T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DALGIÇ POMPA MOTORUNUN FARKLI ÇALIŞMA KOŞULLARI ALTINDA TERMAL ANALİZİ

Bayram KAYA

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2019

Dr. Zeynel A.FIRATOĞLU danışmanlığında, Bayram KAYA'nın hazırladığı "**Dalgıç Pompa Motorunun Farklı Çalışma Koşulları Altında Termal Analizi** " konulu bu çalışma 10/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman :Dr. Öğr. Üyesi Zeynel A. FIRATOĞLU ……..….

Üye :Prof. Dr. Refet KARADAĞ …….…..….

Üye :Doç. Dr. İsmail HİLALİ ……..

Bu Tezin Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Doç. Dr. İsmail HİLALİ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET ii
ABSTRACT iii
TEŞEKKÜR iv
ŞEKİLLER TABLOSU v
ÇİZELGELER TABLOSU vii
SİMGELER ve KISATMALAR DİZİNİ viii
1. GİRİŞ 1
1.1. Tezin Önemi ve Amacı 1
1.2.Tezin Kapsamı 3
1.3. Tezin Katkısı ve Getireceği Yenilikler 4
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 5
2.1. Önceki Çalışmaların Değerlendirilmesi 13
3. MATERYAL ve YÖNTEM 16
3.1. Dalgıç Motoru Tanımlayan Temel Büyüklükler 18
3.2. Deney Düzeneği 22
3.3. Deneysel Ölçümlerde Kullanılan Cihazlar 24
3.4. Nümerik Metodoloji 36
3.4.1. Katı model tasarımı 38
3.4.2. Türbülans model seçimi 42
3.4.3. Mesh tasarımı 43
3.4.4. Sınır şartları 49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 51
4.1. Deneysel Ölçümler 52
4.1.1. Dinamometre ölçümleri 52
4.1.2. Dalgıç asenkron motorunun yüzey sıcaklığının zamanla değişimi 59
4.2. Nümerik Hesaplamalar 66
4.2.1. Meshten bağımsız çözüm 66
4.2.2. Farklı devir sayıları için referans alınan motorun termal davranışı 68
4.2.3. Motor dış yüzeyinden 2 m/s hızında suyun dikey akışı durumunda motorun termal davranışı 78
4.2.4. Motor sıvısını devir daiminin motor termal davranışına etkisi. 81
5. SONUÇ ve ÖNERİLER 85
5.1. Sonuçlar ve Yenilikler 85
5.2. Öneriler 88
KAYNAKLAR 91
ÖZGEÇMİŞ 93
EKLER 94
Ek 1. Seçilen endüstriyel tip dalgıç asenkron motorun test raporu 94
Ek 2. Seçilen endüstriyel tip dalgıç asenkron motorun tüm test verileri 95

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DALGIÇ POMPA MOTORUNUN FARKLI ÇALIŞMA KOŞULLARI ALTINDA TERMAL ANALİZİ

Bayram KAYA

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Zeynel A. FIRATOĞLU
Yıl : 2019, Sayfa : 95

Yeraltı sularını yüzeye çıkarmanın ana araçları olan dalgıç pompalar tarımsal sulamada, petrol endüstrisinde, jeotermal alanlarda ve benzeri uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çoğu uygulamada, özellikle de tarımsal sulamada, dalgıç pompalar işletme sürecinin ana enerji girdileridir. Dalgıç pompalar metrelerce yer altında çalıştıklarında bakım veya arıza durumunda sisteme yönelik müdahalede çok büyük zorluklar söz konusudur. Tez çalışmasının önerilme aşamasında konu ile ilgili faaliyet gösteren firmalar ile yapılan görüşmelerde, dalgıç pompalarda motor ömrünün pompa ömrüne nazaran çok daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Firmalar bir dalgıç pompanın ömrünü yaklaşık olarak motor ömrünün 5 katı olduğunu belirtilmişledir. Buna dair ulusal veya uluslararası herhangi bir istatiksel veriye ulaşılmamasına rağmen ilgili firmaların dalgıç motor ve pompa satış verilerinden çıkarılmıştır. Bir dalgıç motorunun ömrünü belirleyen ana parametre motorun çalışma esnasında termal performansıdır. Motorlardaki termal performans ölçütü; kayıplar sonucu üretilen ısının gövdeden uzaklaştırma hızıdır. Bu nedenle termal performansı artırmaya yönelik yöntemler geliştirilebilmesi için motor iç yapısı ve çalışma ortamını birlikte değerlendirilmesi gerekir. Bu tez çalışmasında dalgıç bir asenkron motorun termal davranışı farklı çalışma koşullarında deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Çoğu kez eş zamanlı yürütülen deneysel ölçüm ve nümerik hesaplamalarda, motorun iç yapısındaki akış alanın ısı ve akış karakteristikleri tanımlandı ve alternatif bir soğutma sistemi geliştirilmiştir. Deneysel ölçümlerde, motor sıvısının ve motor yüzeyinden 9 noktadan sıcaklık ölçümlerine eş zamanlı motorun devri, torku, mil gücü, aktif güç, akım ve motor verimi ölçülmüştür. Yapılan ölçümler ile referans alınan motorun termal davranışının motor performansına etkisi tanımlanmıştır. Tez çalışması sürecinde yürütülen nümerik çalışmalar ile (i) üç farklı devir sayısı, (ii) kuyu ortamında motor yüzeyinde dikey yönde akış hızı ve (iii) motor sıvısının devir daiminin motor termal davranışına etkileri araştırılmıştır. Yürütülen deneysel çalışmalarında motor termal davranışının motor performans verileri üzerinde dramatik bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen deneysel ölçümler çerçevesinde tanımlanan hesaplama alanlarında yürütülen CFD simülasyonlarında, iki temel sonuca varılmıştır; (1) motor devrinin motor termal davranışı üzerinde çok kısıtlı bir etkisinin olduğu ve (2) endüstride yaygın olarak kullanılan su ceketi yöntemi yerine motor sıvısının devir daimî yönteminin motor termal davranışı üzerinde etkilerinin belirgin bir şekilde daha uygun olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Dalgıç asenkron elektrik motoru, CFD simülasyonları, deneysel ölçümler, termal analiz, dalgıç elektrik motoru performans verileri.

ABSTRACT

MasterThesis

EFFECT OF GEOMETRICAL PARAMETERS of THE IMPELLER-DIFFUSER on SUBMERSIBLE PUMP PERFORMANCE

Bayram KAYA

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Zeynel A. FIRATOĞLU
Year: 2019, Page : 95

Submersible pumps, which are the main means of removing groundwater to the surface, are widely used in agricultural irrigation, oil industry, geothermal fields and similar applications. In most applications, especially in agricultural irrigation, submersible pumps are the main energy inputs of the operation process. When submersible pumps work in underground meters, there are major difficulties in system intervention in case of maintenance or failure. At the stage of the thesis study, it was understood that the motor life in submersible pumps was much lower than the pump life in the interviews with the firms operating in the subject. Companies have stated that the life of a submersible pump is approximately 5 times the motor life. Although no national or international statistical data has been reached regarding this, the submersible motor and pump sales data of the related companies have been removed. The main parameter that determines the life of a submersible motor is its thermal performance during operation. The thermal performance criterion in motors is the speed at which the heat generated by the losses is removed from the body. Therefore, it is necessary to evaluate the internal structure and working environment together in order to develop methods for increasing thermal performance. In this thesis, thermal behavior of a submersible asynchronous motor is investigated experimentally and numerically under different operating conditions. In the experimental measurements and numerical calculations, which were carried out frequently, the heat and flow characteristics of the flow area in the internal structure of the motor were defined and an alternative cooling system was developed. In the experimental measurements, the motor speed, torque, spindle power, active power, current and motor efficiency were measured simultaneously from the point of temperature measurements of motor fluid and motor surface. The effects of the thermal behavior of the motor, taken as reference, on the motor performance are defined. In the numerical studies carried out during the thesis study, (i) three different speeds, (ii) vertical flow velocity on the motor surface in the well environment and (iii) the effects of motor fluid circulation were investigated on motor thermal behavior. In the experimental studies carried out, it was found that motor thermal behavior had a dramatic effect on the motor performance data. In the CFD simulations carried out in the calculation areas defined within the framework of the experimental measurements, two main conclusions were reached; (1) the motor speed has a very limited effect on motor thermal behavior; and (2) the effects of the circulating method of the motor fluid on the motor thermal behavior are significantly more suitable than the water jacket method commonly used in the industry.

KEY WORDS: Submersible asynchronous electric motor, CFD simulations, experimental measurements, thermal analysis, submersible electric motor performance data.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesi esnasında bilgisi ve tecrübesi ile desteğini her zaman yanımda hissettiğim değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Zeynel A. FIRATOĞLU'na çalışmalarımın yürütülmesi süresince bana sağladığı maddi ve manevi destek için Fırat Motor Pompa Ltd. Şti.'ne, Ömer SİNGAN'a ve beraber çalıştığım bütün çalışma arkadaşlarıma, çalışmam sürecinde maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve arkadaşım Vedat ÇIPLAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Dalgıç asenkron elektrik motorun genel yapısı 7
Şekil 2.2. Kuyuya dikey olarak yerleştirilen motor-pompa ve soğutma ceketi uygulaması (Groundfos Mühendislik el kitabı). 9
Şekil 3.1. 6" 30 HP Dalgıç asenkron motoru a. 3D model, b. 2D model görüntüsü. 17
Şekil 3.2. Asenkron motorların eşdeğer devresi 21
Şekil 3.3. Motorun hız-moment grafiği 22
Şekil 3.4. Deney düzeneğinin fotoğrafı. 23
Şekil 3.5. Deney düzeneğinin 3D model çizimi 24
Şekil 3.6. PT 100 Isı Sensörü ve motora bağlanma şekli 25
Şekil 3.7. Ölçümlerde kullanılan basınç transmitterinin deney düzeneğine bağlanma şekli 25
Şekil 3.8. Ölçümlerde kullanılan datalogger 26
Şekil 3.9. Ölçümlerde kullanılan termokupl çiftlerinin deney düzeneğine bağlanma şekli 27
Şekil 3.10. Motor üzerinde bulunan basınç ayar çekvalfı 27
Şekil 3.11. Test esnasında kullanılan termal kamera ve yapılan ölçümler 28
Şekil 3.12. Test sisteminde kullanılan tork sensörünün görünümü 30
Şekil 3.13. Tork sensörünün 2D boyutlu gösterimi 30
Şekil 3.14. Test sisteminde kullanılan elektro manyetik frenin görünümü 31
Şekil 3.15. Test sisteminde kullanılan elektro manyetik frenin solidworks çizimi 32
Şekil 3.16. Test sisteminde kullanılan elektro manyetik frenin 2D görünümü 32
Şekil 3.17. Deney düzeneğinde kullanılan elektrik analizörünün ekran ara yüzü 33
Şekil 3.18. Deney düzeneğinde kullanılan analog ampermetre 34
Şekil 3.19. Geliştirilen kontrol ünitesi. 35
Şekil 3.20. Verilerin okunması için geliştirilen ara yüzün ekran görüntüsü 36
Şekil 3.21. referans seçilen 6 inç 30 HP motor bileşenleri 40
Şekil 3.22. Referans seçilen 6 inç 30 HP motor bileşenlerin katı modelleri 41
Şekil 3.23. Referans seçilen 6 inç 30 HP motor bileşenleri montajı 42
Şekil 3.24. Dalgıç motorun üst kısmının mesh tasarımı 45
Şekil 3.25. Dalgıç motorun orta kısmının mesh tasarımı 46
Şekil 3.26. Dalgıç motorun alt kısmının mesh tasarımı 47
Şekil 3.27. Kuyunun mesh tasarımı 48
Şekil 4.1. DASM çektiği akımın zamana bağlı değişimi 53
Şekil 4.2. DASM çektiği akımın mil gücü üzerindeki etkisi 53
Şekil 4.3. DASM motor sıvı sıcaklığının zaman ile değişimi 54
Şekil 4.4. DASM ürettiği aktif gücün motor sıcaklığı ile değişimi 55
Şekil 4.5. DASM ürettiği tork gücün motor sıcaklığı ile değişimi 56
Şekil 4.6. DASM devrinin motor sıcaklığı ile değişimi 57
Şekil 4.7. DASM mil gücünün motor sıcaklığı ile arasındaki değişimi 58
Şekil 4.8. DASM'un iç basıncın zamana göre değişimi. 59
Şekil 4.9. DASM'nun belli zaman aralıklar ile a. Ölçülen yüzey sıcaklık ölçümleri ve b. termal çiftlerin motor üzerine yerleştirme konumları 61
Şekil 4.10. DASM'nun yüzeyindeki iki farklı noktadaki sıcaklık değişimi 62
Şekil 4.11. DASM'nun yüzeyindeki termokupllardan alınan sıcaklık verileri 63
Şekil 4.12. DASM'nun üretmiş olduğu ısı miktarı değişimi 65
Şekil 4.13. DASM'nun veriminin motor sıcaklığı ile değişimi 65
Şekil 4.14. Aynı kaşılar altında farklı üç mesh yapısı için yürütülen simülasyonların sıcaklık kontörleri 67
Şekil 4.15. DASM alt kısmındaki akış alanın duvar kısmındaki oluşturduğu y^+ değeri 68
Şekil 4.16. 2900 dev/dak açısal hızda hesaplama alanı boyunca ki sıcaklık (K) dağılımı 69
Şekil 4.17. 2900 dev/dak'da akış alanı boyunca ki basınç dağılımı ve akış çizgileri 70
Şekil 4.18. 2900 dev/dak açısal hızda Dikey eksen yönünde motor boyunca ki sıcaklık dağılımı ve akış çizgileri 71
Şekil 4.19. 2900 dev/dak açısal hızda üç dikey eksen boyunca oluşan sıcaklık dağılımları 72
Şekil 4.20. 2500 dev/dak açısal hızda hesaplama alanı boyunca ki sıcaklık (K) dağılımı 73
Şekil 4.21. 2500 dev/dak'da akış alanı boyunca ki basınç dağılımı ve akış çizgileri 74

Şekil 4.22. 2500 dev/dak açısal hızda Dikey eksen yönünde motor boyunca ki sıcaklık dağılımı ve akış çizgileri..... 74
Şekil 4.23. 2500 dev/dak açısal hızda üç dikey eksen yönünde boyunca ki sıcaklık dağılımları.... 75
Şekil 4.24. 2000 dev/dak açısal hızda hesaplama alanı boyunca ki sıcaklık (K) dağılımı 76
Şekil 4.25. 2000 dev/dak'da akış alanı boyunca ki basınç dağılımı ve akış çizgileri..... 76
Şekil 4.26. 2000 dev/dak açısal hızda üç dikey eksen yönünde boyunca ki sıcaklık dağılımları.... 77
Şekil 4.27. Farklı devir hızları için motorun üst kısmındaki akış alanında oluşan akış çizgileri..... 78
Şekil 4.28. Dikey yönde motor etrafında 2m/s hızındaki akış alanı sonucunda motor boyunca ki sıcaklık dağılımı..... 79
Şekil 4.29. Dikey yönde motor etrafında 2m/s hızındaki akış alanı sonucunda motor boyunca sıcaklık dağılımları..... 80
Şekil 4.30. Motor sıvısının devir daimi sonucunda motor boyunca ki sıcaklık dağılımı 82
Şekil 4.31. Motor sıvısının devir daimi sonucunda akış alanı boyunca ki basınç dağılımı ve akış çizgileri..... 83
Şekil 4.32. Motor sıvısını devir daimi sonucunda motor boyunca ki sıcaklık dağılımları 84

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. CFD simülasyonlarındaki yürütüldüğü koşullar. 18
Çizelge 3.2. Tez çalışmasında CFD simülasyonlarında sırasıyla izlenen süreçler. 39
Çizelge 3.3. Seçilen Türbülans model sabitleri. 43
Çizelge 3.4. Seçilen Türbülans model sabitleri 50
Çizelge 4.1. DASM yüzeyine yerleştirilen termokupların zamana göre sıcaklık verileri 60

SİMGELER ve KISATMALAR DİZİNİ

AC	Alternatif Akım
ASM	Asenkron Motorlar
c	Kullanılan sıvının öz ısısı
CFD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
cosØ	Güç faktörü
DASM	Dalgıç Asenkron Motorlar
DC	Doğru Akım
f	Statore uygulanan frenkas
g	Yerçekimi
HP	Beygir Gücü
I	Akım
I_{OA}	Motorun ortalama çektiği akım
m	Kütle
M	Moment karakteristiği
n_s	Senkron hızı
n_r	Rotor hızı
η	Motor verimi
P_{aktif}	Aktif güç
P_{mil}	Mil gücü
2p	Kutup sayısı
R	Direnç
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
TED	Türbülans enerji dağılımı
$T_ç$	Çevre sıcaklığı
T_{mil}	Milin torku
T_y	Yüzey sıcaklığı
V	Gerilim
V_1	Statora uygulanan gerilim
Z	Eşdeğer devrenin L tipindeki empedansı
W	Güç
ω	Açısal hız
Q	Öz ısı
Δt	İki nokta arasındaki sıcaklık farkı

1. GİRİŞ

1.1.Tezin Önemi ve Amacı

Günümüzdeki temel kabul elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren en etkili araçlar elektrikli motorlardır. Bu özeliğinden dolayı endüstrinin neredeyse her türlü uygulamasında karşılaşabilecek olan elektrik motorlar temelde alternatif ve doğru akım motorları şeklinde iki sınıfta değerlendirilebilir. Özellikle yüksek güç uygulamalarında; alternatif akım (AC) motorları doğru akım (DC) motorlarına nazaran ilk yatırım ve işletme maliyeti açısından sahip oldukları önemli derecedeki üstünlüklerinden dolayı çok daha yaygın bir şeklide kullanılmaktadırlar.

AC motorları temelde asenkron endüksiyon ve senkron motor olmak üzere iki temel kategoride sınıflandırılabilir. Asenkron motorlar, senkron motorlara nazaran düşük ilk yatırım-işletme maliyetleri, ark sorununun minimum derecede olması, 3.5 MW kadar çeşitli fazlarda imal edilebilmeleri, yüksek torklara çıkabilme esneklikleri ve devir sayılarının yüksek skalada değiştirilebilmesi şeklindeki üstünlükleri yanında imalat açısından yüksek düzeyde teknoloji gereksinimi duymamalarından dolayı, endüstriyel uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan motorlardır. Bu tez çalışmasında referans olarak geometrik açıdan asenkron motorun bir çeşidi olan endüstriyel tip bir dalgıç asenkron motoru (DASM) seçilmiştir.

Belli çaplarda açılmış derin kuyulardaki akışkanı yeryüzüne çıkaracak pompaların tahrikinde kullanılan dalgıç asenkron motorlar (DASM), yukarıda değinildiği üzere geometrik açıdan asenkron motorların özel bir tipi olup, söz konusu geometrik tasarımın sonucu olarak bazı temel farklılık göstermektedir. En belirgin fark motorun çapı açılan kuyunun boyutunu nedeniyle sınırlıdır. Bu nedenle yüksek güç gereksinimi ancak motorun boyu uzatılarak sağlanabilmektedir. DASM'larında diğer öne çıkan belirgin fark ise motor kuyudaki akışkana gömülü şekilde bir tasarıma sahip olduğundan motorun soğutulmasının kuyudaki akışkan vasıtasıyla sağlanmasıdır. Motor boyutunun kuyu çapının zorlaması sonucu uzatılmasından dolayı DASM'larda geleneksel asenkron motorlara nazaran stator ve rotor akım

yoğunlukları oldukça yüksektir. Bu nedenle DASM'ların stator sargılarının çok iyi yalıtılması gerektiğinden DASM'lerde vernikli tel yerine PVC izolasyonlu tel ve çift izole (P2+PA) tel kullanılmaktadır.

DASM'lerin geleneksel asenkron motorlara nazaran önceden de değinildiği üzere en büyük fark güç artırımlarda motor çapının sabit kalma zorunluğundan dolayı motor boyunu uzatılmasıdır. Motor boyunun çapa nazaran büyük olması motorda bulunan yataklamalar ve bobinlerin oyuklara yerleştirilmesi sorunlar çıkmasına neden olmaktadır. Bunun yanında tasarımdan dolayı hava aralığının büyük değerlerde olması, mıknatıslanma akımının daha büyük olması dolayısıyla güç faktörünün küçük olmasına neden olmaktadır. (Choudhury ve Azizur Rahman, (1992); Bilgin (2002)).

Yukarıda değinilen dalgıç asenkron motor özelliklerini ilaveten motor termal karakteristiğini belirleyen temel bir özellik motorun içyapısının su veya benzeri bir sıvı ile doldurulmasıdır. Bu özellik motorun hareketli bileşenlerin yağlanmasını sağladığı gibi oluşan ısının kuyu sıvısına aktarılmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla motor stator ve rotor olmak üzere iki temel bileşen yanında yatak mil gömleği, balans halkası, eksenel karbon yatak, radyal yatak v.b. birçok alt bileşenden meydana gelen DASM'un bileşenleri arasındaki termal etkileşimi motora doldurulan sıvı sağlamaktadır. Dolayısıyla bir DASM'un içindeki akış karakteristiklerinin motor termal performansı üzerinde direkt etkisi söz konusudur. Bu çerçevede tez çalışmasının ana odak noktası motor içerisindeki akış ve ısı karakteristiklerini saptamaktır. Söz konusu ana odak kapsamında ilk etapta Fırat Motor ve Pompa Elektrik San. Tic. Ltd. Şti tarafından üretilen 6 inç 30 HP DASM referans alınarak içerisinde bulunan soğutma sıvının sıcaklığının dalgıç asenkron motorunun gücüne, devir sayısına, ürettiği torka, aktif güce ve motor verimine olan etkisinin deneysel incelenmemiştir. Sonraki aşamada deneysel veriler referans alınarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonlarıyla akış ve ısı karakteristikleri araştırılmıştır.

1.2.Tezin Kapsamı

Bir elektrikli motordaki tüm güç kayıpları ısı enerjisine dönüşür. Örneğin 30 HP veya 22 kW gücünde bir motorun verimi %80 ise motor kayıplardan dolayı yaklaşık olarak 0.2*22=4.4 kW ısı üretir. Bu ısının motordan uzaklaştırılması hem motor performansı hem de motor ömrü açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle yüksek güç uygulamalarında motorun ürettiği ısı yeterince hızlı bir şeklide motordan uzaklaştırılmaz ise motor çok kısa sürede 130° kritik sıcaklığa yükselebilir (Egidi ve ark, (2012)). Bu sıcaklıkta motor servis dışı kalabilir veya içyapısı deformasyona uğrayabilir.

Özellikle termal açıdan motor performansında veya ömründe yaşanacak problemleri minimize etmenin tek yolu; motor konstrüksiyonundan motor tarafından üretilen ısıyı yeterince hızlı bir şeklide motordan uzaklaştıracak yeni tasarımların geliştirilmesidir. Bu da ancak ilk etapta motorun termal karakteristiklerinin tanımlanmasıyla mümkündür. Bir dalgıç motorda farklı termal özelliklere sahip malzemelerden meydana gelen motor bileşenleri arasında önceden de değinildiği üzere motor sıvısı bulunmaktadır. Söz konusu motor sıvısı rotorun kendi ekseni etrafında dönme hareketinden dolayı bir akış alanı söz konusudur. Söz konusu akış alanı da motor termal performansını doğrudan belirleyen temel parametredir. Bu tez çalışması endüstriyel bir dalgıç motor referans olmak üzere motor içyapısındaki ısı akış karakteristiklerini saptamayı hedeflemiştir. Bu çerçevede tez çalışması;

i. Referans alınan bir dalgıç motorun mekanik ve termal performansının deneysel ölçülmesi,

ii. Referans alının motorun katı modelinin tasarımı ve akış ve ısı transferini karakteristiklerinin tespiti yönünde CFD simülasyonlarının yürütülmesi,

iii. Referans alınan motorun için yürütülen CFD simülasyon sonuçlarının deneysel ölçümler ile doğrulanması,

iv. Farklı durumlar ve koşullar için motor termal karakteristiğini etkisi tespit etmeye yönelik CFD simülasyonların yürütülmesi,

şeklinde dört aşamada gerçekleşmiştir. Tez kapsamında yürütülen CFD simülasyonlarında belirlenen durum ve koşullar

a. Üç faklı devir sayısı
b. Kuyu ortamında motor yüzeyinde dikey yönde dört farklı akış hızı
c. Motor sıvısının üç farklı hızda devir dayımı

şeklindedir. Bu çerçevede toplam 5 CFD simülasyonu yürütülmüştür. Tez çalışması sürecinde çoğu zaman eş zamanlı yürütülen söz konusu dört aşama sonunda tipik bir dalgıç motorun içyapısındaki akış ve ısı karakteristikleri belirlenmiştir.

1.3.Tezin Katkısı ve Getireceği Yenilikler

Yeraltındaki su, petrol ve benzeri endüstrinin ihtiyaç duyduğu akışkanları yer üstüne çıkarmanın en kolay yöntemi dalgıç pompalardır. Dalgıç pompalar metrelerce yer altında çalıştıklarında bakım veya arıza durumunda sisteme yönelik müdahalede çok büyük zorluklar söz konusudur. Meydana gelebilecek sorunların, önceden de değinildiği üzere, kaynağı çoğunlukla dalgıç motorlardır. Söz konusu zorlukların minimize etmenin tek yolu optimal motor tasarımlarının gerçekleştirilmesidir. Optimal tasarım kriterlerinin belirlenmesi aşamasının en kritik adımlarından biri motor içyapısındaki akış ve ısı transferi karakteristiklerinin tespiti ve bu tespit çerçevesinde, termal performans açısından etkin bir tasarımın gerçekleştirilmesidir. Yapılan detaylı literatür taramasında söz konu karakteristikleri birlikte ele alan çalışma neredeyse bulunmamaktadır. Tez çalışmasının bir dalgıç motorun içyapısındaki hem akış hem de ısı transferi karakteristikleri birlikte araştırması, çalışmanın özgünlüğünü gösteren en önemli veridir. Bu özgünlük hem akademik açıdan hem de ilgili firmaların yeni tasarımların geliştirme süreçlerine önemli derece katkı sağlayacaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Tez çalışmasının önerilme aşamasında konu ile ilgili faaliyet gösteren firmalar ile yapılan görüşmelerde, dalgıç pompalarda motor ömrünün pompa ömrüne nazaran çok daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Firmalar bir dalgıç pompanın ömrünü yaklaşık olarak motor ömrünün 5 katı olduğunu belirtmişledir. Buna dair ulusal veya uluslararası herhangi bir istatiksel veriye ulaşılmamıştır. Bu kanı ilgili firmaların dalgıç motor ve pompa satış verilerinden çıkarılmıştır. Söz konusu problemin en önde gelen nedenlerinden biri motorların termal performansının düşük olması, yanı motor tarafından üretilen ısının yeterli derecede hızlı bir şekilde motordan uzaklaştıracak bir yapıya sahip olmamalarıdır. Tez çalışmasında referans alınan DASM'run genel yapısı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Şekil 2.1'den görüleceği üzere bir DASM farklı termal özelliklere sahip farklı malzemelerden ve ısı kaynaklarından meydana gelen karmaşık bir mühendislik sistemidir.

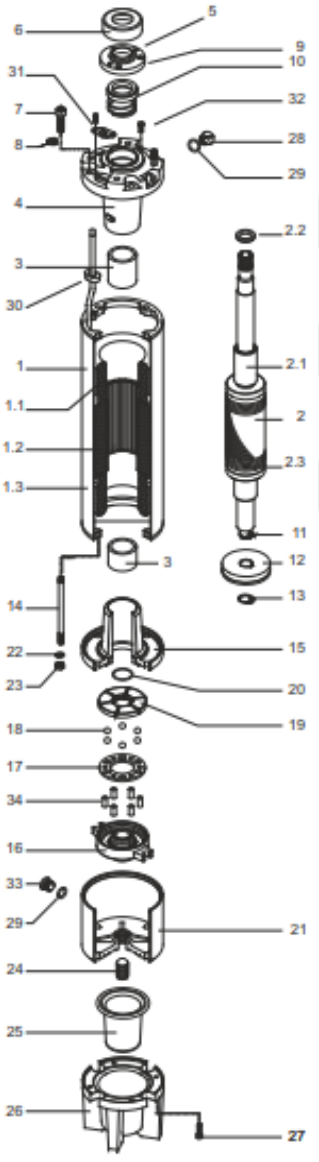
Yapılan araştırmalara göre gelişmiş ülkelerde pompaların toplam enerji tüketimdeki payları yaklaşık olarak %20'dir. Yine araştırmalara göre bu tüketimin yaklaşık olarak %30 optimal bir tasarımla geri kazanılabilir (Kaya ve ark. (2008)). Bu sonuç pompalarda sağlanacak iyileştirmeler ile gelişmiş ülkelerin enerji tüketiminde %6 bir tasarruf sağalabilecekleri anlamına gelmektedir. Dolayısıyla ülkemiz gibi enerjide dışa bağımlı olan ülkelerde pompa tasarımı için optimal tasarım parametrelerinin tespiti kritik bir öneme sahiptir. Bu kritik önemin yanı sıra son yıllarda dalgıç pompa büyüklüğünde ve malzeme yapısında sağlanan önemli derece gelişmeler sonucunda dalgıç pompalar tarım ve kentsel su ihtiyacının karşılanması yanında, petrol ve doğal gazın yer üstüne çıkarılması süreçlerinde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Zhu ve ark. (2016)).

Dalgıç pompaların tahriki için tasarlanmış tipik bir dalgıç motor Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Şekil 2.1'den görüleceği üzere dalgıç bir motor rotor ve stator olmak üzere iki ana bileşenin yanında birçok alt bileşene sahiptir. Bir dalgıç motorun termal

analizinde temel zorluk motor bileşenlerinin çoğunlukla farklı termal özellikte olması yanında motor içerisinde ısı transferinin hem taşınım hem de iletim ile gerçekleşmesidir. Dolayısıyla motor iç yapısı ile ilgili herhangi bir termal analizde akış karakteristiklerinin ısı karakteristiklerinin bir arda değerlendirilmesi zorunluğu bulunmaktadır. Motor iç yapısındaki kısıtlı hacim alanları yanında motorun tamamen kapalı bir hacim şeklindeki tasarımından dolayı akış alanını ölçüme yönelik probların akış alanına yerleştirmesini imkansız kılmaktadır. Günümüzdeki genel trend bu zorluğu, belirli parametreleri deneysel veriler ile doğrulanmış CFD simülasyonlarıyla, aşma yönündedir. Tez çalışmasında benzer bir strateji izlendiğinden dolayı bu bölümünde ilk etapta konu ile ilgili başlıca çalışmalar sunulmuştur. Söz konusu bölümün sonunda literatürdeki mevcut çalışmaların tez konusuyla ilgisi vurgulanmıştır.

Ahmed ve Toliyat (2007), elektrikli makinelerin performansı üzerinde çalışma ortamının etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları araştırmada hava boşluğundan kaynaklanan viskoz sürtünme kaybı üzerindeki etkisinin akışkana batırılmış bir motor için kritik bir değerde olduğunu saptamışlardır. Bu tür tespitlerin ancak CFD simülasyon sonuçları çerçevesinde yürütülecek mekanik ve yapısal analizler ile mümkün olacağı vardıkları diğer bir sonuçtur. Meng ve ark.(2010), motor rotor ve rulman bölgesini bir model çerçevesinde tanımlayarak motor hava aralığı yağı ile rotor yüzeyi arasındaki ısı transferi katsayısını akışkanlar mekaniği teorisini kullanarak tanımlamışlardır. Yaptıkları araştırma sonucunda ısı transferi katsayısı ve elektromanyetik alan kayıp değerlerini referans alarak rotor sıcaklık dağılımını saptamışlardır. Jianjun ve ark.(2010), yaptıkları araştırma sonucunda sabit mıknatıslı dalgıç bir asenkron motor için üç boyutlu bir termal model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri termal model motorda ısınmaya sebep olan bakır kayıpları, stator demir kayıpları ve viskoz sürtünme kayıpları tanımlaya bildiğini vurgulamışlardır. Huai ve ark.(2003), indüksiyon motorlarında termal süreci tanımlayan ve doğrulayan matematiksel bir model geliştirmişler. Araştırmalarda FEMLAB yazılımı kullanılarak kapalı fan soğutmalı endüksiyon motorlarında sıcaklık artışını gözlemleyebilmişlerdir. 1,5 kW standart sincap kafesli asenkron motorunun verileri ile modeli oluşturulan indüksiyon motoru karşılaştırılmıştır. Araştırmalar sonucunda

SIMULINK tabanlı bir termal model geliştirilmişlerdir. Endüksiyon motorlarında sıcaklığın yükselmesi geliştirilen modellemenin deneysel verilerin karşılaştırılması ile sıcaklığın motorun üzerindeki etkisini gösterilmiştir. Ayrıca Huai ve ark.(2003), yaptıkları çalışmada farklı voltaj kaynakları ve yükleme koşulları altında çalışan TEFC endüksiyon motorlarının analizini SIMULINK tabanlı yazılım programı ile analizlerini yapmışlardır. Liu ve ark.(2011), dalgıç bir motorun çalışma koşularında



No	Parça Adı / Part Name
1	Bobinli stator / Stator
1.1	Sargı teli / Winding wire
1.2	Stator paketi / Stator package
1.3	Stator gövdesi / Stator shell
2	Rotor / Rotor
2.1	Yatak mil gömleği / Shaft sleeve
2.2	Balans halkası / Balance ring
2.3	Bakır halka / Copper ring
3	Radyal yatak / Radial bearing
4	Üst yatak gövdesi / Upper bearing body
5	İç bilezik / Bushing
6	Kum çanı / Slinger (sand guard)
7	İmbus civata / Hexagon socket cap screws
8	Bakır rondela / Copper ring
9	Mekanik salmastra üst parçası / Cover seal
10	Mekanik salmastra / Mechanical seal
11	Eksenel yatak kaması / Axial thrust bearing key
12	Eksenel karbon yatak / Axial thrust bearing
13	Mil segmanı / Retaining ring
14	Eksenel yatak gövdesi tespit saplaması / Tie rod
15	Alt yatak gövdesi / Lower bearing body
16	Eksenel yatak taşıyıcı / Thrust bearing support
17	Eksenel yatak bilya merkezleyici / Ball holder
18	Eksenel yatak bilya / Thrust bearing ball
19	Eksenel yatak segmenti / Tilting pads
20	Eksenel yatak O-ring / O-ring
21	Eksenel yatak gövdesi / Thrust bearing body
22	Bakır rondela / Copper ring
23	Alt gövde saplama bağlantı somunu / Nut
24	Eksenel yatak ayar civatası / Screw (thrust bearing base)
25	Membran lastiği / Membrane
26	Membran gövdesi / Membrane body
27	İmbus civata / Hexagon socket cap screws
28	Çekvalf / Check-valve
29	O-ring / O-ring
30	Kablo çıkış lastiği / Cable seal
31	Kablo çıkış lastiği baskı sacı / Seal cover
32	Pompa motor somunu / Nut
33	Kör tapa / Plush (r 3/8")
34	Eksenal yatak pimleri / Ball holder pins

Şekil 2.1. Dalgıç asenkron elektrik motorun genel yapısı

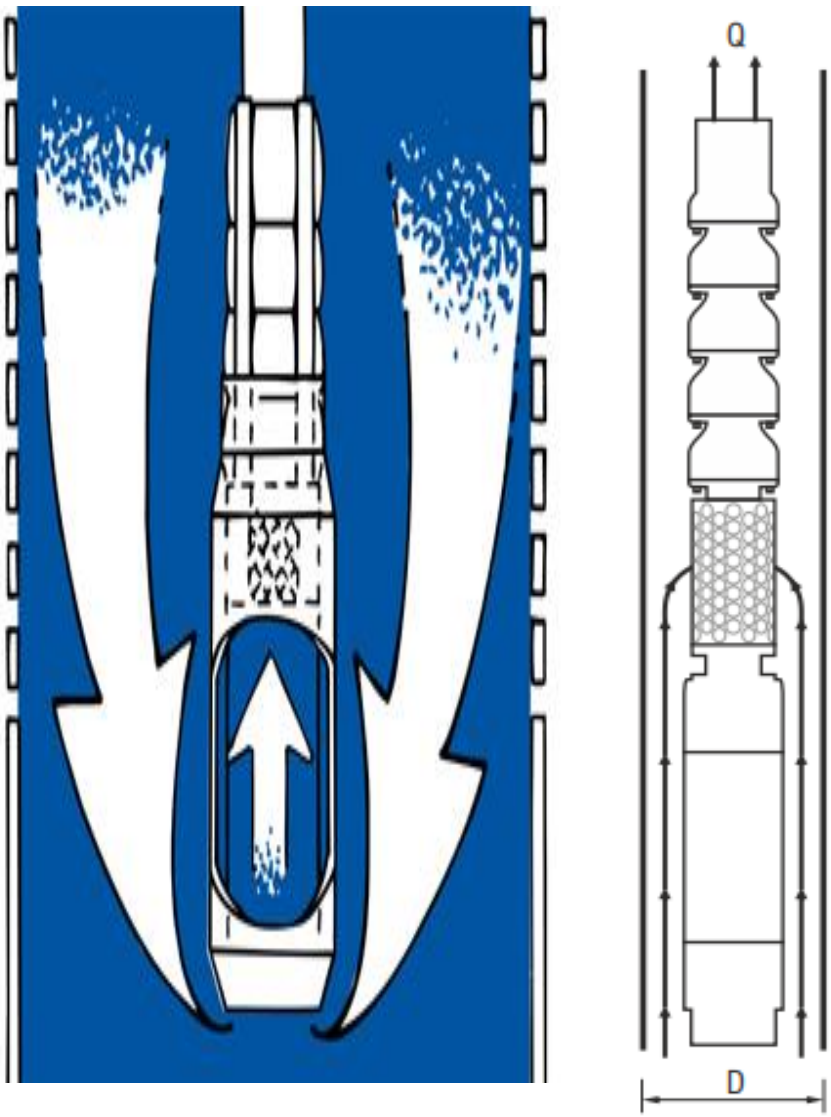
motor izolasyonunun motor performansına etkisini araştırmışlardır. Araştırma süreçlerini yapay sinir ağları metodolojisini kullanarak gerçekleştirmiş ve dalgıç

motor izolasyonunun motor ömrü üzerindeki etkisini saptamaya yönelik bir model geliştirmişlerdir. Kirvelis ve Davies (2003), yaptıkları çalışmada akışkan viskozitesinin motor ısı dağılımına etkisinin araştırmışlardır. Araştırma sonucunda geliştirdikleri modelin akışkan viskozitesi ile pompanın ısıl dağılımı arasında ilişkiyi tanımlayabildiği gibi söz konusu etkini pompa performansı ile ilişki saptayabildiğini vurgulamışlardır.

Dalgıç pompanın ömrünü belirleyen ana parametre önceden de değinildiği üzere motor tarafından üretilen ısının motordan uzaklaşma hızıdır. Uzaklaşma hızı istenilen seviyede olmaz ise motor belirli sıcaklıktan sonra servis dışı kalabilmektedir. Sektörün öncü firmalarından Goundfos firmanın ürünleri konusunda yaptığı çalışmalarda; dalgıç asenkron motorlarının uzun ömürlü olması için anahtar kelime motorun iyi bir şekilde soğutması olduğunu vurgulamaktadır. Dalgıç asenkron motorları için tam kapasite çalışma sırasında, kabul edilebilir soğutma suyu sıcaklığı için akışın en az 0,15m/sn hızla motor etrafında rahatça döndüğünden emin olunması gereklidir. Bu hızın gerekli en az değerin altına düşmesine pompa tarafından izin verilmemelidir. Dalgıç asenkron motorlarının kullanımı günümüzde ciddi bir şekilde artış göstermekle beraber motorun uzun ömürlü olması için motorun oluşturduğu ısıyı motordan uzaklaştırmak gereklidir. Günlük yaşamda dalgıç asenkron motorlarının dış yüzeyinde suya hız kazandırmak için soğutma ceketleri kullanılır. Eğer su sıcaklığı tam kapasite çalışma sıcaklığından düşükse, motor sargıları içeresindeki sıcaklık buna paralel olarak düşük olacaktır. Kuyuda motor dikey şeklide kullanılıyorsa, 20 ^{0} C altındaki su sıcaklığında dalgıç asenkron motorları 0,15 m/sn akış hızından daha az bir akış hızı ile soğutulabilir. Kuyu çapının 12" ’e kadar olduğu bağlantılarda serbest sıcaklık dağılımı aşağıdaki durumlarda yetersiz kalmaktadır;

- Su sıcaklığı 20^{0}C’nin altında ise
- Motor yüzeyinde toprak tortusu, mangan, kireç veya demir bileşenleri yoksa
- Voltaj düşüklüğü veya voltaj kararsızlığı varsa
- Dur/kalk şalt sayısının 30 adet/saat' den az oluğunda
- Motor kum veya çamur içerisinde kalmadıysa
- Motor kuyu filtresinin üzerinde yerleşimi yapıldıysa

Soğutma suyu sıcaklığı maksimum tam kapasite çalışma sıcaklığından yüksek ise motor gücünün büyütülmesi gereklidir. Yani kullanılan pompa motor gücünün üzerinde bir motor ile bağlanmalıdır. Bunun da ötesinde soğutma suyu akış hızı 0,15 m/s den az olmadığına, standart soğutma ceketi kullanarak emin olunmalıdır. Yüksek su sıcaklığı dalgıç asenkron motorların ömrünü kısa tutmaktadır. Ayrıca motor verimine ve ömrüne güç kaynağı, suyun agresivitesi ve kum miktarı da etki etmektedir. Aşağıdaki diyagramda motorun filtre üzerinde yerleştirildiği varsayılarak tam kapasite soğutma için gerekli pompa debilerini göstermektedir (Groundfos Mühendislik El Kitabı).



Şekil 2.2. Kuyuya dikey olarak yerleştirilen motor-pompa ve soğutma ceketi uygulaması (Groundfos Mühendislik el kitabı).

Dalgıç motor soğutmasıyla ilgili geliştirilmiş bir çok sistem bulunmaktadır (US8899054B2, US7188669B2). Örneğin US7188669B2 patent de dalgıç motor soğutmasında yaygın kullanılan su ceketleri (kılıf) ile ilgili bir soğutma sitemi geliştirilmiştir. Şekil 2.2'de tipik su ceketi uygulaması görülmektedir. Şekilde görüleceği üzere su ceketi uygulamasında etki bir soğutma sistemi için motor etrafında bir akış alnın meydana getirilmektedir. Su ceketi uygulamalarında karşılaşılabilecek en büyük sorun kuyu suyunun asitlik veya tuzluluk oranının yüksek olması durumunda motor gövdesinde oluşabilecek tortu ve oksitlenmelerdir. Ayrıca su ceketi optimal tasarımı için kuyu çapı kritik bir önem taşımaktadır.

Uzun yıllar boyunca su soğutmalı elektrik motorları sanayi tarafından kullanılmış olup, özellikle fan soğutmalı motorlar yetersiz olduğu uygulamalarda su soğutmalı elektrik motorları ön plana çıkmıştır. Su sirkülasyonu ile soğutma, büyük boyutlu motorlarda sıklıkla kullanılır. Bu uygulamanın daha küçük motorlarda yaygın olarak kullanılmamasının bir nedeni, hava soğutma sistemlerine kıyasla daha yüksek maliyetli olmasıdır. Teknolojinin ilerlemesi ile bu tip motorların çalışmasını kolaylaştıran yeni yöntemler geliştirilmiştir. Borges ve ark.(2008), yaptıkları çalışmada güç/ boyut oranını en üst düzeye çıkarılmasını ve yük kayıplarının en aza indirgenmesini sağlayan su soğutmalı bir elektrik motorunun çerçevesi içindeki su akışını optimize etmişlerdir. Çalışmaları 22 farklı su ceketi geometrisi çerçevesinde yürütmüşlerdir. Bu çalışmalarında hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve termografi tekniklerini kullanmışlardır. Kullanılan hesaplı akışkanlar dinamiği (CFD), ile motor içerisindeki akış karakteristiklerini gözlemleyebilmişlerdir. Yürüttükleri CFD simülasyonları sonucunda CFD su ceketi içindeki su hızını iki katına çıkararak ilk tasarıma kıyasla yük kaybını % 18 oranda azaldığını saptamışlardır. Geleneksel olarak elektrik motoru üreticileri, elektromanyetik tasarımın iyileştirilmesine yönelik çabalara yoğunlaşma eğiliminde olmuş ve yalnızca yüzeysel olarak termal tasarım özelliklerini ele almışlardır. Ancak, artan gereksinim minyatürleştirme, enerji verimliliği, maliyet azaltma, yeni topolojilerden ve malzemelerden tam olarak yararlanılması ihtiyacı, termal devreyi elektromanyetik tasarımla aynı ölçüde analiz etmeyi zorunlu kılmıştır. Staton ve ark.(2001), bir tasarım mühendisinin dikkate alması gereken termal hususları ve bunun genel

tasarım sürecine üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırmalarını CFD simülasyonları çerçevesinde gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları araştırma sonucunda bir motorun termal analizi için CFD simülasyonlarının kullanışlı bir yöntem olduğunu saptamışlardır

.

Asenkron motorun tasarım aşamasında, en önemli problemlerden biri, sıcaklık dağılımının belirlenmesi ile ilgilidir. Makinenin ısınması elektromanyetik kayıplara bağlı olduğundan, elektromanyetik ve termal olaylar arasında sarım direncinin sıcaklık bağımlılığından kaynaklanan bir bağlantı söz konusudur. Son yıllarda, sonlu elemanlar metodu kullanılarak elektromanyetik ve termal davranışları hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmıştır. Mezani ve ark.(2005), yaptıkları araştırmalarda elektromanyetik ve termal karakteristikleri birlikte ele alan bir model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri model ilk etapta elektromanyetik model hem stabil hem harmonik hareketleri dikkate almaktadır. Sonraki aşamada elektromanyetik hesaplama sonucunda saptanan yük kayıplarından yola çıkarak motor termal performansını sonlu elemanlar metoduyla hesaplamaktadır. Günümüzdeki konu ile ilgili genel trenlerden biride Mezani ve ark. (2005) tarafında izlene metot parelerinde paket programların geliştirilmesidir. Bunlara bir örnek Motor CAD yazılımıdır (https://www.motor-design.com/motor-cad-software/).

Dalgıç elektrik motorlarında kullanılan akışkan cinsi, akışkan hareket alanı ve akışkanın oluşturduğu sıcaklık dağılımı motor veriminde büyük rol oynamaktadır. Xu ve ark.(2015), yaptıkları çalışmada dalgıç motorda bulunan özel yağ sirkülasyon sistemine yönelik küresel akışkan alanının meydana getirdiği ısı transfer modeli oluşturmuşlardır. Ele aldıkları çalışmada sıvı alanının eksenel doğrultu boyunca tekrarı göz önünde bulundurularak motor içindeki sıvının hızı ve basıncı arasındaki ilişkiyi tanımlamışlardır. Araştırmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve ısı transfer teorisi kullanmışlardır. Motordaki sıcaklık dağılımı, motorun iç kısmındaki akışkanın akış durumunu ve akışkanın oluşturduğu sıcaklık alanı üzerindeki etkiler incelenmiş son olarak, önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak için, 15 kW YQYJ-15D dalgıç motoru örnek alınarak hesaplama sonuçlarının prototipten alınan test verileriyle karşılaştırılmışlardır.

Standart endüksiyon motorları genellikle sürekli çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bazı uygulamalarda, elektrik motorlarının sadece çok kısa bir süreyle çalışma ihtiyacı duyulmaktadır. Bu motorların termal tasarımları, sistem ağırlığını ve boyutunu optimize etmek için son derece önemlidir. Swata ve Staton (2011), yaptıkları çalışmada kısa bir süre görev alan bir motorun geçici termal performansını araştırmışlardır. Sıcaklık sensörleriyle yapılan termik koruma, sıcaklık ölçümündeki gecikmeler nedeniyle güvenilir olmayacağı için öngörücü koruma esastır şeklinde bir saptamaya varmışlardır. Yapılan çalışmada 10 saniyeden daha kısa bir çalışma süresine sahip sabit mıknatıslı motorun termal modellemesi ele alınmıştır. Kısa süreli çalışan bir motor için, sarımın (bakır, yalıtım ve emprenye materyalleri) termal kapasitanslarının ısıl performansa hakim olması beklenirken, iletim yoluyla ısı akışının daha az bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Endüksiyon motorundaki ısı transfer davranışını, soğutma kabiliyetini ve makinenin nominal gücünü tanımladığından, uygun şekilde modellemek son derece önemlidir. Sonlu eleman analizi (FE) nedeniyle, karmaşık üç boyutlu geometrilerde ısı transferinin doğru bir şekilde modellenmesi pratik olarak zordur. Daha hızlı mikro işlemciler mevcut olmasına rağmen, 3D FE analizi fazla zaman alması ve (dinamik termal analiz için), bununla birlikte makinedeki ısı transferini modellemek için farklı tipte analitik yöntemler kolaylıkla uygulanabilir. Endüstriyel elektrikli makinelerin çoğu, sabit durum sıcaklığına ulaşıldığı yerlerde sürekli çalışır. Bu tür uygulamalar örneğin, enerji santralleri jeneratörleri, farklı tip konveyörler, iklimlendirme motorları, tahrik motorları, vb. modeldeki makinelerdir. Böyle bir model, makinenin sabit durumdaki sıcaklık yükselişini doğru bir şekilde tahmin etmek için yeterlidir. Ancak, yükleme varyasyonları sırasında ısı transfer mekanizmalarını modelleyemez. Aşırı yükleme yükleri yüksek kayıp anlamına gelir ve sonuç olarak sıcaklık değişimleri yüksektir. Bu çalışmada, motor için analitik ısı transfer modeli inşa edilmiştir ve ana ilgi alanı, yükleme varyasyonları sırasında geçici ısı transfer mekanizmasına odaklanmıştır. Model, sıcaklıkların tahmini olmalıdır. Bu yöntemle ortalama sıcaklıkları oldukça doğru bir şekilde tahmin etmek mümkündür. Rosenberryn (1955), 1955 gibi erken bir tarihte dökme alüminyum sincap kafesli motorların geçici durgun sıcaklıklarını tahmin etmek için ısıl dirençli ağlar kullanmışlardır. Mellor ve ark.(1991), esnek ve hesaplama açısından hızlı ve

sıcaklıkları doğru bir şekilde hesaplayabilmek için ayrıntılı bir çalışma sunmuşlardır. Bu çalışma, üç fazlı asenkron motorun termal analizine odaklanmaktadır. Asenkron motorun çalışması sırasında, ortaya çıkan ısı kayıpları (yani demir kayıpları, stator bakır kayıpları ve rotor kayıpları), asenkron motorun verimini ve performansını etkiler; bu kayıplar, sıcaklığı izin verilen çalışma sıcaklığından daha büyük bir limite yükselmesi gibi bazı önemli sorunlara neden olduğu saptamalarında bulunmuşlardır. Badran ve ark.(2012), matematiksel bir model çerçevesinde endüksiyon motorunun termal performansını tespitine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda motor bileşenleri arasında en sıcak bileşenlerinin son sargı ve rotor çubuklarında olduğunu saptamışlardır. Termal çiftler aracılığıyla yaptıkları deneysel ölçümlerin modelden elde edilen veriler ile uyum içinde olduğu yaptıkları diğer bir tespittir. Bir endüksiyon motorunun iç kısmında hem elektriksel hem de tel kayıpları tarafından üretilen ısı, motorun yapısı boyunca motor muhafazasına temas eden bir sıvıya (hava, su ve yağ) aktarılır. Birçok uygulamada, motorun çalışması sırasında oluşan maksimum iç sıcaklık, motor kullanıcılarının ısı üretimini sınırlamak için bir motorun değerini düşürmeye zorlayarak güvenilirliği etkilemektedir. Yüksek performanslı indüksiyon tasarımcıları termal olarak zorlu uygulamalarda yüksek sıcaklıkta kullanım için motordaki ısı transfer işlemlerinin görmek için endüksiyon motorunun doğru bir şekilde modellemek gerekir. Motordaki ısı transferini tam olarak anlaşılmasıyla, tasarımcılar motorun iç kısmı ile çevre veya soğutucu arasındaki sıcaklık farklarını en aza indirmek için adımlar atmışlardır. Jankowski ve ark.(2010), Entropi oluşumu, sınırlı bir sıcaklık farkı boyunca ısı transferi, beraberindeki basınç düşüşü ile akışkan akışı ve voltaj değişimli akım akışı dâhil (ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere) tüm geri dönüşümsüz işlemlerde görülür. Jankowski ve ark.(2010), yaptıkları çalışmada endüksiyon motorunun termal bir modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri model, elektrikli suya daldırılabilir bir pompayı çalıştıran bir motoru karakterize edebildiğini deneysel veriler ile doğrulamışlardır.

2.1. Önceki Çalışmaların Değerlendirilmesi

Yapılan literatür taramasında ön plana çıkan çalışmalar bir özet şeklinde aşağıda verilmiştir:

Betonico ve ark.(2015), değişik debi ve pompa yüklerinde, dalgıç pompa motorunun sıcaklık dağılımın veren bir model geliştirmişlerdir. Yaptıkları araştırmada, soğutma sıvısı olarak yüksek viskoziteli yağ kullanıldığında termal sınır tabaka gelişiminin etkisini ihmal eden modeller motor sıcaklığını yüksek hesapladığını tespit etmişlerdir. Sapladıkları diğer bir nokta ise maksimum sıcaklığın motorun üstünde meydana geldiği ve alt kısmındaki sıcaklığın ise üst kısmındaki sıcaklıktan önemli derece farklılıklar gösterebildiğidir. Motor frekansının artmasıyla motor sıcaklığın arttığı yaptıkları diğer bir tespittir. Egidi ve ark. (2012), pompa motoru için soğutma sistemlerin geliştirilmesinde bir alt yapı oluşturmak amacıyla dalgıç pompa motoru için soğutma sistemini nümerik incelemişlerdir. Motor diş cidarına ara yüzey şeklinde geliştirdikleri soğutma sistemini motorun sıcaklığındaki artışı önemli derece düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Jankowski ve ark. (2010), Motor boyunca ki ekserji dağılımını, entropi üretimini ve sıcaklığı hesaplayarak hem enerji hem de entropi dengesini içeren bir termal model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri model çerçevesinde entropi dengesini kullanarak motorun iç kayıplarından kaynaklanan entropi üretiminin hesaplanabileceğini öne sürmüşlerdir. Jussila ve ark. (2012), elektrik makinalarında lokal ısı akısını ölçen deneysel bir metot geliştirmişlerdir. Isı akısı ölçümünü termoelektrik temelli sensörler kullanarak yapmışlardır.

Yukarıda literatür ile ilgili verilen özetten anlaşılacağı üzere günümüzde konu ile ilgili gerek akademik ve gerekse endüstriyel ARGE çalışmalarında genel trend optimal tasarım parametrelerinin belirlenmesinde, nümerik simülasyonların kullanılmasıdır. Konu ile ilgili yapılan detaylı literatür taramasından bu kolayca anlaşılabilir. Deneysel ölçüm süreçleri yerine nümerik metotların tercihinin nedeni birçok farklı termal özelliklere sahip alt bileşenden meydana gelen motor iç yapısının akış açısından kompleks bir yapıya sahip olmasıdır. Söz konusu nümerik simülasyonların yürütülmesinde karşılaşılan en büyük sorun ise özellikle dalgıç asenkron motorunun tasarımının çok karmaşık bir yapıya sahip olmasının yanı sıra, hesaplama alanının kompleks matematiksel ve istatiksel modeller çerçevesinde ancak tanımlanabilmesidir. Bu tanımlama nümerik simülasyonları deneysel ölçümler ile doğrulanmasını zorunlu kılmaktadır.

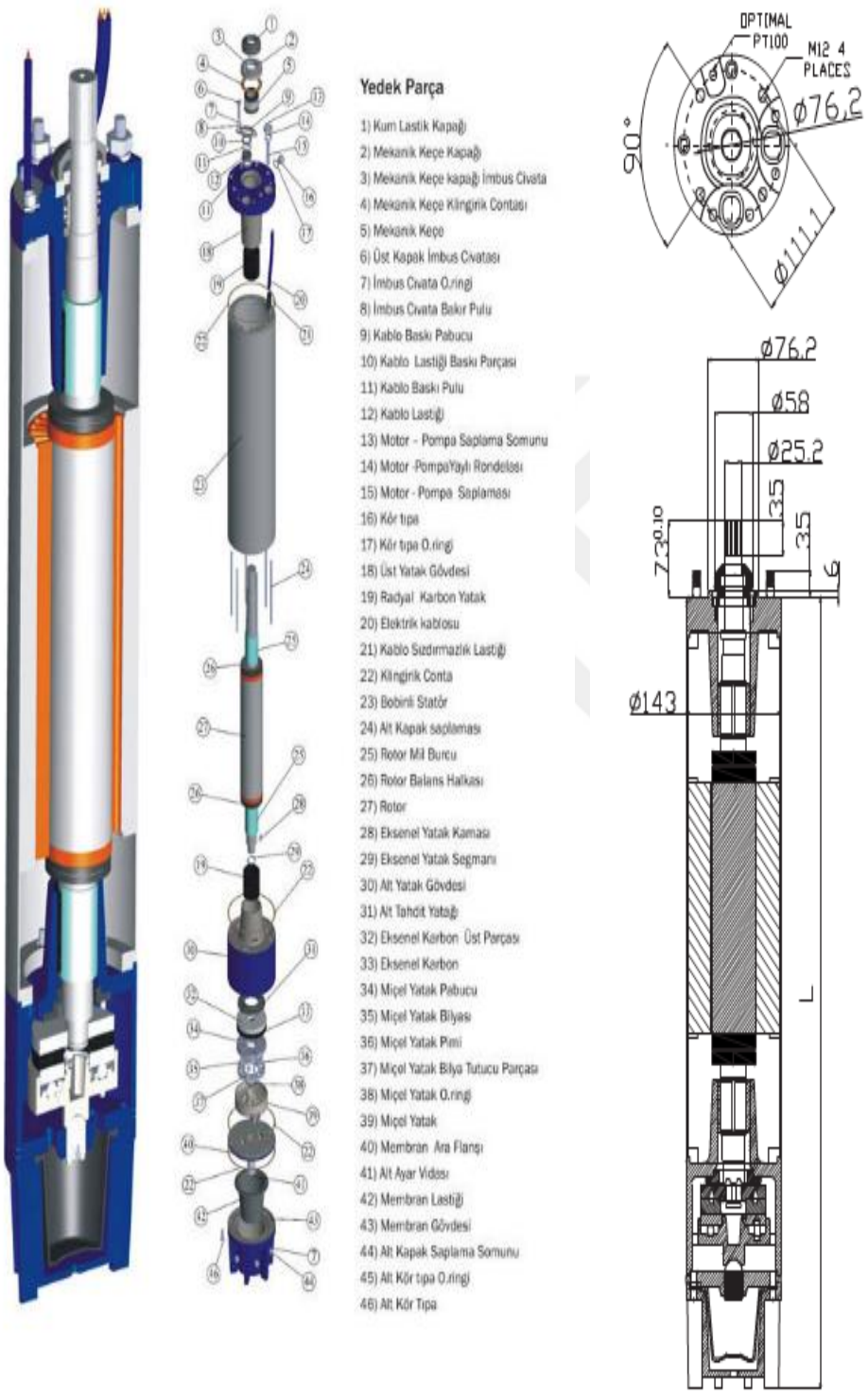
Önceki paragrafta sözü edilen genel trend ve bu trendeki zorluğu açmak için literatürde izlenen yöntem; (i) dalgıç motorun elektromanyetik ve sürtünme kayıplarının deneysel veya nümerik yöntemler ile belirlenmesi, (ii) Belirlenen yük kayıpları çerçevesinde motorun termal performansının CFD simülasyonlarıyla tespit edilmesi şeklinde, iki adımda özetlenebilir. Bu tez çalışmasında da benzer bir strateji izlenmiştir. Sonraki bölümde izlenen yöntemle ilgili detaylı bilgiler sunulacaktır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Eş eksenli iki ferromanyetik armatürden oluşan elektrik motoru temelde rotor(hareketli) ve stator(sabit) olmak üzere iki ana bileşenden meydana gelmektedir. Kullanım alanlarına ve ihtiyaca bağlı olarak elektrikli motor gelişim sürecinde birçok farklı motor geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında referans seçilen dalgıç asenkron motor özellikte tarımsal sulamanın en önde gelen araçlarından biridir. Dalgıç motorlarda özellikle sınırlı çap, paket boyu ve çalışma ortamı şeklindeki parametreler akım yoğunluğu ve motor sıcaklığı gibi temel tasarım parametrelerini dramatik olarak değiştirmektedir. Bu tez çalışmasında asenkron motor bir çeşidi olarak kullanılan dalgıç asenkron motorlarının içindeki soğutma suyun sıcaklığına bağlı olarak motorun verimine, devrine, mil gücü, torku ve aktif güç değişimini etkisi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Tez çalışmasın izlenecek yöntemdeki temel zorluklar (i) motorda meydana gelen sıcaklık dağılımı ana sebebi olan motor içindeki suyun bulunduğu alanın kompleks olması ve (ii) dalgıç elektrik motorunun yapısının birçok farklı malzemeden meydana gelmesi şeklindedir.

Bu tez çalışmasında tez öğrencisinin yaklaşık 3,5 yıl boyunca üretim mühendisi olarak çalıştığı Fırat Motor ve Pompa Elektrik San. Tic. Ltd. Şti tarafından üretilen 6” 30 hp serili endüstriyel dalgıç asenkron motoru referans alınmıştır. Referans alınan motor Şekil 3.1’de gösterilmiştir. İlk etapta Şekil 3.1’de gösterilen motorun içindeki soğutma sıvısının sıcaklığının motorun çıktı girdileri üzerindeki etkileri deneysel olarak ölçülmüştür. Yukarıda da değinildiği üzere tüm CFD simülasyon süreçlerinin doğrulanması tez kapsamında yapılan deneysel ölçümler ile yapılmıştır. Tez kapsamında yürütülen CFD simülasyonlarında dikkate alınan koşullar Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çizelgeden anlaşılacağı üzere üç farklı parametre için 6 farklı koşullarda toplamda 5 CFD simülasyonu yürütülmüştür. Deneysel ölçümler tez öğrencisinin firmada çalıştığı dönemde, koordinatörlüğünde düzenlenen test düzeneğinde yürütülmüştür. Test düzeneği, simülasyonlarda kullanılan araç-gereç ve izlenen yöntemler aşağıda detaylı sunulacaktır. Bu detaylı

sunumun anlaşılabilir olması için ilk etapta dalgıç asenkron elektrik motorunun tanımlayan temel büyüklüklerin sunumu yapılmıştır.



Şekil 3.1. 6” 30 HP Dalgıç asenkron motoru a. 3D model, b. 2D model görüntüsü.

Çizelge 3.1. CFD simülasyonlarındaki yürütüldüğü koşullar.

Farklı motor devirleri	2000(dev/dak)	2500(dev/dak)	2900(dev/dak	
Motor yüzeyinde dikey yönde akışkan hareketi	2m/s	1.5m/s	1m/s	0.5m/s
Motor iç yapısındaki suyun devir dayımı (suyun motora giriş hızı)	1m/s	0.5m/s	0.25m/s	

3.1. Dalgıç Motoru Tanımlayan Temel Büyüklükler

Özellikle yer üstü sularının olmadığı alanlarda su temininin yer altı sularından sağlanması insanlık tarihi kadar eski bir yöntemdir. Bu yöntemde göreceli olarak büyük çapta açılan kuyulardan su yer üstüne çıkrık ve benzeri araçlar ile çıkarılıyordu. 19. yüzyılda bir nevi pozitif deplasman pompası sayılabilecek tulumbalar geliştirdi ve yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Ancak nüfus artışına paralel su gereksinimdeki artış yeni mühendislik çözümleri geliştirmeye zorlamıştır. Bir santrifüj süreci sonunda mekanik gücü hidrolik güce dönüştüren dalgıç pompa konstrüksiyonu bu zorlamanın bir sonucudur. Bu konstrüksiyon gerekli, basınç için kademelerin seri bağlanabildiği karışık akışlı santrifüj pompanın su altında çalışmaya uygun bir elektrik motoruna monte edilmesinden oluşmuş olan özel yapıdır. Dalgıç pompa kademesi önceden söz edildiği gibi çark ve difüzör olmak üzere iki temel bileşenden meydana gelir. Motora bir şaft aracılığıyla bağlı çark mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye dönüştürün bileşendir. Difüzör ise akış hızını yavaşlatır yanı kinetik enerjiyi statik basınç enerjisine dönüştürür ve çarka gelen radyal itme kuvvetlerini düşürür (Zhu ve ark., (2016)).

Yer altı sularının yer yüzeyine çıkarılmasında pompa ile birlikte kullanılan dalgıç asenkron motoru iki ana parçadan meydana gelmektedir. Bunlar stator(sabit) ve rotordan(dönen) oluşmaktadır. Dalgıç elektrik motorlarının performansını Gerilim(V), Akım(A),Tork(T) ve motorda kullanılan soğutma sistemi etkilemektedir.

Tesislerde, farklı cihazların mekanik hareketi elektrik motorları tarafından sağlanır. Elektrik gücü, dahili jeneratörlerden ya da başka kaynaklardan elde edilir ve kullanılabilir gerilim seviyeleri elde etmek için transformatörler vasıtasıyla dağıtılır.

Elektrik iki konu başlığı altında ele alınır;

- AC (Alternatif Akım)
- DC (Doğru Akım)

Bir elektrik devresi, kullanmakta olduğu enerji biçiminden bağımsız olarak üç temel bileşene sahiptir:

- Gerilim (volt)
- Amper (Amp)
- Direnç (Ohm)

Üç fazlı asenkron motorlarda senkron devri hesabı;

$$n_s = \frac{120 * f}{2p} \quad (3.1)$$

n_s : Senkron devir sayısı

f: Çalışma frekansı

2p: Kutup sayısı

Asenkron motor, döner manyetik alanın oluşturduğu senkron hızda hiçbir zaman dönemez. Rotorun dönüş hızı ile senkron hız arasındaki farkı kayma olarak belirtiyoruz. Kayma faktörü "s" ile gösterilir ve formülü şu şekildedir.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.2)$$

n_s: Senkron hızı

n_r: Rotor hızı

Asenkron motorlarda sargılar arasında bağlantı şekli yıldız ve üçgen olmak üzere iki şekilde olmaktadır. Faz gerilimleri ile faz akımları arasındaki ve hat gerilimleri ile hat akımları arasındaki ilişki aşağıdaki şekildedir:

-Üçgen bağlı sistem için;
Hat Gerilimi = Faz Gerilimi
Hat Akımı = √3 x Faz Akımı

-Yıldız bağlı sistemler için;
Hat Gerilimi = √3x Faz Gerilimi
Hat Akımı = Faz Akımı

Asenkron motorlarında açısal hız hesabı(ωr);

$$\omega r = \frac{2\pi n_r}{60} \text{ (rad/sn)} \quad (3.3)$$

Üç fazlı asenkron motorlarında toplam güç(aktif güc) ise şu şekilde hesaplanır;

$$P\text{aktif} = \sqrt{3} * V * I * cos\emptyset \quad (3.4)$$

P_{aktif}=Güç
V= Hat gerilimi
I= Hat akımı
Cosø=Güç faktörü

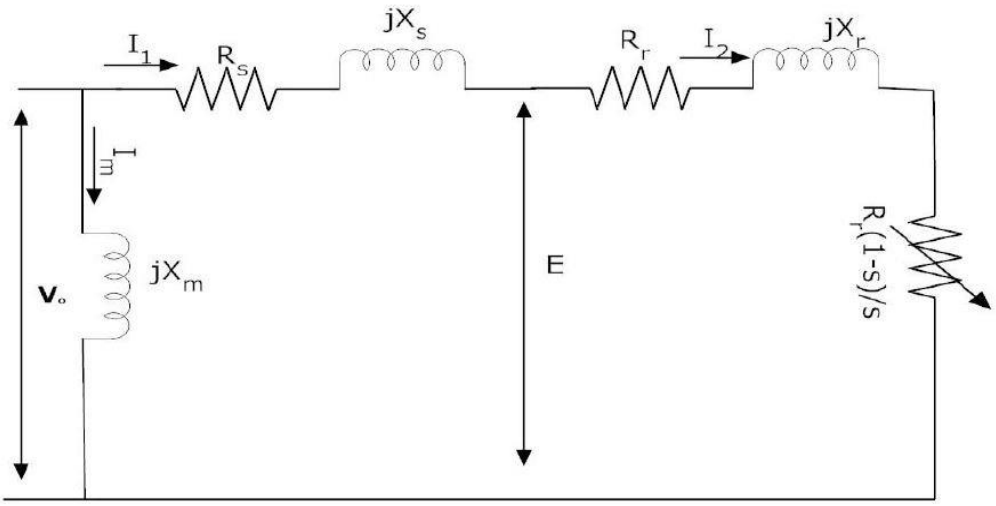
Asenkron motorlarında mil gücü hesabı;

$$P\text{mil} = \frac{\omega r \times T}{1000} \quad (3.5)$$

Asenkron motorların verim hesabı;

$$\eta = \frac{P\text{aktif}}{P\text{mil}} \times 100 \quad (3.6)$$

Asenkron motorların eşdeğer devresi;



Şekil 3.2. Asenkron motorların eşdeğer devresi

Yukardaki devrede asenkron makinelerin L tipi eşdeğer devresi gösterilmektedir. Transformatördeki primer sargıyı stator temsil ettiği gibi sekonder tarafı da rotor temsil etmektedir. Burada önemli olan nokta kayma faktörünün devredeki akım ve gerilime önemli derecede etki etmesidir. Normalde makinenin çıkışındaki direnç hayali bir dirençtir. Çünkü kaymaya göre rotor tarafındaki direnç değeri değişmektedir.

I_m ile gösterilen boşta çalışma akımı, stator ile rotor arasında bulunan ince fakat büyük direnç gösteren hava aralıklarından dolayı transformatördekinden daha büyüktür.

Asenkron motorlarının moment karakteristiği;

Asenkron motorun L tipi eşdeğer devreye göre moment formülü aşağıdaki gibidir:

$$M = \frac{mp}{2\pi f}\frac{r_2'}{s}\frac{V_1^2}{Z^2} \quad (3.7)$$

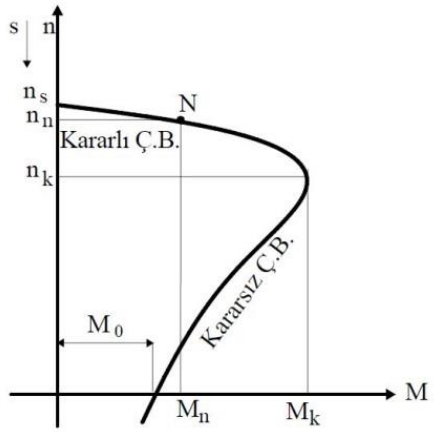
Z:Eşdeğer devrenin L tipindeki empedansı

m:Faz sayısı

p: Kutup çifti sayısı

V_1: Statore uygulanan gerilim

f: Statore uygulanan frenkas



Şekil 3.3. Motorun hız-moment grafiği

Makine senkron hızdayken (gerçekte mümkün olmadığını söylediğimiz) rotorun hızı sıfır olduğu grafikte de açıkça görülüyor. Makinenin kalkınması için belli bir kalkış momenti (M_0) vardır. Bu durumda rotor hızı sıfırdır bunu makinenin yenmesi gerekir ki makine kalkınsın ve harekete başlasın. Makine kalktıktan sonra belli bir hız değerinden sonra veriminin düştüğü görülmektedir. Yani devrilme momentini (Mk) aşmıştır. Makinenin devrilme momentini aşmaması gerekir. Bu durumdaki hızına devrilme hızı (nk), kaymasına ise devrilme kayması (sk) denir. Bu parametrelere göre moment formülünden devrilme momenti hesaplanır.

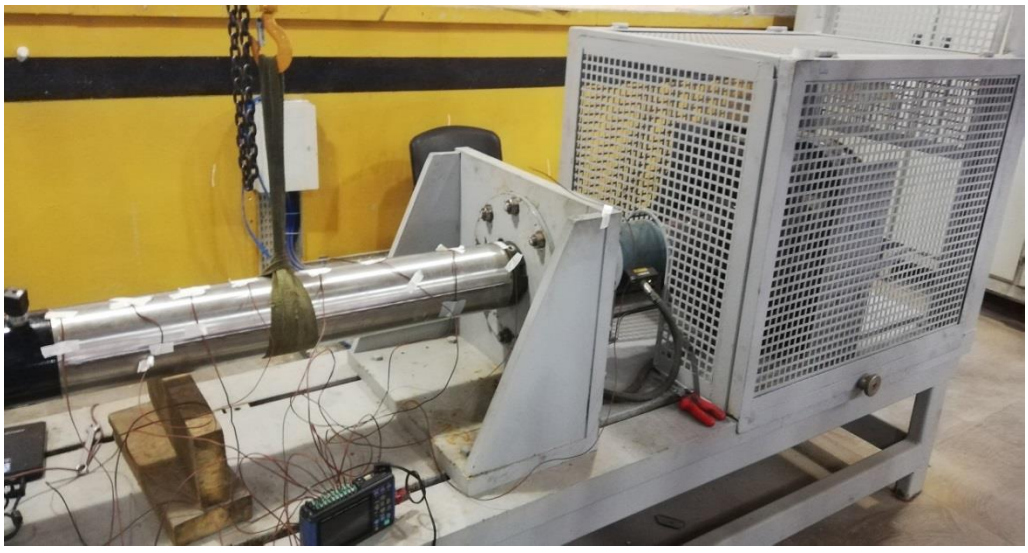
3.2. Deney Düzeneği

Dalgıç elektrik motorlarının tasarım parametrelerini belirlenmesinde Ansys maxwell, MotorCAD ve CFD simülasyonları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak geometrinin kompleks yapısından dolayı CFD simülasyonların mutlaka deneysel ölçümler ile doğrulanması gerekir. Bu bölümde deneysel ölçümlerde kullanılan tez düzeneği sunulacaktır. Anlaşılacağı üzere dalgıç elektrik motorunun

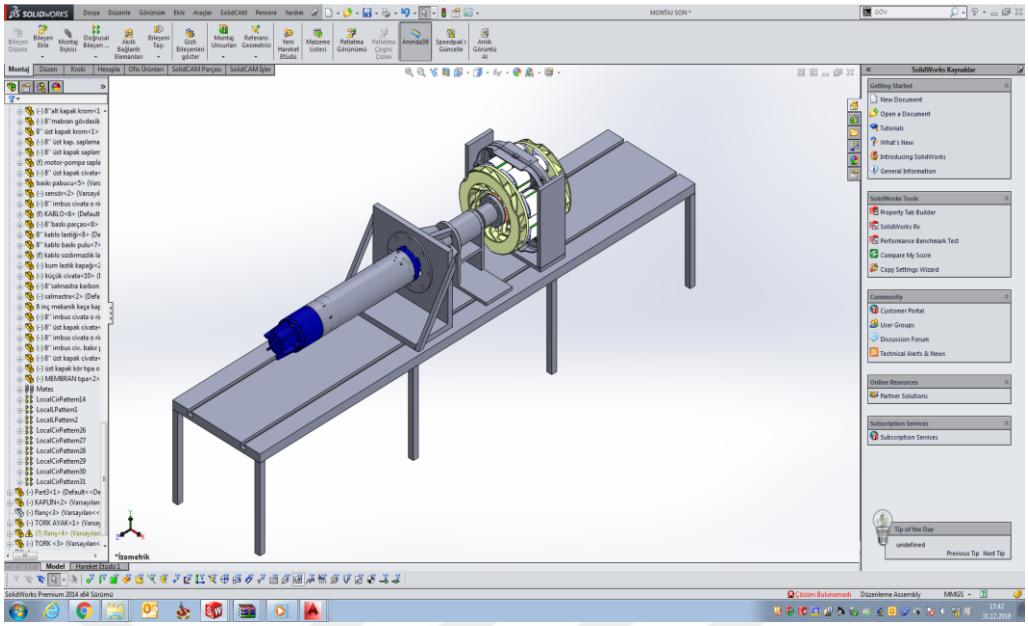
performansının veya çalışma eğrilerinin deneysel ölçümü hem tasarımcılar hem de üreticiler açısından kritik bir önem sahiptir.

Bu tez çalışmasında; dalgıç elektrik motorunun karakteristiklerinin belirlenmesi için voltaj, akım, mil gücü, aktif güç, tork, motor devri, açısal hız, motor içindeki suyun sıcaklığı, motorun iç basıncı ve motor verimi kullanılan bir ara yüz ile bilgisayara aktarılmış ve dalgıç elektrik motorunun karakteristikleri dijital veri olarak elde edilmiştir.

Tez çalışmasında kullanılan deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 3.5'de test sisteminin 3D modeli de gösterilmiştir. Şekil 3.4'de görüleceği üzere dalgıç elektrik motoru yatay bir şekilde test sistemine bağlanır. Yapılan test sisteminde 6"-7" motorlar için gerekli ara parçalar takılarak test işlemi yapılırken aynı işlem 8"-9"-10"-12" motorlar içinde test sisteminde kullanılan ara parçalar değiştirilerek test işlemi yapılır. Voltaj, akım, mil gücü, aktif güç, tork, motor devri, açısal hız, motor içindeki suyun sıcaklığı, motorun iç basıncı ve motor verimi ölçümüne yardımcı panolar, varyak, trafo, şebeke analizörleri, reaktif güç kontrol rölesi, analog ampermetre deney düzeneğinin diğer elemanlarındandır. Bu bileşenler ile ilgili detaylandırmalar sırasıyla sunulacaktır. Ayrıca şebeke gerilimi ve motor devrindeki değişimlerin motor verimi üzerindeki olumsuz etkilerinin giderilmesi için yapılan düzenlemelerde vurgulanacaktır.



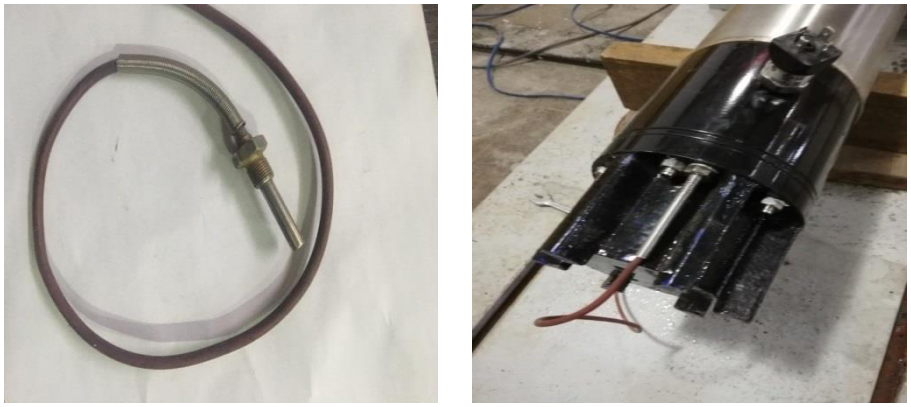
Şekil 3.4. Deney düzeneğinin fotoğrafı



Şekil 3.5. Deney düzeneğinin 3D model çizimi

3.3. Deneysel Ölçümlerde Kullanılan Cihazlar

PT 100 Isı Sensörü: Rezistans termometre, iletken bir telin direnç değerinin sıcaklıkla değişmesinden istifade edilerek oluşturulan bir sıcaklık algılayıcısıdır. Sarımlı direnç prosese daldırılarak sabit bir akım uygulanır. Sıcaklık değişimine bağlı olarak sarımlı direncin değeri değişir ve üzerinde geçen sabit akımla değişen bir gerilim elde edilir. PT100 Sıcaklık ölçümünü yapabilmek için üretilmiş olan ortam sıcaklığı değiştiğinde değeri değişen bir tür dirençtir. Pt 100 genel olarak sıcaklık sensörü olarak adlandırılır. Pt100'ler 2, 3, 4, uçlu olarak üretilirler en sık kullanılan tipi 3 uçlu olandır. Çok daha hassas sıcaklık ölçümleri yapabilmek için 4 uçlu Pt100'ler kullanılır. Deney setinde 4 uçlu Pt100 ısı sönsörü kullanıldı. Pt100'ler tek başlarına hiçbir anlam ifade etmezler. Mutlaka ısı kontrol cihazları pt100 uyumlu olması gerekir.



Şekil 3.6. PT 100 Isı Sensörü ve motora bağlanma şekli

Basınç Transmitteri: Dalgıç elektrik motorunun içerisindeki suyun basınç değişimi sabit olduğu, belli bir basınç değerinden sonra motor üzerinde bulunan basınç ayar çek valf ile dengelenmektedir. Motorun içerisindeki suyun basınç değişimini görmek için 0-100 bar basınç transmitteri kullanıldı. Basınç transmitterinin deney düzeneğine bağlantı fotoğrafı Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Transmitterin uç kısmının motorun içerisindeki suya temas etmesi için motorun alt yatağına montaj edildi. Bu şekilde motorun içerisindeki suyun basıncının meydana gelen değişim gözlemlenmiş olduk. Basınç transmitterini motor alt yatağına montaj ederken motorun çalışmasında herhangi bir risk ve kayıp oluşturmayacak şekilde monte edildi.



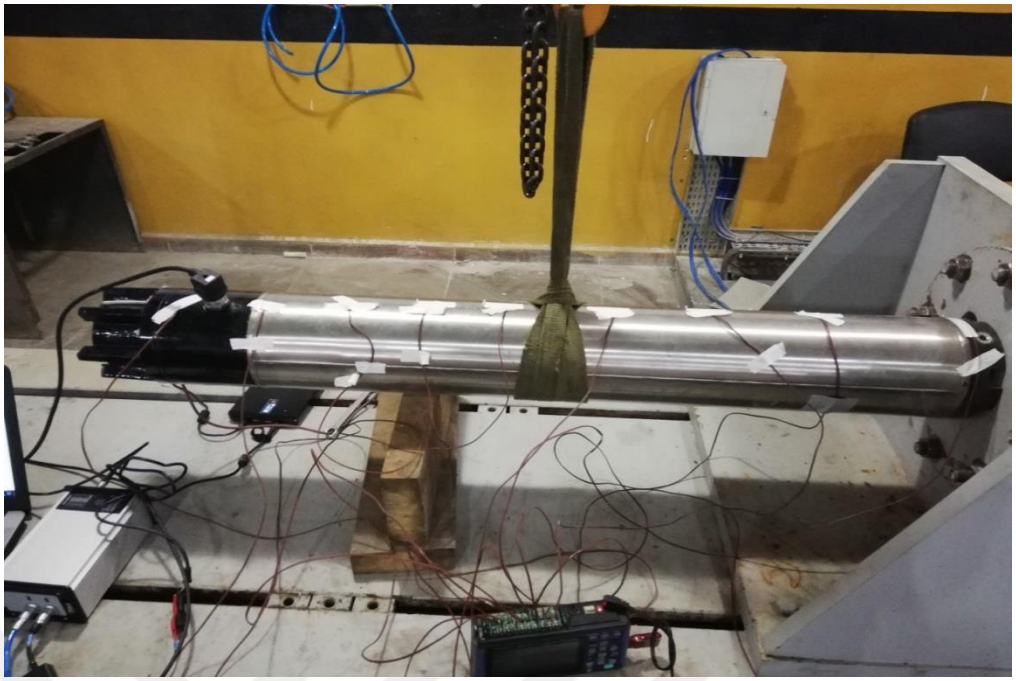
Şekil 3.7. Ölçümlerde kullanılan basınç transmitterinin deney düzeneğine bağlanma şekli

Datalogger: Seçilmiş verileri belirli bir süre boyunca, belirli aralıklarla kaydeden cihazlardır. Datalogger sıcaklık, nem, basınç, su seviyesi, rüzgar hız ve yönü, güneşlenme değerleri, birçok fiziksel veriyi ve çevresel koşulları kaydeden cihazlardır. Kullanılacak alana ve ihtiyaçlara göre farklı özellikte dataloggerlar bulunmaktadır. Test sistemimizde 10 kanallı HİOKİ LR 8431-20 datalogger kullanıldı. Veri kaydı, analog ve darbe / ayrık sinyal seviyesinin, alarmın, tarih, saatin ve hafta gününün bir fonksiyonu olarak bağımsız olarak başlatılabilir veya durdurulabilir özelliğine sahiptir. Test sisteminde kullanılan HİOKİ LR 8431-20 datalogger ve termokupl çiftleri ile motor yüzeyindeki sıcaklık değişimini ve ortam sıcaklığındaki meydana gelen değişimler ölçülüp kaydedildi.



Şekil 3.8. Ölçümlerde kullanılan datalogger

Termokupl: Termokupllar basit, sağlam ve düşük maliyetli oldukları için endüstride en sık kullanılan sıcaklık ölçüm sensörleridir. Bir termokupl, iki farklı iletken telin birlikte uç kısmında kaynatılmasıyla oluşur. Kaynatılan nokta sıcak nokta, açık kalan iki uç soğuk nokta (veya referans noktası) olarak adlandırılır. Bu iki nokta arasındaki sıcaklık farkına orantılı olarak oluşan ve termoelektrik voltaj ya da Seebeck voltajı da denen mV seviyelerindeki bir gerilimin varlığı termokupların sıcaklık ölçümünde geniş bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Termokupllun sıcak noktası ve soğuk noktası arasındaki sıcaklık dağılımı nasıl olursa olsun üretilen gerilim, sıcak ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkına oranlıdır. Deney düzeneğinde T tipi termokupllar kullanıldı. Kullanılan termokupl çiftlerinin deney düzeneğine bağlantı fotoğrafı Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



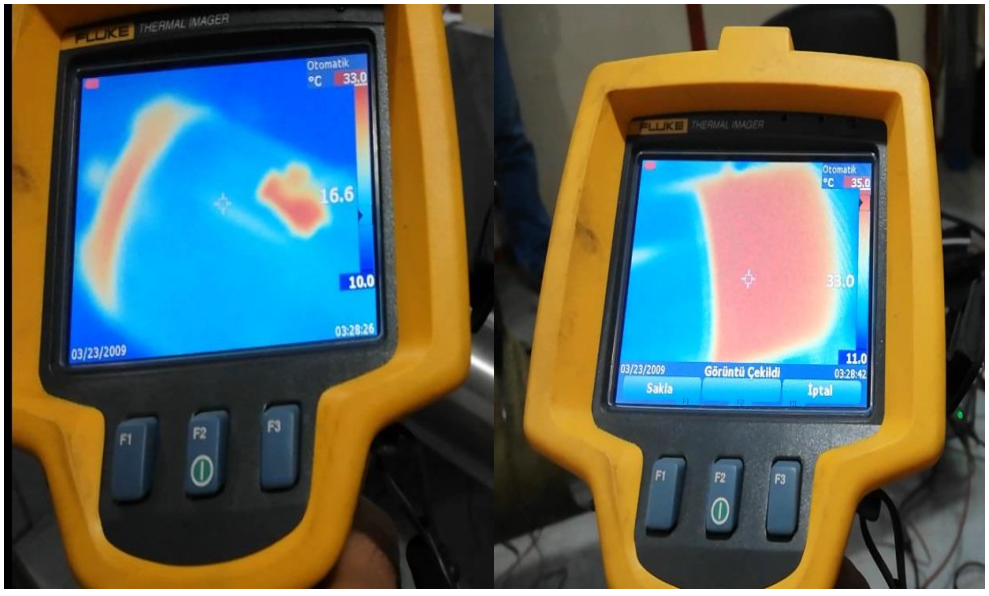
Şekil 3.9. Ölçümlerde kullanılan termokupl çiftlerinin deney düzeneğine bağlanma şekli

Motor basınç ayar çek valfi: Motor içerisindeki meydana gelen basıncın motora zarar vermemesi için 3 bar basınca kadar korunan motor basınç 3 bar basıncın üzerine çıkması halinde motor üzerindeki basınç çek valfin devreye girmesi ile motor içerisindeki basınç dengelenmesini sağlar. Kullanılan basın ayar çek valfin şekli Şekil 3.10'de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Motor üzerinde bulunan basınç ayar çekvalfı

Termal Kamera: Günümüzde görüntüleme alanında birçok teknoloji kullanılmaktadır. Kızılötesi görüntüleme yapan termal kameralar bunlardan biridir. Bu kameralar, elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölümündeki elektromanyetik ışınımı (yaklaşık 900 – 14000 nm veya 0,9 – 14µm) tespit eder ve bu ışınımdan resimler oluşturur. Her cisimden sıcaklığına göre farklı ışınım salındığından termal kameralar cisimlerin, görünür aydınlatma olmadan görünebilmesini sağlar. Sıcak cisimler, termal kamera tarafından görüntülendiklerinde daha soğuk arka planlara göre daha çok göze çarpar. Bu nedenle insanlar ve sıcakkanlı hayvanlar gündüz veya gece termal kameralar tarafından rahatlıkla görülebilir. Termal kameralarda yer alan kızılötesi görüntüleyiciler, kızılötesi dalga boyundaki enerjiyi video ekranında görünür duruma getirir. Sıcaklığı sıfır Kelvin'in üzerindeki tüm cisimler kızılötesi enerji yayar. Bu nedenle tüm objeleri görebilir. Bununla birlikte birçok ısıl görüntüleyici, sadece -50 °C 'den daha sıcak cisimleri algılayabilir. Isıl ışınımın spektrumu ve miktarı cismin yüzey sıcaklığına bağlıdır. Bu durum, termal kameranın bir cismin yüzey sıcaklığını görüntülemesini mümkün kılar. Ölçümlerde termal kamera dalgıç elektrik motorunun yüzeyindeki sıcaklık dağılımını bize verirken dalgıç elektrik motorunun gövdesini oluşturan farklı malzemelerin sıcaklık değişimini açık bir şekilde bize gösterdi. Dalgıç elektrik motorunun test esnasında termal kamera ile motorun yüzey sıcaklığının gösterimi Şekil 3.11'da gösterilmiştir.

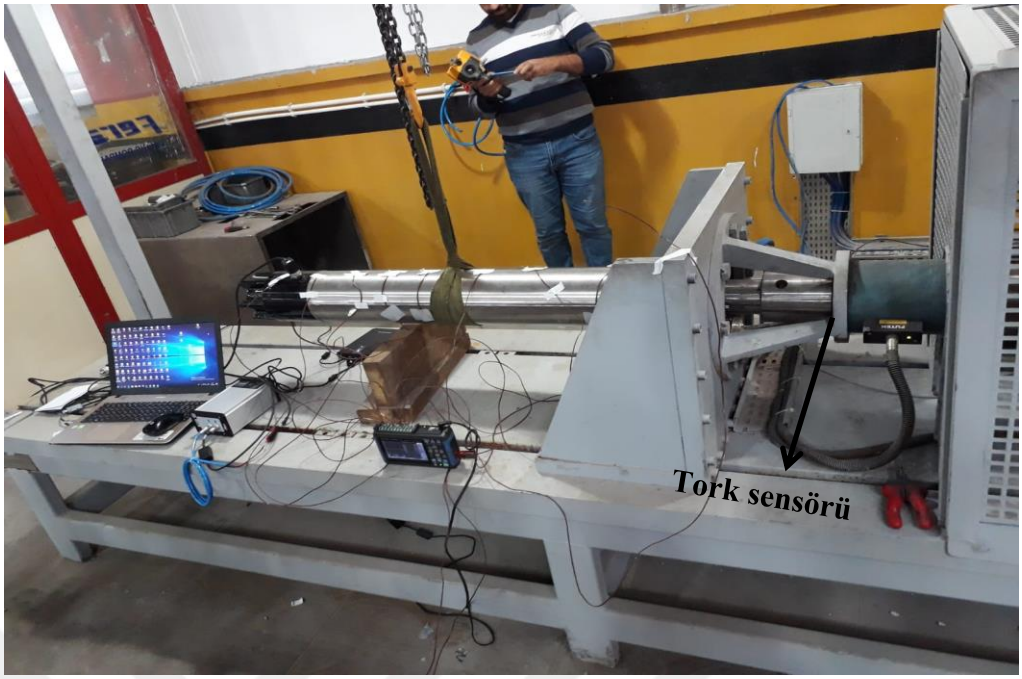


Şekil 3.11. Test esnasında kullanılan termal kamera ve yapılan ölçümler

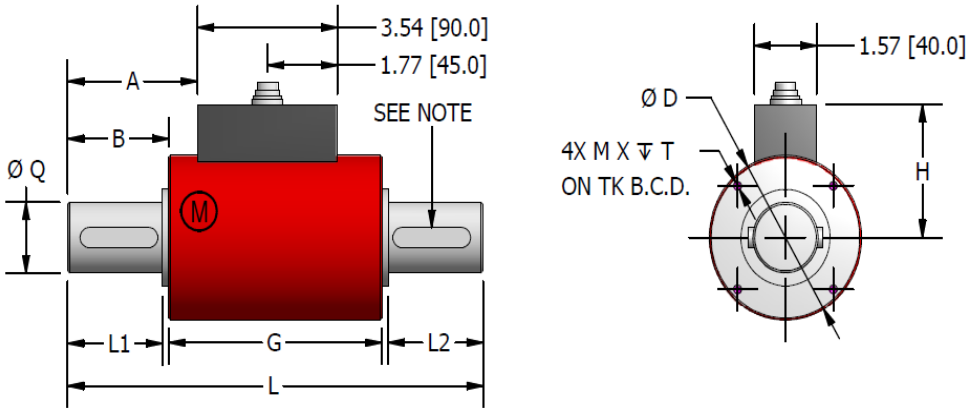
Tork sensörü: TRS 605 serisi hassas tork sensörü, güvenilir statik ve dinamik, saat yönü ve tersine tork ölçümü için ideal seçimdir. TRS 605 tork sensörü, besleme voltajının ve ölçülen sinyalin temassız aktarımı özelliği sayesinde, bakım gerektirmeden yüksek doğrulukta tork ölçümü yapabilmektedir. Bu teknoloji, tork sensörünü; kalkış ve tahrik torku, tutma torku veya sıkıştırma torku ölçümü gereken endüstriyel üretim ve kurulum uygulamaları için mükemmel kılmaktadır. Yüksek ölçüm kalitesi de, tork sensörünün kalite kontrol uygulamaları ve laboratuvarda ar-ge çalışmaları için de uygun olması anlamına gelmektedir. Ağdan bağımsız, mobil uygulamalar için, opsiyonel USB ara yüzü sunulmaktadır. Bu arayüz ile saha ölçümlerine ek olarak ölçüm değerlerini destekleyici görselleştirmeler ve bu değerlerin arşivlenmesi için tork sensörü ürün yazılımını çalıştıran bir bilgisayara bağlanabilir. Uygulanan tork değerleri, normalize edilmiş analog ara yüze bağlı değerlendirme cihazları(PLC ,DAQ vs) ya da kontrolörleri tarafından kolayca okunabilir yapıya sahip cihazlardır.

Kullanılan TRS 605 tork sensörü hakkında teknik bilgiler ise aşaıdaki gibidir. FUTEK en Encoder şaft dönme momentini Sensör TRS605 şaft tork ± 1 Nm (in-lb 8851 için ± 9 in-lb), 1000 Nm kadar ölçümler ve 317 Nm / rad burulma sertliğine sahip montaj çözümü ve mil şaftı bulunmaktadır 173600 Nm / rad. TRS605 metal folyo strain gauge teknolojisini kullanır ve sensörün 7000 RPM'ye kadar çalışmasına izin veren temassız sinyal iletimini içerir.

TRS605, şaft hızını ve konumunu ölçmek için ideal olan bir çift yerleşik döner kodlayıcıya sahiptir. TRS605, tork dönüştürücünün ± 5 VDC çıkış üretmesine izin veren bir dahili amplifikatör içerir. TRS605'in uygulamaları arasında elektrikli el aleti denetimi, otomotiv ve havacılık için motor testleri ve endüstriyel test cihazları bulunur. Test sisteminde kullanılan TRS 605 tork sensörünün test sisteminde yeri ve 2D boyutlu çizimi Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de verilmiştir.



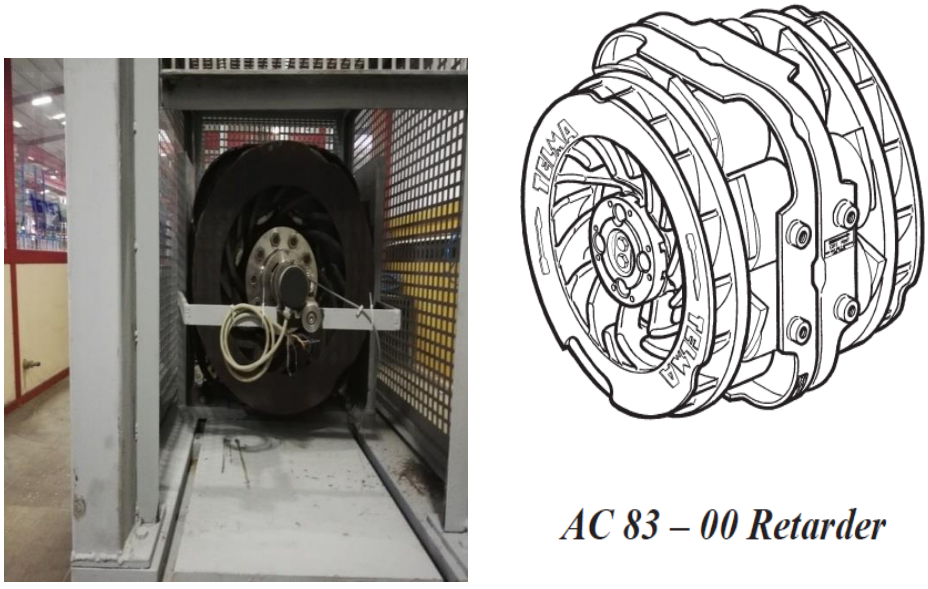
Şekil 3.12. Test sisteminde kullanılan tork sensörünün görünümü



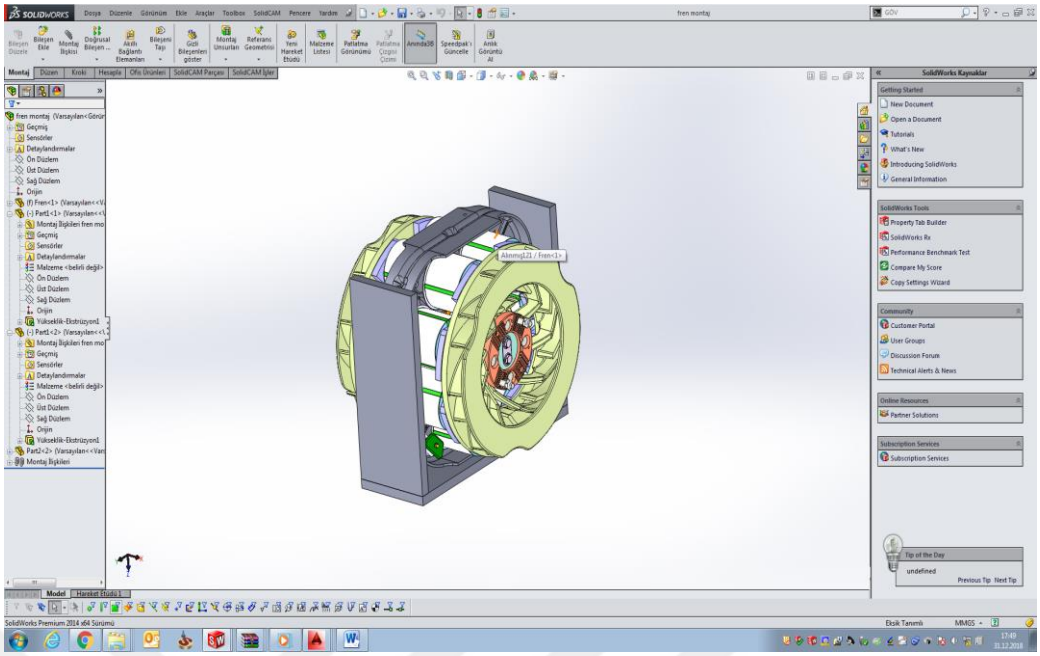
Şekil 3.13. Tork sensörünün 2D boyutlu gösterimi

Sistemde Kullanılan Elektro Manyetik Fren: Motor test sisteminde kullanılan AC83-00 retarder serisi elektro manyetik fren sistemi kullanılmıştır. Kullanılan elektro manyetik fren sistemi hakkında genel olarak elektrikli veya elektromanyetik hız kesiciler olarak adlandırılan telma indüksiyon frenleri bir frenleme direncinin elde edilmesini sağlar. Frenleme enerjisinin önemli bir kısmını dağıtarak klasik frenleme sistemlerini rahatlatır. Telma indüksiyon frenleri Foucault akımları oluşturarak frenleme enerjisini dağıtır. Telma indüksiyon frenleri, sabit bir stator ve statorun dönmesini sağlayan bir tahrik miliyle birlikte çalışan bir çift rotordan oluşur.

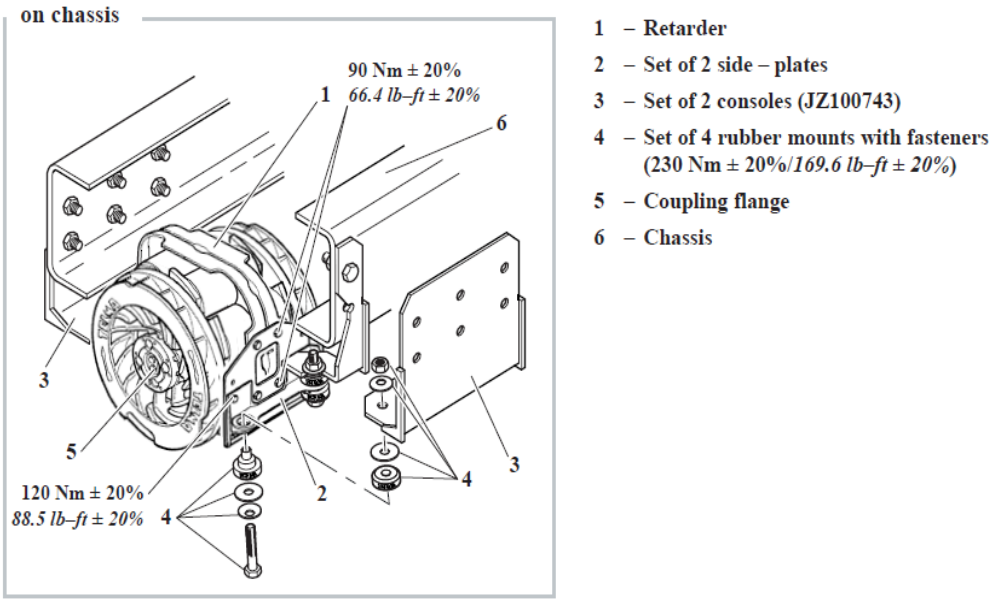
Stator ve rotorlar koaksiyel biçimde karşılıklı olarak monte edilir, aralarındaki hava boşluğu rotorları statordan ayırarak sürtünmeyi önler. Stator indüktör işlevini görür, içlerinden kesintisiz elektrik akımı geçerken rotorlarda Foucault akımları üretilmesi için gerekli olan manyetik alanları oluşturan bir çift elektromıknatıstan oluşur. Rotorlar indüklenen işlevi görür. Özel olarak tasarlanmış iletken bir malzemeden üretilen rotorların içinden Foucault akımları geçerken, stator tarafından üretilen manyetik alanlardan geçerler, bu sırada tahrik mili dönmelerini sağlar. Tanım gereği, Foucault akımları iletken bir metal kütle içinde oluşurken, bu metal kütle değişken bir manyetik alana yerleştirilmiştir. Telma marka indüksiyon frenleri söz konusu olduğunda, rotorların tabi olduğu manyetik alanın değişkenliği bunların dönmesiyle elde edilir. Foucault akımları manyetik akım etrafında döner, bunlara ayrıca girdap akımları da denir. Rotorda Foucault akımlarının oluşması, rotorun dönmesini engelleyen Laplace kuvvetlerinin ortaya çıkmasına neden olur. Bu şekilde üretilen ve tahrik miline etki eden fren torku dalgıç elektrik motorunun yavaşlamasını sağlar. Foucault akımları rotor sıcaklığının kademeli olarak artmasına yol açar, rotorlar bu sıcaklığı havalandırma ile tahliye eder. Telma indüksiyon frenleri sayesinde, döner mili etkin bir şekilde sürtünmesiz ve aşınmasız olarak yavaşlatmak mümkündür.



Şekil 3.14. Test sisteminde kullanılan elektro manyetik frenin görünümü



Şekil 3.15. Test sisteminde kullanılan elektro manyetik frenin solidworks çizimi



Şekil 3.16. Test sisteminde kullanılan elektro manyetik frenin 2D görünümü

Şebeke Analizörü: Enerji analizörü elektrik sistemlerinde gerekli parametreleri ölçen ve bu değerleri kayıt eden elektronik cihazlardır. Enerji analizörleri günümüzde birçok uygulamada kullanılabilir. Kullanım alanları genel olarak fabrikalar, elektrik dağıtım merkezleri, elektrikli sulama vs. kısaca orta ve yüksek

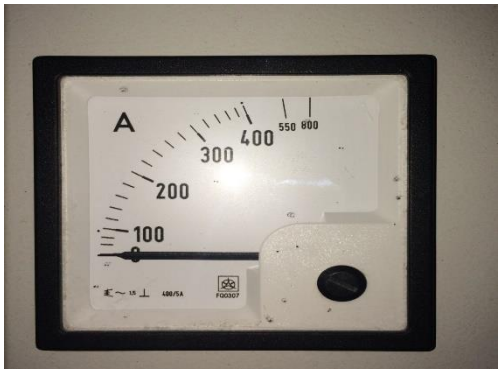
gerilimin kullanıldığı her yerde kullanılabilir. Bir enerji analizörü tek fazlı-üç fazlı sistemlerin RMS değerlerini, faz-nötr & faz-faz gerilimlerini, nötr akım, toplam akım, faz akımlarını, güç faktörünü, anlık aktif gücü (W), anlık görünür gücü (VA), reaktif gücü (VAr), frekansı (Hz), ortalama ve maksimum güçleri, harmonik bozulmayı, saatte harcanan aktif gücü (Wh), indüktif reaktif enerjiyi (kVArh veya MVArh), kapasitif reaktif enerjiyi (kVArh veya MVArh) ve faz açıları gibi birçok parametreyi ölçüp kullanıcıya sunar. Deney düzeneğin elektrik analizörü elektriksel karakteristiklerin ölçümünde kullanılmıştır. Kullanılan elektrik analizörünün ekran ara yüzü Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Deney düzeneğinde kullanılan elektrik analizörünün ekran ara yüzü

Analog Ampermetre: Yapım amaçlarına göre birkaç Miliamper'den yüzlerce Amper'e kadar ölçüm yapabilen araçlardır. Bu araçlar ile DC veya AC akım ölçümü olabilmektedir. Gerilim ölçümünü de beraber yapan ölçü türüne de (dirençle beraber) Wattmetre adı da verilmektedir. Üzerinde büyük akım değerleri ölçüleceğinde; düzenek içinden ölçülecek akımın bir bölümü geçirilir. Akımın geri kalanının büyük bir bölümünü ise aygıta paralel olarak bağlanan bir şönt devresi taşınır. Sistemde şebeke analizörü kullanılarak zaten akım değerleri ölçülmektedir. Analog ampermetre ayrıca kullanılmasının sebebi akım dalgalanmasının analog ampermetre

daha kolay ve daha iyi gözlenebilmesinin yanında dijital verilerin kontrol edilmesidir. Kullanılan analog ampermetre Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Deney düzeneğinde kullanılan analog ampermetre

Varyak (Ayarlı oto transformatör): Ayarlı oto transformatörlerde tek sargı bulunurken 2 adet çıkış ucu bulunur. Bunların yanı sıra kademelerin sayısı değişkenlik gösterebilir. Genelde karşılaşılan kademe sayısı ise en az 3 şeklindedir. Bu 2 çıkış ucundan birine giriş voltajı uygulanırken diğer uçtan da elde edilmek istenen çıkış voltajı alınır. Akım direkt olarak girişten çıkışa doğru bir yol izler. Bu aktarım ise endüktif bir şekilde gerçekleşir. Giriş kısmı voltaj kaynağına veya genellikle şebekeye bağlanırken, çıkış kısmı ise ya kullanıma hazır halde uçlara ya da direkt olarak yüke bağlanır. Deneysel ölçümlerde varyak test düzeneğinin tüm ölçümlerde aynı koşulların sağlanabilmesi için voltaj değerinin sabit tutulmasında kullanılmıştır.

Güç Trafosu: Genel olarak trafolar diğer bir adıyla da transformatörler bir elektrik devresinde gerilim veya akımı indirmek veya yükseltmek için kullanılır. Elektronikte ise esas olarak farklı devrelerdeki yükselticileri birleştirmek, doğru akım dalgalarını daha yüksek bir değerdeki alternatif akıma çevirmek ve sadece belirli frekansları iletmek için kullanılır. Kullanılan trafo, test ünitesi için özel motorları ve standart dalgıç motorları test edebilmek amacıyla özel olarak üretilmiştir. Söz konusu trafoda 380 Volt giriş, çıkış ise isteğe bağlı 460, 525, 660, 800 ve 1000 Volt olarak ayarlanabilmektedir.

Deney ölçümlerin dijital ortama aktarımı ve dijital kontrolü: Dalgıç pompa deneylerinde pompanın performans yani çalışma eğrilerinin tespiti için basınç ve debi değerlerinin sık sık değiştirilmesi gerekmektedir. Ancak bu şekilde pompanın hangi aralıklarda daha verimli çalıştığı anlaşılabilir. Gerek debimetre gerekse basınç sensörü ve güç analizörü üzerindeki değerleri analog okuyup not edilmesi ve kontrolü ölçümcüden kaynaklanacak önemli ölçüm hatalarına sebep olabilir. Deneysel ölçümde önemli hatalara neden olabilecek bu olumsuzlukları ortadan kaldırabilmek için dijital verilerin kayıt edilmesi ve kontrol için bir kontrol ünitesi geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrol ünitesi Şekil 3.19.'de gösterilirmiştir.



Şekil 3.19. Geliştirilen kontrol ünitesi.

Test edilen dalgıç asenkron motorların verilerin görüntülenmesi ve okuma hatalarını minimize edebilecek basitlikte bir ara yüz de geliştirilmiştir. Geliştirilen ara yüzün ekran görüntüsü Şekil 3.20'de gösterilmiştir. Ara yüzden okunan veriler dijital olarak test raporuna not edilmiş böylelikle voltaj, akım, mil gücü, aktif güç, tork, motor devri, açısal hız, motor içindeki suyun sıcaklığı, motorun iç basıncı ve

motor verimini bize bir çıktı olarak sunmaktadır. Alınan verilerden motor performans eğrileri otomatik olarak çıkarılıp birbiri ile ilişkilendirilip değerlendirme yapılır. Ara yüzden alınan verilerin yanı sıra kendimiz de ölçülen aktif güç, mil gücü, açısal hız ve motor verimini teorik olarak hesaplanıp deneysel veriler ile karşılaştırıldı. Deneysel ve teorik olarak elde edelin aktif güç, mil gücü ve motor verimi veriler Ek2'de sunulmuştur.



Şekil 3.20. Verilerin okunması için geliştirilen ara yüzün ekran görüntüsü

3.4. Nümerik Metodoloji

Akışkanlar mekaniği uygulamalarında akış alanının deneysel veya nümerik olarak analizindeki en büyük zorluklardan biri hem akış (u, v, w, ρ, μ) hem de termodinamik (T, P, h, k) parametrelerin birlikte değerlendirilmesindeki zorunluluktur. Bir diğer önemli zorluk ise geometriye nazaran ihmal edilebilecek büyüklükteki bir geometrik farkın hesaplama alanı üzerindeki dramatik etkisidir. Bu nedenler herhangi bir akış alanının optimal tasarımının deneysel olarak araştırılması maliyet açısından özellikle küçük ve orta ölçekli firmalar için neredeyse imkansızdır. Günümüzdeki akış uygulamaları için optimal tasarım parametrelerinin saptanmasında izlenen genel trend belli parametreleri deneysel yöntemler ile

doğrulanmış nümerik (CFD) yöntemlerini kullanmaktır. Bu tez çalışmasında da optimal tasarım için söz konusu strateji izlenmiştir. Akış alanın nümerik simüle eden Fluent, OpenFoam, CFX v.b. birçok ticari veya açık kodlu paket CFD programları bulunmaktadır. Bu programlar esasen herhangi bir akışı tanımlayan süreklilik, momentum ve enerji denklemleri nümerik yöntemler ile çözme prensibine dayanırlar. Bu tez çalışmasında akış alanının simülasyonunda Fluent paket programı kullanılmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde sırasıyla nümerik simülasyonları tanımlayan temel matematiksel modeller, simülasyonlarda izlenen strateji ve izlenen strateji yönelik yapılan çalışmalar sunulacaktır.

Herhangi bir akış alanı için kütlenin korunumu prensibine dayanan süreklilik denklemi (Türbülans akış);

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3.8}$$

şeklindedir. Momentum korunumuna dayanan momentum denklemi ise (x-yönünde);

$$\rho\left(\bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right) = X_f - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2}\right) - \rho\left(\frac{\partial u'u'}{\partial x} + \frac{\partial u'v'}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial u'w'}{\partial z}\right) \tag{3.9}$$

şeklindedir. Denklemdeki X_f, x yönündeki birim hacme düşen kuvvetleri göstermektedir. Bu denklemlerin akış alanın tanımlayan sınırlar çerçevesinde çözümü hesaplanacak akış alanının tanımlanması mümkündür. Söz konusu nümerik çözümlerdeki karşılaşılabilecek en büyük zorluk özellikle momentum denkleminin ikinci dereceden kısmı diferansiyel denklem karakterinde olmasıdır. Denklem (3.9) verilen momentum denkleminin çalkantı hızlarını tanımlayan terimdeki reynolds gerilimleri tek boyutlu bir akış için yaygın olarak;

$$-\rho u'v' = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \tag{3.10}$$

şeklinde tanımlanır (Boussinesq teoremi). Bu tanımlamanın sonucu olarak kayma gerilmesi;

$$\tau = (v + v_t)\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \tag{3.11}$$

şeklinde olur. Denklemlerdeki μ_t dinamik eddy viskoziteyi ve v_t kinematik eddy viskozitesini göstermektedir. Eddy viskozitesinin akışın değil akış alanının bir özelliği olması CFD simülasyonları için en temel zorluktur. Eddy viskozitesinin tanımlanmasındaki söz konusu zorluğu aşmak amacıyla literatürde geliştirilmiş birçok türbülans modeli bulunmaktadır (Gao ve ark., 2017, Argyropoulos ve Markatos, 2015, Bradshaw, 1996). Herhangi bir CFD simülasyonu için en kritik süreç akış alnına en uygun türbülans modelinin seçilmesidir. Tez çalışmasında simülasyonların hesaplama süreçlerinde seçilen türbülans modelin detayları olarak aşağıda verilmiştir.

Herhangi bir CFD simülasyonu akış alanının tanımlanması, simülasyonların yürütülmesi ve simülasyon sonuçlarının değerlendirmesi şeklinde üç temel aşamadan meydana gelir. Tez çalışmasın söz konusu üç temel aşama çeşitli paket programları çerçevesinde yürütülmüştür. Kullanılan paket programları ilgili bölümde sunulacaktır. Yukarıda sözü edilen üç temle aşma referans olmak üzere simülasyonlarda izlene süreçler şematik olarak Çizelge 3.2'de verilmiştir. Çizelgeden anlaşılacağa üzere tez çalışması kapsamında CFD simülasyonları 10 adım da gerçekleştirilmiştir.

3.4.1. Katı model tasarımı

Dalgıç veya herhangi bir motor hareket ve malzeme açısından bir çok alt bileşene sahip olduğundan tek bir parça şeklinde tasarlanamaz. Tez çalışmasın da akış yanı sıra termal analiz yapıldığından akış alanı yansıra tüm bileşenlerin modellenmesi gerekir. Referans alınan motorun bileşenlerinin fotoğrafı Şekil 3.21'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği söz konusu motor altı tane temel bileşenden meydana gelmektedir. Konstrüksiyonun kompleksliği yanı sıra farklı eksenlere sahip olmasından dolayı katı model tasarımlarında birçok hata söz konusu olabilecektir. Bu

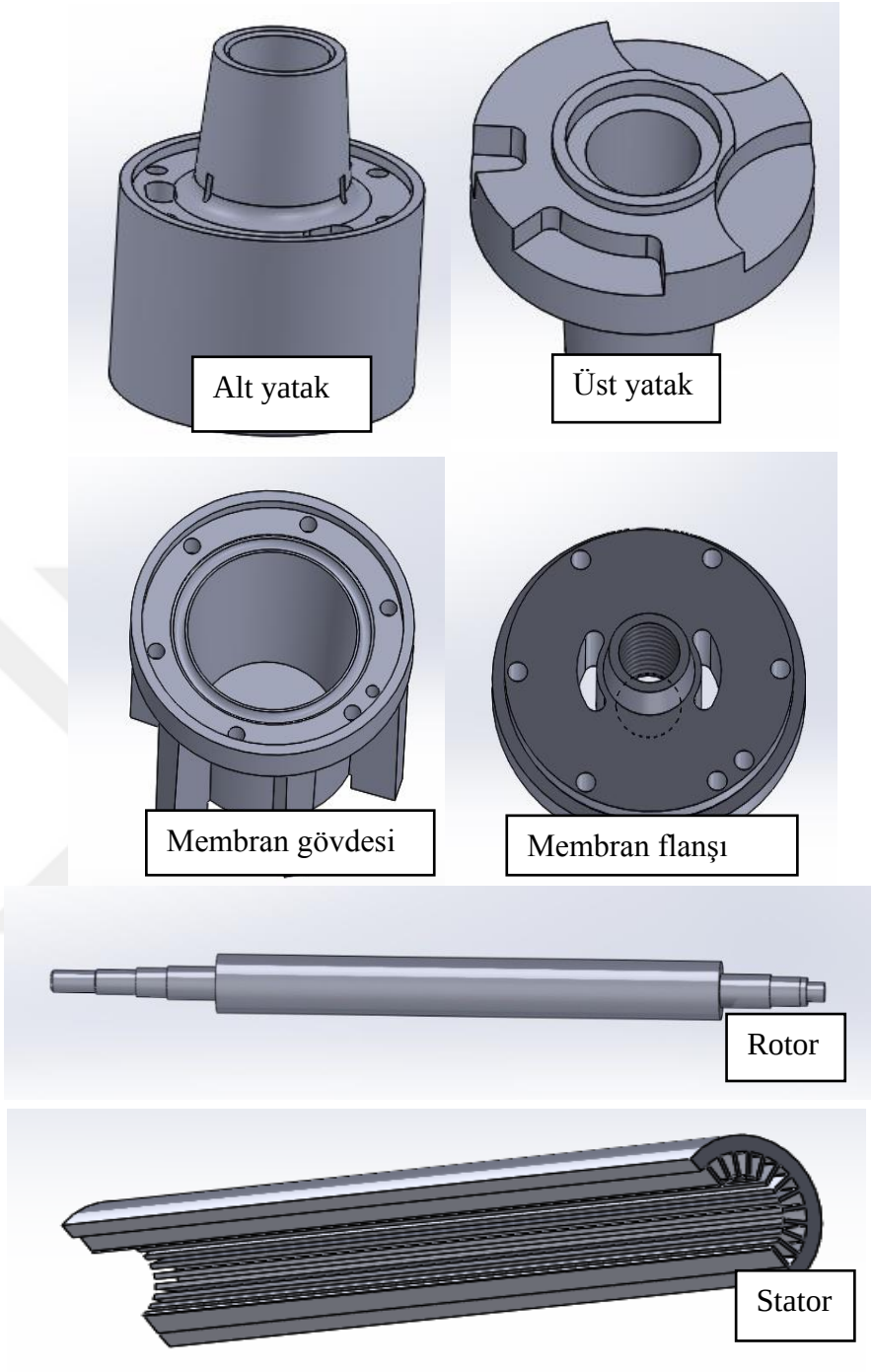
hataları minimize etmek amacıyla, Başkent CADCAM firmasından optik tarama hizmeti alınmıştır. Bunun sonucu olarak söz konusu altı bileşen ayrı ayrı taranarak katı modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan katı modeller Şekil 3.22'de gösterilmiştir. Şekilde görülen altı bileşen SolidWorks ortamında montaj edilerek Şekil 3.23'de gösterilen motor katı modeli elde edilmiştir. Şekilde görülen montaj edilmiş komple motor SolidWork programının boşaltma özelliği kullanılarak akış alanı elde edilmiştir.

Çizelge 3.2. Tez çalışmasında CFD simülasyonlarında sırasıyla izlenen süreçler.

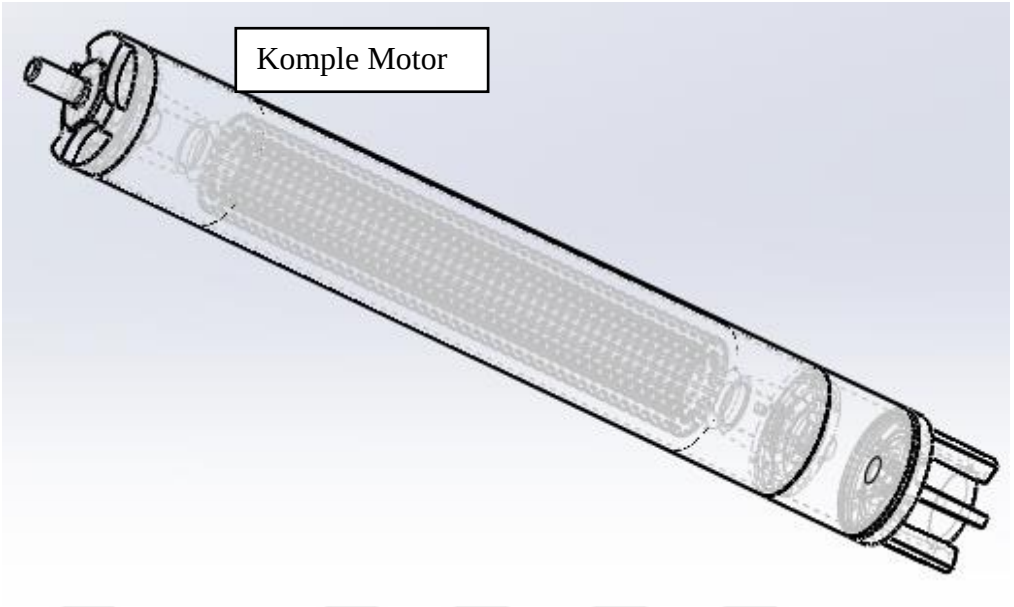
	Adımlar	**CFD simülasyon aşamaları**
Akış alanının tanımlanması	1	Akış alnının tanımlanması
	2	Akış alanı çerçevesinde katı model tasarımı
	3	Sınırlar ve ilk koşulların belirlenmesi
	4	Belirlenen ilk koşular kapsamında mesh yapısının tasarımı
	5	Nümerik hesaplamalar için gerekli sınır şartlarının akış alanı çerçevesinde belirlenmesi
Simülasyonların yürütülmesi	6	Simülasyon stratejisinin benzer çalışmalar çerçevesinde belirlenmesi
	7	Nümerik hesaplamaların yürütlmesi
Sonuçlarının değerlendirmesi	8	Nümerik hesaplama sonuçlarının değerlendirilmesi
	9	Nümerik sonuçların deneysel ölçümler veya benzer çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılması
	10	CFD simülasyonunda yürütülen hesaplamaların fark mesh yapılarında tekrarlanarak meshten bağımsız sonuçlar elde edilmesi



Şekil 3.21. referans seçilen 6 inç 30 HP motor bileşenleri



Şekil 3.22. Referans seçilen 6 inç 30 HP motor bileşenlerin katı modelleri



Şekil 3.23. Referans seçilen 6 inç 30 HP motor bileşenleri montajı

3.4.2. Türbülans model seçimi

Türbülans akışın temel karakteristiği akış hızında meydana gelen çalkantılardır. Bu çalkantılar momentum, enerji gibi niceliklerde çalkantılar meydana gelmesine neden olur. Söz konusu çalkantılar düşük skalada ve yüksek frekansta olduklarından direkt nümerik yöntemler ile hesaplanmaları, çok büyük bilgisayar kapasitesi ve hesaplama zamanı ile ancak mümkündür. Bundan dolayı pratik uygulamalarda, büyük bir çoğunlukla direk nümerik simülasyonlar yerine korunum denklemlerinin ortalama formu veya farkı süreçler ile küçük skalaların elimine edildiği hesaplama yükü ve zamanlaması daha düşük yöntemler kullanılır. Ancak söz konusu yöntemler denklemlerin motife edilmesinden dolayı bazı ek parametrelerin ortaya çıkmasına neden olur. Denklemlerin motife edilmesi ve ortaya çıkan parametrelerin tanımlanma süreçleri türbülans modelleri olarak adlandırılmaktadır.

Tez çalışmasında, simülasyonların yürütüldüğü ticari fluent programı k-epsilon, SST k-ω, Detached Eddy Simulation, Low Re k-epsilon, RNG k-epsilon gibi birçok türbülans model seçeneği sunmaktadır. Bu tez çalışmasında nümerik simülasyonlarda k-ε türbülans modeli seçilmiştir. Literatürde yapılan birçok çalışmada k-ε türbülans modelinin ters basınç gradyanı ve ayrılmaların olduğu

santrifüj pompalarda deneysel ölçümlere en iyi uyum gösterdiği saptanmıştır (Li ve ark. (2016), Zhu ve ark. (2016), Zhou ve ark., (2018), Spence ve Amaral-Teixeirab**,** **(**2008). İki denklemli ve Boussinesq teoremini temel alan k-ε türbülans modelinde eddy viskozitesi:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{K^2}{\varepsilon} \tag{3.12}$$

Denklemdeki C_μ ampirik bir sabittir. Denklemdeki K ve ε momentum denkleminden türetilir. Türbülans kinetik enerjisi(TKE):

$$\rho U_i \frac{\partial K}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K}\right)\frac{\partial K}{\partial x_i}\right] - \rho\varepsilon + \mu_t\left[\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right]\frac{\partial U_j}{\partial x_i} \tag{3.13}$$

Türbülans enerji dağılımı(TED):

$$\rho U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = C_{1\varepsilon}\left(\frac{\varepsilon}{K}\right)\mu_t\left[\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right]\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial K}{\partial x_i}\right] - C_{2\varepsilon}\rho\left(\frac{\varepsilon^2}{K}\right) \tag{3.14}$$

Bu denklemlerdeki ε σ_K, σ_ε, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, model sabitleridir. Simülasyonlarda bu sabitler için seçilen değerler Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Seçilen Türbülans model sabitleri.

σ_K	σ_ε	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ
1	1.3	1.44	1.92	0.09

3.4.3. Mesh tasarımı

Nümerik simülasyonlarda, hesaplama alanını tanımlayan matematiksel bağıntıların çözülmesinde, sınır şartları çerçevesinde tüm hesaplama alanı için çözme yerine, hesaplama alanını çok küçük elemanlar(mesh) ile tanımlayıp adım adım

çözme yöntemi tercih edilir. Bu tercih özellikle pratik mühendislik uygulamalarında bir zorunluluktur. Söz konusu zorunluğunun sebebi ise hesaplama alanı boyunca geometriden veya hesaplama alanını tanımlayan büyüklüklerin özelliklerinden dolayı meydana gelebilecek olası değişmeleri, hesaplama sürecine dahil edebilmek içindir. Çünkü özellikle mühendislik uygulamalarında hesaplama alanındaki herhangi bir parametredeki çok küçük bir değişim, simülasyon sonucundaki etkisi çok büyük olabilmektedir. Öte yandan denklemleri tüm hesaplama alanı boyunca adım adım çözme, adım sayısına bağlı olarak önemli derece ek hesaplama yüküne ve zamanına neden olur. Dolayısıyla hesaplama alanının mesh denilen küçük elemanlar ile tanımlanma süreci hem simülasyonun sonucu hem de simülasyonun hesaplama yükü ve zamanı açısından en kritik aşamadır. Özellikle akış uygulamalarında, hesaplama alanı boyunca katı yüzeyler üzerinde meydana gelebilecek sınır tabaka gelişmesi, ayrılması ve de, akış yapısındaki küçük skalada ve yüksek frekansta dalgalanmalar, yukarıda sözü edilen kritik aşama için çok daha büyük önem arz etmektedir.

Bir akış alanında mesh tasarımında dikkate alınan öncelikli parametre türbülans sınır tabakada meydana gelen ve akış ile katı yüzey arasındaki ilişki tanımlayan temel parametrelerden biri olan, laminer alt tabakasıdır. Söz konusu bölgede y^+ değeri 1-5 arasındadır. Nümerik hesaplama sürecinin akış yapısını tanımlaya bilmesi ancak birkaç düğüm noktasının bu bölgede yer alması ile mümkündür. Laminer tabaka içerisinde birkaç düğüm bırakarak yapılacak mesh tasarımı hesaplama ve yükü ve zamanını önemli derece artırmaktadır. Mühendislik uygulamalarında genellikle laminer alt tabaka bölgesi duvar fonksiyonu denilen matematiksel modeller ile tanımlayıp, hesaplama yükü ve zamanı azaltma tercih edilmektedir. Duvar fonksiyonları;

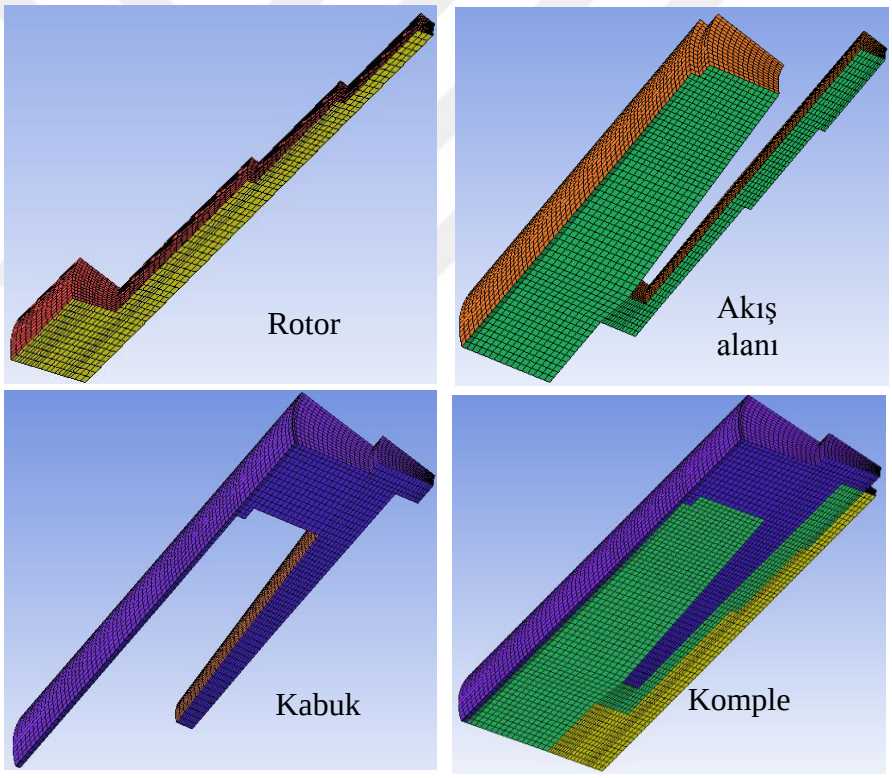
$$U^+ = \frac{1}{K} log y^+ + B \tag{3.15}$$

şeklinde olup, denklemdeki *B* ve *K* türbülans modeline bağlı değişkenlik gösteren boyutsuz sayılardır. Denklemdeki U^+ ve y^+ sırasıyla;

$U^+ = U_0/\sqrt{\tau/\rho}, \quad y^+ = y\sqrt{\tau/\rho}//v$ şeklindedir. Denklemdeki U_0 ortalama hızı τ kayma gerilmesini, v kinematik viskoziteyi ve y yüzeyden itibaren ilk düğüm noktasının uzunluğunu göstermektedir. Bu tez çalışmasında duvara yakın bölge için

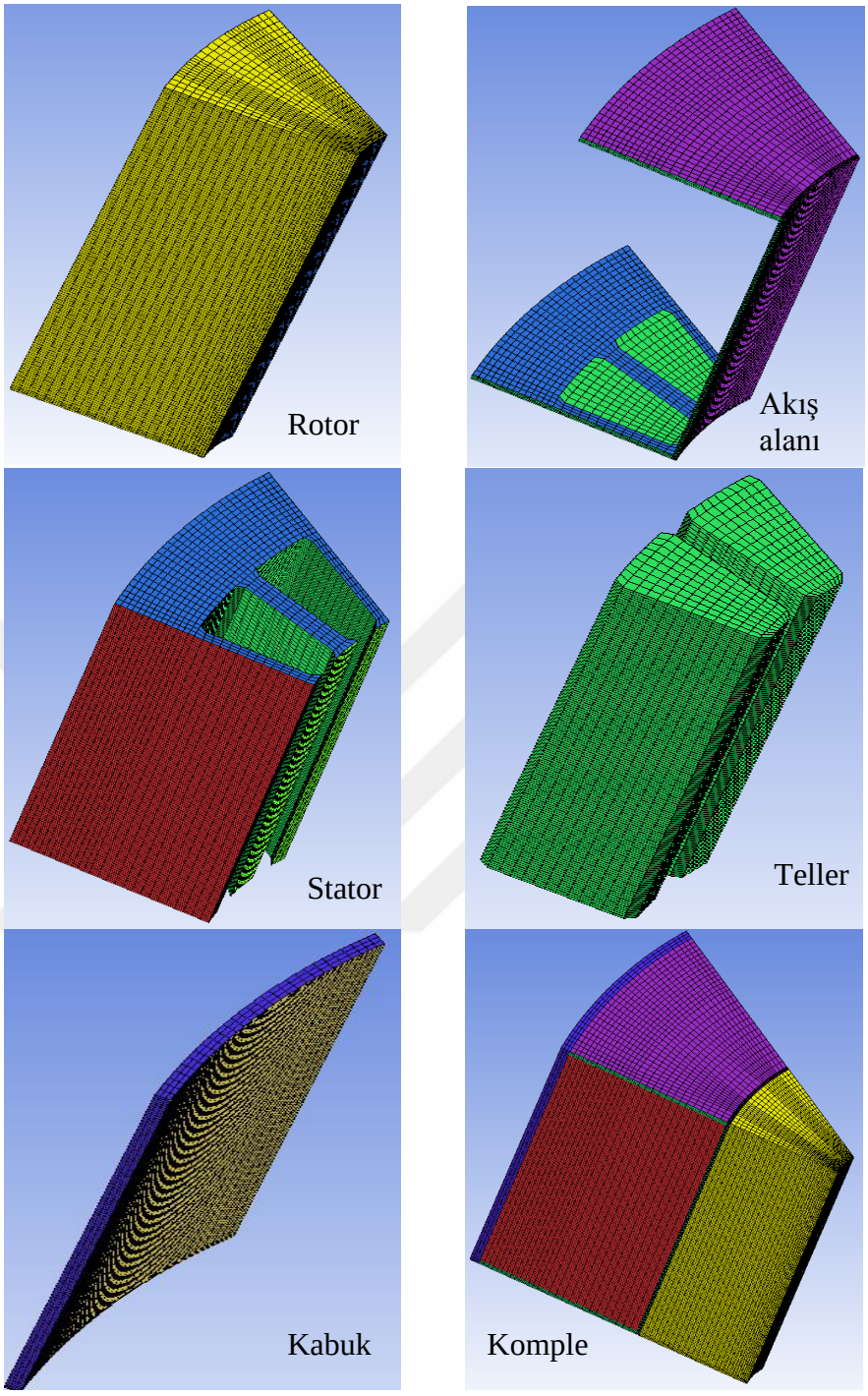
ölçeklenebilir duvar fonksiyonu kullanılmıştır. Seçilen türbülans modeline uygun mesh tasarımında dikkate alınan tasarım parametresi tüm yüzeylerden itibaren ilk düğüm noktasında $y^+<11$ olmasıdır. Söz konusu kriter dikkate alınarak mesh tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasında akış alnının kompleks yapısından dolayı hesaplama alanı (i) kuyu, motorun (ii) üst, (iii) orta ve (iv) alt kısmı olmak üzere dört bölge ayrılmıştır. Daha sonra nu dört farklı bölgeler fluent ortamında mesh interfaces metodu kullanılarak birleştirilmiştir. Motor üst kısmına dair yapılan mesh tasarımı Şekil 3.24'de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere motor üst kısmı rotor kabuk ve akışkan olmak üzere üç hesaplama alnından meydana gelmektedir.



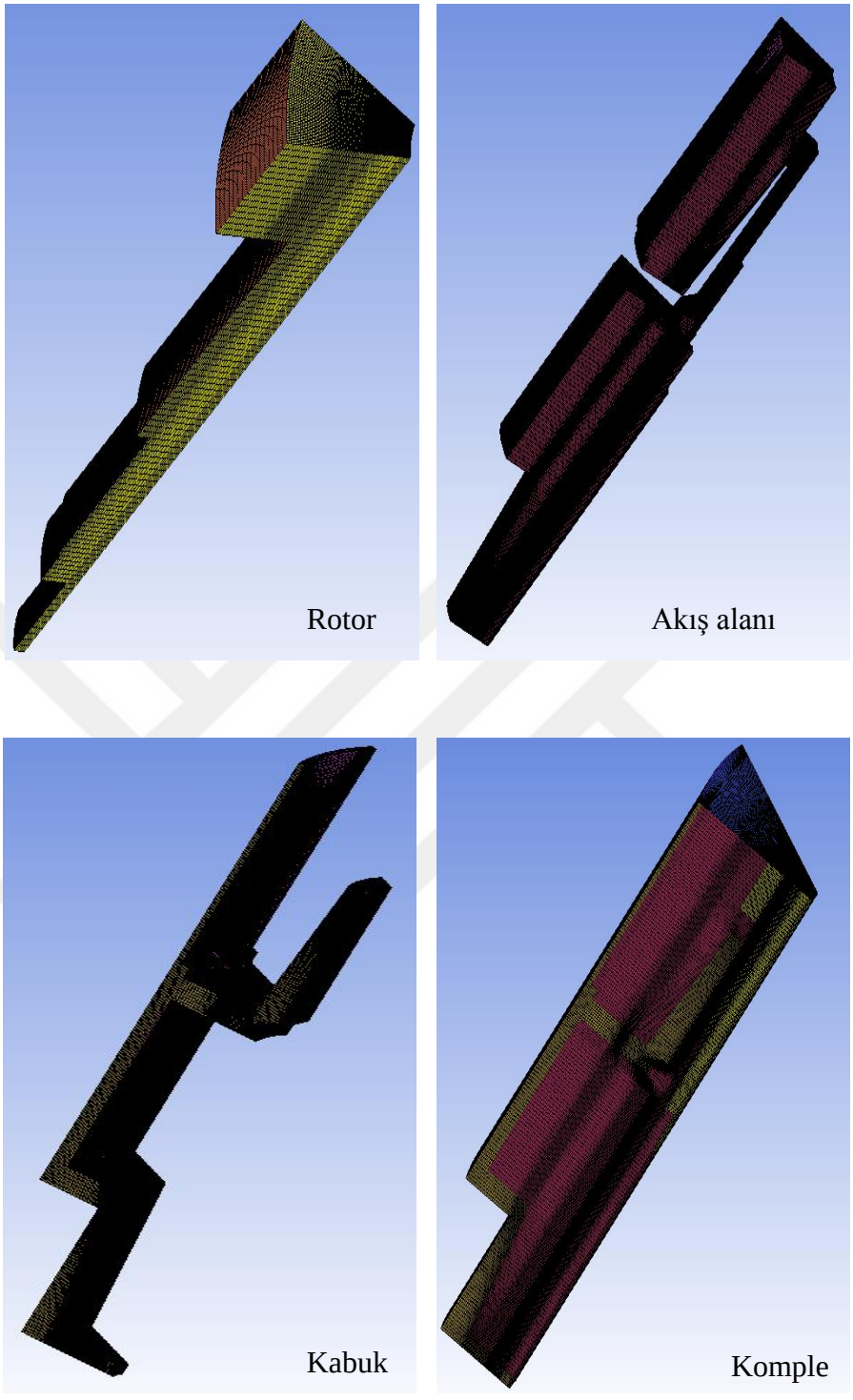
Şekil 3.24. Dalgıç motorun üst kısmının mesh tasarımı

Motor orta kısmına ait mesh tasarımı Şekil 3.25'de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere hesaplama alanı rotor, stator, bakır tel, kabuk ve akış alanı olmak üzere beş farklı bölgeden meydana gelmektedir. Tüm hesaplama alanları için mesh tasarımı blok stratejisi uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

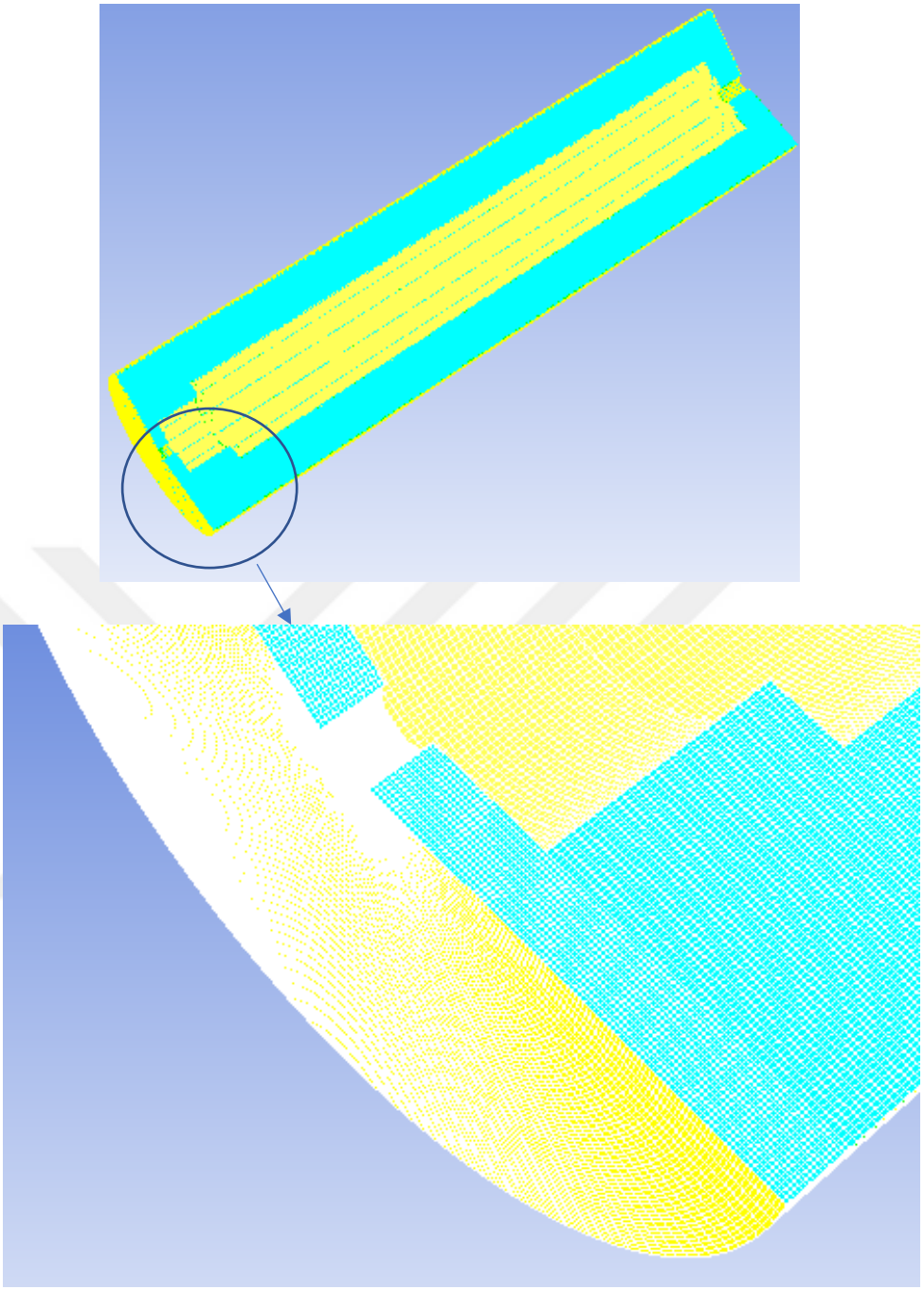


Şekil 3.25. Dalgıç motorun orta kısmının mesh tasarımı

Motorun alt kısmı için yapılan mesh tasarımı Şekil 3.26'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi motor üst kısmı gibi söz konusu kısım kabuk, rotor ve akış alanı olmak üzere dört bölgeden meydana gelmektedir.



Şekil 3. 26. Dalgıç motorun alt kısmının mesh tasarımı



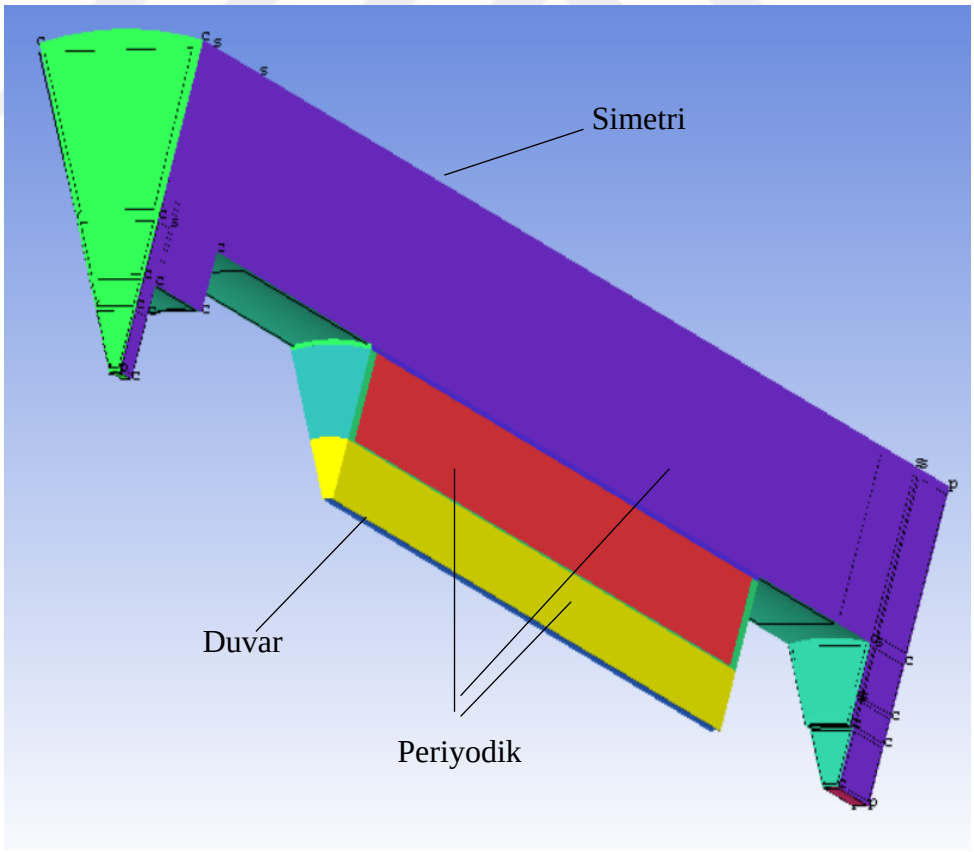
Şekil 3.27. Kuyunun mesh tasarımı

CFD simülasyonlarında motorun çalışma ortamı ile benzer koşullar sağlamak amacıyla kuyu akış alanı da tanımlanmıştır. Tanımlanan akış alanına ait mesh tasarımı Şekil 3.27'de gösterilmiştir. Mesh tasarımında mesh yoğunluğunun nedeni seçilen türbülans modeli ve duvar fonksiyonu için istenilen $11<y^+$ değerini sağlamaktır. Bu çerçevede farklı 10 durum için yürütülen 10 CFD simülasyonu

yapılan mesh tasarımlarında mesh sayısı yaklaşık 10-15.5 milyon mesh sayısı aralığında değişmektedir.

3.4.4. Sınır şartları

CFD simülasyonlarında sınır şartları deneysel ölçümlerdeki koşullar dikkate alınarak belirlendi. CFD simülasyonları hareketli referans bölgeleri (moving reference frame (MRF)) metodu kapsamında yürütülmüştür. Bu çerçeve Şekil 4. 24, 4.25 ve 4.26 görülebilecek rotor hareketli bölge olarak seçilmiş ve kendi ekseni etrafında farklı dev/dak değerleri için simülasyonlar yürütülmüştür. Bu çerçevede bir kısım sınır şartlarının akış alanı üzerindeki konumları Şekil 3.28'de gösterilmiştir. Şekilde anlaşılabilir olması için yalnızca kuyu ve motorun orta kısmı gösterirmiştir. Şekilde görüleceği üzere periyodik sınır şartları seçilerek hesaplama alanı 1/12 oranında küçültürmüştür.



Şekil 4.28. Hesaplama alanındaki bir takın sınır şartları

Motor verimi göz önünde bulundurularak motorun kayıplardan dolayı 4.4 kW ısı ürettiği varsayılmıştır. Bu ısının %40 rotorun % 60 statorun ürettiği simülasyonlarda yapılan diğer bir kabuldür. Bu kabuller sonucunda ek kaynak (source term) metodu kullanılarak ilgili hesaplama alanlarına ısı üretim miktarları girilmiştir. Hesaplama alanındaki tüm yüzeylerde kaymama sınır şartı $(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0)$ uygulanmıştır. Yüzeylerdeki termal şartlar açısından ilk simülasyon başlangıcında yüzey sıcaklığının 300 K olduğu varsayılmıştır. Tez çalışması kapsamında yürütülen 5 CFD simülasyonu için ilk ve sınır şartları Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Seçilen Türbülans model sabitleri

	Yüzey sıcaklıkları (K)	Motor dış yüzeyleri boyunca akış hızı (m/s)	Motor içerisindeki sıvının devir daimi için 5mm çapa sahip bir kesitten suyun giriş hızı (m/s)	Açısal hız (dev/dk)	Mesh sayısı
1	300	0	0	2900	9.321 milyon
2	300	0	0	2500	9.520 milyon
3	300	0	0	2000	9.855 milyon
4	300	2	0	2900	13.78 milyon
5	300	0	1	2900	12850 milyon

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Dalgıç pompalar elektrik motoru ve pompa olmak üzere iki ana parçadan meydana gelmektedir. Dalgıç pompalardaki önemli sorunlardan biri; pompa sadece akıştan kaynaklanan dirençlere maruz kalırken, motor hem akış hem de elektriksel kayıplardan kaynaklanan dirençlere maruz kalmaktadır. Bunun sonucu olarak pompaya nazaran motorun işletme maliyeti daha yüksek olurken motor ömrü de çok daha düşük olmaktadır. Konu ile ilgili üretim yapan firmalara pompadan daha ziyade motor talebi olması bu sonucu destekleyen en önemli parametredir. Dalgıç pompalarda motoru tahrik eden enerjinin bir kısmı pompaya mekanik enerji olarak ilettirirken kalan kısmı motorda ısı ya dönüşmekte ve dolayısıyla motor sıcaklığını yükseltmektedir. Kritik motor sıcaklığı yaklaşık olarak 130 ^{0} C'dir. Bu kritik sıcaklık aşıldığında motor ömrü önemli derecede azaltmaktadır (Egidi ve ark., (2012)).

Bir AC motorun içerisindeki hareketli parçaların harekete gösterdiği direnç ve elektriksel kayıplar önemli derece ısı üretilmesine sebep olur ve bu ısı akışkan aracılığıyla motor konstrüksiyonuna iletilir. Yüksek performanslı motorlarda bazen bu ısı motorun güvenilir çalışma sıcaklığı sınırlarını aşar. Tasarımcıların birincil hedefi motor iç sıcaklığı ile motor dış çevre sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkını minimize etmektedir. Yukarıda değinilen sorunları çözmek amacıyla son yıllarda geliştirilmiş birçok motor termal analiz metodu bulunmaktadır. Bu metotlar ile ilgili detaylı açıklamalar önceki çalışmalar bölümünde sunulmuştur. Tez çalışmasında referans olarak seçilen dalgıç pompa motorunda yaygın olarak kullanılan soğutma sistemi stator ve rotor boşluğunun sıvı ile doldurulmasıdır. Tamamen sıvıya gömülü olan motorun iç basıncı 4 bara ulaşınca motorun üst yatağında bulunan bir çek valf yardımıyla motordaki basınç dengesi sağlanmaktadır.

Tez çalışması kapsamında, referans alınan endüstriyel bir dalgıç asenkron elektrik motorunun içerisinde bulunan sıvının sıcaklığının motorun verileri üzerindeki etkisi, önceki bölümde sunulan deney seti ve ölçüm araç gereçleri ile

ölçülmüştür. Ölçümleri takiben CFD simülasyonları motorun üç farklı durumu için termal analizi yapılmıştır. Bu bölümde tez çalışması boyunca yürütülen deneysel ölçümlerin ve CFD simülasyonların sonuçları, detaylı grafikler ve sayısal veriler ile verilmiştir. Bu çerçevede ilk etapta deneysel ölçüm verileri sunulmuştur. Deneysel verilerin sunumundan sonra üç farklı tasarım durumu için yürütülen toplam 5 CFD simülasyon sonuçları sırasıyla verilmiştir.

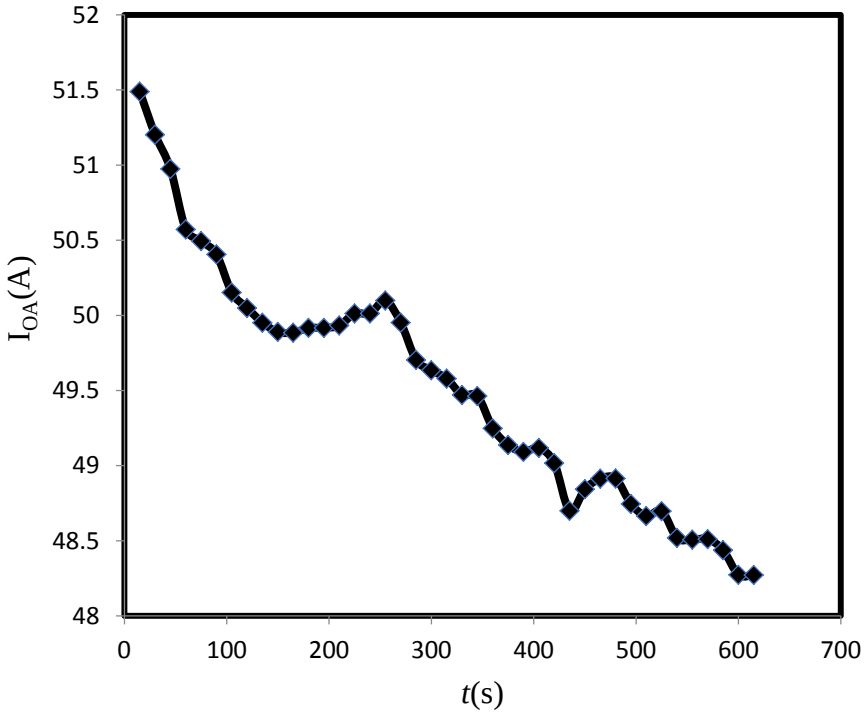
4.1. Deneysel Ölçümler

4.1.1. Dinamometre ölçümleri

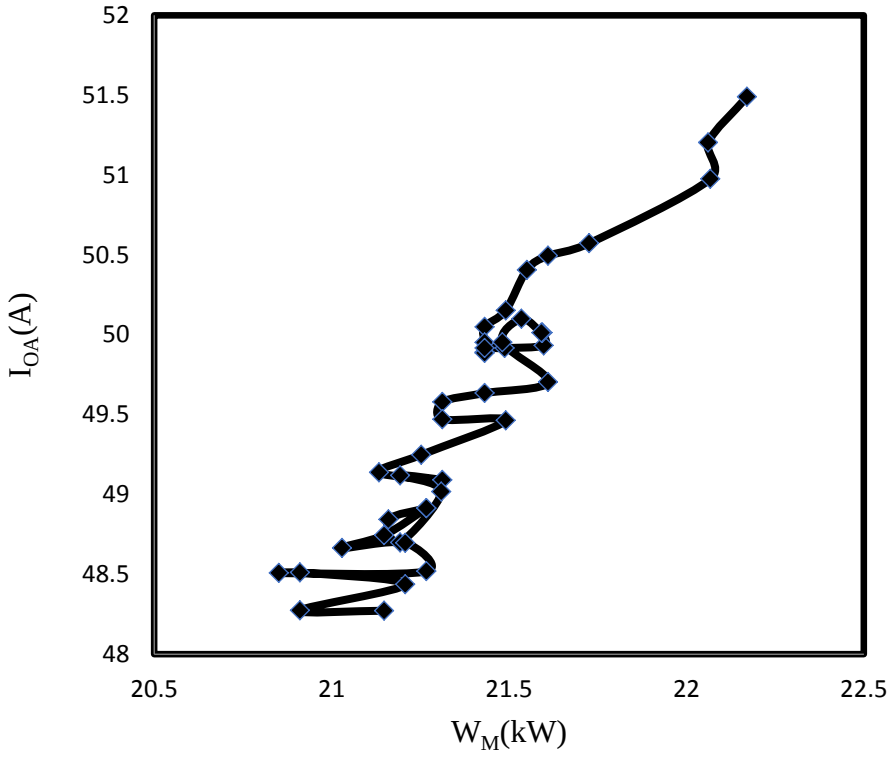
Bu bölümde Fırat Motor ve Pompa Elektrik San. Tic. Ltd. Şti tarafından üretilen 6 inç 30 HP DASM ilgili yürütülen deneysel ölçüm sonuçları sunulmuştur. Yürütülen deneylerde voltaj, akım, mil gücü, aktif güç, tork, motor devri, açısal hız, motor içindeki su sıcaklığı, motorun iç basıncı ve motor verimi ölçülmüştür. Yapılan detaylı ölçümler EK 1'de verilmiştir. Deneysel olarak elde edilen veriler ile teorik olarak hesaplanan veriler ise EK 2'de sunulmuştur. Bu bölümde motor içindeki suyun sıcaklığının motor verileri üzerindeki etkileri ve söz konusu etkinin motor performansı ile ilişkisi detaylı grafikler ile sunulmuştur.

Yapılan ölçümlerde referans alınan 6" 30 HP (22kW) DASM'nun deney sürecinde çektiği ortalama akımın zaman bağlı değişimi Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Testte kullanılan 22 kW gücündeki motorumuzun çekmesi gereken akım miktarı 49A iken Şekil 4.1'de görüldüğü üzere motorumuzun çektiği akım 51.5A olarak ölçülmüştür. Zamanla motorun çektiği akım miktarı dramatik olarak azalmakta bu dramatik düşüşün sonucu olarak motor gücüde önemli derecede düşecektir. Yine şekilden görüleceği üzere akımdaki düşüş gayri lineer bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu düşüşün mil gücü üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için ölçülen akım ile mil gücü arasındaki ilişki Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere mil gücünün 22 kW olduğu durumdaki akım miktarı 51.5A iken motorumuz 49A'lık akımında ise 21 kW değerinde olmaktadır. Yine Şekil 4.2'de görüleceği üzere akımdaki düşüşe bağlı olarak motor mil gücündeki düşüşte önemli derecede

salınımlar meydana gelmektedir. Yapılan ölçümlerde akımdaki % 2.9 düşün sonucunda motor mil gücü yaklaşık olarak % 4.5 düşmektedir.

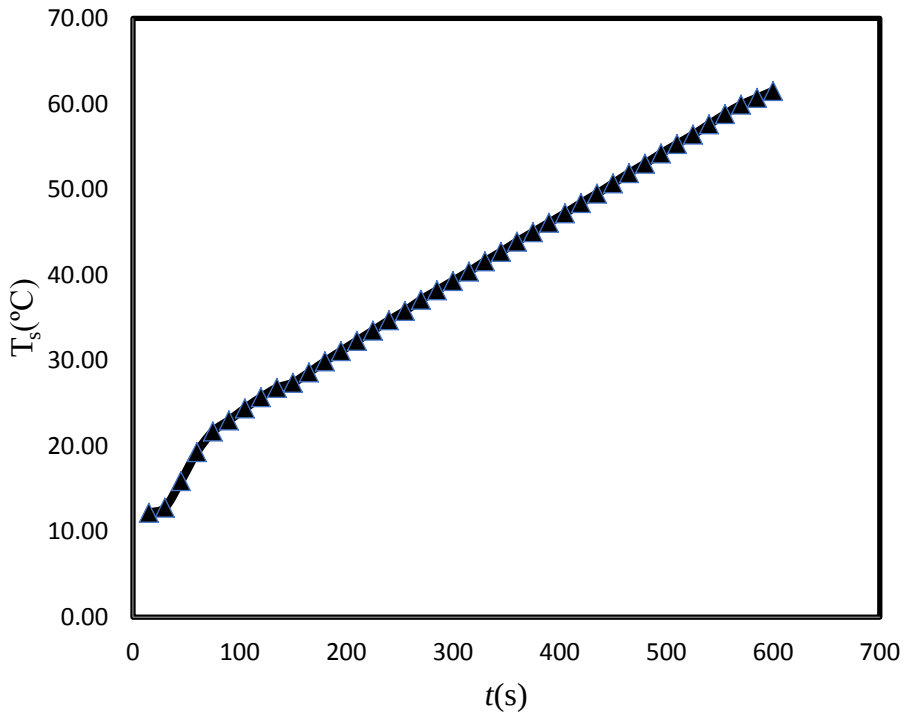


Şekil 4.1. DASM çektiği akımın zamana bağlı değişimi



Şekil 4.2. DASM çektiği akımın mil gücü üzerindeki etkisi

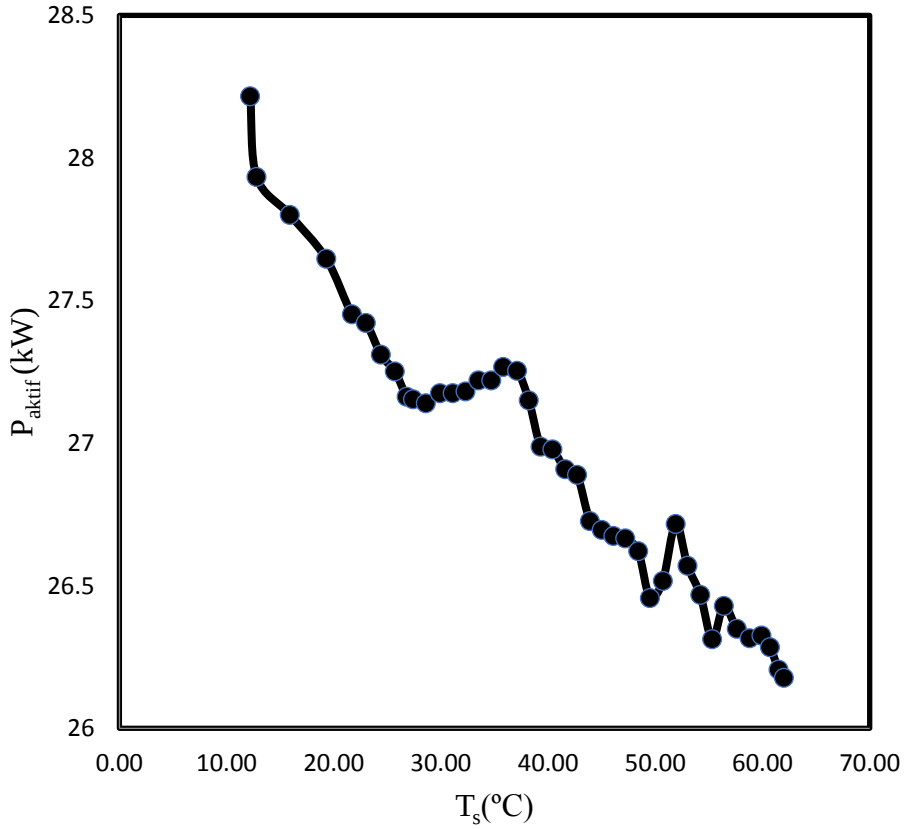
Dalgıç asenkron motorun klasik asenkron motorlarda ayıran bir özelliği motor yapısındaki farklı termal özelliklere sahip bileşenleri arasındaki termal iletişimi sağlayan bir sıvı ile doldurulmasıdır. Referans alınan dalgıç asenkron motorda sıvı olarak su + propilen glikol karışımı kullanılmaktadır. Kullanılan sıvının diğer bir işlevi hareketli parçaların yağlanmasıdır. Deney süreçlerinde motor içerisindeki su sıcaklığı ölçülmüştür. Motorun ilk kalkışından itibaren 600s boyuna motor sıvısının sıcaklığındaki zamana bağlı dağılım Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Şekil 4.3'de görüleceği üzere ilk kalkış anında yaklaşık 12 ^{0}C olan su sıcaklığı 600s sonunda dramatik olarak artmakta ve 61.5 ^{0}C ulaşmaktadır. İlk 10s eksponensel yükselen su sıcaklığı daha sonra lineer bir artış göstermiştir. Su sıcaklığındaki bu artış motor kayıplarından dolayı meydana gelen ısının bir sonucu olduğundan motorun çalışmasıyla birlikte üretilen ısının lineer bir artış gösterdiği öngörüsüne varılabilir.



Şekil 4.3. DASM motor sıvı sıcaklığının zaman ile değişimi

Motorun içerisinde bulunan sıvının sıcaklığının zamanla artması ile artmasının motor aktif gücüne etkisi de ölçüşmüştür. Yapılan ölçüm sonuçları şekil 4.4'de gösterilmiştir. Şekil 4.4'de görüldüğü motor ilk çalıştığında ürettiği aktif güç miktarı 28.2 kW iken zamanla motorun ısınması ile aktif güç miktarı 26.1 kW değerine kadar

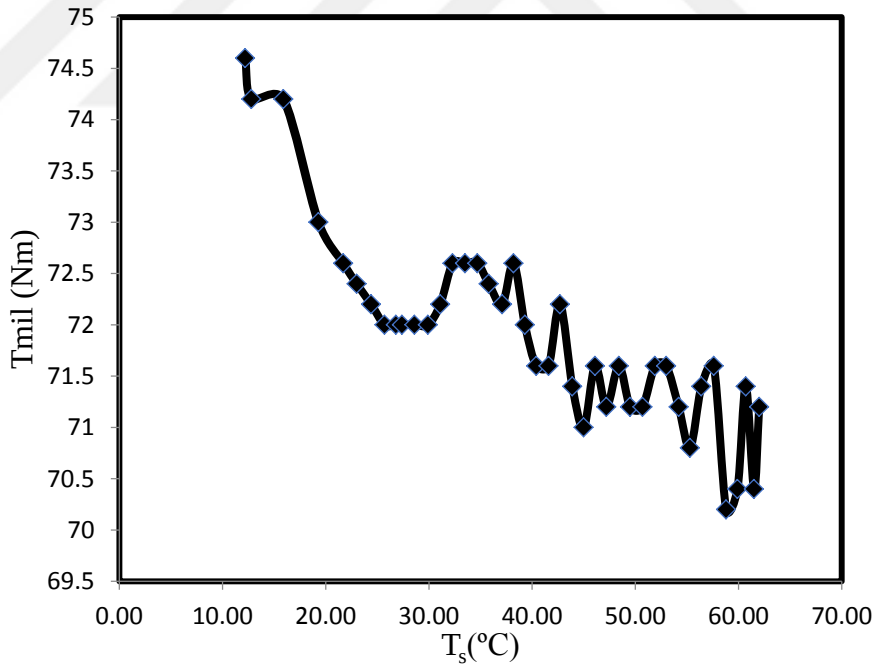
düşüş göstermektedir. Düşüş yaklaşık olarak %7.445 oranında meydana gelmektedir. Sonuç olarak motor ısısının artması ile motordaki aktif güç zamanla düşüş göstermektedir.



Şekil 4.4. DASM ürettiği aktif gücün motor sıcaklığı ile değişimi

Genel olarak, bir elektrik motorunun rotoru, stator tarafından oluşturulan bir manyetik alan içindedir. Manyetik alan rotor içinde bir akım oluşturur ve stator rotordaki manyetik alanların neden olduğu sonuç kuvvetin döndürmesine (dolayısıyla tork oluşumuna) neden olur. Mekanik güç çıkışını belirleyen iki önemli faktör tork ve hızdır. Tork; dönme eğilimi gösteren bir kuvvet ölçüsüdür. Genellikle pound-feet veya Newton-metre cinsinden ifade edilir. Kullanıcılar açısından motor performansını gösteren ana parametrede motor tork değeridir. Tekrarlanan çok sayıda deneysel ölçümler sonucunda ortalama olarak motor sıvısı sıcaklığına bağlı olarak motor torkunun gösterdiği eğilim Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Şekil 4.5'den görüleceği üzere ilk motor kalkışında yanı sıcaklık yaklaşık 12 ^{0}C iken motor torku 74.6 Nm 600s sonunda sıcaklık 61.5 ^{0}C ulaştığında tork değeri 70.2 Nm derine kadar

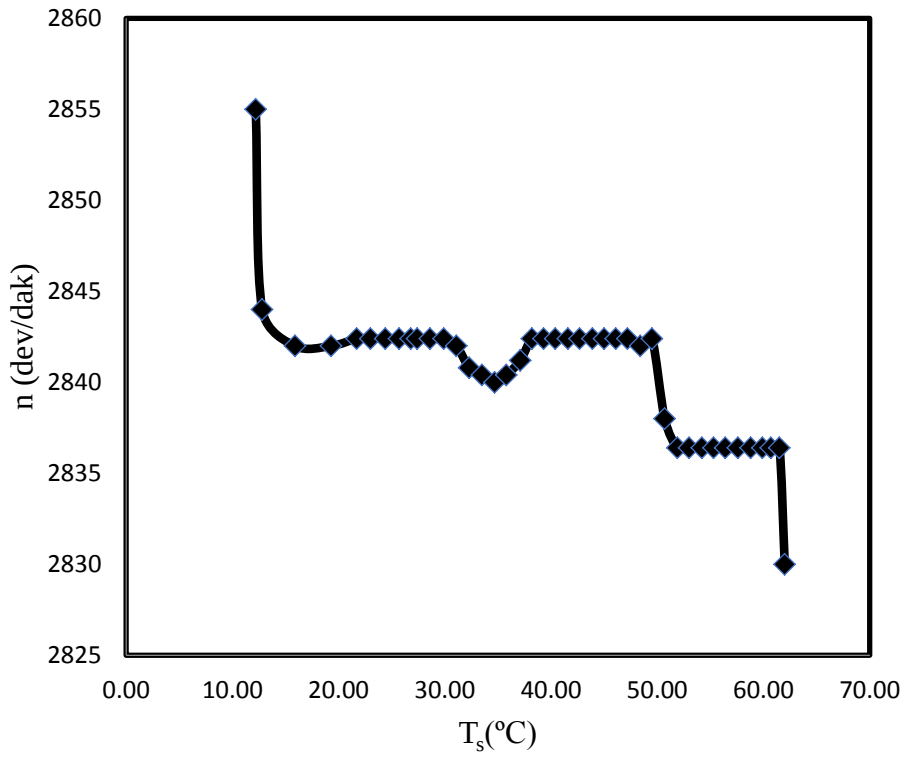
düşmektedir. Gözlemlenen diğer bir tespit ise motor sıvı sıcaklığının 30 ^{0}C değerinden sonra motor torkundaki düşmenin salınımlar göstermesidir. Yapılan ölçümlerden anlaşılacağı üzere motordaki sıcaklık yükselmesinin motor torku üzerindeki etkisi son derece yüksektir. Standart şartlarda test edilen 6" 30 HP (22kW) DASM üretmesi gereken tork değeri 75Nm'dir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi test motorunda ilk başlarda motorun tork değeri 74Nm iken zamanla motor sıcaklığının artması ile motorun üretmiş olduğu tork değeri ciddi bir düşüş göstermiştir. Motorun ürettiği tork değerinin düşmesi ile motordan pompaya iletilmesi gerek kuvvet miktarının azalması ile pompa verimi ciddi bir şekilde düşüş göstermesine neden olacaktır. Pompanın dönmesi gereken kuvvet motor tarafından sağlamadığı için pompadan birim zamanda istenilen su miktarı sağlanmamış olur. Ayrıca kullanılan motor pompanın gereken kuvveti sağlayamadığı için pompa motora ciddi bir yük yüklemesine sebep olur. Bekleneceği üzere söz konusu yük altında motor ömrü önemli derede kısalacaktır.



Şekil 4.5. DASM ürettiği tork gücün motor sıcaklığı ile değişimi

Asenkron motorların bir özelliği hava aralığında oluşan döner alanın frekansı ile rotorun dönme frekansı aynı olmamasıdır. Hava aralığındaki döner alanın frekansı, motorun beslenme frekansı ve kutup sayısına bağlı olup motorun yükü ile

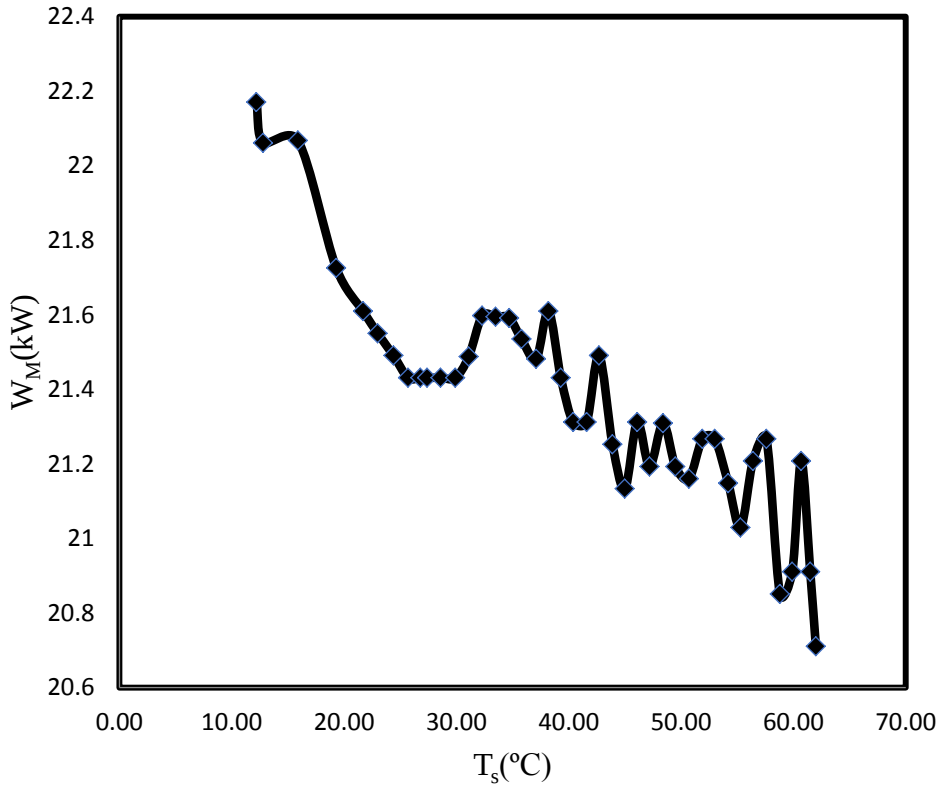
değişmez iken rotorun dönme frekansı yüke ve motor sıcaklığına bağlı olarak değişir. Motorun çalışma bölgesinde yük artıkça motor devir sayısı düşer, yük azaldıkça devir sayısı artar. Aynı şekilde motor sıcaklığı artması ile motorun devri düşüş gösterir. Yürütülen deneylerde motor sıvının sıcaklığına bağlı olarak motor devrinin izlediği trende ölçülmüştür. Yapılan ölçüm sonuçları Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekil 4.6'dan görüleceği üzere motor devri belli bir sıcaklık değerine yanı ısı birikimi sonunda dramatik olarak düşmektedir. Örneği motor sıvı sıcaklığı yaklaşık olarak 50 ^{0}C ulaştığında motor devri anı bir düşüş göstermektedir. Bu düşüş miktarı 60 ^{0}C sıcaklıkta tekrarlanmaktadır. Motor devrinin düşmesi en çok pompa verimini etkilemektedir. Düşük devirde çalışan motor pompanın yükünü karşılayamadığı için motor kısa bir zamanda arıza vermesi söz konusudur. Ayrıca motor devrinin düşmesi ile pompadan istenilen su miktarında da düşüş gözlenir.



Şekil 4.6. DASM devrinin motor sıcaklığı ile değişimi

Üç fazlı asenkron motorların stator sargılarına uygun değerde gerilim uygulandığında herhangi bir kontrol ünitesine gerek kalmadan motor çalışır. Motor çalışırken şebekeden PV giriş gücünü çeker. Bu güç öncelikle statorda bakır ve demir

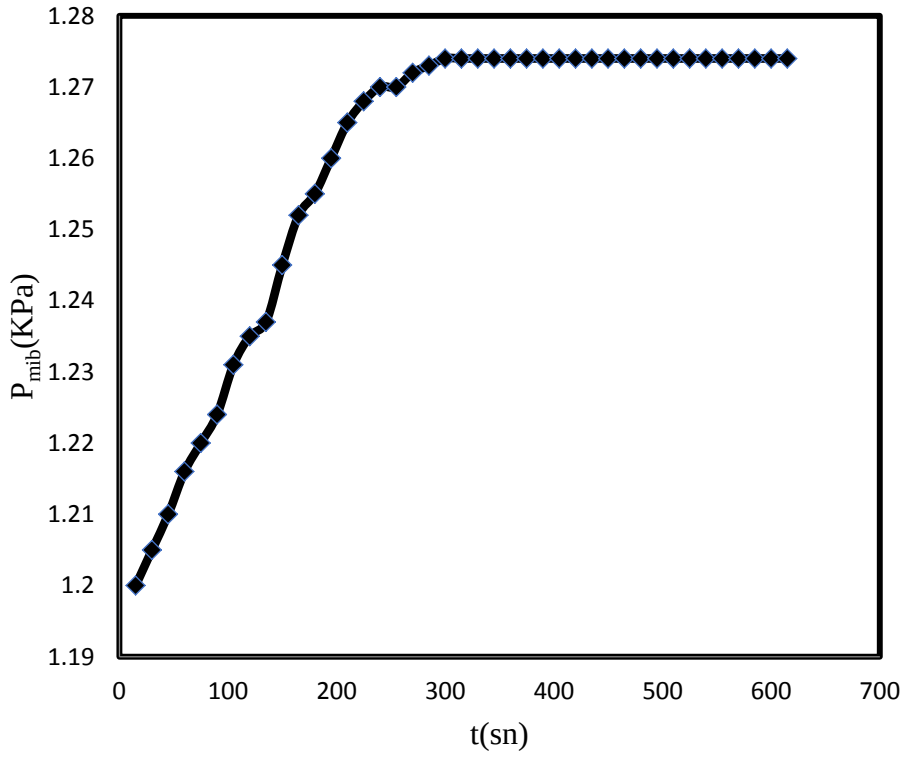
kayıplarına uğradıktan sonra stator – rotor arasındaki hava boşluğundan rotora aktarılır. Rotor devresinde de bakır, demir, rüzgâr, sürtünme ve kaçak yük kayıplarına uğrayan güç mile mekanik güç olarak aktarılır. Ancak rotor demir kayıpları diğer kayıplar yanında çok küçük olduğundan rotor devresinde gösterilmez. Motorun toplam demir kayıpları stator tarafında stator demir kaybı olarak gösterilir. Zamanla artan motor sıcaklığı motora ekstra bir kayıp olarak eklenir. Yürütülen deneyler sonucunda motor mil gücünün motor sıvısı sıcaklığına bağlı olarak gösterdiği eğilim ölçümüş ve yapılan ölçümler Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Test sisteminde kullanılan 6" 30 HP (22kW) değerindeki motorumuz ilk durumdaki mil gücü 22 kW değerinde iken zamanla motor sıcaklığının artması ile mil gücü 20,7 kW değerine kadar düşüş göstermiştir. Düşüş oranı yaklaşık %5.9 değerindedir.



Şekil 4.7. DASM mil gücünün motor sıcaklığı ile arasındaki değişimi

Dalgıç asenkron motorlarının içerisinde bulunan su ile kuyudaki su arasında basınç farkı oluşur. Oluşan basınç farkını karbon yataklar ve genleşme diyaframı(membran lastiği) aracılığıyla dengelenmektedir. Ayrıca kullanılan diyaframın yetersiz kaldığı durumda motorun üst yatağına monte edilen basınç ayar

çek valfi ile motor iç basıncı dengelenir. Motor da kullanılan çek valf 3 bar basınca duyarlı yarı otomatik bir yapıya sahiptir. Test sisteminde kullanılan basınç transmitteri ile motor iç basıncı ölçülmüştür. Yapılan ölçümler Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Şekil 4.8'de görüldüğü üzere motor iç basıncı belli bir zamandan sonra sabit kalmaktadır.



Şekil 4.8. DASM'un iç basıncın zamana göre değişimi

4.1.2. Dalgıç asenkron motorunun yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

Dalgıç asenkron motorların termal analizinde yüzey sıcaklığı önemli bir rol oynamaktadır. DASM'un yüzeyi kuyu içerisinde su ile birebir temas halinde olması motorun soğutulmasında önemli rol oynamaktadır. Tez çalışmasında test edilen motor ise dinamometre ye bağlandığı için dış yüzeyinin sıvı ile teması sağlanmadı. Test işleminde motorun ürettiği ısı kaybı hesabı yapılarak motorun dış yüzeyinden termokupllar ile alınan veriler değerlendirildi. Test motorunun dış yüzeyi iki farklı malzemeden oluşmaktadır. Motorun orta yüzeyi AISI 304 L paslanmaz ve motorun alt ve üst yatakları ise GG22 Pik dökümden oluşmaktadır. Test işleminde 10 adet termokupl kullanıldı. Bunlardan motor yüzeyine 9 adet termokupl ile bazı noktaların

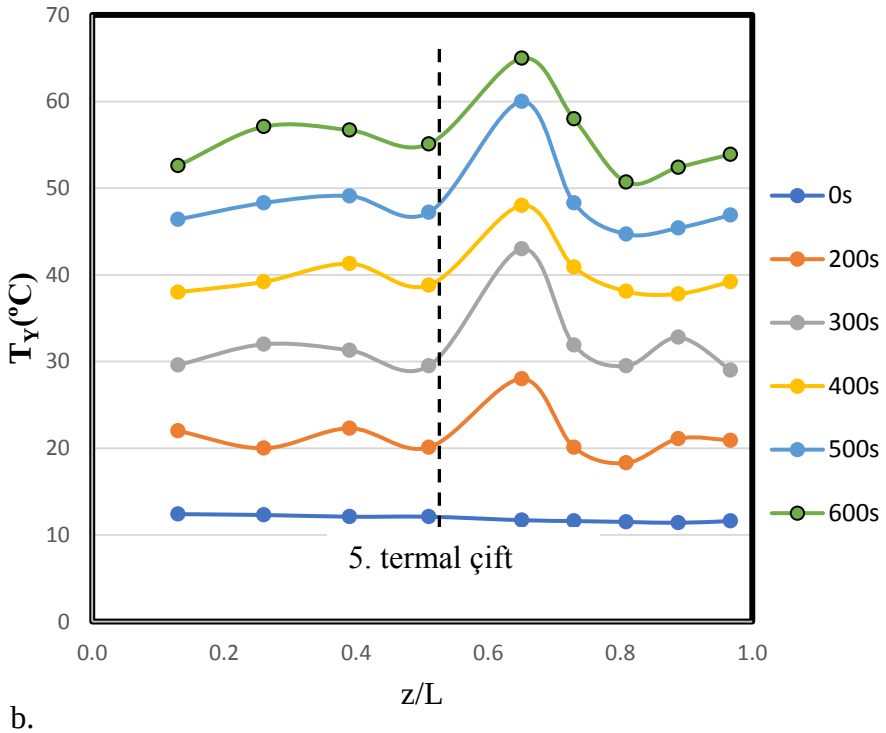
belli zaman aralıkları ile sıcaklık verileri alındı. Test odasında ortam sıcaklığının ölçülmesi için ise 10. termal çift ucu serbest bırakıldı. Referans alınan motorun yaklaşık olarak uzunluğu L= 1143mm'dir. Motorun stator bölümü motor altı referans olmak üzere 327 mm uzaklıktan başlayıp 968 mm'de bitmektedir. Ölçümlerde 5 termal çift motorun stator kısmının tam merkezine yerleştirilmiştir. Dolayısıyla motor alt kısmı referans olmak üzere 5. termal çift 0.651 z/L mesafesine yerleştirilmiştir. Yerleştirilen termal çiftlerden ölçülen motor yüzey sıcaklıkları ve termal çiftlerin motor yüzeyindekine yerleştirme şekline ait fotoğraf Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Ayrıca ölçülen değerlerin sayısal verileri de Çizelge 4.1'de verilmiştir

Çizelge 4.1. DASM yüzeyine yerleştirilen termokupların zamana göre sıcaklık verileri

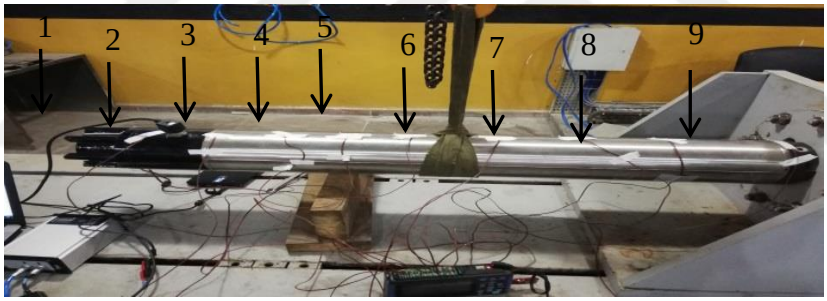
T. çiftler	z/L	0s	200s	300s	400s	500s	600s
1	**0,130**	12,4	22,0	29,6	38,0	46,4	52,6
2	**0,260**	12,3	20,0	32,0	39,2	48,3	57,1
3	**0,390**	12,1	22,3	31,3	41,3	49,1	56,7
4	**0,510**	12,1	20,1	29,5	38,8	47,2	55,1
5	**0,651**	11,7	28,0	43,0	48,0	60,0	65,0
6	**0,730**	11,6	20,1	31,9	40,9	48,3	58,0
7	**0,809**	11,5	18,3	29,5	38,1	44,7	50,7
8	**0,888**	11,4	21,1	32,8	37,8	45,4	52,4
9	**0,967**	11,6	20,9	29,0	39,2	46,9	53,9
10	**$T_ç$**	12,4	13,6	18,0	19,0	21,0	21,8

Motor yüzey sıcaklığının değişimi ile motorun üretmiş olduğu ısı miktarının artış trendi izlenebilir. Yapılan ölçümlerde Şekil 4.9'dan görüleceği üzere en fazla sıcaklık artışı 5 termal çiftin olduğu bölgede yanı motor stator bölgesinin tam orta noktasında meydana gelmektedir. Bu noktada sıcaklık artışı açısından tüm ölçüm zamanlarda bir pik noktası meydana gelmektedir. Bu pik noktasının meydana gelmesinin en büyük nedeni satator alt ve üst bölgesinde ek su hacimlerinin bulunmasıdır. Motor yüzey sıcaklığın izlediği artış trendi önceki bölümde sunulan performans değerleri ile paralellik göstermektedir.

a.



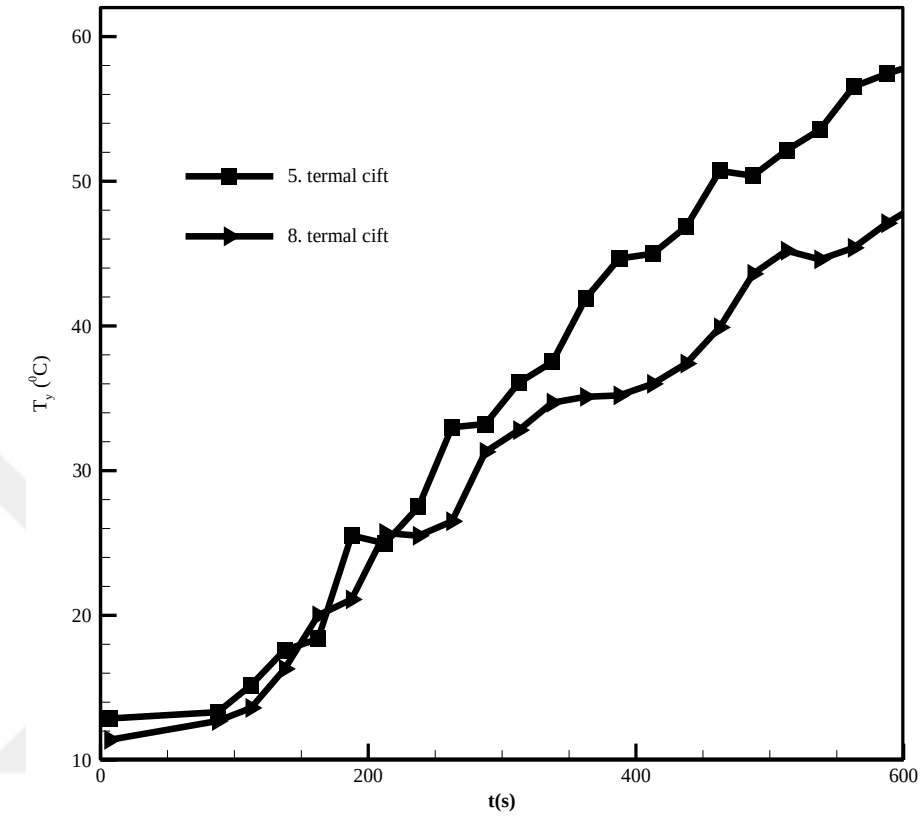
b.

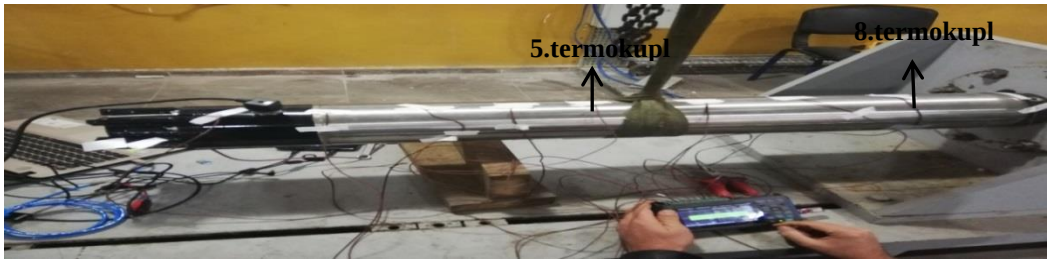


Şekil 4.9. DASM'nun belli zaman aralıklar ile a. Ölçülen yüzey sıcaklık ölçümleri ve b. termal çiftlerin motor üzerine yerleştirme konumları

Dalgıç asenkron motoru belli bir zaman çalıştıktan sonra motor ısınmaya başlar. DASM'nun yüzeyinde oluşan sıcaklık homojen bir dağılım göstermez. Motor yüzeyindeki meydana gelen sıcaklık değişimlerinin motorun iç kısmında bulunan ara parçalardan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.10'de motor yüzeyine bağlanan 5. ve 8. Termal çiftlerden alınan verilerin oluşturduğu grafik gösterilmiştir. DASM'nun içinde ısının oluşmasında en etkili olan ara parça motor sargısında kullanılan bakır tellerden oluşmaktadır. Motor yüzeyine bağlanan 5. Termal çifti motor sargısının olduğu yerin sıcaklığını ölçerken 8.termokupl çifti ise sargının olmadığı kısmın sıcaklığını ölçmektedir. Şekil 4.10'de görüldüğü üzere 5. Termal çiftten alınan

sıcaklık verilerinin 8. Termal çiftten alınan verilere göre çok daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

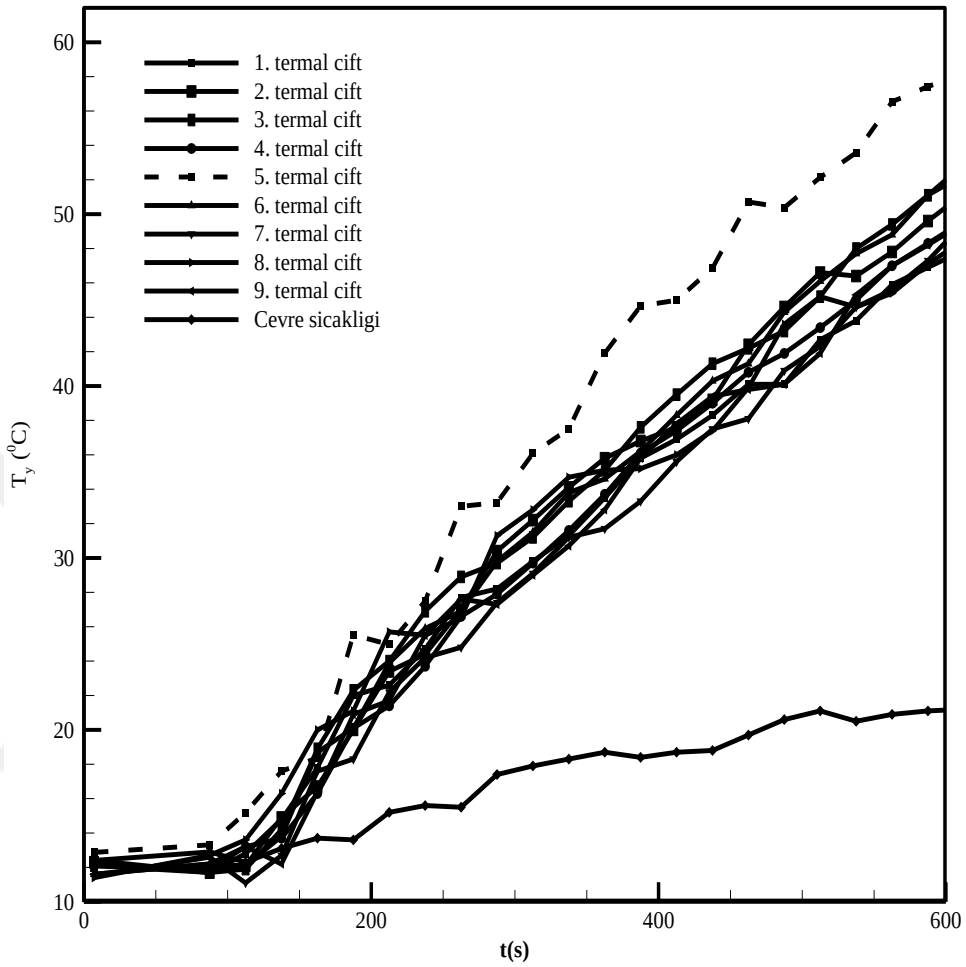




Şekil 4.10. DASM'nun yüzeyindeki iki farklı noktadaki sıcaklık değişimi

Dalgıç asenkron motorunun yüzeyine yerleştirilen tüm termal çitlerde alınan veriler ise Şekil 4.11'te gösterilmiştir. Şekil 4.11'te görüldüğü gibi motorun yüzey sıcaklığının lineer bir şekilde sürekli artış göstermektedir. Motor yüzey sıcaklığı artması motor verileri ve motor ömrünü ciddi bir şekilde etkilemektedir. Artan sıcaklık motor iç kısmında bulunan bakır tellerin ve karbon yatakların zarar vermesine neden olurken, bakır tellerin zarar görmesi motorun yanmasına neden

olur. Bu durumda motor sarımında kullanılan bakır tellerin özellikleri büyük önem taşımaktadır.



Şekil 4.11. DASM'nun yüzeyindeki termokupllardan alınan sıcaklık verileri

Şekil 4.11'den açıkça test odasındaki ortam sıcaklığı ile motor sıcaklığının birbiri ile arasındaki sıcaklık değişimde izlenebilir. Motor sıcaklığı ortam sıcaklığına göre lineer bir şekilde artış göstermektedir. Söz konusu grafikten açıkça görüleceği üzere zamanla dalgıç asenkron motorun ürettiği ısı miktarı ortama verilerek ortam sıcaklığını artırmıştır.

Saf bir maddenin birim kütlesinin sıcaklığını 1ºC artırmak için gerekli ısı miktarına öz ısı denir. Özgül ısı ya da ısınma ısısı olarak da bilinir. Eşit kütledeki farklı maddeler aynı miktarda enerji alışverişi yaptıklarında

maddelerin sıcaklık değişim miktarları aynı olmaz. Bu farklılık, ısı ve sıcaklıkla ilgili olan ve maddelere özgü bir değer olan öz ısı ile açıklanır. Özgül ısı;

$$Q = m.\ c.\ \Delta T \quad (4.1)$$

şeklinde hesaplanır. Denklemdeki m kütleyi, c özgül ısıyı ve ΔT sıcaklık farkını göstermektedir. Herhangi miktarda bir maddenin sıcaklığını 1 °C (ya da 1 K) artırmak için verilmesi gerekli olan enerji miktarına ısı sığası denir. Isı sığası ise C ile gösterilir ve tanımı;

$$C=m*c \quad (4.2)$$

şeklindedir. Öz ısının ısı sığası cinsinden ifadesi ise;

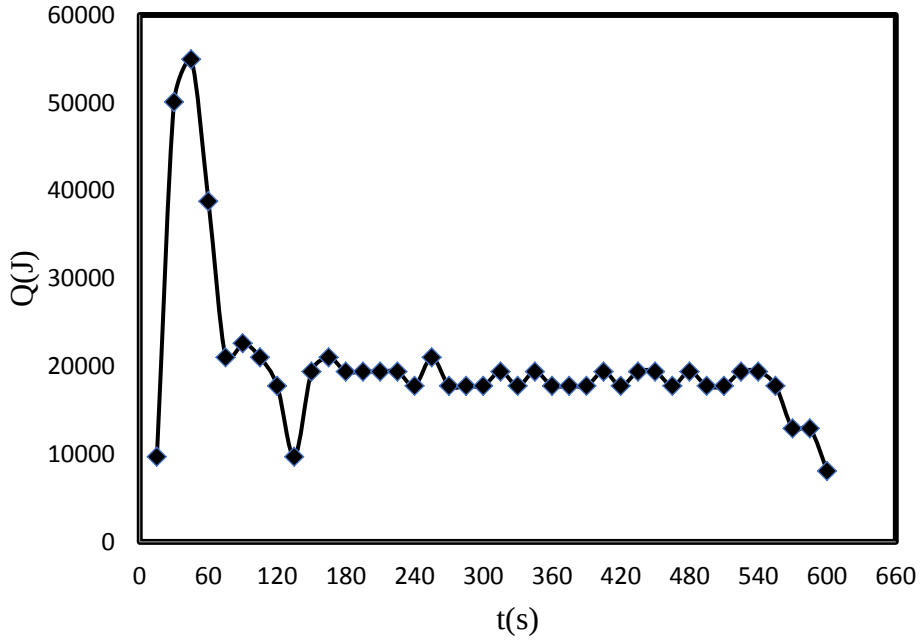
$$Q = C.\ \Delta t \quad (4.3)$$

Şeklinde hesaplanabilir.

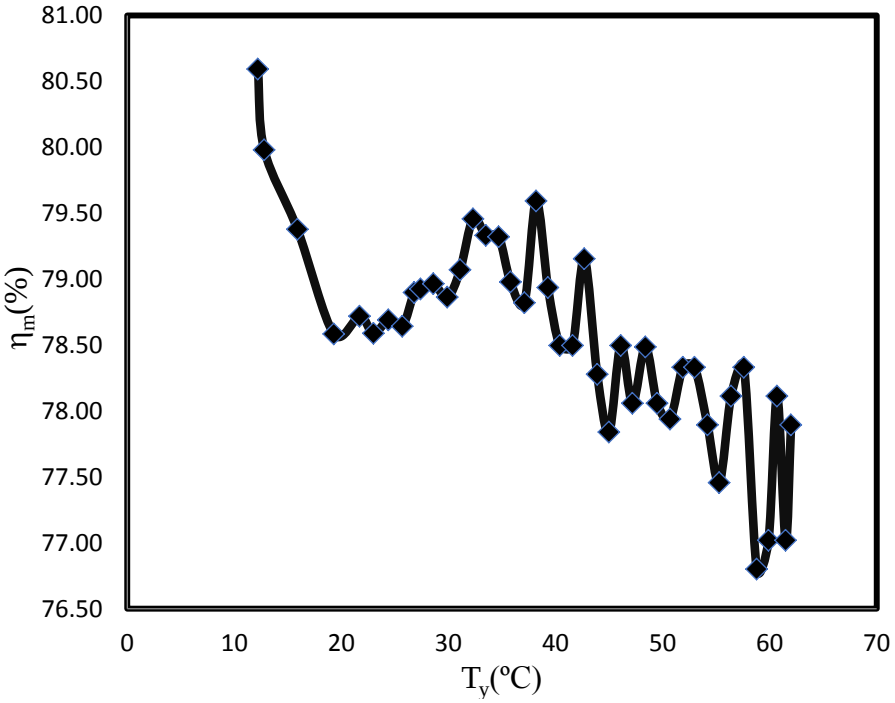
Yapılan test işleminde motor tarafından motor sıvısına aktarılan ısı miktarı yukarıdaki bağıntılardan yararlanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda motor sıvısına aktarılan ısının zamana bağlı değişimi Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere motorun kalkışından itibaren motor sıvısına aktarılan ısı miktarı 60s'de 55 kJ ile maksimum değere ulaşmakta ve daha sonra dramatik olarak düşmektedir. Bunu en büyük nedeni motor su sıcaklığının yükselmesi ile aktarılan ısı miktarı hızının sıvı sıcaklığındaki artışa ters oranda düşmesidir. Yine Şekil 4.12'den görüleceği gibi belli bir zaman periyodundan sonra motor sıvısına aktarılan ısı miktarı yaklaşık 20 kJ etrafında küçük salınımlar yapmaktadır.

Dalgıç asenkron motorunun sıcaklığının yükselmesi ile motorun veriminde önemli derece düşme meydana geldiği yapılan deneysel ölçümler ile tespit edilmiştir. Motor sıvısındaki sıcaklı artışa ile motor verimi arasındaki ilişki Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Referans alınan motorun üretici firma kataloğundaki verimi %85'dir. Çok sayıda yapılan ölçümlerde bu değerin ortalama olarak %80.6 olduğu saptanmıştır. Şekilden görüleceği üzere motorun ilk kalkışında yaklaşık %80.6 olan motor verimi motor sıvısındaki sıcaklığın yükselmesiyle göreceli olarak dramatik olarak düşmektedir. Dramatik düşütten sonran ise motor verimindeki düşüş salımlar yaparak düşmeye devam etmektedir. Test süreçleri sonunda motor verimin ilk

kalkıştan itibaren deney süreci sonunda ortalama %3.7 düştüğü saptanmıştır. Motorun elektriksel ve mekanik kayıpları yanı sıra meydana gelen söz konusu kayıp tamamen motor sıcaklığı ile ilişkilendirebilir.



Şekil 4.12. DASM'nun üretmiş olduğu ısı miktarı değişimi



Şekil 4.13. DASM'nun veriminin motor sıcaklığı ile değişimi

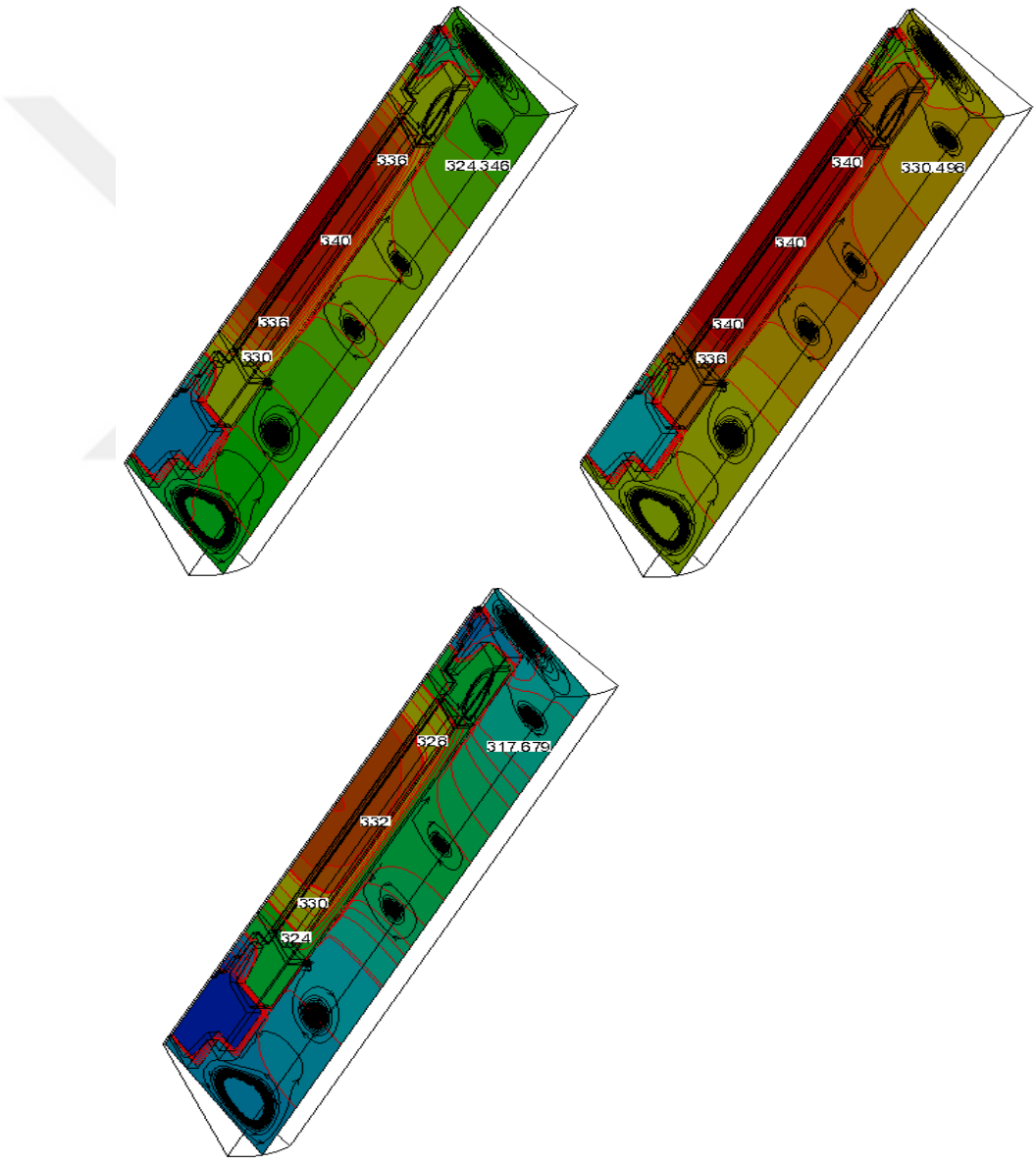
4.2. Nümerik Hesaplamalar

Tez çalışması kapsamında yürütülen deneysel ölçümlerde motordaki olası kayıplar sonucunda meydana gelen ısı dolayısıyla motor performansı önemli derece olumsuz yönde etkilenmektedir. Bundan dolayı motor tarafından üretilen ısının optimal bir hızda motordan uzaklaştırılması motor işletme maliyeti ve ömrü açısından kritik bir öneme sahiptir. Tez çalışmasının bu bölümünde 5 farklı durum için motorun termal performansı CFD simülasyonları ile araştırılmıştır. Bu aşamadaki temel hedef termal performans açısından optimal tasarım kriterlerini bulmaya yönelik veriler elde etmektir. Bu bölümde ilk etapta simülasyonların güvenilirliği üzerine yürütülen çalışmalar sunulacaktır. Daha sonraki bölümde farklı koşularda yürütülen 5 farklı CFD simülasyon sonuçları sırasıyla sunulacaktır. Simülasyonların birbirlerine göre değerlendirilmesi ayrı bir başlık altında sunulmayacak her simülasyon başlığı altında ayrıca sunulacaktır.

4.2.1. Meshten bağımsız çözüm

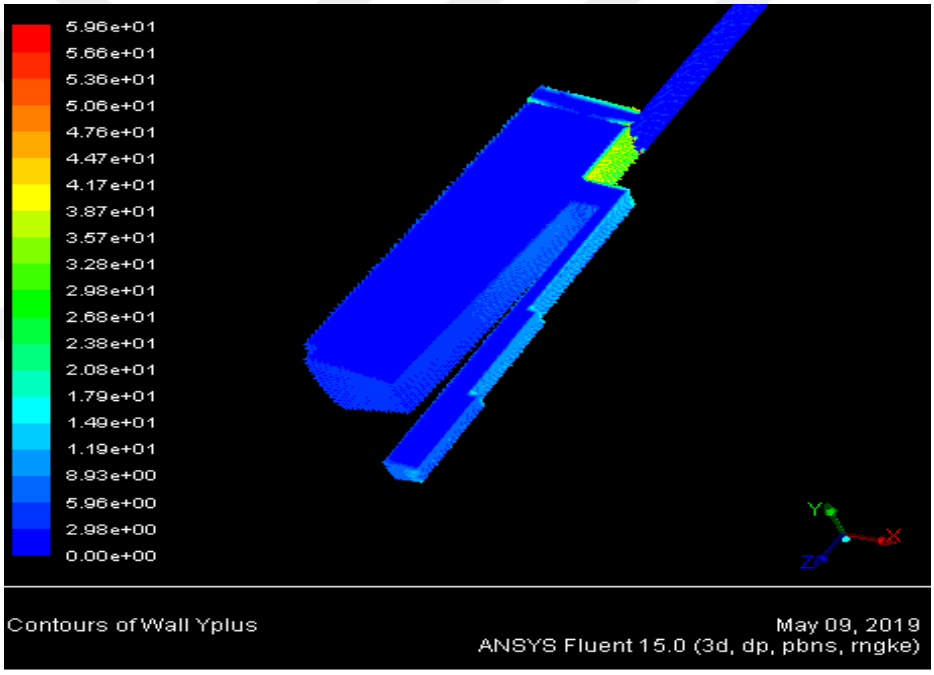
Tez çalışması kapsamında yürütülen CFD simülasyonlarında izlenen ve Çizelge 3.2'de verilen süreçlerin, simülasyon sonuçlarının güvenilirliği açısından en kritiği mesh tasarımıdır. Önceden de değinildiği üzere bir akış alanının mesh tasarımını seçilen türbülans modeli ve duvar fonksiyonu çerçevesinde yapmak bir zorunluluktur. Bu çalışmada söz edilen zorunluluk dikkate alınarak akış alanlarının mesh tasarımı yapılmıştır. Yapılan ilk deneme simülasyonlarında, seçilen türbülans modeli için paket programın önerdiği y^+ değerlerine ulaşılmıştır. Bu mesh tasarım sürecinin detayları 3. Bölüm 'de verilmiştir. Bir CFD simülasyonunu güvenirliğini belirleyen diğer bir parametre ise meshten bağımsız bir çözüme ulaşmaktır. Bu parametreyi de sağlamak amacıyla mesh tasarımı süreci sonucunda tespit edilen ve Çizelge 3.4'de 1. Durum için verilen mesh sayıları referans alınarak, seçilen DASM'un mevcut ölçütleriyle tanımlanan akış alanı, sırasıyla bu mesh sayıları %10 azaltma ve %20 artırma şeklinde üç farklı mesh yapısında tasarlanmıştır. Yapılan farklı mesh yapılar çerçevesinde yürütülen CFD simülasyonları ile mesh sayısının simülasyonlar üzerinde etkisi incelenmiştir.

Yukarıda söz edilen farklı mesh sayıları için, aynı sınır şartlarında yürütülen CFD simülasyonlarında mesh sayısının akış alanını tanımlayan büyüklükler üzerinde çok sınırlı bir etkisini saptanmıştır. Şekil 4.14'de görüldüğü üzere her üç mesh sayısında yaklaşık olarak %2 oranında çok küçük sapmalar meydana gelmektedir. Söz konusu benzer sıcaklık değerleri ve düşük sapma değerleri Çizelge 3.4'de verilen mesh sayıları ile yürütülecek simülasyon sonuçlarının meshten bağımsız olduğunu göstermektedir. Bundan dolayı tez çalışması boyunca yürütülen diğer simülasyonlarda mesh sayısı Çizelge 3.4'deki değerler çerçevesinde yapılmıştır.



Şekil 4.14. Aynı kaşılar altında farklı üç mesh yapısı için yürütülen simülasyonların sıcaklık kontörleri

CFD simülasyonun güvenrilliğini tanımlayan ve ön plana çıkan en önemli parametre y^+ değeridir. Önceden belirdiği gibi türbülanslı akış yapısı ve bölgeleri y^+ değeri çerçevesinde tanımlanmaktadır. Mesh sıklığı seçilen türbülans modeli ve duvar fonksiyonu için önerilen y^+ değeri dikkate alınarak yapılması zorunludur. Önceki bölümde de değinildiği üzere bu tez çalışması boyunca yürütülen CFD simülasyonlarında seçilen türbülans modeli ve duvar fonksiyonu için $y^+ <11$ şeklinde bir sınır değeri önerilmektedir. Yapılan mesh tasarımları sonucu yürütülen tüm CFD simülasyonlarında y^+ değerinin 11 altında olduğu saptanmıştır. Bu simülasyon sonuçlarına bir örnek Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere motorun alt kısmındaki akış alanı ele alınarak yapılan örnek simülasyon sonucunda tüm yüzeyler boyunca y^+ değeri 11 altın da kalmaktadır.



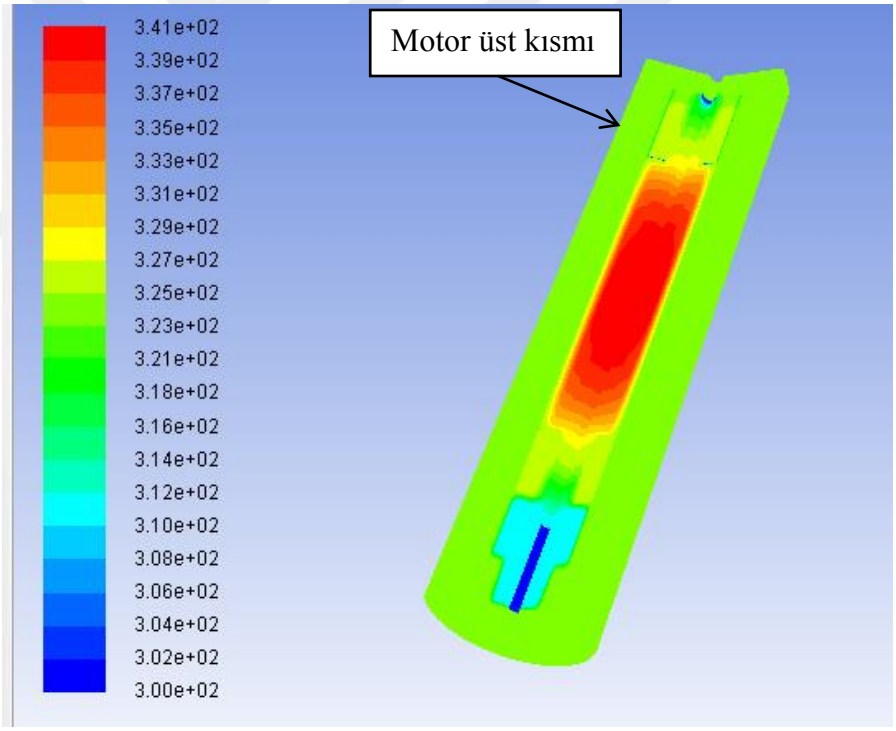
Şekil 4.15. DASM alt kısmındaki akış alanın duvar kısmındaki oluşturduğu y^+ değeri

4.2.2. Farklı devir sayıları için referans alınan motorun termal davranışı

2900, 2500 ve 2000 dev/dak motor devirleri için CFD simülasyonları yürütülmüştür. Referans alınan motorun çalışma devri 2900 dev/dak'dir. Yapılan deneysel ölçümlerde motorun ısınmasıyla birlikte motor devri düşme eğilimi gösterdiğinden çalışma devrinden daha düşük devirlerde de motorun termal davranışı

araştırılmıştır. Bu bölümde yürütülen CFD simülasyon sonuçları sırasıyla 2900, 2500 ve 2000 dev/dak için sunulmuştur

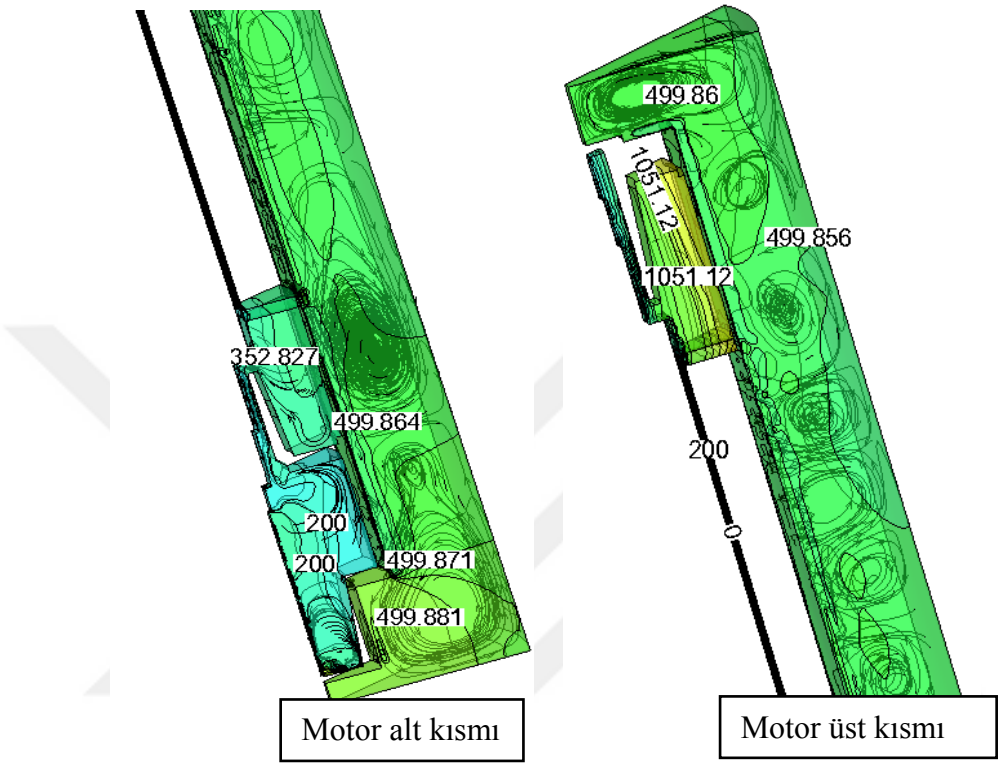
2900 dev/dak için materyal ve metot bölümünde belirtilen sınır koşuları çerçevesinde yürütülen CFD simülasyonunda motor boyunca ki sıcaklık dağılımı Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Şekilde görüleceği maksimum sıcaklık 341 K ile motor ekseninde stator bölümünün tam merkezinde meydana gelmektedir. Bu noktadan sonra motor boyunca sıcaklık kademeli düşüş göstermektedir. Sıcaklıktaki düşme oranı motor alt kısmına nazaran üst kısımda daha düşük olmaktadır. CFD simülasyonları kuyu şartlarında motorun dikey yerleştirilmesi kabulü ile gerçekleştirilmiştir. Dikey konum motor üst kısmını alt kısmına nazaran sıcaklığını daha yüksek olmasını açıklayan en önemli parametredir.



Şekil 4.16. 2900 dev/dak açısal hızda hesaplama alanı boyunca ki sıcaklık (K) dağılımı

2900 dev/dak motor boyunca ki basınç dağılımı Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Aynı Şekil akış alanı boyunca meydana gelen akış çizgileri de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere motor üst kısmında basınç değeri yaklaşık olarak 500 Pa değerine kadar çıkmaktadır. Motor alt kısmında ise basınç değeri 200 Pa kadar

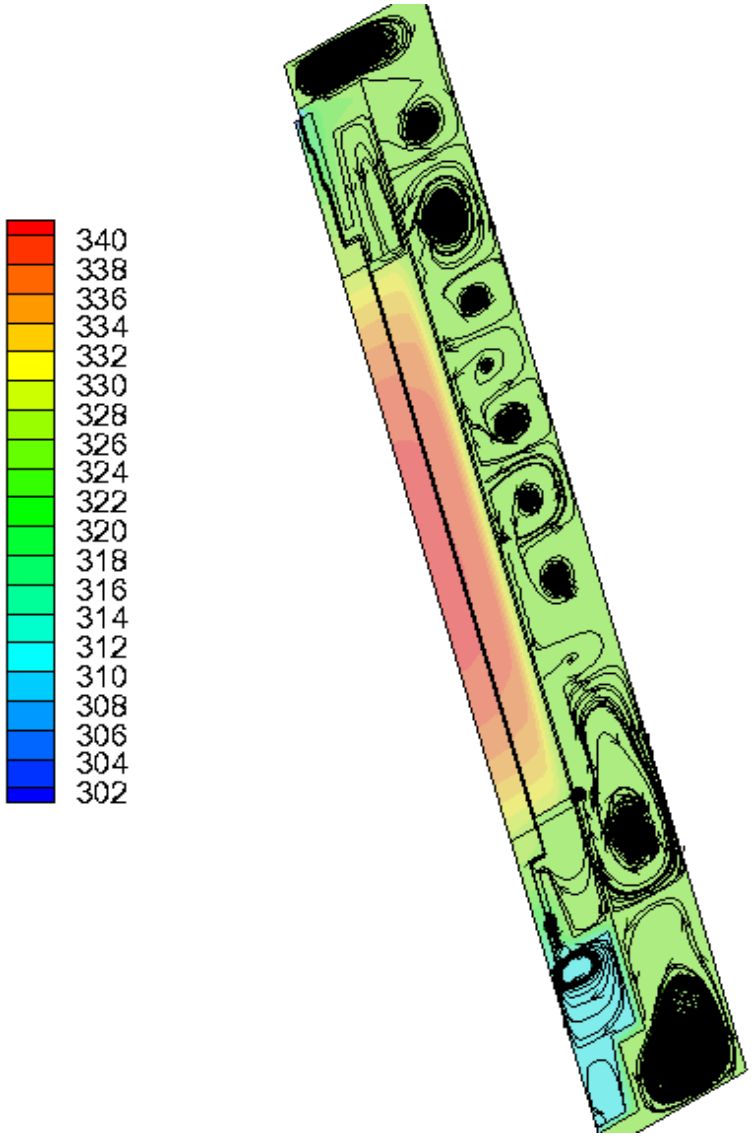
düşmektedir. Kuyu boyunca ise basınç değeri küçük salınımlar göstermektedir. Bu küçük salınımlar sonucunda kuyu boyunca özellikle motor yüzeyine yakın farklı şiddette bir vorteks meydana gelmektedir.



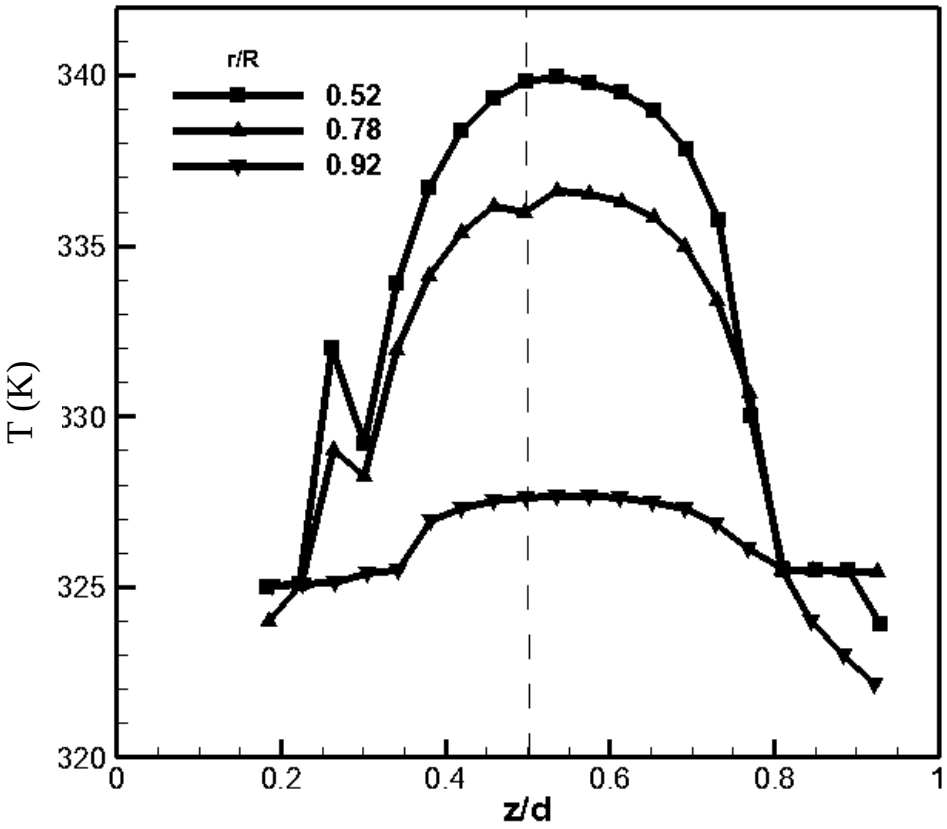
Şekil 4.17. 2900 dev/dak'da akış alanı boyunca ki basınç dağılımı ve akış çizgileri

Motor boyunca ki sıcaklık dağılımını daha açık bir şekilde gözlemleye bilmek amacıyla motor ekseni boyunca ki sıcaklık dağılımları Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Aynı şekil sıcaklık dağımın akış yapısı ile ilişkisini tanımlamak amacıyla akış çizgileri de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere motor boyunca sıcaklık yaklaşık olarak 300-340 K aralığında değişmektedir. Sıcaklık dağılımındaki söz konusu yüksek skalanın nedeni kuyu içerisinde çalışan motorun dikey yönde daha ziyade eksenel yönde ısı transferine meyilli olmasıdır. Bu meyil motor uzunluğunu motor çapına nazaran çok daha büyük olmasının bir sonucudur. Yürütülen simülasyonlar sonucunda motor boyunca eksenel yönde üç dikey yönde sıcaklık dağılımları sayısal veri olarak saptanmıştır saptanan sayısal veriler Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere her üç eksen boyunca sıcaklık dağılımında pik noktaları meydana gelmektedir. Meydana gelen pik noktaları motor stator kısmının tam orta noktasının

bir miktar üstünde oluşmaktadır. Yine Şekil 4.19'dan görüleceği dikey yönde motor boyunca ki sıcaklık gradyanı merkez ekseninden uzaklaştıkça düşüş göstermektedir. Örneğin r/d=0.52'de motor boyunca ki sıcaklık dağılımın maksimum ile minimum değerler arasında yaklaşık olarak 15 ^{0}C bir fark meydana gelirken r/d=0.78'de 11 ^{0}C'ye r/d=0.92'de 3^{0}C düşmektedir. Yine şekilden görüleceği üzere dikey yönde motor sıcaklığındaki değişimleri, kuyu ve motor boyunca ki vorteks yapıları üzerinde direkt etkisi söz konusudur.



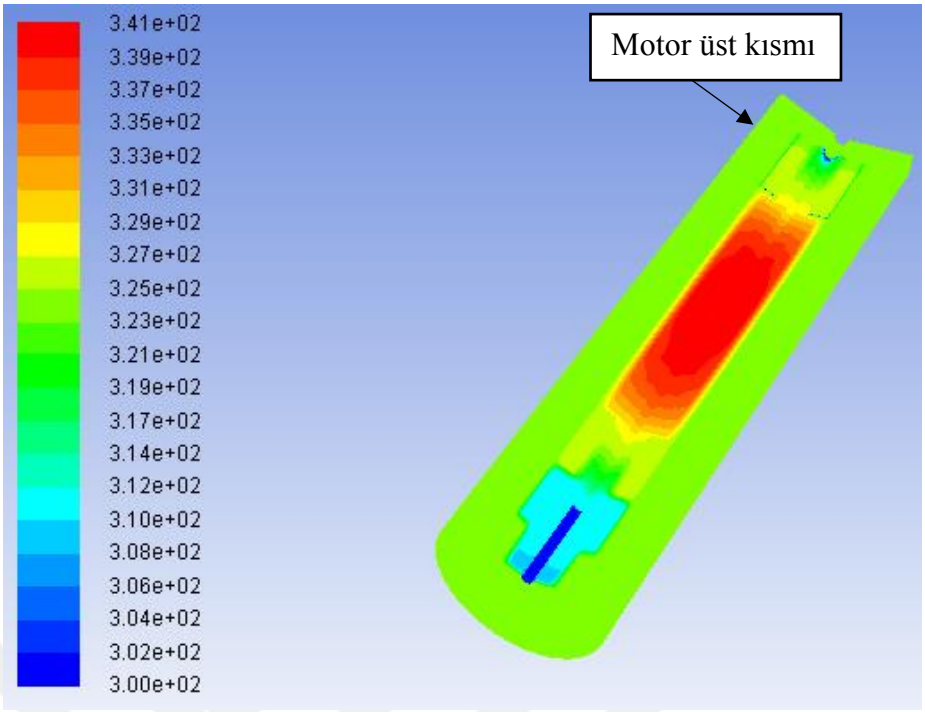
Şekil 4.18. 2900 dev/dak açısal hızda Dikey eksen yönünde motor boyunca ki sıcaklık dağılımı ve akış çizgileri



Şekil 4.19. 2900 dev/dak açısal hızda üç dikey eksen boyunca oluşan sıcaklık dağılımları

2500 dev/dak için materyal ve metot bölümünde belirtilen sınır koşuları çerçevesinde yürütülen CFD simülasyonunda motor boyunca ki sıcaklık dağılımı Şekil 4.20'da gösterilmiştir. Şekilde görüleceği maksimum sıcaklı 341 K ile motor ekseninde stator bölümünün merkezinin bir miktar üzerinde meydana gelmektedir. 2900 dev/dak motor devrine nazaran motor üst kısmındaki kademeli sıcaklık düşüşü daha düşük bir olanda meydan gelmektedir. 2500 dev/dak motor devri için sıcaklık dağılımı ise yaklaşık olarak 2900 dev/dak motor devrine benzer bir eğilim göstermektedir.

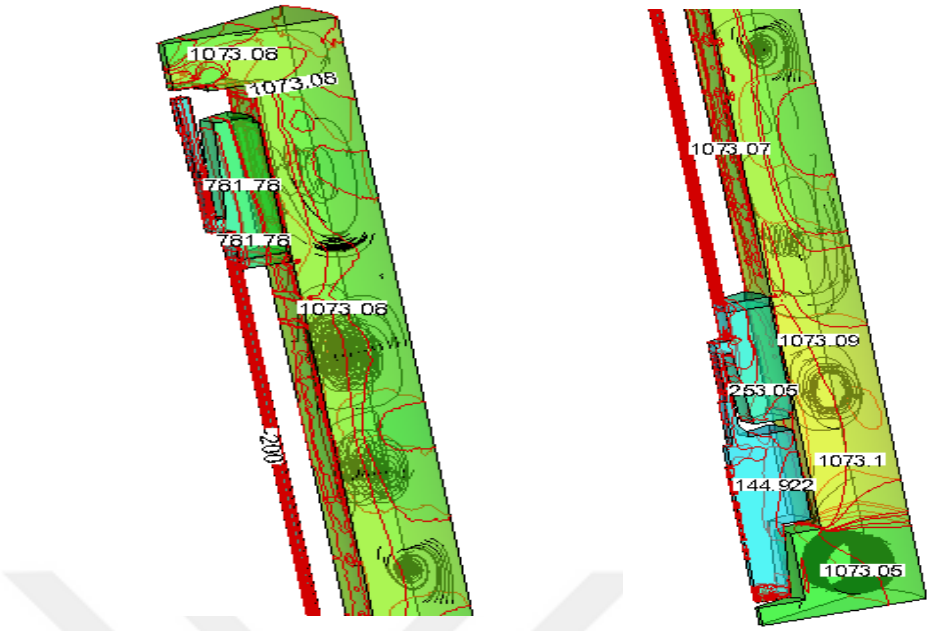
2500 dev/dak motor boyunca ki basınç dağılımı ve akış çizgileri Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere motor üst kısmında basınç değeri yaklaşık olarak 1000 Pa değerine kadar çıkmaktadır. Motor alt kısmında ise basınç değeri 250 Pa'dan 140 Pa kadar değişkenlik göstermektedir. Özellikle 2900 dev/dak motor devrine nazaran motor üst kısmındaki basınç iki katı değerinde meydana gelmektedir.



Şekil 4.20. 2500 dev/dak açısal hızda hesaplama alanı boyunca ki sıcaklık (K) dağılımı

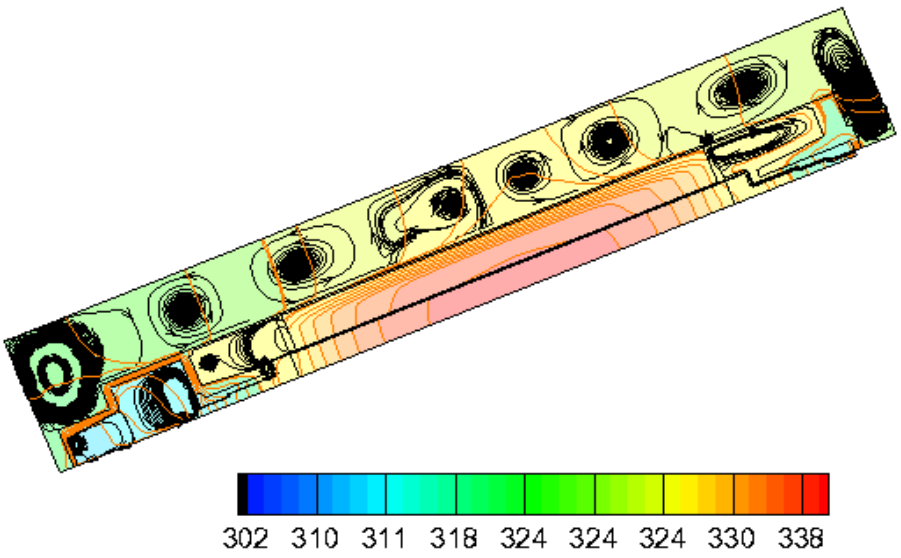
2900 dev/dak motor devrinde motor üst ve alt kısmın arasındaki basınç farkı 300 Pa iken bu değer 2500 dev/dak motor devrinde yaklaşık olarak dört katına çıkmaktadır. Kuyu boyunca ise basınç değeri küçük salınımlar göstermektedir. Bu küçük salınımlar sonucunda kuyu boyunca özellikle motor yüzeyine yakın farklı şiddette bir vorteks meydana gelmektedir.

Motor boyunca ki sıcaklık dağılımını daha açık bir şekilde gözlemleye bilmek amacıyla motor ekseni boyunca ki sıcaklık dağılımları Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Aynı şekil sıcaklık dağımın akış yapısı ile ilişkisini tanımlamak amacıyla akış çizgileri de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere motor boyunca sıcaklık yaklaşık olarak 305-335 K aralığında değişmektedir. Sıcaklık dağılımındaki söz konusu skalanın büyüklüğü 2900 dev/dak nazaran daha düşüktür. Yine motor üst kısmı ile alt kısmı arasındaki sıcaklı farkı 2900 dev/dak motor devrine nazaran daha düşüktür. Şekil 4.22'den görüleceği üzere akış alanlarındaki vorteks ayakları özellikle yüksek sıcaklık gradyanlarının olduğu bölgelerde yüzeylere bağlanmaktadır. 2500 dev/dak motor devri için motor boyunca eksenel yönde üç dikey yönde sıcaklık dağılımları sayısal veri olarak saptanmıştır saptanan sayısal veriler Şekil 4.23'de gösterilmiştir.

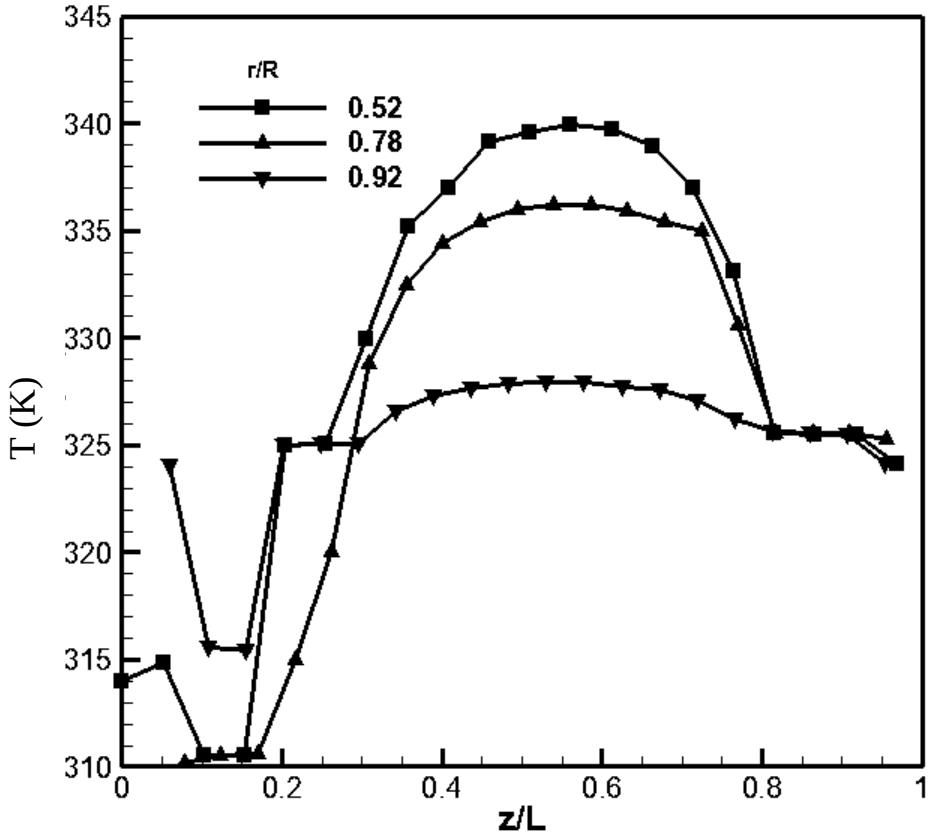


Şekil 4.21. 2500 dev/dak'da akış alanı boyunca ki basınç dağılımı ve akış çizgileri

Şekilden görüleceği üzere her üç eksen boyunca sıcaklık dağılımında 2900 devir/dak motor devrine benzer şekilde pik noktaları meydana gelmektedir. Her üç eksende de bik noktaları aynı mesafede meydana gelmektedir. Yine 2900 dev/dak motor devrine benzer olarak dikey yönde motor boyunca ki sıcaklık gradyanı merkez ekseninden uzaklaştıkça düşüş göstermektedir.



Şekil 4.22. 2500 dev/dak açısal hızda Dikey eksen yönünde motor boyunca ki sıcaklık dağılımı ve akış çizgileri

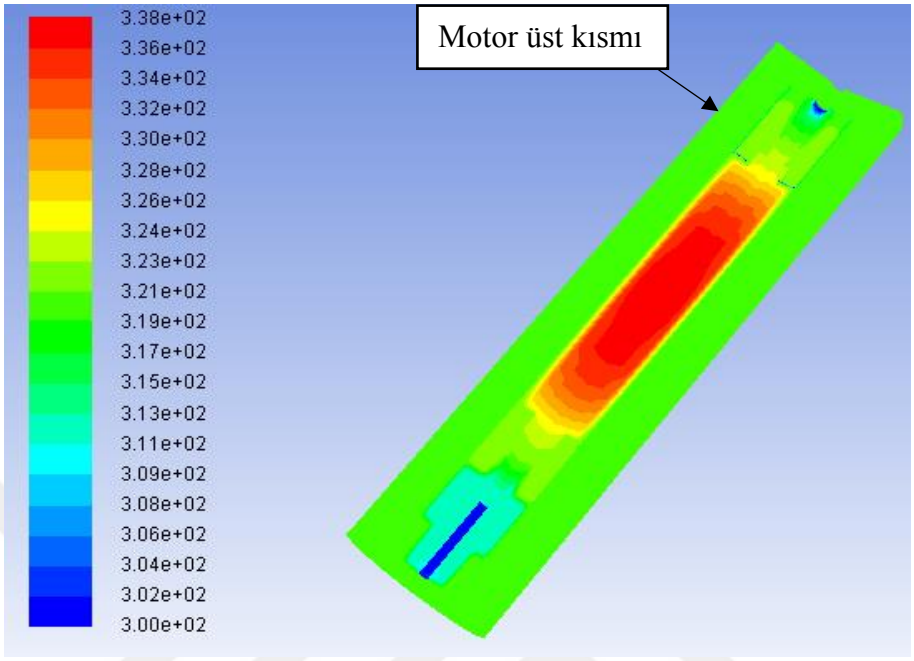


Şekil 4.23. 2500 dev/dak açısal hızda üç dikey eksen yönünde boyunca ki sıcaklık dağılımları

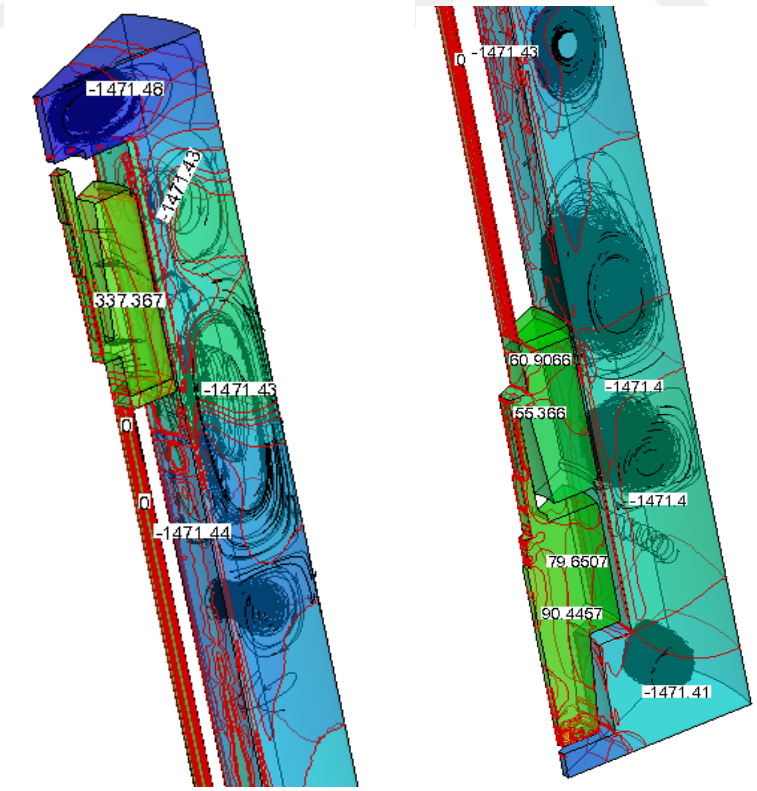
2000 dev/dak için materyal ve metot bölümünde belirtilen sınır koşuları çerçevesinde yürütülen CFD simülasyonunda motor boyunca ki sıcaklık dağılımı Şekil 4.24'de gösterilmiştir. Şekilde görüleceği maksimum sıcaklı 336 K ile motor ekseninde stator bölümünün merkezinin bir miktar üzerinde meydana gelmektedir. Bu noktadan sonra motor boyunca sıcaklık kademeli düşüş göstermektedir. Sıcaklıktaki düşme oranı motor alt kısmına nazaran üst kısımda diğer iki motor devrinde olduğu gibi daha düşük olmaktadır. Gözlemlenen diğer önemli bir veri ise motor devri düştükçe motor boyunca ki sıcaklık gradyanlarının düştüğüdür.

2000 dev/dak motor boyunca ki basınç dağılımı Şekil 4.25'de gösterilmiştir. Aynı Şekil akış alanı boyunca meydana gelen akış çizgileri de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere motorda statorun yer aldığı bölge ile motor üst ve alt kısmı arasında basınç açısından önemli derecede farklar meydana gelmektedir. Yine görüleceği üzere özellikle motor stator bölümünü alt ve üst uç kısımlarımda yüksek

sıcaklık gradyanından dolayı kuyuda meydana gelen vorteks yapıları diğer bölgelere nazaran çok daha büyük olmaktadır.

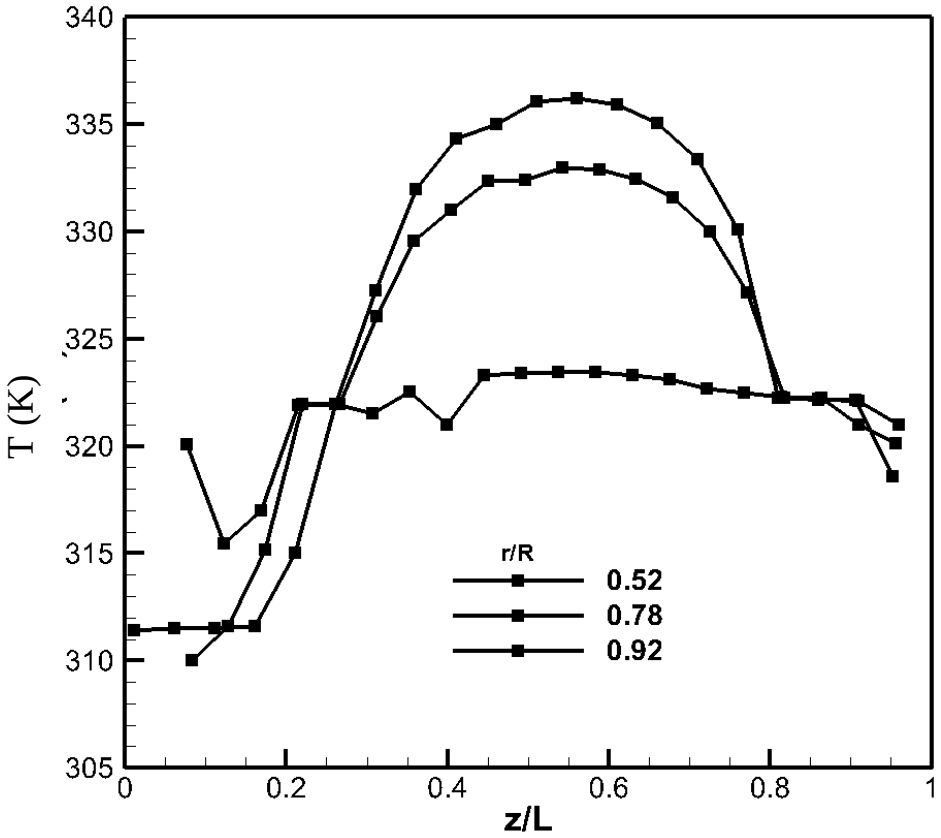


Şekil 4.24. 2000 dev/dak açısal hızda hesaplama alanı boyunca ki sıcaklık (K) dağılımı



Şekil 4.25. 2000 dev/dak'da akış alanı boyunca ki basınç dağılımı ve akış çizgileri

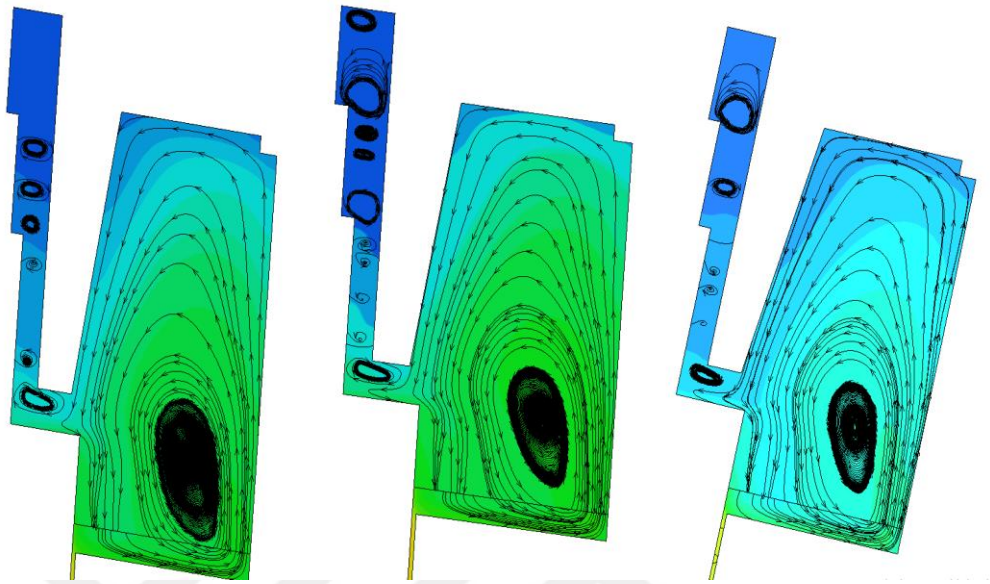
2000 dev/dak motor devri için motor boyunca eksenel yönde üç dikey yönde sıcaklık dağılımları sayısal veri olarak saptanmış ve saptanan sayısal veriler Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere her üç eksen boyunca sıcaklık dağılımında diğer iki motor devrine benzer şekilde pik noktaları meydana gelmektedir. Gerek üç farklı motor devri için yürütülen CFD simülasyonlarında gerek akış yapısı ve gerekse termal davranış açısından belirgin bir fark tespit edilememiştir.



Şekil 4.26. 2000 dev/dak açısal hızda üç dikey eksen yönünde boyunca ki sıcaklık dağılımları

Dalgıç asenkron motorun içerisinde bulunan akış alanı ve miktarı motor gücüne ve motor çapına göre farklılık göstermektedir. Tez çalışmasında ele alınan 6" 22 kW dalgıç asenkron motorun iç kısmındaki akış miktarı ve akış alanı sürekli sabit kalmaktadır. Şekil 4.27'de motorun üst kısmını oluşturan akış alanına ait akış çizgileri görülmektedir. Motor devrinin artması motorda ki akış alanını oluşturan akış çizgileri üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Ayrıca akış alanında

oluşan vortekslerin konumu da motor devrinden bağımsız olduğu gerçekleştirilen simülasyonlarda görülmüştür.



2000 dev/dk 2500 dev/dk 2900 dev/dk

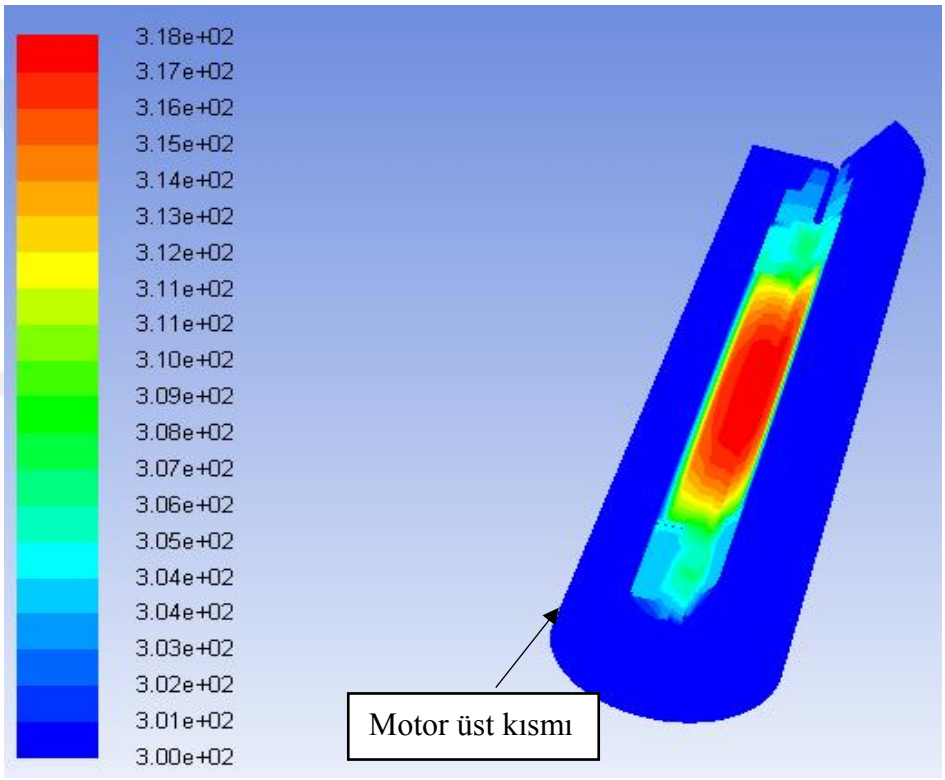
Şekil 4.27. Farklı devir hızları için motorun üst kısmındaki akış alanında oluşan akış çizgileri

4.2.3. Motor dış yüzeyinden 2 m/s hızında suyun dikey akışı durumunda motorun termal davranışı

Dalgıç pompalarda motor termal performansını iyileştirmek amacıyla motor yüzeyi üzerinden dikey yönde bir akış temin etme yöntemi endüstride su ceketi uygulaması olarak bilinmektedir. Tez çalışmasında referans alınan dalgıç motorun mevcut çalışma koşullarında farklı devirler için yürütülen CFD simülasyonları takiben su ceketinin motor termal davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Yürütülen simülasyonlarda motor etrafında 2 m/s dikey yönde bir akış alanı tanımlanmıştır. Motor devri seçilen motorun kullanıcılara sunulan 2900 dev/dak devri seçilmiştir. Yukarıda değinilen koşullar altında yürütülen CFD simülasyonları sonucunda yapılan saptamalar motor termal davranışı dikkate alınarak sunulmuştur.

Yukarıda değinilen sınır şartları altında saptanan motor boyunca ki sıcaklık dağılımı Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere motor boyunca sıcaklık dağılımı referans seçilen motor için mevcut çalışma koşulları çerçevesinde

yürütülen CFD simülasyonları sonucu elde edilen sıcaklık dağılımları ile benzer bir eğilim göstermektedir. Buna karşın sıcaklığı şiddeti mevcut çalışma koşularına nazaran önemli derece düşmektedir. Örneğin mevcut çalışma koşularında motor boyunca ki maksimum sıcaklık yaklaşık olarak 340 K iken motor yüzeyinde su akışı ile bu sıcaklık değeri 318 K kadar düşmektedir. Yine şekilde görüleceği üzere motor yapısında meydana gelen maksimum sıcaklık farkı yaklaşık olarak 14 ^{0}C'dir. Bu değer mevcut çalışma koşuları için yaklaşık olarak 38 ^{0}C'dir. Dolayısıyla motor yüzeyinde dikey yönde bir akış alanı motor termal davranışını önemli derece stabil yapmaktadır.

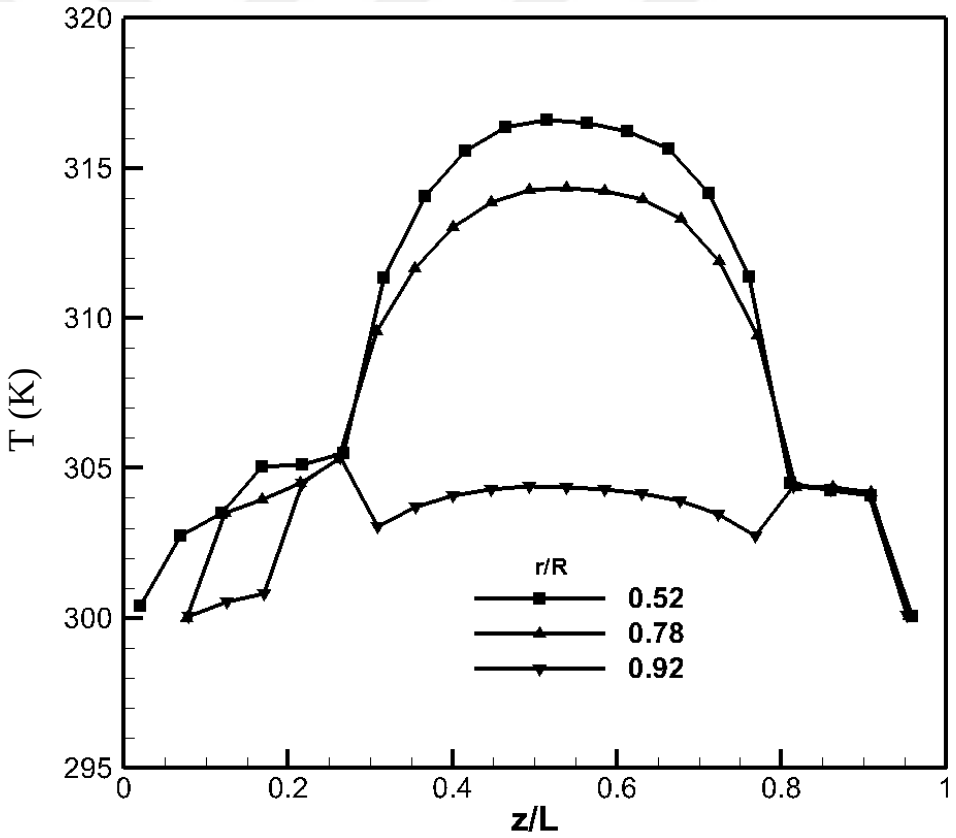


Şekil 4.28. Dikey yönde motor etrafında 2m/s hızındaki akış alanı sonucunda motor boyunca ki sıcaklık dağılımı

Motor etrafında 2m/s dikey yönde bir akış alanı sonucu motor ve tanımlanan kuyu boyuncaki basıç dağılımı ve akış çizgileri Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere motor etrafında dikey yönde bir akış alanı motor içindeki akış alanında önemli derece stabil yapmaktadır. Bunun sonucu olarak motor üst ve alt kısmı arasındaki basınç farkı çok düşük derecelerde olmaktadır. Yürütlen önceki CFD simülasyoların sonuçlarına ait Şekil 4.18, 4.21, 4.25 ve Şekil 4.29 birlikte

değerlendirldiğinde motor etrafındaki dikey yöndeki bir akışın hem motor termal davranışı hemde motor iç yapısındki akış alanı üzerinde önemli derecede olumlu yönde etkisi söz konusudur.

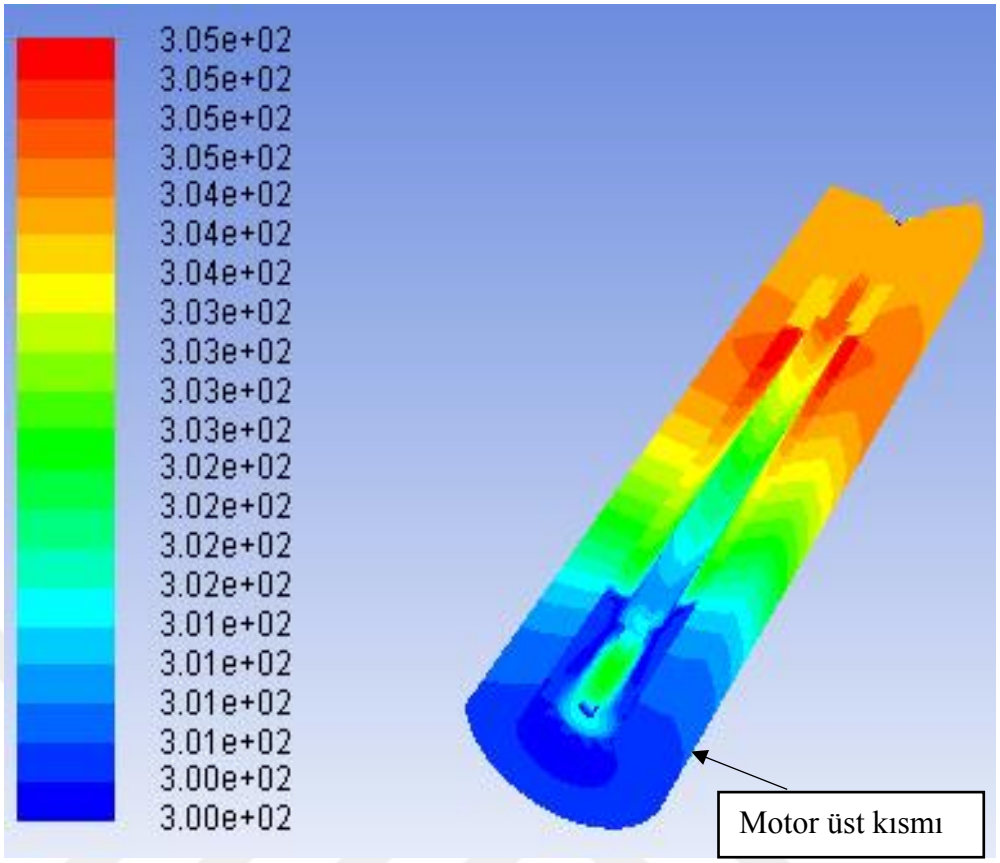
Motor etrafında dikey yönde bir akış alanı çerçevesinde yürütülen simülasyonlar sonucunda motor boyunca üç eksenel yöndeki sıcaklık dağılımları sayısal veri olarak saptanmıştır. Saptanan veriler Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere her üç eksende özellikle motorun stator bölümü boyunca sıcaklık dağılımı yaklaşık olarak parabolik bir eğilim göstermektedir. Bu parabolik eğilimde maksimum sıcaklık farkı r/R=0.52 noktadaki eksende 10 ^{0}C olarak meydana gelmektedir. Motor merkez ekseninden uzaklaştıkça söz konusu fark önemli derecede düşüş göstermektedir. Bu sonuç ürütülen önceki simülasyonlarda da gözlemlenmiştir.



Şekil 4.29. Dikey yönde motor etrafında 2m/s hızındaki akış alanı sonucunda motor boyunca sıcaklık dağılımları

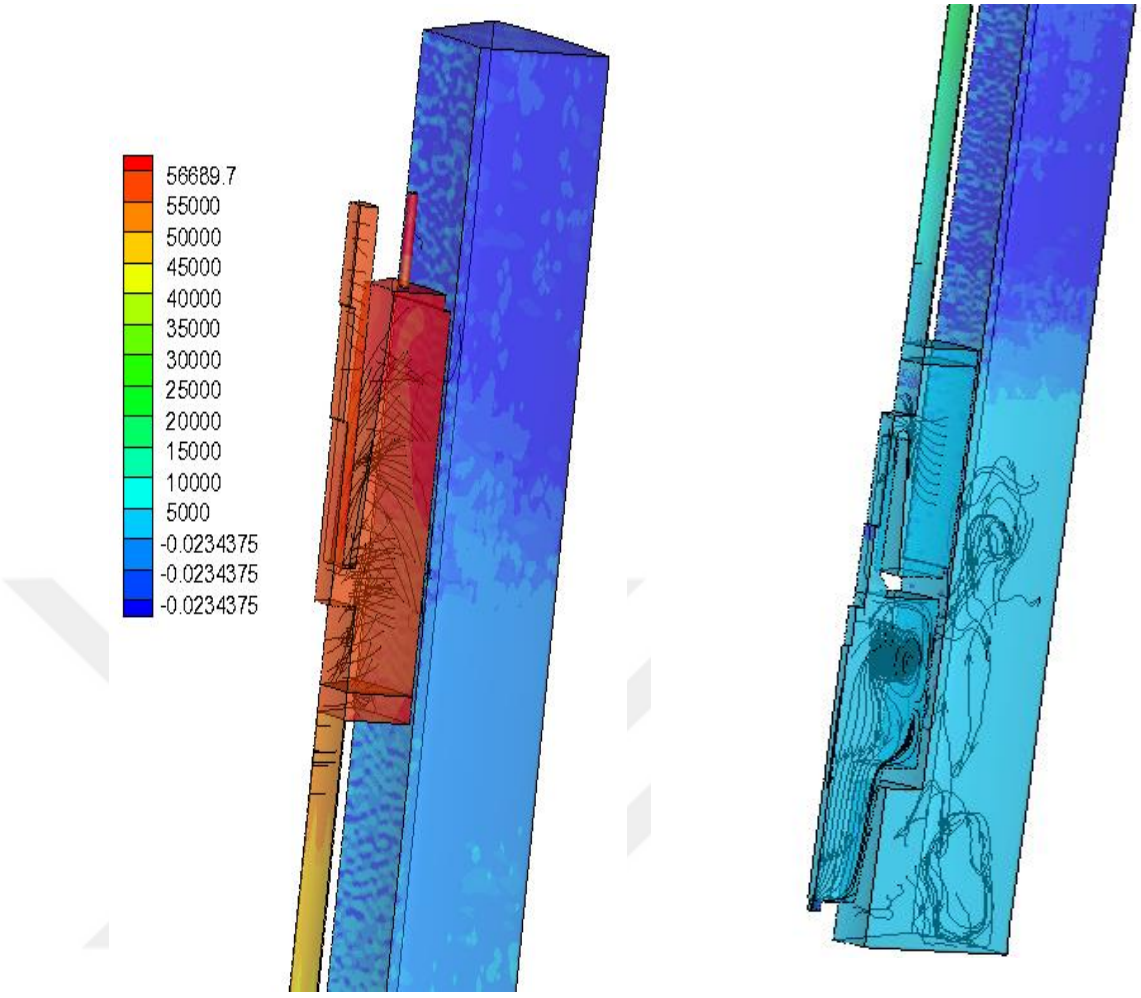
4.2.4. Motor sıvısını devir daiminin motor termal davranışına etkisi.

Önceden de değinildiği üzere dalgıç motorlar derin kuyular için tasarlanmış ince uzun bir silindirik geometriye sahip motorlardır. Söz konusu motorların yapısından dolayı motorda kayıplar sonucunda meydana gelen ısıyı yeterince hızlı bir şekilde dış ortma aktaramamaktadır. Bu motorlar bir sıvı kütlesi içinde çalıştığından yukarıdaki değinilen sorunu bir nebze giderebilmektedirler. Tez çalışmasının bu aşamasında değinilen olumsuzluğu minimize etmeye yönelik olarak motor sıvısının devir daiminin motor termal davranışına etkisi araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda motor üst kısmından motor içerisine 5mm çapındaki bir bağlatı elamanı ile su aktarılması ve aktarılan suyun motor altına yerleştirilen bir boşaltma tıpası ile motordan uzaklaştırılması şeklinde bir akış alanı tanımlanmıştır. Tanımlanan akış alanı çerçevesinde yürütülen CFD simülasyonları sonucunda motor boyuncaki motor termal davranışı saptanmıştır. Yapılan saptamalar sonucunda söz konusu koşullar altında motor boyuncaki sıcaklık dağılımı Şekil 4.30 gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere motor sıvısını devir daimi sonucunda özellikle motor üst kısmındaki sıcaklık yaklaşık olarak kuyu sıcaklığına düşmektedir. Şekilden de görüleceği gibi motor sıvısının devir daimi sonucunda motorun termal davranışı mevcut çalışma koşulları ve motor etrafında dikey yönden motor boyuncaki sıcaklık farkları yaklaşık olarak 5^0C altında olmaktadır. Dolayısıyla motor sıvısının devir daimi motor termal performansında önemli derecede iyileşme sağlamaktadır.



Şekil 4.30. Motor sıvısının devir daimi sonucunda motor boyunca ki sıcaklık dağılımı

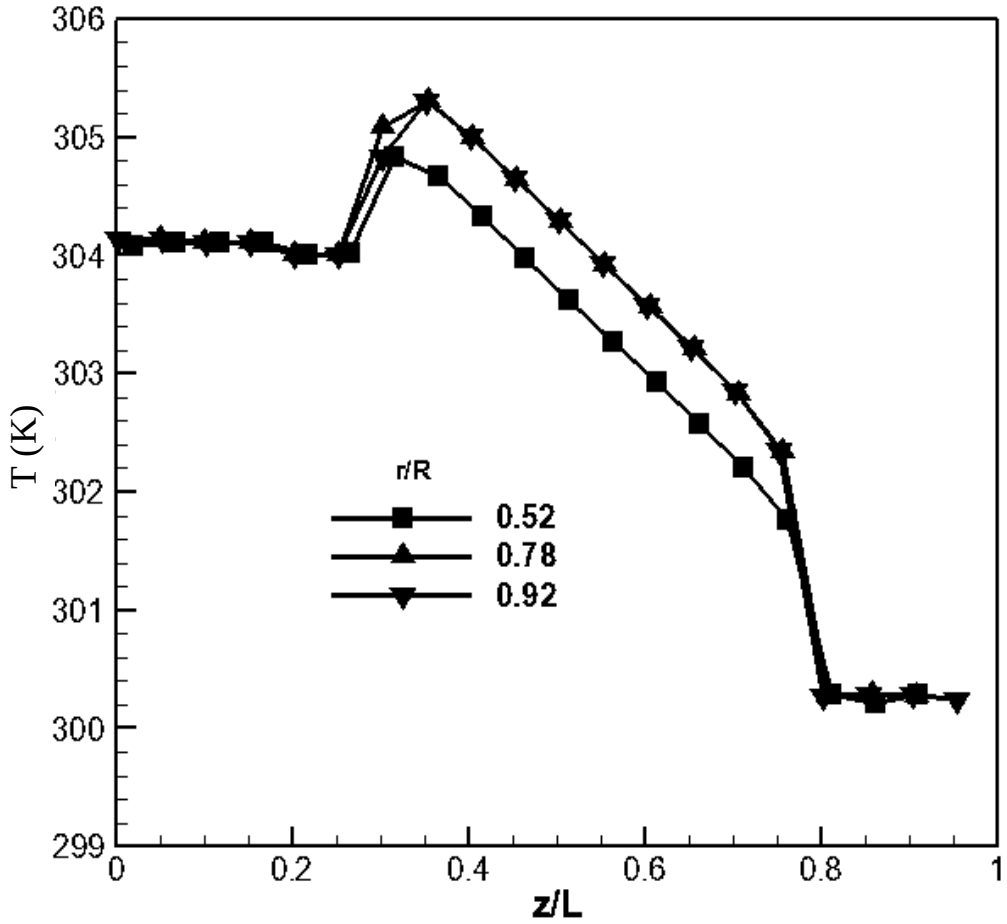
Motor sıvısının devir daimi koşularında ve motorun kuyu boyuncaki basınç dağılımı ve akış çizgileri Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere motor sıvısının devir daimi sonucunda motor üst kısmında yaklaşık 55kPA'lık bir basınç meydana gelmektedir. Motor alt kısmında ise basınç değeri yaklaşık olarak 5 kPa değerine düşmektedir.



Şekil 4.31. Motor sıvısının devir daimi sonucunda akış alanı boyunca ki basınç dağılımı ve akış çizgileri

Motor sıvısının devir daimi şeklindeki bir akış alanı çerçevesinde yürütülen simülasyonlar sonucunda motor boyunca üç eksenel yöndeki sıcaklık dağılımları sayısal veri olarak saptanmıştır. Saptanan veriler Şekil 4.32'de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere her üç eksende sıcaklık dağılımları benzer eğilim göstermekte ve önceki farklı koşullarda yürütülen CFD simülasyonları ile tamamen farklık göstermektedir. Yine şekilde görüleceği üzere motor boyunca oluşan en büyük sıcaklık farkı yaklaşık 4^0 C'dir. İlk su girişine bağlı olarak motorun üst kısmı en düşük sıcaklığa sahiptir. Motor boyunca her üç eksende maksimum sıcaklık stator kısmının alt ucunda meydana gelmektedir. Özellikle motorun stator bölümü boyunca sıcaklık dağılımı yaklaşık olarak parabolik bir eğilim göstermektedir. Bu parabolik eğilimde maksimum sıcaklık farkı r/R=0.52 noktadaki eksende 10 ^{0}C olarak meydana gelmektedir. Motor merkez ekseninden uzaklaştıkça söz konusu fark

önemli derecede düşüş göstermektedir. Bu sonuç ürütülen önceki simülasyonlarda da gözlemlenmiştir.



Şekil 4.32. Motor sıvısını devir daimi sonucunda motor boyunca ki sıcaklık dağılımları

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında özellikle tarım sektöründe yaygın olarak kullanılan dalgıç motorun termal performansı deneysel ve nümerik araştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında deneysel ölçümler ve CFD simülasyonları eş zamanlı yürütürmüştür. Yürütülen deneysel ölçümlerde motor termal performansının motor verilerine etkisi saptanmıştır. CFD simülasyonları ile ise beş farklı çalışma koşulu için motor termal davranışı incelenmiştir. Bu bölümde ilk olarak tez çalışmasında yapılan deneysel ve nümerik olarak tespit edilen bulguların özeti verilecek daha sonrada çalışmada eksik kalan yönler ve bu doğrultuda gelecekte yapılacak deneysel ve nümerik çalışmalar için öneriler sunulacaktır.

5.1. Sonuçlar ve Yenilikler

Seçilen endüstriyel tip bir dalgıç asenkron motorunun(6" 30HP) çalışma esnasında iç kısmında bulunan sıvının ısınması ile oluşan ısının motorun voltaj, akım, mil gücü, aktif güç, tork, motor devri, açısal hız, motorun iç basıncı, motor verimi ve motor ömrüne olan etkisi deneysel ölçümler ile doğrulanmış CFD simülasyonlarıyla araştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında, yukarıda sözü edilen her bir veri ayrı ayrı ele alınıp motor sıcaklığı ile arasında oluşan değişimler değerlendirilmiştir. Yapılan CFD simülasyonlarıyla motordaki termal analiz yapılarak deneysel veriler ile karşılaştırılıp değerlendirilmiştir.

Yukarıda değinilen motor verileri deneysel olarak ilk etapta hesaplanıp motor sıcaklığının veriler üzerindeki etkileri ele alınıp incelenmiştir. Yapılan test işleminde motor yüzeyine bağlanan termokupl çiftlerinden alınan veriler ile CFD simülasyonları için sınır şartları belirlendi. Motor sıcaklığının artması motor verilerinde ciddi bir değişim oluşturduğu deneysel veriler ile kanıtlanmıştır. Deneysel ölçümlere eş zamanlı olarak test edilen 6" 30HP motorun tasarlanan ölçülerinde ve deneysel ölçümlerin sınırları çerçevesinde tasarlanan model ile CFD simülasyonları yürütülmüştür. Yürütülen CFD simülasyonlarında motor devrindeki

artışın motor içyapısında göreceli olarak daha üniform bir yapıya neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca devir sayısının akış yapısı üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı ve yürütülen çalışmalar sonucunda motor üst kısmının yaklaşık olarak %20 alt kısmına göre daha çok ısındığı saptanmıştır. Motor üst kısmının ısınmasından dolayı motor sıvısındaki basınç artışı ise en fazla üst kısımda gözlemlenmiştir. Eş zamanlı yürütülen çalışmalardan CFD simülasyon sonuçlarında deneysel ölçümler ile tam bir uyum gösterdikleri gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, tez kapsamında CFD simülasyonların yürütülmesinde izlenen yöntemin güvenirliğini gösteren en önde gelen parametredirler.

Deneysel ölçümler motor sıcaklığının diğer motor verileri ile olan ilişkisi değerlendirilip motorun termal analizinin önemi vurgulanmıştır. Motor test işleminde elde edilen verilerin motor sıcaklığının ne kadar büyük bir öneme sahip olduğunu ve bu konun çözümü için gerekli araştırmalar yapılıp öneriler kısmında sunulmuştur. Dalgıç asenkron motorun sıcaklığının aşağıdaki her bir parametre için yürütülen deneysel verileri değerlendirilip motor verimine etkisi sırayla özet şeklinde sunulmuştur.

- **Motorun çektiği akım:** Yürütülen deneysel verilerde motor sıcaklığının artması ile motorun çektiği akım normal çekmesi gereken akım miktarından daha fazla akım çekmiştir. Örneğin 6" 30 HP (22kW) test motorun çekmesi geren akım miktarı 49 A iken deneysel verilerde 51 A çektiği görülmüştür. Zamanla akım miktarının düşmesi ise motorun olması gereken güçte olmadığı için akım miktarı düşüş göstermiştir.

- **Motorun aktif gücü:** Motor sıcaklığının artması ile motorun güçten düşmesi ile sistemden çektiği güç miktarı artmaktadır. Aktif gücün yükselmesi ile motor verimi de azalmaktadır. Yapılan testte aktif gücün sürekli değişim göstermesi test motorunun olması gereken güçte olmadığını ve motor veriminin zamanla düşmesine neden olmaktadır. Motor mil gücünün aktif güce oranı bize motor verimini vermektedir. Test edilen 22 kW motorun test edilen firma kataloğunda %85 verimle

çalıştığı yazılmasına rağmen test sonucunda motor veriminin en fazla %80 serilerinde olduğu ölçülmüştür.

- **Motorun mil gücü:** Motor sıcaklığının artması motor verilerinde en çok motor mil gücünde kayba neden olmaktadır. Motor sıcaklığın artması motorun mil gücünde azalmasına neden olurken pompadan gelen yükü karşılık göstermediği içn pompanın veriminde ciddi bir azalmaya neden olur. Motor sıcaklığının kontrol altına alınması ile motor gücünde oluşan kaybın önüne geçilecektir. Yapılan deney setinde test edilen 6 " 30 HP motorun mil gücünün 22 kW olması gerekirken zamanla motor sıcaklığının artması ile mil gücünün 20,8 kW kadar düştüğü görülmüştür. Kısa bir süre içerisinde 1,2 kW'lık bir güç kaybı yaşanmış olması motorun daha fazla çalıştırılması ile daha büyük güç kayıplarına neden olması beklenmektedir.

- **Motorun devri ve torku:** Motor sıcaklığının artması motorun devrinde ve torkunda düşüş meydana getirmektedir. Motor devrinin azalmasının en büyük etkilerden biri pompanın birim zamanda vermesi gereken su miktarında azalma meydana gelmesini sağlamaktadır. Motor devri motor torkuyla beraber doğru orantılı bir şekilde azalmaktadır. Test edilen 6 " 30HP dalgıç asenkron motorunun katalogdaki devir sayısı 2870 rpm iken deney düzeneğinde ise 2836 RPM olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde motor torkunun 75 Nm olması gerekirken deney düzeneğinde ölçülen değer ise 70,2 Nm olarak ölçülmüştür.

- **Motor verimi:** Dalgıç asenkron motorlarında motor içinde bulunan sıvının ısınması ile motor sıcaklığı artmaktadır. Yapılan ölçümlerde motordaki mevcut kaybın yanı sıra yaklaşık %3.5 verim düşüşünün motor ısınmasından kaynaklandığı saptanmıştır. Ayrıca motor içerisindeki sıcaklığının 130 ^{0}C üstüne çıkmasında motoru oluşturan iki ana parçadan biri olan rotorun yataklanmasında kullanılan karbon yatakların zarar görmesine bununla birlikte diğer ana parça olan statordaki sargıların ise sıcaklıktan etkilenip motorun elektriksel olarak yanmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak dalgıç asenkron motorlarında oluşan sıcaklık motorun hem mekanik açıdan hem de elektriksel açıdan zarar görmesine neden olmaktadır.

5.2. Öneriler

Yürütülen deneysel çalışmalarda gözlemlenmiştir ki dalgıç asenkron motor sıcaklığının motor verileri üzerindeki olumsuz etkileri gözlenmiştir. Bundan dolayı motor sıcaklığının önlenmesinde gerekli önemlerin tasarımı özellikle işletme maliyeti açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle maliyet ve tasarım açısından, motor üzerinde yapılacak tasarım karmaşık bir yapıya sahiptir. Yapılan deneysel çalışmalardan alınan veriler ile motor sıcaklığının etkileri ve alınması gereken önemlerin önemini vurgulanmıştır. Deneysel verilerin yanı sıra deneysel ölçümler ile doğrulanmış CFD simülasyonlarının kullanılmasının etkili bir yöntem olduğu tez çalışmasının sonuçlarından anlaşılmıştır. Bu yöntemin izlenmesinde motor boyunca oluşan ısının motor verileri üzerindeki etkileri ve farklı bir soğutucu akışkan kullanılarak oluşan sıcaklık değişimi konusunda bize yol göstermiştir. CFD simülasyonları boyunca karmaşık bir tasarıma ship olan motorun farklı hacim alanları oluşturularak CFD analizi yapılmıştır. Bu zorluk ancak optimal lokal mesh tasarımlarıyla aşılabilir.

Dalgıç asenkron motorun ısınmasının önüne geçmek öncelikle motorun kullanılacağı kuyu suyunun özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Kuyu suyunun özelliklerinin belirlenmesinden sonra motor sıcaklığının önüne geçmek için aşağıdaki belirtilen yöntemlerden biri seçilerek motorun ısınmasının önüne geçilebiliriz. Ayrıca kullanılacak dalgıç asenkron motorunun kuyu içerisindeki montaj biçimi kullanılacak yöntemde önemli rol oynamaktadır.

Dalgıç asenkron motorların ısınmasının önüne geçmek yapılması gereken ve en uygun olan yöntem su ceketlerinin(kılıf) kullanılmasıdır. Su ceketleri kullanılarak kuyu içerisinde sıvının motor yüzeyi üzerinde hareketini sağlayıp motorun ısınmasının önüne geçilmek amaçlanmaktadır. Kullanılacak su ceketlerinin tasarımında motor çapı ve kuyu özellikleri en önemli iki etkeni oluşturmaktadır. Motor yüzeyinin paslanmaz AISI 304 L saçtan yapılmasının en önemli özelliği kuyu içerisinde bulunan elementlerin motor yüzeyi üzerinde tortu ve pas oluşmasının önüne geçilmesidir. Su ceketleri kullanılan motor çapına ve kuyu derinliğine göre

farklılık gösterebilir. Su ceketleri maliyet acısından ve Türkiye'deki kuyuların özelliği bakımından en çok tercih edilmesi gereken yöntemdir.

Dalgıç asenkron motorlarının ısınmasının önüne geçmek için önerilen bir diğer yöntem ise dalgıç asenkron motorunun tasarımında bir takım değişiklik yapılmasının motor oluşan ısısının önüne geçilmesi planlanmaktadır. Dalgıç asenkron motor önceden de belirtildiği üzere iki ana parça olan rotor ve statorden oluşmaktadır. İki ana parçanın yanı sıra motor üst yatak, alt yatak, membran flaşı ve membran gövdesinden oluşmaktadır. Motor ısısının önüne geçilmesi için farklı bir tasarım gerektiren parçamız motorun üst kısmını oluşturan üst yatakta yapılması gerekmektedir. Üst yatağa birbirine dik olan iki farklı noktadan birer delik delinip bu deliklerden birine emiş diğerine ise çıkış olacak şekilde iki adet filtreli supap takılması planlanmaktadır. Motor içerisinde ısınan sıvı motor üst kısmına doğru birikirken motor içerisindeki sıvının ile kuyu arasındaki basınç farkından dolayı ısınan sıvı çıkış supabından kuyuya geçerken motor içerisinde bulunan suyun azalması ile kuyu içerisindeki su ise emiş supabından motor içerisine dolar. Bu şekilde motor içerisinde bulunan suyun devri daimi sağlanıp motorun ısınmasının önüne geçilmesi planlanmaktadır. Önerilen bu yöntem maalesef Türkiye'nin birçok bölgesinde kullanılması bize olumlu bir sonuç vermesi beklenmemektedir. Çünkü Türkiye'de bulunan kuyuların çoğu kuyu suyunun çok kirli ve tortulu oluşu kullanılan filtrelerin kısa zaman içinde tıkanmasına neden olmakla beraber motorun susuz kalmasına ve motor yanmasına neden olması beklenir. Önerilen bu yöntem daha çok baraj sularında ve içme sularının olduğu tesislerde kullanılması olumlu sonuçlar verebileceği düşünülmektedir.

Motor ısınmasının önüne geçmek için düşünülen ve öneride bulunduğumuz bir diğer yöntem ise kuyudan çıkarılan suyunun kuyu dışında arıtılıp bir hortum vasıtası ile motor içine gönderilerek dalgıç motorun ısınmasının önüne geçilmek amaçlanmaktadır. Motorun üst yatağından motor içine gönderilen su motorun alt kısmında bulunan membran üzerindeki boşaltma deliğinden kuyuyu verilmesi sağlanmaktadır. Bu şekilde suyun sürekli devri daimi sağlanıp motorun ısınması engellenmiş olunur.

Motor sıcaklığının artması ve azalması motor performansı üzerinde sürekli bir artış ve azalış sağladığı, yürütülen çalışmalardan saptanmıştır. Bundan dolayı bir dalgıç asenkron motor için sıcaklık koşulları ancak bir parametrenin kendi içinde değerlendirilmesinin yanında diğer parametrelerinde bir arada değerlendirilmesiyle mümkündür.

Tez çalışması kapsamında dikkate alınan deneysel ve CFD simülasyonlarından yola çıkarak dalgıç asenkron motorunun sıcaklığını düşürmek için önerilen yöntemler kullanılarak motor sıcaklığının düşürülmesi sağlanıp motor ömrünün uzamasına ve motor performansını en üst seviyede tutulması amaçlamaktadır.

KAYNAKLAR

AHMED, S. and TOLİYAT H. A., 2007. Coupled Field Analysis Needs in the Design of Submersible Electric Motors. Electric Ship Technologies Symposium, ESTS 07: 231-237.

ARGYROPOULOS, C. D. and MARKATOS, N. C., 2015. Recent advances on the numerical modelling of turbulent flows. Applied Mathematical Modelling, *39* (2): 693-732.

BADRAN, O., SARHAN, H. and ALOMOUR, B., 2012. Thermal performance analysıs of ınductıon motor, 30(1):75-88.

BETONİCO, G. C., BANNWART, A.C. and GANZAROLLİ, M.M., 2015. Determination of the temperature distribution of ESP motors under variable conditions of flow rate and loading. Journal of Petroleum Science and Engineering, 129: 110–120.

BORGES, S.S., CEZARİO, C.A. and KUNZ, T.T., 2008. Design of Water Cooled Electric Motors Using CFD and Thermography Techniques. Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, s.1-6.

BRADSHAW, P., 1996. Turbulence modeling with application to turbomachinery. Progress in Aerospace Sciences, *32* (6): 575-624.

CHOUDHURY, M.A. and AZİZUR RAHMAN, M., 1992. Starting performances of Delta-Modulated inverter-fed submersible induction motors. IEEE Trans. onIndustry Appl, 28(3):685-693.

ÇUNKAŞ, M., 2012. Dalgıç motorlar üzerine bir inceleme. S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Derg.27(4):135-148.

EGİDİ, N., MAPONİ, P., MİSİCİ, L. and RUBİNO S.. 2012. A three-dimensional model for the study of the cooling system of submersible electric pumps. Mathematics and Computers in Simulation, (in press) 82: 2962–2970.

ERTÖZ, A.Ö., 2001. Jeotermal akışkanların pompajı. 7. Ulusal Tesisat Müh. Kongresi, İzmir, s.109-116.

GAO, F., WANG, H. and WANG, H., 2017. Comparison of different turbulence models in simulating unsteady flow. Procedia Engineering, 205: 3970-3977.

GUNDELA, V.A. and KULKARNİ, M.S., 2012. Optımızatıon Of The Core Length Of A Water Cooled Three Phase Submersıble Motor. International Journal of Engineering Research and Applications, s.508-514.

HUAİ, Y., MELNİK, R.V.N. and THOGERSEN, P.B., 2003. Computational analysis of temperature rise phenomena in electric induction motors. Applied Thermal Engineering, 23: 779–795.

JANKOWSKİ, T.A., PRENGER, F.C., HİLL, D.D., O'BRYAN, S.R., SHETH, K.K., BROOKBANK, E.B., HUNT, D.F.A. and ORREGO, Y.A., 2010. Development and Validation of a Thermal Model for Electric Induction Motors. IEEE Transactıons On Industrıal Electronıcs, 57(12):4043-4054.

JİANJUN, L., JİBİN, Z., XİNTONG, J. and XİNGHE, F., 2010. Electrical-thermal Coupled Calculation of a Submersible Motor Used for Deep-sea Electromagnetic Propeller. In Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation,IEEE,s. 1-1.

JUSSİLA, H. K., MİTYAKOV, A. V., SAPOZHNİKOV, S. Z., MİTYAKOV, V. Y. and PYRHÖNEN, J., 2012. Local heat flux measurement in a permanent

magnet motor at no load. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60(11): 4852-4860.

KİRVELİS, R. and DAVİES, D. R., 2003. Enthalpy balance model leads to more accurate modelling of heavy oil production with an electric submersible pump. Trans Int. Chem. Eng. Part A, 81(3): 342-351.

KAYA, D., YAGMUR, E. A., YİGİT, K. S., KİLİC, F. C., EREN, A. S. and CELİK, C., 2008. Energy efficiency in pumps. Energy Conversion and Management, 49 (6): 1662-1673.

Lİ, W., JİANG, X., PANG, Q., ZHOU, L. and WANG, W., 2016. Numerical simulation and performance analysis of a four-stage centrifugal pump. Advances in Mechanical Engineering, 8 (10):1-8.

LİU, B., BAO, XH., LİU, J. and ZHU QL., 2011. Insulation Life Prediction of High Voltage Submersible Motor Based on BP Neural Network. Int. Conference on Consumer Electronics Communications and Networks (CECNet), XianNing, China, 418-421.

MENG, D., LİU, Y., XU Y. and ZHANG Q., 2010. Analysis and Calculation of 3-D Temperature Field of Submersible Motor Rotor. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, s.1-4.

MENZAİ, S., TAKORABET, N. and LAPORTE, B., 2005. A Combined Electromagnetic and Thermal Analysis of Induction Motors. IEEE Transactıons On Magnetıcs, 41(5):1572-1575.

MELLOR, E.A., 1991. Lumped parameter thermal model for electrical machines of Tefc design. IEE Proceedings-B,138(5): 205-218.

ROSENBERRY, G.M.Jr., 1955. The transient stalled temperature rise of the cast aluminum squirrel rotors for induction motors. AIEE, vol, PAS-74.

SWATA, T. and STATON, D., 2011. Thermal Modeling of a Short-Duty Motor. Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2054-2059.

STEL, H., SİRİNO, T., PONCE, F. J., CHİVA, S. and MORALES, R. E., 2015. Numerical investigation of the flow in a multistage electric submersible pump. Journal of Petroleum Science and Engineering, 136: 41-54.

STATON, D., PİCKERİNG, S. and LAMPARD, D., 2001. Recent Advancement in the Thermal Design of Electric Motors. In SMMA Technical Conference– Emerging Technologies for Electric Motion Industry, s.1-7.

URL-1, 2005. Groundfos Mühendislik El kitabı Derinkuyu dalgıç pompaj sistemi, http://www.solar-academy.com/menuis/Muhendislik-El-Kitabi-Grundfos Pompa.024842.pdf (Erişim Tarihi: 01.04.2019).

XU Y., MENG D., LİU Y. and ZHANG Q., 2010. Amelioration Research of Submersible Motor Design Method. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, s. 1-4.

XU, Y.M., LİU, F. and ZHANG, F., 2015. Analysis of Heat Transfer Based on Fluid Network Decoupling in Submersible Motor. IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), s.81-82.

ZHU, J., BANJAR, H., XİA, Z. and ZHANG, H. Q., 2016. CFD simulation and experimental study of oil viscosity effect on multi-stage electrical submersible pump (ESP) performance. Journal of Petroleum Science and Engineering, 146: 735-745.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Bayram KAYA
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : BATMAN - 18.05.1993
Telefon : 5066727461
e-mail : bayramkaya72@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Gercüş Anadolu Lisesi /Gercüş/ BATMAN	2010
Üniversite	: Harran Üniversitesi/ŞANLIURFA	2014
Yüksek Lisans	: Harran Üniversitesi/ŞANLIURFA	2019

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2014-2107	Fırat Motor Pompa	Üretim Mühendisi
2017-2017	Fırat Motor Pompa	Üretim Müdürü

UZMANLIK ALANI: Akışkanlar Mekaniği, Dalgıç asenkron motor, Termal analiz

YABANCI DİLLER: İngilizce

EKLER

Ek 1. Seçilen endüstriyel tip dalgıç asenkron motorun test raporu

FIRAT MOTOR VE POMPA ELK.SAN.TİC.LTD.ŞTİ www.ferat.com.tr	SUBMERSIBLE MOTOR TEST REPORT	CODE	
		REV NO	4
		REV DATE	10.09.2014
			01.08.2006

Date of test:	27.12.2018	Report number:	271218-1026	Date of issue:	

Motor description

Rated output power	kW	22	Manufacturer	FIRAT	
Rated voltage	V	380	Model Nr.	FM6/30	
Rated current	A	49	Serial Nr.	221861141	
Rated speed	min^{-1}	2870	Duty type IEC 60034-1	S1	
Supply frequency	Hz	50	Design	Water Cooled	
Number of Phases	-	3	Insulation class IEC 60085	Y	
IEC 60034-30-1 (rated)	E-Code	IE1	Max. ambient temperature	35	°C

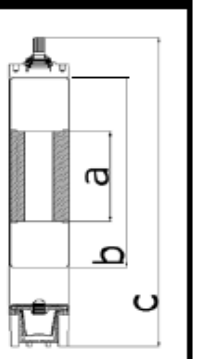
Initial motor conditions				6.1.3.2.1 Rated load test			
Test resistance	R_i		Ω	Test resistance	R_n		Ω
Winding temperature	θ_0		°C	Winding temperature	θ_n		°C
Ambient temperature	θa		°C	Ambient temperature	θa		°C

6.1.3.2.3 Load curve test

Test resistance before load test					R			Ω
Rated output power		%	100	100	100	100	100	100
Water temperature	θ_{wa}	°C	12.2	25.7	37.4	43.9	53	61.5
Rated output power	P_{out}	kW	22.17	21.43	21.590	21.250	21.267	20.91
Torque	T	Nm	74.6	72	72.6	71.4	71.6	70.4
Input power	P_1	kW	28.21	27.252	27.220	26.730	26.571	26.206
Line current	I	A	51.5	50.05	50.010	49.250	48.910	48.273
Operating speed	n	min^{-1}	2838	2842	2840.00	2842.00	2836.00	2836
Teminal voltage	U	V	382.5	383.5	383.80	384.70	384.28	384.76
Frequency	f	Hz	50	50	50	50	50	50
Power Factor	Ø	Cos	0.818	0.813	0.813	0.810	0.811	0.81
Efficiency	η	%	78.589	78.636	79.317	79.499	80.04	79.79
Temperature efficiency change								
Test resistance before load test					R			Ω

6.1.3.2.4 No Load test

Test resistance before load test				R				Ω	
Rated Voltage	%		110	100	95	90	60	50	40
Input power	P_1	kW	*	*	*	*	*	*	*
Line current	I	A	*	*	*	*	*	*	*
Teminal voltage	U	V	*	*	*	*	*	*	*
Frequency	f	Hz	*	*	*	*	*	*	*
Power Factor	Ø		*	*	*	*	*	*	*
Winding temp	θ_w	°C	*	*	*	*	*	*	*
Test resistance before load test				R				Ω	



Locked Rotor				Dimensions			Weight		
Torque	T	Nm	74	a	b	c	kg		
Input power	P_1	kW	22	610	870	1200.5	92.3		
Line current	I	A	49	Winding			16		
Teminal voltage	U	V	380	Wire (mm)			1.7	Insulation	PPC
Frequency	f	Hz	50	Max.Diameter			143	Starting	λ /Δ
Power Factor	Ø	0.82		Notes					
Winding temperature	θ_w	62°C							

TESTİ YAPAN	KONTROL EDEN
Bayram KAYA	Ömer SİNGAN

Adres:Organize San.Böl.203.Cad. No:31 ŞANLIURFA/TÜRKİYE

Tel: +90 414 357 57 05, Faks: +90 414 357 57 08, ferat@ferat.com.tr- info@ferat.com.tr

Ek 2. Seçilen endüstriyel tip dalgıç asenkron motorun tüm test verileri

Time	Voltaj Ort.	Akım Ort.	Cos	Teorik Aktif Güç	Aktif Güç	Tork	Devir	Açısal hız	Teorik Mil Gücü	Mil Gücü	Teorik Verim	Verim	Su Sıcaklığı
31.12.2018	382.5036	51.48923	0.8177755	27.89630269	28.21611	74.6	2839.2	297.044	22.1594824	22.17072	79.44	78.57468659	12.20
31.12.2018	382.9321	51.20263	0.8172182	27.75317664	27.93347	74.2	2839.2	297.1696	22.04998432	22.06117	79.45030801	78.97754916	12.8
31.12.2018	382.9437	50.97517	0.8170564	27.62525372	27.8006	74.2	2840	297.253333	22.05619733	22.06738	79.84070501	79.37735157	15.9
31.12.2018	383.0806	50.57236	0.8155189	27.36516289	27.64658	73	2842	297.462667	21.71477467	21.72579	79.35189261	78.58400569	19.3
31.12.2018	383.2197	50.49461	0.8145061	27.29906781	27.45196	72.6	2842.4	297.504533	21.59882912	21.60978	79.1192918	78.7185323	21.7
31.12.2018	383.318	50.40548	0.8145661	27.25987924	27.42174	72.4	2842.4	297.504533	21.53932821	21.55025	79.0147602	78.58819316	23
31.12.2018	383.2876	50.15224	0.8143711	27.11428053	27.31037	72.2	2842.4	297.504533	21.47982731	21.49072	79.21961006	78.69069515	24.4
31.12.2018	383.5112	50.04888	0.813096	27.03179385	27.25155	72	2842.4	297.504533	21.4203264	21.43119	79.24123172	78.64209559	25.7
31.12.2018	383.7566	49.95115	0.8128218	26.98716841	27.16309	72	2842.4	297.504533	21.4203264	21.43119	79.37226342	78.89820341	26.8
31.12.2018	383.759	49.88984	0.8123447	26.9383917	27.15394	72	2842.4	297.504533	21.4203264	21.43119	79.51598089	78.92478955	27.4
31.12.2018	383.7659	49.88545	0.812375	26.93751032	27.14005	72	2842.4	297.504533	21.4203264	21.43119	79.51858263	78.96518245	28.6
31.12.2018	383.7787	49.91668	0.8129957	26.97586849	27.17534	72	2842.4	297.504533	21.4203264	21.43119	79.40551167	78.86263797	29.9
31.12.2018	383.7892	49.91668	0.8129957	26.97660663	27.17534	72.2	2842	297.462667	21.47680453	21.4877	79.6126989	79.07058385	31.1
31.12.2018	383.7929	49.93246	0.8129194	26.98286213	27.18141	72.6	2840.8	297.337067	21.58667104	21.59762	80.00141326	79.45732028	32.3
31.12.2018	383.8002	50.01259	0.8132254	27.03685082	27.22042	72.6	2840.4	297.2952	21.58363152	21.59458	79.83041983	79.33228069	33.5
31.12.2018	383.8002	50.01259	0.8132254	27.03685082	27.22042	72.6	2840	297.253333	21.580592	21.59154	79.81917769	79.32111261	34.7
31.12.2018	383.8152	50.00933	0.8133814	27.0899967	27.26726	72.4	2840.4	297.2952	21.52417248	21.53509	79.45431933	78.97782909	35.8
31.12.2018	383.8512	49.95203	0.8129897	26.99987264	27.25387	72.2	2841.2	297.378933	21.47075899	21.48165	79.52170467	78.82054916	37.1
31.12.2018	384.0896	49.70399	0.812163	26.85515286	27.15029	72.6	2842.4	297.504533	21.59882912	21.60978	80.42713154	79.59318298	38.2
31.12.2018	384.2838	49.63432	0.8113033	26.80266775	26.9879	72	2842.4	297.504533	21.4203264	21.43119	79.91863572	79.41036539	39.3
31.12.2018	384.2492	49.57885	0.8117564	26.78525403	26.97858	71.6	2842.4	297.504533	21.30132459	21.31213	79.5263116	78.99648536	40.4
31.12.2018	384.3074	49.47045	0.8109975	26.70574825	26.90882	71.6	2842.4	297.504533	21.30132459	21.31213	79.76306967	79.20128047	41.6
31.12.2018	384.4417	49.46319	0.8104325	26.69255135	26.88901	72.2	2842.4	297.504533	21.47982731	21.49072	80.47124094	79.9238053	42.7
31.12.2018	384.7196	49.24833	0.8094174	26.56250226	26.72692	71.4	2842.4	297.504533	21.24182368	21.2526	79.96921177	79.51758003	43.9
31.12.2018	385.0421	49.1374	0.8090975	26.51440446	26.69628	71	2842.4	297.504533	21.12282187	21.13354	79.66545844	79.16286464	45
31.12.2018	385.127	49.09084	0.8085921	26.47857149	26.67452	71.6	2842.4	297.504533	21.30132459	21.31213	80.44740855	79.89695785	46.1
31.12.2018	384.979	49.11815	0.8093222	26.50703319	26.66656	71.2	2842.4	297.504533	21.18232277	21.19307	79.91208454	79.4743304	47.2
31.12.2018	385.0314	49.01728	0.8093116	26.45585182	26.62173	71.6	2842	297.462667	21.29832693	21.30913	80.50516415	80.04412185	48.4
31.12.2018	385.1052	48.6988	0.8077447	26.23810025	26.45681	71.2	2842.4	297.504533	21.18232277	21.19307	80.7311603	80.10440412	49.5
31.12.2018	385.0145	48.84314	0.8085749	26.3367114	26.51684	71.2	2838	297.044	21.1495328	21.16026	80.30438	79.79932752	50.7
31.12.2018	384.6928	48.91334	0.8104867	26.41483469	26.7171	71.6	2836.4	296.876533	21.25635979	21.26714	80.47129591	79.60122918	51.9
31.12.2018	384.2854	48.91414	0.8109202	26.40140585	26.57068	71.6	2836.4	296.876533	21.25635979	21.26714	80.51222692	80.03987854	53
31.12.2018	384.1694	48.74519	0.8101294	26.27662344	26.46806	71.2	2836.4	296.876533	21.13760917	21.14833	80.44263838	79.90132258	54.2
31.12.2018	384.2946	48.66452	0.8095933	26.22432139	26.31289	70.8	2836.4	296.876533	21.01885856	21.02962	80.15024772	79.92098169	55.3
31.12.2018	384.3933	48.69719	0.8103924	26.27457487	26.42929	71.4	2836.4	296.876533	21.19698448	21.20774	80.67489041	80.24332095	56.4
31.12.2018	384.6978	48.51891	0.8094023	26.1671124	26.34937	71.6	2836.4	296.876533	21.25635979	21.26714	81.23311225	80.71213847	57.6
31.12.2018	384.6231	48.50788	0.8095387	26.1604916	26.31637	70.2	2836.4	296.876533	20.84073264	20.8513	79.66491212	79.23319212	58.8
31.12.2018	384.6012	48.51103	0.8100339	26.16989723	26.3256	70.4	2836.4	296.876533	20.90010795	20.91071	79.963164	79.43108609	59.9
31.12.2018	384.5925	48.43745	0.8096984	26.12558301	26.28476	71.4	2836.4	296.876533	21.19698448	21.20774	81.13497209	80.68454877	60.7
31.12.2018	384.7604	48.27372	0.8091462	26.03087465	26.20618	70.4	2836.4	296.876533	20.90010795	20.91071	80.28968763	79.79304882	61.5
31.12.2018	384.5371	48.27221	0.8096885	26.03238912	26.17737	71.2	2836.4	296.876533	21.13760917	21.14833	81.19734641	80.78859717	62