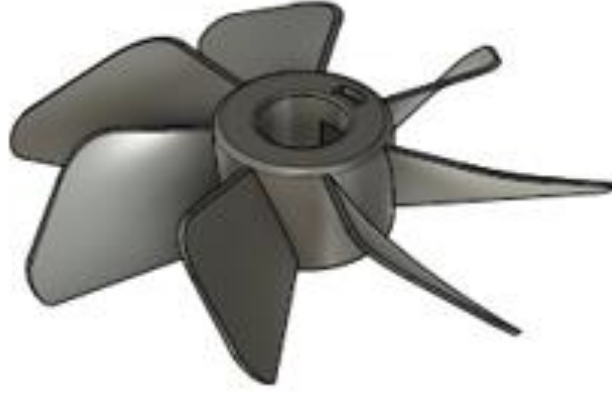
Şekil 5.3. Tasarlanan eksenel fanın asenkron motor üzerindeki montajı

5.2.1 Fan çizimi

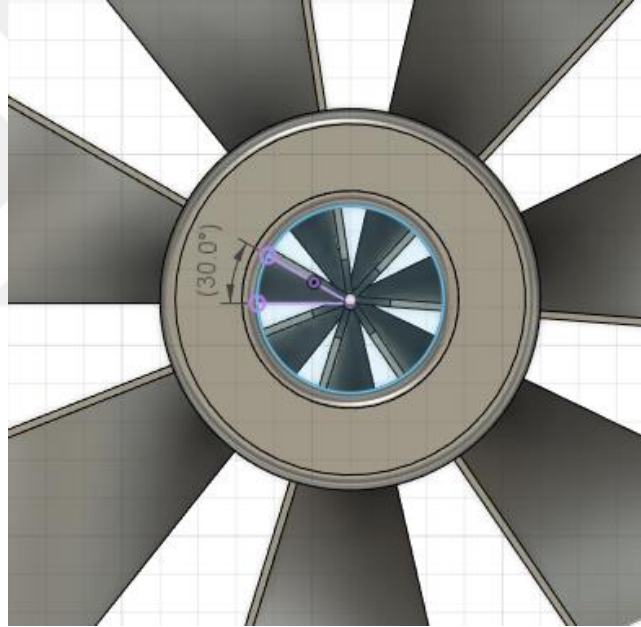
Asenkron motorlarda sıkça kullanılan radyal fan ölçüleri referans alınarak bu çalışmada eksenel fan tasarımı yapılmıştır. Eksenel fan çizimi Fusion 360 cad programında tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan eksenel fanın amacı soğutma üzerindeki etkilerinin ve fiziki değerlerin kontrol edilmesidir. Şekil 5.4'te tasarlanan eksenel fanın teknik detaylarına yer verilmiştir. Şekil 5.5'te ise tasarlanan eksenel fanın perspektifi görülmektedir.



Şekil 5.4. Tasarlanan eksenel fan teknik resmi

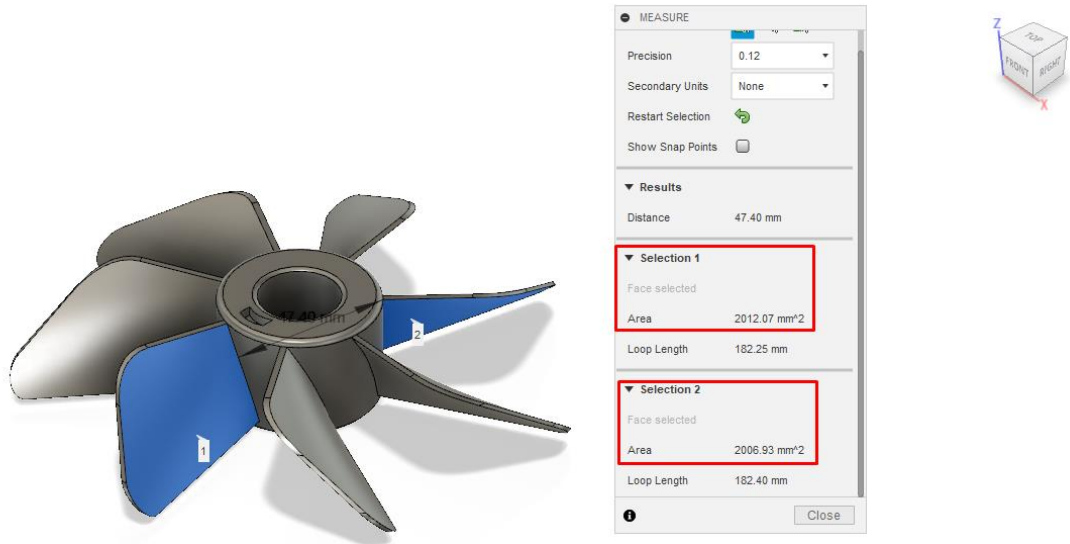


Şekil 5.5. Tasarlanan eksenel fanın perspektif görünümü



Şekil 5.6. Eksenel fan kanat açısı

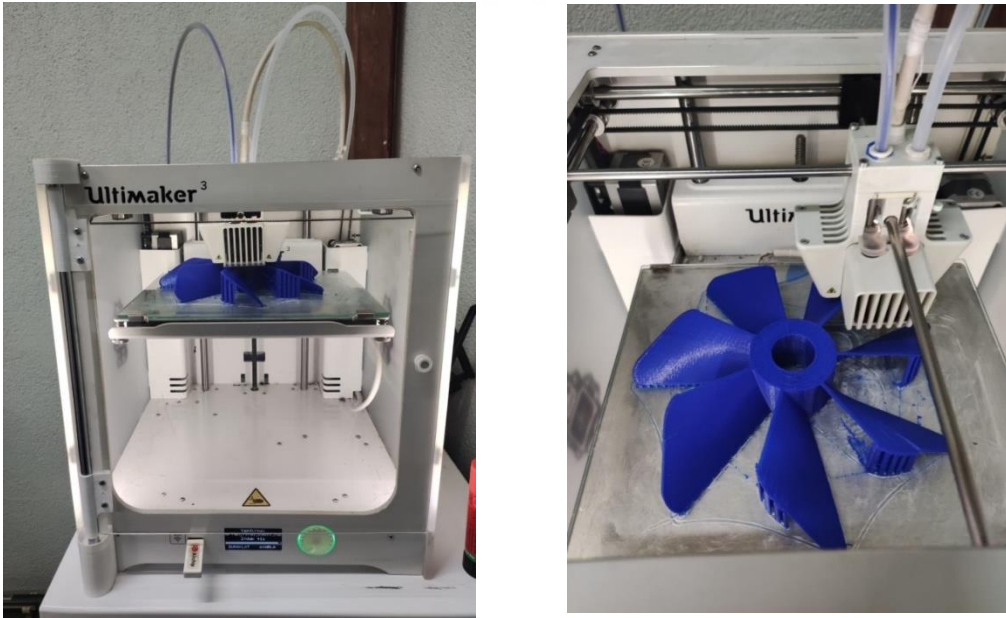
Eksenel fan tasarımında kanatlar 30 derecelik açı ile çizilmiştir. Şekil 5.6’da fan kanat açısının derecesi görülmektedir. Tasarlanan fanın kanat dış yüzey alanı 2012 mm^2 ve iç yüzey alanı 2006 mm^2 ’dir. Şekil 5.7’de eksenel fan kanat yüzey alanları görülmektedir.



Şekil 5.7. Eksenel fan kanat yüzey alanları

5.2.2 Tasarlanan eksenel fanın 3 boyutlu baskısı

Tasarımı yapılan eksenel fanın asenkron motor üzerinde kolay test edilebilmesi için 3d yazıcıda çıktısı alınmıştır. Test sırasında sorun olmaması için ve radyal fan malzeme kalitesine yakın olması amacıyla 0,01 hassasiyet ile basımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.8’de tasarımı yapılan eksenel fanın 3d baskısı görülmektedir.



Şekil 5.8. Tasarlanan eksenel fanın 3d baskısı

5.3 Akış Analizi

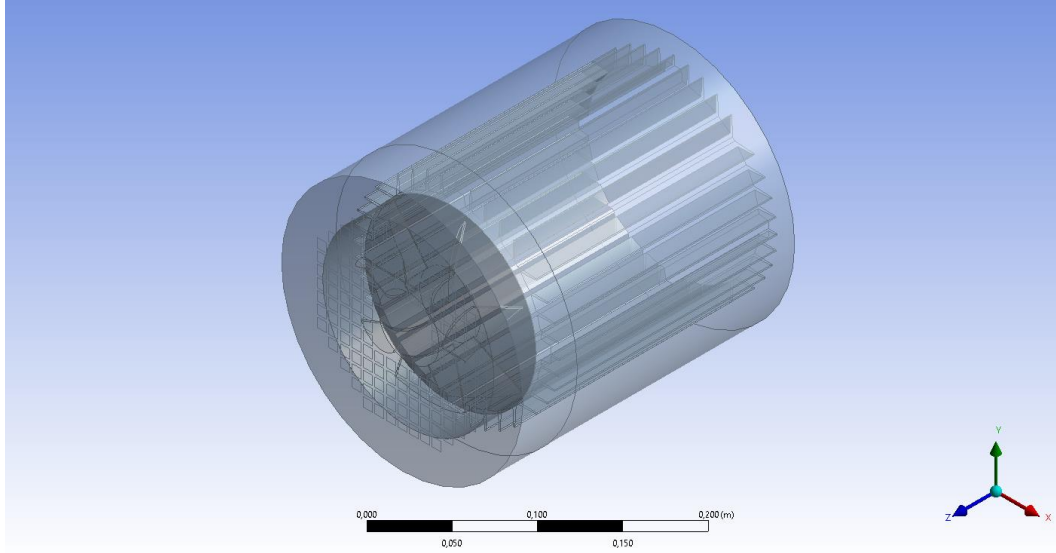
Akışkanlar mekaniğinin bir dalı olan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ya da bir diğer ismiyle Computational Fluid Dynamics (CFD) cisimler üzerindeki akışkanın hareketinin simülasyonlar ve algoritmalar yardımıyla analiz edilmesini sağlar.

Bu analizdeki amaç incelenecek parçanın küçük parçalara ayrılarak her parça için çözümlenmesini sağlamaktır. Çalışma yapılacak parça ne kadar küçük parçalara ve doğru geometrik şekillere bölünürse yapılacak analizin doğruluğu da o oranda artmaktadır. Parça sayısı ve geometrisi çalışma yapılacak bölgenin geometrik özelliğine bağlıdır.

Bu sayede bir ürün üretilmeden önce üzerinde ne gibi eksiklikler olduğu öngörülerek tasarımda amaca yönelik iyileştirmeler yapılır. Mühendislik alanında oldukça sık kullanılan analiz türlerindendir. Bu tez çalışmasında tasarımı yapılan fan içerisinde hava akış analizi yapılarak havanın fanın üzerinde ki akış hareketi gözlemlenmiştir. Yapılan analiz de beş aşama ile sonuca varılmıştır. Geometry, Mesh, Setup, Solution ve Results aşamaları ise şu şekildedir.

5.3.1 Geometri

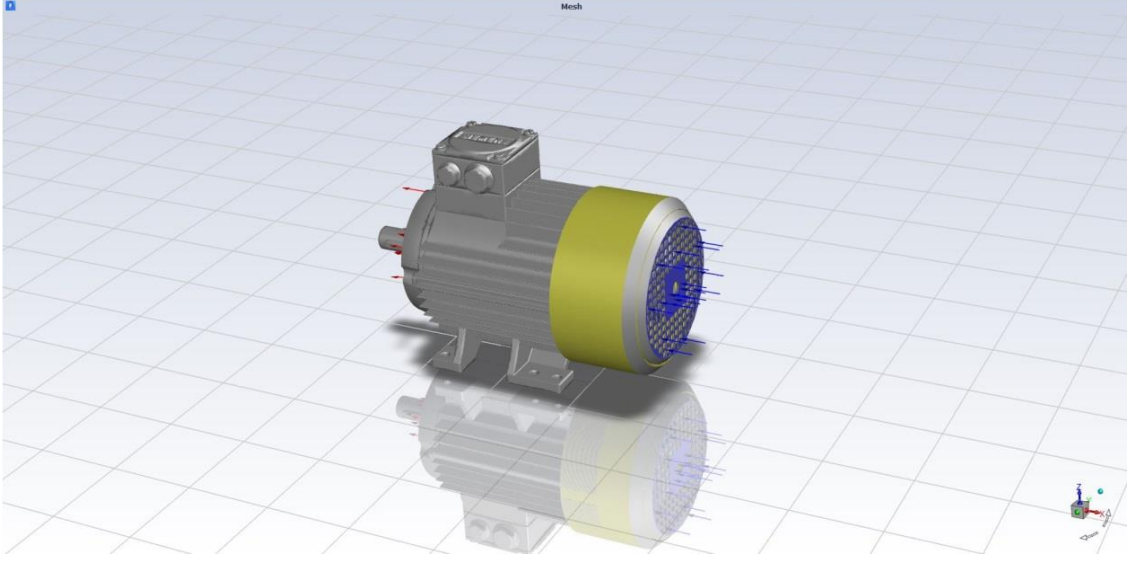
Geometri içerisine Import Geometry browse yardımıyla 3 boyutlu tasarım programı olan Fusion360'da tasarımı yapılan fanın .step uzantılı dosya türü seçilmiştir. Edit Geometry in Design Modeler yardımıyla fan dosyası açılmıştır. Bu bölüm içerisinde hava akış analizinin yapılabilmesi için fanın etrafına kafes çizilmesi Tools, Enclosure yardımıyla yapılmıştır. Kabuk (shape) silindir (cylinder) olarak seçilmiştir. Ve havanın giriş yönü Z-axis eksenini (cylinder alignment) olarak belirlenmiştir. Etrafına çizilen silindir şeklindeki kabuk her tarafından 5 mm boşluk kalacak şekilde çizilmiştir. Hava akımının daha iyi görülebilmesi ve CFD analizin yapılabilmesi için çizilen kabuk içerisinde ise motordan sadece havanın geçtiği yerlerden temsili bir rüzgâr tüneli oluşturulmuştur. Son yapılan işlemler generate edildikten sonra mesh alanına geçiş yapılmıştır. Şekil 5.9'da asenkron motor üzerinde oluşturulan rüzgâr tüneli görülmektedir.



Şekil 5.9. Asenkron motor üzerinde oluşturulan rüzgar tüneli

5.3.2 Mesh

Mesh işlemi analiz sonucunu doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Fiziksel modelin matematiksel modele dönüştürme işlemi olan mesh içerisinde element size boyutu 1 mm alındığında minimum orthogonal quality değerinin 0,1 olduğu ve yapılacak analiz için ideal kalite değerinde olduğu görülmüştür ve çizim generate edilerek mesh atılması sağlanmıştır. Hava giriş ve çıkışın belirlenmesi için Create Named Selection yardımıyla Z eksen yönünde hava girişi havag-inlet (mavi) ve tam zıt yönünden de hava çıkışı havac-outlet (kırmızı) belirlenmiştir. Şekil 5.10'da asenkron motorun hava giriş ve çıkış yönü görülmektedir.



Şekil 5.10. Asenkron motor hava giriş çıkış yönü

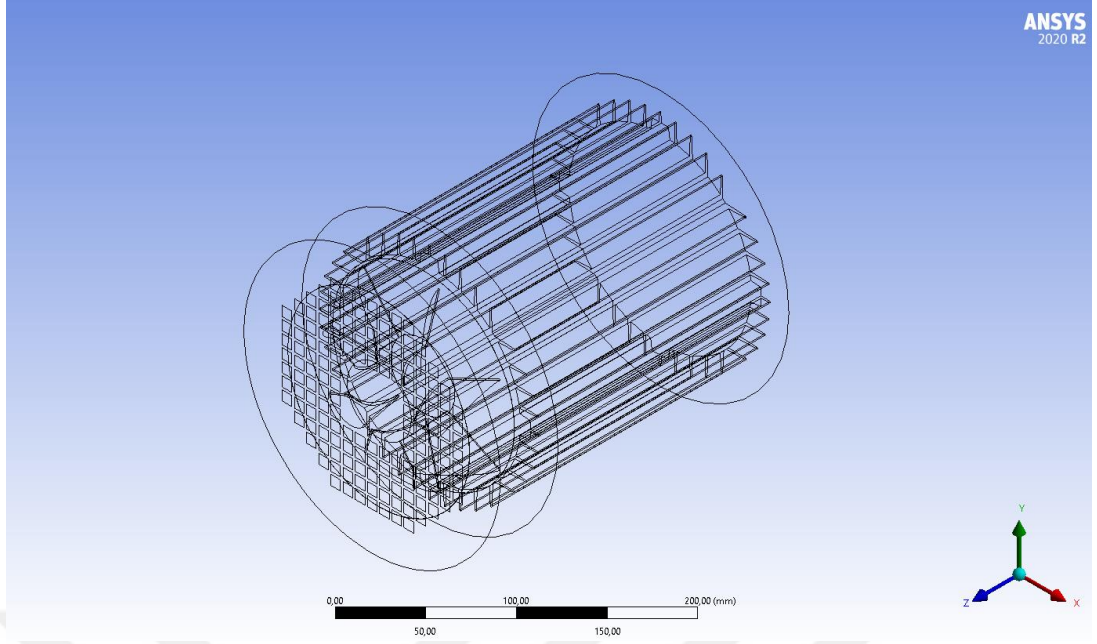
Yapılan analizlerin doğru değerlere yakın olması için mesh kalitesinin yüksek olması gerekir. Bu durumda bazı ayarlamalar ve kontrol edilmesi gereken mesh kaliteleri vardır.

Yapılması gereken ayarlamalar şöyledir:

- ✓ Capture Curvate aktifleştirilerek eğri yüzeylerde 70° 'ye kadar kör noktaları yakalayarak bu yüzeylere uygun mesh atılması sağlanır.
- ✓ Capture Proximity aktifleştirilerek çizim içerisinde birbirine yakın olan alanlara daha hassas mesh atılması sağlanır. Geçişlerin daha iyi mesh edilmesi sağlanmış olur.
- ✓ Inflation yapılması gereken önemli ayarlamalardan bir diğeridir. Bu ayar sınır tabakaların daha iyi modellenmesini sağlar. Use Automatic Inflation ayarı Program Controlled olarak seçilir bu komut sayesinde parçanın üzerinde özellikle dairesel alanları otomatik algılayarak daha uygun mesh modellemesi yapılması sağlanır. Sınır tabaklar ne kadar iyi modellenirse parçanın analizi gerçeğe o kadar yakın olur.
- ✓ Physics Prefence akış analizi yapılacağı için mutlaka CFD olarak seçilmelidir.

Kontrol edilmesi gereken kalite değerleri ise şöyledir:

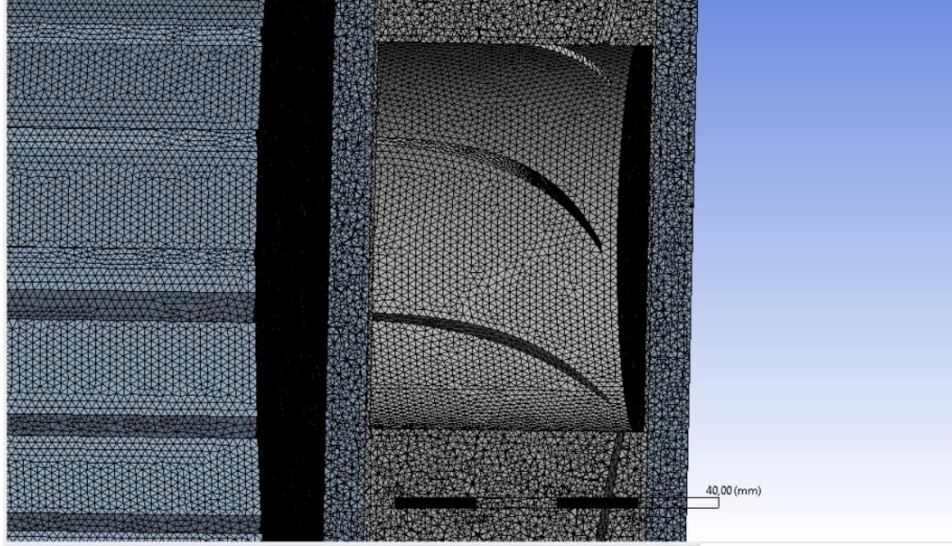
- ✓ Element Quality: Mesh elemenlarının kenar oranlarının 0,25-1 arasında olması gerekir. Yani oran 1'e yaklaştıkça kalite artar ve oranın 0,25 'in altına düşmemesi gerekir. Element Quality'nin iyi bir değere sahip olması diğer kalite değerlerininde ideal değere sahip olduğunu gösterir. Yapılan fan analiz çalışmasında Element Quality değeri 0,84763 değeri elde edilmiştir.
- ✓ Aspect Ratio: Dikdörtgen mesh elemanlarının birbirine oranıdır. 1 (bir) bu kalite için çok ideal bir değerdir. Oran 10'un üzerine çıktııkça kalite düşmektedir. Yapılan fan analiz çalışmasında Aspect Ratio değeri 1,813'dır.
- ✓ Jacobian Ratio: Üçgen mesh elemanlarının birbirine oranıdır. 1 (bir) mükemmel 10(on) ideal, 30 ve üzeri kalitesiz değere sahip olduğunu göstermektedir. Yapılan fan analiz çalışmasında Jacobian Ratio değeri 1 (bir) yani mükemmel kalite değerindedir.
- ✓ Skewness: Bir mesh elemanın sahip olduğu açların oranıdır. Sapma miktarı olarak tanımlanabilir. Sıfıra (0) yaklaştıkça kalite artar 1 (bir) ve üzeri ise kalitesiz olduğunu gösterir maksimum 0.9 değerine sahip olabilir. Yapılan fan analiz çalışmasında Skewness değeri 0,21127'dir.
- ✓ Orthogonal Quality: 0-1 arasındaki kalite değeridir. 1'e doğru yaklaştıkça kalitenin arttığı anlamına gelmektedir. Min.0,1-0,01 olarak kabul edilebilir. CFD analiz çalışmalarında kontrol edilmesi gereken en önemli kalite parametresi Minimum Orthogonal Quality'dir. Yapılan fan analiz çalışmasında Min. Orthogonal Quality 0,10361 değerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 5.11. Motor duvarlarının wireframe görüntüsü

Şekil 5.11’de fanın ve fandan gelen havanın temas ettiği motor duvarlarının wireframe görüntüsü bulunmaktadır.

Statistics değerleri kontrol edildiğinde Nodes sayısı 792897, Elements sayısı ise 4252553 tane olduğu görülmüştür. Akış analizlerinde Orthogonal Quality ve Skewness kaliteleri çok önemlidir. Orthogonal Quality’nin 0,1’in üzerinde Skewness’in 0,95’in altında olması gerekir (Ansys, 2009). Yapılan mesh işleminde 4252553 tane element olduğu için mesh görüntüsü Şekil 5.12’de kesit alınarak gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Mesh görüntüsünden kesit

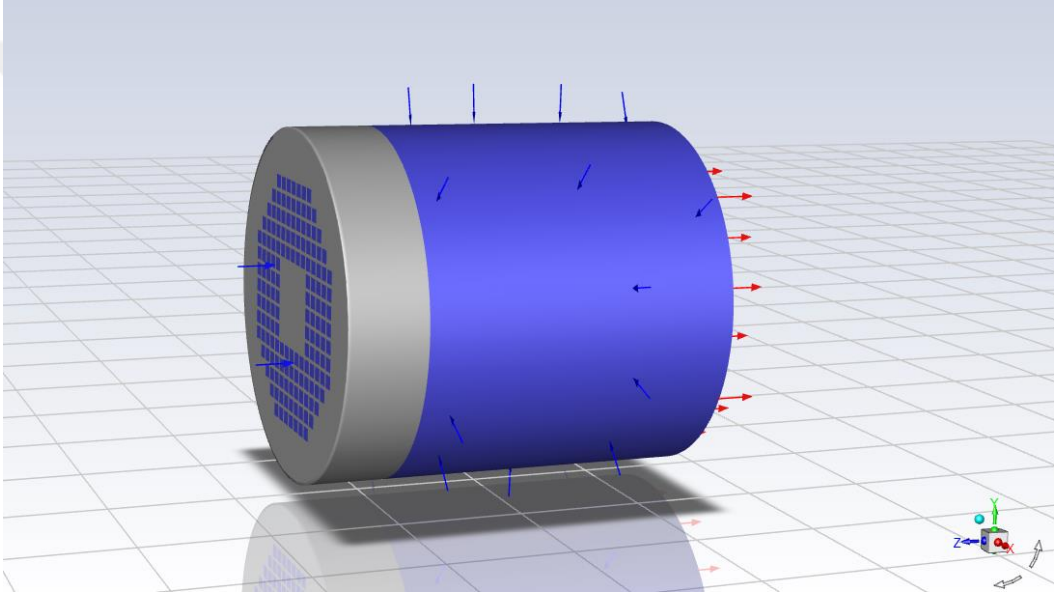
Tasarlanan eksenel fanın mesh aşamasında elde edilen tüm kalite değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir. Mesh aşamasından sonra bu alandan çıkıp fluid flow un 3. adımı olan mesh tekrar update edilerek bir sonraki adım Setup’a geçilmiştir.

Çizelge 5.2. Fan Kalite Değerleri

KALİTE DEĞERLERİ	
Element Quality	0,84763
Aspect Ratio	1,813
Jacobian Ratio	1
Skewness	0,21127
Min. Orthogonal Quality	0,10361
Nodes	792897
Element Sayısı	4252553

5.3.3 Setup

Setup içerisinde Boundary Conditions yardımıyla hava giriş (havag-inlet) ve hava çıkış (havac-outlet) tanımlaması yapılmıştır. Havag (inlet) seçilerek type bölümünden pressure-inlet seçilir. Havac (outlet) ise type bölümünden pressure-outlet olarak tanımlama yapılmıştır. Motor üzerinde soğutma etkisi olarak iki faktör bulunmaktadır. İlki fandan gelen havanın soğutma etkisi ikincisi ise motorun dış ortamla temas ettiği ve motor duvarlarından yaydığı sıcaklık ile soğutma etkisidir. Şekil 5.13'te motor üzerindeki soğutma faktörleri görülmektedir.



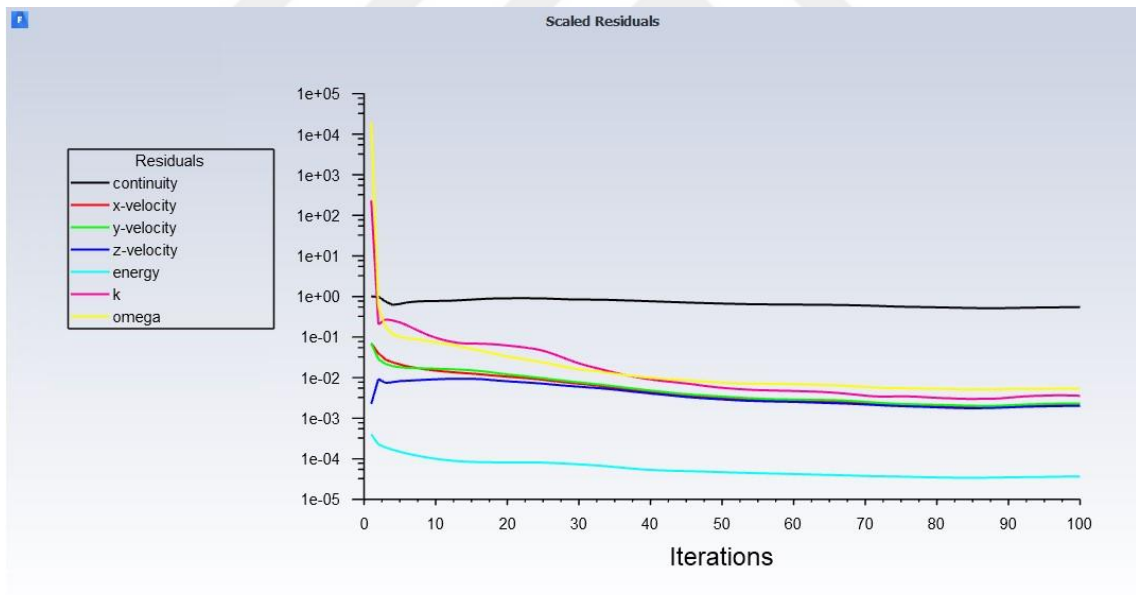
Şekil 5.13. Motor üzerindeki soğutma faktörleri

Hesaplama modeli olarak akış türbülanslı olduğu için k-epsilon (k- ϵ) iki denklemlilik türbülans modeli kullanılmıştır. Bu model içerisinde geometri yapısına bağlı olarak üç yöntem mevcuttur. Bu yöntemler standart, RNG ve realizable yöntemleridir. Realizable yöntemi basınç farklılığı olduğunda kullanılmaya uygun olduğu için bu yöntem seçilmiştir.

Motor etrafında soğutma duvarı olduğundan Near-Wall Treatment (duvara yakın işlem) içerisinde ölçeklenebilir duvar fonksiyonu Scalable Wall Functions aktif edilmiştir. Initialization ile standart başlatma çözümü, Run Calculations aşamasında 100 iterasyon sayısı ile çözümleme yapılmıştır.

5.3.4 Results

Son aşamada Result ise hava taneciklerinin fanın üzerindeki hareketleri gözlemlenmektedir. Aynı işlem setup içerisinde iterasyon tamamlandıktan sonrada elde edilmektedir. Initialization ile standart başlatma çözümü, Run Calculations aşamasında 100 iterasyon sayısı ile çözümleme yapılmıştır. Hedeflenen enerji grafiği Şekil 5.14'te Scaled Residuals grafiğinde görülmektedir. Bir CFD çözümünde süreklilik ve k-epsilon terimlerinin toplamı asla tam olarak sıfır olmaz, ancak ilerleyen iterasyonlar ile azalması beklenir (Cimbala, 2015). Süreklilik (continuity), k-epsilon değerlerinin grafikte yakınsadığı görülmektedir ve bu grafik yapılan analizin doğruluğu göstermektedir.

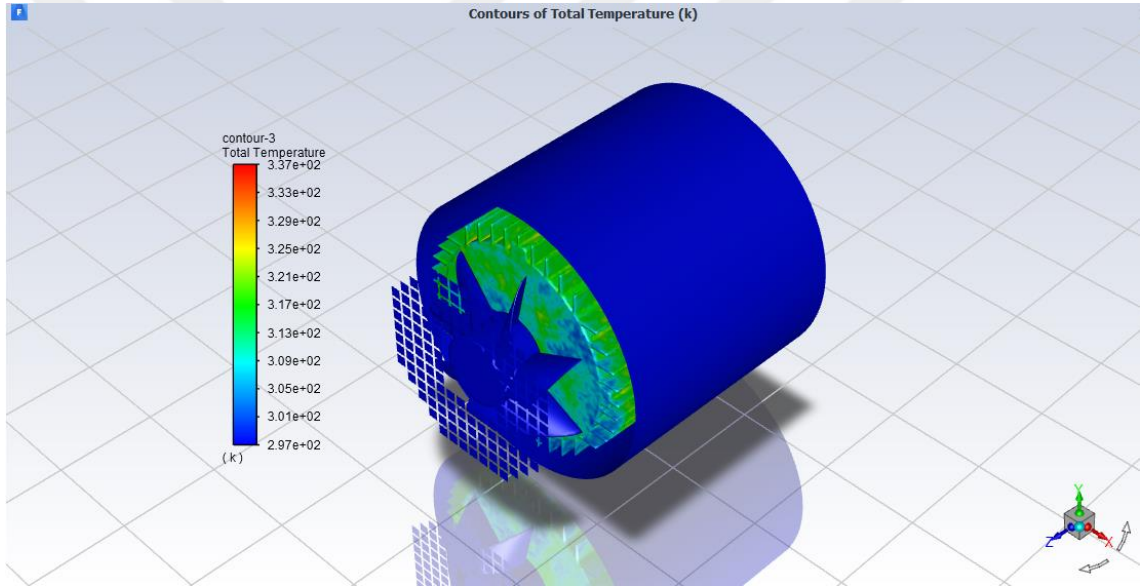


Şekil 5.14. Enerji (Scaled Residuals) Grafiği

5.4 Termal Analiz

Fan için yapılan CFD ve termal analizlerde iki önemli unsur bulunmaktadır. İlk olarak mesh kalitesinin yüksek olması ve diğerinin ise girilen sınır şartlarının doğru olmasıdır. Yapılan bu çalışmada Min. Orthogonal Quality 0,10361 değeri elde edilerek yüksek kaliteye ulaşılmıştır.

Sınır şartları ise termal analiz söz konusu olduğu için burada ortalama basınç ve ortalama hava sıcaklığı kullanılmıştır. Analizin 3. aşaması olan Setup bölümünde Energy komutu aktifleştirilerek CFD ile birlikte termal analizin yapılması sağlanmıştır. Burada motor sıcaklığı asenkron motorların ortalama çalışma sıcaklığı olan 80°C alındı. Motoru soğutan hava sıcaklığı ise ortam sıcaklığı olarak kabul edilen 20°C olarak girildi.



Şekil 5.15. Motor üzerindeki hava temas noktaları

Motoru, fan ile birlikte dış havayla temas ettiği motor duvarlarında soğuttuğu kabul edilerek analiz yapıldı. Fanın dönme hızı ile fan koruyucu kapağından çektiği hava ve motorun dış yüzey ile ortama olan teması motorun soğutulmasındaki önemli etkenlerdir. Şekil 5.15'te fanın koruyucu kapaktan çektiği hava girişi ve motorun temas ettiği dış duvar ile çevrelendiği sınır şartları görülmektedir.

5.5 Termal Yükleme Testleri

Tasarlanan eksenel fanın soğutma verimini net görebilmek için laboratuvar ortamında test düzeneği hazırlanıp asenkron motor üzerinde fansız, tasarlanan eksenel fan ile ve motorun orijinal fanı yani radyal fan ile sıcaklık değerleri üç ayrı test yapılarak termal kamera ile kontrol edilmiştir. Aşağıdaki şekilde hazırlanan test düzeneği ve termal kamera ile ölçümü görülmektedir.

Veriler maksimum, ortalama ve minimum sıcaklıkları her iki dakikada bir, güç değerleri hız (rpm), akım (A), tork (Nm), elektriksel güç (W), toplam elektriksel güç (W) verim (%) ise altı dakika da bir olacak şekilde kaydedilmiştir. Bu periyotlar her üç test içinde uygulanmıştır. Sıcaklık değerleri hazırlanan grafiklerle, güç değerleri ise tablo halinde hazırlanarak eklenmiştir.



Şekil 5.16. Hazırlanan test düzeneği

Motor sıcaklıkları hep aynı yerden ölçülerek değerlerin doğru noktadan alınması için dikkat edilmiştir. Termal kamera ile yapılacak her test düzeneği için motorun en yüksek

sıcaklığa sahip olan gövdenin orta noktasını hedef alarak ve hareket ettirilmeden yerinin sürekli sabit kalacağı şekilde termal kamera yerleştirilmiştir. Şekil 5.16’da motor sıcaklığının termal kamera ile ölçümü görülmektedir.

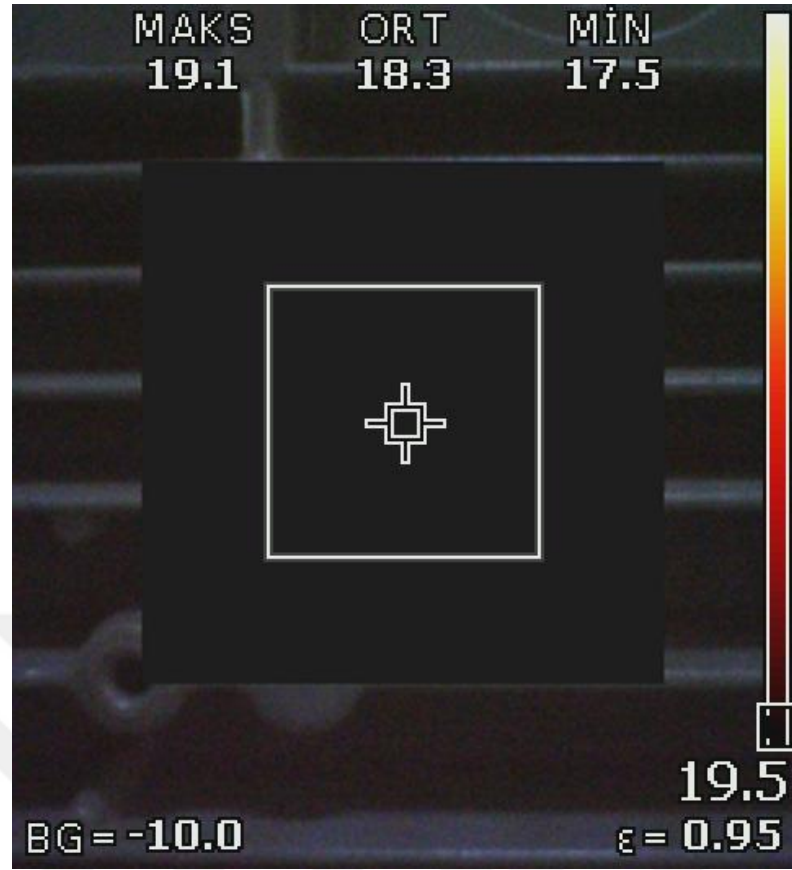
5.5.1 Fansız çalıştırılan motor ile sıcaklık testi

Motor sıcaklık değeri ortam sıcaklığı 19.1°C dereceden başlayarak 90°C derece sıcaklığa kadar motor çalıştırılıp her iki dakikada bir sıcaklık değerleri maksimum, minimum ve ortalama olarak tüm değerleri ölçülmüştür. En yüksek sıcaklık maksimum sıcaklık, en düşük sıcaklık minimum sıcaklık ve çoğunluklu sıcaklığa sahip motor sıcaklığına ortalama sıcaklık olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 5.17. Fansız olarak çalıştırılan motor test düzeneği

Şekil 5.17’de fansız olarak çalıştırılan motor test düzeneği görülmektedir. Fansız olarak çalıştırılan asenkron motor sıcaklık artışının düzenli periyotta hangi sıklıkla yükseldiği gözlemlenmiştir. Yaklaşık yarım saatte motor izin verilebilir sıcaklığa ulaştığı görülmektedir.



Şekil 5.18. Motor başlangıç sıcaklığının termal kamera ile görüntüsü

Şekil 5.18’de motor başlangıç sıcaklığının termal kamera ile sıcaklık ölçümü görülmektedir. Fansız olarak çalıştırılacak asenkron motor başlangıç sıcaklığı maksimum değeri 19.1°C derece ile teste başlanmıştır.

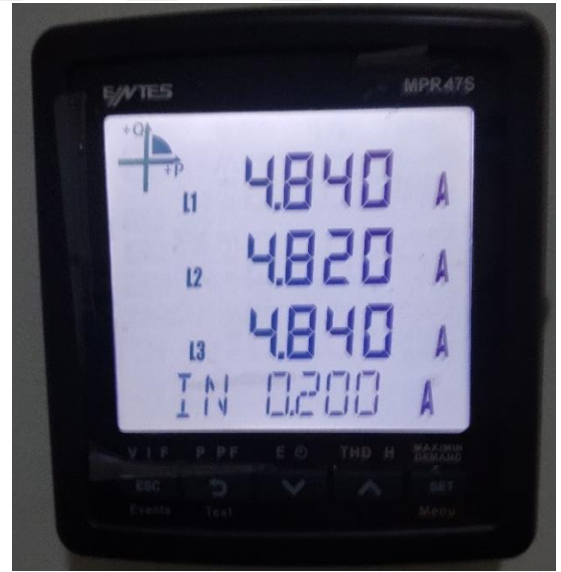
Fansız motor güç başlangıç değerleri kontrol ünitesi Şekil 5.19’da test kontrol ünitesi olarak görülmektedir. Kontrol ünitesinde dinamo aktif edilir ve bağlantı tamamlandığında motor nominal akımına göre anma değerine yakın olarak teste başlanır. Motor mekanik gücü 2165 W olarak teste başlanmıştır.



Şekil 5.19. Test kontrol ekranı



Şekil 5.20. Test başlangıcındaki akım



Şekil 5.21. Test bitişindeki akım değerleri

Test başladığında akım 5.1 amper de iken test tamamlandığında akım 4.84 ampere ulaştığı Şekil 5.20’de ve Şekil 5.21’de görülmektedir. Motor ısındıkça sargı dirençleri ısıya bağlı olarak değiştiği için direnç artmakta akım düşmektedir. Test sonundaki akımın motorun anma akımı olan 4.85 A değerine yakın olması sağlanmıştır.

5.5.2 Radyal fan ile motor sıcaklık testi

Orijinal fanı olan ve endüstride kullanım kolaylığı nedeni ile en çok tercih edilen radyal fan asenkron motor üzerine monte edilerek test aynı şartlar altında başlatılmıştır. Her iki dakikada bir termal kamera ile sıcaklıkları değerleri ölçülmüştür. Ve yine aynı periyotlara sahip olacak şekilde altı dakikada bir güç değerleri; hız (rpm), akım (A), tork (Nm), elektriksel güç (W), toplam elektriksel güç (W) verim (%) kaydedilmiştir. Termal testlerde motorun termal rejime ulaşması süresince sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Motor test standartları EN60034 ‘e göre motorun tam yükteki sıcaklık artışı durduktan sonra 30 dk içerisinde en fazla 0.5°C derece artması veya azalması durumunu yakalandığında motor termal rejime ulaşmıştır. Şekil 5.22’de radyal fan için hazırlanan test düzeneği görülmektedir.



Şekil 5.22. Radyal fan ile motor sıcaklık test düzeneği

5.5.3 Tasarlanan eksenel fan ile motor sıcaklık testi

Hazırlanan test düzeneğinde 3D yazıcıdan çıktısı alınan eksenel fan, motor üzerine monte edilerek motor çalışmaya hazır hale getirilmiştir. Motor sıcaklığı termal rejimi elde edene kadar sıcaklık artışı her iki dakikada bir kaydedilerek ölçülmüştür. Şekil 5.22’de eksenel fanın motor üzerinde montajı ve test düzeneği görülmektedir.

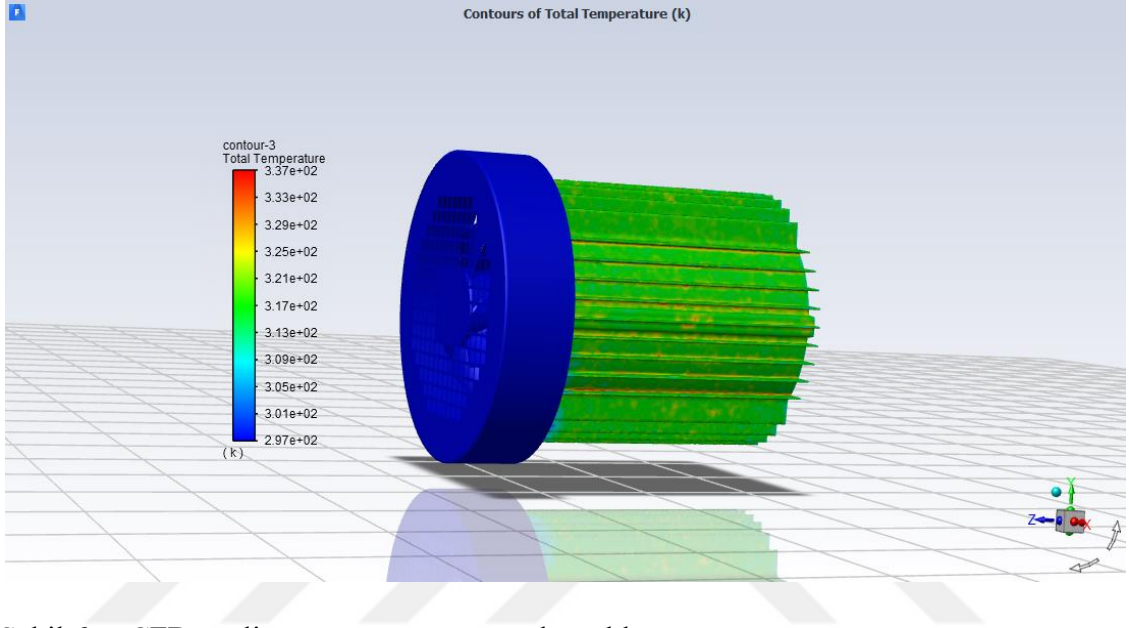


Şekil 5.23. Tasarlanan eksenel fan için test düzeneği

6. BULGULAR

6.1 Analiz Sonuçları

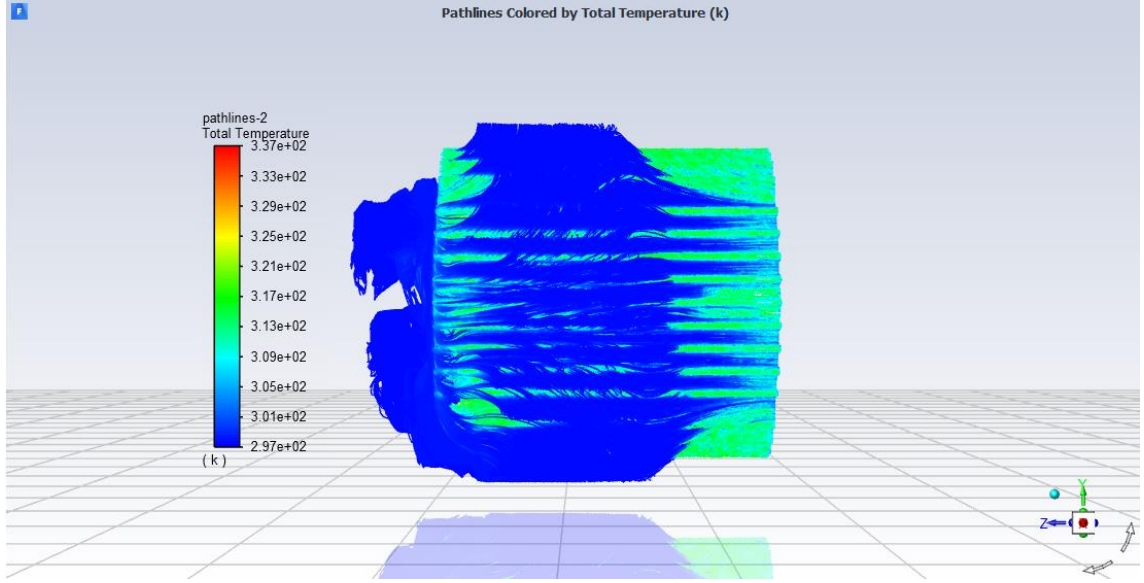
Asenkron motorlar çalışma koşullarına bağlı olarak motor üzerinde bölgelerine göre sıcaklığı değişkenlik gösterir. Havanın ilk temas ettiği noktalar minimum sıcaklığa, motor sargılarının olduğu orta bölüm ise maksimum sıcaklığa sahiptir.



Şekil 6.1. CFD analiz sonucu motor termal sıcaklığı

Yapılan fan analizinde elde edilen maksimum sıcaklık 337 Kelvin (64°C derece) ve bu sıcaklık motor sargısına en yakın noktalarda oluşmaktadır. Minimum sıcaklık ise 297 Kelvin (24°C derece) bu bölümler ise fandan çıkan havanın ilk temas ettiği motorun ön bölümleridir. Şekil 6.1 de Ansys CFD de analizi tamamlanan asenkron motorun termal sıcaklığı görülmektedir.

Tasarlanan eksenel fanın etkisi ile motorun en sıcak bölgesi olan orta yüzeye daha çok temas ederek hava akımı oluşturduğu görülmektedir. Bu hava akımı ile hedeflenen soğutma bölgesine ve istenilen hava akımına ulaşılmıştır.

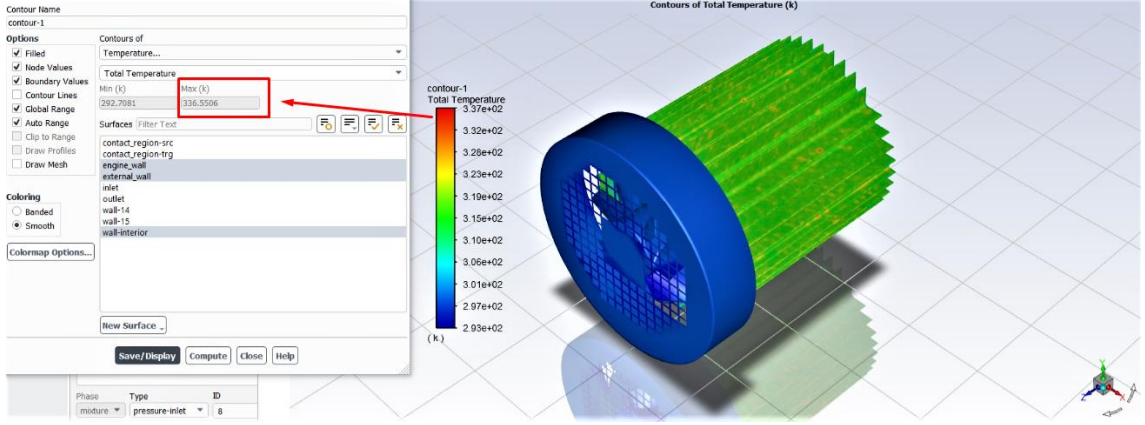


Şekil 6.2. Motor üzerindeki hava akış çizgileri

Tasarlanan eksenel fanın oluşturduğu hava akımı motorun en sıcak bölgesine sürekli temas ederek motor yüzeyinden fazla sıcaklığı alır, dış yüzeye aktarılmasını sağlar ve motorun verimli çalışmasına önemli bir fayda oluşturur. Şekil 6.2 de CFD analizi tamamlanan eksenel fanın motor üzerinde hava akış çizgileri görülmektedir.

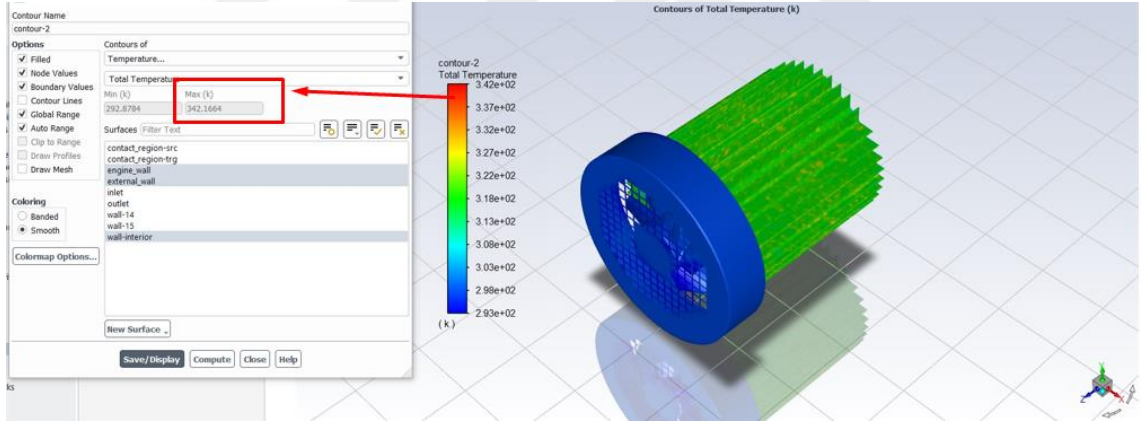
6.2 NEMA Standartlarında İzin Verilebilir Sıcaklıklar İçin Analiz

Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği (NEMA) belirlemiş olduğu standartlar da motor çalışma sıcaklıkları izolasyon sınıf gruplarına göre 60°C, 75°C, 80°C, 105°C ve 125°C'dir. Tasarlanan eksenel fan için yapılan analizde projede kullanılan motor verimlilik sınıfına göre izin verilebilir maksimum gövde sıcaklığı 80°C için termal ve akış analizleri detaylı olarak incelenmiştir.



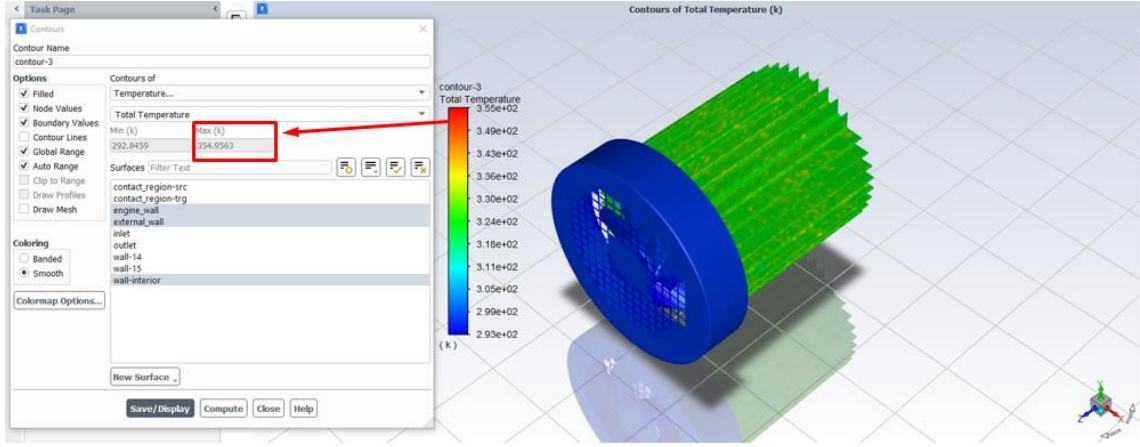
Şekil 6.3. Sıcaklık 80°C için termal analiz

Analizde 80°C için elde edilen maksimum sıcaklık şekil 6.3'te görüldüğü gibi 336.55 Kelvin, Celcius olarak kontrol edildiğinde maksimum sıcaklık 63.55°C'dir. 80°C sıcaklığa sahip motor üzerinde tasarlanan eksenel fanın oluşturduğu soğutma etkisi ile 16.45 °C'lik soğutma sağlamaktadır.



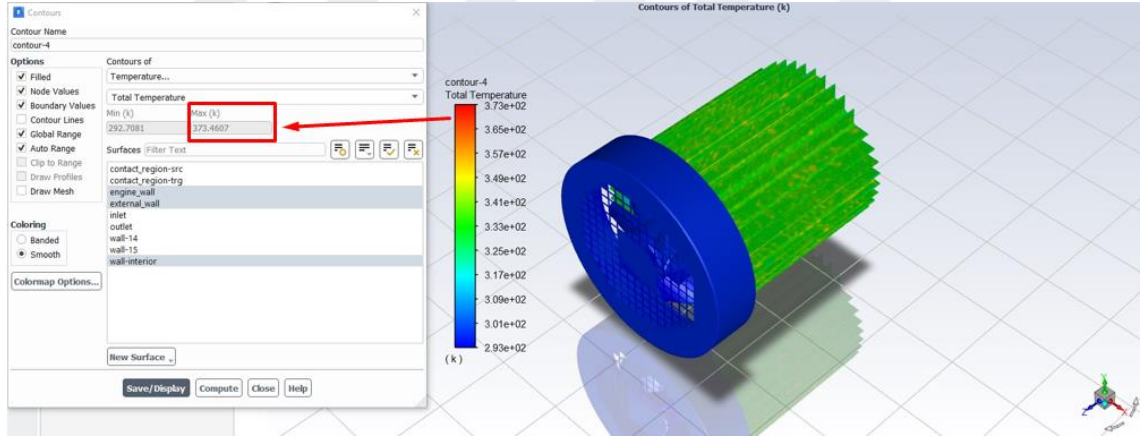
Şekil 6.4. Sıcaklık 90°C için termal analiz

Yapılan analizde 90°C için elde edilen maksimum sıcaklık şekil 6.4'te görüldüğü gibi 342.16 Kelvin, Celcius olarak kontrol edildiğinde elde edilen maksimum sıcaklık 69.16°C'dir.



Şekil 6.5. Sıcaklık 105°C için termal analiz

Sıcaklığı 105°C olan motor için yapılan analizde elde edilen maksimum sıcaklık şekil 6.5'te görüldüğü gibi 354.95 Kelvin, Celcius olarak kontrol edildiğinde maksimum sıcaklık 81.95°C'dir. 105°C sıcaklığa sahip motor üzerinde tasarlanan aksenal fanın oluşturduğu soğutma etkisi ile 23.05°C'lik soğutma sağlamaktadır.



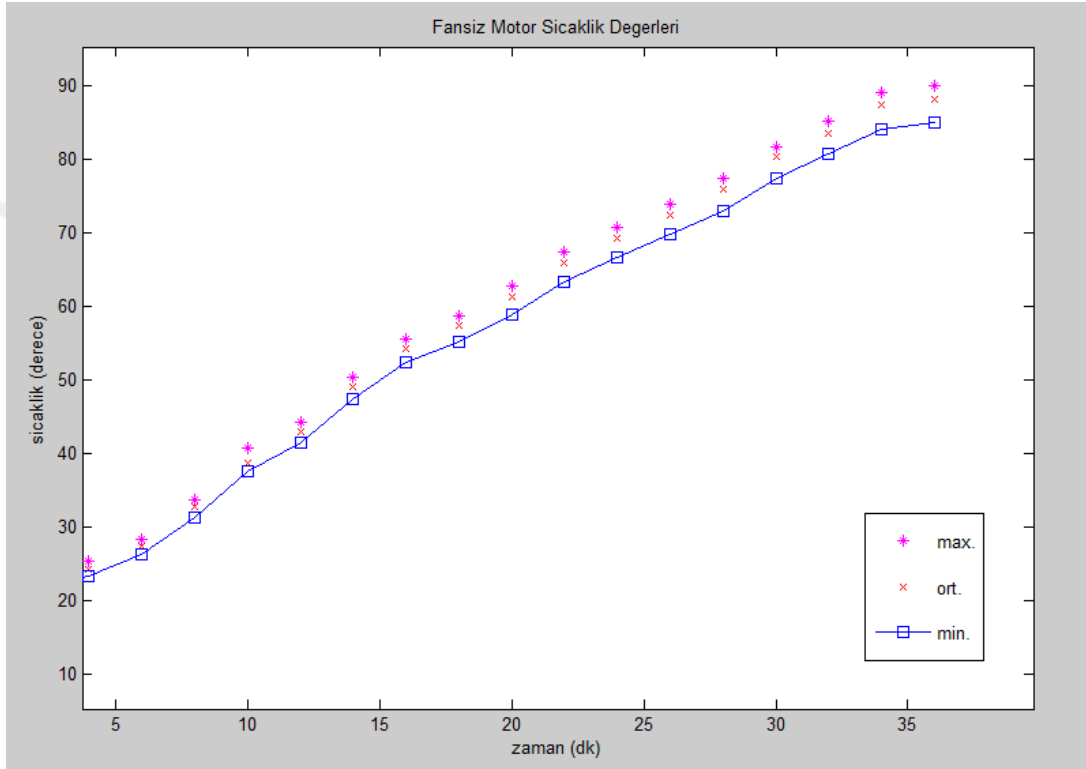
Şekil 6.6. Sıcaklık 125°C için termal analiz

Analizde 125°C için elde edilen maksimum sıcaklık Şekil 6.6'da görüldüğü gibi 373.46 Kelvin, Celcius olarak kontrol edildiğinde maksimum sıcaklık 100.46°C'dir. 125°C sıcaklığa sahip motor üzerinde tasarlanan aksenal fanın oluşturduğu soğutma etkisi ile 24.54°C'lik soğutma sağlamaktadır.

6.3 Termal Test Sonuçları

6.3.1 Fansız çalıştırılan motor ile sıcaklık test sonucu

Teste başlandığında motor maksimum sıcaklığı 19.1°C olarak ölçülmüştür ve test süresi izin verilebilir motor sıcaklığına kadar sürdürülmüştür. Motor fansız olarak çalıştırıldığı için 90°C dereceye ulaştığında motorun zarar görmemesi amacıyla testin 36. dakikasında 90°C dereceye ulaştığında test durdurulmuştur.



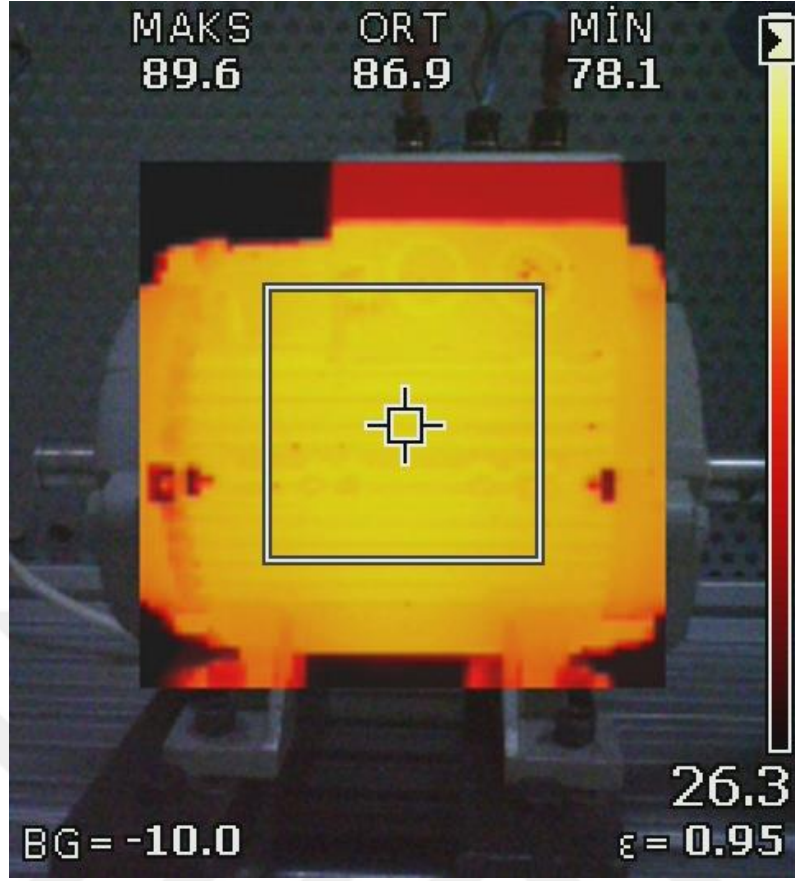
Şekil 6.7. Fansız olarak çalıştırılan motor sıcaklık grafiği

Fansız olarak çalıştırılan asenkron motor için sıcaklık değerleri incelendiğinde 30. dakikada maksimum ulaşılan sıcaklık 81.8°C derece, 32. dakikada maksimum sıcaklık 85.3°C derece, 34.dakikada maksimum sıcaklık 89.1°C derece ve 36. dakikada izin verilen maksimum sıcaklık 90°C dereceye ulaştığı görülmüştür. Şekil 6.7'de fansız olarak çalıştırılan motor sıcaklık grafiği görülmektedir.

Çizelge 6.1. Fansız motor sıcaklık değerleri

Zaman (dk)	Maksimum Sıcaklık (°C)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Minimum Sıcaklık (°C)
0	19.1	18.3	17.5
2	23.7	23	22
4	25.5	24.3	23.4
6	28.5	27.4	26.4
8	33.8	32.8	31.4
10	40.8	38.7	37.6
12	44.4	43.1	41.6
14	50.5	49.2	47.4
16	55.6	54.3	52.5
18	58.7	57.4	55.2
20	62.8	61.4	59
22	67.5	66.1	63.5
24	70.9	69.4	66.7
26	74	72.4	69.9
28	77.5	76.1	73.1
30	81.8	80.4	77.4
32	85.3	83.6	80.8
34	89.1	87.4	84.1
36	89.6	88.3	85.1

Çizelge 6.1’de fansız motor sıcaklık değerleri net olarak görülmektedir. Test tamamlandığında ulaşılan maksimum sıcaklık değeri 90°C derece görüldüğünde test durdurulmuştur.



Şekil 6.8. Test bittiğinde fansız motor sıcaklığı

Test tamamlandığında Şekil 6.8’de fansız olarak çalıştırılan motorun termal kamera ile sıcaklık ölçümü görülmektedir. Termal kameranın aşırı hassas olması nedeni ile görselde maksimum sıcaklık 89.6°C derece olarak görülmektedir.

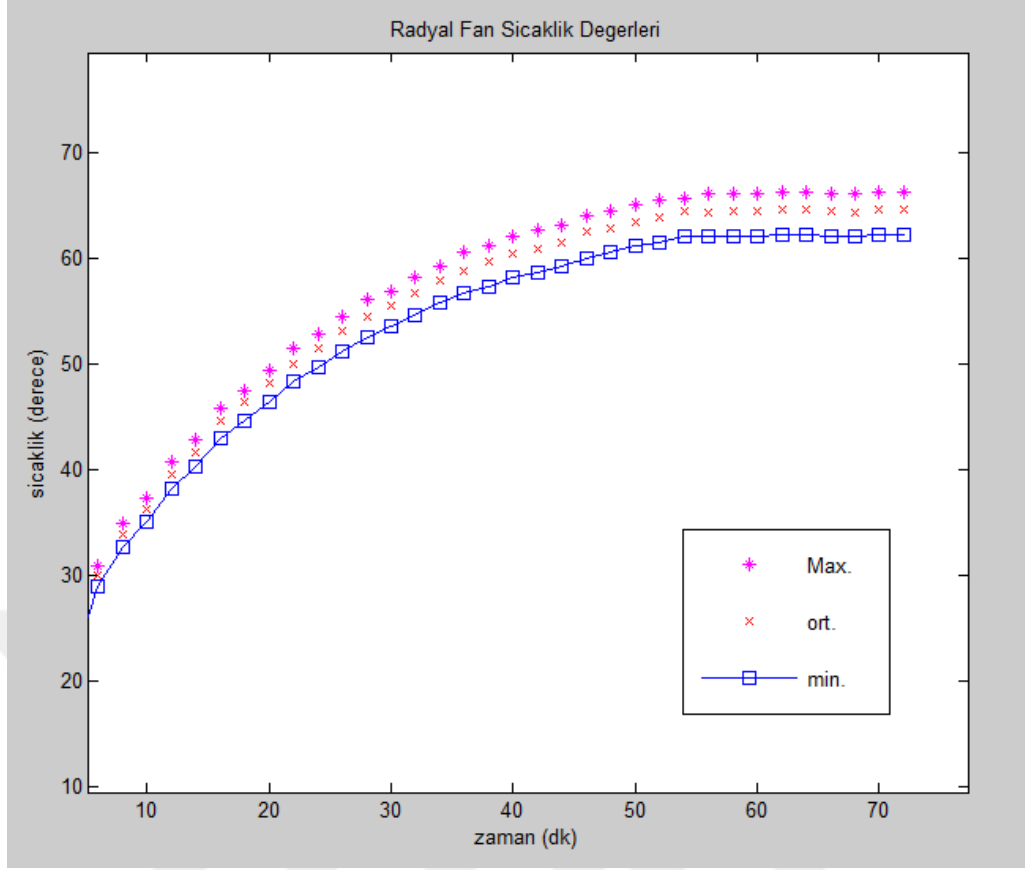
Çizelge 6.2. Fansız çalıştırılan motor güç değerleri

Zaman (dk)	Hız (rpm)	Akım (A)	Tork (Nm)	Güç (W)	Toplam Güç (W)	Verim (%)	Sıcaklık (°C)
6	1433	5.1	14.43	2165	2763	78.4	28.5
12	1432	4.94	14.23	2134	2621	80.2	44.4
18	1422	4.9	14.20	2114	2649	79.8	58.7
24	1420	4.86	14.20	2111	2631	80.2	70.9
30	1419	4.86	14.17	2105	2637	79.8	81.8
36	1414	4.84	14.15	2095	2628	79.7	90
Ortalama	1423	4.91	14.23	2120	2654	79.6	-

Fansız motor güç değerleri incelendiğinde nominal yük altından motorun gövde sıcaklığı takip edilmiş ve 90 derecenin daha üzerine çıkmaması ve motorun zarar görmemesi için test 36. Dakikada bitirilmiştir. Test süresince ortalama 2120 W mekanik güç ile %79.6 verim elde edilmiştir. Akımın test balancığında 5.1 A olarak ölçülmüştür. Motor ısındıkça sargı dirençleri arttığı için test sonunda akım 4.84 A olduğu gözlemlenmektedir. Ortalama akım değeri 4.91 A olup nominal akımın bir miktar üzerine çıkmıştır. Yapılan teste soğutucu fan kullanılmadığı için sıcaklık artışı 36 dakikada 90°C'ye ulaştığı gözlenmiştir. Düzenli periyotlarla kaydedilen güç değerleri Çizelge 6.2'de görülmektedir.

6.3.2 Radyal fan ile motor sıcaklık test sonucu

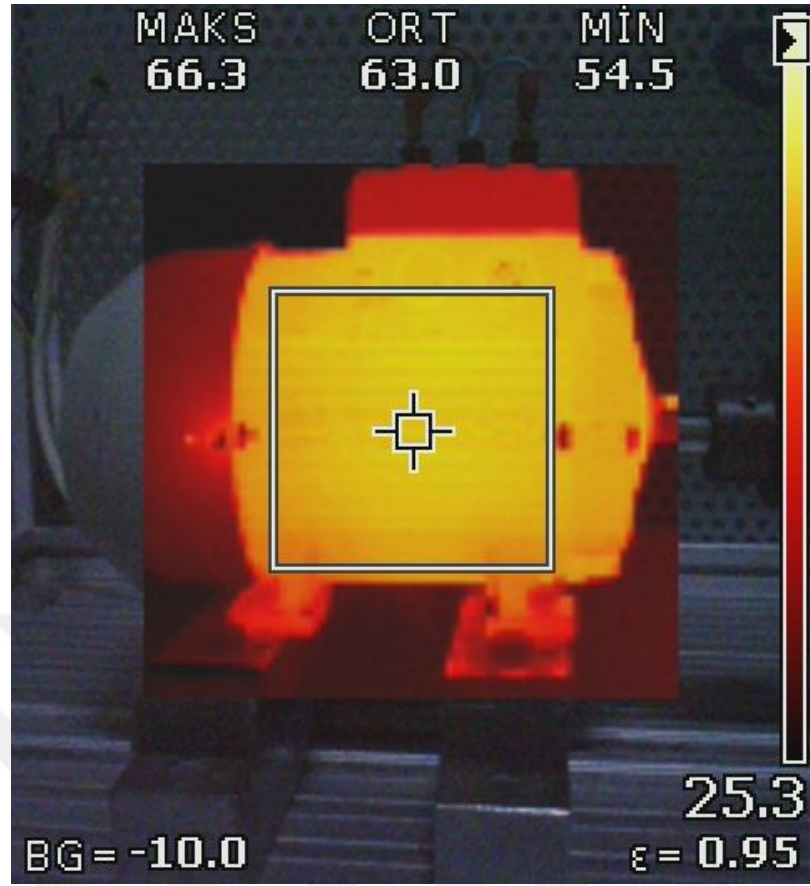
Teste başlandığında motor maksimum sıcaklığı 19.4°C olarak ölçülmüştür ve test süresi termal rejim oturana kadar devam edilmiştir. Termal rejimin 54. Dakikada oluşmaya başladığı aralarındaki sıcaklık farkının en fazla 0.5°C derece olduğu görülmüştür. Test 72. dakika da tamamlanmıştır. Test bittiğinde motorun maksimum sıcaklık değeri 66.3°C derece, ortalama sıcaklık 63°C derece ve minimum sıcaklık 54.5°C derece olarak görülmektedir.



Şekil 6.9. Radyal fan sıcaklık grafiği

72. dakikaya kadar olan tüm sıcaklık verileri kaydedilerek Şekil 6.9’da radyal fan sıcaklık grafiği elde edilmiştir. Grafikte maksimum, ortalama ve minimum sıcaklıkların 56. dakikadan itibaren termal rejimin başladığı görülmektedir.

Radyal fan sıcaklığı 56. dakikaya kadar artışla devam etmektedir. 56. dakikadan sonra iki dakikalık zaman aralığında ölçülen sıcaklık artışının azalmaya başladığı ve sıcaklığın sabitlenmeye başladığı gözlenmektedir. Sıcaklık artışının düzenli olarak devam ettiğini asenkron motor üzerinde soğutma sıcaklığının sabitlenmeye başladığı gözlemlenerek test süreci 16 dakika boyunca devam ettirilip 72. dakikada tamamlanmıştır. Test tamamlandığında fansız olarak çalıştırılan ve maksimum sıcaklığın 90° derece sıcaklığa kadar çıkan motorun, radyal fanın oluşturduğu hava akışının etkisiyle motor üzerindeki maksimum sıcaklık değeri 66.3°C derece olarak ölçülmüş ve motor üzerinde etkili bir soğutma sağladığı görülmüştür.



Şekil 6.10. Test bittiğinde radyal fanlı motor sıcaklığı

Şekil 6.10’da radyal fan ile yapılan testin tamamlandığında motorun sıcaklığının termal kamera ile sıcaklık ölçümü görülmektedir. Radyal fan için yapılan test sonucunda motorun en yüksek sıcaklığa sahip bölgesinde ölçülen maksimum sıcaklığın 66.3°C olduğu görülmektedir.

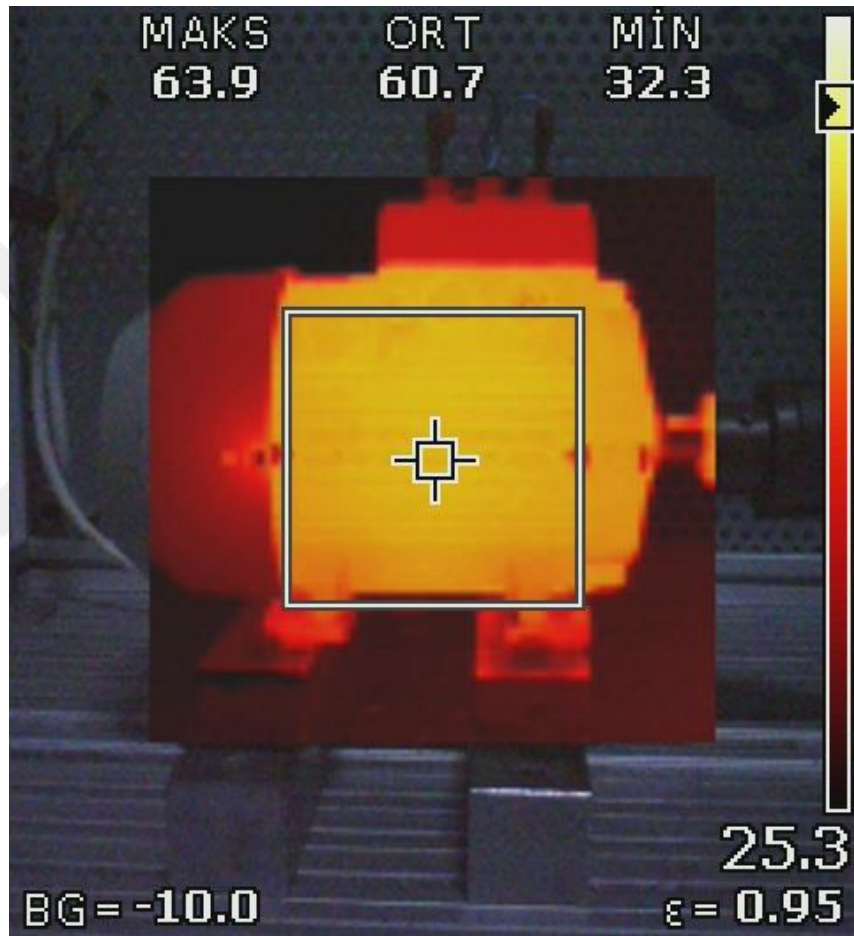
Çizelge 6.3. Radyal fan güç değerleri

Zaman (dk)	Hız (rpm)	Akım (A)	Tork (Nm)	Güç (W)	Toplam Güç (W)	Verim (%)	Sıcaklık (°C)
6	1431	5.16	14.63	2192	2814	77.9	30.9
12	1430	4.96	14.45	2165	2700	80.2	40.8
18	1427	4.90	14.43	2156	2667	80.8	47.5
24	1424	4.90	14.38	2144	2655	80.8	52.9
30	1422	4.86	14.20	2114	2655	79.6	56.9
36	1421	4.84	14.17	2108	2637	79.9	60.6
42	1418	4.80	14.17	2104	2625	80.2	62.7
48	1418	4.80	14.15	2101	2610	80.5	64.5
54	1416	4.80	14.15	2098	2613	80.3	65.7
60	1415	4.79	14.15	2097	2619	80.1	66.2
66	1416	4.78	14.12	2094	2601	80.5	66.2
72	1415	4.77	14.12	2092	2610	80.2	66.3
Ortalama	1421	4.86	14.26	2122	2650	80	-

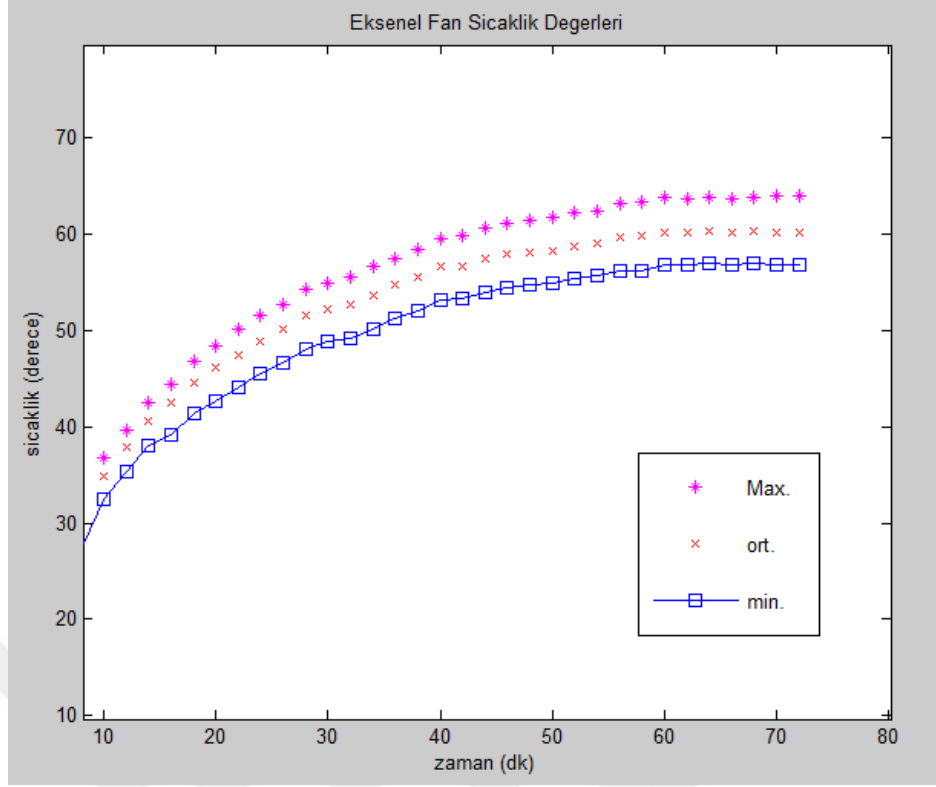
Radyal fan ile yapılan motor test güç değerleri düzenli periyotlarla kaydedilerek Çizelge 6.3'te radyal fan güç değerleri görülmektedir. Radyal fan güç değerleri incelendiğinde verimin test süresince artarak devam ettiği ve test tamamlandığında verimin % 80.2 olduğu görülmektedir. Akım ise başlangıç değeri 5.16 A'den azalarak 4.77 Amper'e ulaştığı gözlenmektedir. Yapılan teste radyal fan kullanıldığı için sıcaklık artışında fazla artış olmadığı 72. dakikada 66.3°C'ye ulaştığı gözlenmiştir.

6.3.3 Eksenel fan ile motor sıcaklık test sonucu

Eksenel fan testi için radyal fan ile aynı şartlar altında başlanmıştır ve test süresi termal rejim oturana kadar devam edilmiştir. Termal rejimin 56. Dakikada oluşmaya başladığı aralarındaki sıcaklık farkının en fazla 0.5°C derece olduğu görülmüştür. Test 72. dakika da tamamlanmıştır. Test bittiğinde motorun maksimum sıcaklık değeri 63.9°C derecedir. Şekil 6.11’de test tamamlandığında motorun termal kamera ile sıcaklık ölçümü görülmektedir.



Şekil 6.11. Test bittiğinde eksenel fanlı motor sıcaklığı



Şekil 6.12. Eksenel fan sıcaklık grafiği

Eksenel fan için elde edilen sıcaklık değerleri hazırlanan grafik ile Şekil 6.12’de görülmektedir. Test başlangıcında maksimum sıcaklık 20.1°C derece, ortalama sıcaklık 18.2°C derece ve minimum sıcaklık 15.8°C derecedir. Grafik incelendiğinde 56. dakikadan itibaren maksimum sıcaklık 63.1°C derece ile termal rejimin oturmaya başladığı görülmektedir. 58. dakikada maksimum sıcaklık 63.4°C derece, 60. dakikada maksimum sıcaklık 63.8°C derece şeklinde 0.5°C ve altındaki değer aralıklarında devam etmektedir. Testin tamamlandığı 72. dakikada ise maksimum sıcaklık 63.9°C derece, ortalama sıcaklık 60.2°C derece ve minimum sıcaklığın 56.8°C dereceye ulaştığı görülmektedir.

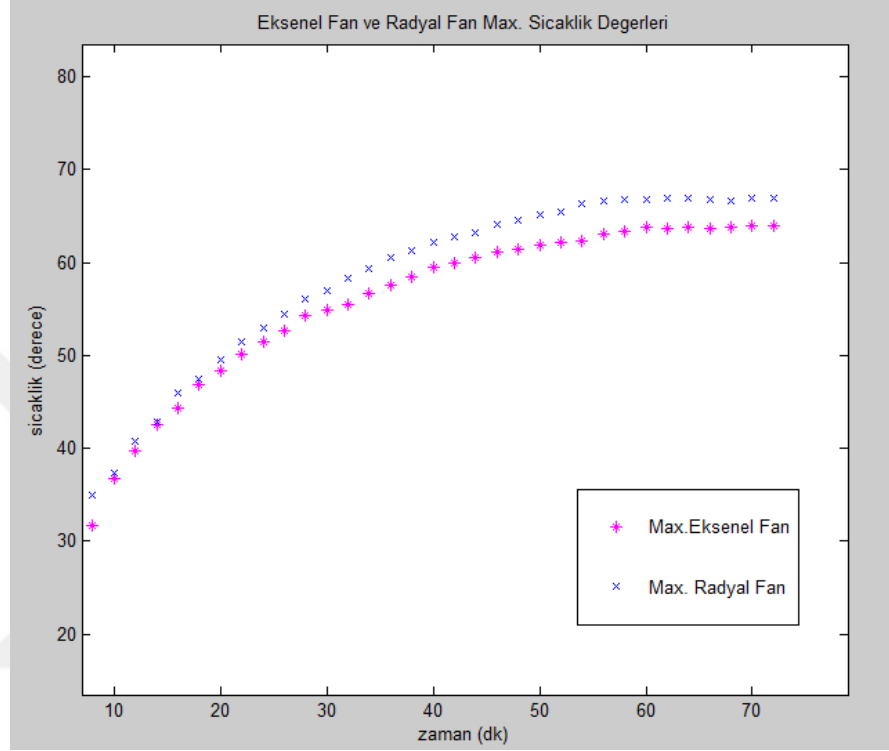
Çizelge 6.4. Eksenel fan güç değerleri

Zaman(dk)	Hız (rpm)	Akım (A)	Tork (Nm)	Güç (W)	Toplam Güç (W)	Verim (%)	Sıcaklık (°C)
6	1430	5.04	14.58	2183	2763	79	26.6
12	1426	4.90	14.35	2143	2670	80.3	39.7
18	1425	4.88	14.35	2141	2637	81.2	46.8
24	1421	4.82	14.32	2131	2628	81.1	51.5
30	1420	4.82	14.29	2125	2628	80.9	54.9
36	1411	4.80	14.26	2116	2619	80.8	57.5
42	1416	4.80	14.23	2110	2610	80.8	59.9
48	1418	4.78	14.27	2113	2601	81.2	61.5
54	1417	4.78	14.20	2107	2610	80.7	62.3
60	1415	4.7	14.00	2074	2616	79.3	63.8
66	1415	4.74	14.00	2074	2598	79.8	63.7
72	1417	4.74	13.97	2073	2592	80	63.9
Ortalama	1419	4.81	14.23	2115	2631	80.4	-

Eksenel fan testi tamamlandığında elde edilen güç değerleri çizelge 6.4'te görülmektedir. Güç değerleri incelendiğinde motorun test boyunca ortalama 2115 W ve % 80.4 verimle çalıştığı görülmektedir. Akımın da 5.04 amperden başlayarak motor ısındıkça sargı dirençleri arttığı için motor termal rejime ulaştığında akımın 4.74 A olmuştur. Ortalama akım 4.81 A olarak motor etiket değerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Yapılan teste eksenel fan kullanıldığı için sıcaklık artışının radyal fana göre motor sıcaklığının 2.4 derece daha düşük olduğu 72. dakikada 63.9°C'ye ulaştığı gözlenmiştir.

Eksenel fan ve radyal fan maksimum sıcaklık değerleri grafiği Şekil 6.13'te görülmektedir. Eksenel fanın maksimum sıcaklığı 64. dakikadan itibaren termal rejimin oturduğu ve sıcaklığın sabitlenmeye başladığı görülmektedir.

Grafik incelendiğinde 56. dakika da eksenel fanın maksimum sıcaklığı 63.1°C derece ile termal rejimin oluşmaya başladığı görülmektedir.



Şekil 6.13. Eksenel fan ve radyal fan maks. sıcaklık grafiği

Maksimum sıcaklığı 90° derecenin de üzerine çıkabilecek asenkron motor üzerinde test yapıldığında tasarlanan eksenel fanın oluşturduğu hava akışı nedeniyle asenkron motor maksimum sıcaklığı 63.9° derece olarak ölçülmüştür. Tasarlanan eksenel fan ile asenkron motor üzerinde etkili bir soğutma sağlanmıştır.

7. SONUÇ

CFD analizi ile oluşturulan hava akım çizgilerinin motor etrafında temas ettiği bölgeler gözlemlenerek akım çizgilerinin en fazla sıcaklığa sahip olan motorun orta bölümden geçerek soğutma sağladığı görülmüştür. Hedeflenen soğutma bölgesine hava akışının temas ederek fazla ısıyı motor üzerinden uzaklaştırdığı görülmüştür.

Motor verimliliğine göre izin verilebilir diğer sıcaklıklar için yapılan termal analizler de sırasıyla 80°C, 90°C, 105°C ve 125°C için yapılmıştır. Yapılan termal analiz sonucunda tasarlanan eksenel fanın soğutma etkisi ile 80°C dereceye sahip motorun gövdesinde en yüksek sıcaklık 336.55 Kelvin'dir. Analizde 80°C dereceye kadar ısıtılan motorun tasarlanan eksenel fan ile soğutma sağlanarak üzerindeki en yüksek sıcaklığı 63.55°C derece olduğu görülmüştür. Tasarlanan eksenel fan ile motor üzerinde 16.45°C derecelik soğutma sağlanmıştır.

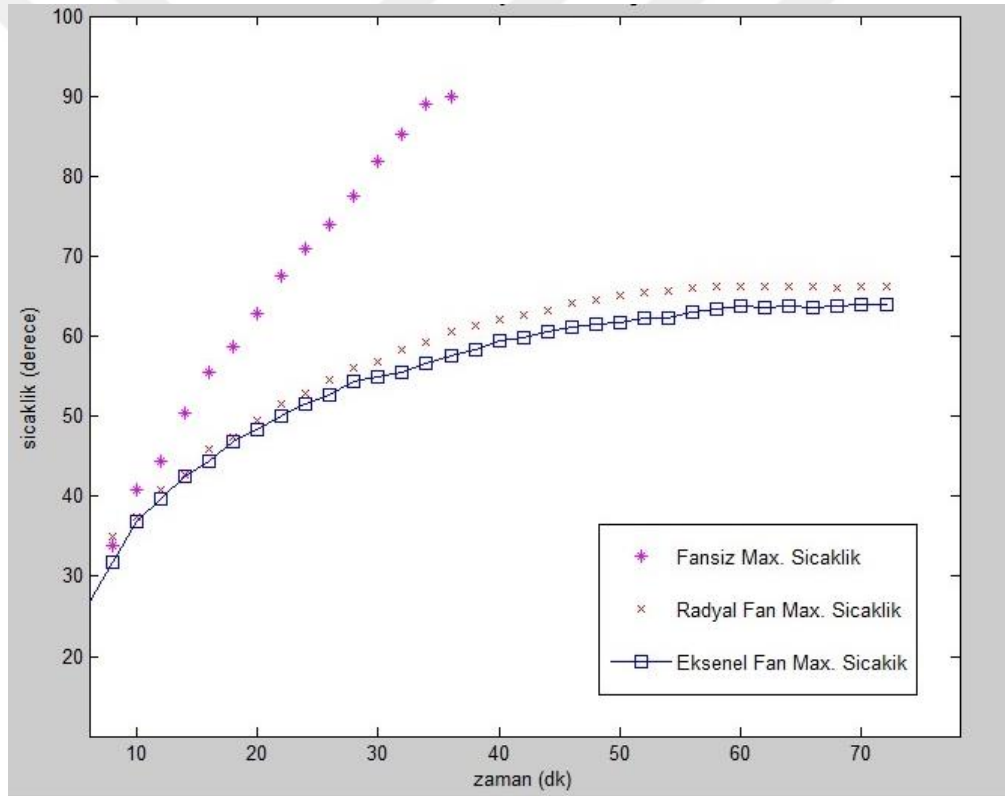
Çizelge 7.1. İzin verilebilir sıcaklıklar için analiz

Değerler Sıcaklıklar	Maksimum Sıcaklık (Kelvin)	Maksimum Sıcaklık (°C)	Motorda Soğuma Sıcaklığı (°C)
80°C	336.55	63.55	16.45
90°C	342.16	69.16	20.84
105°C	354.95	81.95	23.05
125°C	373.46	100.46	24.54

Çizelge 7.1'de izin verilebilir sıcaklıklar için yapılan analiz sonuçları görülmektedir. 90°C dereceye sahip motor sıcaklığı için yapılan analizde elde edilen maksimum sıcaklık 342.16 Kelvin'dir. Analizde 90°C dereceye kadar ısıtılan motorun tasarlanan eksenel fan ile soğutma sağlanarak üzerindeki en yüksek sıcaklığı 69.16°C derece olduğu görülmüştür. 90°C derece sıcaklığa sahip motor üzerinde, tasarlanan eksenel fanın oluşturduğu hava etkisi ile 20.84°C derecelik soğutma sağlandığı görülmüştür.

Sıcaklığı 105°C derece olan motor sıcaklığı için yapılan analizde elde edilen maksimum sıcaklık 354.95 Kelvin'dir. 105°C dereceye kadar ısıtılan motorun yapılan analiz ile motor gövdesindeki en yüksek sıcaklığının 81.95°C derece olduğu görülmüştür. Motor gövdesi üzerinde 23.05°C derecelik soğutma sağlanmıştır.

Yapılan termal analiz sonucunda tasarlanan eksenel fanın soğutma etkisi ile 125°C dereceye sahip motorun gövdesinde en yüksek sıcaklık 373.46 Kelvin'dir. Analizde 125°C dereceye kadar ısıtılan motorun tasarlanan eksenel fan ile soğutma sağlanarak üzerindeki en yüksek sıcaklığı 100.46°C derece olduğu görülmüştür. Tasarlanan eksenel fan ile motor üzerinde 24.54°C derecelik soğutma sağlanmıştır.



Şekil 7.1. Termal yükleme grafiği

Şekil 7.1’de tüm durumlar için termal yükleme grafiği görülmektedir. Laboratuvar ortamında yapılan termal testlerde tasarlanan eksenel fanın test edildiğinde oluşturduğu hava akımı ile motor gövdesindeki en yüksek sıcaklığının 63.9°C derece olduğu görülmüştür. Aynı şartlar da yapılan radyal fan testi tamamlandığında oluşturduğu hava akımı etkisi ile motorun en yüksek sıcaklığı 66.3°C derece olarak ölçülmüştür.

Laboratuvar da aynı şartlar altında her iki fan içinde test uygulanmıştır. Yapılan testlerde termal rejim oluşma süresince teste devam edilmiştir. Yaklaşık olarak her iki fanda aynı sürelerde termal rejim oluşmuştur. Çizelge 7.2’de termal yükleme test sonuçları görülmektedir.

Çizelge 7.2. Termal yükleme test sonuçları

Değerler Motor	Maks. Sıcaklık (°C)	Ort. Sıcaklık (°C)	Test Süresi (dk)	Ortalama mekanik güç	Ortalama Verim (%)	Ortalama Faz akımı (A)
Fansız	89.6	88.3	36	2120	79.6	4.91
Radyal Fan	66.3	63	72	2122	80	4.86
Eksenel Fan	63.9	60.2	72	2115	80.4	4.81

Eksenel fanın elde ettiği maksimum sıcaklık değeri 63.9°C derece iken radyal fanın elde ettiği maksimum sıcaklık değeri 66.3°C derecedir. Eksenel fanın çektiği hava debisinin yüksek olması sebebi ile radyal fana göre fazla hava kütlesi aldığı için motor üzerine temas eden hava daha fazla olmaktadır. Asenkron motor üzerine temas eden hava taneciklerinin artması motorun daha fazla soğumasını sağlamaktadır.

Tasarlanan eksenel fan için yapılan termal analizde motor üzerindeki en yüksek sıcaklık 63.55°C derece, laboratuvar da eksenel fan için yapılan termal yükleme testi ile motor üzerindeki en yüksek sıcaklık 63.9°C derece olduğu görülmüştür. Bu durumda analiz sonuçlarına göre elde edilen tasarım sonuçları deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır.

Motorun nominal yükündeki çalışma şartları altında öngörülen eksenel fan ile orijinal fana göre ortalama değer olarak 2.8°C derece daha fazla soğutma yapmıştır. Bu durumda eksenel fanın yaklaşık % 4.4 soğutma performansını artırdığı görülmektedir.

Ayrıca Çizelge 7.2’de görüldüğü üzere eksenel fan ile yapılan soğutmada motor veriminde % 0.4 artış olurken faz akımında küçük düşüşler olduğu gözlenmiştir. Burada gövde sıcaklığındaki küçük de olsa düşüşlerin motor performansını olumlu etkilediği görülmektedir. Bunun yanı sıra eksenel fan tek yönlü çalışabilmektedir. Dolayısı ile radyal fan gibi çift yönlü uygulamalarda kullanılamayışı bir dezavantajdır. Bu nedenle tek yönde çalışmaya uygun olan pompa, fan, testere gibi uygulamalarda tercih edilmesi mümkündür. Maliyet ve seri üretim açısından eksenel ve radyal fan arasında önemli bir fark yoktur.



8.KAYNAKLAR

- (2021, 11 20). Vikipedi: https://tr.wikipedia.org/wiki/Lorentz_kuvveti adresinden alındı
- Ambdekar, T. .., & Barve, S. B. (2014). Design and Analysis of Engine Cooling Fan. *International Journal of Current Engineering and Technology*.
- Ansys. (2009). *Meshing Help Document Reliese 12.1 s.102*.
- Behzadmehr, A., & Mercadier, Y. (2006). Sensitivity Analysis of Entrance Design Parameters of a Backward-Inclined Centrifugal Fan Using DOE Method and CFD Calculations. *Journal Of Fluids Engineering*, 446-453.
- Bodur, A., & Metin, E. (2010). *Elektrik Motorları AC Motorlar ve Sürücüler*. Ankara: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası.
- Bulgurcu, H. (2015). Fanlar. *Havalandırma Tesisatı* (s. 94-141). içinde İSTANBUL: MMO İstanbul Şube 31.
- C. Jang, J. L. (2019). Sayısal Analizle 200kW Sınıfı Düşük Voltajlı Motor için Soğutma Fanının Optimal Tasarımı. *2019 IEEE Uluslararası Elektrik Makineleri ve Sürücüler Konferansı (IEMDC)* (s. 1163-1168). San Diego, CA, ABD: IEEE.
- Cimbala, Y. A. (2015). *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*. Ankara: Palme Yayıncılık.
- Çolak, P. D. (2001). *Asenkron Motorlar*. Ankara: Nobel Yayınları.
- Endüstriyel Fanlar. (Aralık-2008). *Termodinamik*.
- Gallonia, E., & ark. (2018). CFD analyses of a radial fan for electric motor cooling. *Thermal Science and Engineering Progress*, 470-476.
- Gök, O., & ark. (2015). Standart Verimli ve Yüksek Verimli Sincap Kafesli Asenkron Motorların Fiziksel Farklılıkları ve Performans Analizleri. *Imcofe'15 International Multidisciplinary Congress of Eurasia*.
- Gürgöze, F., & Mergen, A. F. (2010). Üç fazlı asenkron motorlarda sıcaklık dağılımının çıkartılarak tasarım optimizasyonunun yapılması. *itüdergisi/d mühendislik*, Cilt:9, Sayı 1, 36-44.
- Hasırcı, D. (2006). Elektromanyetizma ve Elektrik Makinaları. Düzce Üniversitesi.
- Madej, J., & Bedkowski, B. (2013). Air Flow Analysis For Electrical Motor's Cooling System With Autodesk. *Versita, SAYI-2*.

- Maestre, D., & Ramirez, R. (2019). Methodology for a Numerical Analysis of the Aerodynamic Performance of a Centrifugal Fan Trough Computational Fluid Dynamics (CFD). *25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2019)*. Brazil.
- Min Seok Kim, J.-H. P.-S.-H.-Y. (2020). Optimum Design of Cooling Fan considering Experimental Method for Three-Phase Induction Motor. *2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (s. 1220-1224). Hamamatsu, Japan: IEEE.
- Qinghua, L. (2005). *Analysis, design and control of permanent magnet synchronous motors for wide-speed operation*. Singapore: National University of Singapore.
- Roffi, M., & Ferreira, F. (2017, october 3). *Comparison of Different Cooling*. researchgate: <https://www.researchgate.net/publication/319024721> (erişim tarihi: 02.11.2020) adresinden alındı
- Şimşek, F., & Mergen, F. (2021, mart 31). *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası*. emo.org.tr: https://www.emo.org.tr/ekler/88f0a1cf6e3fd01_ek.pdf adresinden alındı
- Takafumi Nakahama, D. B. (2006). Improved Cooling Performance of Large Motors Using Fans. *Enerji Dönüşümü IEEE İşlemleri* (s. 324-331). IEEE.
- Tuncay, E. (2013). Fan Verimi Nedir? *Tesisat Dergisi*, 43.
- Türkoğlu, P. D. (2010, Ekim 13). Fan Verimi. *Fans and Fan Performance Tests*. Ankara: Makine Mühendisleri Odası.
- Üstünel, M. (2012). Elektrik Makinaları ve Laboratuvarı. M. Üstünel içinde, *1.Sınıf Elektrik Tesisatçılığı Elektrik Makinaları ve Laboratuvarı* (s. 154-157). Ankara: MEB.
- Yang, Z. S. (2015). Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications. *Enerji Dönüşümü IEEE İşlemleri* (s. 245-254). IEEE.
- Yetgin, A. G. (2017). Asenkron motor mil çapının motor performansına etkisi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.
- Ying Huai, R. V. (2003). Computational Analysis of Temperature Rise Phenomena in Electric Induction Motors. *Uygulamalı Termal Mühendislik*, 23(7), 779-795. doi:10.1016/S1359-4311(03)00013-9

Yoon, M. K., & Jeon, C. (2002). Efficiency Increase of an Induction Motor by Improving Cooling Performance. *IEEE Power Engineering Review* (s. 66-67). IEEE.

Zakharchuk, O., & Bukhtiyarov, I. (2014). Rational design of rotor of the asynchronous motor fan. *TEKA. Commission Of Motorization And Energetics in Agriculture*, 339-348.

