T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CFD VE REGRESYON ANALİZİ İLE ELEKTRİK MOTORU RADYAL FAN OPTİMİZASYONU

İbrahim TÜRKOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

Eş Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Berna BOLAT

Ocak, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CFD VE REGRESYON ANALİZİ İLE ELEKTRİK MOTORU RADYAL FAN OPTİMİZASYONU

İbrahim TÜRKOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 29.01.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğretim Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Dr.Öğretim Üyesi Berna BOLAT Yıldız Teknik Üniversitesi Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğretim Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğretim Üyesi Berna BOLAT, Eş-Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Serpil KURT, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Muharrem Erdem BOĞOÇLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ ve eş danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Berna BOLAT sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "CFD Ve Regresyon Analizi İle Elektrik Motoru Radyal Fan Optimizasyonu" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

İbrahim TÜRKOĞLU

İmza



Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans danışmanlığını üstlenen, yaptığım çalışmalarda bana yol gösterici olan hocalarım Dr. Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ, Dr. Berna BOLAT ve Arş. Gör. Eren KALAY'a,

Çalışmalarımı yapabileceğim laboratuvar ve laboratuvardaki test cihazlarından faydalanmamı sağlayan GAMAK Makine A.Ş. işletmesi ailesine,

Tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini hiç esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

İbrahim TÜRKOĞLU

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR iiv
İÇİNDEKİLER iv
SİMGE LİSTESİ ivii
KISALTMA LİSTESİ iviii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xiv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti ... 1
1.2 Tezin Amacı ... 16
1.3 Hipotez ... 16
2 ELEKTRİK MOTORU KOMPONENTLERİ 17
2.1 Yaygın Kullanılan Elektrik Motorları ... 17
2.1.1 Alternatif Akımlı Elektrik Motorları ... 17
2.1.2 Doğru Akımlı Elektrik Motorları ... 18
2.2 Elektrik Motoru Temel Parçaları ... 20
2.2.1 Gövde ... 20
2.2.2 Kapak ... 21
2.2.3 Stator ... 21
2.2.4 Rotor ... 22
2.2.5 Mil ... 22
2.2.6 Klemens Grubu ... 22
2.2.7 Fan Muhafaza Tası ... 23
2.2.8 Fan ... 23
2.3 Elektrik Motoru Soğutma Sistemleri ... 24
2.3.1 Doğrudan Hava Soğutma ... 24
2.3.2 Dolaylı Hava Soğutma ... 25
2.3.3 Doğrudan Sıvı Soğutma ... 26
2.3.4 Dolaylı Sıvı Soğutma ... 26
2.4 Isı Transferi ... 27
2.4.1 İletim İle Isı Transferi ... 27

2.4.2 Taşınım İle Isı Transferi 28
2.4.3 Işınım İle Isı Transferi 28
3 FANLARIN MATEMATİKSEL HESAPLAMALARI 29
3.1 Fan Çeşitleri 29
3.1.1 Radyal Fan 29
3.1.2 Eksenel Fan 32
3.1.3 Karışık Akışlı Fan 33
3.1.4 Çapraz Akışlı Fan 33
3.2 Fanların Verimi Ve Performansı 34
4 MATERYAL VE YÖNTEM 35
4.1 3D CAD Model 36
4.2 Simülasyon CFD Analizleri 39
4.3 Validasyon Testleri 52
4.4 Malzeme Regresyon Analizi 54
4.5 Fan Malzemesi Açıklaması 56
5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER 57
KAYNAKÇA 58
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 60

SİMGE LİSTESİ

A	Alan
P	Basınç
Ø	Çap
Q	Debi
Δ	Delta
°	Derece
n	Devir Sayısı
V	Hacim
h	Isı Taşınım Katsayısı
K	Kelvin
C	Santigrat
σ	Stefan-Boltzman sabiti
η	Verim
p	Yoğunluk
%	Yüzde
W	Watt

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternating Current
CAD	Computer Aided DesignActivities of Daily Life
CFD	Computational Fluid Dynamics
DC	Direct Current
FEA	Finite Elements Analysis
IC	International Cooling
kW	KiloWatt
MRF	Moving Reference Frame
PLA	Poliaktik Asit
PA6	Poliamid 6
PP	Polipropilen
RPM	Revolutins Per Minute

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Kanat Sayısı Akış Çizelgesi **1**
Şekil 1.2 Fan Tipleri Radyal-Eksenel **2**
Şekil 1.3 Radyal Fan Analiz Hava Akışı Sonuçları **2**
Şekil 1.4 Eksenel Fan Analiz Hava Akışı Sonuçları **3**
Şekil 1.5 Geometrik Parametrelerin Tanımlanması **3**
Şekil 1.6 Pi/H Oranlarının Kütlesel Debi Oranı Ve Torka Etkisi **4**
Şekil 1.7 Kanat Montaj Açısının Kütlesel Debi Oranı Ve Torka Etkisi **4**
Şekil 1.8 Fan Muhafaza Tasının Farklı Montaj Açılarının Akış Hızına Etkisi **4**
Şekil 1.9 Mevcut Fan **6**
Şekil 1.10 Yeni Tasarım Fan **6**
Şekil 1.11 Optimizasyon Fan Tasarımları **6**
Şekil 1.12 Düz 12 Kanatlı Radyal Fan Tasarımı **7**
Şekil 1.13 Kavisli 12 Kanatlı Fan Tasarımı **7**
Şekil 1.14 Fanlara Göre Stator Sıcaklığı **8**
Şekil 1.15 Fan Kanat Uzunluğu-Sürtünme Kaybı Arası İlişki **9**
Şekil 1.16 Fan Kanat Uzunluğu-Sürtünme Kaybı/Sargı Sıcaklığı Arası İlişki **9**
Şekil 1.17 18,27,36 Kanatlı Gövdelerin Sıcaklık Dağılımları **10**
Şekil 1.18 18,27,54,72 Kanatlı Gövdelerin Sıcaklık Dağılımları **10**
Şekil 1.19 Elektrik Motoru Ve Fan Muhafaza Tası **11**
Şekil 1.20 Orifis Şekilleri **11**
Şekil 1.21 Kare Orifis Akış Simülasyonu **12**
Şekil 1.22 Daire Orifis Akış Simülasyonu **12**
Şekil 1.23 Analiz Edilen Izgara Çeşitleri **13**
Şekil 1.24 Izgara Çeşitlerine Göre Kütlesel Debi **13**
Şekil 1.25 Akış Yönlendiricisiz Akış **14**
Şekil 1.26 Disk Akış Yönlendiricili Akış **14**
Şekil 1.27 Hava Aralığı Fanlı Akış **14**
Şekil 1.28 Hava Aralığı Fansız Akış **15**
Şekil 2.1 DC Fırçalı Motor **18**
Şekil 2.2 Step Motor **19**
Şekil 2.3 Elektrik Motoru Parçaları **20**
Şekil 2.4 Gövde **21**

Şekil 2.5 Kapak....21
Şekil 2.6 Stator....21
Şekil 2.7 Rotor....22
Şekil 2.8 Mil....22
Şekil 2.9 Klemens Grubu....23
Şekil 2.10 Fan Muhafaza Tası....23
Şekil 2.11 Fan....23
Şekil 2.12 IC410 Soğutma....24
Şekil 2.13 IC411 Soğutma....24
Şekil 2.14 IC416 Soğutma....25
Şekil 2.15 IC418 Soğutma....25
Şekil 2.16 IC611- IC616- IC666 Soğutma....25
Şekil 2.17 IC71W Soğutma....26
Şekil 2.18 IC81W-IC86W Soğutma....27
Şekil 3.1 Fan Tipleri....29
Şekil 3.2 Fanın Hızları....30
Şekil 3.3 Fanın Kanat Görünümü....30
Şekil 3.4 Fanın Eğrileri....30
Şekil 3.5 Fanın Hızları....31
Şekil 3.6 Fanın Kanat Görünümü....31
Şekil 3.7 Fanın Eğrileri....31
Şekil 3.8 Fanın Kanat Görünümü....32
Şekil 3.9 Fanın Eğrileri....32
Şekil 3.10 Eksenel Fan....32
Şekil 3.11 Eksenel Fan Eğrisi....33
Şekil 3.12 Karışık Akışlı Fan....33
Şekil 3.13 Çapraz Akışlı Fan....34
Şekil 4.1 Gövde Katı Modeli....36
Şekil 4.2 Kapak Katı Modeli....36
Şekil 4.3 Stator Katı Modeli....37
Şekil 4.4 Rotor Katı Modeli....37
Şekil 4.5 Fan Katı Modeli....37
Şekil 4.6 Mil Katı Modeli....38
Şekil 4.7 Fan Muhafaza Tası Katı Modeli....38
Şekil 4.8 Montaj Katı Modeli....38

Şekil 4.9 Hava Giriş, Çıkış Ve Simetri Yüzeyleri **39**
Şekil 4.10 Mesh(Ağ Örgüsü) İşlemi **39**
Şekil 4.11 Mesh(Ağ Örgüsü) XY Kesit Görünüm **40**
Şekil 4.12 Mesh(Ağ Örgüsü) YZ Kesit Görünüm **40**
Şekil 4.13 Alüminyum Malzeme Özellikleri **41**
Şekil 4.14 Bakır Malzeme Özellikleri **41**
Şekil 4.15 Çelik Malzeme Özellikleri **41**
Şekil 4.16 MRF Yaklaşımı **42**
Şekil 4.17 Fan Dönüş Tanımlaması **42**
Şekil 4.18 Türbülans Modeli Tanımlaması **43**
Şekil 4.19 Stator Bakır Isı Kaynak Değeri **44**
Şekil 4.20 Stator Üst Laminasyon Çeliği Isı Kaynak Değeri **44**
Şekil 4.21 Stator Alt Laminasyon Çeliği Isı Kaynak Değeri **44**
Şekil 4.22 Rotor Isı Kaynak Değeri **45**
Şekil 4.23 Çözüm Metodu Girdileri **45**
Şekil 4.24 Yakınsama Eğrileri **46**
Şekil 4.25 CFD Analiz Stator Sargı Sıcaklığı **46**
Şekil 4.26 XY Kesiti Akış Çizgileri **47**
Şekil 4.27 XY Kesiti Akış Hızı Sonucu **47**
Şekil 4.28 Regresyon Analizi Nicel Değişkenler **48**
Şekil 4.29 Regresyon Analiz Sonucu **49**
Şekil 4.30 Regresyon Analiz Denklemi **49**
Şekil 4.31 Çap Ve Kalınlığın Sıcaklığa Etkisi **50**
Şekil 4.32 Kanat Sayısı Ve Çapın Sıcaklığa Etkisi **50**
Şekil 4.33 Kanat Sayısı Ve Kalınlığın Sıcaklığa Etkisi **50**
Şekil 4.34 Optimize Fan Minitab Değerleri **51**
Şekil 4.35 5 Numaralı Fan **52**
Şekil 4.36 12 Numaralı Fan **52**
Şekil 4.37 Optimize Fan **52**
Şekil 4.38 AGM2E 80 M2b Test Motoru **53**
Şekil 4.39 Optimize Fanlı Motor **53**
Şekil 4.40 Yükte Test Aşaması **54**
Şekil 4.41 Optimizasyon Sonucu Malzeme Değerleri **55**

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Fan Çeşitleri Ve Özellikleri **1**
Tablo 1.2 Prototip Fanların Sonuçları **7**
Tablo 1.3 Refereans Motorun Kayıpları **8**
Tablo 1.4 Orifis Şekillerinin Akış Katsayısına Etkisi **12**
Tablo 2.1 Malzemelerin Isıl İletkenlik Katsayıları **27**
Tablo 4.1 Fanların Ansys Fluent Analiz Sonuçları **48**
Tablo 4.2 Validasyon Testi Yapılan Fanlar **53**
Tablo 4.3 Validasyon Testi Sonuçları **54**
Tablo 4.4 Malzemelerin İletkenlik Katsayıları **55**
Tablo 4.5 Malzemelerin Regresyon Analiz Sonuçları **55**
Tablo 4.6 Optimize Malzemelerle Analiz Sonuçları **56**

ÖZET

CFD Ve Regresyon Analizi İle Elektrik Motoru Radyal Fan Optimizasyonu

İbrahim TÜRKOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr.Öğretim Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

Eş Danışman: Dr.Öğretim Üyesi Berna BOLAT

Elektrik motorları ev aletlerinden endüstriyel sanayiye hayatımızın birçok alanında kullanılmaktadır. Elektrik motorunda stator ve rotor manyetik alan ve akım etkisiyle temel ısı kaynağıdır. Motor komponentlerinin soğutulması için en etkin rolü fan almaktadır.

Bu çalışmanın amacı AGM2E 80 M2b elektrik motorunun radyal fan optimizasyonunu regresyon ve FEA analizlerini kullanarak oluşturmaktır. Motorda kritik bölge stator sargı başı sıcaklığı baz alınmıştır.

Optimizasyon denklemini ve CFD fan analiz opsiyonlarını belirlemek amacıyla Minitab programından yararlanılmıştır. Radyal fanın performansını doğrudan etkileyen değişken parametreler fan çapı, kanat adedi ve kanat genişliği alınmıştır. Belirlenen üç değişkenli parametrelerle 15 farklı fan CFD analizi yapılarak stator sargı sıcaklığı değerleri bulunmuştur ve bulunan sıcaklık değerleriyle Minitab programında optimizasyon denklemi elde edilmiştir.Hedeflenen 85 °C sargı

sıcaklığına uygun optimize fan değerleri dış çap 96mm, kanat adedi 15 ve kanat genişliği 20mm olarak bulunmuştur.

CFD analiz sonuçlarını doğrulama için optimize fan ve seçilen diğer iki fan 3D yazıcıda PLA malzemeden basılmıştır. Fanlar AGM2E 80 M2b motora montajlanarak validasyon testleriyle stator sargı sıcaklıkları ölçülmüştür. Validasyon testi ve CFD analiz sonuçları kıyaslandığında yaklaşık %10 sapma olduğu tespit edilmiştir. Isı iletimi yapan parçaların malzeme ısıl iletkenlik katsayı değerlerinin sonuçlara doğrudan etkili olduğu bilinmektedir. Bakır, alüminyum ve çelik malzemelerinin optimum ısıl iletkenlik katsayısı değerlerini bulmak için malzeme regresyon analizi yapılmıştır. Malzeme regresyon analizinden elde edilen denklem ile optimize fanın validasyon testi sargı sıcaklık değerine uygun optimum değerler alınmıştır. Bulunan bu değerlerle 3 fanın yeniden CFD analizleri yapılarak sonuçlar elde edilmiş, validasyon test sonuçlarına göre değerlendirildiğinde hata payının %6 değerlerine düştüğü görülmüştür. Hedeflenen sargı sıcaklığına uygun optimize fan tasarımı CFD ve regresyon analizleri kullanılarak doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrik motoru, radyal fan, CFD, regresyon analizi, validasyon testi

ABSTRACT

Radial Fan Optimization of Electric Motor With CFD And Regression Analysis

İbrahim TÜRKOĞLU

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist.Prof. Dr. Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

Co-supervisor: Assist. Prof. Dr. Berna BOLAT

Electric motors are used in many areas of our lives, from household appliances to industrial industry. In the electric motor, the stator and rotor are the main heat source due to the effect of magnetic field and current. The fan plays the most effective role in cooling the motor components.

The aim of this study is to create the radial fan optimization of the AGM2E 80 M2b electric motor using regression and FEA analyses. The critical zone in the motor is based on the stator winding head temperature.

Minitab program was used to determine the optimization equation and CFD fan analysis options. Variable parameters that directly affect the performance of the radial fan are fan diameter, number of blades and blade width. The stator winding temperature values were found by performing CFD analysis of 15 different fans with the determined three-variable parameters, and the optimization equation was obtained in the Minitab program with the temperature values found. The optimized fan values suitable for the targeted 85 °C winding temperature were found to be 96 mm in outer diameter, 15 blades and 20 mm in blade width.

To verify the CFD analysis results, the optimized fan and the other two selected fans were printed from PLA material on a 3D printer. The fans were mounted on the AGM2E 80 M2b motor and the stator winding temperatures were measured with validation tests. When the validation test and CFD analysis results were compared, it was determined that there was approximately a 10% deviation. It is known that the material thermal conductivity coefficient values of the heat-conducting parts directly affect the results. Material regression analysis was performed to find the optimum thermal conductivity coefficient values of copper, aluminum and steel materials. With the equation obtained from the material regression analysis, optimum values were taken in accordance with the validation test winding temperature value of the optimized fan. With these values, CFD analyzes of the 3 fans were performed again and the results were obtained, and when evaluated according to the validation test results, it was seen that the margin of error decreased to 6%. The optimized fan design suitable for the targeted winding temperature was verified using CFD and regression analysis.

Keywords: Electric motor, fan, CFD, regression analysis, validation test

1
GİRİŞ

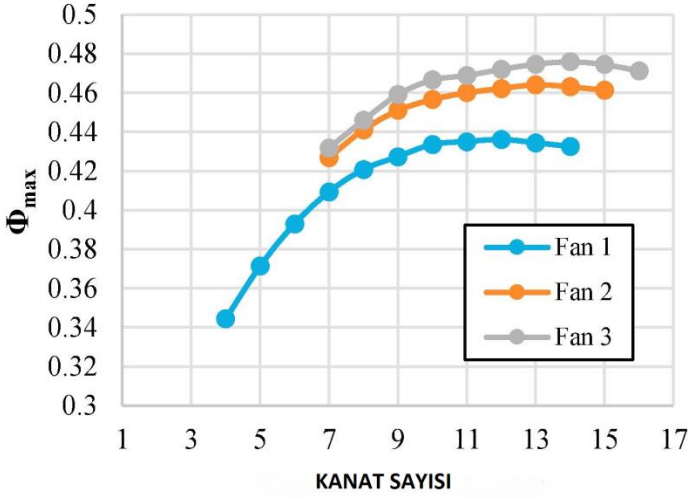
1.1 Literatür Özeti

Fan tasarımı elektrik motoru dizaynında soğutma performasında en önemli rollerden birini oynaması nedeniyle üzerine bir çok çalışma yapılmıştır.Fan üzerindeki herhangi tasarım değişikleri fanın performasında önemli etkilere neden olmaktadır.Tez çalışmasına geçmeden önce bilim camiasında elektrik motoru radyal fanı üzerine yapılan çalışmalar bu bölümde anlatılmıştır.

E.Galloni ve arkadaşları bu makalede kendi kendini soğutan IC411 soğutma tipli motorları baz alarak radyal fan için sayısal bir model geliştirerek doğrulamışlardır. Ardından farklı şekillerle karakterize edilen fanların performasnlarını değerlendirerek sayısal analizler yapmışlardır. Fanın dış çapı ,kanatların genişlikleri ve kanat adet sayılarını değiştirerek boyutsuz karakteristik eğriler üretmişlerdir.[1]

Tablo1.1 Fan Çeşitleri Ve Özellikleri[1]

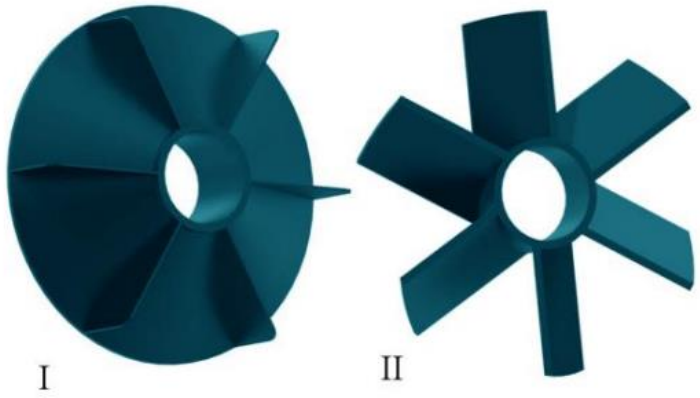
	Dış Çap(mm)	**Kanat Kalınlığı(mm)**	**Kanat Adeti**	**Akış Katsayısı**
Fan 1	165	40	12	0.436
Fan 2	330	80	13	0.464
Fan 3	495	120	14	0.476



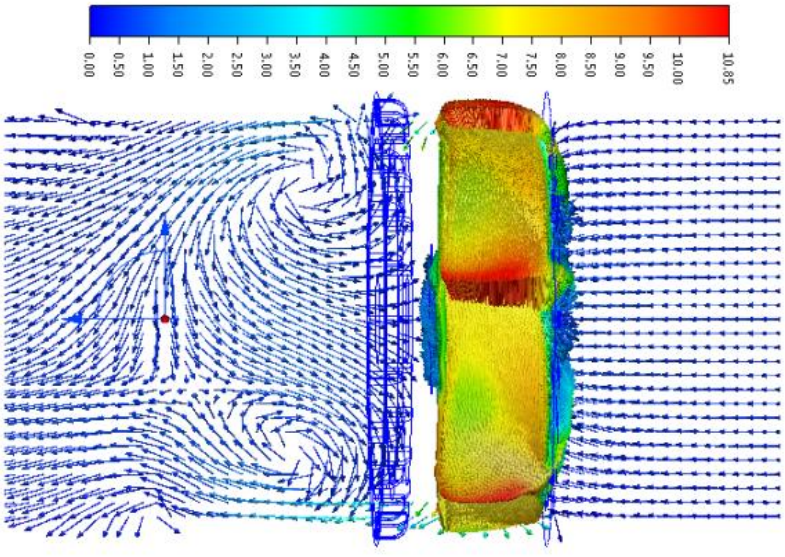
Şekil 1.1 Kanat Sayısı Akış Çizelgesi[1]

Yukarıda paylaşılan Tablo 1.1'de 3 farklı fanın özellikleriyle yapılan sayısal metot analiz sonuçları değerlendirildiğinde kanat sayısı arttıkça doğru orantılı olarak çekilen hava debiside artmıştır. Şekil 1.1 'de grafiksel olarak ifade edilmektedir.[1]

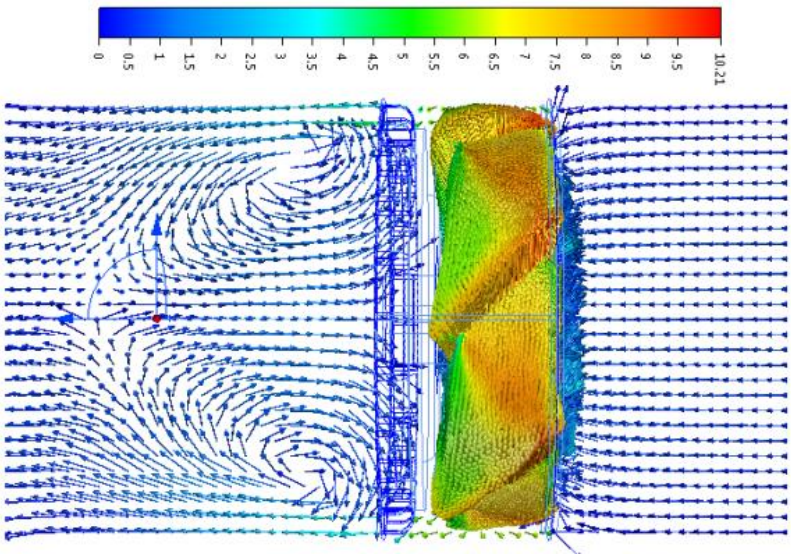
Jerzy Madej ve Bartlomiej Bedkowski yapmış oldukları çalışmada elektrik motorunda en optimum fan tipini seçmeyi hedeflemişlerdir.CFD sayısal karakteristik analiz çalışması yapmışlardır.Aşağıda analizlerde kullanılan fanların görselleri ve analiz sonuçları belirtilmiştir. .[2]



Şekil 1.2 Fan Tipleri Radyal,Eksenel[2]



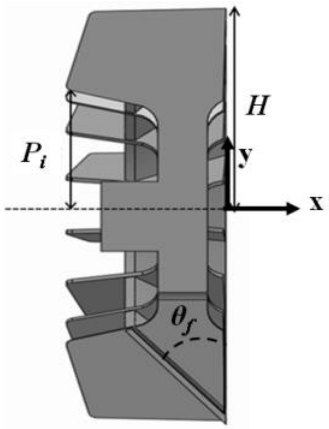
Şekil 1.3 Radyal Fan Analiz Hava Akışı Sonuçları [2]



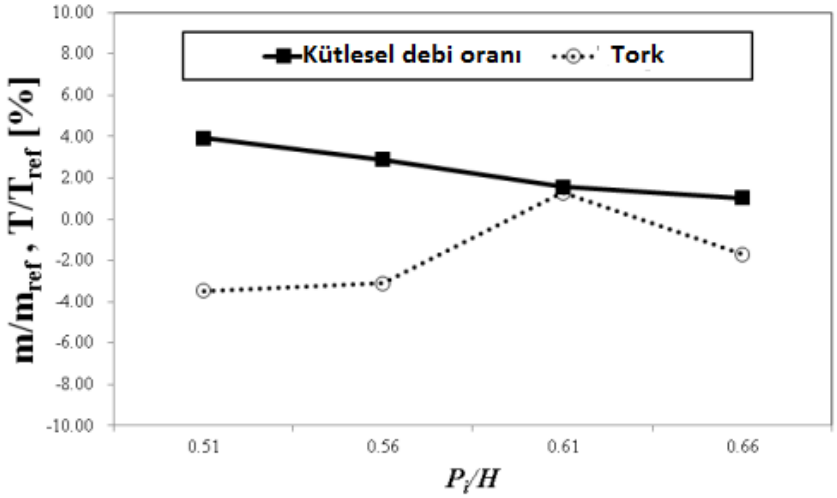
Şekil 1.4 Eksenel Fan Analiz Hava Akışı Sonuçları [2]

Yukarıda Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te hava akış analiz sonuçları verilmiştir.Bu sonuçlara göre radyal fan 5.5x10^6mm3/s hava debisi,eksenel fan 6.7x10^6mm3/s hava akış debisi sonucu görülmüştür.Bu iki fan arası hava akışı debisi farkı 5 °C oluşmuştur.Eksenel fanın soğutma kapasitesinin radyal fana kıyasla daha üstün olduğu tespit edilmiştir.[2]

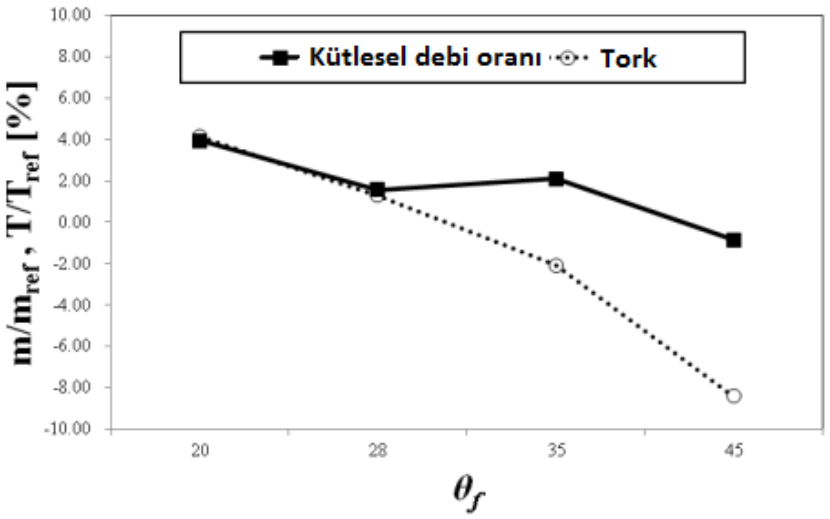
Jae Min Park ve arkadaşları alçak gerilim motorların aerodinamik soğutma karakteristiklerini belirleme çalışmasında Şekil 1.5'te gösterilen fan kanat sayısı,fan kanat sırtı ile fan metkezi ve fan kanat açısı baz alınarak parametrik çalışmalar yapmışlardır.Yaptıkları deneyler ile simülasyon türbülans modellemelerinde k-Ɛ modelini kullanarak doğrulamışlardır. [3]



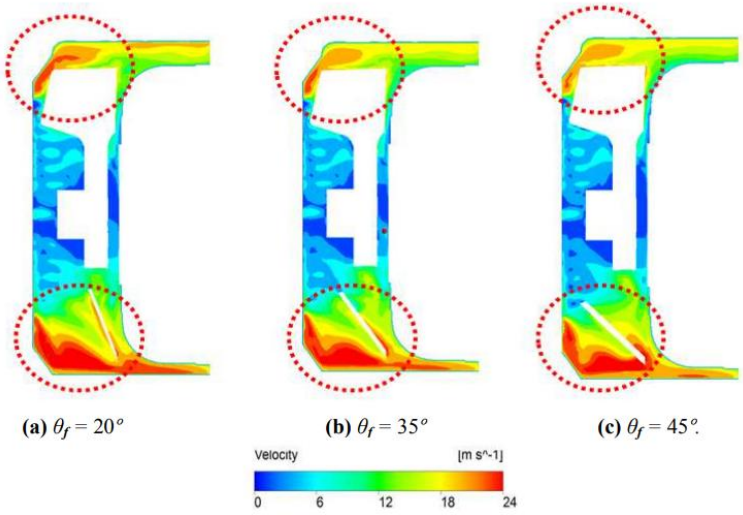
Şekil 1.5 Geometrik Parametrelerin Tanımlanması[3]



Şekil 1.6 Pi/H Oranlarının Kütlesel Debi Oranı Ve Torka Etkisi [3]



Şekil 1.7 Kanat Montaj Açısının Kütlesel Debi Oranı Ve Torka Etkisi[3]



Şekil 1.8 Fan Muhafaza Tasının Farklı Montaj Açılarının Akış Hızına Etkisi[3]

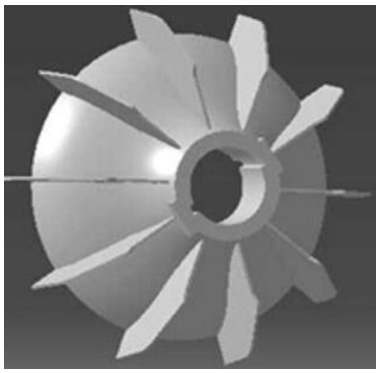
Yapılan çalışmalar sonucu kanat sayısı artışı kütlesel debi ile doğru orantılı olarak artmaktadır.Kanat sırtı ve fan merkezi mesafesinin fan dış çapına oranı baz alındığında torkun en küçük kütlesel debinin en büyük olduğu nokta Şekil 1.6 'da belirlenebilmiştir.Kanat montaj açısının artması tokun ters orantılı olarak azalmasına neden olmuuştur.Şekil 1.8'de montaj açısının simülasyon analizindeki hız görselleri belirtilmiştir. [3]

Senkron ve asenkron elektrikli motorlar pazarları verim sınıflarını IE3,IE4,IE5 olarak yaygınlaştırdıkları için motor tasarımlarının kayıpları tüm detayları ile önem kazanmaktadır. Michele Roffi ve arkadaşları bu kayıpların fan bazlı olarak inceleyerek fan sürtünme kayıpları,akış hızı ve ses gürültü seviyelerini hem aynı cins hem de farklı cins fanlarla karşılaştırmalarda bulunmuşlardır.CFD simülasyon analizleri ve 3D yazıcı ile küçük radyal fan,büyük radyal fan,4 farklı formda eksenel fan ile çalışma yapmışlardır. [4]

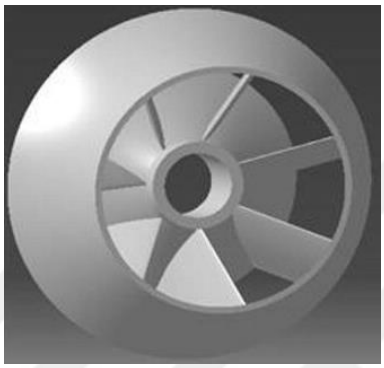
Çalışmaları sonucu aynı sürtünme kayıp değerindeki eksenel fanın radyal fana kıyasla hem akış hızının hem gövde soğutma yetkinliğinin iyi olduğu,gürültü seviyesi olarak daha kötü olduğu tespit edilmiştir.Aynı tip fanlarda geometriksel olarak büyük fanın soğutma yetkinilği ,gürültü seviyesi ve fan sürtünme kaybının arttığı tespit edilmiştir. [4]

Takafumi Nakahama ve arkadaşları büyük motorların soğutma performanslarını incelemişlerdir.Eksenel fanın kanatlarının eğimini ve öne doğru eğimli kanatlı fanların soğutma kapasitesi karşılaştırılmıştır.Testler sonucunda eksenel fanların havaya karşı direnci fazla olması nedeniyle ve akış ayrımı olmaması değerlendirme koşulları olarak baz alınmıştır.Öne eğimli kanatlı fan diğer fana gore %80 daha fazla hava debisi olduğu ve stator sargı sıcaklığında %30 düşüş olması,hava direncinin de az olması nedeniyle en avantajlı tasarım olarak çıktı alınmıştır. [5]

S.Rama Krishna,A.Rama Krishna ve K.Rajmi tarafından yapılan çalışmada elektrik motorunun fan odaklı akustik ses basıncı değerleri üzerinde çalışılmıştır. Denizaltında pompa olarak kullanılan motorun ses seviyesi düşük olması beklenirken soğutmada da iyileştirmeler hedeflenmiştir. [6]



Şekil 1.9 Mevcut Fan[6]



Şekil 1.10 Yeni Tasarım Fan[6]

Motor fanında gürültüyü azaltmak için radyal 10 adet düz kanatlar yerine geriye eğimli 7 kanatla tasarım yapıldı.İki fan için CFD simülasyon analizi sonuçlarında yeni tasarım fan mevcut fana kıyasla 8,6 dB daha az ses basıncına sahip ve muhafaza fanı ızgarasından çektiği debiye göre %15,4 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. [6]



Şekil 1.11 Optimizasyon Fan Tasarımları [7]

Chungman Jang ve arkadaşları alçak gerilimli 280 tip elektrik motorunun optimum fan tasarımını belirlemek için bu çalışmayı yapmışlardır.Çalışmada sürtünme kaybı,sargı sıcaklıkları ve gürültü seviyeleri ana değerlendirme

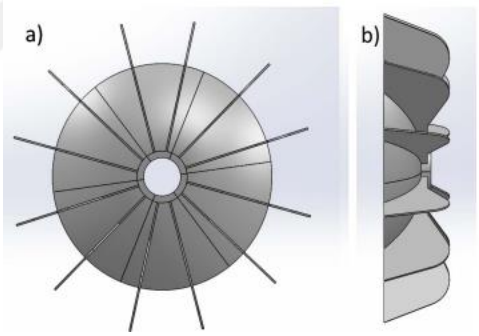
kalemleri olmuştur.Fan 1 mevcutta kullanılan fan olmakta 2 farklı fan dizaynını değerlendirerek optimum fanı seçmişlerdir. [7]

Tablo1.2 Prototip Fanların Sonuçları[7]

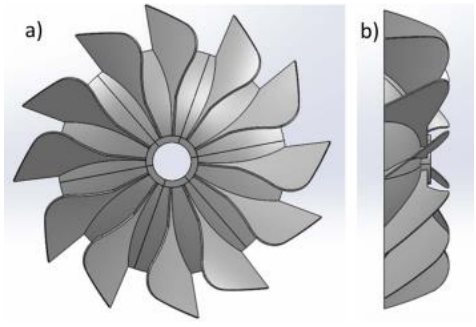
	Fan 1	**Fan 2**	**Fan 3**
Hava Debisi(m^3/s)	0,673	0,425	0,568
Stator Sıcaklığı(K)	74,1	85,59	78,9
Sürtünme Kaybı(kW)	2,016	1,344	1,692
Verim(%)	95,29	95,65	95,47

Analizleri ve doğrulama testleri sonucu Fan 1 (mevcut fan) ile diğer iki fan kıyaslandığında Fan 3 mekanik kayıpların %16 azalırken,verimin %0,18 arttığı fakat stator sıcaklığının 4,7 K arttığı gözlemlenmiştir.Bu sonuçlarla beraber en optimum fanın Fan 3 olduğunu belirlemişlerdir. [7]

S.Y. Goh ve arkadaşaları elektrik motorunun ısı kaynağı olan stator ve rotorunun soğumasını sağlayan fanın dönüş yönüne ve tasarımının etkisini incelemişlerdir. Çift yönlü dönüşü etkilemeyen düz kanatlı radyal fan ve kavisli kanatlı fanın saat yönü ve saat yönü tersi dönüşe göre CFD analiz sonuçları değerlendirilmiştir[8]

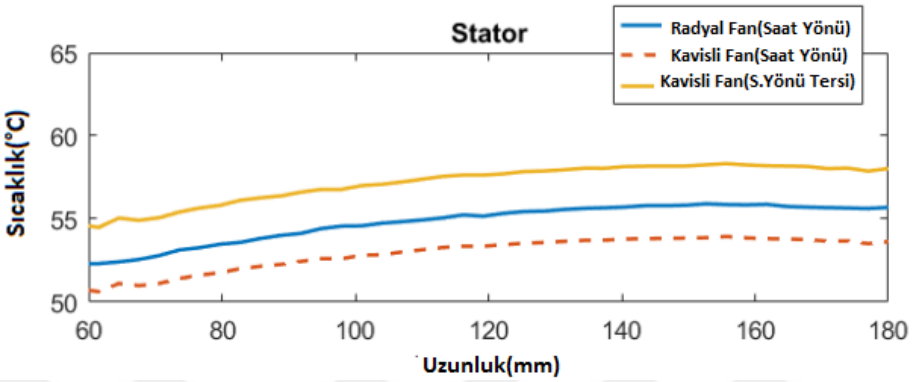


Şekil 1.12 Düz 12 Kanatlı Radyal Fan Tasarımı [8]



Şekil 1.13 Kavisli 12 Kanatlı Fan Tasarımı [8]

Yukarıda fan tasarımları görselleri paylaşılmıştır.Yapılan analizlerde Şekil1.14'te de görüldüğü üzere kavisli fan ve radyal fanın saat yönünde dönmesi mukayese edildiğinde yaklaşık 3 °C kavisli fanın soğutma performansının daha iyi olduğu, kavisli fanın saat yönü ve saat yönü tersi dönmesi değerlendirildiğinde yaklaşık °C fark olduğu tespit edilmiştir. [8]



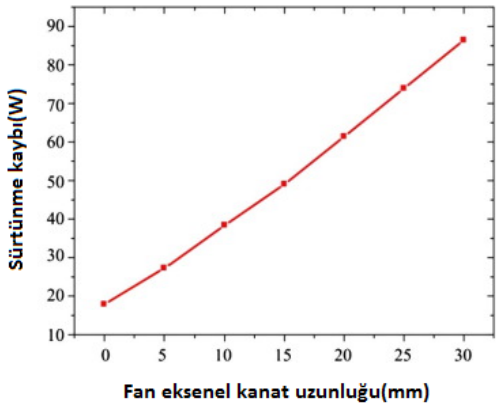
Şekil 1.14 Fanlara Göre Stator Sıcaklığı [8]

Chih Chung Chang ve arkadaşları büyük güçlü motorların soğutma performanslarını sayısal olarak incelemişlerdir.Fan tasarımları,ısı eşanjör boruların düzenlenmesi ve eksenel fanlar arası mesafe incelenmiştir.Çalışma sonucu ısı eşanjörü borularının adedinin artması basınç düşüşüne neden olsada ısı transferinde iyi sonuçlar elde edilmiştir.Santrifüj fanın farklı opsiyonlarla denemeler sonucu iyileştirmeler ve iki eksenel fanın akış kaçağının en az olacak mesafede montajlanması ısı transferinde önemli rol oynamıştır. [9]

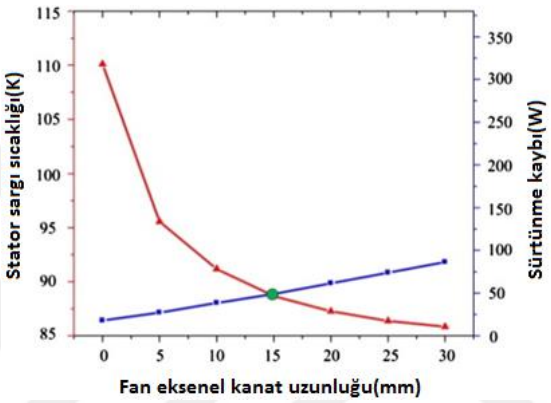
Shuye Ding,Jieanfeng Liu ve Liying Zhang tarafından yapılan asenkron tamemen kapalı sadece harici fanla soğuyan motorların yapısı,kayıpları ve soğutma performansı arasındaki ilişkiyi tespit etmek amacıyla bu çalışmayı yapmışlardır.Soğutma performansını tespit etmek için en fazla sıcak noktası olan stator sargı uçlarındaki değerler referans alınmıştır.Fan kanatlarının eksenel uzunluklarının sürtünme kayıbı ve soğutma performansı değerlendirilmiştir. [10]

Tablo1.3 Refereans Motorun Kayıpları[10]

Konum dağılımı	Stator demir kaybı	Stator bakır kaybı	Rotor demir kaybı	Rotor alüminyum kaybı	mekanik kayıp	Başıboş kayıp
Kayıp (W)	559.7	1347	32.5	750	770	296



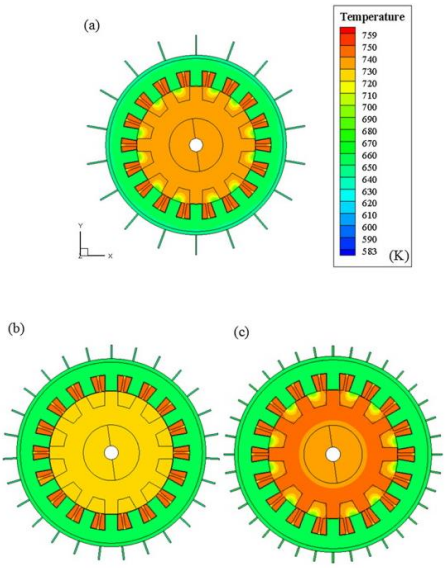
Şekil 1.15 Fan Kanat Uzunluğu-Sürtünme Kaybı Arası İlişki[10]



Şekil 1.16 Fan Kanat Uzunluğu-Sürtünme Kaybı/Sargı Sıcaklığı Arası İlişki[10]

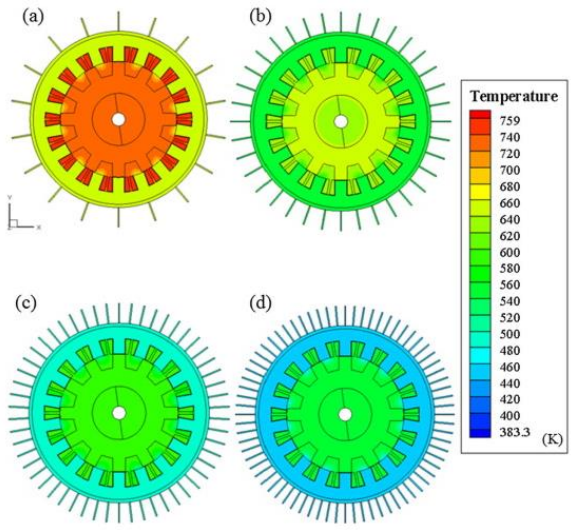
Shuye Ding ve arkadaşları çalışma sonucunda kanat eksenel uzunluğunun artması sargı sıcaklığının azalmasına,sürtünme kaybının hızlı bir şekilde artmasına sebebiyet vermektedir.En optimum kanat uzunluğu olarak iki eğrinin en uygun eşleşmenin 15 mm oluğunu tespit etmişlerdir.[10]

Han Chieh Chiu ve arkadaşları 30 kW'lık elektrikli motorun gövde kanatlarının sargı sıcaklıklarını etkisini simülasyon programlarını kullarak tespit etmeye yönelik bu çalışmayı yapmışlardır.[11]



Şekil 1.17 18,27,36 Kanatlı Gövdelerin Sıcaklık Dağılımları[11]

Şekil1.17'de de belirtildiği üzere gövde kanatlarının yüzey alanı sabit tutatarak kanat adedi artırılarak ve kanat boyu azaltılarak denemeler yapılmıştır.Çalışma sonucu 18 kanatlı 30 mm kanat boylu gövdenin sıcaklık performansının daha iyi olduğu tespit edilmiştir. [11]



Şekil 1.18 18,27,54,72 Kanatlı Gövdelerin Sıcaklık Dağılımları[11]

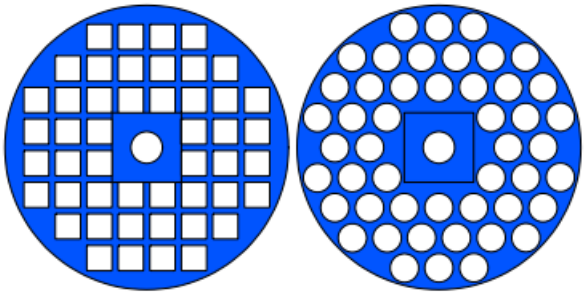
Gövde kanat boyunun uzun olmasının soğutma açısından daha etkili tespit edilmesine istinaden kanat boylarını sabit tutarak kanat adetlerini 18,27,54,72 çıkararak yüzey alanları artırılması sonucu 72 kanatlı gövdenin 54 kanatlı gövdeye kıyasla maksimum sıcaklık noktasının 30 K daha düşük olduğu gözlmlenmiştir. [11]

M.K. Yoon ve arkadaşları asenkron motorlarının enerji kayıplarına dikkat çekerek motor verimliliklerini sargıların sıcaklıkları ile ilişkisi üzerine çalışmışlardır.Yapılan testler de sargı sıcaklıklarını soğutma performasını artırarak 10°C düşürülmesi motorun tam (%100) yükte %0,25 ve %125 yükte %0,5 verimlilikte iyileşme olduğu tespit edilmiştir. [12]

Aurel-Ionuţ Chirilă ve arkadaşları indüksiyon elektrik motorlarının fan muhafaza tasının orifis şekillerinin motor soğutma kapasitelerine etkisi incelemişlerdir [13]

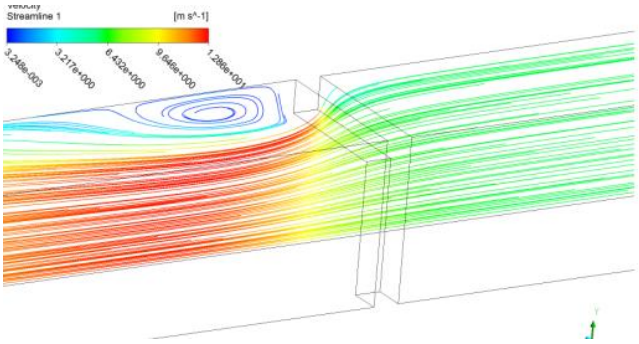


Şekil 1.19 Elektrik Motoru Ve Fan Muhafaza Tası [13]

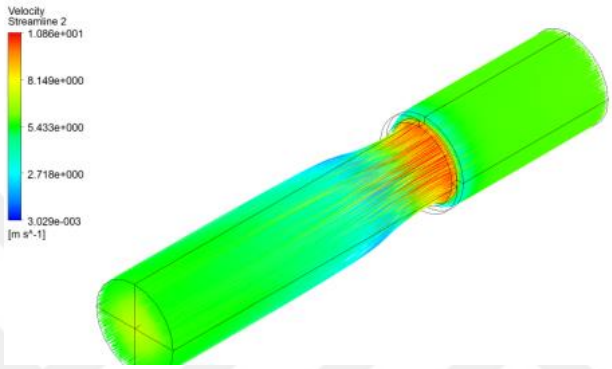


Şekil 1.20 Orifis Şekilleri [13]

.Kare orifis ve daire orifis modelleri karşılaştırılarak akış simülasyon analizleri yapılmıştır. [13]



Şekil 1.21 Kare Orifis Akış Simülasyonu [13]



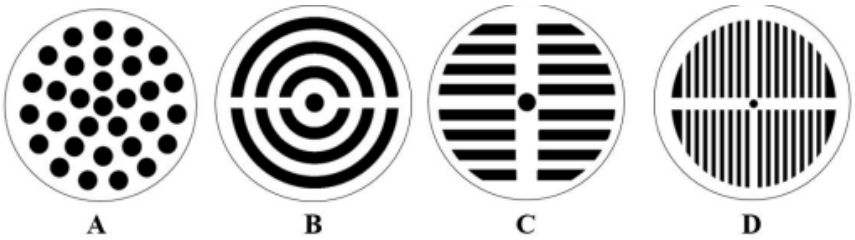
Şekil 1.22 Daire Orifis Akış Simülasyonu [13]

Yapılan simülasyon analizleri sonucu kare orifiste akışta köşeler sebebiyle türbülans girdapları oluşarak akış katsayısı oranı dairesel orifise kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir.Daire orifsin şekillerinde optimizasyonlar yapılarak daha iyi değerler alınabilieceği değerler Tablo 1.4'de verilmiştir. [13]

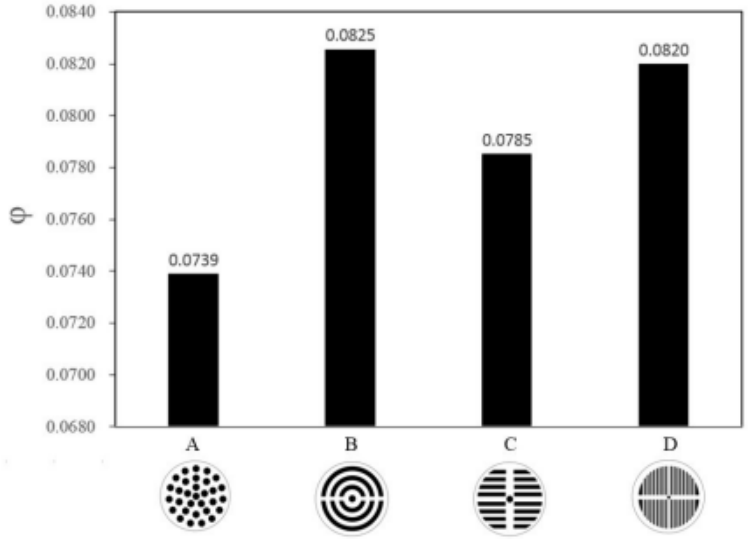
Tablo1.4 Orifis Şekillerinin Akış Katsayısına Etkisi[13]

Orifis Şekilleri	**Akış Katsayısı**	**Kare Orifise Göre Artış %**
Kare	0.646	-
Daire	0.767	18.7
İyileştirilmiş Daire	0.832	28.8

Jae Min Park ve arkadaşları yaptıkları çalışmada fan muhafaza tası orifisi(ızgara) farklı şekillerde simülasyon analizleri yaparak en optimum şekli elde etmeyi hedeflemişlerdir.Şekil 1.23 analizleri yapılan ızgara çeşitleri gösterilmiştir. [14]



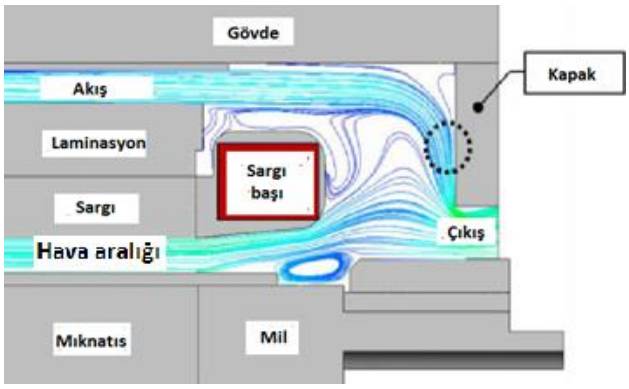
Şekil 1.23 Analiz Edilen Izgara Çeşitleri [14]



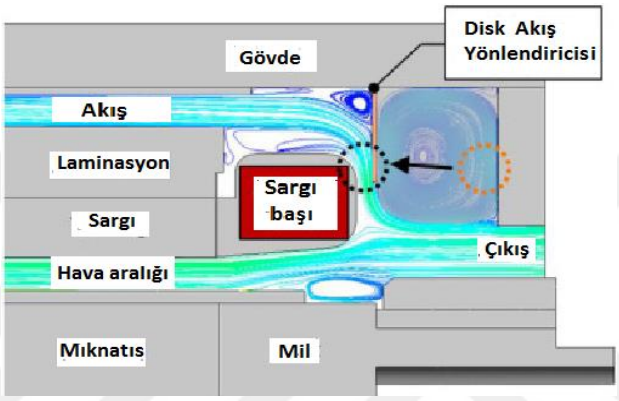
Şekil 1.24 Izgara Çeşitlerine Göre Kütlesel Debi [14]

Izgara çeşitleri fanın motor yüzeyinden çekeceği hava miktarına ve fan üzerine gelen torka büyük etkisi olduğu tespit edilmiştir. Kütlesel debi ve tork minimum A şekilinde olurken maksimum B şeklinde meydana gelmiştir. [14]

Seunghwan Hyeon ve arkadaşları hava soğutmalı açık bir motorun stator sargı sıcaklıklarını düşürmek için motor içi akışı yönlendirmeye yönelik çalışma yapmıştır. Çalışmalarda gövde içerisine Şekil 1.25 gösterildiği üzere disk akış yönlendiricisi kullanılarak mevcut durum kıyalanmıştır.[15]



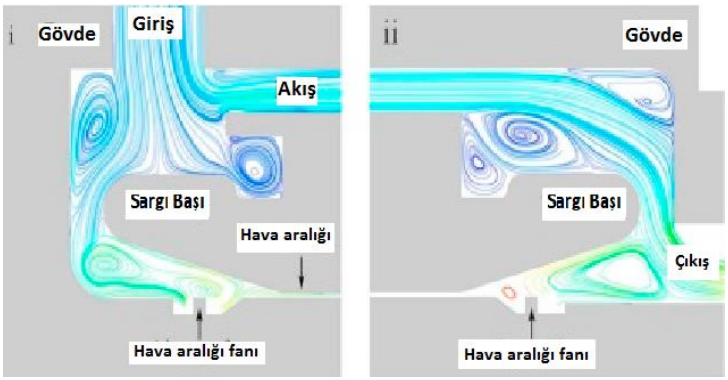
Şekil 1.25 Akış Yönlendiricisiz Akış [15]



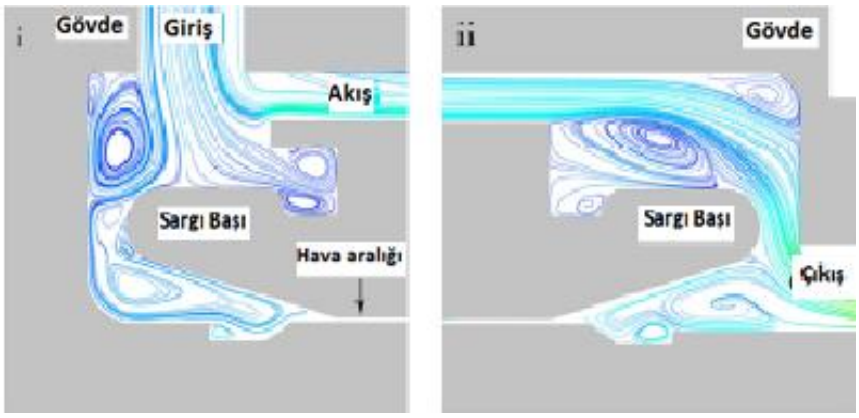
Şekil 1.26 Disk Akış Yönlendiricili Akış [15]

Motor içerisinde akışın zorlaşmaması olabildiğince kısa yoldan tahliyesini sağlamak için kullanılan disk şeklinde hava akışı yönlendiricisi yapılan çalışmada göstermiştirdir ki yaklaşık 21°C sargıdaki sıcaklığı düşürmüştür. [15]

Chiwon Kim,Kwan- Soo Lee ve Se-Jin Yook yapmış oldukları çalışmada sargı sıcaklığını düşürmeye yönelik kullanılan hava aralığı fanının performasınını gözlemlemişlerdir. [16]



Şekil 1.27 Hava Aralığı Fanlı Akış [16]



Şekil 1.28 Hava Aralığı Fansız Akış [16]

Çalışmada rotorun ön ve arka kısmına hava aralığına yakın küçük fanlar kullanılmış ve hava aralığının hızını arttırarak ısı transferi miktarını arttırmışlardır. Yapılan analiz sonuçlarında %55 soğutma performasında iyileşme olduğunu gözlemlemişlerdir.[16]

Marec Gebauer ve arkadaşları temel amaçları elektrik motorun metodolojiye uygun bir yöntem geliştirmek olmuştur.Motorun soğutulmasını bulmak için teorik sayısal hesaplama,CFD simülasyon analizleri ve deneysel olarak doğrulama testleri yapmışlardır.Yapmış oldukları çalışmalar sonucu CFD analiz sonuçları test sonuçlarını doğrular ölçüde olduğunu saptamışlardır. [17]

David A. Staton ve Andrea Cavagnino yapmış oldukları çalışmada elektrik motorların soğumasını ve akışını tahmin etmek için konveksiyon ısı tranfere bağlı ampirik formüller elde etmişlerdir.Seçilecek formizasyon motorun yüzey geometrisine ve akış tipine seçilmesi gereketiğini bulmuşlardır.Elde ettikleri boyutsuz formulleri deneylerle kontrol ederek formullerin kullanılabilir referans alınabilir olduğunu belirtmişlerdir. [18]

1.2 Tezin Amacı

AGM2E 80 M2b elektrik motorunun stator sargı sıcaklığını regresyon ve FEA analizleri kullanarak hedeflenen değerde sabitleyebilecek optimum radyal fanın değerlerinin bulunabileceği sistematik çalışmayı oluşturmaktır.

1.3 Hipotez

Bu çalışmada elektrik motoru radyal fanının performansını etkileyen parametreler araştırmalarıda göz önünde bulundurularak fan dış çapı,kanat sayısı ve kanat genişliği referans alınmıştır. Dış çapın ve kanat adedinin kanat genişliğine kıyasla soğutmaya daha etkili olacağı düşünülmektedir.Validasyon testleriyle sonuç doğrulukları değerlendirildiğinde malzeme ısıl özellikleri için optimizasyon gerekli olabilecektir. 3D printer basımı PLA malzemeden yapılacaktır,seri üretim mühendislik malzemelerine kıyasla farklılık gösterebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

2
ELEKTRİK MOTORU KOMPONENTLERİ

Elektrik motorları temel olarak elektrik enerjisini kullanarak içerisinde oluşturduğu manyatik alan sayesinde mekanik enerjiye dönüştüren aygıtlardır.Günümüzde kullanılan birçok şeyin dönme, öteleme, titreşim hareketleri elektrik motorları ile sağlanır.Beslediği elektrik akımına göre ikiye ayrılır.

- Alternatif akım ile çalışan elektrik motorları
- Doğru akım ile çalışan elektrik motorları

2.1 Yaygın KullanılanElektrik Motorları

2.1.1 Alternatif Akımlı Elektrik Motorları

Alternatif akım fazlardan oluşan ve yönü sürekli değişip sabit kalmayan akımdır. Mekanik enerjiyi alternatif akımın dönüşümüyle elde eden elektrik motorlardır. Alternatif akım ile çalışan motorlar daha çok endüstride yüksek güç gereksinimli alanlarda kullanılır.Asenkron ve senkron olarak iki çeşidi bulunmaktadır.

2.1.1.1 Asenkron Motorlar

Motor statoruna sağlanan Alternatif akım güçü, zaman içerisinde AC salınımlar ile dönen manyetik alan oluşur. Bu motorlarda rotor dönüş hızı statorun manyetik alanından daha azdır. Bu sebeple asenkron motor statorun manyetik alanı rotora göre farklılaşır. İkincil sarmal motor etkisinde, kısa devre oluşumunda bu indükleme indüksiyon motorda ters bir akım oluşturur. Rotor sarımlarındaki akımlar dolayısıyla stator alana karşı tepki rotorlarda manyetik alan oluşur. Senkron hız dönüşü rotorun akımının indüklenmemesine sebep olacaktır ve bu asenkron motorların hızlarınn senkronlara kıyasla yavaş olma nedenidir.

2.1.1.2 Senkron Motorlar

Bu motorlar, duran milin dönüşünü akım beslemesiyle frekansla ile etkileşimiyle çalışan elektrik motorudur.Dönüş periyodu ve AC çevrimleri birbirine eşittir.

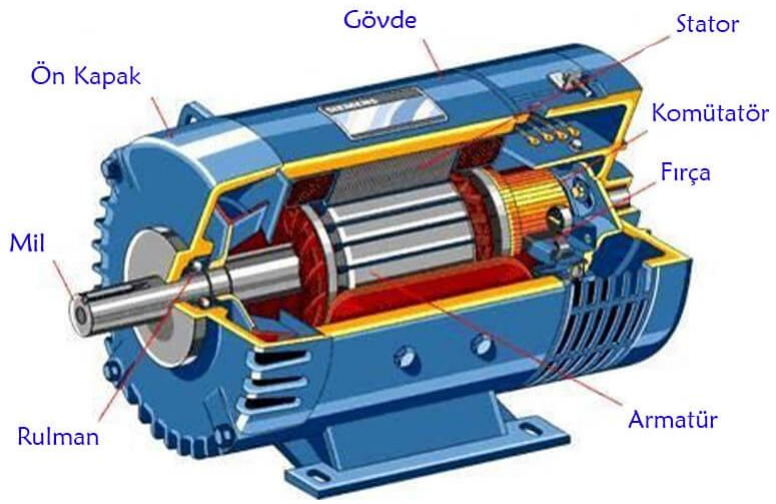
Yükün artıp azalmasının motorun dönüş devrine etkilemeyen motorlardır.Bu yüzden frekans ve kutup sayısını değiştirerek devir sayısına müdahale edilmektedir.

2.1.2 Doğru Akımlı Elektrik Motorları

Doğru akım yüksek potansiyelli artı ve düşük potansiyelli eksi kutuplardan oluşur. Doğru elektrik akımı ile çalışan elektrik motorlarına denir. Fırçalı,fırçasız, servo ve step motolar olarak dört çeşide ayrılabilir.

2.1.2.1 Fırçalı Motorlar

Bu motorların rotorundaki manyetik alan elektrik akımının etkisi ile oluşur.Fırça ve kollektör elemanlarının sayesinde rotora akım geçişi olur ve bu sayede moment oluşur.Motorun sabit yönde dönmesini sağlamak için, "Doğru akım" komütatörleri, her yarım döngüde (iki kutuplu bir motorda) akımı ters yönde döndürür, bu da rotorun aynı yönde dönmesinin devamlılığını sağlamaktadır. Diğer motorlara göre daha ucuzdur ve kullanımı daha kolaydır.Fırça kullanıldığı için zamanla aşınır belli süre sonra değiştirilmesi gereklidir.



Şekil 2.1 DC Fırçalı Motor

2.1.2.2 Fırçasız Motorlar

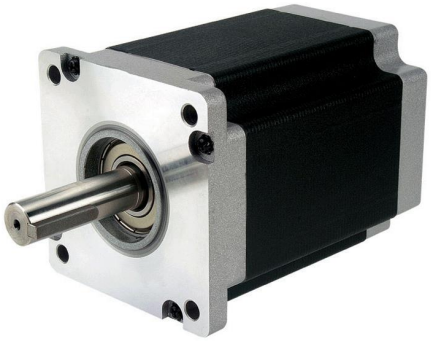
Fırçalı DC motorların yerini alması amacı ile tasarlanmışlardır. Sürtünmenin en az durumda olması nedeniyle verimlilikleri yüksektir. Fırça gibi aşınan bir parça olmaması sebebiyle de yüksek performansın ihtiyaç duyulduğu alanlarda kullanılır.

2.1.2.3 Servo Motorlar

Bu motorlar 0 ve 180 derece arasında hedeflenen konumda dönüş yapılabilecek motorlardır. Bu motorlar uzaktan kumandalı araçlarda kullanılması sebebi ile tasarlanmıştır. Bunların en büyük avantajı başka bir sürücüye ihtiyaçlarının olmamasıdır.

2.1.2.4 Step Motorlar

Fırçalı DC motorlar, terminallerine DC gerilim uygulandığında sürekli olarak dönerler . Kademeli motor, bir dizi giriş darbesini (tipik olarak kare dalgalar) şaftın dönme konumunda kesin olarak tanımlanmış bir artışa dönüştürme özelliğiyle bilinir. Her darbe, şaftı sabit bir açıyla döndürür.

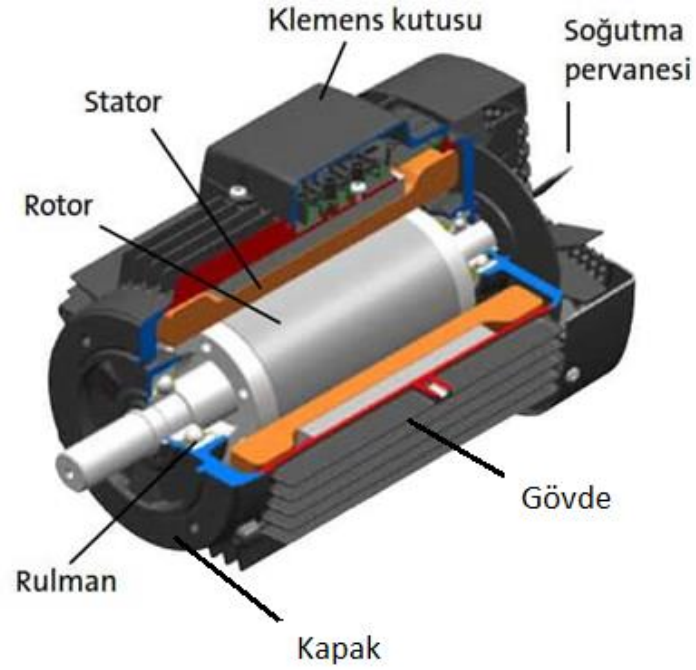


Şekil 2.2 Step Motor

2.2 Elektrik Motoru Temel Parçaları

Bu bölümde elektrik motorunun temel komponentlerinden bahsedilecektir. Temel parçalarınyanındastandart komponentler de bulunmaktadır. Rulman, keçe,conta, civata,somun,rondel bunların başlıcalarıdır.Elektrik motorunun temel parçaları;

- Gövde
- Ön ve Arka Kapak
- Stator
- Rotor
- Mil
- Klemens Kutusu Grubu
- Fan Muhafaza Tası
- Fan



Şekil 2.3 Elektrik Motoru Parçaları

2.2.1 Gövde

Elektrik motorunun gövdesi motorun komponentleri için ana rol oynar tüm bileşenleri içerir.Vernikli statorun pres yardımıyla gövdeye montajlanmasıyla stator yatağı görevi görmektedir.Gövde tasarımı genellikle ısı transferini daha hızlı gerçekleştirme amacıyla yüzey alanını artırma amacıyla kanatçıklı

yapıdadır.Gövdeler dış etkilere karşı dayanımlı olması adına alüminyum,dökme demir ve çelikten üretilmektedir.



Şekil 2.4 Gövde

2.2.2 Kapak

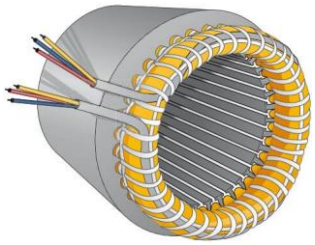
Mile çakılmış rotor statorun merkezlenmesi için ,rulmanlar ile ön ve arka kapaklara yataklanır,bu şekilde gövde ile montajlanmış olur.



Şekil 2.5 Kapak

2.2.3 Stator

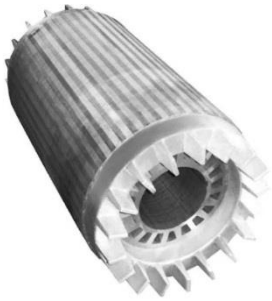
Alternatif gerilimle çalışan motorlarda manyetik alanın oluştuğu ve üzerinde sargıların konumlandığı parçadır. Manyetik alan akımın kutuplar arasında dönüşümlü olarak dönmesiyle oluşturur. Stator, her biri 0,5 mm kalınlığında olan laminasyon saçların üst üste dizilerek oluşturulmaktadır.



Şekil 2.6 Stator

2.2.4 Rotor

Statorun meydana getirdiği döner manyetik alanın içinde dönen ve oluşan torkun mille aktarılmasını sağlar. Stator tarafından oluşan manyetik alan rotorda akım indükler ve bu akım kendi manyetik alanını yaratır.Rotor, motorun merkezi bileşenidir ve mile sabitlenmiştir.Genellikle rotorlar enjeksiyon kalıplarda laminasyonları diztikten sonra saf alüminyum dökülmesiyle üretilir.



Şekil 2.7 Rotor

2.2.5 Mil

Mil ve rotor birbirine montajlanarak sabitlenmiştir birlikte dönerler. Şaft, motor gövdesinin dışına çıkar ve torku iletmek tahrik vermek için kullanılır.



Şekil 2.8 Mil

Milin kopmasını önlemek için motorun oluşturduğu torka ve yüklere göre boyutlandırılmıştır.

2.2.6 Klemens Grubu

Statordaki sargıların uçları klemens kutusuna çıkarılır. Motor ile şebeke arasındaki bağlantı klemenslerle yapılır.Motorun elektrik girişinin yapıldığı kısımdır.



Şekil 2.9 Klemens Grubu

2.2.7 Fan Muhafaza Tası

Arka kapak ve soğutma pervanesini örterek dışarıdan gelebilecek cisimlere darbelere karşı korur. Motor yüzeyinden geçecek hava akışı için deliklere sahiptir.



Şekil 2.10 Fan Muhafaza Tası

2.2.8 Fan

Motorun dönen miline bağlanan plastik veya metal pervane gövdenin ve kapakların ısı transferinin artmasını sağlayan komponenttir. Pervane, motorun ısınmasını önlemektedir ve verime pozitif yönde etkisi vardır.



Şekil 2.11 Fan

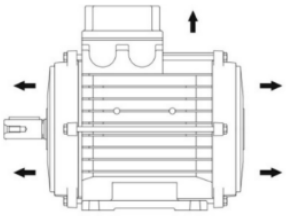
2.3 Elektrik Motoru Soğutma Sistemleri

Elektrik motorları soğutma sistemlerinde akışkan olarak hava ve ya sıvılar kullanılmaktadır.Yaygın olarak hava ile soğutma yöntemi kullanılmaktadır.

2.3.1 Doğrudan Hava Soğutma

- **IC410 Soğutma**

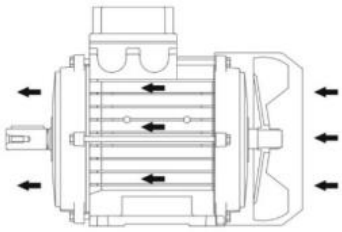
Bu soğutma türünde ısının dışarı atılmasını sağlamak için herhangi bir fan kullanılmamaktadır. Doğal konveksiyon ile ısı transferi gerçekleşir.



Şekil 2.12 IC410 Soğutma

- **IC411 Soğutma**

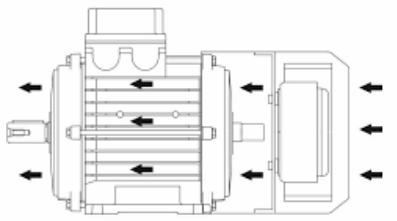
Bu tip soğutma, elektrik motorların büyük çoğunluğunda kullanılan sistemdir. Rotorun aynı eksenine sabitlenmiş bir fana sahiptir.Fan, gövde kanatçıklarından havayı iterek ısı transferi gerçekleşir.



Şekil 2.13 IC411 Soğutma

- **IC416 Soğutma**

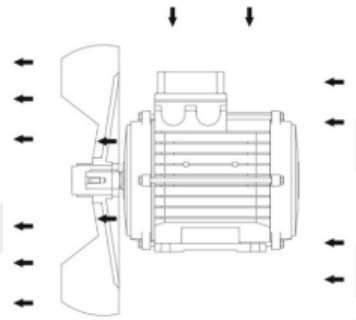
IC411 motor sorununa invertör kullanımıyla çözüm olarak bu soğutma sistemine genellikle ihtiyaç duyulur. Temel fark, fanın kendi motoru ve bağımsız güç ve devirde çalıştırılmasıdır.



Şekil 2.14 IC416 Soğutma

- **IC418 Soğutma**

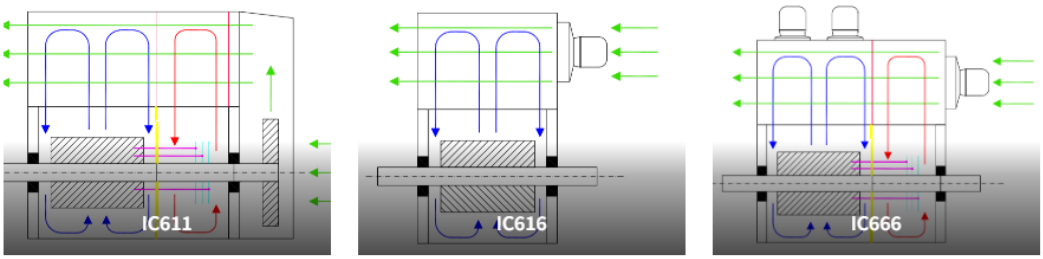
Her ne kadar bir IC410'a benzer gibi görünse de böyle değildir.Bu sistemde havalandırma sistemlerinde kullanılan hava akışı motoru soğutmada da kullanılır.



Şekil 2.15 IC418 Soğutma

2.3.2 Dolaylı Hava Soğutma

Bu soğutma türü yüksek güçlü elektrik motorlarında kullanılmaktadır ve aşağıdaki üç soğutma tipi de havadan havaya 2 fazlı eşanjör kullanılır. Bu sayede ekipmanın içindeki hava dışarıyla temas etmez. IC611'de hem içeride hem de dışarıda kullandığımız fanlar milli rotorla montajlıdır. İçerideki havayı sirküle eden bir fanı ve dışarıdaki havayı eşanjörden geçmeye zorlayan ikinci bir fan vardır.IC616'da, havanın eşanjörden içeri girmesini sağlayan harici bir fan ve IC666 soğutmada ise hem içeride hem de dışarıda zorlamalı fanlar kullanılır.



Şekil 2.16 IC611- IC616- IC666 Soğutma

2.3.3 Doğrudan Sıvı Soğutma

- **IC71W Soğutma**

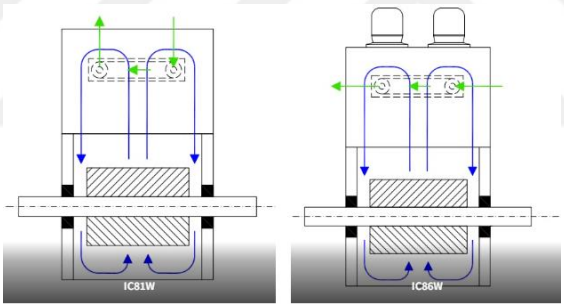
Bu tip motorlarda su doğrudan motor gövdesinden geçerek statoru ve rotoru soğutmaktadır.



Şekil 2.17 IC71W Soğutma

2.3.4 Dolaylı Sıvı Soğutma

Dolaylı sıvı soğutmada da hava soğutmaya benzer bir sistem bulunmaktadır,hava yerine sıvı akışkan olarak kullanılmaktadır.



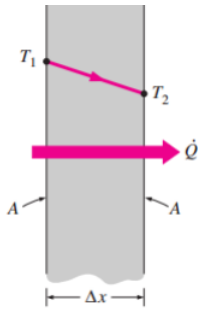
Şekil 2.18 IC81W-IC86W Soğutma

2.4 Isı Transferi

İki ve ya daha fazla sıcaklıkları farklı nesnelerin iletim,taşınım,ışınım yolları ile enerji transferine denilmektedir.

2.4.1 İletim İle Isı Transferi

Birbiri ile temas halindeki parçaların moleküllerin kafes yapısındaki titreşmesiyle aktarılan ısı transferidir.



$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -k.A.\frac{\Delta T}{\Delta x} \qquad (2.1)$$

ΔQ: Isı miktarı, Δt: Zaman değişimi, k: ısı iletim katsayısı, A: Alan

ΔT: Sıcaklık farkı, Δx: Kalınlık

Isıl iletkenlik; Bir malzemenin birim kalınlığından birim sıcaklık değişimine ısı transfer hızı olarak tanımlanabilir. Bir malzemenin ısıyı iletme kabiliyetini ısıl iletkenliği ile bağdaştırabiliriz.

Tablo 2.1 Malzemelerin Isıl İletkenlik Katsayıları

Malzeme	**Isıl İletim Katsayısı(W/mK)**
Elmas	2300
Gümüş	429
Bakır	401
Altın	317
Alümiyumü	237
Demir	80

2.4.2 Taşınım İle Isı Transferi

Katı yüzeylere temas halindeki sıvı veya gaz arasında enerji transferine denir. İletim ve akışkan hareketinin birlikte gerçekleşmektedir. Akışkan hareketi ne kadar hızlı olursa, taşınım ısı akışı da o kadar büyük olur.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = h.A(T_S - T_\infty) \tag{2.2}$$

ΔQ: Isı miktarı, Δt: Zaman değişimi, h: ısı taşınım katsayısı, A: Alan

T_S: Yüzey sıcaklığı, T_∞: Akışkanın sıcaklığı

2.4.3 Işınım İle Isı Transferi

Malzemelerin atom ve moleküllerin elektronik hareketleri sonucunda elektromanyetik dalgalar şeklinde yayılan enerjidir. Bu ısı transferi için aracı bir ortam gerekmemektedir.Her katı, sıvı ve gazlar, ışınımı farklı seviyelerde yayar, soğurur ve geçirirler.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \sigma.A.{T_S}^4 \tag{2.3}$$

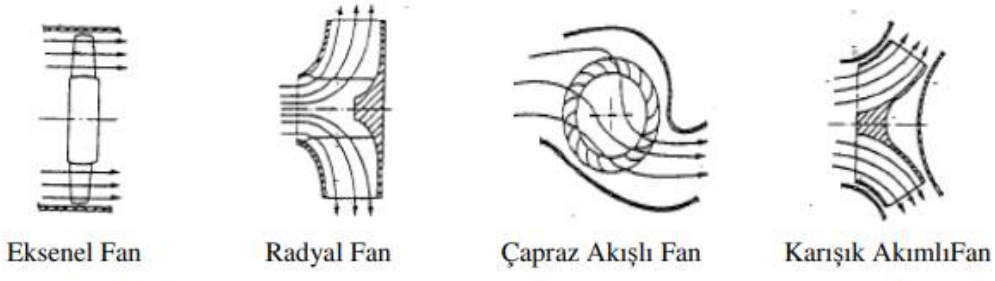
σ: Stefan-Boltzman sabiti($5.670x10^{-8}$)($\frac{W}{m^2}.\frac{1}{K^4}$)

3
FANLARIN MATEMATİKSEL HESAPLAMALARI

Fan havanın basınç farkı oluşmasını sağlayarak transferini gerçekleştiren cihazlardır.Fanların kanatları hava üzerinde statik enerjiyi ve kinetik enerji kazandırarak iş yapar.Kazandırılan statik enerji ile kinetik enerji oranları fanların tiplerine göre değişiklik gösterir.[19]

3.1 Fan Çeşitleri

Temel olarak radyal ve eksenel fan olarak iki tip fan vardır. Havanın akış yönlendirmesine bağlı olarak çapraz akışlı fan ve karışık akışlı fan olarak toplamda 4 tiptir. [20]



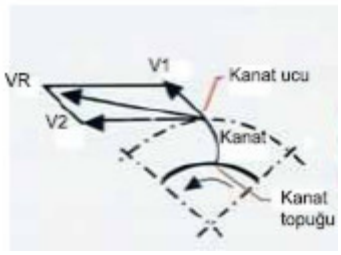
Şekil 3.1 Fan Tipleri[20]

3.1.1 Radyal Fan

Bu fanlar merkezkaç kuvvetinden faydalanarak havayı eksenel yönden radyal yönde akış sağlar.Yüksek basınç elde etmesinden kaynaklı verimleri yüksektir.Günümüzde daha çok endüstriyel fan olarak kullanılmaktadır.Eksenel fanlara göre basınç bakımından daha yüksektir.Öne eğik kanatlı radyal fan,geriye eğik kanatlı radyal fan ve radyal kanatlı fan olarak üç çeşittir. [21]

3.1.1.1 Öne Eğik Kanatlı Radyal Fan

Bu fanlarda çarktan çıkan hava hızı VR , kanatların çevre hızı V2'den hızlıdır. Böyle fan kanat tasarımları yüksek VR hava hızı oluşturduğundan fanın dönüş hızını azaltabilir.[21]



Şekil 3.2 Fanın Hızları[21]

Düşük hızı ve basıncı olduğu için diğer fanlara kıyasla hafiftir ve malzeme maliyeti nedeniyle fiyatları uygundur.Genelde hava debisinin mikatarının fazla olduğu fakat hızın az olup basıncın düşük istenilen alanlarada kullanılmaktadır.Verimlilik bu fanlarda ön planda değerlendirilen kriter değildir. [21]



Şekil 3.3 Fanın Kanat Görünümü [21]

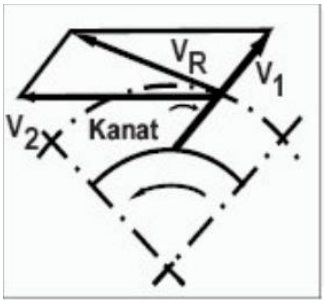
Bu tarz fanlar ağır çalışma koşullarına uygun değildir.Temiz olmayan çevre ortamlarında kullanılması uygun olmamaktadır. Bu fanların eğrileri aşağıda grafikte belirtilmiştir.



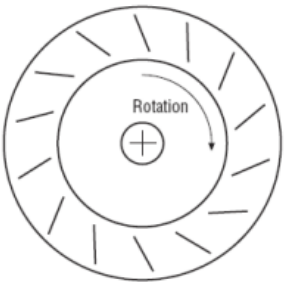
Şekil 3.4 Fanın Eğrileri [21]

3.1.1.2 Geriye Eğik Kanatlı Radyal Fan

Bu radyal fanlarda hava hızı (VR) çevre hızından(V2) daha düşük hızda terk eder. En fazla çark hızı bu fanlarda görülmektedir.

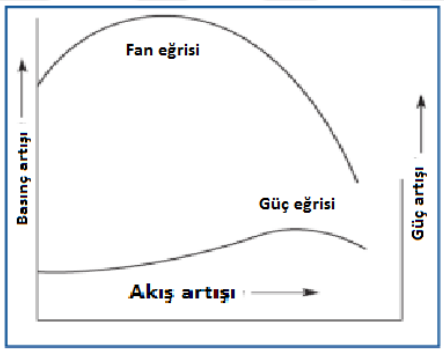


Şekil 3.5 Fanın Hızları [21]



Şekil 3.6 Fanın Kanat Görünümü[21]

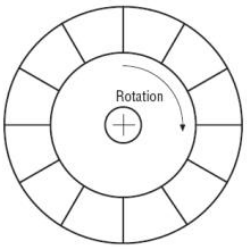
Genelde bu fanlar büyük basınçlar ve düşük miktarlarda debiler istenilen uygulamalarda tercih edilirler.Bu fanın eğrileri aşağıda paylaşılmıştır.



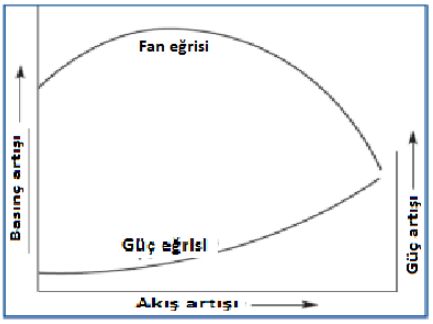
Şekil 3.7 Fanın Eğrileri[21]

3.1.1.3 Radyal Kanatlı Radyal Fan

Bu fanlarda düşük miktarlada debiler istenilip aynı zamanda yüksek miktarlarda basınç beklenilen alanlarda kullanılmaktadırlar.Aşağıda fan formları ve eğrileri paylaşılmıştır.



Şekil 3.8 Kanat Görünümü [21]

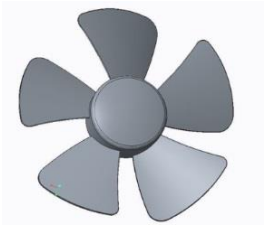


Şekil 3.9 Fanın Eğrileri[21]

Radyal kanatlı bu fanlar verimlilikleri kıyaslandığında öne eğik fanlardan daha verimlidir.Diğeri ile kıyaslandığında verim oranı %20 daha fazla değerlere yükselebilmektedir. [21]

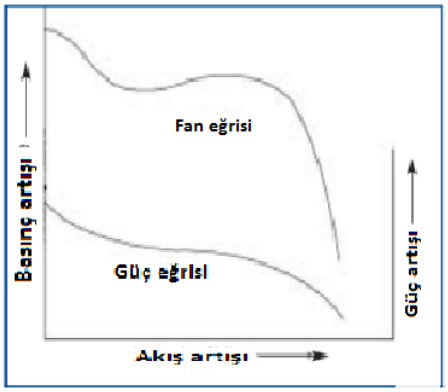
3.1.2 Eksenel Fan

Bu fanlar büyük debilere aynı zamanda düşük basma kabiliyetine sahiptir. Bu fanlar radyal fanlarla kıyaslandığında debi kayıpları daha fazladır. Güç eğrisi ve fan eğrisi rasyal fanlarla karışlaştırıldığında benzemeyen formlardadır.Ağırlıklarının düşük olması ve bu nedenle az mazleme maliyeti nedeniyle talep edilmesi falzadır. Bilgisayarlarda, evlerde vantilatör, rüzgar tünellerinde aktif olarak kullanılmaktadır. [21]



Şekil 3.10 Eksenel Fan

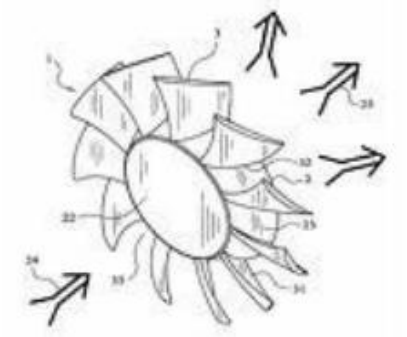
Güç ihtiyacı ve debi ters orantılı olarak etkilemektedir, yani debi artarsa güç ihtiyacı azalacaktır.Aşağıda fan eğrileri paylaşılmıştır. [21]



Şekil 3.11 Eksenel Fan Eğrisi[21]

3.1.3 Karışık Akışlı Fan

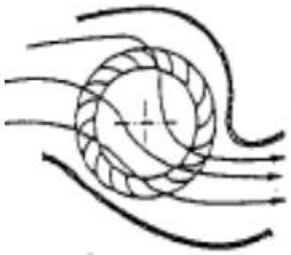
Havanın kanatlar üzerinden, emiş ağzına göre yaklaşık 45° açı yaparak hareket eden fanlardır. Karışık akışlı fanlar diğer fanlarla kıyaslandığında aynı miktarda hava akışını düşük hızlarda sağlar ve bu nedenle karışık akışlı fanlar, düşük ses seviyesine sahiptirler.



Şekil 3.12 Karışık Akışlı Fan [21]

3.1.4 Çapraz Akışlı Fan

Çapraz akışlı fanlarda hava kanatların etkisiyle girdikleri doğrultudan yön değiştirerek farklı doğrultuda fandan ayrılır.Fiziksel olarak montaj alanın az olduğu uygulamlarda avantajlı olduğu için kullanılmaktadır. Diğer fanlara kıyasla çapraz akışlı fanlar daha fazla ses oluşturmaktadır.



Şekil 3.13 Çapraz Akışlı Fan [21]

3.2 Fanların Verimi ve Performansı

Havanın akışına verilen enerjinin tahrik taraftan alınan enerjiye oranı fanın verimliliğini ifade etmektedir. [20]

Fanların performanslarını daha anlaşılır ve basitleştirmek için eğrilerden yararlanılır.Performansının en iyi olduğu aynı zamanda verimininde maksimum olduğu noktadır. Fanların maksimum noktaya optimum yakın çalışması fan yüzeyinin az aşınmasınıda sağlar.[21]

Fanın dönüş hızı performansı açısından doğrudan etkilidir.Dolayısıyla dönüş hızını etkileyen havanın sıcaklığı,ortamın gürültüsü ve fan mekanik özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.Fan verimi için aşağıdaki tanımlamalar kullanılmaktadır.[21]

$$Fan\ Toplam\ Verimi = \frac{Hidrolik\ Güç}{Mil\ Gücü} \tag{3.1}$$

$$Hidrolik\ Güç = DebixToplam\ Basınç \rightarrow\ P_H = QxΔP_T \tag{3.2}$$

$$Top.Basınç = Statik\ Basınç + Dinamik\ Basınç \rightarrow\ ΔP_T = ΔP_S xΔP_D \tag{3.3}$$

$$Mil\ Gücü = Motor\ GücüxMotor\ Verimi \rightarrow\ P_{Mil} = P_{Motor}\ xη_{Motor} \tag{3.4}$$

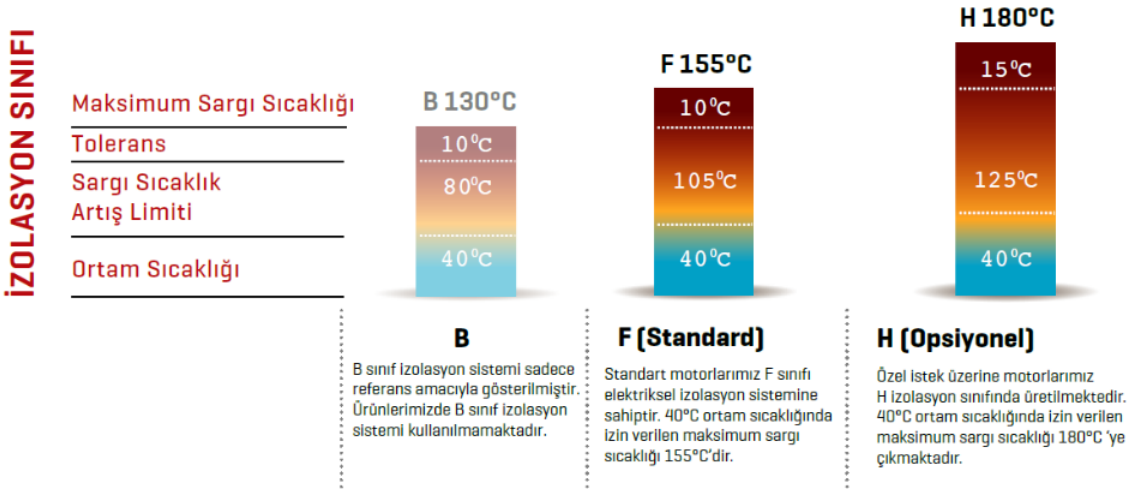
$$Sistem\ Verimi = Mekanik\ Verimi\ xMotor\ Verimi \tag{3.5}$$

Yukarıda ifade edilen denklemlerle fan ve sistem verimleri ile ilgili değerler elde edilebilmektedir.

4
MATERYAL VE YÖNTEM

Önceki bölümlerde elektrik motoru çalışma prensibi hakkında bilgiler ve çalışma temeli motorları soğutmanın en etkin elamanı fanlar hakkında teorik anlatım ve litaratür çalışmalarınada ilk bölümlerde bahsedilmiştir.Bu bölümde ağırlıklı olarak tezde yapılan 3D katı model çalışmaları,CFD simülasyon analiz çalışmaları, regresyon analizi ve validasyon testlerine detaylı yer verilmiştir.

Elektrik motorlarında rotor ve stator üzerlerinden akım ve manyetik alan oluşması kaynaklı ısı kaynağı olarak görev alan elamanlardır.Isınmadan dolayı elektrik motorlarında kritik olarak motor kablo bağlantılarında ve maksimum ısıya sahip olan stator sargı başlarını soğutmaya odaklı soğutma dizaynları yapılmaktadır. Statordaki bakır tellerdeki ısıyı iletimle ısı transferi en hızlı ısı transferi olduğu bilindiği üzere teller arası boşlukları doldurmaya yönelik izolasyon olarak tanımlanan vernikleme işlemleri uygulanmaktadır.Belli standartlara göre maksimum çıkılabilecek sıcaklık noktalarına göre izolasyon tipleri değişmektedir.İlgili liste aşağıda paylaşılmıştır.

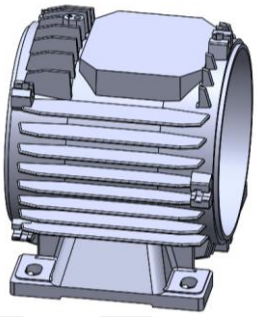


Çalışmada Gamak AGM2E 80 M2b asenkron elektrik motoru kullanılmıştır.80 tip motorlarda sargı sıcaklıkları teorik ve tecrübe çalışmaları sonucunda F izolasyonla koruma sağlayabilecek izolasyon verniği kullanılmaktadır.Bu vernik asıl amacı maksimum 155 °C sıcaklığa dayabilen koruma kabiliyeti olacağı anlaşılmaktadır.

Çalışmada 80 tip elektrik motorunun fan seçimini ANSYS CFD simülasyon analizi, Mintab ve validasyon testlerini yaparak uygun fan seçim yöntemini elde etmek amaçlanmıştır.Öncelikle CFD analizlerini yapabilmek için 3D cad datalarının analize uygun ve gerçeğe yakın şekilde hazırlanmıştır.

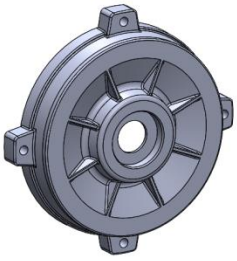
4.1 3D CAD Model

Simülasyon çalışmalarını yapabilmek için seçilen elektrik motorunun 3D modellemeleri ilk olarak Solidworks programında hazırlanmıştır.Ana komponentler gövde, kapaklar, rotor, stator, mil,fan muhafaza tası ve fan modelleri Cad olarak hazırlanmıştır.Hazırlanan modelleri analize uygun şekilde ince radyus, pah ve küçük ayrıntılar temizlenmiştir.



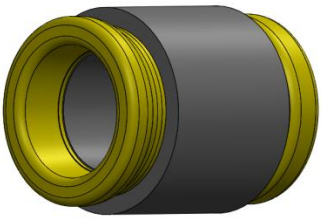
Şekil 4.1 Gövde Katı Modeli

Kanatların yüzeylerindeki ince randyuslar temizlenmiştir.Kapak montaj faturaları,yazılar ve delikler kaldırılarak meshlerin sayısını azaltarak analizin rahat çözüm almasını sağlanmıştır.



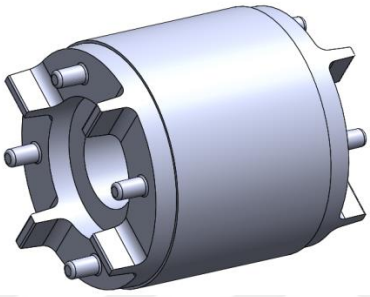
Şekil 4.2 Kapak Katı Modeli

Yukarıda kapağın katı modeli belirtilmiştir.Radyuslardan küçük pahlardan arındırılmıştır.



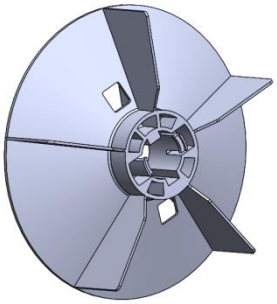
Şekil 4.3 Stator Katı Modeli

Stator bakırı,stator laminasyonu iki parça olarak tasarlanmıştır.Bakır sargı tellerin yerleştirildiği slotlar (oyuklar) modellenmeyerek bakır silindirik olarak modellenmiştir. Topam tel hacmi ölçülerek katı model oluşturulmuştur.



Şekil 4.4 Rotor Katı Modeli

Rotor laminasyonlarında alüminyum enjekte edilmesi için slotlar bulunmaktadır. Rotorda alüminyum çeliğe kıyasla az olduğu için ihmal edilerek modellenmiştir.



Şekil 4.5 Fan Katı Modeli

Fan dış çap,kanat sayısı ve genişlik diğer değişken parametreler olarak alınımıştır,keskin köşelerde radyus eklenmeden meshlemelerde göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır.



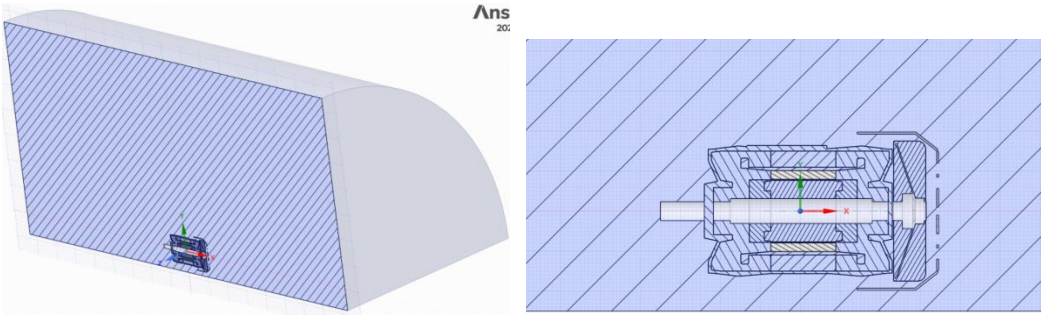
Şekil 4.6 Mil Katı Modeli

Milde rotor çakımı için açılan tırtıklar ve fan,rulman montajları için açılan kama,segman ayrıntıları temizlenerek analize hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.7 Fan Muhafaza Tası Katı Modeli

Motor üzerinden akan havanın giriş yüzeyidir.Genellikle 1,5 mm kalınlığındaki saç çelikten elde edilmektedir.Küçük radyus cıvata delikleri ve analizi etkilemeyecek ayrıntılardan arındırılmıştır .

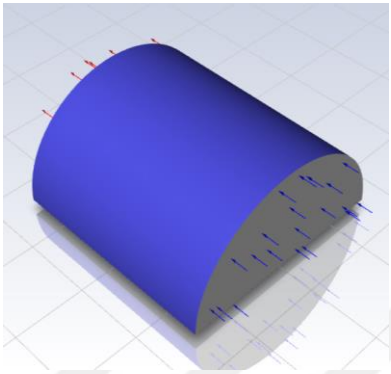


Şekil 4.8 Montaj Katı Modeli

Ansys Spaceclaim programı kullanılarak motorun modelleneceği hava sahası ve motor içi havalarda 3D olarak oluşturulmuştur.

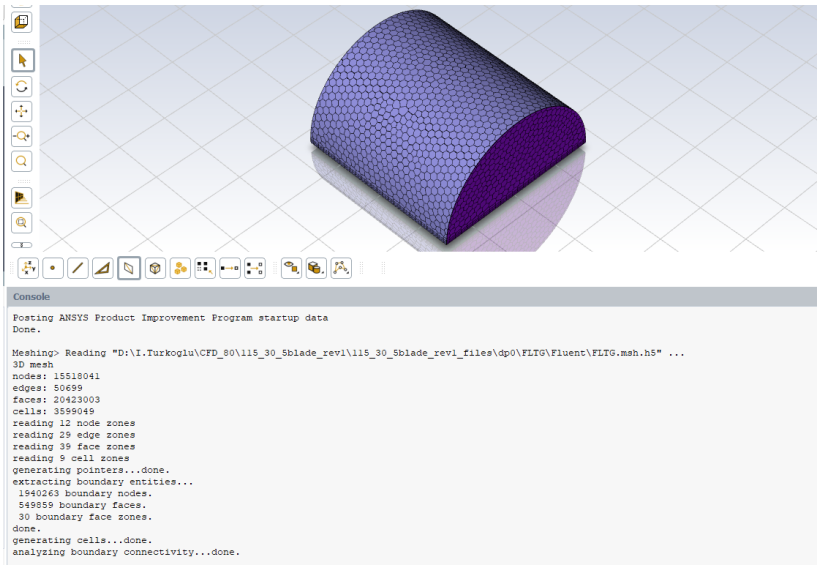
4.2 Simülasyon CFD Analizleri

80 Tip elektrik motorumuzun analize uygun olacak şekilde CAD dataları hazırlandıktan sonra Ansys programı kullanılarak CFD analizleri yapılmıştır.Analizler yapılırken literatür araştırmalarında kurulan türbülans modelleri,mesh modellerinde başarılı sonuç alan çalışmalar referans alınmıştır.



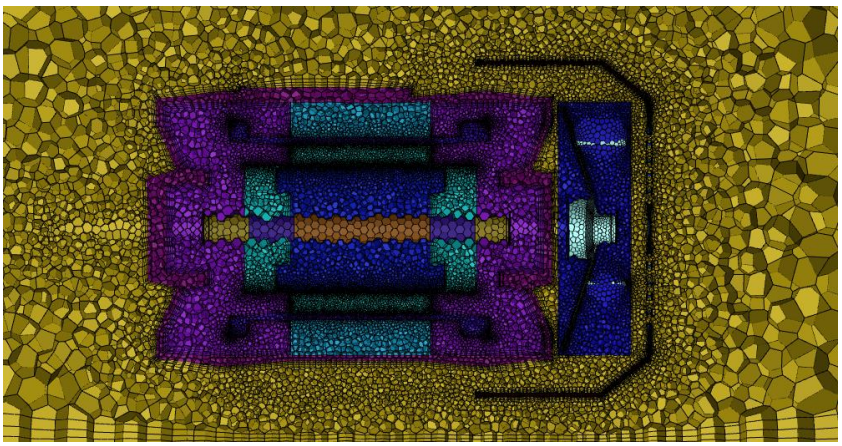
Şekil 4.9 Hava Giriş,Çıkış Ve Simetri Yüzeyleri

Havayı motorun yüzeylerinden olabildiğince geniş hacimde tanımlanmıştır. Hava girişi sağ yüzey,çıkışı sol yüzey olarak tanımlanmıştır.Mavi yüzey simetri olarak tanımlanarak üst yüzeye çarpan havanın geri dönüşleri engellenmiştir.Spaceclaim programında yüzeylerin duvar ve geçilebilir yüzeyler tanımlanmıştır.Tanımlanma sonrası analizin çözümlenebilmesi için mesh atılma işlemi gerçekleştirilmiştir.Mesh atılmasında watertight yöntemi ile altıgen mesh elamanları ile oluşturulmuştur.

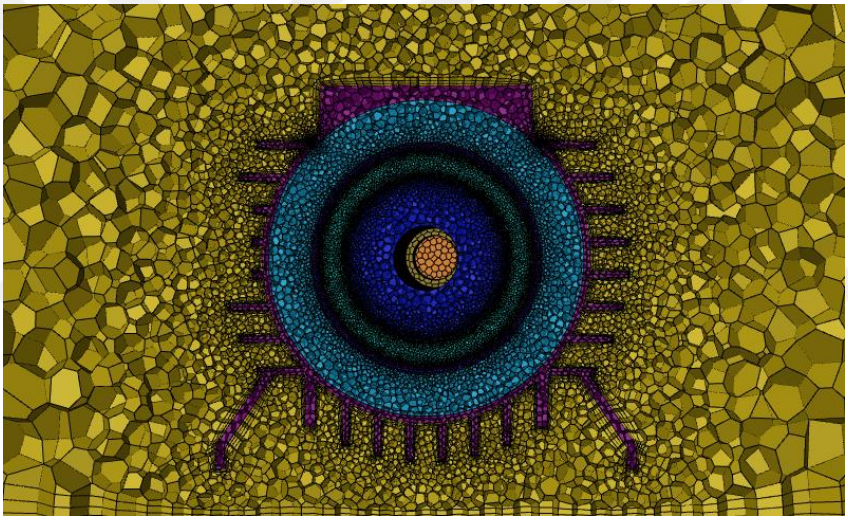


Şekil 4.10 Mesh(Ağ Örgüsü) İşlemi

Mesh elemanları ortalama 3500000-3600000 eleman olacak şekilde fan geometri şekline bağlı olarak değişiklik göstermiştir.



Şekil 4.11 Mesh(Ağ Örgüsü) XY Kesit Görünüm

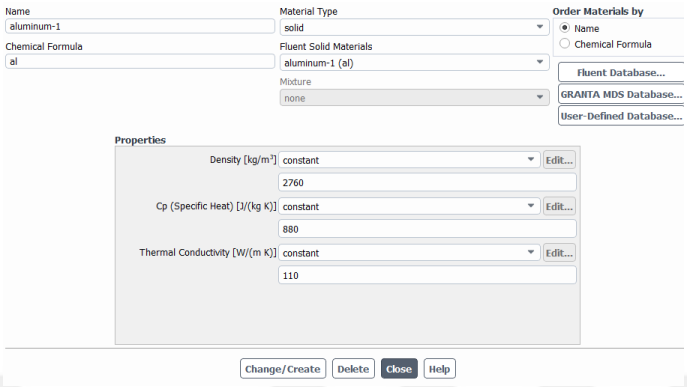


Şekil 4.12 Mesh(Ağ Örgüsü) YZ Kesit Görünüm

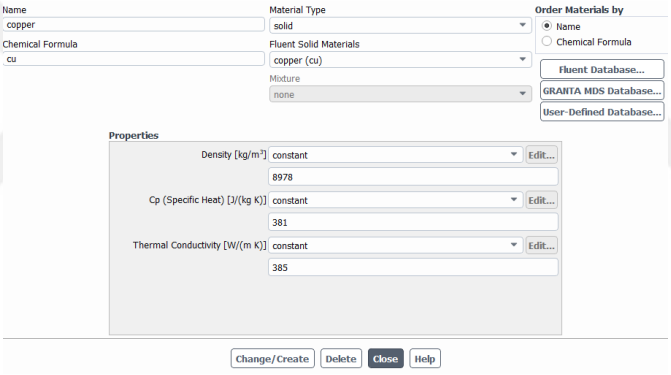
Ağ örgüsü işlemi tamamlanması aşamasında skewness mesh kalite değerleri 0,2 değeri baz alınarak,bölgesel olarak ince ağ örgüsü atılmıştır.

Meshleme aşaması tamamlandıktan sonra analizi kurulum aşamasına geçilerek mevcutta gerçek hayattaki motorun çalışma durumu simülasyona aktarılacaktır.Motor komponentlerinin malzemeleri alüminyum,bakır,çelik analize tanımlanmıştır.Analize tanımlanması gereken malzeme özellikleri yoğunluk, termal iletkenlik ve özgül ısı olmuştur.Termal iletkenlik ısı transferi konusunda doğrudan etkili olduğu ve araştırmalar neticesinde sırasıyla alüminyum 110-130 (W/(mK)),çelik 23-37 (W/(mK)),bakır 385-400 (W/(mK)) aralıklarında olduğu

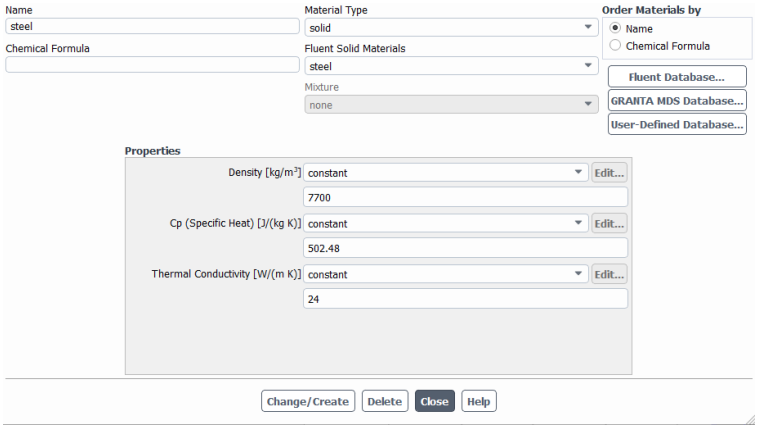
tespit edilmiştir.Analiz sonucunda validasyon analizleriyle değerlendirildiğinde uygun değerleri saptamak hata paylarını tespit etmek için minitabte çalışılacaktır.Analizde girilen malzemelerin karakteristik özellikleri tüm fanlar için değerler aşağıda sırasıyla paylaşılmıştır.



Şekil 4.13 Alüminyum Malzeme Özellikleri



Şekil 4.14 Bakır Malzeme Özellikleri

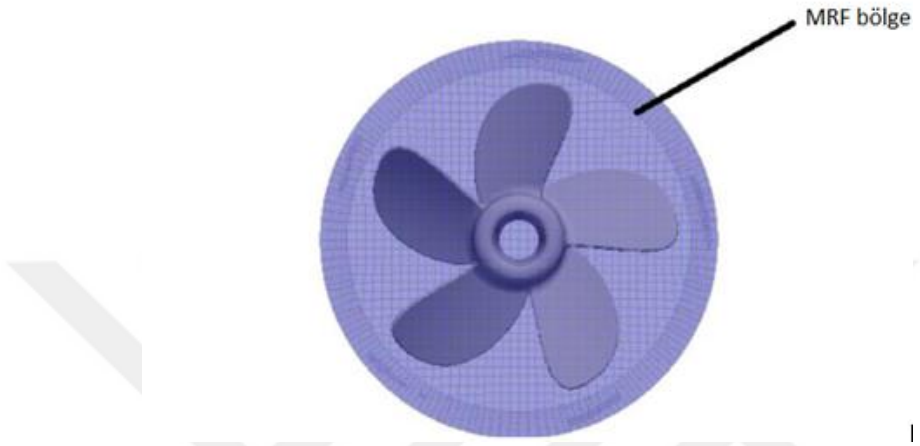


Şekil 4.15 Çelik Malzeme Özellikleri

Malzeme özellikleri tamamlanması ardından fan için MRF yaklaşımı kullanılarak fan dönme hızı sağlanmıştır.

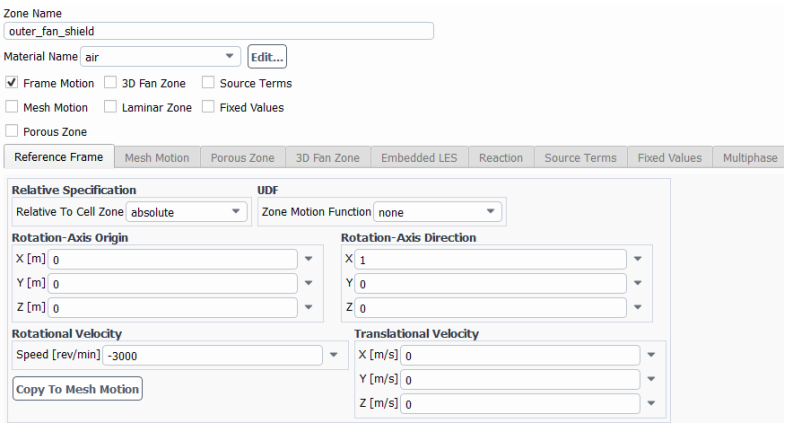
MRF Yaklaşımı

MRF Ağ oluşturma aşaması sırasında dönen gövdenin etrafında ince bir hacimsel bölgesi oluşturularak elde edilir ve buna MRF bölgesi denir.



Şekil 4.16 MRF Yaklaşımı

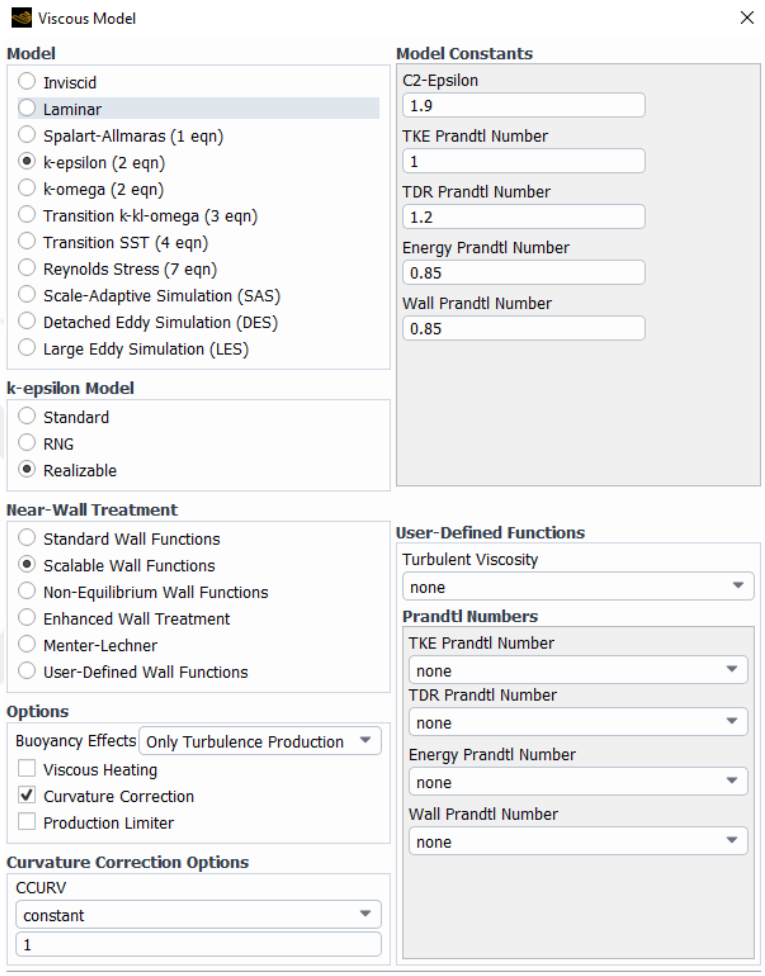
Simülasyon aşamasında MRF bölgesi cismin ekseni etrafında döndürülür ve cisim sabit tutulur.Coriolis kuvvetlerinin fan yüzeyinde üzerindeki yönünü korumak için MRF bölgesinde topun dönme hızı tersine çevrilir.



Şekil 4.17 Fan Dönüş Tanımlaması

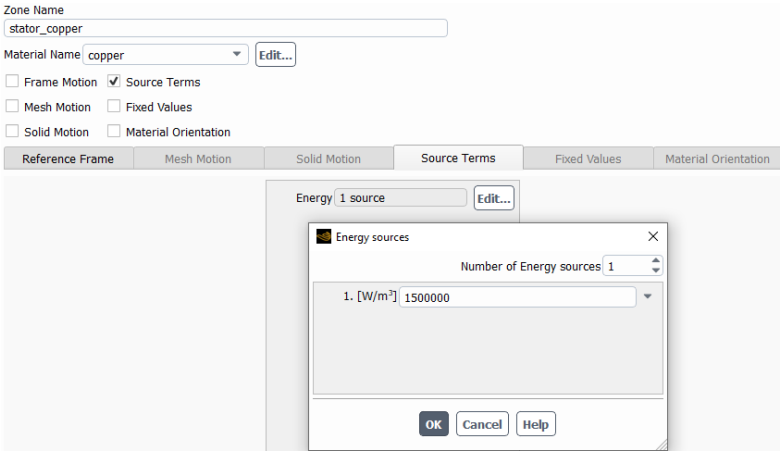
Analizde fan dış yüzeylerini kaplayacak hacimde mrf bölge yöntemi yapılmıştır.Yukarıda belirtilen şekilde fan dönüşü ve benzer yöntemle rotor dönüşü sağlanmıştır.

Elektrik motorunda fan kullanılması nedeniyle hava hızı kinematic viskoziteye bakıldığında türbülans oluşacaktır.Türbülans modelini simülasyona tanımlamak gerektiği için yapılan litaratür çalışmalarında da tespit edildiği üzere k-epsilon(2eqn) kullanılmıştır.Duvarlada yakınsama modelleri ve yakınsamaları aşağıda paylaşıldığı üzere tanımlanmıştır.



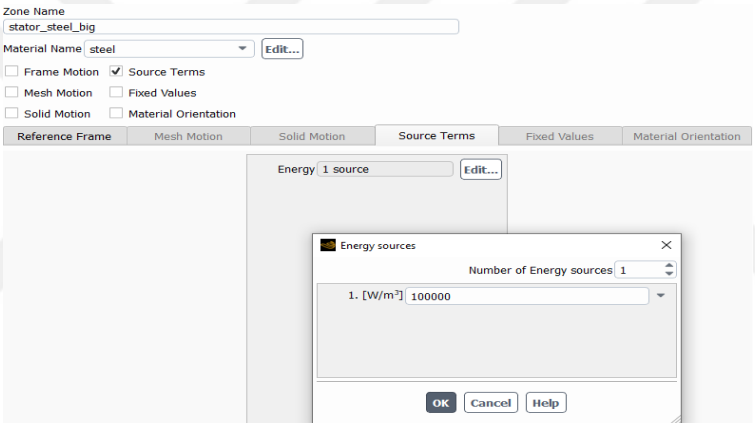
Şekil 4.18 Türbülans Modeli Tanımlaması

Motorun manyetik akım ve elektrik akımı vasıtasıyla ısı kaynağı olarak stator ve rotor görev almaktadır. firmanın kendi bünyesine test laboratuvarında ve özel test programıyla seçilen bir fanla testi yapılan motorun ısı kayıpları referans alınmış ve tüm analizlerde ortak olarak kullanılmıştır. Bu alınan değerler stator bakırları, stator laminasyon çeliği,rotor laminasyon çeliklerinin hacimleriyle oranlanarak ilişiklendirilmiştir.

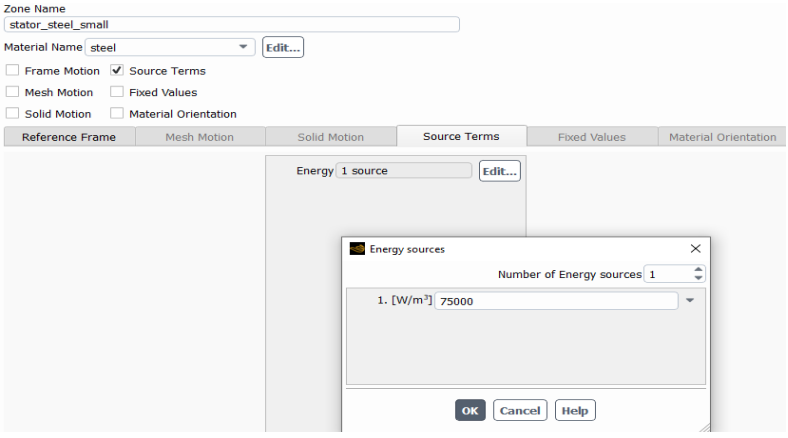


Şekil 4.19 Stator Bakır Isı Kaynak Değeri

Yukarıda stator bakırlarının üretmiş olduğu ısı miktarı girilmiştir.Aşağıda ise stator üst ve alt laminayon çeliği değerleri paylaşılmıştır.

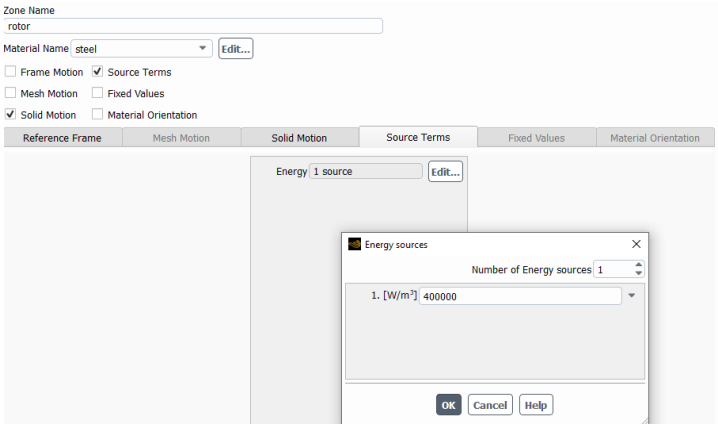


Şekil 4.20 Stator Üst Laminasyon Çeliği Isı Kaynak Değeri



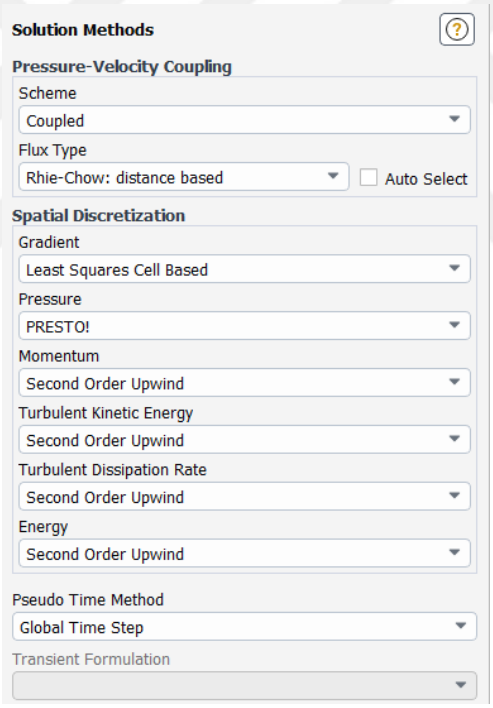
Şekil 4.21 Stator Alt Laminasyon Çeliği Isı Kaynak Değeri

Aşağıda görselde rotor ısı kaynakları tanımlanmıştır.



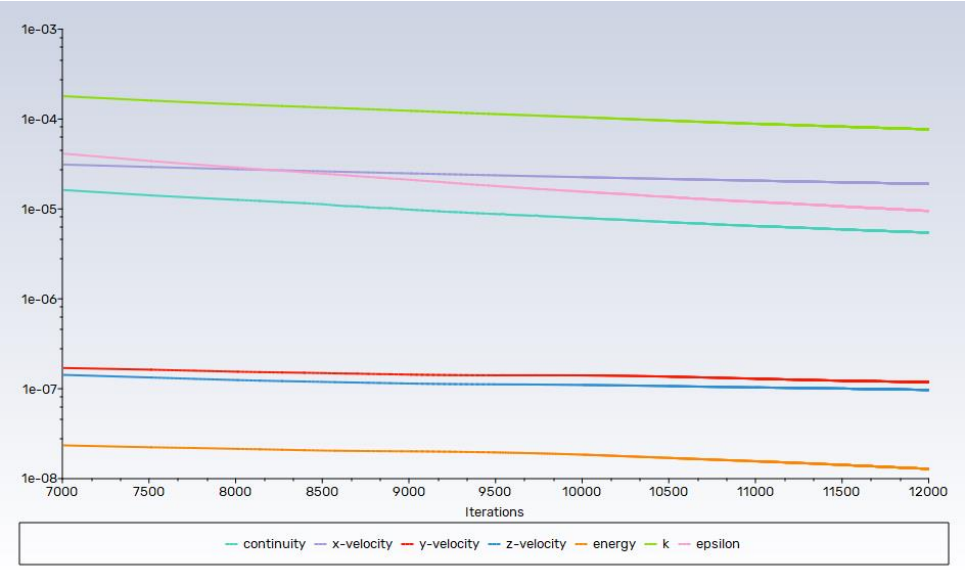
Şekil 4.22 Rotor Isı Kaynak Değeri

Isı kaynağı girdileri sonrası analiz çözüm metodu tanımlanmıştır.Basınç için bu analizde Presto metodu seçilirken diğer yakınsamalarda ikincil tercih edilmiştir.



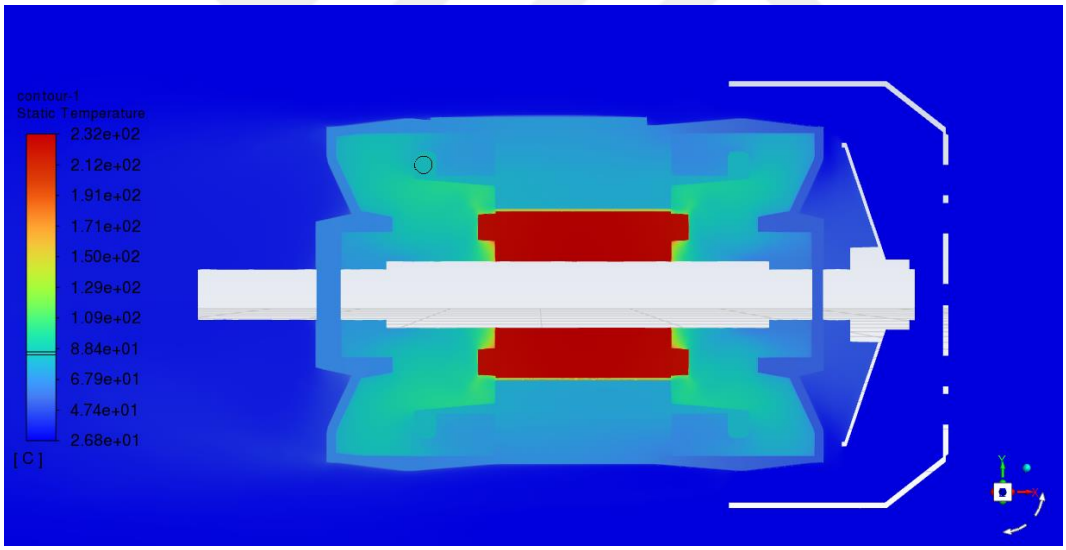
Şekil 4.23 Çözüm Metodu Girdileri

Analize ait çözücü metotları ve girdiler sonrasında çözümleme başlatılmıştır.Yakınsama eğrileri takip edilerek sağlıklı sonuç alınması kontrol edilmiştir.



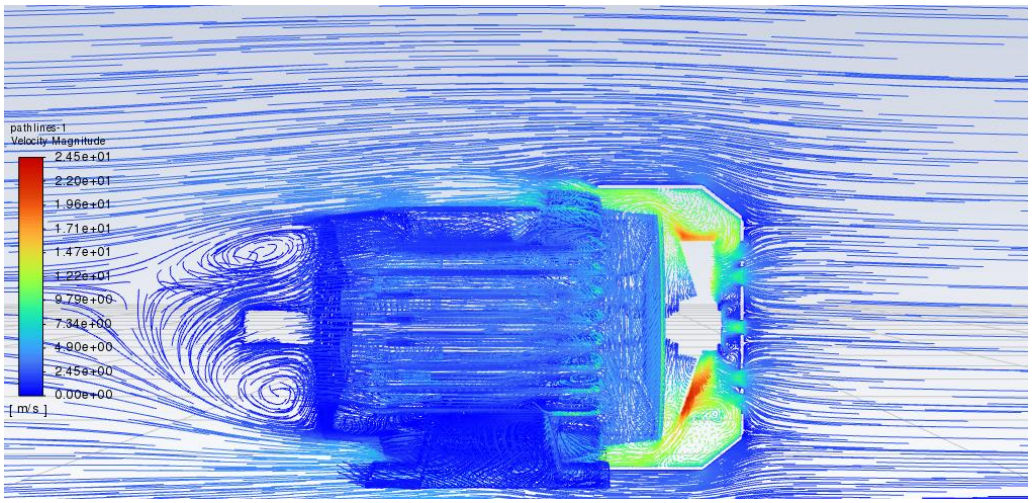
Şekil 4.24 Yakınsama Eğrileri

Çözüm sonunda maksimum değer 10^-3 olacak şekilde 12000 iterasyon koşulmuştur.



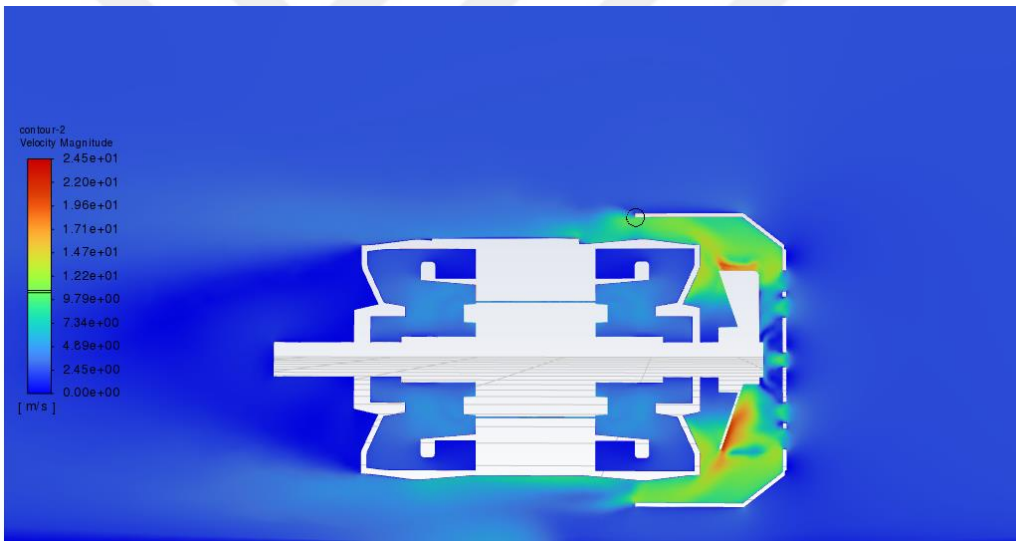
Şekil 4.25 Stator Sargı Sıcaklığı CFD Analiz Sonucu

Analiz sonuçları incelenirken stator sargı başları sıcaklıkları baz alınmıştır.Rotor sıcaklığı statora göre daha sıcak olduğu görülmektedir.Günlük hayattada motor çalıştığında stator sıcaklığı kaynaklı izolasyonun zarar görerek şase yapması ve motorun çalışamaz duruma gelebilme ihtiamali çok yüksek olduğu için stator ön sargı başı referans alınmıştır.



Şekil 4.26 XY Kesiti Akış Çizgileri

Analiz sonuçlarıyla havanın akış çizgileri türbülans olan bölgeleri ve akış sürekliliğini tespit edilebilmektedir.



Şekil 4.27 XY Kesiti Akış Hızı Sonucu

Tas orifisi kesit alanları tüm analizlerde sabit tutulduğu için fanlara göre akışın tasa giriş hızları ve tastan çıkış hızları değişkenlik göstermektedir.Fan çapı ve kanat adedi değişimi akış hızı üzerinde etkisinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

4.2.1 Regresyon Analizi

Ansyste kaç farklı analiz yapılması gerektiği ve fan modelleri ile ilgili hususlar minitab programında ile belirlendi. Fanın dış çapı, kanat sayısı ve kanat adedi

nicel değişkenler olarak alındı.Fan koruyusu tasın boyutlarına bağlı olarak izin verilen maksimum minimum kalınlık, çap, adet sayıları tanımlandı.

	KALINLIK	CAP	KANAT
1	25	90,0	5
2	25	135,0	15
3	20	135,0	10
4	20	90,0	10
5	30	112,5	15
6	25	112,5	10
7	25	112,5	10
8	30	135,0	10
9	30	90,0	10
10	25	135,0	5
11	30	112,5	5
12	25	112,5	10
13	20	112,5	15
14	20	112,5	5
15	25	90,0	15

Şekil 4.28 Regresyon Analizi Nicel Değişkenler

Aşağıdaki tabloda 15 farklı fanın ANSYS Fluent programında analizleri tamamlanarak sonuçları tabloda verilmiştir.

Tablo 4.1 Fanların Ansys Fluent Analiz Sonuçları

FAN	KALINLIK(mm)	ÇAP(mm)	KANAT(Adet)	SONUÇLAR(°C)
1	30	90	10	87,838
2	25	135	5	82,579
3	20	112,5	5	91,677
4	30	135	10	76,3755
5	20	90	10	91,007
6	25	112,5	10	79,476
7	25	135	15	75,933
8	25	112,5	10	79,476
9	25	112,5	10	79,476
10	20	112,5	15	79,387
11	25	90	15	87,676
12	30	112,5	5	85,351
13	25	90	5	97,9545
14	20	135	10	79,41
15	30	112,5	15	78,645

Ansys sonuçları sıcaklık değerleri minitab programına tanımlanarak reglasyon denklemi elde edilmiştir.Buna bağlı olarak fan optimizasyonu yapılabilecektir. Görselde regresyon analizi sonucuna ait çıktılar paylaşılmıştır.

Response Surface Regression: SONUC versus KALINLIK; CAP; KANAT

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	79,476	0,423	187,73	0,000	
KALINLIK	-1,659	0,259	-6,40	0,001	1,00
CAP	-6,272	0,259	-24,19	0,000	1,00
KANAT	-4,490	0,259	-17,32	0,000	1,00
KALINLIK*KALINLIK	0,956	0,382	2,50	0,054	1,01
CAP*CAP	3,226	0,382	8,45	0,000	1,01
KANAT*KANAT	3,334	0,382	8,74	0,000	1,01
KALINLIK*CAP	0,034	0,367	0,09	0,931	1,00
KALINLIK*KANAT	1,396	0,367	3,81	0,013	1,00
CAP*KANAT	0,908	0,367	2,48	0,056	1,00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,733264	99,54%	98,72%	92,67%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	583,795	64,866	120,64	0,000
Linear	3	498,028	166,009	308,75	0,000
KALINLIK	1	22,018	22,018	40,95	0,001
CAP	1	314,729	314,729	585,35	0,000
KANAT	1	161,281	161,281	299,96	0,000
Square	3	74,669	24,890	46,29	0,000
KALINLIK*KALINLIK	1	3,371	3,371	6,27	0,054
CAP*CAP	1	38,426	38,426	71,47	0,000
KANAT*KANAT	1	41,030	41,030	76,31	0,000
2-Way Interaction	3	11,098	3,699	6,88	0,032
KALINLIK*CAP	1	0,004	0,004	0,01	0,931
KALINLIK*KANAT	1	7,795	7,795	14,50	0,013
CAP*KANAT	1	3,298	3,298	6,13	0,056
Error	5	2,688	0,538		
Lack-of-Fit	3	2,688	0,896	*	*
Pure Error	2	0,000	0,000		
Total	14	586,483			

Şekil 4.29 Regresyon Analiz Sonucu

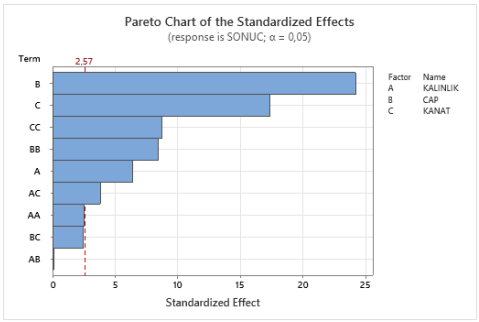
Regression Equation in Uncoded Units

SONUC = 269,9 - 2,835 KALINLIK - 1,801 CAP - 5,869 KANAT + 0,0382 KALINLIK*KALINLIK + 0,006372 CAP*CAP + 0,1333 KANAT*KANAT + 0,00030 KALINLIK*CAP + 0,0558 KALINLIK*KANAT + 0,00807 CAP*KANAT

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	SONUC	Fit	Resid	Std Resid	
10	82,579	83,345	-0,766	-2,09	R
15	87,676	86,910	0,766	2,09	R

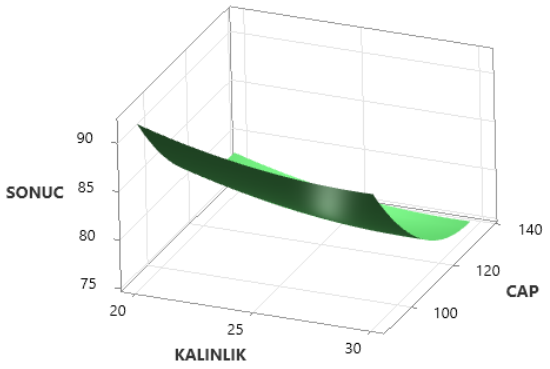
R Large residual



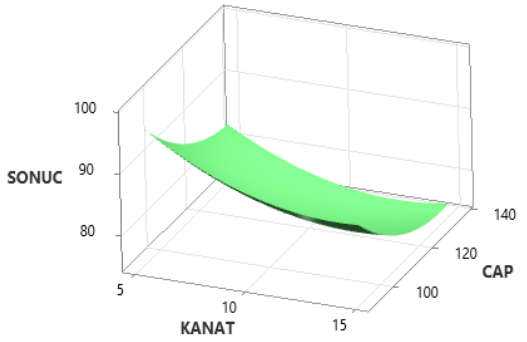
Şekil 4.30 Regresyon Analiz Denklemi

Reglasyon analizine ait denklem elde edilmiştir. Bu dekleme göre talep ettiğimiz sargı sıcaklığına uygun fan değerlerine ulaşabileceğiz. Denklem aşağıda paylaşılmıştır.

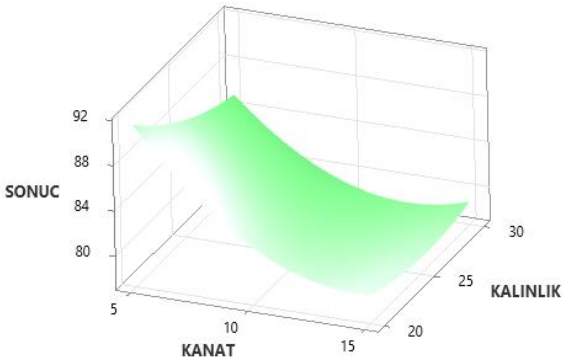
Sonuç:269,9- 2,835 Kalınlık- 1,801 Cap- 5,869 Kanat +0,0382 Kalınlık *Kalınlık + 0,006372 Cap*Cap+ 0,1333 Kanat*Kanat+ 0,00030 Kalınlık*Cap+ 0,0558 Kalınlık*Kanat+ 0,00807 Cap *Kanat



Şekil 4.31 Çap Ve Kalınlığın Sıcaklığa Etkisi



Şekil 4.32 Kanat Sayısı Ve Çapın Sıcaklığa Etkisi

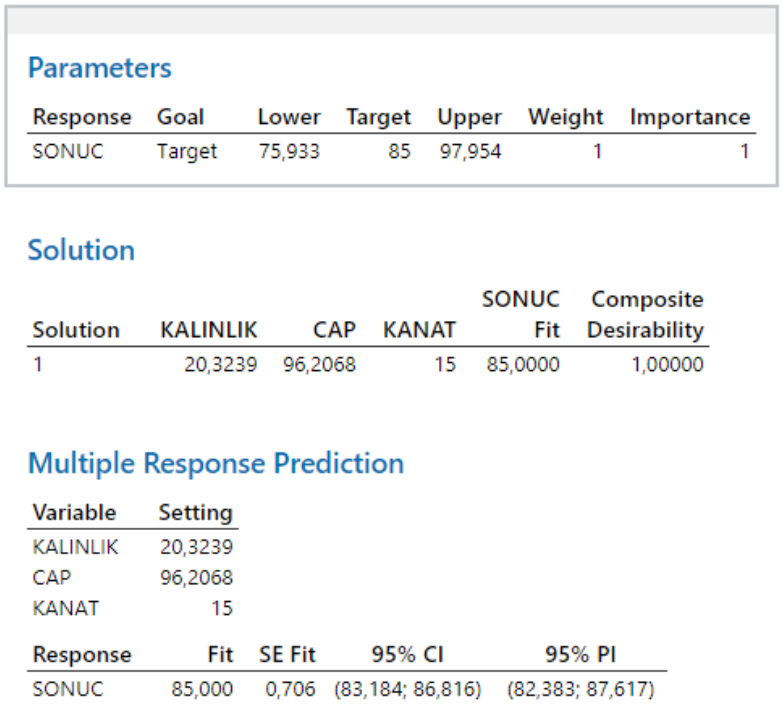


Şekil 4.33 Kanat Sayısı Ve Kalınlığın Sıcaklığa Etkisi

Nicel değişkenlerin sıcaklığa olan etkisi değerlendirildiğinde kanat adedi ve fan dış çapının etkisi oldukça fazla olurken kanat kalınlığının etkisi diğer iki değişkene kıyasla oldukça az olduğu tespit edilmiştir.

Optimize Fan

Minitab programından elde edilen denklemle sargıda istenilen sıcaklık değerine göre optimize edilmiş fan kanat sayısı ,çap ve kanat genişliği elde edilebilmektedir.Ortam sıcaklığı 26,85°C olduğu baz alınarak sargı sıcaklığı 85°C olması istenmiştir, buna göre yaklaşık olarak dış çapı 96,2mm ,genişlik 20,3mm, kanat adedi 15 olarak bulunmuştur.



Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
SONUC	Target	75,933	85	97,954	1	1

Solution

Solution	KALINLIK	CAP	KANAT	SONUC Fit	Composite Desirability
1	20,3239	96,2068	15	85,0000	1,00000

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
KALINLIK	20,3239
CAP	96,2068
KANAT	15

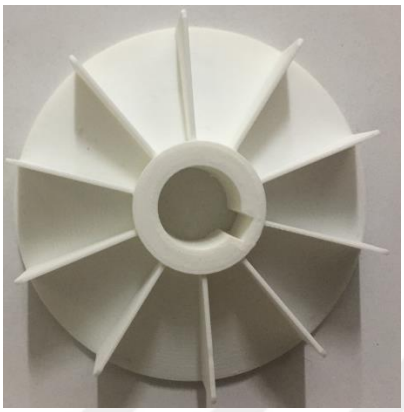
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
SONUC	85,000	0,706	(83,184; 86,816)	(82,383; 87,617)

Şekil 4.34 Optimize Fan Minitab Değerleri

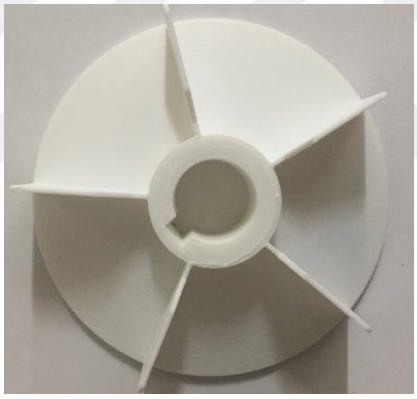
Bulunan değerlerle CAD model hazırlanarak Ansys CFD analiz çalışması yapılmıştır.Analiz sonucunda sargı sıcaklığı değeri yaklaşık olarak okunan değer 84,65 °C'dir.

4.3 Validasyon Testleri

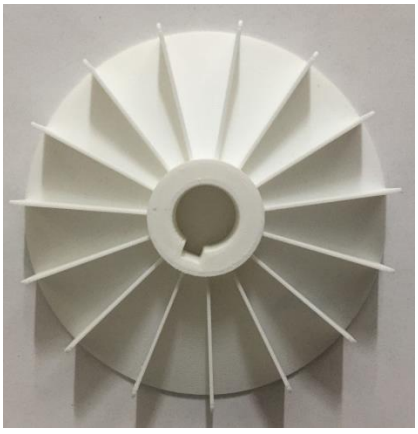
Solidworks, Minitab ve Ansys programları kullanılarak elde edilen sıcaklık değerlerinin doğruluğunu tespit etmek adına seçilen üç adet fanı 3D yazıcıda basarak motor testi yapılmıştır.



Şekil 4.35 5 Numaralı Fan



Şekil 4.36 12 Numaralı Fan



Şekil 4.37 Optimize Fan

5,12 numaralı ve optimize fan seçilmiştir.Ve ölçülerinde 3D yazıcıda basılmıştır.

Aşağıdaki tabloda analizi validasyon testleri yapılan fanların bilgileri verilmiştir.

Tablo 4.2 Validasyon Testi Yapılan Fanlar

FAN	Kalınlık	Çap	Kanat	Analiz Sonuç Sıcaklık(°C)
5	20	90	10	91,007
12	30	112,5	5	85,351
Optimize	20	95	15	84,65

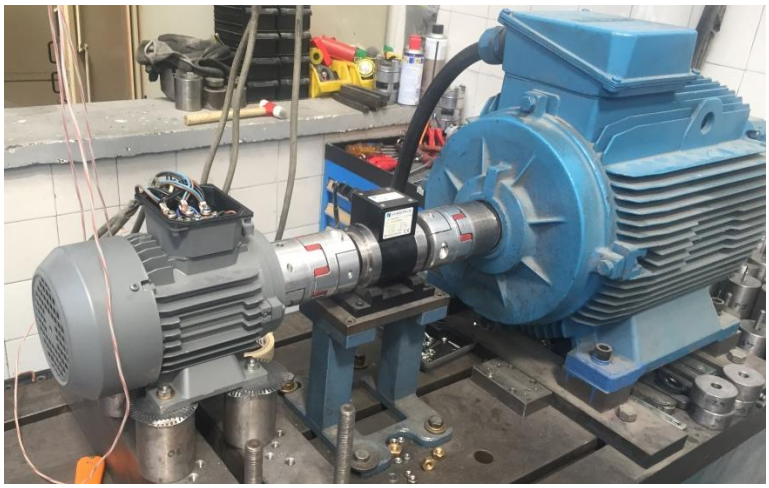
Validasyon testleri Gamak Makina A.Ş bünyesinde test laboraturvarında tam yükte gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.38 AGM2E 80 M2b Test Motoru



Şekil 4.39 Optimize Fanlı Motor



Şekil 4.40 Yükte Test Aşaması

Yukarıki görselde görüldüğü üzere 3 fanda aynı motora montajlanarak testleri tamamlanmıştır.Sargıdaki sıcaklık değeri motor rejime oturduğunda firmanın kendi bünyesindeki test programından akım,direnç değişimlerinden faydalanılarak elde edilmektedir.

Tablo 4.3 Validasyon Testi Sonuçları

FAN	Kalınlık	Çap	Kanat	Ansys Analiz Sonucu(°C)	Validasyon Test Sonucu(°C)	Fark(°C)
5	20	90	10	91,007	81,95	9,057
12	30	112,5	5	85,351	82,96	2,391
Optimize	20	95	15	84,65	80,15	4,5

Testler sonucunda sonuçların maksimum yaklaşık %10 sapmasının ardından sapmaları iyileştirmek adına ısı transferine en büyük etkisi olan malzemelerin iletkenlik katsayıları aralıkları için regresyon analizi yapılmıştır.

4.4 Malzeme Regresyon Analizi

Malzemelerin tdsleri incelendiğinde bu çalışmamızda teorik olarak değerlendirildiğinde en büyük etkinin iletkenlik katsayıları aralıkları olmuştur. Regresyon analizinde kullanılan malzemelerin optimum değerleri bulunması amaçlanmıştır.Bu kapsamda bakır,çelik ve alüminyum için iletkenlik katsayıları maksimum ve minimum dcğerleri alınarak minitab programında optimize fana göre regresyon analizi yapıldı.

Tablo 4.4 Malzemelerin İletkenlik Katsayıları

	Minimum (W/m.K)	Maksimum (W/m.K)
Cu	385	400
Al	110	130
St	23	37

Tedarik edilen bakırın,alüminyum ve çeliğin minimum maksimum iletkenlik katsayıları programa girilerek analiz opsiyonları bulunmuştur.

Tablo 4.5 Malzemelerin Regresyon Analiz Sonuçları

Simülasyon	**Cu**	**St**	**Al**	**Sıcaklık**
1	392,5	37	130	81,5705
2	385	23	120	85,2785
3	400	30	130	82,2065
4	400	30	110	82,353
5	385	37	120	81,6445
6	392,5	23	110	85,357
7	392,5	37	110	81,7155
8	392,5	30	120	82,28
9	385	30	110	84,307
10	400	37	120	81,632
11	392,5	30	120	82,28
12	392,5	23	130	85,2
13	400	23	120	85,2665
14	385	30	130	82,218
15	392,5	30	120	82,28

Malzeme regresyon denklemi aşağıda paylaşılmıştır.

Sonuç: 1178 - 4,43 Cu - 3,21 Al - 1,43 St + 0,00461 Cu*Cu + 0,00265 Al*Al + 0,01937 St*St+ 0,00647 Cu*Al - 0,00000 Cu*St + 0,00004 Al*St

Yapılan analizler sonucu regresyon analizinde alınmak istenen validasyon testi değerine göre optimize değerler elde edilmiştir.

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
Cu	389,091
Al	130
St	36,7172

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
sonuç	81,273	0,385	(80,284; 82,262)	(79,783; 82,763)

Şekil 4.41 Optimizasyon Sonucu Malzeme Değerleri

Elde edilen değerlerle yeniden simülasyonlar yapılarak sonuçlar elde edildi.

Tablo 4.6 Optimize Malzemelerle Analiz Sonuçları

FAN	Kalınlık	Çap	Kanat	İlk Ansys Analiz Sonucu (°C)	Validasyon Test Sonucu (°C)	İlk Fark (°C)	Malzeme Optimizasyon Ansys Sonucu (°C)	Son Fark (°C)
5	20	90	10	91,007	81,95	9,057	86,927	4,977
12	30	113	5	85,351	82,96	2,391	81,15	1,7
Optimize	20	95	15	84,65	80,15	4,5	80,6	0,4

Yukarıda ki tabloda belirtildiği üzere ilk yapılan simülasyon ve optimize malzemeli simülasyon sonuçları kıyaslandığında validasyon test sonucuna göre olan sapma miktarında azalmalar olduğu sonuçlardaki iyileşmeler tespit edildi.

4.5 Fan Malzemesi Açıklaması

Mevcutta kullanılan motorda kullanılan fanın malzemesi PA6 kullanılmaktadır. Testler için üç boyutlu yazıcıda basılan fanlarda PLA malzeme kullanılmıştır.

PLA malzeme seri üretimde kullanılması uygun olmadığı için prototip denemelerinde ağırlıklı olarak kullanılmaktadır.PA6 plastik ile kıyaslandığında yüzey kalitesi kötü olmasından kaynaklı sürtünme değerleri yüksek çıkmaktadır.Seri üretimde malzeme değişikliğine gidildiğinde değerlerde farklılıklar oluşabilieceği göz önünde bulundurulmalıdır.

5
SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada elektrik motoru radyal fanın hedeflenen stator sargı sıcaklığına uygun optimize fan değerleri elde edilebilen bir sistem oluşturulmuştur.Bu çalışmada minitab programından regresyon analizleri,Ansys Fluent ve 3D printerda basılan fanlarla validasyon testleri ilişiklendirilerek çalışma tamamlanmıştır.Fanın kanat adedi ve fan dış çapı fan kalınlığına kıyasla soğutmada daha fazla etkin olduğu tespit edilmiştir.

AGM 80 M2b motorunun sargı sıcaklığını 85 °C tutulması hedeflenmiştir, bu değere uygun optimize fan dış çap 96mm, kanat adedi 15 ve kanat genişliği 20mm bulunmuştur.

Malzemenin bu çalışmayla ilişkili olan termal özellik aralıklarının sonuçlara doğrudan etkili olduğu,malzemeler içinde regresyon analizi yapılması gerektiği saptanmıştır.Yapılan malzeme optimizasyonu sonucu analiz sonuçları hata oranlarında %10'dan, %6'ya iyileşmeler olmuştur.

Motorun fan haricinde fan muhafaza tası,gövde başta olmak üzere diğer komponentlerinde değiştirilmesiyle soğutulmasında etki ve iyileştirmeler olabilecektir.Radyal fan yerine fan tipleri ya da form değişikliği yapılarak soğutma performansına etki edilebilmektedir.

Validasyon testleri için 3D printerde hazırlanan PLA malzeme fanlar,seri üretim PA6 malzeme fanları ile kıyaslanmamalıdır.Bu çalışmada amaç fan değişkenlerinin soğutmaya olan etkisi ve çalışmanın doğruluğunu tespit etmek olmuştur.PA6 malzeme ile aynı çalışma yapıldığında aynı sonuçların elde edileceği garanti edilmemektedir.

KAYNAKÇA

[1] E. Galloni, P. Parisi, F. Marignetti, G. Volpe "CFD analyses of a radial fan for electric motor cooling,''Thermal Science and Engineering Progress,470-476, 2018.

[2] Jerzy Madej, Bartłomiej Będkowski, "Air flow analysis for electrical motor's cooling system with Autodesk simulation CFD 2013 program,''Article in Acta Mechanica et Automatica, December 2013

[3] Jae-Min Park, Man-Woong Heo, Kwang-Yong Kim, Hyeon-Seok Shim , Jang -Un Choi, Joon-Yeob Lee , "Aerodynamic Characteristics Of A Cooling Fan In A Low-Voltage Electric Motor,'' Conference paper,December 2013

[4] Michele Roffi, Fernando J. T. E. Ferreira, "Comparison of Different Cooling Fan Designs for Electric Motors, '' Conference paper, May 2017

[5] Takafumi Nakahama, Debasish Biswas, Koichiro Kawano,Fuminori Ishibashi "Improved Cooling Performance of Large Motors Using Fans,'' in IEEE Transactions on Energy Conversion, July 2006

[6] S. Rama Krishna, A. Rama Krishna, K. Ramji, "Reduction of motor fan noise using CFD and CAA simulations, '' Applied Acoustics, 13 July 2011

[7] Chungman Jang, Jongin Lee, Minkyu Sung, Joonyeob Lee,"Optimal Design of Cooling Fan for 200kW Class Low Voltage Motor by Numerical Analysis, '' 2019

[8] S. Y. Goh, A. S. Fawzal, K. N. Gyftakis,A. J. M. Cardoso, "Impact of the Fan Design and Rotational Direction on the Thermal Characteristics of Induction Motors,'' 2018

[9] Chih-Chung Chang, Yu-Fu Kuo, Jung-Chang Wang, Sih-Li Chen,"Air cooling for a large-scale motor,''Applied Thermal Engineering, 2 March 2010

[10] Shuye Ding , Jianfeng Liu, Liying Zhang," Fan characteristics of the self-support components of rotor ends and its performance matching,'' International Journal of Heat and Mass Transfer, 23 January 2017

[11] Han-Chieh Chiu, Jer-Huan Jang, Wei-Mon Yan, Ruei-Bin Shiao," Thermal performance analysis of a 30 kW switched reluctance motor, '' International Journal of Heat and Mass Transfer, 20 June 2017

[12] M. K. Yoon, C. S. Jeon, S. Ken Kauh," Efficiency Increase Of An Induction Motor By Improving Cooling Performance, '' IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 17, No. 1, March 2002

[13] Aurel-Ionuţ Chirilă, Lucian Mândrea, Ioan-Dragoş Deaconu, Carmen Mateescu, Valentin Năvrăpescu," Fan Cowl's Orifices Type Analysis of Fan-Cooled Induction Motors, '' The 10th International Symposium On Advanced Topics In Electrical Engineering, March 2017

[14] Jae-Min Park, Man-Woong Heo, Kwang-Yong Kim," Effects of Inlet Vent Shape on Aerodynamic Performance of a Low-Voltage, '' Conference Paper, October 2015

[15] Seounghwan Hyeon, Chiwon Kim, Kwan-Soo Lee,“ Thermal enhancement of an air-cooled motor with a flow guide,’’ International Journal of Heat and Mass Transfer, 15 November 2021

[16] Chiwon Kim, Kwan-Soo Lee, Se-Jin Yook,“ Effect of air-gap fans on cooling of windings in a large-capacity, high-speed induction motor, ’’Applied Thermal Engineering, 3 March 2016

[17] Marek Gebauer, Tomáš Blejchar, Tomáš Brzobohatý, Tomáš Karásek, Miroslav Nevrela,“ Determination of Aerodynamic Losses of Electric Motors, ’’ M. Determination of Aerodynamic Losses of Electric Motors, Symmetry, 2022

[18] David A. Staton, Andrea Cavagnino,“ Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models, ’’ IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 55, No. 10, October 2008

[19] Frank P. Bleier, “Fan Handbook: Selection, Application and Design”1997

[20] Illiam Cory, “ Fans & Ventilation”2005

[21] Kıvanç Şevki Akköse, Biomimetik Fan Tasarımı(Y.Lisans Tezi),Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

[1] İ.TÜRKOĞLU, B.AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ, B.BOLAT ‘‘CFD VE REGRESYON ANALİZİ İLE ELEKTRİK MOTORU RADYAL FAN OPTİMİZASYONU’’11.Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi,s.197-202.