İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇ MOTORUNUN SOĞUTMA SİSTEM TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yaşar MUTLU

Anabilim Dalı : Makina Mühendisliği

Programı : Isı Akışkan

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇ MOTORUNUN SOĞUTMA SİSTEM TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yaşar MUTLU
(503091163)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 15 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Murat ÇAKAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Levent KAVIRMACIOĞLU (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN (İTÜ)

HAZİRAN 2011

Sevgili Eşime,

ÖNSÖZ

Öncelikle, tez çalışmalarım boyunca engin bilgisini ve tecrübesini benimle paylaşarak çalışmalarıma yön veren saygıdeğer hocam Yrd. Doç. Dr. Murat ÇAKAN 'na çok teşekkür ederim. Ayrıca bu tez çalışmasının sayısal analizleri için bana gereken imkanları sağlamış olan İstanbul Teknik Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Yüksek Başarımlı Hesaplama Laboratuarına teşekkür ederim.
Son olarak bu tez çalışması boyunca her zaman bana destek olan ve benimle her türlü zorluğa katlanan yol arkadaşım, sevgili eşim Pegah'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2011 Yaşar MUTLU

(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Elektrikli Araçların Tarihçesi 1
1.2 Akülü Elektrikli Araçların Çalışma Prensibi 4
1.3 Akülü Elektrikli Araçların Avantaj ve Dezavantajları 5
1.4 Tezin Amacı 6
1.5 Tasarlanan Elektrikli Araç Özellikleri 8
1.6 Literatür Özeti 8
2. ISI AKTARIM TEORİSİ **13**
2.1 Amaç 13
2.2 Süreklilik Denklemi 13
2.3 Momentum Denklemleri 15
2.4 Enerji Denklemi 18
2.5 Isı İletimi 21
2.6 Isı Taşınımı 21
2.7 Akış Analizi ve Türbülans 23
3. SAYISAL ANALİZ **27**
3.1 Giriş 27
3.2 Ağ Üretimi Metodolojisi 28
3.3 Sayısal Çözüm Metodolojisi 31
4. MOTOR SOĞUTUCU TASARIMI **39**
4.1 Giriş 39
4.2 Serpantin Modeli 40
4.3 Manifold Modeli 43
4.4 Helisel Model 46
4.5 Helisel 3,5 Tur 47
4.6 Helisel 4 Tur 49
4.7 Helisel 4 Tur Tümsekli 50
4.7.1 Helisel 4 tur tümsekli birinci konfigürasyon 51
4.7.2 Helisel 4 tur tümsekli ikinci konfigürasyon 53
4.7.3 Helisel 4 tur tümsekli üçüncü konfigürasyon 53
4.7.4 Helisel 4 tur tümsekli dördüncü konfigürasyon 54
5. SONUÇ VE ÖNERİLER **57**
KAYNAKLAR **61**
EKLER **63**

KISALTMALAR

BLDC : Fırçasız doğru akım motoru
rpm : dev./dak.
$\vec{V}$: Hız
u : Hızın x Yönündeki Bileşeni
v : Hızın y Yönündeki Bileşeni
w : Hızın z Yönündeki Bileşeni
ρ : Yoğunluk
∀ : Hacim
m : Kütle
t : Zaman
$\vec{F}$: Kuvvet
$\vec{M}$: Momentum
$\vec{a}$: İvme
f : Birim kütle başına kuvvet
τ : Kayma gerilmesi
σ : Normal gerilme
μ : Dinamik viskozite
Q : Isı
q : Birim zamanda geçen ısı
W : İş
Ẇ : Birim zamanda yapılan iş
T : Sıcaklık
K : Isı iletim katsayısı
u : Birim kütle için iç enerji
P : Basınç
ϕ : Disipasyon fonksiyonu
q'' : Isı akısı
h : Isı taşınım katsayısı
Re : Reynolds sayısı
HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CPU : Merkezi işlem birimi
k : Türbülans kinetik enerjisi
μ_t : Türbülans viskozitesi
σ_k : Türbülans kinetik enerjisi Prandtl sayısı
σ_ε : Türbülans disipasyon oranı Prandtl sayısı
G_k : Türbülans kinetik enerjisi üretimi
G_b : Kaldırma kuvveti etkisinde meydana gelen türbülans kinetik enerjisi
ε : Disipasyon oranı
Y_M : Çalkantı genleşmesi
g : Yer çekimi ivmesi
M_t : Türbülans Mach sayısı
a : Ses hızı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Bazı akülerin özellikleri [3]. 4
Çizelge 1.2 : Akülü elektrikli araçların kıyaslanması [3]. 6
Çizelge 1.3 : Tasarlanmakta olan elektrikli aracın bazı özellikleri. 8
Çizelge 4.1 : Analizlerde kullanılan sınır koşulları. 40
Çizelge 4.2 : Sonuçların ağdan bağımsızlığı araştırması. 40

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Stephen Anyos JEDLIK in yaptığı ilk elektrik motoru 1827 [1]. 1
Şekil 1.2 : İlk elektrikli araç 1830 [2]..... 2
Şekil 1.3 : 1900 yılında New York'ta bir elektrikli taksi [3]..... 3
Şekil 1.4 : 100 km/h hız sınırını geçebilen ilk elektrikli araç [3]..... 3
Şekil 1.5 : Elektrikli Aracın Çalışma Prensibi [3]..... 5
Şekil 1.6 : Yüzey mıknatıslı BLDC motor. 9
Şekil 2.1 : Süreklilik denklemi çıkarımı için bir diferansiyel eleman [11]. 14
Şekil 2.2 : Momentum denklemlerinin çıkarımı için alınan diferansiyel eleman [11]. ..16
Şekil 2.3 : Bir akış elemanını yüzeyini etkileyen kuvvetler [11].....17
Şekil 2.4 : Enerji denkleminin çıkarımı için alınan diferansiyel eleman [11]. 19
Şekil 2.5 : Düz levha üzerindeki akış [11].....22
Şekil 2.6 : Düz levhadaki akışta türbülansa geçiş aşamaları[13].....23
Şekil 2.7 : Türbülanslı akışta bir noktadaki hızın zamanla değişimi [11]. 24
Şekil 3.1 : 2 ve 3 boyutlu yapılı (Structured) ağ hücreleri.....29
Şekil 3.2 : 2 ve 3 boyutlu yapısız (Unstructured) ağ hücreleri. 29
Şekil 3.3 : Ağ hücre geometrileri [14].....30
Şekil 3.4 : Akış kanalındaki ağ sıklığı.....30
Şekil 3.5 : Segregated Solver algoritması [15]. 31
Şekil 3.6 : Coupled Solver algoritması [15].....32
Şekil 3.7 : Açık çözümleme metodu [16]. 33
Şekil 3.8 : Kapalı çözümleme metodu [16]. 33
Şekil 3.9 : Türbülanslı akış bölgeleri [11]. 36
Şekil 3.10 : Yüzeye yakın bölgelerin çözümleme yöntemleri [15].....37
Şekil 4.1 : Serpantin modeli geometrisi.....41
Şekil 4.2 : Serpantin modeli 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı.....42
Şekil 4.3 : Serpantin modeli 8 L/dak. akış için basınç [Pa] dağılımı. 42
Şekil 4.4 : Serpantin modeli 8 L/dak. akış için hız [m/s] dağılımı.....43
Şekil 4.5 : Manifold modeli geometrisi. 44
Şekil 4.6 : Manifold modeli 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı. 45
Şekil 4.7 : Manifold modeli 8 L/dak. akış için basınç [Pa] dağılımı.....45
Şekil 4.8 : Manifold modeli 8 L/dak. akış için hız [m/s] dağılımı. 46
Şekil 4.9 : Helisel modeli geometrisi. 47
Şekil 4.10 : $3\frac{1}{2}$ tur helisel modeli 8 L/dak. akış için basınç [Pa] dağılımı. 48
Şekil 4.11 : $3\frac{1}{2}$ tur helisel modeli 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı.....48
Şekil 4.12 : 4 tur helisel modeli 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı. 49
Şekil 4.13 : Tümsekli kanal şematik gösterimi. 50
Şekil 4.14 : Akışın gelişmesi ile ısı taşınım katsayısının değişimi [12].....51
Şekil 4.15 : Helisel 4 tur tümsekli 1. konfigürasyon basınç [Pa] düşüşü. 52
Şekil 4.16 : Helisel 4 tur tümsekli 1. konfigürasyon 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı. 52

Şekil 4.17 : Helisel 4 tur tümsekli 2. konfigürasyon 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı.....53
Şekil 4.18 : Helisel 4 tur tümsekli 3. konfigürasyon 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı.....54
Şekil 4.19 : Dördüncü konfigürasyon için tümsekli kanal kanalın şematik üstten görünüşü. 55
Şekil 4.20 : Helisel 4 tur tümsekli 4. konfigürasyon 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı.....55
Şekil 5.1 : Debi değişimi ile ortalama stator sıcaklığı değişimi. 57
Şekil 5.2 : Debi değişimi ile basıç düşüşü değişimi.....58
Şekil 5.3 : Debi değişimi ile pompa gücü değişimi. 59
Şekil A.1 : Serpantin modeli stator sıcaklık [K] dağılımı.a)4L/dak. b)12L/dak. c)16L/dak.....64
Şekil A.2 : Manifold modeli stator sıcaklık [K] dağılımı.a)4L/dak. b)12L/dak. c)16L/dak.....65
Şekil A.3 : $3\frac{1}{2}$ tur helisel modeli stator sıcaklık [K] dağılımı.a)4L/dak. b)12L/dak. c)16L/dak.....66
Şekil A.4 : 4 tur helisel modeli stator sıcaklık [K] dağılımı.a)4L/dak. b)12L/dak. c)16L/dak.....67
Şekil A.5 : Helisel 4 tur tümsekli 1. konfigürasyon sıcaklık [K] dağılımı.a)4L/dak. b)12L/dak. c)16L/dak.....68
Şekil A.6 : Helisel 4 tur tümsekli 2. konfigürasyon sıcaklık [K] dağılımı.a)4L/dak. b)12L/dak. c)16L/dak.....69
Şekil A.7 : Helisel 4 tur tümsekli 3. konfigürasyon sıcaklık [K] dağılımı.a)4L/dak. b)12L/dak. c)16L/dak.....70

ELEKTRİKLİ ARAÇ MOTORUNUN SOĞUTMA SİSTEM TASARIMI

ÖZET

Son yıllarda küreselleşme ile birlikte gün gittikçe taşımacılığa duyulan ihtiyaç artış göstermektedir. Diğer yandan, günümüzde taşımacılığın büyük ölçüde dolaylı veya dolaysız olarak fosil yakıtlara bağlı olması çağımızın ve geleceğin en büyük sorunu olan çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bu sebepten dolayı gün geçtikçe alternatif taşımacılık yöntemleri ile ilgili çalışmalar artmaktadır. Fosil yakıtlardan yararlanarak hareket için gereken enerjiyi sağlayan araçlara alternatif olabilecek araçlardan biri akülü elektrikli araçlardır.

Akülü elektrikli araçlarda elektrik enerjisi şarj edilebilen akülerde depolanır ve daha sonra bir elektrikli motor depolanan bu enerjiden yararlanarak aracın hareketini sağlar.

Bütün makinelerde olduğu gibi elektrikli motor da, yüzde yüz verime sahip olmayıp aldığı enerjinin bir kısmını faydalı olmayan enerji türlerine dönüştürmektedir. Elektrikli motorlarda ohmik dirençten, eddy akımından, tepki kuvvetlerinden ve sürtünmeden dolayı kayıplar meydana gelmektedir.

Elektrikli motorlarda meydana gelen bu kayıplar motorun verimini, dönme hızını ve yataklardaki yağlama sistemini şiddetli bir şekilde etkiler, motorun yorulması ve sonuç olarak motorun ömrünün azalmasına sebep olur. Neticede, üretilen ısıların kontrolü ve etkin bir soğutma sistemi motor dayanıklılığın artmasına, daha sessiz ve verimli çalışmasına sebep olacaktır. Bu sebepten dolayı elektrikli motorların tasarımında göz önünde bulundurulması gereken en önemli konulardan biri elektrikli motorun soğutma sistemidir.

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında elektrikli bir araçta kullanılacak olan bir elektrikli motorun, daha etkin bir soğutma yaratabilen, sıvı akışkan (su) ile soğutulması için gereken analizler ve tasarım çalışmaları yapılmıştır.

Günümüzde çoğu mühendislik tasarımları bilgisayar simülasyon programları yardımı ile gerçekleşmektedir. Bu programlar sayesinde daha kısa sürede ve daha az maliyetle çok sayıda analizin yapılması mümkündür. Bu şekilde hem zaman hem de maliyet açısından tasarruf sağlanmış olmaktadır. Bu tez çalışmasında yapılan analizler, HAD çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılmakta olan FLUENT yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

DESIGN OF AN ELECTRICAL VEHICLE MOTOR COOLING SYSTEM

SUMMARY

In recent years, because of globalization, the need for transportation has been increased. On the other hand, dependence of transportation to the fossil fuels, directly or indirectly, has been causing environmental pollution, which is one of the biggest problems of future. Because of this, nowadays a large number of studies have been carried to find alternative methods for transportation. One of the best alternative methods for the vehicles which are powered with fossil fuels is battery powered electrical vehicles.

In the battery powered electrical vehicles, the electric energy is stored in the rechargeable batteries and during the movement this energies provided.

Electric motors, like of the other vehicle machines do not have a hundred percent efficiency but convert a portion of supplied energy to the types of energies which are unwanted. In the electric motors, losses occur because of ohmic resistance, eddy current, reaction forces and friction. These losses in electric motors affect the motors, efficiency, rotational and bearings lubrication. these losses also cause fatigue and decrease motor life.

As a result, control of the produced heat and efficient cooling increase the strength of motor, and also cause the motor work more quietly and efficiently.

For this reason, one of the most important issues in the electrical motors design is the design of electric motor's cooling system. In this graduate thesis, design of a more efficient cooling system, with fluid (water) as a coolant is aimed.

Nowadays most of engineering designs have been done with the help of computer simulation programs. Thanks to these programs very large number of analysis can be done in less time and less cost. In this thesis, the analysis was carried out with FLUENT software that are widely used in CFD studies.

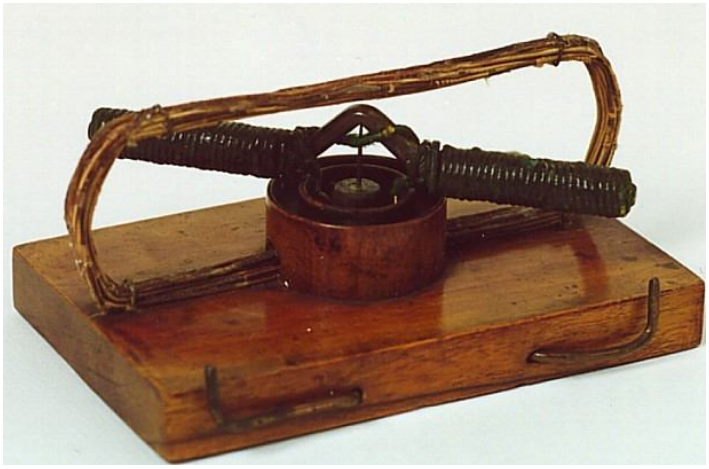
1. GİRİŞ

Günümüzde küreselleşme ile birlikte taşımacılığa duyulan ihtiyaç gittikçe artış göstermektedir. Bu ihtiyacın artışı ile birlikte çevre kirliliği günümüzün ve geleceğin büyük problemlerinden biri haline gelmiştir. Taşımacılığın büyük bir kısmının doğrudan veya dolaylı olarak fosil yakıtlara bağlı olması, bu alanda birçok probleme yol açmaktadır. Küresel çevre etkileri ve enerji tasarrufu açısından bakınca, çevreyi korumak için çevre dostu araçlar kısa bir sürede içten yanmalı araçların yerini almalıdır. Elektrikli, yakıt pilli ve hibrit araçlar çevre dostu sayılabilecek araçlardır.

Fosil yakıtların yaratığı çevre kirliliğinin yanı sıra, petrol kaynaklarının sınırlı olması taşımacılık konusunda alternatif yöntemlere yönlenmeyi kaçınılmaz kılmıştır. Günümüzde birçok bilim kuruluşu ve araştırma merkezinde alternatif araç konusunda araştırmalar yapılmaktadır. Bu tez çerçevesinde yapılan çalışma, fosil yakıtlarla çalışan araçlara alternatif olan akülü elektrikli araçların soğutma sisteminin tasarım çalışmasıdır.

1.1 Elektrikli Araçların Tarihçesi

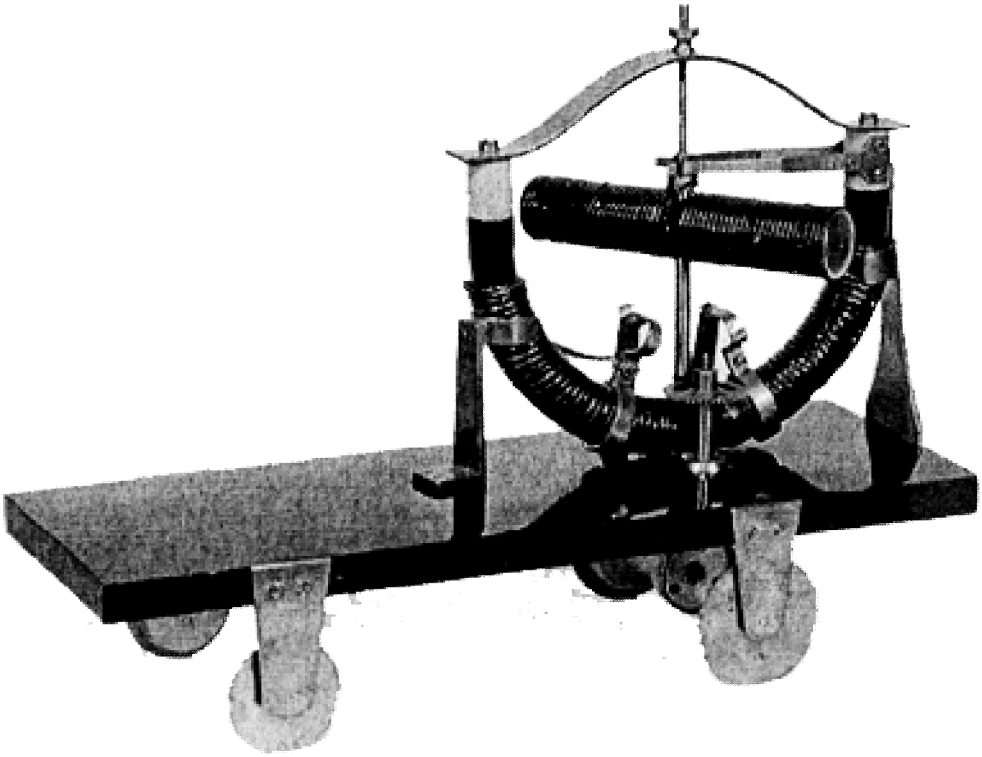
İlk elektrikli motor 1828 yılında bir Macar bilim adamı olan Stephen Anyos JEDLIK (1800-1895) tarafından üretildi (Şekil 1.1). JEDLIK üretilen bu makineye "Lightning magnetic self rotor" adını verdi [1].



Şekil 1.1 : Stephen Anyos JEDLIK in yaptığı ilk elektrik motoru 1827 [1].

Bu makine doğru akımla çalışıyor ve bugünkü motorlar gibi iki ana parçadan oluşuyordu: 1-Rotor, 2-Stator. Rotor kısmı mıknatıs özelliğe sahip olup stator kısmından geçen elektrik akımının yarattığı mıknatıs alanın etkisi altında dönüyordu.

JEDLIK 1830 yılında bu motor tasarımından yararlanarak çok basit bir düzeneğe sahip olan ilk elektrikli aracı (Şekil 1.2) üretti.



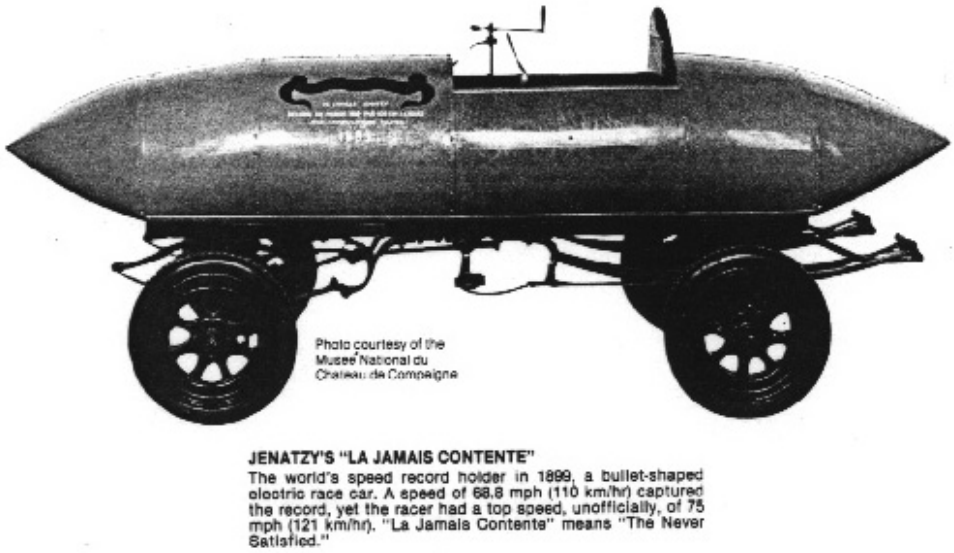
Şekil 1.2 : İlk elektrikli araç 1830 [2].

19. Y.Y.'da elektrikli motorlar, o günlerde kullanılmakta olan buhar makinelerine göre çok avantajlı ve kullanışlı idi. Bunun sonucunda elektrikli araçların kullanımı çok kısa bir sürede yaygınlaştı ve bu konuda çok sayıda araştırma yapıldı.

İlk elektrikli araçların en önemli problemleri güç kaynağı idi. İlk örneklerde kullanılan aküler tekrar şarj edilebilme kabiliyetine sahip olmadıkları için kullanımları çok pahalı ve sorunlu oluyordu. Bu engel kısa süre geçmeden aşıldı ve 19. Y.Y.'ın sonlarına doğru şarj edilebilen akülerin üretimine başlatıldı. Yeniden şarj edilebilen akülerin üretimi ile birlikte akülü araçlar yaygınlaştı (Şekil 1.3) ve 1899 yılında ilk kez bir elektrikli araç 100 km/h hız sınırını geçebildi [3] (Şekil 1.4).



Şekil 1.3 : 1900 yılında New York'ta bir elektrikli taksi [3].



JENATZY'S "LA JAMAIS CONTENTE"
The world's speed record holder in 1899, a bullet-shaped electric race car. A speed of 68.8 mph (110 km/hr) captured the record, yet the racer had a top speed, unofficially, of 75 mph (121 km/hr). "La Jamais Contente" means "The Never Satisfied."

Şekil 1.4 : 100 km/h hız sınırını geçebilen ilk elektrikli araç [3].

20. Y.Y. başlangıcında bir yandan içten yanmalı motorların gelişmesi, diğer yandan 2. dünya savaşının başlaması ve ayrıca Ford firmasının yeni üretim hattı ile birlikte çok hızlı ve ucuz içten yanmalı araçların üretilmesi elektrikli araçlara olan ilginin gittikçe azalmasına sebep oldu.

20. Y.Y. sonlarına doğru, yaşanan çevre problemleri ve petrol rezervlerinin biteceği söylemleri elektrikli araçlara olan ilginin tekrar artmasına sebep oldu ve bu konuda yeni araştırmalar ve yatırımlara başlandı.

1.2 Akülü Elektrikli Araçların Çalışma Prensibi

Akülü elektrikli araçlarda elektrik enerjisi akülerde depolanır ve daha sonra motorun hareketi için gereken elektrik bu şekilde temin edilir. Aküler, içlerinde kullanılan malzemeye göre birkaç guruba ayrılır. Akülerin seçiminde dört faktör çok önemli rol oynamaktadır:

1-**Özgül Enerji:** Bir akünün en önemli özelliklerinden biri akünün özgül enerjisidir. Bir enerji kaynağının özgül enerjisi, o kaynağın kilogram başına taşıyabileceği enerjidir [W.h/kg]. Örneğin kurşun asit bir akünün özgül enerjisi 30 W.h/kg dır, yani 1 kg akü 30 W.h. (1 W.h = 3600 J) enerji taşıyabilir. Bu değer benzin için 9000 W.h/kg dır, yani 1 kg benzin 9000 W.h (9000 x 3600 = 32400 kJ) enerji sağlayabilir [3]. Aslında, fosil yakıtların özgül enerjilerinin çok yüksek olması, yani kütle olarak çok az miktarda yakıtla çok miktarda enerji elde edilebilir olması, fosil yakıtların tercih edilmelerinin en önemli sebeplerinden biridir.

2-Kendi Kendine Deşarj Olma: Akülerin başka önemli özelliklerinden biri kendi kendine deşarj olma oranıdır. Bu özellik aslında akülerin negatif özelliklerinden biridir ve ne kadar az olursa o akünün o kadar iyi olduğunun göstergesidir. Bir akü şarj edildikten sonra hiç kullanılmazsa bile zamanla şarjı boşalmaya başlar. Yani tam dolu olan bir akü bir süre kullanılmazsa boşalır ve tekrar şarj edilmesi gerekir.

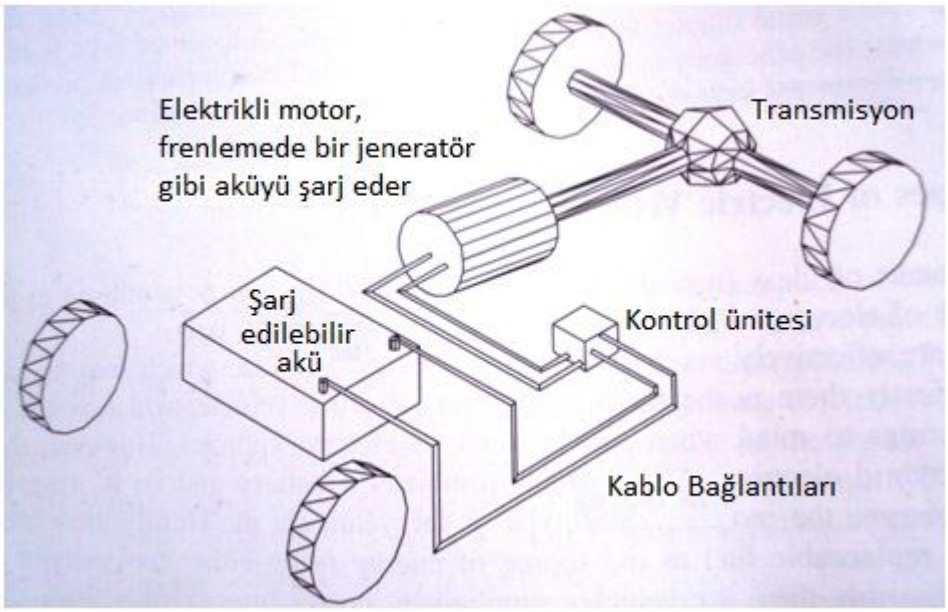
3-Şarj Süresi: Akülerin özelliklerinden biri de şarj süresidir. Aküler belli bir süre kullanıldıktan sonra tekrar şarj edilmelidir. Şarj olma olayı ne kadar hızlı bir şekilde yapılabilirse, yani ne kadar kısa sürede gerçekleşirse o kadar iyidir.

4-Fiyat: Aküler masraflı parçalar oldukları için fiyat olarak ne kadar ucuz olurlarsa o kadar iyiler anlamına gelmektedir. Çizelge 1-1'de bazı akülerin özellikleri gösterilmektedir [3].

Çizelge 1.1 : Bazı akülerin özellikleri [3].

Adı	Özgül Enerji (Wh/kg)	Kendi kendine deşarj olma (her gün)	Şarj süresi (h)	Fiyat ($/hücre)
Kurşun Asit	20-35	%2	8	0,5
Ni-Kadmium	40-55	%0,5	1	1,5
Ni Metal Hibrit	65	%5	1	2
Na-Metal- Chloride	100	%10	8	2
Li-ion	90	%0,16	2-3	10
Çinko-hava	230	--	10(dak.)	--

Akülü araçların çalışma prensibi çok basittir. Bu araçlarda aküler bir kontrol ünitesi yadımı ile motorun gerekli enerjisini temin etmekteler. Elektrikli motor ise doğrudan diferansiyele bağlanarak elektrikli motorun dönme hareketini tekerleklere iletilmektedir. Şekil 1-5'te bir akülü elektrikli aracın şematik olarak ana parçaları ve çalışma prensibi gösterilmektedir [3].



Şekil 1.5 : Elektrikli Aracın Çalışma Prensibi [3].

1.3 Akülü Elektrikli Araçların Avantaj ve Dezavantajları

Akülü elektrikli araçlar diğer araçlara göre bazı avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Örneğin bu araçlar içten yanmalı motor kullanan araçlar gibi doğrudan çevreye zararlı gazlar üretmezler, çok sessiz çalışırlar, içten yanmalı motorlar gibi ses kirliliği yaratmazlar ve elektrikli motorların çok verimli olmalarından dolayı (%90 üzerinde) daha az ısı üretirler ve enerji tüketimi açısından çok verimlidirler.

Diğer yandan eğer akülü elektrikli araçların dezavantajlarını incelemek istersek, bu araçlarda kullanılan güç kaynağının yani akülerin özgül enerjisinin benzin gibi fosil yakıtlara göre çok az olması bu araçların en önemli dezavantajlarından biridir. Yani örneğin eğer 1 kez benzin alarak (30 litre) bir içten yanmalı motor kullanan araçla 500Km yol alabiliyorsak (100 Km için 6 litre yakıt tüketiliyorsa) bu mesafe elektrikli araçlarda çok daha düşük mertebelerdedir (100 km civarında). Akülü elektrikli araçların bir diğer dezavantajı şarj süresidir. Bu araçlarda şarj süresi çok uzundur. Örneğin 100 Km yol alabilmek için bir akülü aracın 1 saatten fazla şarj olması

gerekirken bir içten yanmalı motor birkaç dakikada gereken benzini alarak aynı yolu katedebilir. Akülü elektrikli araçların diğer problemlerinden biri akülerin deşarj olmasıdır. Son olarak ise elektrikli araçların hala çok sayıda üretilmemesi, bu araçların çok pahalı olmalarına sebep olmuştur. Çizelge 1-2'de üretilen birkaç ticari akülü elektrikli aracın kıyaslanması yapılmıştır [3].

Çizelge 1.2 : Akülü elektrikli araçların kıyaslanması [3].

Adı	Açıklama	Üretim Yılları	Üretim sayısı	Maks. Hız (km/h)	Alabileceği Yol (km)
Detroit E	Kullanımı çok kolay olan ilk elektrikli araç	1907-1939	5000	32	80
Henney Kilowatt	İlk kez bir elektrikli araçta transistor kullanıldı ve hidrolik fren sistemine sahipti	1958-1960	100	96	110
G.M IV	Çoğu General Motor firması tarafından geri iade alındı ve imha edildi	1996-2003	2000	128	240
Honda EV Pluse	24 adet akü kullanıldı	1997-1999	350	128	180
Toyota RAV4 EV	--	1997-2002	1249	200	130-190
Nissan Altera IV	Transporter tarzında yapılan, Li-ion uzun ömürlü akülerle	1998-2000	140	120	120
TH!NK City	--	1999-2002	1005	144	85
Reva	Hindistan'da üretilen araba	2001-	2000	72	95
ZAP- Xebra	Çin üretimi binek ve kamyon tarzında	2006-	200	64	85

1.4 Tezin Amacı

Elektrikli motorların soğutulması, elektrikli motor tasarım ve üretiminin en önemli konularından biridir. İyi bir elektrik motoru tasarımı için sadece elektrik konusuna odaklanmamak lazım belki elektrodinamik, termodinamik, malzeme, kimya, statik, malzemenin dinamiği ve kinetiği de göz önüne bulundurulmalı [4].

Günümüzde yüzey mıknatıslı motorlar, ev aletlerinde ve sanayide yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tip motorlar sadece doğru akımla çalışmakta ve alternatif akımla beslendikleri takdirde verilen bütün akım, sargıda ısıya dönüşmektedir. Yüzey mıknatıslı motorların tercih sebebi yüksek güçlerde çalışabilme kabiliyeti, yüksek hızlarda çok verimli olmaları ve hız kontrolünün çok kolay olmasıdır [3].

Düşük güce sahip yüzey mıknatıslı BLDC motorların, genel olarak güvenlik ve işletme maliyeti göz önünde bulundurularak hava ile soğutulmaları tercih edilir, ama

yüksek güçlü motorlar, üretilen ısı miktarının fazla olmasından dolayı su ile soğutulurlar [4].

Tasarlanması planlanan elektrikli araçta yüzey mıknatıslı BLDC motorun kullanılması hedeflenmektedir. Bu motorlar farklı nedenlerden dolayı çalışma esnasında ısı üretmektedirler. Yapılan bu çalışmanın esas amacı üretilen bu ısının motordan çekilip çevreye aktarılmasıdır. Bu tez kapsamında tasarlanmakta olan motor soğutma sistemi su soğutmalı olup, suyun sistemdeki dolaşımı bir sirkülasyon pompası yardımı ile gerçekleştirilmekte ve motordan çekilen ısı bir radyatör yardımı ile çevreye atılmaktadır. Sıvı akışkan ile soğutma yöntemi genel olarak motorun etrafında tasarlanan bir gömlek ile yapılır. Bu yöntemde bir sıvı akışkan (genel olarak su) elektrikli motorun etrafında tasarlanan kanallarda dolaşarak motor tarafından üretilen ısıyı kendine çekip, daha sonra bir ısı değiştiricisinin yardımı ile çevreye aktarır.

Daha önce de anlatıldığı gibi, elektrikli araçların en önemli problemlerinden biri akülerin düşük özgül enerjiye sahip olmaları ve diğer yandan şarj sürelerinin uzun olmasıdır. Bu sebeplerden dolayı enerji tasarrufu bu araçlarda çok önem kazanır. Araç ne kadar az enerji tüketiyorsa o oranda az sıklıklarla şarj edilmesine ihtiyaç duyulacak veya daha az akü kullanarak daha hafif araçlar üretilebilecektir. Bu amaçlar doğrultusunda yapılan çalışmada soğutma işleminin minimum pompa gücü ile gerçekleştirilmesi ve sistemin bir bütün olarak daha hafif olması hedeflenmektedir. Akışkanlar mekaniğinden bilindiği gibi bir kapalı sistemin pompasının daha az enerji tüketmesi için sistemdeki basınç düşüşünü en az seviyeye indirilmesi gerekir.

Bu tasarımda kullanılması planlanan elektrikli motorun teknik verileri aşağıdaki gibi belirlenmiştir (Çizelge 1.3). Belirlenen bu veriler çerçevesinde:1-Motorun ürettiği ısının çekilip çevreye aktarılması. 2-Motorun daha verimli çalıştığı sıcaklık aralığında tutulması. 3-Motordaki sıcaklık dağılımının homojen bir şekilde olması. 4-Motorun maksimum sıcaklığının, asla bakır sarımların etrafında bulunan yalıtım malzemesinin erime sıcaklığını geçmemesi. 5-Sistemin daha verimli çalışabilmesi için soğutma sistemindeki basınç düşüşünün en aza indirilmesi. 6-Tasarımın minimum maliyet ile gerçekleştirilmesi.

1.5 Tasarlanan Elektrikli Araç Özellikleri

Bu tez çalışması kapsamında tasarlanacak olan elektrikli motor soğutma sistemi, İstanbul Teknik Üniversitesinde tasarlanmakta olan yeni bir elektrikli aracın bir parçasıdır. Tasarım aşamasında olan bu araç için ön görülen bazı özellikler aşağıdaki gibi olacaktır (Çizelge 1.3).

Çizelge 1.3 : Tasarlanmakta olan elektrikli aracın bazı özellikleri.

Özellik	Değer
Elektrikli motor gücü	70 kW (3000 rpm)
Motor verimi	%96,3552
Motor tipi	Sabit mıknatıslı BLDC
Boş araç ağırlığı	1600 kg
Test sürüşlerinde araç yükü	700 kg
Maksimum hız	110 km/h
İvme (0-50 km/h)	5s
İvme (0-100 km/h)	10s

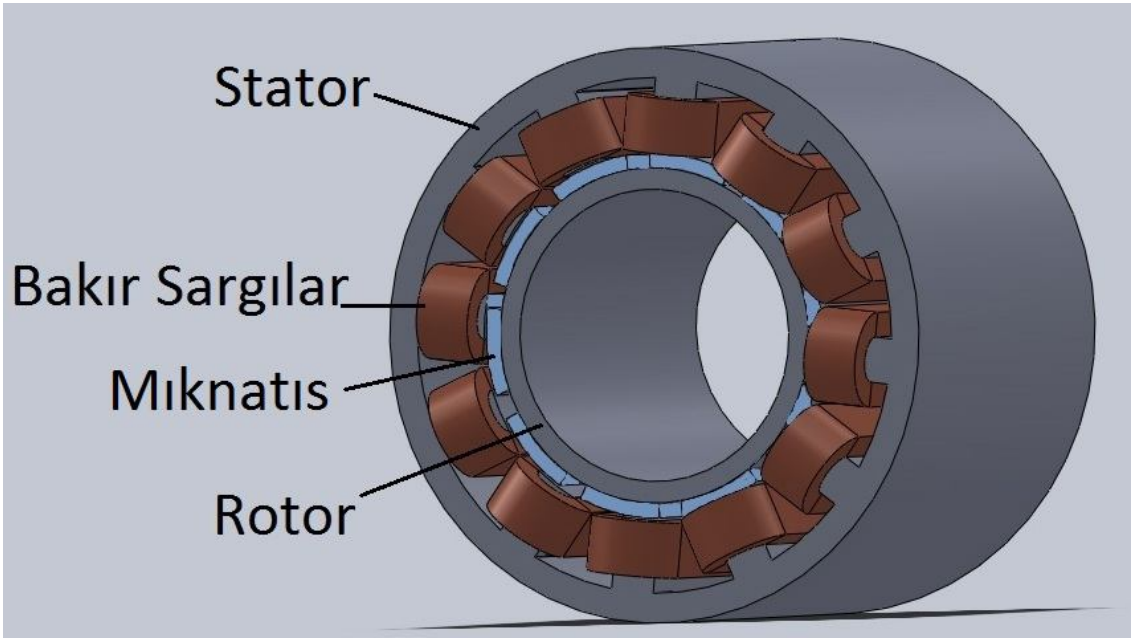
1.6 Literatür Özeti

Çalışmaya ilk olarak patent ve makale araştırmasıyla başlanmıştır. Böylelikle, daha önceden yapılmış çalışmalar incelenerek genel bir bilgi edinilmiştir. Ayrıca, ileride yapılacak olan tasarım çalışmaları için telif ve patent hakları göz önünde bulundurulmuştur.

Bir yüzey mıknatıslı BLDC motoru, dört ana parçadan oluşmaktadır. 1- Sarım: sarım bakır malzemeden oluşan birbirine sarılmış ve içlerinden elektrik akımı geçen tellerden oluşur. Teller birbirine akım geçirmesinler diye bir yalıtım malzemesi ile yalıtılmışlardır. 2-Stator: stator motorun sabit kısmıdır ve sarımlar statorda açılan yuvalarda sarılırlar. 3-Rotor: Motorun dönen kısmıdır. Elektrik enerjisi tarafından üretilen kuvvet bu kısmı etkiler ve dönmesini sağlar. 4-Mıknatıslar: rotorun dış çevresinde gömülü olarak yerleştirilen manyetik parçaları (Şekil 1.6).

Elektrikli motorlar ve jeneratörler çalıştıkları zaman kendi özelliklerine göre belli miktarda ısı üretirler. Özellikle yüksek hızlarda çalışan elektrikli motorlar ve jeneratörler daha fazla ısı üretirler. Bir elektrikli motor veya jeneratörün zarar görmeden, düzgün ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için iyi bir soğutmaya ihtiyaç duyulur. Sıvıların ısı taşınım katsayılarının havadan daha fazla olmasından dolayı

genelde elektrikli motorlar ve jeneratörlerin soğutulması için sıvılardan yararlanılır [5].



Şekil 1.6 : Yüzey mıknatıslı BLDC motor.

Bir elektrik motordaki ısıl disipasyon, bakır kayıplarından ve demir kayıplarından meydana gelir. Bakır kayıpları ohmik dirençten ve eddy akımından meydana gelir. Ohmik direnç kayıpları sarımdaki akımla ilgilidir. Bakır kaybındaki eddy akımları ise motorun dönme hızına bağlıdır. Demir kayıpları ise eddy akımından ve tepki kuvvetlerinden dolayı meydana gelir ki ikisi de motorun dönme hızına bağlıdır. Elektrikli motorlarda çok belirgin olan bakır ve demir kayıplarının yanı sıra ortaya çıkan ısının bir kısmı mekanik kayıplardan dolayı ortaya çıkmaktadır. Mekanik kayıplar sarımdaki ve yataklardaki sürtünme kayıplarından dolayı meydana gelmektedir [6].

Elektrik motorunda sargılardaki elektrik akımından meydana gelen bakır kaybı, çekirdekteki demir kaybı ve dönen milden ve yataklardan meydana gelen mekanik kayıplar hep birlikte ısı üretimine ve motorun ısınmasına sebep olurlar. Bu kayıplar motorun verimini, dönme hızını ve yataklardaki yağlama sistemini şiddetli bir şekilde etkiler, motorun yorulması ve sonuç olarak motorun ömrünün azalmasına sebep olur. Neticede, üretilen ısıların kontrolü ve etkin bir soğutma sistemi motor dayanıklılığın artmasına, daha sessiz ve verimli çalışmasına sebep olacaktır [7].

Bir elektrikli araç, aküden güç alan bir elektrikli motor yardımı ile çalışmaktadır. Bu araçların en önemli özellikleri her şarjdan sonra yol alabilecekleri mesafedir. Bir elektrikli arabada bir kere aküleri şarj ettikten sonra daha fazla mesafe kat edebilmek için yapılması gereken en önemli işlemlerden biri aracın ağırlığının azaltmasıdır. Elektrikli bir aracın ağırlığını etkileyen en önemli faktörlerden biri aracın motor ağırlığıdır. Diğer yandan bir elektrikli motor ürettiği güç sabit kalmak şartı ile, ne kadar küçük ise o kadar fazla ısı üretmektedir. Artan ısı miktarı sıcaklığın artmasına ve sonuç olarak motorun performansının düşmesine ve motorun sarımlarının etrafında kullanılan yalıtımın erimesine ve motorun yanmasına sebep olacaktır. Bu sebepten dolayı eğer bir motorun ağırlığını azaltılmak istenirse ilk aşamada etkin bir soğutma sistemi tasarlanması gerekir [8].

Elektrikli araçların ürettiği ısı kullanım şartlarına bağlı olarak çok geniş bir yelpazeyi kapsar, ve üretilen bu ısı dolaysıyla, aracın kullanıldığı çevre koşulları etkisi altında, çok yüksek sıcaklıklara ulaşılabilir.

Maksimum soğutma kapasitesine yaz aylarında, çevre sıcaklığın çok yüksek olduğu zamanlarda ihtiyaç duyulur. Çevre sıcaklığı genelde maksimum 40 °C olarak göz önüne bulundurulur, ama araç çok sıcak bölgelerde kullanılacak ise bu değer daha yüksek alınabilir ki alınan değer üretici firmanın yaptığı testler sonucu veya bölgenin meteorolojik değerlerine göre belirlenir. Belirlenen çevre sıcaklığı ve motorun tam yükleme durumunda ürettiği ısı, radyatör kapasitesi, soğutucu akışkan debisi, uygun pompa ve fan seçiminde çok önemli rol oynamaktadır. Ama bu konuyu da göz ardı etmemek lazım ki her zaman çevre sıcaklığı çok yüksek olmayıp aracın motoru tam kapasite çalışmayacaktır. Bu gibi durumlarda elektrikli motorunu fazlası ile soğutmanın bir anlamı yoktur ve bu, enerji kaybından başka bize bir avantaj sağlamamaktadır [9].

Daha önce de anlatıldığı gibi su soğutmalı elektrikli motorlarında, motorun etrafına bir gömlek yerleştirilir ve bu gömlekte açılan kanallarda su dolaşır. Gömleğin içinde çok farklı yöntemlerle kanal açılabilir. Bu kanal geometrilerinin herbiri kendine göre bazı avantaj ve dezavantajlara sahiplerdir.

Yapılan bu literatür araştırması sonucunda, tasarlanmış olan elektrikli motorun özellikleri ve geometrisi göz önünde bulundurarak üç farklı gömlek tipinin tasarlanıp, analizleri yapıldı. Ayrıca bu üç tasarımdan, diğer tasarımlardan daha

uygun görülen birinin üzerinde farklı değişiklikler yapılarak dört farklı konfigürasyon için analizlerin yapılmasına karar verildi. Bu gömleklerin hangi özelliklere sahip oldukları ve ne şekilde çalışacakları detaylı bir şekilde 4. bölümde anlatılacaktır.

2. ISI AKTARIM TEORİSİ

2.1 Amaç

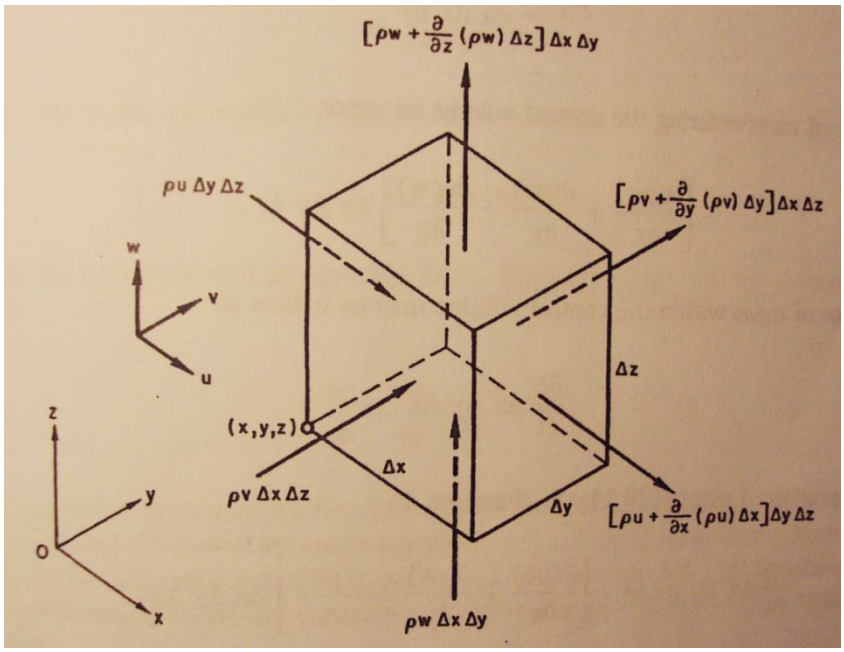
Bu tez çalışmasının esas amacı bir ısı aktarım olayının bilgisayar yardımı ile analizinin yapılmasıdır. Bir bilgisayar destekli analizde doğru sonuçları elde edebilmek için bilgisayar programına doğru verileri sağlamak ve ayrıca doğru çözüm metodunu seçmek gerekir. Aksi halde elde edilen sonuçlar çok yanıltıcı olabilir ve bizi hatalı bir tasarım yapmaya sürükleyebilir. Bu sebepten dolayı çözümlemeye başlamadan önce bilgisayar programının çözümü nasıl gerçekleştirdiğini ve hangi denklemleri hangi koşullarda çözdüğünü anlamak gerekmektedir.

Transport olaylarını genel olarak üçe bölmek mümkün, 1-Akışkanlar dinamiği 2-Isı transferi 3-Kütle transferi. Akışkanlar dinamiği momentum aktarımından, ısı transferi enerji aktarımından ve kütle transferi ise farklı kimyasal kütlelerin aktarımından oluşmaktadır [10]. Bu tez kapsamında ısı aktarım olaylarının inceleyebilmek için ilk önce aktarım olaylarının temelini oluşturan korunum denklemlerinin incelenmesi faydalı olur.

2.2 Süreklilik Denklemi

Tek fazlı ve homojen bir akış olduğunu farz edelim. Akış $\vec{V}$ hızına sahip ve bu hız kartezyen koordinatlarda u, v, w bileşenlerinden oluşmaktadır. Şimdi bu akışın çok küçük bir parçasını göz önüne bulunduralım. Bu küçük parçaya diferansiyel eleman adı verilir (Şekil 2.1). Bu küçük parçacığın (diferansiyel elemanın) boyutları Δx, Δy ve Δz olsun.

Şekil 2.1 'de görüldüğü gibi bu diferansiyel elemanın her düzleminden kütle giriş ve çıkışı olabilir. Her düzlem için eğer giren ve çıkan kütlelerin akısını yazarsak, yani her düzlem için o düzleme giren veya çıkan kütlenin debisini ilgili düzlemin alanıyla çarpıp, her doğrultuda girenlerden çıkanları, çıkarırsak aşağıdaki ifadeleri elde etmiş oluruz.



Şekil 2.1 : Süreklilik denklemi çıkarımı için bir diferansiyel eleman [11].

x yönünde: $\rho\, u\, \Delta y\, \Delta z - \left(\rho\, u + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u)\Delta x\right)\Delta y \Delta z = \frac{\partial}{\partial x}(\rho u)\Delta x\, \Delta y \Delta z$ **(2.1)**

y yönünde: $\rho\, v\, \Delta x\, \Delta z - \left(\rho\, v + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v)\Delta y\right)\Delta x \Delta z = \frac{\partial}{\partial y}(\rho v)\Delta x\, \Delta y \Delta z$ **(2.2)**

z yönünde: $\rho\, w\, \Delta x\, \Delta y - \left(\rho\, w + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w)\Delta z\right)\Delta x \Delta y = \frac{\partial}{\partial z}(\rho w)\Delta x\, \Delta y \Delta z$ **(2.3)**

Elde edilen bu üç ifadeyi topladığımız zaman, aldığımız diferansiyel elemanın içindeki birim zamanda net kütle artışını elde etmiş oluyoruz **(2.4)**.

$$-\left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w)\right]\Delta x\, \Delta y \Delta z \qquad \textbf{(2.4)}$$

Diğer yandan eğer başka bir şekilde aldığımız diferansiyel elemandaki birim zamanda kütle artışını ifade etmek istersek aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\partial m}{\partial t} \qquad \textbf{(2.5)}$$

Yani kütlenin zaman bağlı değişimi.

Elde ettiğimiz **(2.4)** ve **(2.5)** numaralı denklemler kütle korunumu kanunundan dolayı birbiri ile eşit olmak zorundadırlar. Bu durumda:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -\left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w)\right]\Delta x\, \Delta y \Delta z \qquad \textbf{(2.6)}$$

Biliyoruz ki $\rho = \frac{m}{\forall}$ demektir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta x \, \Delta y \Delta z = -[\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w)] \, \Delta x \, \Delta y \Delta z \qquad \textbf{(2.7)}$$

Yani,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \qquad \textbf{(2.8)}$$

(2.8) numaralı denkleme süreklilik denklemi adı verilir. Bu denklemi benzer bir şekilde silindirik ve küresel koordinatlarda ise elde etmek mümkündür [11].

2.3 Momentum Denklemleri

Bir akışın dinamik davranışı, momentum denklemleri veya hareket denklemleri adı verilen bir denklem takımı yardımı ile elde edilebilmektedir [11]. Bu denklemler Newton'un ikinci kanununun uygulanması ile elde edilir. Newton'un ikinci kanununa göre:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{M}}{dt} = \frac{d(m\vec{V})}{dt} = m\vec{a} \qquad \textbf{(2.9)}$$

Bu ifadede $\vec{F}$ akışkan parçacığını etkileyen toplam kuvvettir ve $\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt}$ ise akışkan parçacığının ivmesidir.

Şimdi bir akışkan parçacığını göz önünde bulunduralım. Bu parçacık t anında x,y,z noktasında bulunsun ve t+dt anında ise x+dx, y+dy, z+dz noktasında olsun. Bu parçacığın bu harekette x yönündeki hız bileşeninin değişimi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\Delta u = \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy + \frac{\partial u}{\partial z} dz + \frac{\partial u}{\partial t} dt \qquad \textbf{(2.10)}$$

Benzer şekilde y ve z yönlerindeki hız değişimleri ise aşağıdaki gibidir:

$$\Delta v = \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy + \frac{\partial v}{\partial z} dz + \frac{\partial v}{\partial t} dt \qquad \textbf{(2.11)}$$

$$\Delta w = \frac{\partial w}{\partial x} dx + \frac{\partial w}{\partial y} dy + \frac{\partial w}{\partial z} dz + \frac{\partial w}{\partial t} dt \qquad \textbf{(2.12)}$$

İvme tanımından biliyoruz ki:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} \qquad \textbf{(2.13)}$$

İvme tanımını **(2.10)**, **(2.11)** ve **(2.12)** numaralı denklemlerde uygularsak:

$$a_x = u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \qquad \textbf{(2.14)}$$

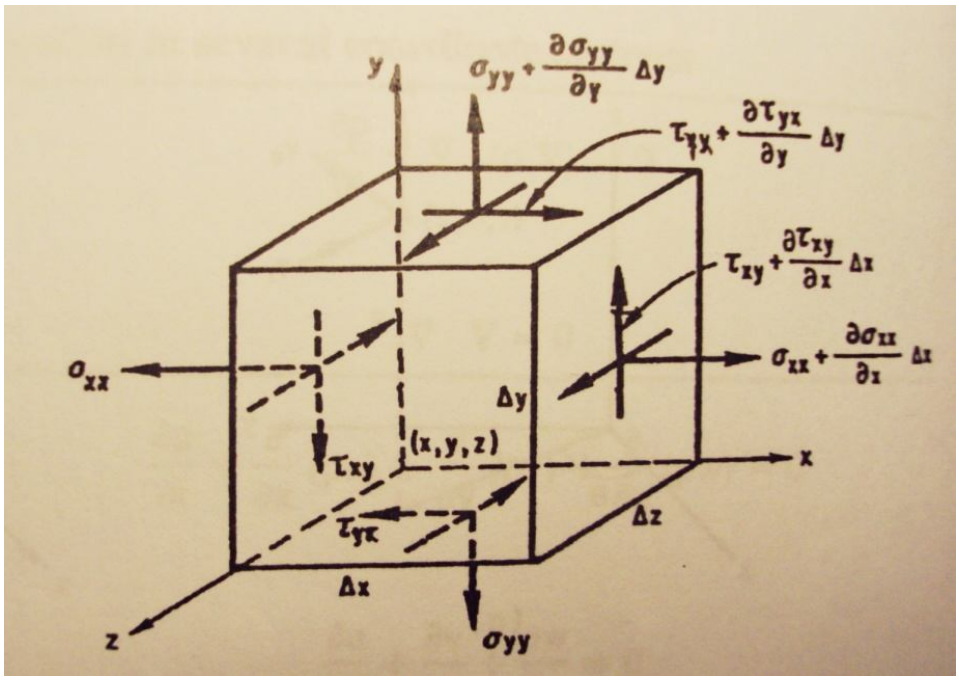
$$a_y = u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t} \qquad \textbf{(2.15)}$$

$$a_z = u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} \qquad \textbf{(2.16)}$$

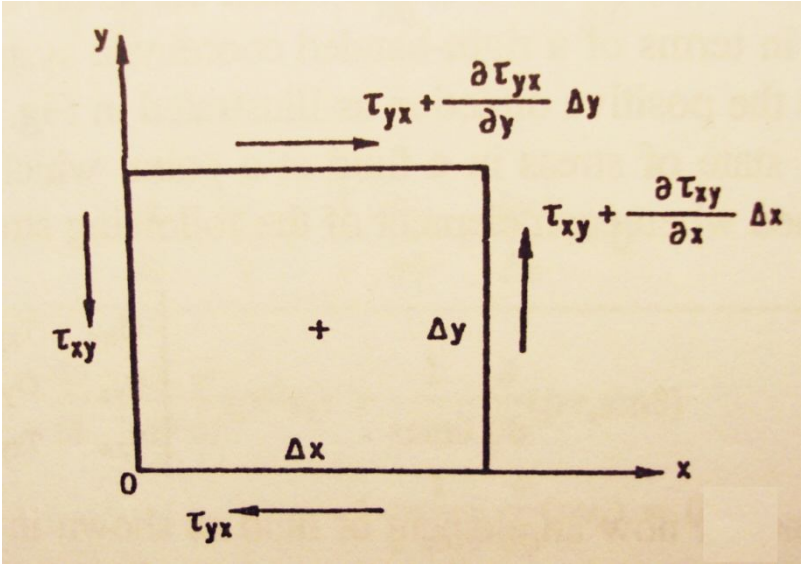
Şimdi bu denklemleri bir yana bırakıp, tekrar süreklilik ifadesinin çıkarımı gibi bir diferansiyel göz önüne alalım (Şekil 2.2). Bu diferansiyel elemanı iki tür kuvvet etkiliyor, 1-Hacimsel kuvvetler, 2-Yüzey kuvvetleri (Surface Forces) bu durumda:

$$\vec{f}_{toplam} = \vec{f}_{hacimsel} + \vec{f}_{yüzey} \qquad \textbf{(2.17)}$$

Yüzey kuvvetleri aldığımız diferansiyel elemanın her yüzeyinde etkili olan kuvvetlerdir. Yüzeye etkileyen kuvvetler 2 türdür: 1-Kayma gerilmesi, 2- Normal gerilme (Şekil 2.3).



Şekil 2.2 : Momentum denklemlerinin çıkarımı için alınan diferansiyel eleman [11].



Şekil 2.3 : Bir akış elemanını yüzeyini etkileyen kuvvetler [11].

Şimdi Şekil 2.2 de her yönde uygulanan net kuvveti yazmak istersek:

$$F_x = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial y} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \qquad \textbf{(2.18)}$$

$$F_y = \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \qquad \textbf{(2.19)}$$

$$F_z = \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial y} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \qquad \textbf{(2.20)}$$

Şimdi denklem **(2.17)** göz önüne alırsak:

$$F_{x,toplam} = m.f_{x,hacimsel} + F_x \qquad \textbf{(2.21)}$$

$$F_{x,toplam} = (\rho . f_{x,hacimsel} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial y}) \Delta x \Delta y \Delta z \qquad \textbf{(2.22)}$$

Tamamen benzer şekilde y ve z yönleri için ise aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$F_{y,toplam} = (\rho . f_{y,hacimsel} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y}) \Delta x \Delta y \Delta z \qquad \textbf{(2.23)}$$

$$F_{z,toplam} = (\rho . f_{z,hacimsel} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial y}) \Delta x \Delta y \Delta z \qquad \textbf{(2.24)}$$

Şimdi tekrar Newton'un ikinci kanununa dönersek:

$$F_{x,toplam} = m\, a_x \qquad \textbf{(2.25)}$$

Denklem **(2.14)** ve **(2.22)** den denklem **(2.25)**'te yerleştirirsek:

$$\left(\rho.f_{x,hacimsel} + \frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial y}\right)\Delta x\Delta y\Delta z = \rho\Delta x\Delta y\Delta z(\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}} + \mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{z}} + \frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{t}}) \quad \textbf{(2.26)}$$

Sonuç olarak:

$$\rho\left(\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}} + \mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{z}} + \frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{t}}\right) = \left(\rho.f_{x,hacimsel} + \frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial y}\right) \quad \textbf{(2.27)}$$

benzer şekilde y ve z yönleri için:

$$\rho(\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}} + \mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{z}} + \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{t}}) = (\rho.f_{y,hacimsel} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial y}) \quad \textbf{(2.28)}$$

$$\rho\left(\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{y}} + \mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{z}} + \frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{t}}\right) = (\rho.f_{z,hacimsel} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial y}) \quad \textbf{(2.29)}$$

Elde edilen **(2.27)**, **(2.28)** ve **(2.29)** numaralı denklemler, momentum denklemlerinin veya hareket denklemlerinin en genel halidir[11].

Elde edilmiş olan momentum denklemleri çok genel olup her tür problemde uygulanması çözüm işini çok zorlaştırabilir. Bu sebepten dolayı bazı basitleştirmeler yaparak ve ayrıca çoğu zaman karşımıza çıkacak akış koşullarını göz önüne bulundurarak daha basit ve kullanışlı denklemler elde edebiliriz. Eğer çözümü ile ilgilendiğimiz akışkan Newtonian olup yoğunluk ve viskozitesi sabit alınabiliyorsa, ayrıca sıkıştırılamaz akış olup, sıcaklık değişimi ani olmazsa, gösterilebilir [11] ki momentum denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilirler:

$$\rho\left(\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{t}} + \mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}} + \mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{z}}\right) = \rho.f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \quad \textbf{(2.30)}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{t}} + \mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}} + \mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{z}}\right) = \rho.f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) \quad \textbf{(2.31)}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{t}} + \mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{y}} + \mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{z}}\right) = \rho.f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \quad \textbf{(2.32)}$$

Bu denklemlere Navier-Stokes denklemleri adı verilir. Bu denklemler benzer bir şekilde silindirik ve küresel koordinatlar için de elde edilebilir.

2.4 Enerji Denklemi

Enerji denklemi $\Delta x\Delta y\Delta z$ hacminde, bir diferansiyel elemanın üzerinde Termodinamiğin birinci yasasının uygulanmasından elde edilir. Termodinamiğin birinci yasasına göre bir diferansiyel elemanına birim zamanda aktarılan ısı ile aynı

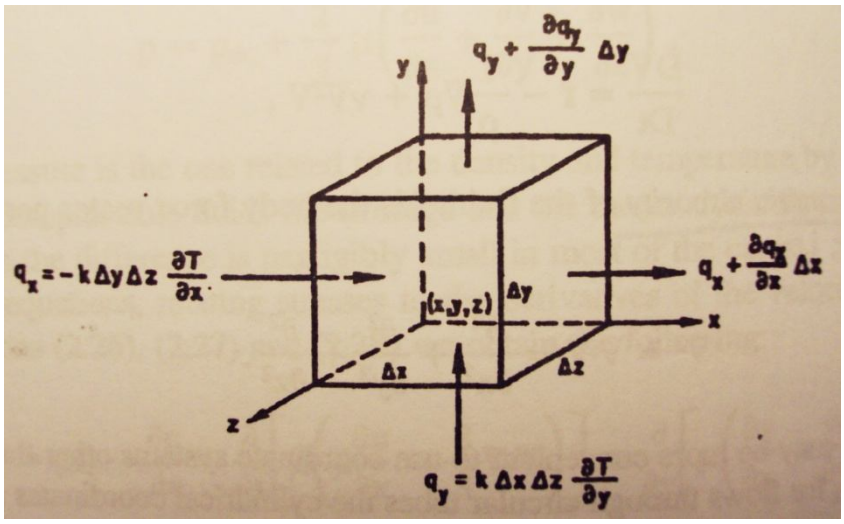
diferansiyel elemanın birim zamanda yaptığı işin farkı o elemandaki birim zamanda enerji artışını gösterir [11].

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\delta Q}{dt} - \frac{\delta W}{dt} \tag{2.33}$$

veya,

$$\frac{dE}{dt} = q - \dot{W} \tag{2.34}$$

Şimdi diğer korunum denklemleri gibi bir diferansiyel elemanı göz önüne alalım (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Enerji denkleminin çıkarımı için alınan diferansiyel eleman [11].

Bu diferansiyel eleman için Fourier kanununu göz önünde bulundurarak birim zamanda net ısı aktarımını yazmak istersek aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(K\,\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K\,\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K\,\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right]\Delta x\Delta y\Delta z \tag{2.35}$$

Şimdi aynı diferansiyel eleman için akışkan tarafından birim zamanda yapılan net işi yazmak istersek (Şekli 2.2):

$$-[\frac{\partial}{\partial x}(u\sigma_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial x}(u\tau_{yx} + v\sigma_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial x}(u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\sigma_{zz}) + \rho(uf_x + vf_y + wf_z)]\Delta x\Delta y\Delta z \tag{2.36}$$

Diğer yandan bir diferansiyel elemanın birim zamanda enerjisinin artışı 2 enerjiden oluşur, iç enerji ve kinetik enerji. Bu enerjilerin de diferansiyel elemandaki net artışı aşağıdaki gibidir:

$$\rho\Delta x\Delta y\Delta z\ \frac{D}{Dt}\ (\mathcal{U} + \frac{u^2+v^2+w^2}{2}) \qquad \textbf{(2.37)}$$

Şimdi denklem **(2.34)**'ü göz önünde alıp tekrar yazmak istersek:

$$\rho\ \frac{\mathrm{D}}{\mathrm{Dt}}\left(\mathcal{U} + \frac{\mathrm{u}^2+\mathrm{v}^2+\mathrm{w}^2}{2}\right) = \left[\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\left(\mathrm{K}\ \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x}}\right) + \frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}\left(\mathrm{K}\ \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{y}}\right) + \frac{\partial}{\partial \mathrm{z}}\left(\mathrm{K}\ \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{z}}\right)\right] + -[\frac{\partial}{\partial x}(u\sigma_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial x}(u\tau_{yx} + v\sigma_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial x}(u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\sigma_{zz}) + \rho(uf_x + vf_y + wf_z)] \qquad \textbf{(2.38)}$$

Bu ifadeye toplam enerji denklemi adı verilir ki hem ısıl enerjiyi hem de mekanik enerjiyi içerir.

Bizim istediğimiz, ısıl enerji denklemini elde edebilmek için bu ifadeden mekanik enerji denklemini çıkarmamız gerekiyor. Eğer x yönündeki momentum denklemini **(2.27)** u ile, y yönündeki momentum denklemini **(2.28)** v ile, z yönündeki momentum denklemini **(2.29)** w ile çarpar ve son olarak hepsini toplarsak aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\rho\ \frac{\mathrm{D}}{\mathrm{Dt}}\left(\frac{\mathrm{u}^2+\mathrm{v}^2+\mathrm{w}^2}{2}\right) = \mathrm{u}\left(\frac{\partial \sigma_{\mathrm{xx}}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \tau_{\mathrm{yx}}}{\partial \mathrm{y}} + \frac{\partial \tau_{\mathrm{zx}}}{\partial \mathrm{z}}\right) + \mathrm{v}\left(\frac{\partial \tau_{\mathrm{xy}}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \sigma_{\mathrm{yy}}}{\partial \mathrm{y}} + \frac{\partial \tau_{\mathrm{zy}}}{\partial \mathrm{z}}\right) + \mathrm{w}(\frac{\partial \tau_{\mathrm{xz}}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \tau_{\mathrm{yz}}}{\partial \mathrm{y}} + \frac{\partial \sigma_{\mathrm{zz}}}{\partial \mathrm{z}}) + \rho\left(\mathrm{uf_x} + \mathrm{vf_y} + \mathrm{wf_z}\right) \qquad \textbf{(2.39)}$$

Bu denkleme mekanik enerji denklemi adı verilir. Bu denklemi **(2.38)** numaralı denklemden çıkarsak:

$$\rho\ \frac{\mathrm{D}\mathcal{U}}{\mathrm{Dt}} = \frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\left(\mathrm{K}\ \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x}}\right) + \frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}\left(\mathrm{K}\ \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{y}}\right) + \frac{\partial}{\partial \mathrm{z}}\left(\mathrm{K}\ \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{z}}\right) + \sigma_{\mathrm{xx}}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \sigma_{\mathrm{yy}}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}} + \sigma_{\mathrm{zz}}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{z}} + \tau_{\mathrm{xy}}\left(\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}}\right) + \tau_{\mathrm{yz}}\left(\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{y}} + \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{z}}\right) + \tau_{\mathrm{zx}}\left(\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{z}} + \frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}}\right) \qquad \textbf{(2.40)}$$

Bu ifadeye ısıl enerji denklemi veya kısacası enerji denklemi adı verilir. Denklem **(2.40)** 'ta kayma gerilmesi ve normal gerilmeyi hızlar cinsinden yazarsak bir takım ara işlemden sonra (Kaynak [11]'de detaylı bir şekilde anlatılmıştır) enerji denklemini aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$\rho\ \frac{\mathrm{D}\mathcal{U}}{\mathrm{Dt}} = \frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\left(\mathrm{K}\ \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x}}\right) + \frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}\left(\mathrm{K}\ \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{y}}\right) + \frac{\partial}{\partial \mathrm{z}}\left(\mathrm{K}\ \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{z}}\right) + \frac{\mathrm{p}}{\rho}\frac{D\rho}{Dt} + \phi \qquad \textbf{(2.41)}$$

$$\phi = 2\mu\ [(\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial y})^2 + (\frac{\partial w}{\partial z})^2 + \frac{1}{2}\ (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})^2 + \frac{1}{2}\ (\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z})^2 + \frac{1}{2}\ (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})^2 - \frac{1}{3}(\nabla.\overrightarrow{V})^2 \qquad \textbf{(2.42)}$$

Burada ϕ ifadesine disipasyon fonksiyonu adı verilir, ki birim zamanda birim hacimde viskoz kuvvetlerin bir akışkan parçacığının üzerinde yaptığı ters işin göstergesidir [11].

2.5 Isı İletimi

Isı geçişi sıcaklık farkından kaynaklanan enerji aktarımıdır. Bir ortam içinde veya ortamlar arasında, bir sıcaklık farkı mevcut olan her durumda, ısı geçişi mutlaka gerçekleşir. Katı veya akışkan bir durgun ortam içinde, bir sıcaklık farkı olması durumunda, ortam içinde gerçekleşen ısı geçişi için, iletim terimi kullanılır. İletim kelimesi, atomik ve moleküler faaliyeti çağrıştırmalıdır, çünkü ısı geçişinin bu türü, atomik ve moleküler düzeyde hareketle ilişkilidir. İletim bir maddenin daha yüksek enerjili parçacıklarından daha düşük enerjili parçacıklarına, bu parçacıklar arasındaki etkileşimler sonucunda enerjinin aktarılması olarak düşünülebilir[12].

Eğer tekrar Şekil 2.4'ü göz önünde bulundurursak, alınan diferansiyel elemanından ısı iletimi ile geçen ısıyı Fourier yasası ile elde edebiliriz.

$$q_x = -K\,\Delta y \Delta z\,\frac{\partial T}{\partial x} \qquad \textbf{(2.43a)}$$

$$q_y = -K\,\Delta x \Delta z\,\frac{\partial T}{\partial y} \qquad \textbf{(2.43b)}$$

$$q_z = -K\,\Delta x \Delta y\,\frac{\partial T}{\partial z} \qquad \textbf{(2.43c)}$$

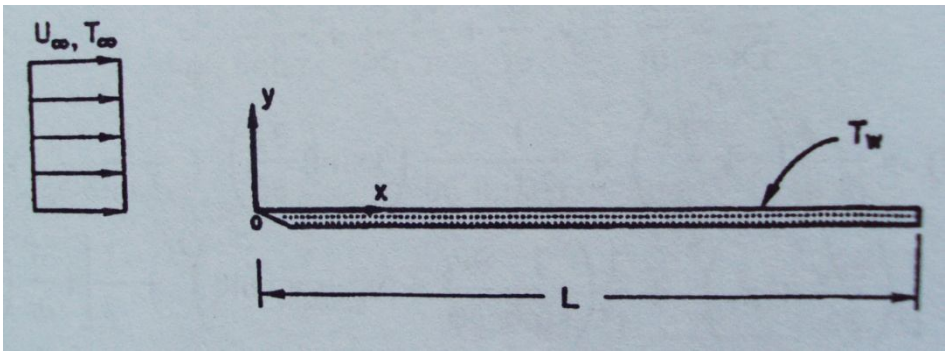
Bu ifadelerde k ısı iletim katsayısıdır ki bu bir malzeme özelliğidir ve malzemeye göre değişir. Bu ifadeleri silindirik ve küresel koordinatlar için de yazmak mümkündür.

Bu çalışmada elektrikli motorun belli bölgelerinde üretilen ısı diğer bölgelere iletim ile yayılmaktadır. Yapılacak olan tasarımın amacı iletimle motorda dağılan ısıyı motorun dış yüzeyinden çekip çevreye aktarmaktır.

2.6 Isı Taşınımı

Bir yüzey ile hareket halindeki bir akışkan farklı sıcaklıklarda ise, aralarında gerçekleşen ısı geçişi taşınım terimi ile anılır. Taşınım ile ısı geçişi, iki mekanizmadan oluşmaktadır. Rastgele moleküler hareket (yayılım) sonucunda enerji aktarımının yanısıra, akışkanın kitlesel veya makroskopik hareketi ile de enerji

aktarımı olur. Bu akışkan hareketi herhangi bir anda, çok sayıda molekülün topluca veya kümelenmiş olarak hareket etmesi ile ilgilidir. Bir sıcaklık gradyanı olması durumunda, böylesi bir hareket, ısı geçişine katkıda bulunur. Küme içindeki moleküller rastgele hareketlerini de korudukları için, toplam ısı geçişi, moleküllerin rastgele hareketi ile ve akışkanın kitle hareketi ile oluşan enerji aktarımının bir toplamıdır. Bu toplam aktarım söz konusu olduğunda, taşınım terimi kullanılır[12]. Taşınım ile gerçekleşen ısı geçişini Newton Soğutma yasası olarak bilinen ifade ile hesaplamak mümkündür. Şekil 2.5'te gösterildiği gibi, L uzunluğundaki bir düz levha üzerinden, u_∞ hızına ve T_∞ sıcaklığına sahip bir akışkanın aktığını göz önüne bulunduralım.



Şekil 2.5 : Düz levha üzerindeki akış [11].

Bu akışta eğer levha T_w sabit yüzey sıcaklığında ise ve $T_w \neq T_\infty$ o zaman ısı taşınımı ile levha ve akışkan arasında ısı aktarımı gerçekleşecek.

$$q'' = h\,(T_w - T_\infty) \qquad \textbf{(2.44)}$$

Burada h yerel ısı taşınım katsayısıdır ki akış koşulları ve akışkanın özellikleri bu değirin miktarını etkiler. Yukarıdaki örnekte h levhanın her noktasında değişir bu sebepten dolayı taşınımla gerçekleşen toplam ısı akısını bulabilmek için tüm yüzey için ortalama ısı taşınım katsayısını, $\overline{h}$ hesaplamak lazım.

$$\overline{h} = \frac{1}{L}\int_0^L h\,dx \qquad \textbf{(2.45)}$$

Bu durumda toplam taşınımla olan ısı akısı aşağıdaki gibi olur[12]:

$$q'' = \overline{h}\,(T_w - T_\infty) \qquad \textbf{(2.46)}$$

Bu tasarım çalışmasında bölüm 2.5'te de anlatıldığı gibi elektrikli motorun belli bölgelerinde meydana çıkan ısı, iletim ile elektrikli motorun tümüne yayılacaktır.

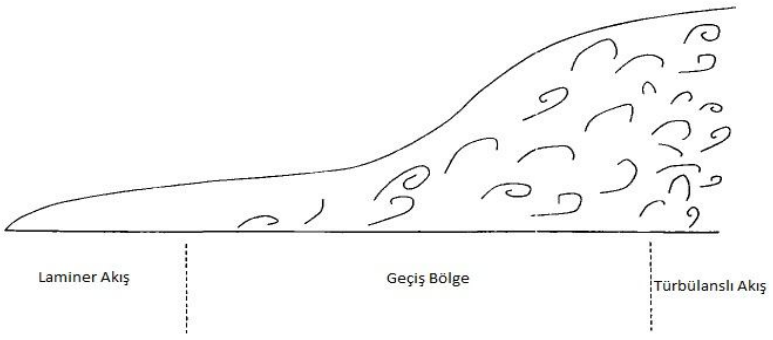
Yapılacak olan tasarımın amacı iletim ile motorun dış yüzeyine aktarılan ısıyı taşınım ile bir akışkana aktarıp ve daha sonra bir radyatör yardımı ile çevreye aktarmaktır.

2.7 Akış Analizi ve Türbülans

Bu tasarım çalışmasının esas amacı ısı üreten bir kaynaktan, bir akışkan yardımıyla ısıyı çekip çevreye aktarmaktır. Söz konusu akışkanın ısı kaynağından çektiği ısıyı çevreye aktarabilmesi için hareketli olmalı, yani işlemin gerçekleşebilmesi için bir akış olmalıdır. Bir akışın analizi ve analitik olarak çözümü genelde çok zordur ve bir kaç özel durum haricinde (basitleştirmeler yaparak) genelde tam çözümü imkansızdır.

Bir akışın çözümünden kastedilen, akışın her t anında (x,y,z) noktasında, u,v,w hızlarını ve p basıncını verebilen ifadeleri elde etmektir. Bu ifadeleri elde edebilmek için bir önceki bölümlerde elde edilen süreklilik ve momentum denklemlerini aynı anda çözmek gerekir. Görüldüğü gibi bu takım denklemleri dört denklem ve dört bilinmeyenden oluşmaktadır ama elde edilen denklemlerin doğrusal olmayan (nonlinear) kısmi diferansiyel denklem olmalarından dolayı tam çözümleri çok zordur ve bir kaç özel durum dışında imkansızdır.

Bir akış iki tür olabilir 1- Laminer Akış, 2-Türbülanslı Akış. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi eğer bir akışkan parçacığı sadece akış doğrultusunda hareket ederse akış laminerdir. Bunun dışında eğer akışkan parçacığı akış doğrultusu dışında diğer doğrultularda da hareket ederse akış türbülanslıdır.



Şekil 2.6 : Düz levhadaki akışta türbülansa geçiş aşamaları[13].

Şekil 2.6 da görüldüğü gibi bir akışı, akış doğrultusunda üç bölgeye bölebiliriz 1-Laminer Bölge, 2-Laminerden Türbülansa Geçiş Bölgesi, 3-Türbülans Bölgesi.

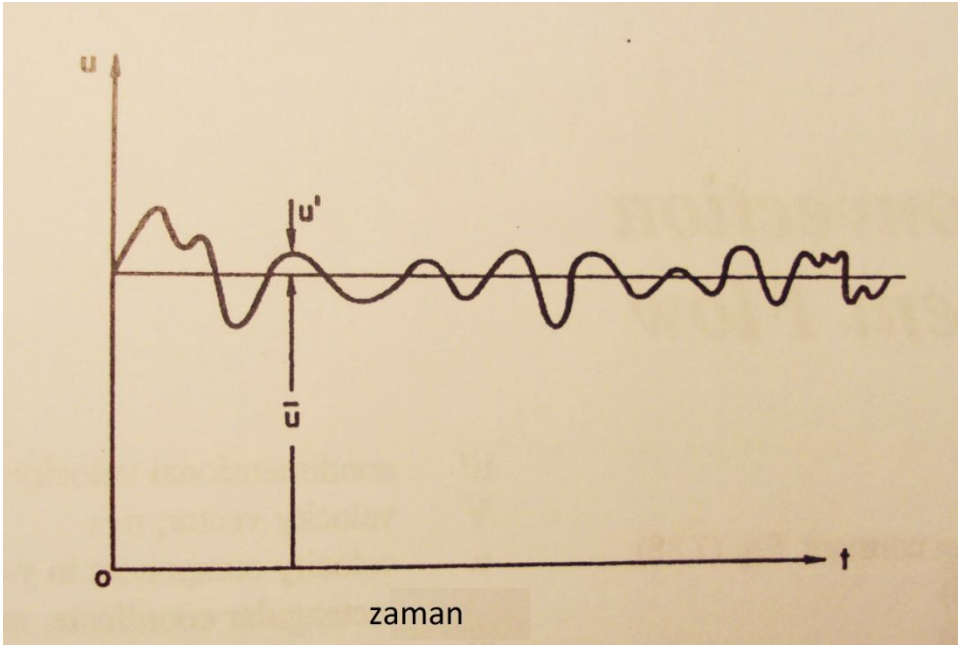
Pratikte çoğu akışlar türbülaslıdırlar. Bir türbülanslı akışta hız, sıcaklık, basınç ve diğer akış özellikleri akışın her noktasında zamanla sürekli değişir [11]. Çok sayıda etken bir akışın laminerden türbülansa geçmesine sebep olabilir. Bir akışın laminerden, türbülansa geçmesini gösteren en önemli değer Re sayısıdır.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho.v.L}{\mu} \qquad \textbf{(2.47)}$$

Örnek olarak boru akışında Re sayısı 2300 geçtiğinden sonra akış türbülansa geçecek, bu değer düz levha üzerindeki akışta 300000 ~500000 arasındadır. Bellidir ki basınç gradyanı, ısı geçişi (ısınma veya soğuma), yüzey pürüzlülüğü, yüzey eğriliği gibi faktörler ise, laminerden türbülansa geçiş olayını etkiler [13].

Daha önce elde edilen süreklilik, momentum ve enerji denklemleri türbülanslı akış için de geçerlidirler çünkü bu denklemler zamana bağlı olup anlık değerlere sahiptirler.

Bir türbülanslı akışta akışın değerleri sürekli değişir, bu değişimler genelde rastgele ve bir kurala tabii olmadan bir ortalama değer etrafında çalkantılı bir şekilde gerçekleşir. Bu olay korunum denklemlerinin çözümünü çok zorlaştırır. Bir türbülanslı akışın çözümünü gerçekleştirmek için ilk olarak ortalama ve çalkantı değerlerini tanımlamak lazımdır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 : Türbülanslı akışta bir noktadaki hızın zamanla değişimi [11].

Şekil 2.7'de bir türbülanslı akışın herhangi bir noktasındaki zamana bağlı hız değişimi gösterilmektedir. Görüldüğü gibi u yani anlık hız bir ortalama hız değerin etrafında sürekli değişim göstermektedir. Anlık değer ile ortalama değerin arasındaki farka çalkantı (fluctuating) değeri adı verilir. Buna göre:

$$u = \overline{u} + u' \qquad p = \overline{p} + p'$$

$$v = \overline{v} + v' \qquad T = \overline{T} + T' \qquad \textbf{(2.48)}$$

$$w = \overline{w} + w' \qquad \rho = \overline{\rho} + \rho'$$

Şimdi eğer daha önce elde edilen korunum denklemlerinde **(2.48)** numaralı ifadelerden yerleştirirsek türbülanslı akış için korunum denklemleri elde edilmiş olur. Bu denklemler ve çıkarım aşamaları [11] numaralı kaynakta detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Türbülanslı bir akışın tam çözümü imkansızdır. Bu akışların çözümü için ancak yaklaşık yöntemler kullanıp, modellemeler yapmak gerekir. Türbülanslı akışların çözümü için çok sayıda çözüm modeli ve korelasyonlar araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Çoğu HAD programında bu modellemeler mevcuttur, ancak önemli olan her çözümlemede akış ve geometrinin özelliğine bağlı doğru çözüm modelini seçmektir. Bu sebepten dolayı bir bilgisayar destekli akış analizine başlamadan önce akış ve geometrimize uygun türbülans çözümleme modeline karar verilmesi gerekir. Bu konu ile ilgili [11] ve [13] numaralı kaynaklarda detaylı açıklamalar mevcuttur ve daha detaylı açıklamalar bu tez konusunun dışında kalır.

3. SAYISAL ANALİZ

3.1 Giriş

Günümüzde bilgisayarların donanım ve yazılım olarak gelişmesi, çoğu mühendislik analizinin bilgisayarlarla yapılmasına imkan vermiştir. Bu tür analiz yapma kabiliyetine sahip olan yazılımlara genel olarak simülasyon programları adı verilir. Simülasyon programlarında bir fiziksel olayı programa tanımlayıp, daha sonra bu fiziksel olayı etkileyen dış faktörler programa tanımlanır. Simülasyon programları o fiziksel olayı tanımlayan matematiksel denklemleri dış etkenlerin etkisini de göz önüne bulundurarak yüksek hassasiyetlerle çözüp, olayın sonucunu hesaplar. Çoğu mühendislik problemi çok karmaşık matematik ifadelerden oluşur ve genel olarak analitik çözümlerini elde etmek çok zor veya bazen imkansızdır. Bu sebepten dolayı genelde bu tür problemlerin çözümünde bilgisayar simülasyon programları kullanılmaktadır. Bu şekilde bir olayın analizini daha az maliyetle, daha hızlı ve daha kolay bir şekilde yapmak mümkün olabilir.

Bir mühendislik tasarımı yaparken, tasarımın geometrisi, malzemesi ve birçok dış etken tasarımın sonucunu etkileyebilir. İyi bir tasarım yapabilmek için tasarımı etkileyen bu etkenlerin her birinin etkisini tek, tek incelemek gerekir. Son olarak ise bütün sonuçları göz önünde bulundurarak optimum bir durumu elde edip tasarımı gerçekleştirmek lazımdır. Deneysel bir çalışmada bütün etkenlerin etkisini sürekli değiştirmek çok zaman alıcı veya bazı durumlarda hiç mümkün olmayabilir. Bu sebepten dolayı günümüzde bilgisayar destekli tasarımlar çok rağbet görmektedir.

Öte yandan bilgisayar destekli tasarımların sonuçları her zaman yüzde yüz doğru olmayabilir, ve bu tasarımlar sadece tasarımcıya olayın niteliği ile ilgili fikir verebilir ve seri üretime başlamadan önce her zaman bilgisayar sonuçlarını deneysel olarak doğrulamak gerekir.

Bilgisayar simülasyon programlarının kullanıldığı en önemli mühendislik dallarından biri ısı ve akışkan bilim dallarıdır. Daha önce de anlatıldığı gibi ısı akışkan problemlerinin analitik çözümü çok zordur ve birkaç basit durum haricinde tam

çözüm imkansızdır. Yapılacak olan bu tasarım çalışmasında akış problemlerini çözebilmek için FLUENT6.3 paket programı kullanılmıştır. FLUENT programı süreklilik denklemi, momentum denklemleri ve enerji denklemini çözerek sonuç olarak basınç, hız ve sıcaklık alanlarını hesaplar.

3.2 Ağ Üretimi Metodolojisi

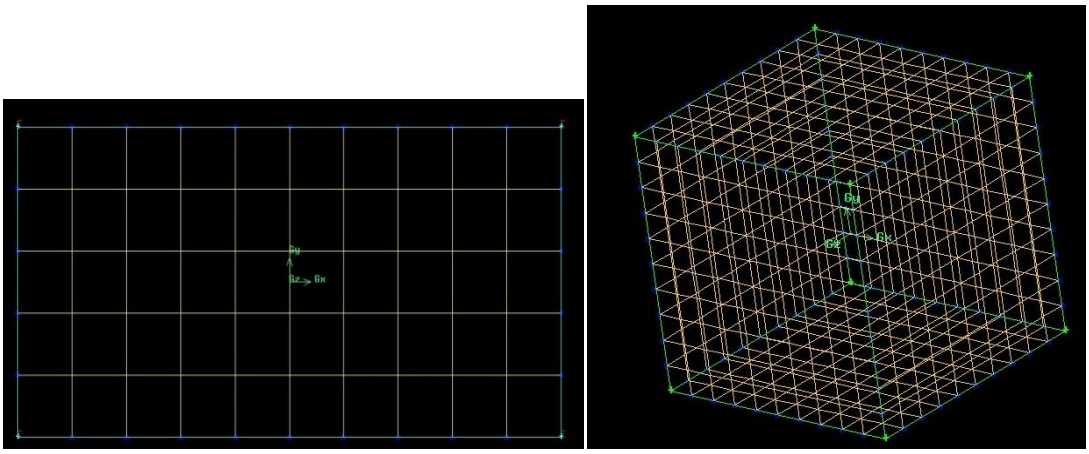
Bir HAD analizine başlamadan önce olayın gerçekleşeceği geometrilerde ağ (mesh) üretmek lazım. Sayısal analizin gerçekleşebilmesi için bir kontrol hacmini daha küçük hacimlere bölmek işlemine ağ üretimi adı verilir. FLUENT programı kendisi ağ üretme özelliğine sahip olmadığı için, ağ üretme işlemi için başka yazılımlardan yararlanılır. FLUENT programı ile uyumlu olup ağ üretebilen programlardan biri GAMBIT programı dır.

Bu tasarım çalışmasında, ilk önce SOLIDWORKS-2010 programı yardımı ile tasarımların geometrilerinin çizimi gerçekleştirildi daha sonra GAMBIT programı yardımı ile ağ üretilip gereken sınır koşulları tanımlandı ve son olarak ise FLUENT programı yardımı ile gereken ısı ve akış analizleri yapılmıştır.

İyi bir ağ üretimi HAD çözümünün en önemli aşamasıdır. Ağ üretme işlemi bilgisayar hafızası açısından çok ağır işlemdir ve yanlış ağ üretime metodolojisi, gereksiz hafıza kullanımına, çözümlemenin çok yavaşlayıp zaman kaybına ve yanlış sonuçların elde edilmesine sebep olabilir.

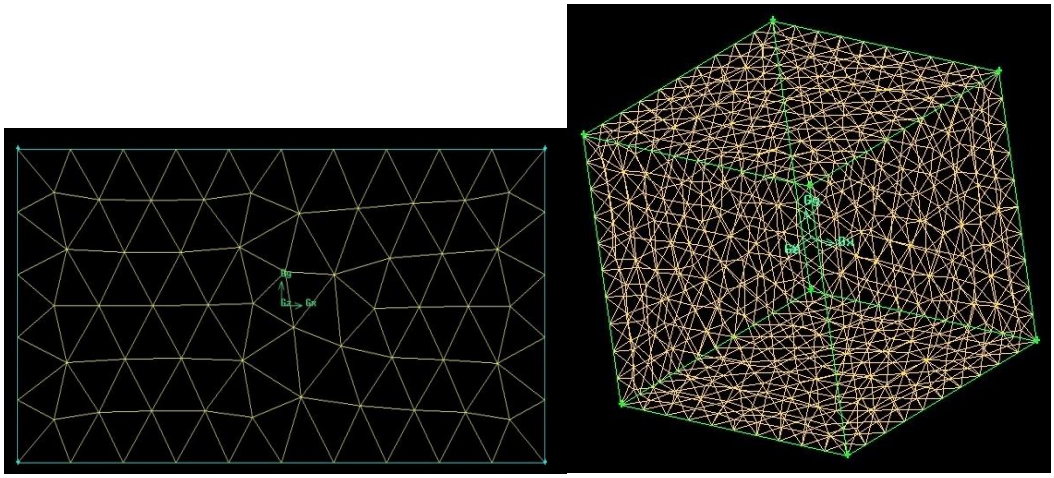
GAMBIT yazılımı 2 farklı ağ üretim metoduna sahip, 1-Yapılı (Structured), 2-Yapısız (Unstructured). Bu yöntemlerin her birinin kendine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Yapılı bir ağ üretiminde, ağ hücreleri topolojik olarak dikdörtgen esaslılar. Bu sebepten dolayı, üretilen hücreler bu yöntemde 2 boyutlu çözümlemede dört yüzeyli ve 3 boyutlu çözümlemede ise altı yüzlüdürler (Şekil 3.1).

Yapılı ağ üretim metodunda üretilen ağlar daha az bilgisayar CPU zamanını kullanıp daha hızlı sonuçlar verirler, ama bu yöntem karmaşık geometriler için uygun olmayıp bazı ölü bölgelerin oluşmasına (Hücre atılmayan bölgeler) sebep olabilir.



Şekil 3.1 : 2 ve 3 boyutlu yapılı (Structured) ağ hücreleri.

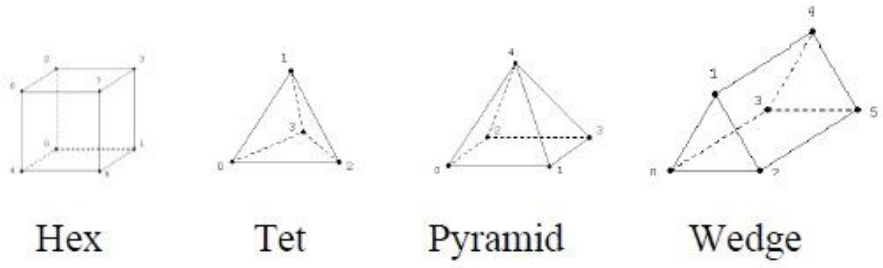
Yapısız ağ üretiminde hücreler farklı şekillerde üretilebilir, bu sebepten dolayı ağ üretme işlemi daha esnek bir şekilde gerçekleşebilir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : 2 ve 3 boyutlu yapısız (Unstructured) ağ hücreleri.

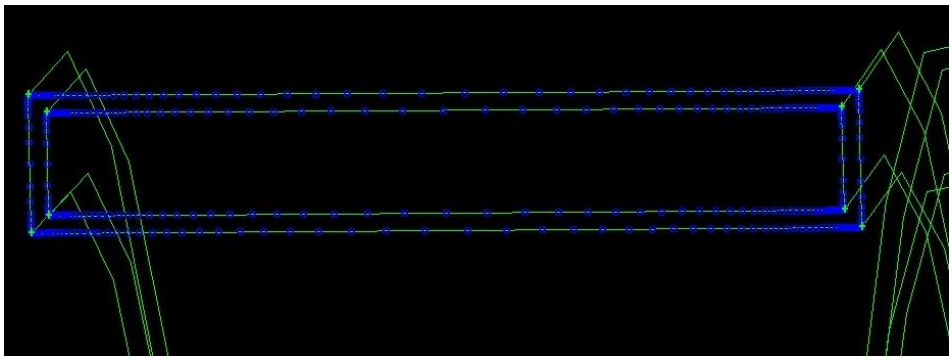
Yapısız ağlara sahip geometrilerin bilgisayar açısından çözümlemesi daha zor ve zaman alıcıdır ama karmaşık geometrilerde bu tarz ağ üretim metodunun kullanılması kaçınılmazdır. Bu çalışmada geometrilerin karmaşık olmasından dolayı yapısız ağ üretimi yönteminden yararlanmıştır.

GAMBIT yazılımında 3 boyutlu çözümlemede 4 farklı hücre şeklinin üretilmesi mümkün,1-Hex, 2-Tet, 3-Pyramid, 4-Wedge (Şekil 3.3) [14]. Yapılan bu çalışmada bütün analizlerde TET/HYBRID yöntemi ile ağ üretilmiştir. Bu hücre yapısına sahip ağların avantajı 64 bitle çalışıp daha uygun bir şekilde hafızanın kullanılması ve ayrıca karmaşık bölgelerde diğer hücre şekillerinden (HYBRID) yararlanmasıdır.



Şekil 3.3 : Ağ hücre geometrileri [14].

Bu çalışmanın ağ üretiminde göz önüne bulundurulan başka bir konu ise akış kanallarındaki ağ sıklığıdır. Bilindiği gibi bir kanal akışında hız ve sıcaklık değişiminin büyük bir kısmı yüzeylere yakın bölgelerde (hidrolik ve ısıl sınır tabaka) gerçekleşmektedir, bu sebepten dolayı bu bölgelerin daha yüksek hassasiyetlerle incelenmesi gerekir. Bu çalışmada ise bu konuya dikkat edilerek akışın gerçekleştiği kanallarda yüzeye yakın bölgelerde daha sık ağ üretildi (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 : Akış kanalındaki ağ sıklığı.

Ağ üretiminde göz önünde bulundurulması gereken faktörlerden biri sonuçların ağ sıklığında bağımsız olmasıdır. Bir aşamadan sonra ağ sıklığını ne kadar değiştirelim artık sonuçlar değişmemektedir. Bu duruma "sonuçların ağ sıklığından bağımsız olama durumu" veya "ağ yakınsaması" adı verilir. Bu çalışmada genel analizlere başlamadan önce bir tasarım için sonuçların ağdan bağımsız olma durumu incelenmiştir. Bu konu detaylı bir şekilde 4. bölümde anlatılacaktır.

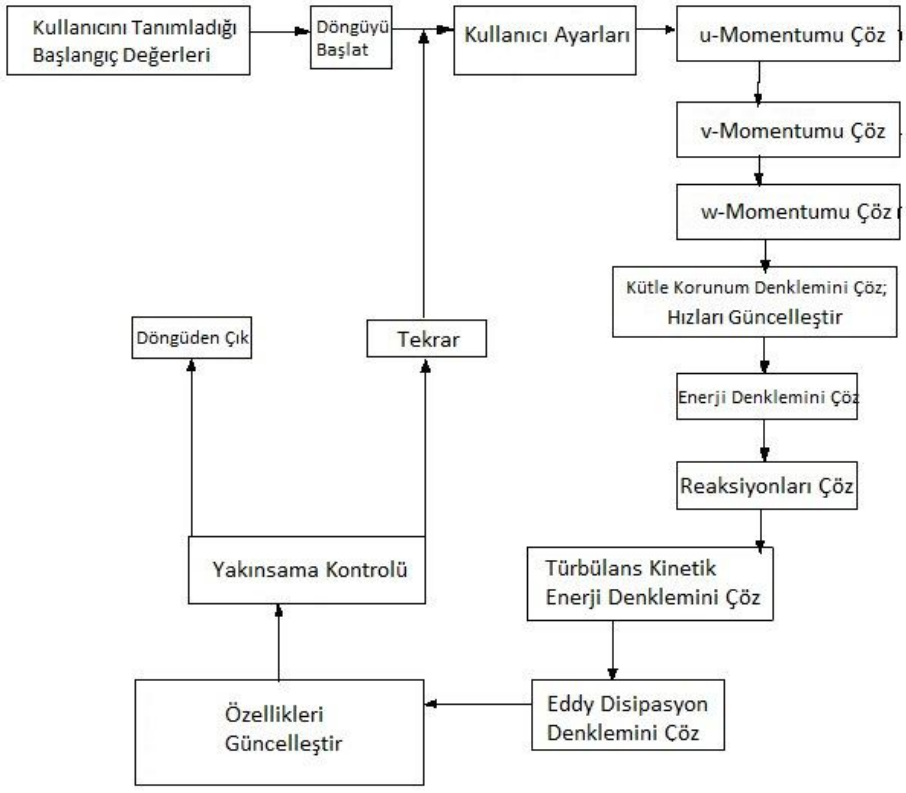
GAMBIT programında geometrilerde ağ oluşturduktan sonra sınır koşullarının tanımlanması gerekir. Bu iş için geometriyi oluşturan bütün yüzeyleri göz önünde almak, sınır koşullarını ve bu sınır koşulların hangi türden olduğunu tanımlamak gerekir. Sınır koşullarını tanımladıktan sonra bu kez sıra geometriyi oluşturan hacimlerin hangisinin katı, hangisinin akışkan olduğunun tanımlamasındadır. Bütün

bu işlemler bittikten sonra GAMBIT programı yardımı ile bir MESH dosyası üretilebilir. Bu dosya GAMBIT'ten FLUENT'e geçiş imkanını sağlar.

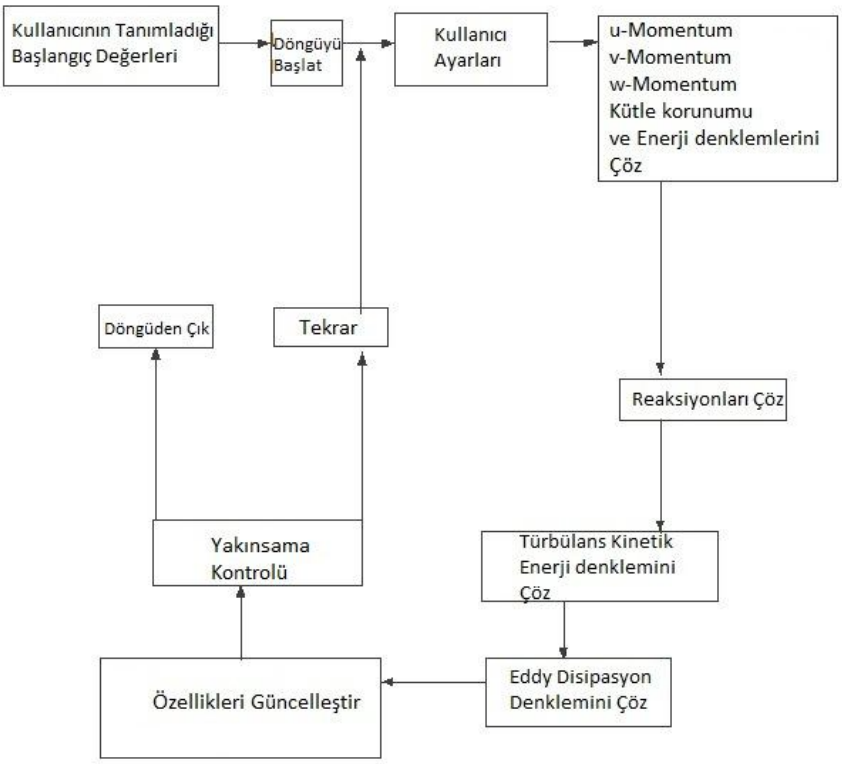
3.3 Sayısal Çözüm Metodolojisi

GAMBIT programı yardımı ile ağları oluşmuş MESH dosyası artık FLUENT analizi için hazır duruma gelmiştir. FLUENT yardımı ile çalıştırılan MESH dosyası ilk önce bir ağ kontrolünden (Grid/Check) geçtikten sonra ölçülendirilmesi gerekir. GAMBIT ortamı boyutsuz bir ortamdır ve boyutlandırma işi FLUENT programında yapılmalıdır. Bu işlemlerin yapılmasından sonra ve ayrıca FLUENT yardımı ile ağlar tekrar gözden geçirilip gereken düzeltmeler yapıldıktan sonra FLUENT'te çözüm stratejisi belirlenir.

FLUENT'te iki farklı çözüm algoritması mevcuttur: 1-Segregated Solver, 2-Coupled Solver. Segregated Solver algoritmasında (Şekil 3.5), her denklem (Momentum, Süreklilik, ...) ayrı ayrı çözülür ve işlem iterasyonlarla devam eder. Coupled Solver algoritmasında (Şekil 3.6) ise Süreklilik, Momentum ve Enerji denklemleri bir arada çözülüp diğer denklemler ayrı çözülür.



Şekil 3.5 : Segregated Solver algoritması [15].

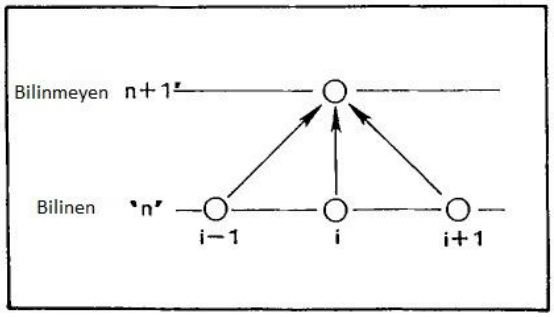


Şekil 3.6 : Coupled Solver algoritması [15].

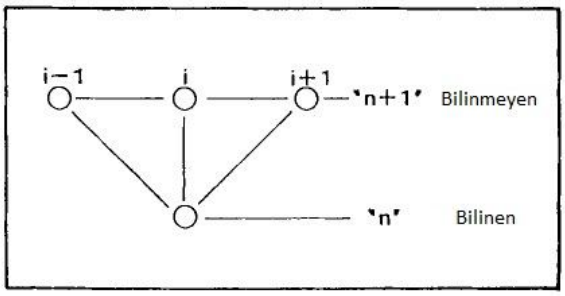
Coupled Solver genelde yüksek hızlara sahip akışların çözümünde yani sıkıştırılabilme etkisinin çok fazla olduğu akışlarda kullanılır. Segregated Solver algoritması ise düşük hızlara sahip sıkıştırma etkisinin bulunmadığı akışlarda kullanılır. Yapılacak olan analizlerde akış hızı düşük olduğundan ve sıkıştırılabilirlik etkisi hemen hemen hiç olmadığından dolayı Segregated Solver algoritması ile çözümlemeye karar verilmiştir. FLUENT'te Segregated Solver algoritması ile bir analizin gerçekleştirebilmesi için "Define/Solver" menüsünden "Pressure Based" seçeneğini seçmek gerekir (Density Based seçeneğini seçtiğimiz taktirde program Coupled Solver algoritması ile çözümlemeyi gerçekleştirecektir).

Çözümleme stratejisinin devamında, ağ çözümleme metodu olarak kapalı (implicit) seçilmiştir. Bilindiği gibi bir ısı ve akış analizinin yapılabilmesi için çok sayıda diferansiyel denklem ve entegralin çözümlemesine ihtiyaç duyulacaktır. Sayısal çözümlemelerde diferansiyel denklemlerin ve entegrallerin çözümü için sonlu fark yöntemlerinden yararlanılır. Sonlu farkla çözümleme metodunda iki yöntem kullanılabilir, 1-Kapalı (implicit), 2-Açık (explicit). Açık çözümlemesinde değeri bilinen 3 düğüm yardımı ile değeri bilinmeyen bir düğümün değeri hesaplanır (Şekil

3.7). Kapalı metodunda ise değeri bilinen 1 düğüm yadımı ile değeri bilinmeyen 3 düğümün değeri hesaplanır (Şekil 3.8).



Şekil 3.7 : Açık çözümleme metodu [16].



Şekil 3.8 : Kapalı çözümleme metodu [16].

Bu metotlarla çözümlemenin her biri bir kaç yöntemle gerçekleşebilir, ki yöntemlerin her biri farklı hata mertebesine sahiptirler (Bu yöntemlerle ilgili detaylı bilgiler [16] numaralı kaynakta mevcuttur). Kapalı çözümleme metodu, açık metoduna göre çok daha hızlı yakınsar ama buna karşılık daha fazla hafıza kullanır.

Yapılan bu HAD analizinde sistemin rejime geldiği durumundaki değerleri bizim için önemli olduğundan çözümlemede, çözümün zamandan bağımsız olmasına yani sürekli hal çözümü, yöntemi seçilmiştir.

Daha öncede anlatıldığı gibi HAD analizlerinde çok önemli rol oynayan faktörlerden biri türbülans çözümüdür. Türbülanslı akışların çözümü için tek bir yöntem mevcut değildir ve akışın fiziğine göre farklı yöntemlerle çözümlemenin gerçekleştirilmesi mümkündür. Bu sebepten dolayı türbülanslı akışların çözümü kolay olmayıp doğru çözüm yönteminin seçilmesi analizin sonucunda çok önem arz etmektedir.

Bu tasarım çalışmasında analizi yapılan bütün akışların, kanal akışı olması ve Reynolds sayısının 2300, kanal akışı laminerden türbülansa geçiş değerinin kat kat

üstünde olmasından dolayı akış tam türbülanslıdır ve çözüm modeli olarak Standard k-ε modeli seçilmiştir.

Bu model türbülanslı çözümlemelerin en basit hali olan 2 denklemli modellemelerin biridir. Bu modelin, güçlü olması, ekonomik olması (CPU kullanımı açısından), ve yüksek hassasiyete sahip olması, çoğu akış ve ısı transferi simülasyonunda kullanılmasına sebep olmuştur. Bu modelleme bir yarı ampirik modellemedir. Bu modelin üzerinde zamanla bazı düzenlemeler yapılmıştır ve sonuçta 3 farklı model ortaya çıkmıştır, 1- Standard, 2- RNG, 3-Realizable [15].

k-ε türbülans çözümü, modelin temelini oluşturan 2 denklemdir. Birincisi, türbülans kinetik enerjisi denklemi (k) ve diğeri ise disipasyon oranı denklemi (ε). Bu modellemede akışkanın tam türbülanslı olduğu farz edilmiştir bu sebepten dolayı bu modelleme sadece tam türbülanslı akışlar için geçerlidir. k, türbülans kinetik enerjisi denklemi ve ε disipasyon oranı aşağıdaki denklemlerin çözümünden elde edilirler [15]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \quad \textbf{(3.1)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad \textbf{(3.2)}$$

Bu denklemlerde, G_k türbülans hız gradyanına bağlı türbülans kinetik enerjisinin üretimini gösteren bir ifadedir ve aşağıdaki denklemden hesaplanır:

$$G_k = -\rho\overline{u_i' u_j'}\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad \textbf{(3.3)}$$

Bu denklemlerde, G_b kaldırma kuvvetinin etkisi altında meydana gelen türbülans kinetik enerjisinin göstergesidir ve aşağıdaki denklemden elde edilir:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t}\frac{\partial T}{\partial x_i} \quad \textbf{(3.4)}$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \quad \textbf{(3.5)}$$

ve,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \textbf{(3.6)}$$

(3.4) numaralı denklemde g yer çekimini gösterir. β ise ısıl genleşme katsayısıdır ve **(3.5)** numaralı denklemden elde edilir. Ayrıca **(3.6)** numaralı ifade de μ_t türbülans viskozitesidir ve denklemde kullanılan C_μ bir sabite eşittir.

(3.1) numaralı türbülans kinetik enerjisi ifadesinde, Y_M çalkantı genleşmesinin bir göstergesidir:

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2 \quad \textbf{(3.7)}$$

Burada M_t türbülans Mach sayısıdır ve aşağıdaki denklemden hesaplanır:

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a}} \quad \textbf{(3.8)}$$

Ayrıca, **(3.2)** disipasyon oranı denkleminde $C_{3\varepsilon}$ FLUENT'te aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right| \quad \textbf{(3.9)}$$

Türbülans kinetik enerjisi ve disipasyon oranı denklemlerinde, diğer terimler yani $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve C_μ sabit değerlerdir ve ayrıca σ_k ve σ_ε terimleri türbülans kinetik enerjisi ve disipasyon oranı denklemlerinin Prandtl sayılarıdır. Bu sabitlerin değerleri aşağıdaki gibidir:

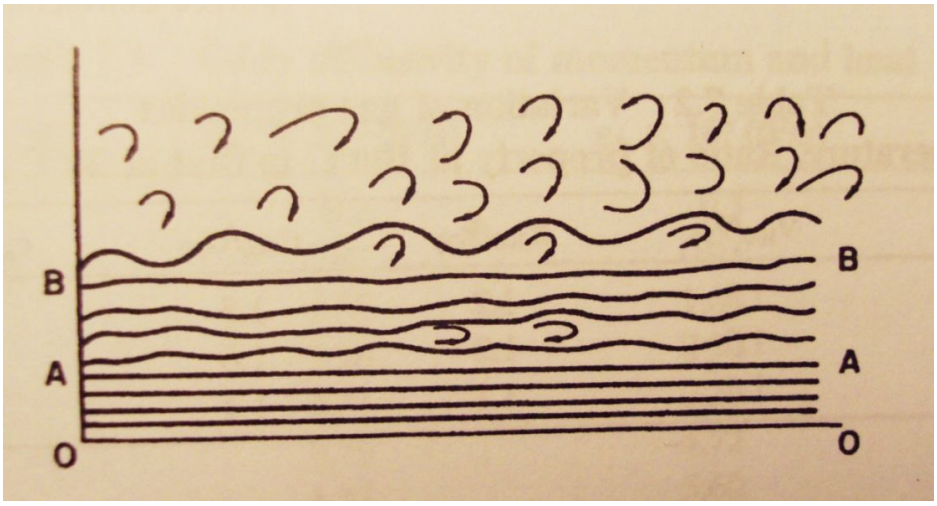
$$C_{1\varepsilon} = 1{,}44 \;\; ; C_{2\varepsilon} = 1{,}92 \;\; ; \;\; C_\mu = 0{,}09 \;\; ; \sigma_k = 1{,}0 \;\; ; \sigma_\varepsilon = 1{,}3$$

Bu sabit değerler, hava ve su kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiştir. Türbülans kinetik enerjisi ve disipasyon oranı denklemlerinde S_k ve S_ε değerleri ise kullanıcı tarafından özel durumlarda eklenebilen değerlerdir [15].

Türbülanslı akışları belirgin bir şekilde etkileyen faktörlerden biri yüzey etkileridir. Bellidir ki akışın ortalama hız değeri yüzeylerdeki kaymama şartının etkisi altında değişecektir. Yüzeye yakın bölgelerde viskozitenin sönüm etkisi altında çalkantılar azalmaya başlar, tam tersine yüzeyden uzaklaşınca, ortalama hız gradyanı artar ve şiddetli çalkantıların ortaya çıkmasına ve türbülans kinetik enerjisinin artışına sebep olur [15].

Yapılan çok sayıda deneysel çalışmanın sonucunda anlaşılmıştır ki türbülanslı bir akışta yüzeye dik yönde akışı 3 bölgeye bölmek mümkündür. 1- Viskoz Alt Tabaka

(viscouse sublayer): Bu bölgede akış laminerdir ve viskoz kuvvetler, ısı, momentum ve kütle aktarımında etkin rol oynamaktadır (Şekil 3.9, O-A). 2- Tam Türbülanslı Bölge (fully turbulent layer): Bu bölge yüzeyden uzak noktalardır ve bu bölgede aktarım olayları, etkin bir şekilde türbülans etkisindedirler. 3- Geçiş Bölgesi (Şekil 3.9, A-B): Bu bölge diğer iki bölgenin arasında yer almakta ve burada viskozite ve türbülansın aktarım üzerinde etkileri eşit derecede önemlidir [11].



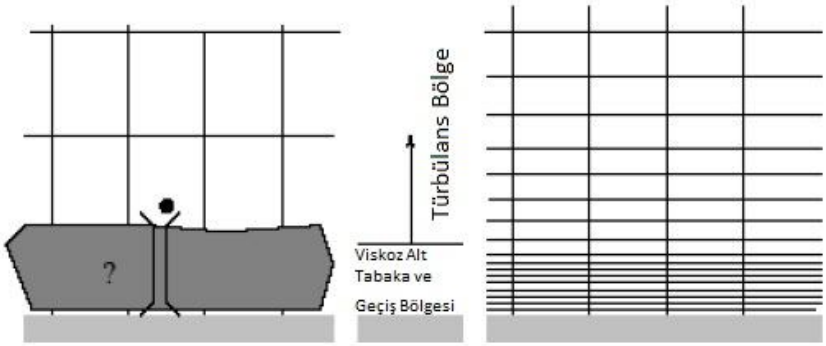
Şekil 3.9 : Türbülanslı akış bölgeleri [11].

Türbülanslı bir akışta hangi bölgenin yüzeyden ne kadar mesafede olduğunu hesaplayabilmek için boyutsuz bir sayı olan yüzey koordinatının normali y^+ ifadesinden yararlanır.

$$y^+ = y \frac{\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}}{\nu} \qquad \textbf{(3.10)}$$

Eğer $y^+ < 5$ ise viskoz alt tabaka, eğer $5 < y^+ < 30$ ise geçiş bölgesi ve eğer $y^+ > 30$ ise tam türbülanslı bölge anlamına gelir [11].

Yüzeye yakın bölgelerin çözümü için genel olarak iki yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntemde yüzeye yakın bölgeler, kısmen ampirik olan ve yüzey fonksiyonları (wall functions) diye adlandırılan fonksiyonlar tarafından çözülmektedir. Bu yaklaşımda yüzeye yakın bölgelerde yüksek hassasiyetli ağlara ihtiyaç yoktur, çünkü bu bölgelerin türbülanslı bölge üzerindeki etkisi direk fonksiyonlar tarafından hesaplanır (Şekil 3.10a). İkinci yöntemde yüzeye yakın bölgeler normal bir şekilde çözümlenir (near wall modeling) ve bu sebepten dolayı bu yaklaşımda yüzeye yakın bölgelerde çok yüksek hassasiyetli ağların oluşturulması gerekmektedir (Şekil 3.10b).



a) Yüzey fonksiyonu yaklaşımı b) Yüzey modelleme yaklaşımı

Şekil 3.10 : Yüzeye yakın bölgelerin çözümleme yöntemleri [15].

Yüzey fonksiyonu yöntemi daha ekonomik (CPU kullanımı açısından) ve daha hassas olmasından dolayı daha çok tercih edilir. Yapılan analizlerde yüzey fonksiyonu yaklaşımı ile çözümlemeleri yapan "Standard Wall Functions" tercih edilmiştir.

FLUENT'te çözümleme stratejisinin devamında, sınır şartlarının değerleri belirlenmiştir. Bu çalışmada dört farklı sınır koşulu kullanıldı. Akışkanın kanala giriş yüzeyinde "hız giriş koşulu", akışkanın kanaldan çıkış yüzeyi için "çıkışta basınç", ara yüzeylerde "ara yüz" ve dış yüzeyler için "duvar" koşulları kullanıldı.

Çözümleme işleminde, analiz yapma hızını ve yakınsama süresini etkileyen diğer bir faktör ayrıklaştırma yöntemidir. Yapılan analizlerde daha ekonomik olan (CPU kullanımı açısından) ama bir az daha geç yakınsayan ayrıklaştırma yöntemi olan "First Order Upwind" yöntemi seçilmiştir.

Yapılan analizlerin karmaşık bir geometride gerçekleşmesi ve analizleri yapılan geometrilerde çok sayıda ağ hücresinin mevcut olmasından dolayı, analizlerin normal bilgisayarlarda koşturulması imkansız hale gelmiştir. Bu sebepten dolayı yapılan analizlerin koşturma aşaması İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsünde mevcut olan yüksek başarımlı bilgisayarlar yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

4. MOTOR SOĞUTUCU TASARIMI

4.1 Giriş

Yapılan literatür araştırmalarında, BLDC elektrikli motorların soğutulması için farklı yöntemler bulundu. Genel olarak bütün tasarımlarda elektrikli motoru soğutan parça bir gömlek şeklinde elektrikli motorun etrafına sarılmıştır ve soğutucu akışkan (su) bu gömlekte açılan kanallarda dolaşırken, motorun soğutulmasını sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında tasarlanmış olan elektrikli motorda stator, yani sabit parçanın, motorun dış kısmında yer alması ve ısının büyük ölçüde statorda üretilmesi dolaysıyla, bu tarz gömlekler tasarımımıza uygundur.

Çalışmaların ilk aşamasında, literatürdeki farklı kanal tasarımlarını göz önünde bulundurarak, yeni kanalların tasarımı yapıldı. Yapılmış olan bu farklı tasarımlarda projenin verileri yani, motorun ürettiği ısı miktarı, motor boyutları, optimum çalışma sıcaklığı vs. göz önüne bulundurulurken diğer yandan hedeflediğimiz genel kriterler yani, minimum basınç düşüşü, maksimum ısı aktarımı gibi konular dikkate alındı. Yapılan bu çalışmaların sonucunda üç farklı tip soğutucu gömleğin analizine karar verildi. Bu tasarımlara, kanalın aldığı geometrik şekil göz önünde bulundurularak, 1-Serpantin, 2-Manifold, 3-Helisel, adları verildi.

Yapılan tasarımlarda, akışkanlar mekaniği ve ısı geçişinin genel kuralları göz önüne bulundurarak projenin hedefi olan minimum basınç düşüşü ve maksimum ısı geçiş performansı kriterlerinin sağlanmasına çaba gösterildi.

Daha önce de anlatıldığı gibi bu çalışmanın analizleri FLUENT paket programı yardımı ile yapıldı. Yapılan analizlerde her tasarımı diğer tasarımlarla doğru bir şekilde kıyaslayabilmek için, bütün analizlerde eşit sınır şartları kullanıldı. Bu şekilde sonuçlar elde edildiğinde kolay bir şekilde tasarımların birbiri ile kıyaslanma şansı sağlanmış oldu.

Yapılan HAD analiz çalışmalarında motorun her zaman maksimum güçte çalışmadığı ve ayrıca çevre sıcaklığın da her zaman sabit kalmadığı, gerçeklerini göz önünde bulundurularak, sistemin verimini arttırmak amacıyla, bütün analizler 4 farklı

soğutma suyu debisi ile yapıldı. Bu şekilde elde edilen sonuçlar aracılığyla, motorun farklı çalışma koşulları için farklı debilerle çalışabilme imkanı incelenmiş olur. Bu hedef kapsamında bütün tasarımlar için analizler 4,8,12 ve 16 L./dak. debileri için yapıldı. Çizelge 4.1'de bütün analizler için kabul edilen sınır koşulları verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Analizlerde kullanılan sınır koşulları.

Sınır Koşulu	Değer
Motorun etrafındaki hava sıcaklığı	50 °C
Motorun etrafındaki hava ısı taşınım katsayısı	5 W/m^2 K
Soğutucu akışkanın kanal giriş sıcaklığı	55 °C
Soğutucu akışkan türbülans şiddeti	%5
Soğutucu akışkan kanal çıkış basıncı	101325 Pa
Bakır sarımların ürettiği ısı akısı	2929,13 W/m^2
Birim stator hacminde üretilen ısı	787928,3 W/m^3

Genel analizlere başlamadan önce bölüm 3.2'de anlatıldığı gibi sonuçların ağdan bağımsızlığı konusu araştırıldı. Bu kapsamda bir tasarım için (3,5 tur helisel) bütün sınır koşulları sabit kaldığı durumunda sadece ağ sıklığı değiştirilerek 5 analiz yapıldı. Bu analizlerin sonuçları Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2 : Sonuçların ağdan bağımsızlığı araştırması.

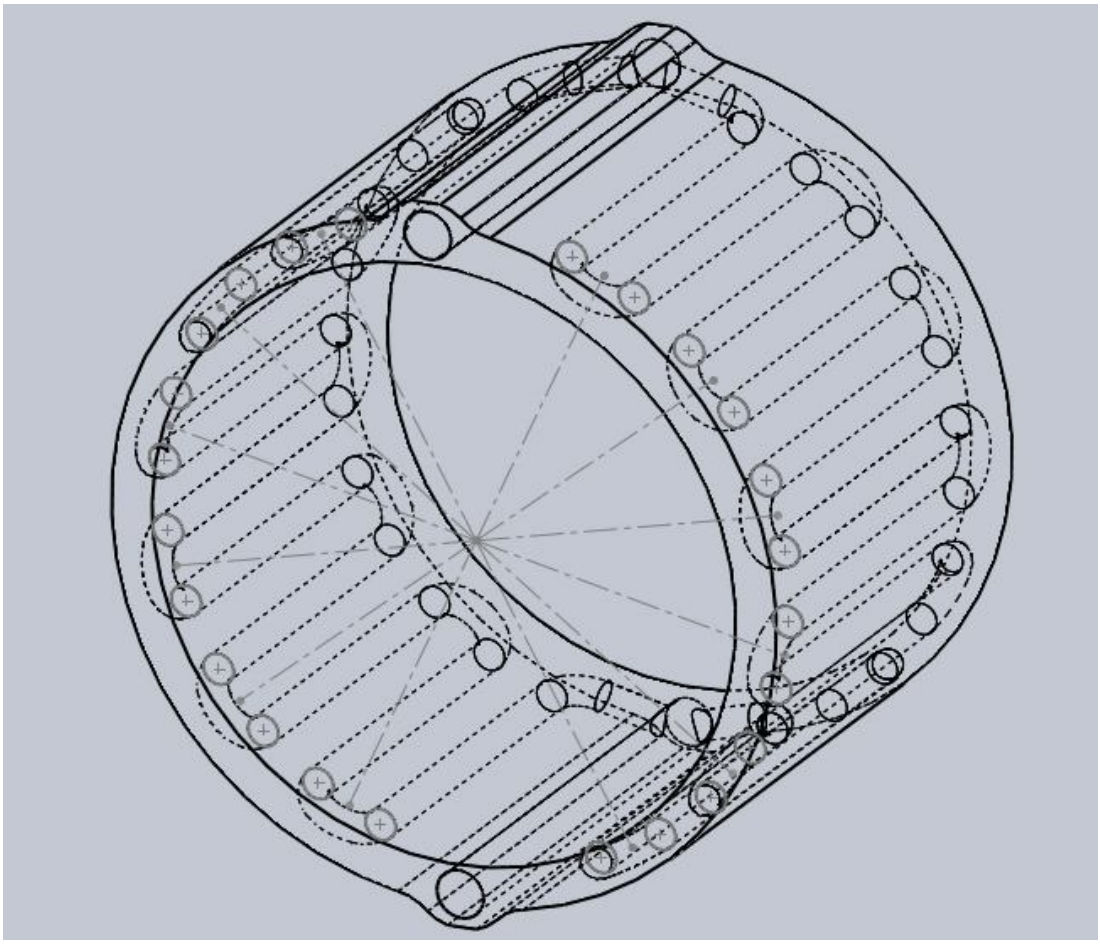
No.	Hücre sayısı	Su giriş çıkış sıcaklık farkı (°C)	Bir önceki durumla olan fark	Su giriş çıkış basınç farkı (Pa)	Bir önceki durumla olan fark	Ortalama stator sıcaklığı (°C)	Bir önceki durumla olan fark
Durum1	2.407.969	3,85	-	1080,34	-	83,96	-
Durum2	5.884.032	4,34	%11,31	1190,65	%0,09	85,55	%1,87
Durum3	7.596.536	4,54	%4,28	1221,63	%0,02	85,60	%0,06
Durum4	11.895.928	4,73	%4,05	1483,02	%0,18	85,75	%0,17
Durum5	14.213.130	4,73	%0,001	1483,02	%0	85,75	%0,00005

Çizelge 4.22'de görüldüğü gibi ağ kalitesi üstten aşaığıya doğru artmaktadır. Bu işlemin sonucunda her aşamanın bir önceki durumu ile olan farkının azaldığı görülmektedir. Yapılan analizler sonucunda bilgisayar hafıza kullanım durumunu göz önüne bulundurarak dördüncü durumun ağ kalitesi ile analizlerin yapılmasına karar verildi.

4.2 Serpantin Modeli

Soğutma gömleğinde kullanılan kanal konfigürasiyonlarından biri serpantindir. Bu tip kanalda soğutucu akışkan (su) gömleğin üst kısmında gömleğin derinliğine açılmış olan bir daire kesitli kanaldan gömleğin içine girmektedir. Soğutucu akışkan açılmış olan bu kanalın sonunda ikiye bölünerek, bir kısmı sağ tarafta açılmış olan

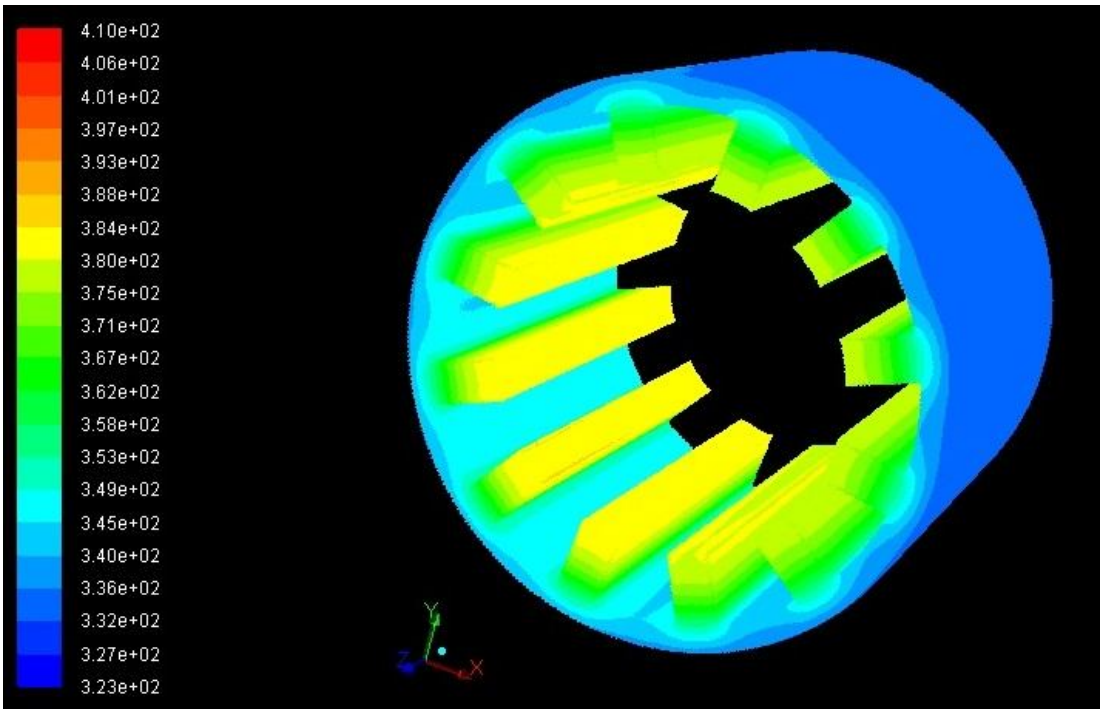
kanala akarken diğer kısmı ise sol tarafta açılmış olan kanala akmaktadır. Sağ ve sol tarafta açılmış olan bu yeni kanallar yine daire kesitli olup, kesit alanı ilk kanalın yarısı kadardır (Şekil 4.1). Bu şekilde soğutucu akışkan ikiye bölündükten sonra ani hız değişimine uğramadan bu iki kanalda akışına devam edecektir.



Şekil 4.1 : Serpantin modeli geometrisi.

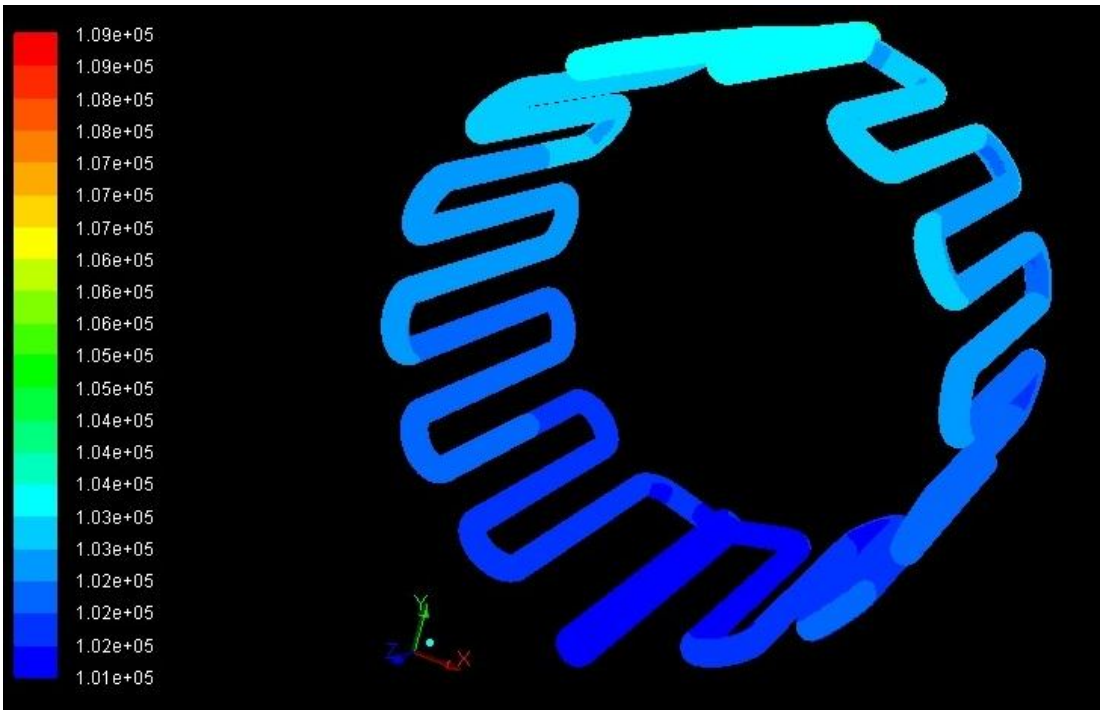
Sağ ve sol taraf olarak ikiye bölünen akış, U dönüşleri yaparak serpantin şeklinde olan kanallarda akıp bütün statorun dış yüzeyini yaladıktan sonra gömleğin alt kısmında tekrar birleşip geometri olarak giriş kanalına benzeyen bir kanaldan akıp gömlekten çıkmaktadır.

Bu tasarımda soğutucu gömlek elektrikli motorun dış yüzeyini tamamen örttüğü için sıcaklık dağılımı nispeten homojendir, sadece soğuk akışkanın üst taraftan kanala giriş yapıp aşağıya doğru hareket edip ısınmasından dolayı motorun alt kısmında sıcaklık üst kısmına göre daha fazladır (Şekil 4.2).



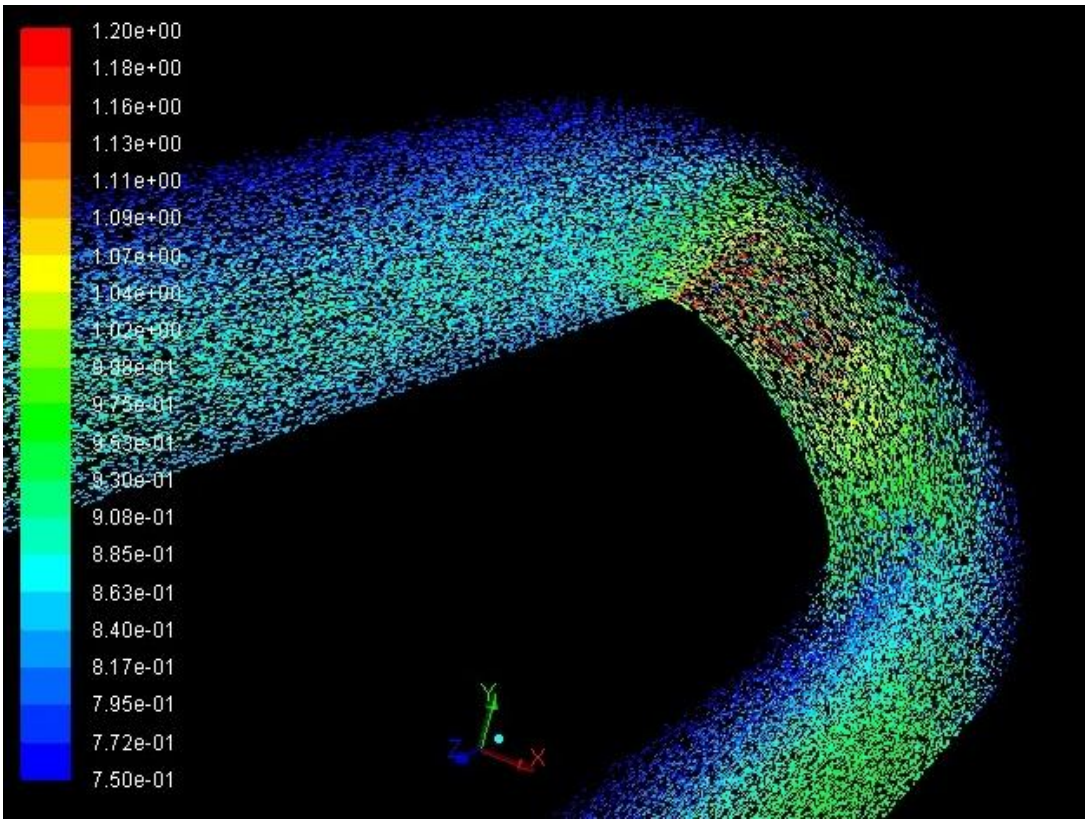
Şekil 4.2 : Serpantin modeli 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı.

Bu tarz bir kanalda akış açısından sorun yaratan en önemli bölge U dönüşü bölgeleridir. Bu bölgelerde akışın çok hızlı bir şekilde yön değiştirmesinden dolayı basınç düşüşü birden artış göstermektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 : Serpantin modeli 8 L/dak. akış için basınç [Pa] dağılımı.

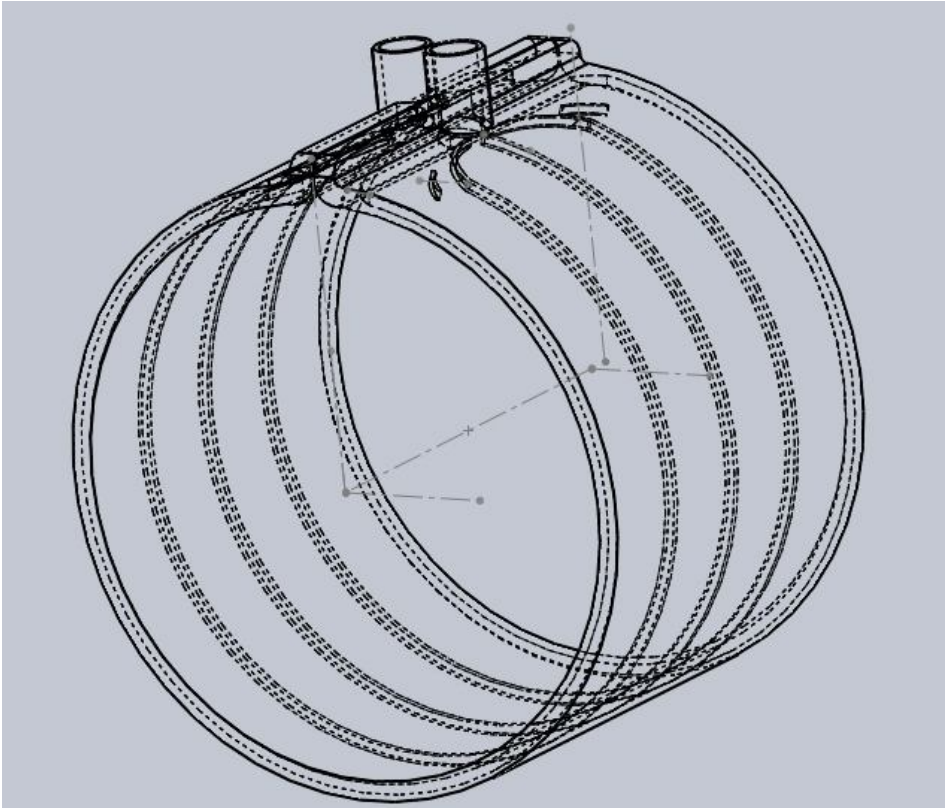
Ayrıca dönüş bölgelerinde bazı alanlarda ölü bölgelerin oluşumu, yani akış hareketinin olmadığı bölgelerin var olduğu görülmüştür ve benzer şekilde bazı alanlarda akış kopmalarının olduğu gözlenmektedir (Şekil 4.4). Bu tasarım ile ilgili 4, 12 ve 16 L/dak. debili akış durumları için stator sıcaklık dağılımı Ek A Şekil A.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.4 : Serpantin modeli 8 L/dak. akış için hız [m/s] dağılımı.

4.3 Manifold Modeli

Elektrikli motoru saran gömlek üzerinde tasarlanan başka bir kanal modeli manifoldlu modeldir. Bu kanalda soğutucu akışkan gömleğin dış çevresinin üzerinde açılan bir daire kesitli kanaldan gömleğin içine girmektedir. Gömleğin içinde manifolda benzeyen bir şekilde kanal dörde bölünmektedir. Soğutucu akışkan bölünen bu kanallarda akıp motorun dış çevresinde bir tur attıktan sonra tekrar manifold yapılı bir geometri yardımı ile toparlanmaktadır. Toparlanan akış girişteki daire kesitli kanala benzer ve aynı çapa sahip bir kanal yoluyla gömlekten çıkmaktadır (Şekil 4.5).

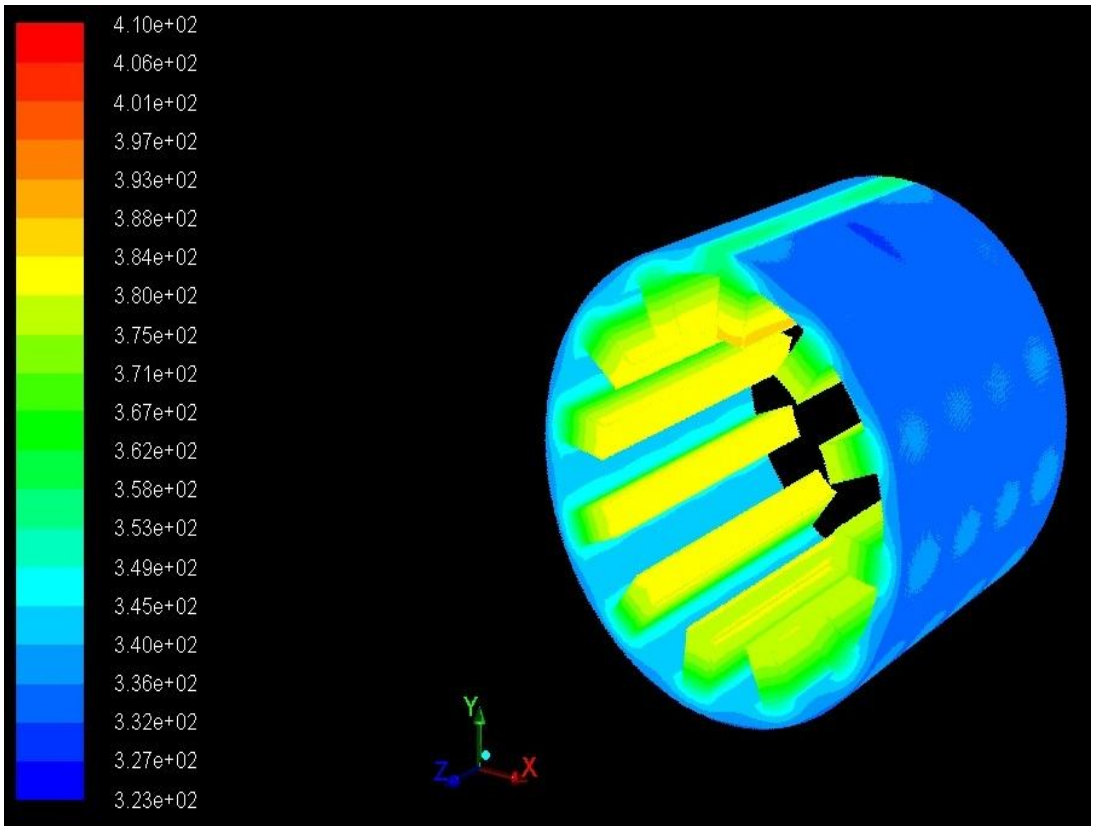


Şekil 4.5 : Manifold modeli geometrisi.

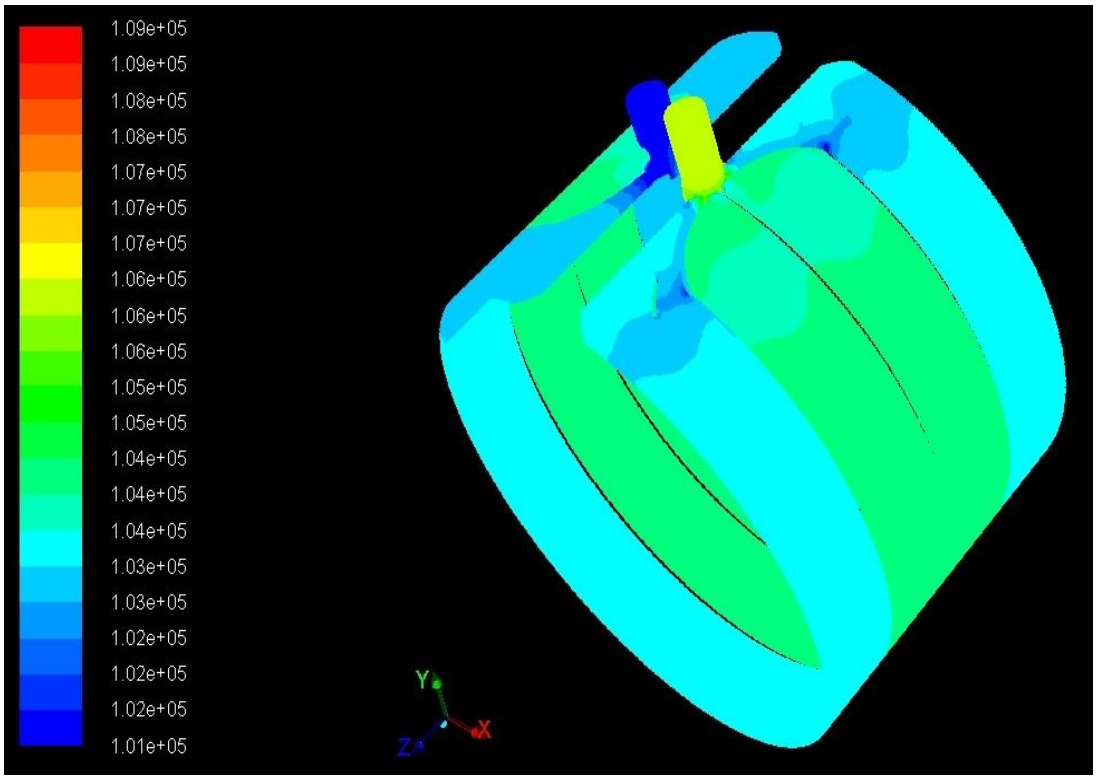
Şekil 4.5'te de görüldüğü gibi akışkanın bütün açılan kanallarda eşit bir şekilde dağılabilmesi için iki uçta yer alan kanaların girişine akış yönlendiricileri yerleştirilmiştir. Bu yönlendiriciler sayesinde giren akışkanın sadece orta kanallarda değil bütün kanallarda yaklaşık eşit debiyle dolaşması sağlanmaktadır.

Bu tasarımda soğutucu akışkanın motorun bir tarafından gömleğe girip ısınarak diğer taraftan çıkmasından dolayı elektrikli motorun sağ ve sol tarafındaki sıcaklıklar farklıdır. Eğer soğutucu akışkanın saat yönünde dolaştığını düşünürsek Şekil 4.6'da görüldüğü gibi motorun sol tarafı sağ tarafından daha sıcak olacaktır.

Bu tasarımın serpantin tasarımına göre avantajı U dönüşlerinin olmamasıdır. Bu sebepten dolayı bu tasarımda ani basınç düşüşleri ortaya çıkmamaktadır. Bu tasarımda gömleğe giren akışkanın birden dörde bölünmesinden ve kullanılan debilerin nispeten düşük olmasından dolayı kanallarda hız birden düşmektedir. Tasarımı yaparken hızın fazlası ile düşmesini engellemek için kanal yükseklikleri düşürülmüş bu şekilde ani hız düşümü engellenmiştir. Bu tasarımda çıkış manifoldunda girişin tam tersine hızın birden artış göstermesi çıkışta basınç düşüşünün birden artmasına sebep olmuştur (Şekil 4.7).

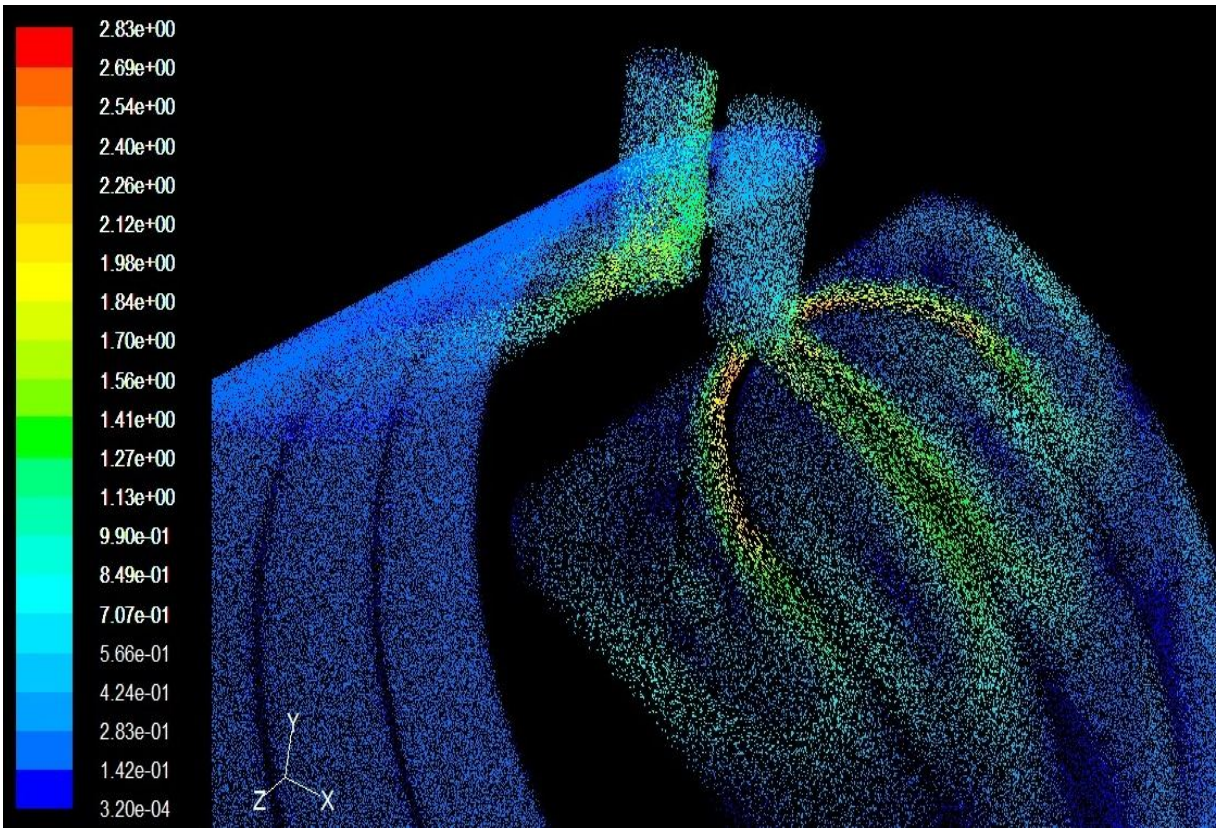


Şekil 4.6 : Manifold modeli 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı.



Şekil 4.7 : Manifold modeli 8 L/dak. akış için basınç [Pa] dağılımı.

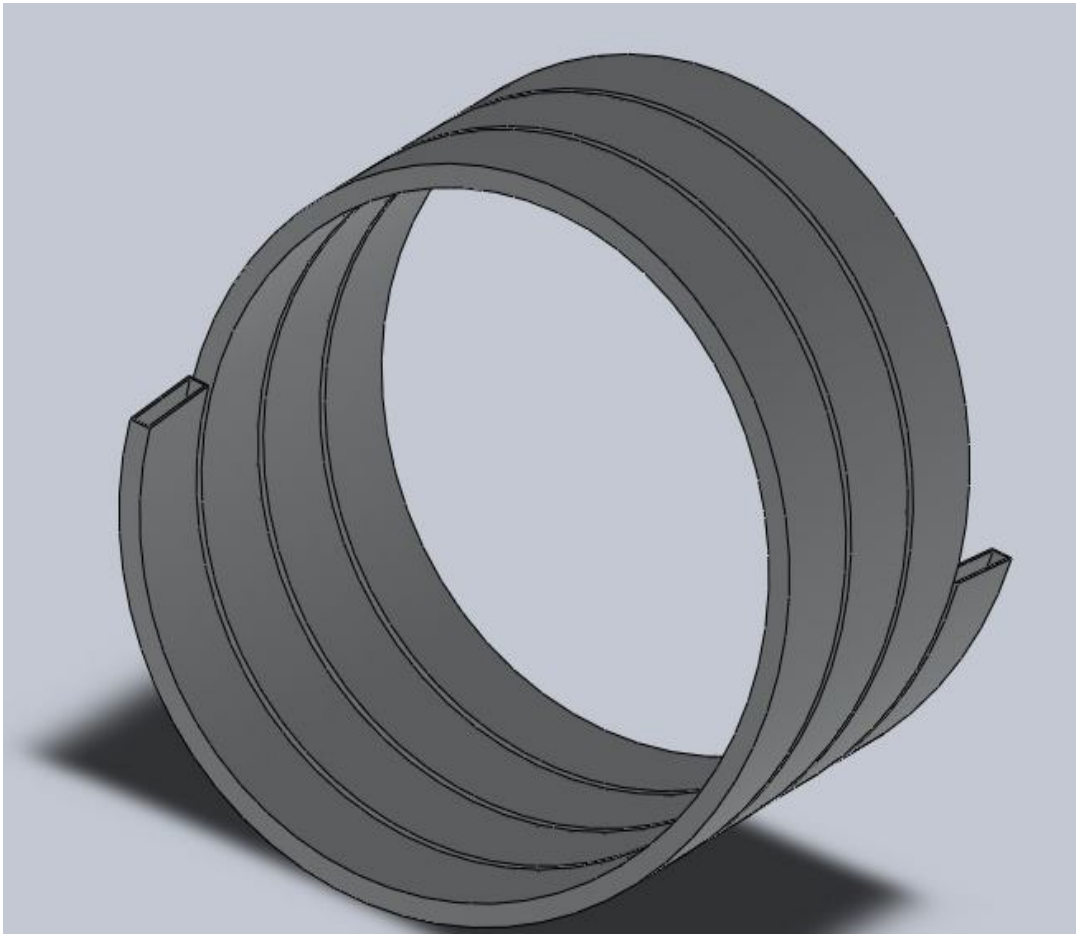
Manifold modeli tasarımında sorun yaratan başka bir problem ise giriş ve çıkış manifoldlarındaki ön ve arka kısımlarda ortaya çıkan ölü bölgelerdir. Bu tasarımda da akış yönlendiricileri yardımı ile bu bölgelerin ortaya çıkması engellendi (Şekil 4.8). Bu tasarım ile ilgili 4, 12 ve 16 L/dak. debili akış durumları için stator sıcaklık dağılımı Ek A Şekil A.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.8 : Manifold modeli 8 L/dak. akış için hız [m/s] dağılımı.

4.4 Helisel Model

Bu tasarım çalışmasının koşullarına uyum gösteren başka bir soğutucu gömlek modeli helisel modeldir. Bu modelde dikdörtgen kesitli olan bir kanal bir yay gibi, 4 derecelik bir helis açısı ile elektrikli motorun etrafında sarılmıştır (Şekil 4.9). Bu şekilde soğutucu akışkan elektrikli motorun dışında ve ön tarafından yer alan kanalın girişinden akıp helisel bir şekilde elektrikli motorun etrafında dönerek motorun sonunda yer alan kanalın sonundan, çıkmaktadır. Bu tasarıma ait analiz sonuçlarının önceki diğer iki tasarımla kolay bir şekilde kıyaslanabilmesi amacıyla kanalın girişindeki dikdörtgen kesitin alanı diğer iki tasarımın alanı ile eşittir. Bu şekilde aynı debilerle kanala giriş yapan akışkanlar aynı hıza sahip olacaklardır.

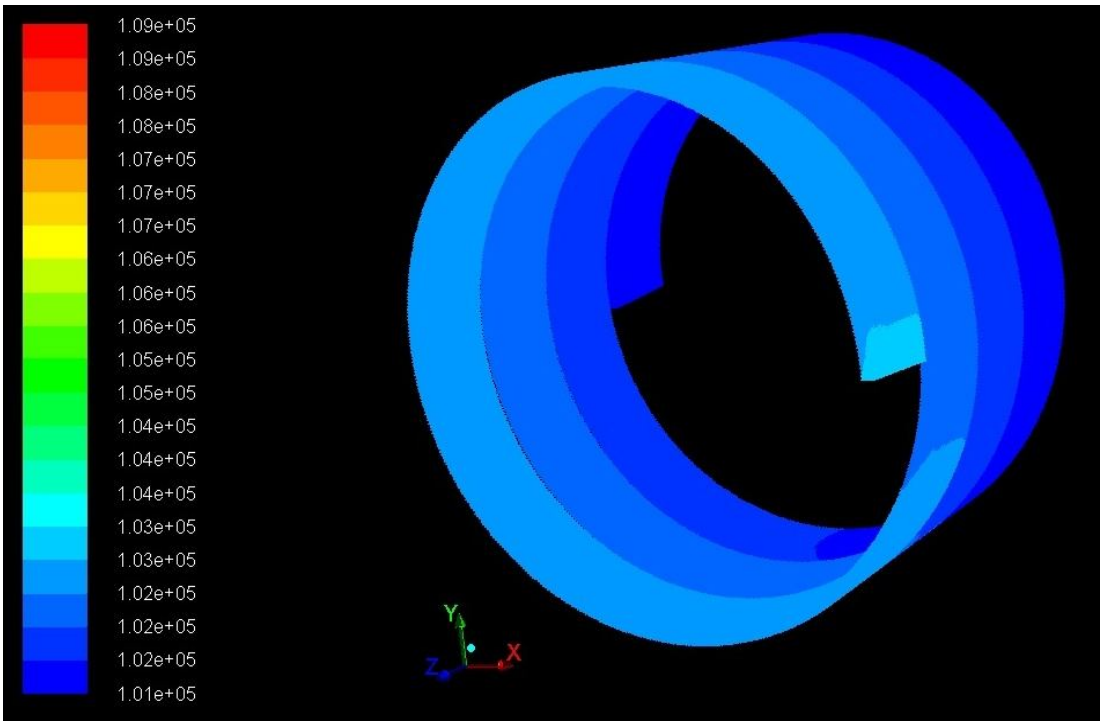


Şekil 4.9 : Helisel modeli geometrisi.

Bu kanalın tasarımını yaparken birkaç farklı alt konfigürasyonun analizi yapıldı. Analizler aşağıdaki bölümlerde tek tek sunulmuştur.

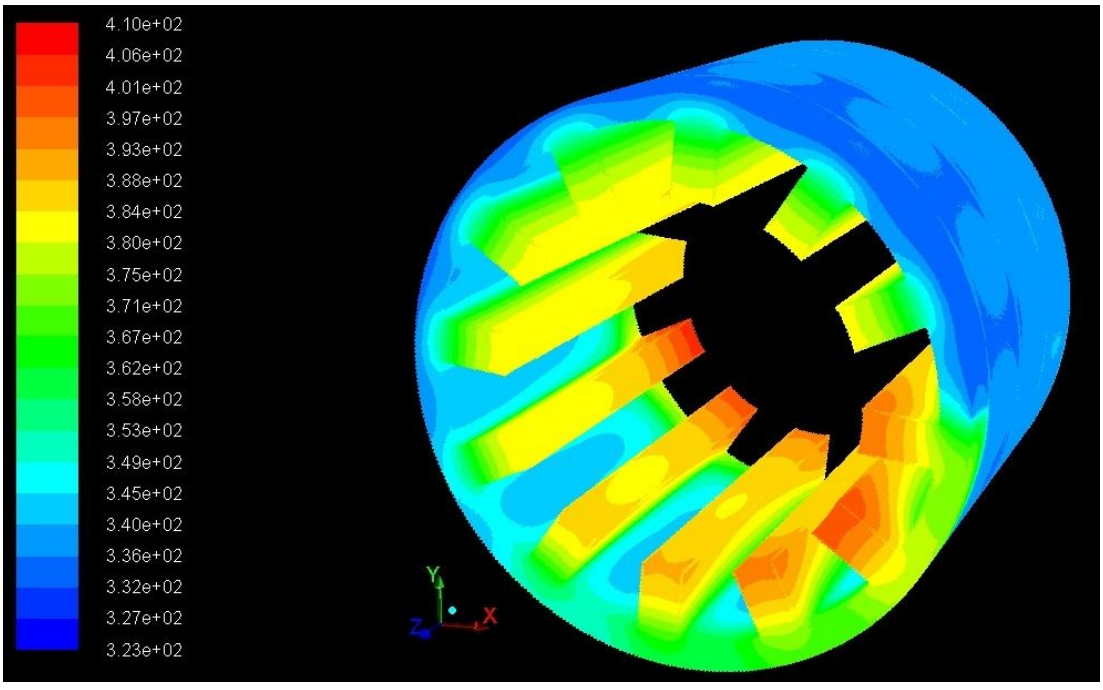
4.5 Helisel $3\frac{1}{2}$ Tur

Helisel gömlek tasarımında yapılan ilk analiz daha önce de anlatılan dikdörtgen kesitli kanalın elektrikli motor etrafında $3\frac{1}{2}$ tur sarılmasından meydana gelen tasarım idi. Bu tasarımda kanal uzunluğunun daha fazla basınç düşüşüne sebep olacağı gerçeği göz önünde bulundurularak mümkün olan en kısa kanal tasarlanmıştır. Bu tasarımda serpantin tasarımı gibi ani dönüşlerin olmamasından dolayı basınç düşüşü oldukça azdır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 : $3\frac{1}{2}$ tur helisel modeli 8 L/dak. akış için basınç [Pa] dağılımı.

Helisel kanal elektrikli motorun dış çevresini tamamen sarmadığı için statorda homojen bir sıcaklık dağılımı ortaya çıkmamaktadır (Şekil 4.11).



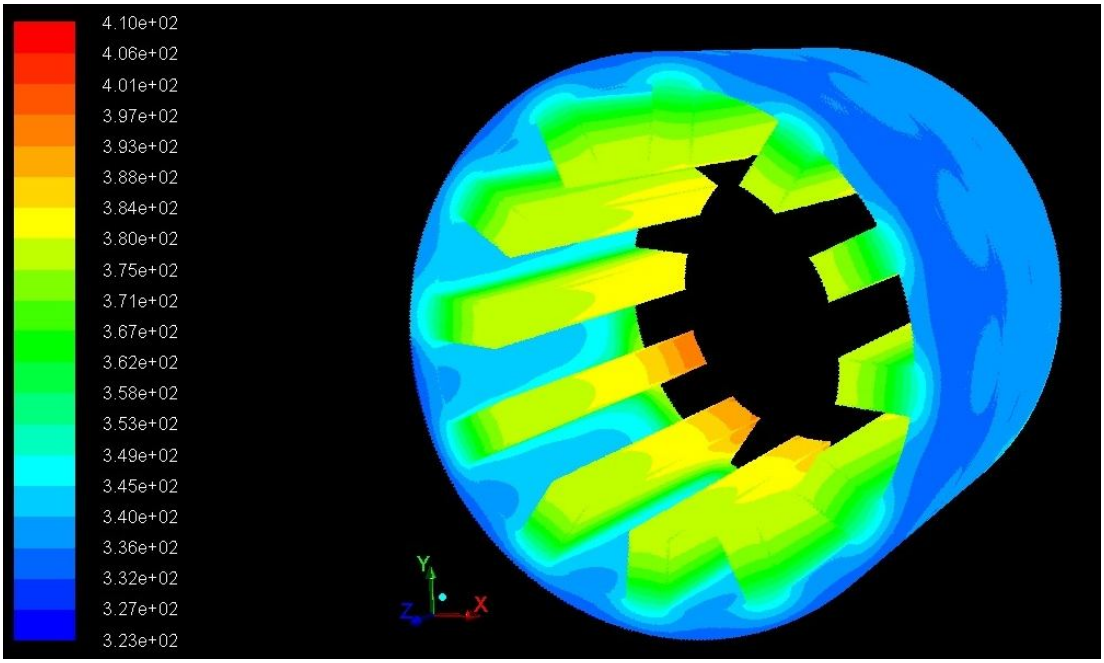
Şekil 4.11 : $3\frac{1}{2}$ tur helisel modeli 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı.

Şekil 4.11'de görüldüğü gibi statorun ön ve arkasında, kanalın örtmediği alanlarda, sıcak noktalar ortaya çıkmıştır. Bu sıcak bölgelerin oluşumunu önlemek için, biraz

daha basınç düşüşü göze alınarak bulundurarak daha uzun bir kanalın analizinin yapılmasına karar verildi. Yapılan bir sonraki analizde aynı geometriye sahip ancak motor çevresinde 4 tam tur atan bir kanalın analizleri yapıldı. Helisel $3\frac{1}{2}$ tur tasarımı ile ilgili 4, 12 ve 16 L/dak. debili akış durumları için stator sıcaklık dağılımı Ek A Şekil A.3'te sunulmuştur.

4.6 Helisel 4 Tur

Bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi $3\frac{1}{2}$ tur helisel tasarımında istenmeyen sıcak bölgelerin ortaya çıkmasından dolayı yeni analizlerin elektrikli motor etrafında 4 tur sarılmış helisel bir kanal ile yapılmasına karar verildi. Bu kanalın analizinde verilen bütün sınır koşulları $3\frac{1}{2}$ sarılmış kanal koşulları gibi idi. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki basınç düşüşünde, analizi yapılan bütün debiler için, %10-%15 gibi bir artış görülmektedir. Buna karşılık ortalama stator sıcaklığında %0,4-%0,95 düşüş ortaya çıkmıştır. Bu tasarımda Şekil 4.12'de görüldüğü gibi statorda daha homojen bir sıcaklık dağılımı görülmektedir. Ama azda olsa sıcaklığı homojen olmayan bölgelerin ise görülmektedir.



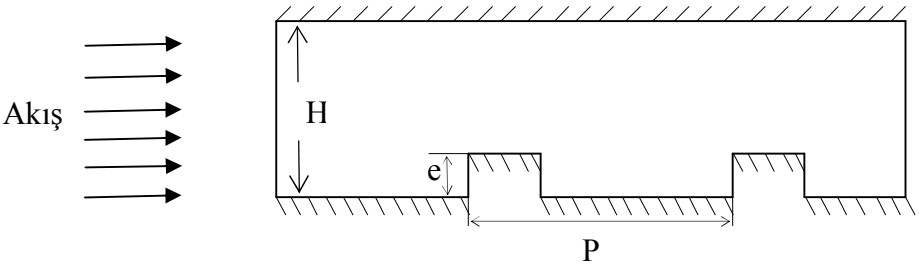
Şekil 4.12 : 4 tur helisel modeli 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı.

Bu iki analizin sonuçları karşılaştırıldığında kanal uzunluğunun basınç düşüşü üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Helisel 4 tur tasarımında ortaya çıkan birkaç

ufak sıcak bölgenin giderilmesi için gerekirse tasarımın son aşamasında kanal uzunluğunun arttırılması yoluyla bu bölgelerin yok edilmesi mümkündür. Helisel 4 tur tasarımı ile ilgili 4, 12 ve 16 L/dak. debili akış durumları için stator sıcaklık dağılımları Ek A Şekil A.4'te sunulmuştur.

4.7 Helisel 4 Tur Tümsekli

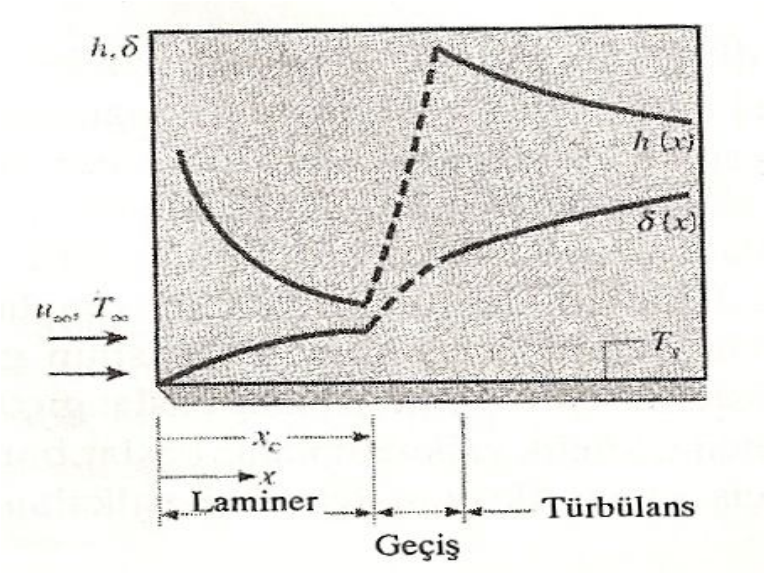
Helisel tasarımının analiz sonuçlarını incelerken, anlaşıldı ki bu tasarımda basınç düşüşünün diğer tasarımlara göre daha az olmasına rağmen bu tasarım, ısı geçişi performansı açısından çok iyi değildir. Bu sebepten dolayı literatür araştırmalarında da görülen ve kanal içi akışlarda ısı geçiş performansını arttıran elemanların kanal boyunca yerleştirilmesine karar verildi. Kanal içi akışlarda ısı geçiş performansını arttırabilen elemanlar farklı geometrilere sahip olabilirler. Bu elemanların genel amacı akışı rahatsız edip genel türbülans seviyesini arttırmaktır. Elemanların etkisi altında sınır tabaka kalınlaşmasına fırsat verilmez. Bu çalışmada dikdörtgen kesitli olan akış bozucu elemanların kanal boyunca yerleştirilmesine karar verilmiştir (Şekil 4.13). Bu akış bozucuların basınç düşüşü artışına sebep olacakları bilinmektedir ama iyi bir ısı geçişi performansı sağladığı taktirde debinin azalması ile bu basınç düşüşünü telafi etmek mümkün olabilir.



Şekil 4.13 : Tümsekli kanal şematik gösterimi.

Şekil 4.13'te de gösterildiği gibi helisel kanal boyunca, belli mesafelerde (P) ve belli yükseklikle (e) sahip akış bozucu elemanlar yerleştirilmiştir. Bu elemanlar iki şekilde ısı geçişinin artmasını sağlayabilirler, 1- Her akış ayrılmasında yeni bir sınır tabaka oluşturarak. 2-Türbülans yaratarak. Akış kanal boyunca bu geometrilerle karşılaşınca, geometrinin üst yüzeyinde yeni bir sınır tabakanın ve laminer olan bir akışın şekillenmesine sebep olur. Şekil 4.14'te verilen eğriden de anlaşıldığı gibi bir akışta laminer bölgenin başlangıcında çok yüksek mertebeli bir ısı taşınımı mevcuttur. Daha sonra akışın gelişmesi ile birlikte ısı taşınım katsayısı hızlı bir

şekilde azalmaktadır. Sonra tekrar akışın türbülansa girmesi ile birlikte ısı taşınım katsayısı artmaktadır.



Şekil 4.14 : Akışın gelişmesi ile ısı taşınım katsayısının değişimi [12].

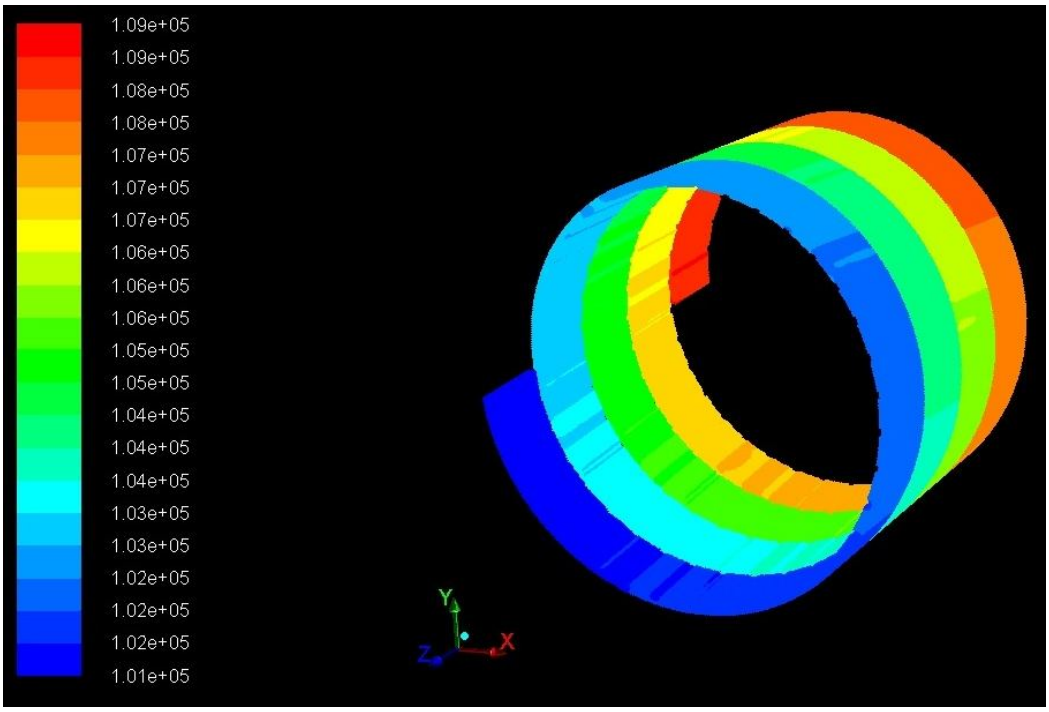
Sonuç olarak bu akış bozucu elemanlar yardımıyla, 1-Sürekli yeni sınır tabakaların oluşturulması ile laminer akışın başlangıcında gerçekleşen yüksek ısı taşınım katsayısından yararlanmış olunur. 2-Kanal boyunca akışı göz önüne bulundurduğumuz taktirde, bu akış bozucular yardımı ile akışın türbülans yoğunluğu artar. Dolaysıyla, bu bölgelerdeki yüksek ısı taşınım katsayılarından yararlanılır.

Analizlerin bu aşamasında daha önce literatürde yapılan analizleri göz önünde bulundurarak bozucular arasındaki mesafeyi (P) ve bozucu yüksekliğini (e) değiştirerek dört farklı tasarımın analizi yapıldı.

4.7.1 Helisel 4 tur tümsekli birinci konfigürasyon

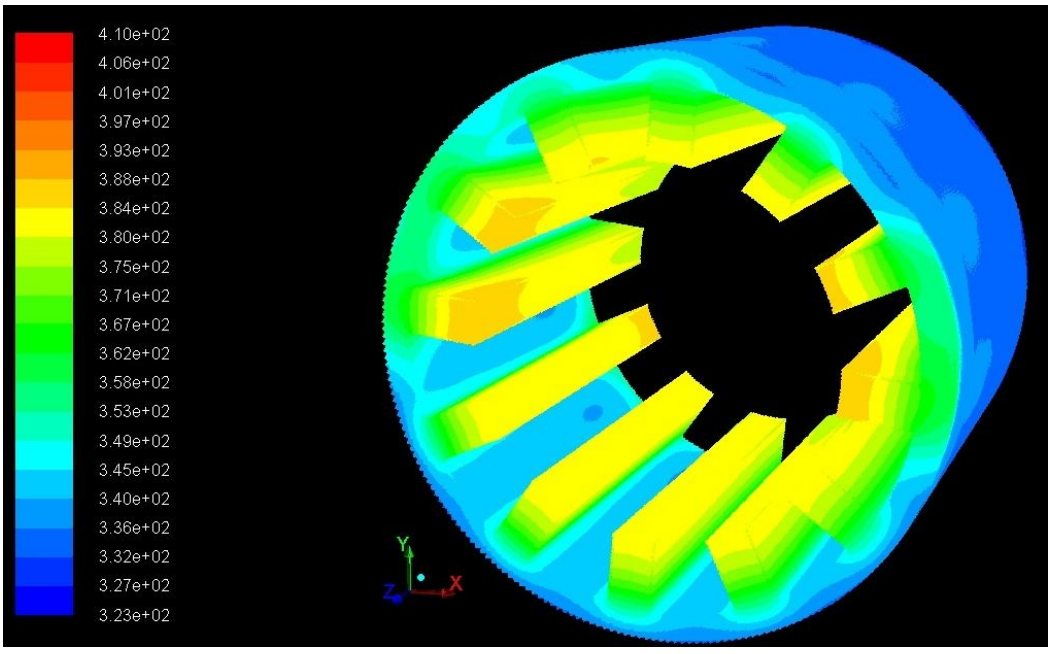
Bu analizde akış bozucusunun yüksekliğinin, toplam kanal yüksekliğine olan oranı %20 olarak alındı (e/H=0,2). Ayrıca bozucular arasındaki adımın, akış bozucu yüksekliğine olan oranı ise 15 alındı (P/e=15).

Bu analizlerde daha önce de beklendiği gibi basınç düşüşü çok artmaktadır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 : Helisel 4 tur tümsekli 1. konfigürasyon basınç [Pa] düşüşü.

Analiz sonuçlarının incelemesinde anlaşılmıştır ki akış bozucuların olmadığı 4 tur helisel konfigürasyonuna göre basınç düşüşü 1,5 kat ile 5 kat arasında artış göstermesine rağmen ortalama stator sıcaklığında %1 ile %4 arasında bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.16). Helisel 4 tur tasarımı ile ilgili 4, 12 ve 16 L/dak. debili akış durumları için stator sıcaklık dağılımı Ek A Şekil A.5'te sunulmuştur.

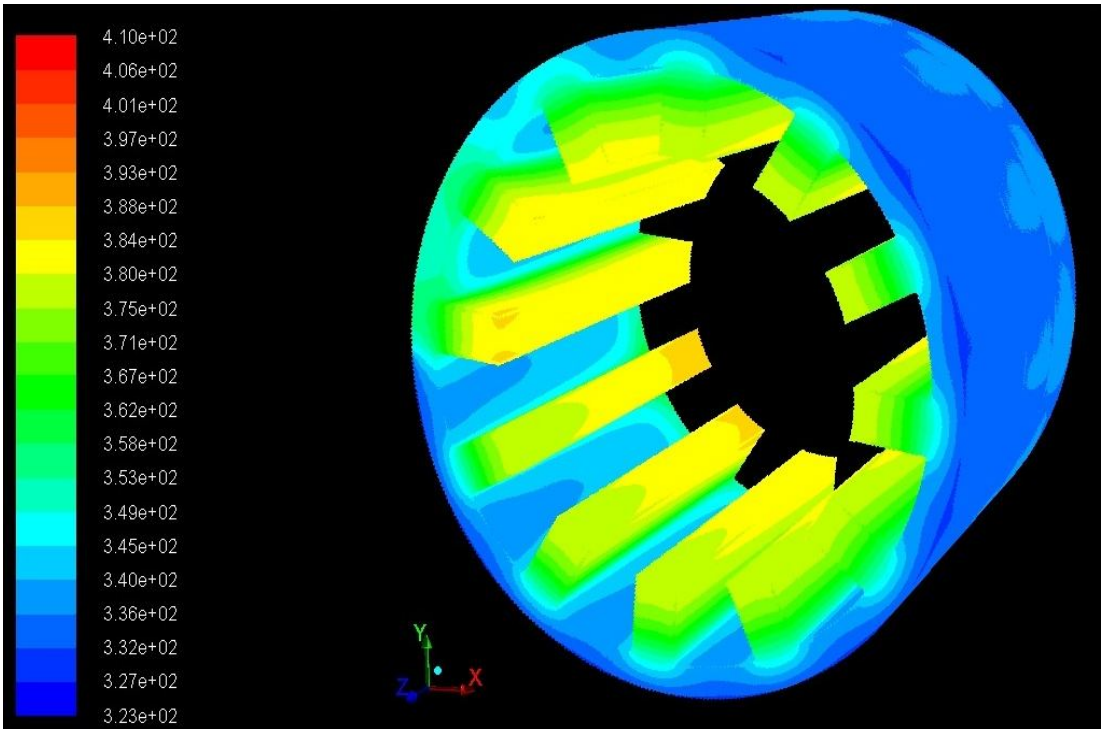


Şekil 4.16 : Helisel 4 tur tümsekli 1. konfigürasyon 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı.

4.7.2 Helisel 4 tur tümsekli ikinci konfigürasyon

İkinci konfigürasyonun amacı, akış bozucu yüksekliğinin basınç artışı ve ısı geçiş performansı üzerinde olan etkisini incelemektir. Bu analizde akış bozucusunun yüksekliğinin, toplam kanal yüksekliğine olan oranı %5 arttırılarak, %25 olarak alındı (e/H=0,25) ve bozucular arasındaki adım, birinci konfigürasyona göre değiştirilmedi, yani akış bozucular arasındaki adım akış bozucu yüksekliğine göre oranı 15 alındı (P/e=15).

Analiz sonuçlarının incelemesinden anlaşılmıştır ki akışta, helisel 4 tur tümsekli birinci konfigürasyonuna göre basınç düşüşünde %35 ile %55 arasında artışa rağmen ortalama stator sıcaklığında %0,3 ile %0,6 arasında bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.17). Helisel 4 tur tasarımı ile ilgili 4, 12 ve 16 L/dak. debili akış durumları için stator sıcaklık dağılımı Ek A Şekil A.6'da sunulmuştur.



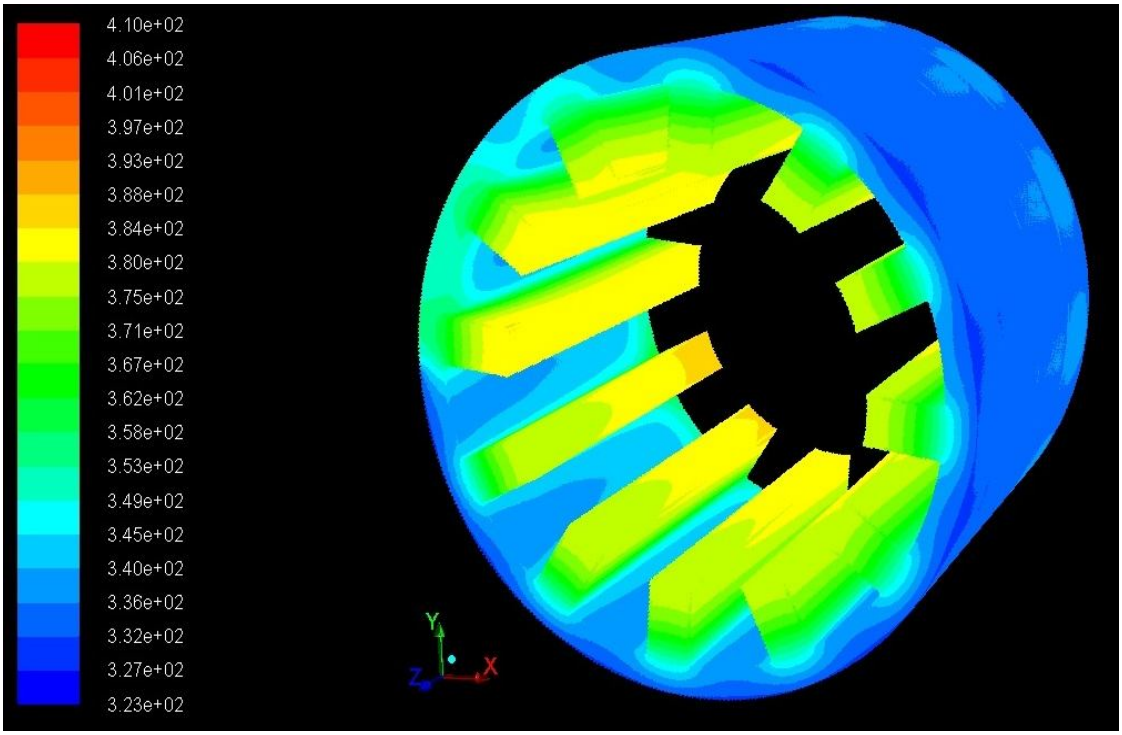
Şekil 4.17 : Helisel 4 tur tümsekli 2. konfigürasyon 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı.

4.7.3 Helisel 4 tur tümsekli üçüncü konfigürasyon

Üçüncü konfigürasyonun amacı, akış bozucular arasındaki adımın basınç artışı ve ısı geçiş performansı üzerinde olan etkisinin incelenmesidir. Bu analizde akış bozucular arasındaki adım akış bozucu yüksekliğine göre oranı 10 alındı (P/e=10) ve akış

bozucuların yüksekliği birinci konfigürasyona göre değiştirilmeden %20 alındı (e/H=0,20).

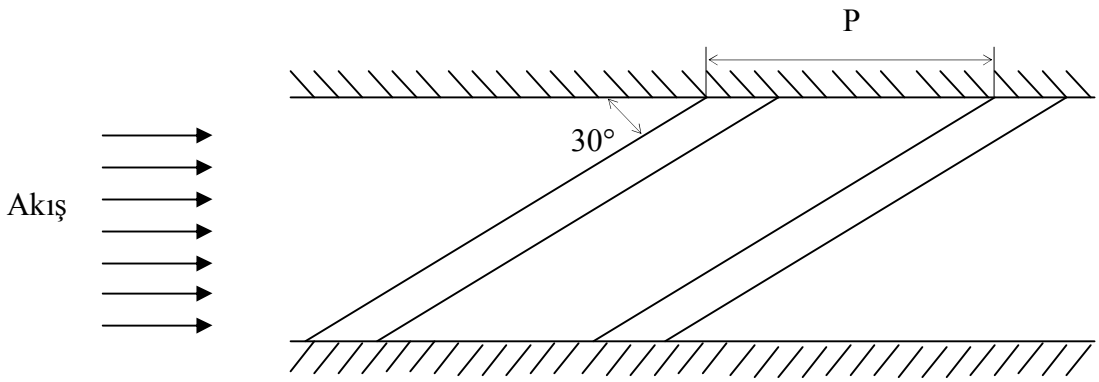
Analiz sonuçlarının incelemesinden anlaşılmıştır ki akışta, helisel 4 tur tümsekli birinci konfigürasyona göre basınç düşüşünde %20 ile %45 arasında artışa rağmen ortalama stator sıcaklığında %0,6 ile %1 arasında bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.18). Helisel 4 tur tasarımı ile ilgili 4, 12 ve 16 L/dak. debili akış durumları için stator sıcaklık dağılımı Ek A Şekil A.7'de sunulmuştur.



Şekil 4.18 : Helisel 4 tur tümsekli 3. konfigürasyon 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı.

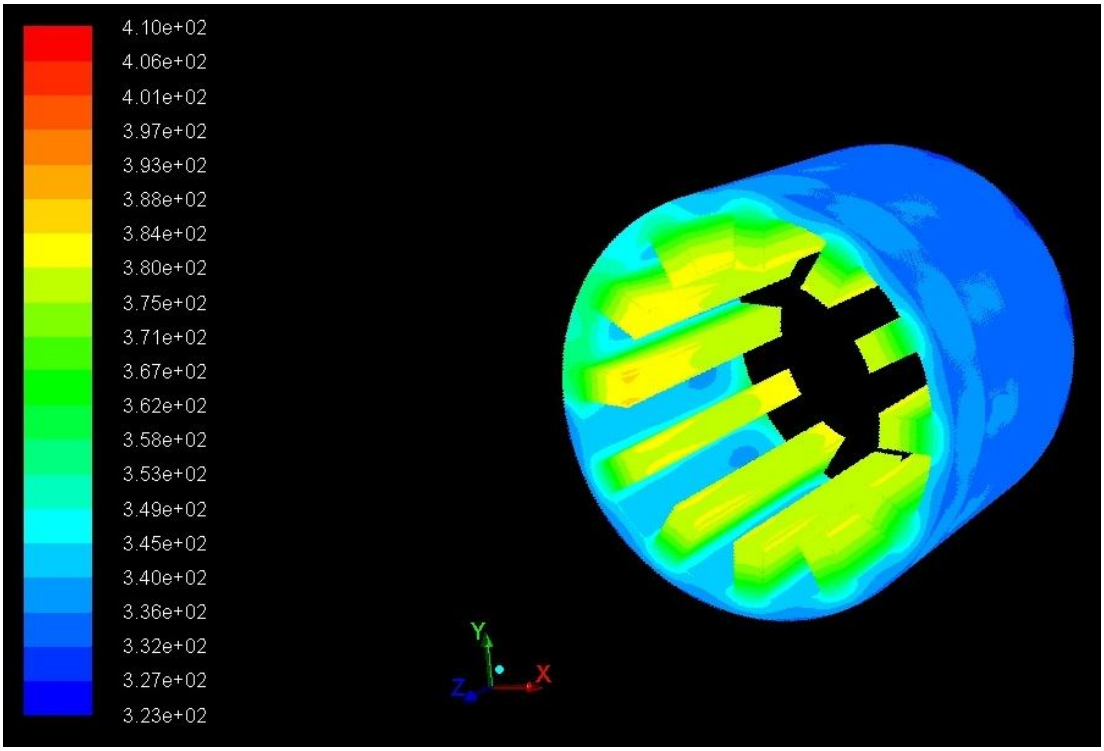
4.7.4 Helisel 4 tur tümsekli dördüncü konfigürasyon

Son konfigürasyonun amacı, kanal içine yerleştirilen tümseklerin ana akış doğrultusu ile yaptığı açının ısı geçiş performansı ve basınç düşüşü üzerine olan etkisini incelemektir. Bu amaçla helisel 4 tur tümsekli birinci konfigürasyondaki yükseklik ve aralığa sahip akış bozucular, ana akış doğrultusu ile 30 derecelik açı ile kanal içinde yerleştirildi (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 : Dördüncü konfigürasyon için tümsekli kanal kanalın şematik üstten görünüşü.

Bu konfigürasyon için sadece 8 L/dak. için bir analiz yapıldı. Analiz sonucunda anlaşılmıştır ki, helisel 4 tur tümsekli birinci konfigürasyonun 8 L/dak. durumuna göre basınç düşüşü %17 artış göstermesine rağmen ortalama stator sıcaklığında %1,4 azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.20).

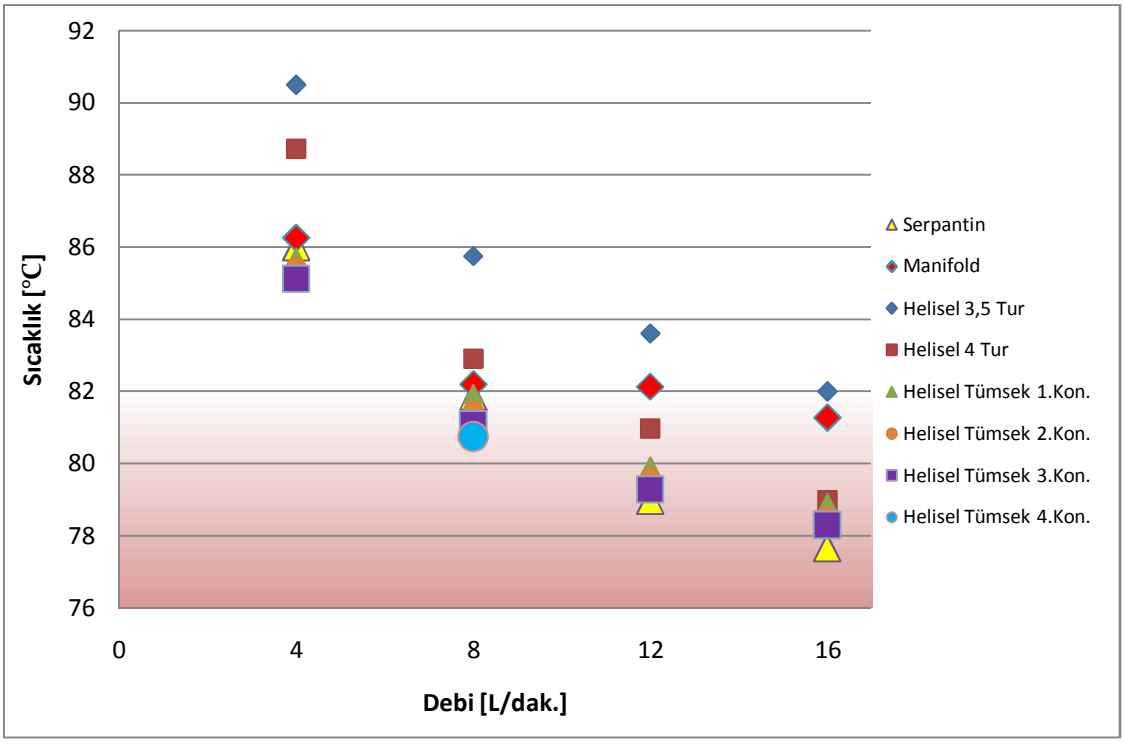


Şekil 4.20 : Helisel 4 tur tümsekli 4. konfigürasyon 8 L/dak. akış için stator sıcaklık [K] dağılımı.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında tasarım aşamasında olan elektrikli aracın motorunun geometrisine uygun soğutucu seçeneklerinin HAD analizleri yapıldı.

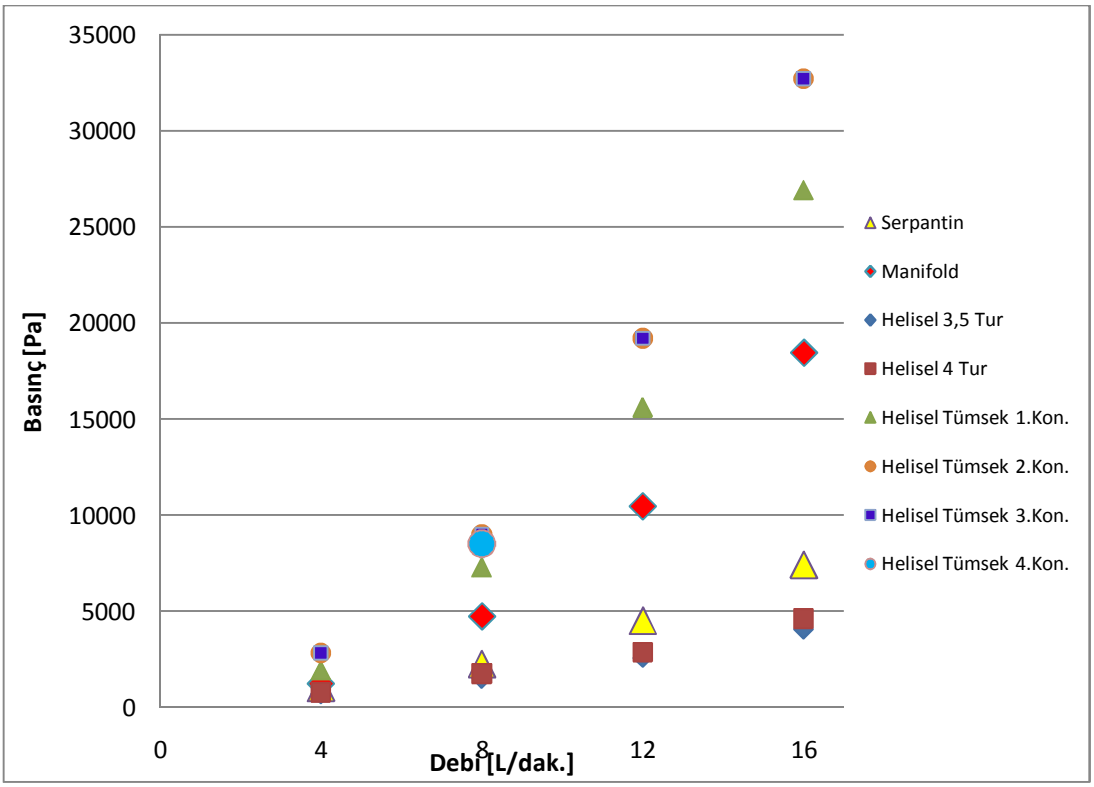
Tasarımın en önemli amaçlarından biri stator ortalama sıcaklığının 70°C-80 °C aralığında kalmasıdır. Şekil 5.1'de bütün analizler için elde edilen ortalama stator sıcaklıkları sunulmuştur.



Şekil 5.1 : Debi değişimi ile ortalama stator sıcaklığı değişimi.

Beklendiği gibi debi artışı ile ortalama stator sıcaklığı azalmaktadır. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi istenen sıcaklık aralığı ancak 12 L/dak. ve 16 L/dak. debileri için ve sadece birkaç tasarım için gerçekleşebilmektedir.

Tasarımda önem arz eden başka faktörlerden biri de akışın basınç düşüşüdür. Daha az basınç düşüşü, daha düşük bir pompa gücü ile akışkanın dolaşımını sağlayabilmek anlamına gelmektedir. Şekil 5.2'de bütün analizler için elde edilen soğutucu akışkan basınç düşüşleri sunulmuştur.

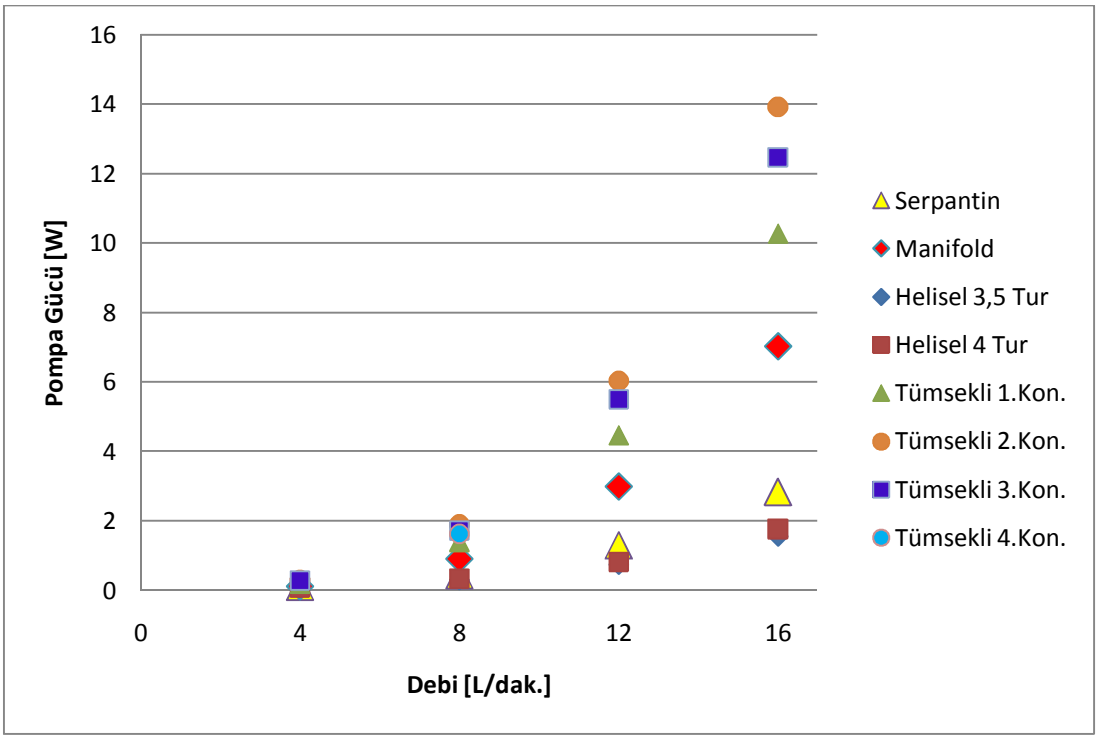


Şekil 5.2 : Debi değişimi ile basıç düşüşü değişimi.

Beklendiği gibi debi artışı ile basınç düşüşü artmaktadır. Bu düşüş özellikle tümsekli kanallarda ciddi bir şekilde artış göstermektedir. Basınç düşüşünden yola çıkarak sirkülasyonu gerçekleştirecek pompanın gücünü hesaplamak mümkündür. Şekil 5.3'te %70 verimine sahip bir sirkülasyon pompası kullanıldığı taktirde analizi yapılan her bir tasarımda pompayı çalıştırmak için gereken güç ihtiyacı gösterilmiştir.

Şekil 5.3'te sunulan değerler, akışkanın sadece soğutucu kanal içinde dolaşımı için gereken pompa gücünü göstermektedir. Toplam pompa gücünü hesaplamak için bu değerlere radyatör ve bağlantı elemanlarında meydana gelen akış kayıplarını da eklemek gerektiği unutulmamalıdır.

Genel olarak analiz sonuçlarına bakıldığında 12 L/dak. ve 16 L/dak. çalışma durumları stator ortalama sıcaklığı açısından daha uygun görülmektedir. Ancak sistemi bir bütün olarak ele aldığımızda debinin artışı ile akışkanın radyatörde kalma süresi de azalmaktadır. Bu sebepten dolayı sistem daha yüksek debilerle çalıştırıldığı takdirde daha büyük radyatörlerin kullanılması gerekebilir.



Şekil 5.3 : Debi değişimi ile pompa gücü değişimi.

Sonuç olarak stator ortalama sıcaklığı ve pompa gücü göz önünde bulundurulduğu zaman Helisel 4 Tur, 8 L/dak. debi konfigürasyonun kullanılması uygun görülmektedir. Bu tasarım ve çalışma durumunda düşük basınç kaybına karşılık nispeten iyi bir stator ortalama sıcaklığı elde etmek mümkündür.

Bu konuyu unutmamak lazım ki yapılan analizlerde motor kaputu içindeki hava durgun ve sıcaklık 50°C alınmıştır. Bu gibi çevre koşulları bir araç için her zaman gerçekleşmeyebilir ve aslında göz önüne bulundurulan koşullar nadiren gerçekleşen zor koşullardır. Bu sebepten dolayı sistemi daha verimli bir hale getirebilmek için soğutucu kanalın çıkışında bir sıcaklık algılayıcısının yerleştirilmesi, bu cihaz ve bu çalışmada yapılan analizler yardımı ile sirkülasyon pompasının çalışma hızının kontrol edilmesi önerilir. Bu şekilde düşük çevre sıcaklıkları durumunda pompa daha yavaş çalışıp motor gereksiz yere soğutulmayacaktır ayrıca çevre sıcaklığının artışı veya aracın zorlanma durumunda (örneğin yokuş tırmanırken) pompa daha hızlı çalışıp debi artacaktır ve bu şekilde motorun bu sıcaklık artışından zarar görmesi önlenmiş olacaktır.

Bu tasarım çalışması, bir sonraki aşamada deneysel çalışmalarla devam edecektir. Deneysel çalışmalarda, yapılmış olan sayısal analizlerin sonuçları yol gösterici olup, zaman ve maliyet tasarrufu sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

[1] Url-1 <*http://0317bc4.netsolhost.com/WordPress/?p=784*>, alındığı tarih 12.04.2011.

[2] Url-2 <*http://www.qwiki.com/q/#!/History_of_the_electric_vehicle*>, alındığı tarih 12.04.2011.

[3] Larminie, J., and Lowry, J., 2004: Electric Vehicle Technology. Oxford brookes university, UK.

[4] Hongmin, L., 2009: Cooling of a permanent magnet electric motor with a centrifugal impeller, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. **53** (2010), PP 797-810.

[5] Masoudipour, M. M., Verdes, R. P., Duong, L. K. and Lakewood, 2007: Electric motor cooling jacket, *US Patent*, No: 7675209 Dated 09.03.2010.

[6] Fakhfakh, M. A., Kasem, M. H., Tounsi, S., and Neji, R., 2008: Thermal Analysis of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles, *Journal of Asian Electric Vehicles*, Vol. **6**, no. 2, December 2008.

[7] Kim, M. S., Lee, K. S., Um, S., 2008: Numerical investigation and optimization of the thermal performance of a brushless DC motor, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. **52** (2009), PP 1589-1599.

[8] Nakahama, T., Suzuki, K., Hashidume, S., Ishibashi, F., and Hirata, **M.**, 2006: Cooling Airflow in Unidirectional Ventilated Open-Type Motor for Electric Vehicles, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. **21**, no. 3, September 2006.

[9] Muso, M., Oda, K., Koizumi, O., and Hamano, H., 1993: Cooling system of electric automobile and electric motor used therefor, *US Patent*, No: 5678760 Dated 21.10.1997.

[10] Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N., 2002: Transport Phenomena. John Wiley & Sons, New York.

[11] Kakaç, S., and Yener, Y., 1995: Convective Heat Transfer. CRC Press, Boca Raton, FL.

[12] Incropera, F. P., and DeWitt, D. P., 2007: Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri. Literatür Yayınları, İstanbul.

[13] Hoffmann, K., A., 2000: Computational Fluid Dynamics Volume 3.,Engineering Education System, Kansas, USA.

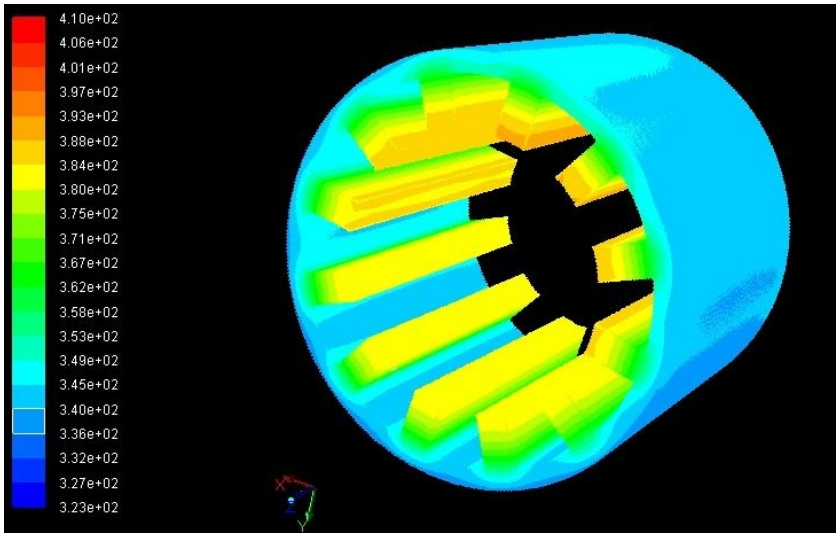
[14] GAMBIT, 2004: GAMBIT2.2 Tutorial Guide. Fluent.Inc, Lebanon.

[15] FLUENT, 2005: Fluent 6.2 User's Guide. Fluent.Inc, Lebanon.

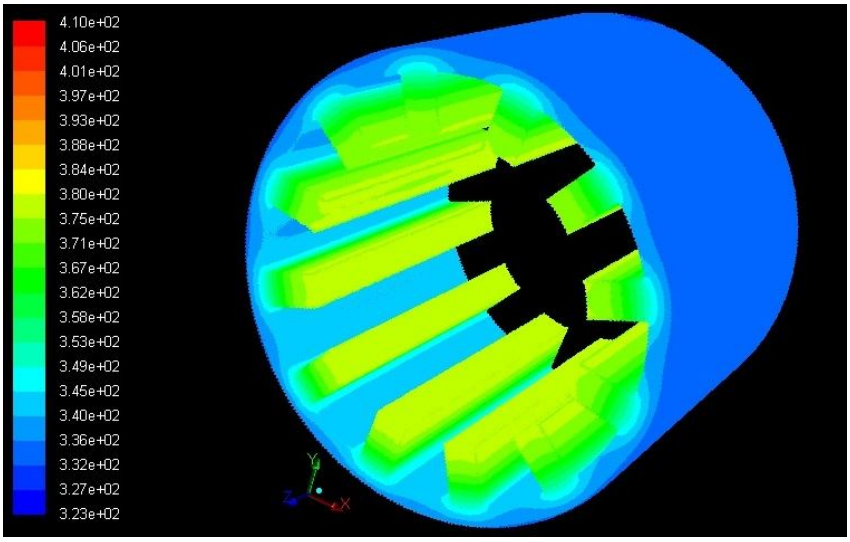
[16] Hoffmann, K., A., 2000: Computational Fluid Dynamics Volume 1.,Engineering Education System, Kansas, USA.

EKLER

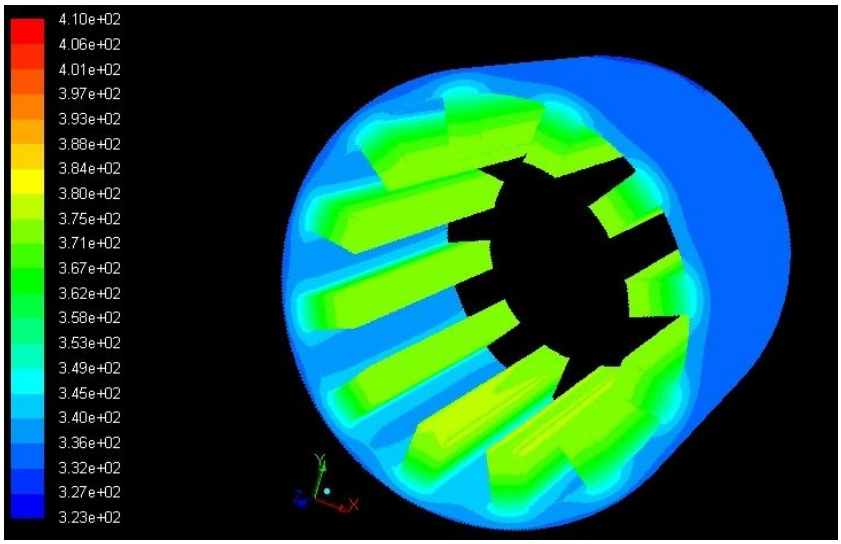
EK A.1 : Stator sıcaklık dağılımları.



(a)

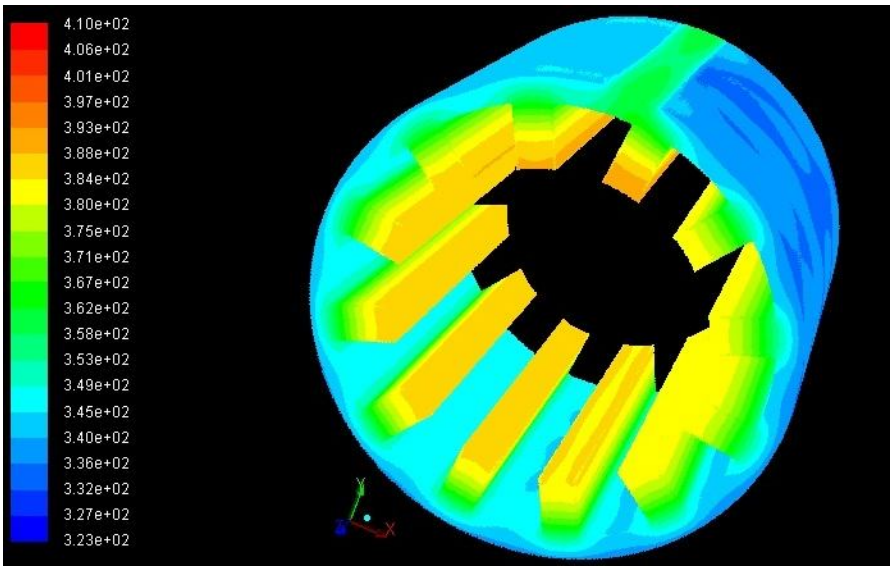


(b)

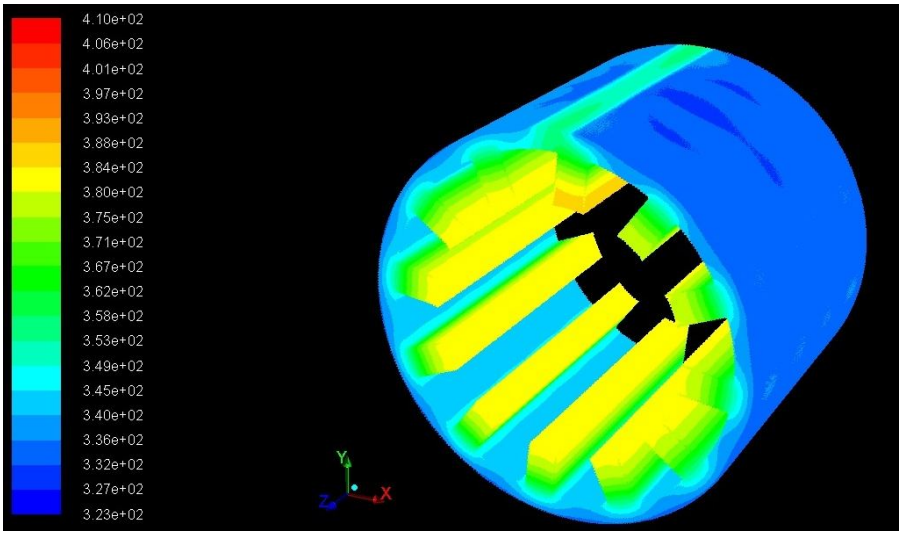


(c)

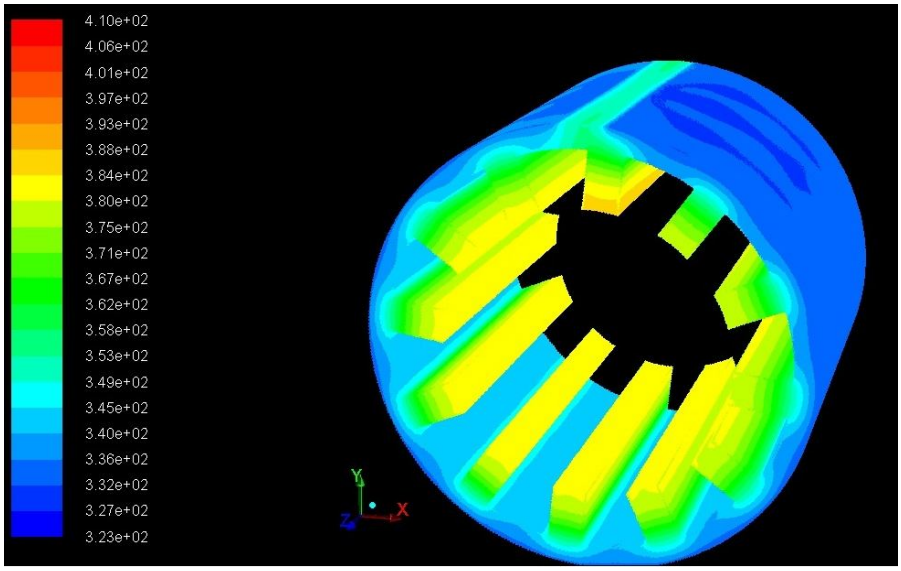
Şekil A.1 : Serpantin modeli stator sıcaklık [K] dağılımı.a)4L/dak. b)12L/dak. c)16L/dak.



(a)

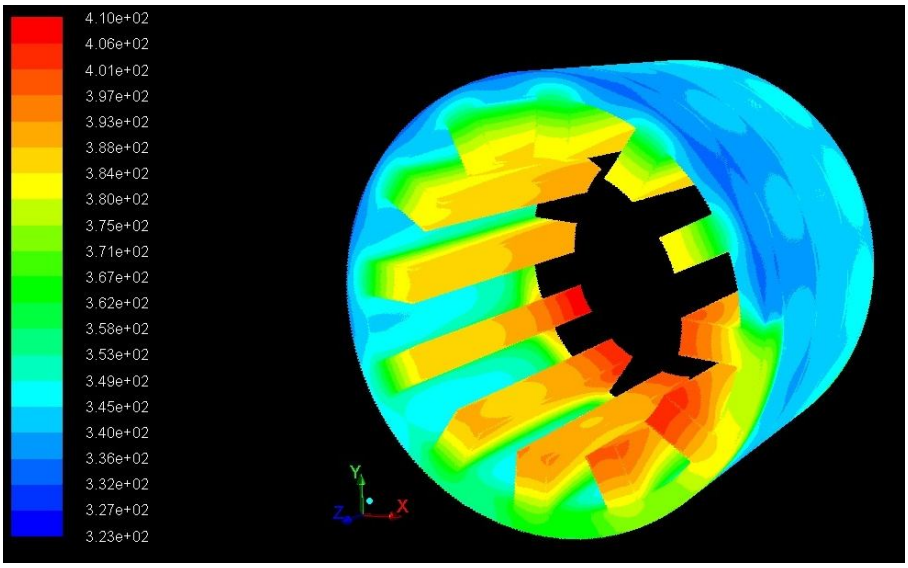


(b)

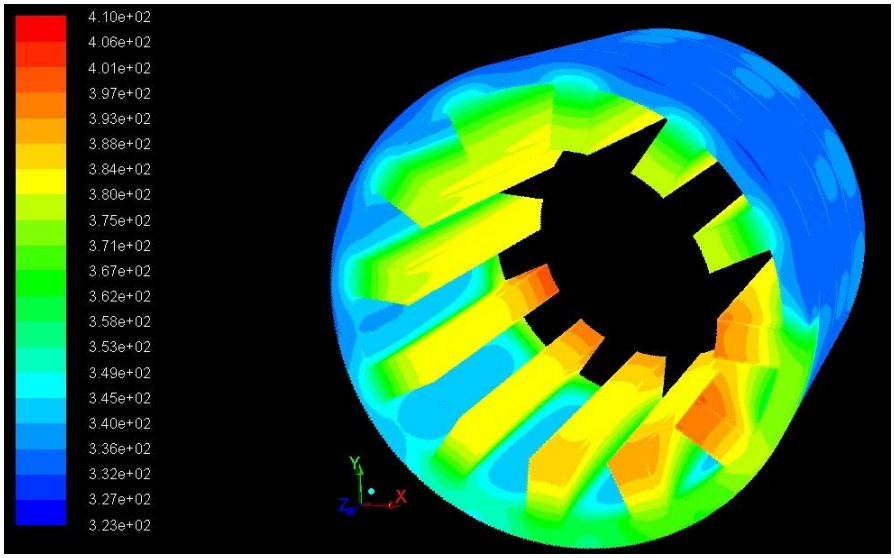


(c)

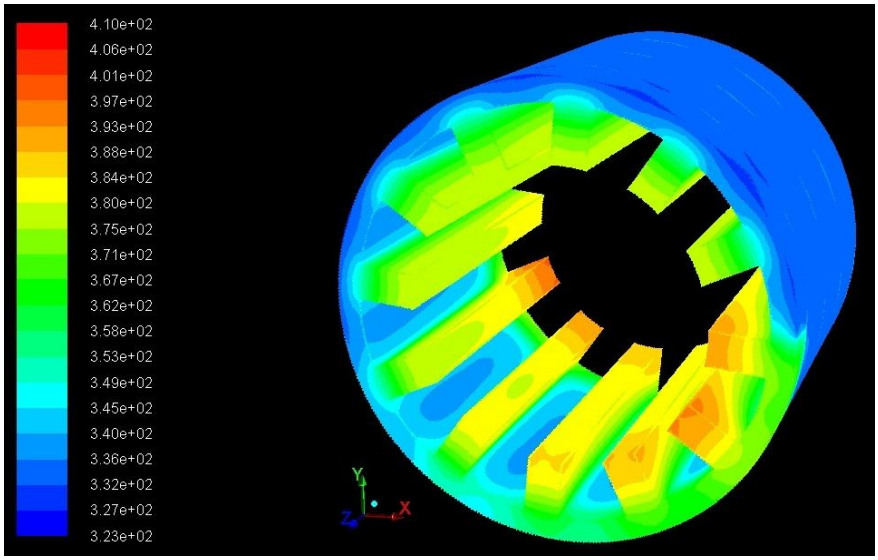
Şekil A.2 : Manifold modeli stator sıcaklık [K] dağılımı.a)4L/dak. b)12L/dak. c)16L/dak.



(a)

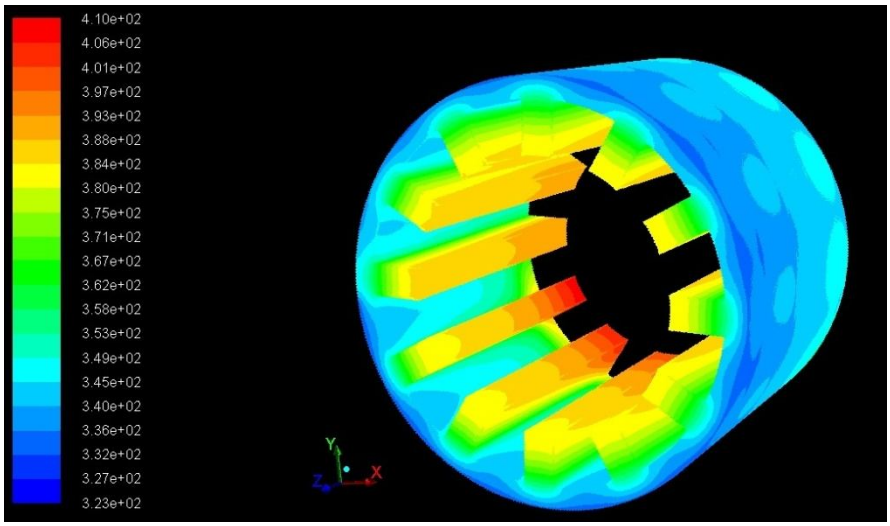


(b)

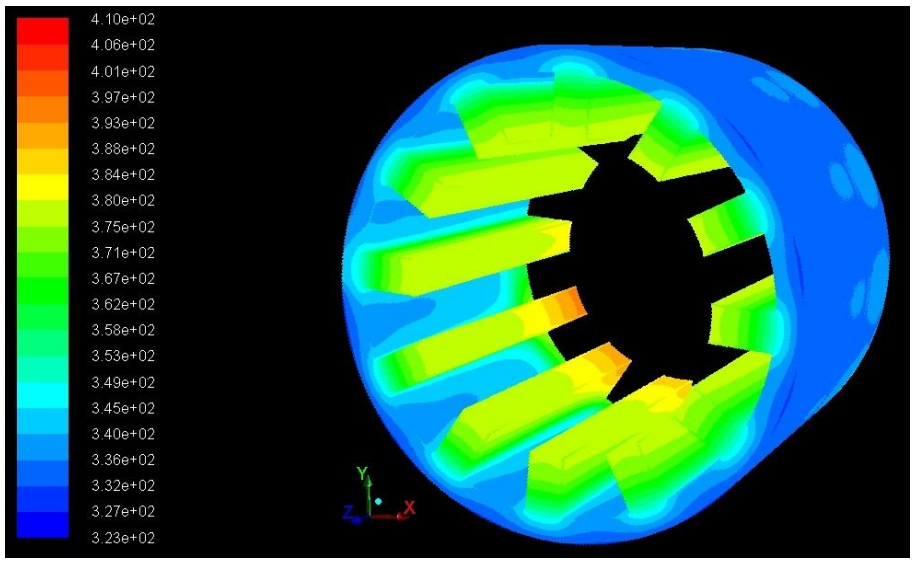


(c)

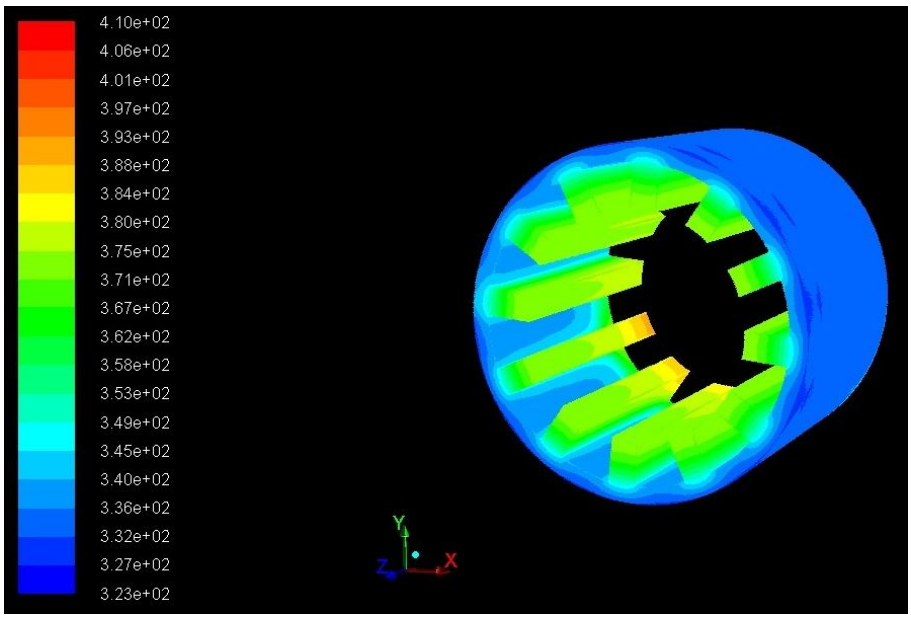
Şekil A.3 : $3\frac{1}{2}$ tur helisel modeli stator sıcaklık [K] dağılımı.a)4L/dak. b)12L/dak. c)16L/dak.



(a)

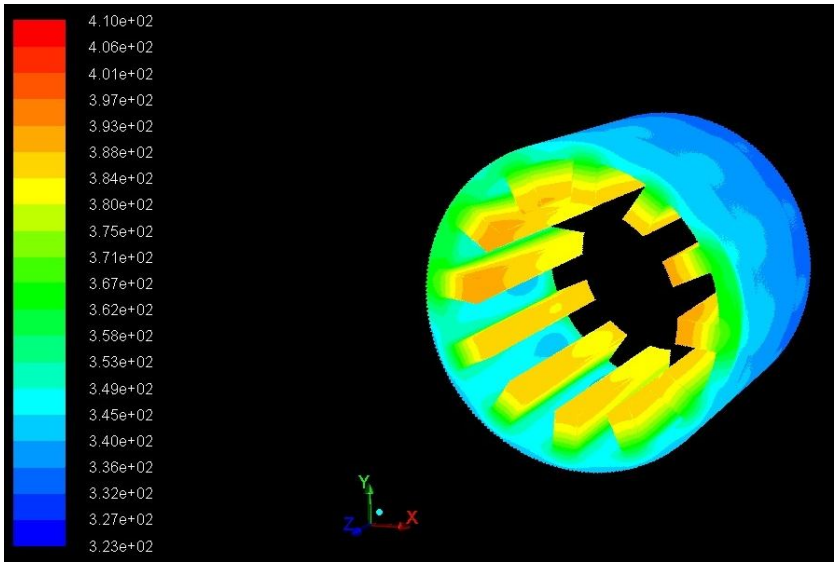


(b)

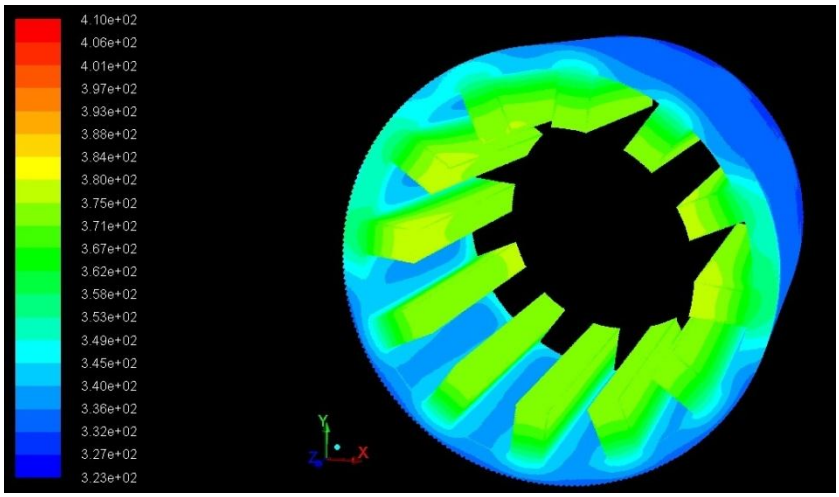


(c)

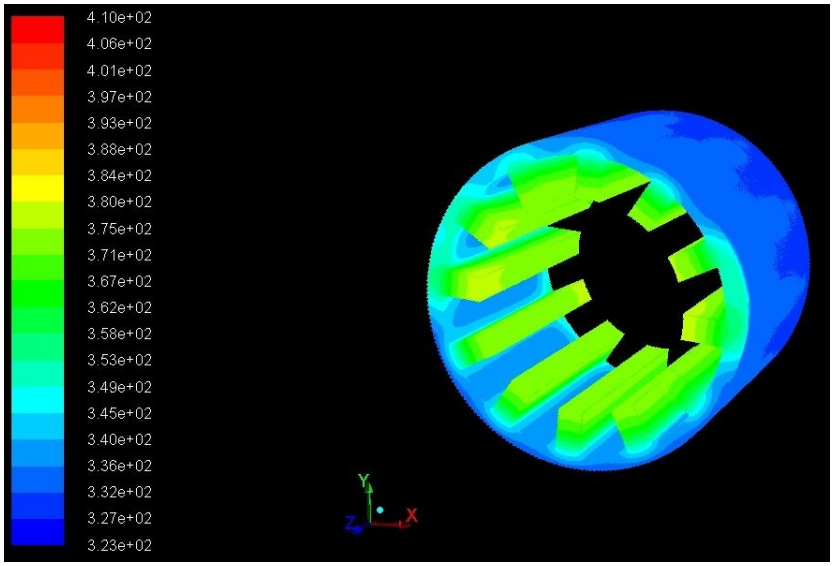
Şekil A.4 : 4 tur helisel modeli stator sıcaklık [K] dağılımı.a)4L/dak. b)12L/dak. c)16L/dak.



(a)

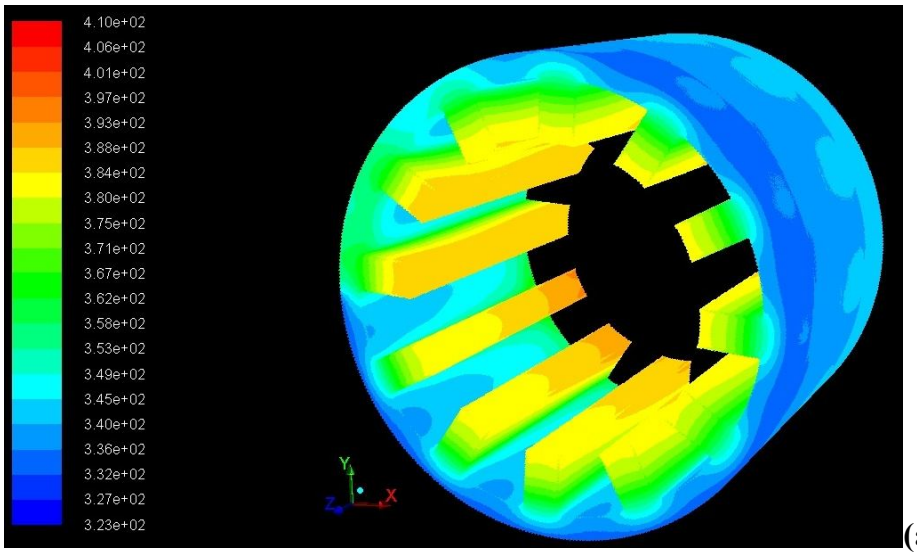


(b)

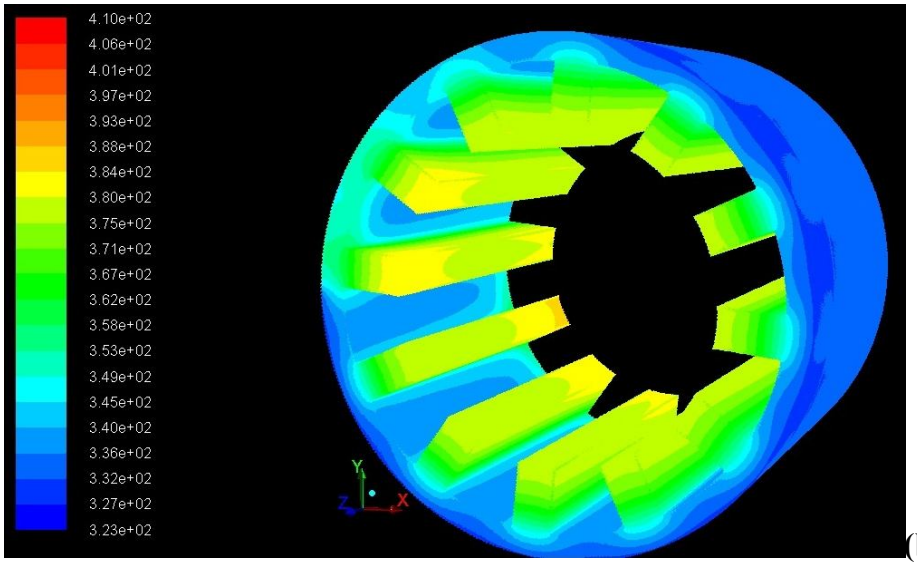


(c)

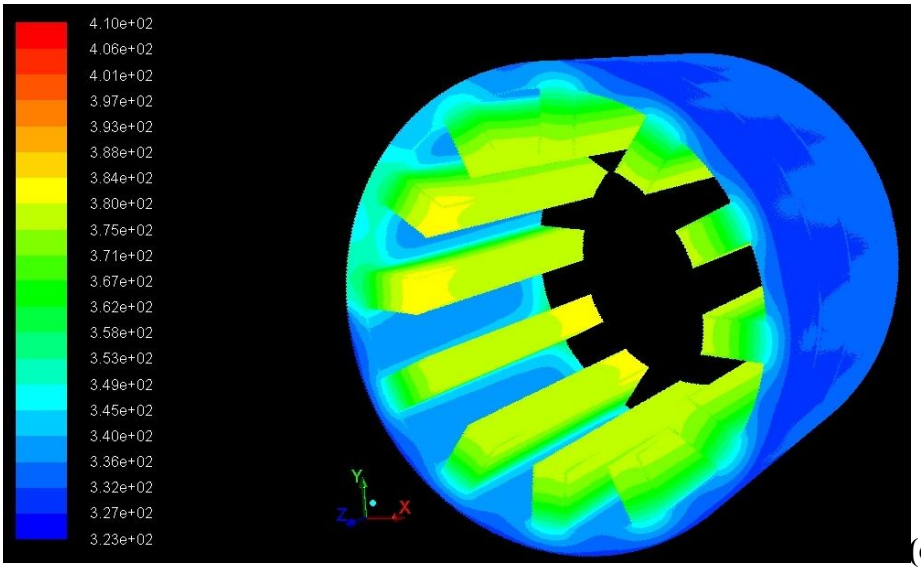
Şekil A.5 : Helisel 4 tur tümsekli 1. konfigürasyon sıcaklık [K] dağılımı.a)4L/dak. b)12L/dak. c)16L/dak.



(a)

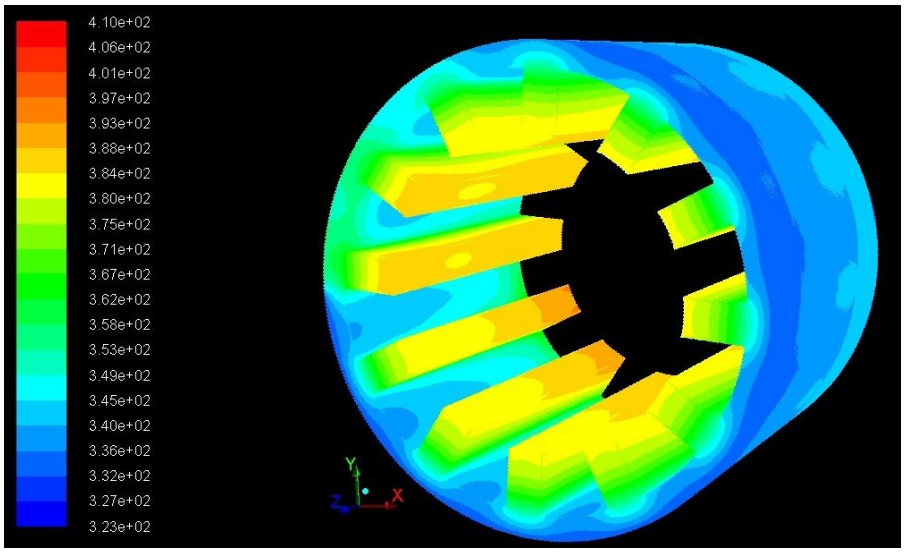


(b)

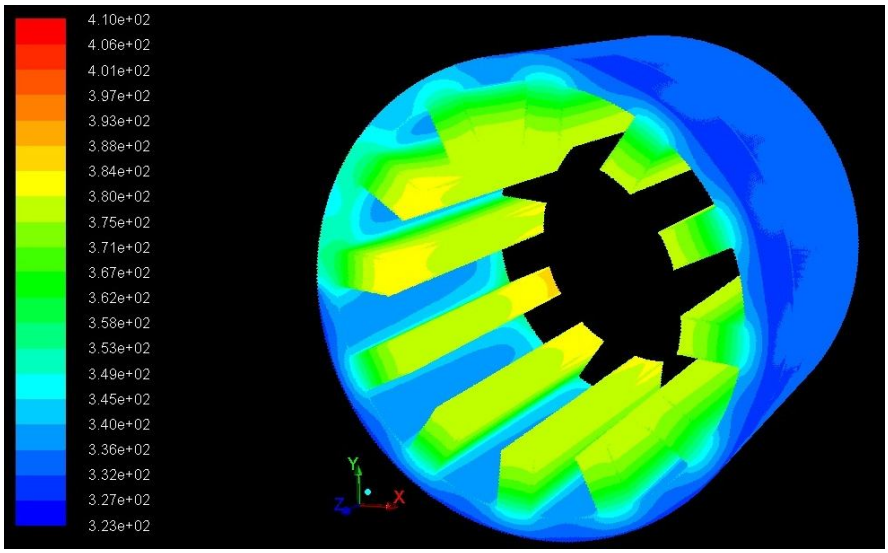


(c)

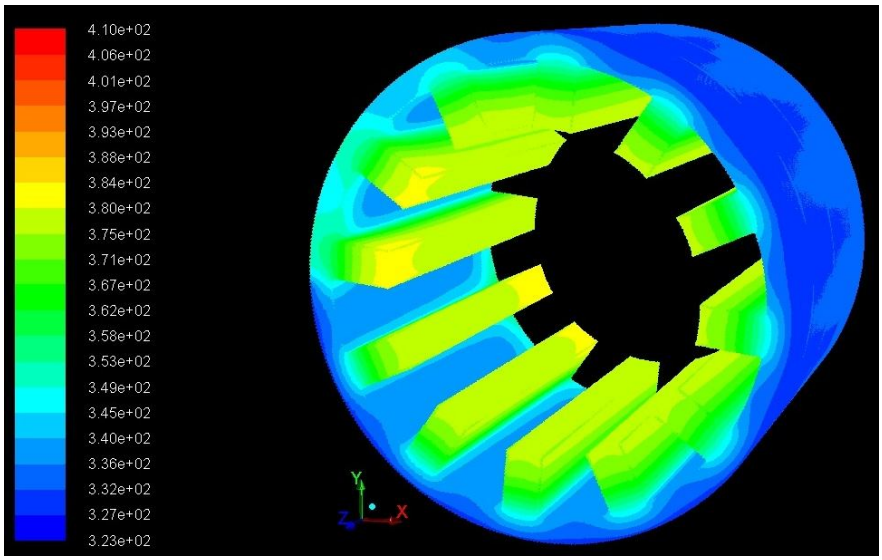
Şekil A.6 : Helisel 4 tur tümsekli 2. konfigürasyon sıcaklık [K] dağılımı.a)4L/dak. b)12L/dak. c)16L/dak.



(a)



(b)



(c)

Şekil A.7 : Helisel 4 tur tümsekli 3. konfigürasyon sıcaklık [K] dağılımı.a)4L/dak. b)12L/dak. c)16L/dak.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Yaşar MUTLU

Doğum Yeri ve Tarihi: İran-1980

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi:

- Dönmez, A.H., **Mutlu, Y.(JABBARIBEHROOZ,Y.),** Kuddusi, L., and Meydanlı, S.C., 2010: *A New Design for an Existing Air-Conditioner Heat Exchanger to Improve the Thermal Performance,* Included in the Clima 2010 Congress CD ISBN Code of the CD 978-975-6907-14-6, May 9-12, 2010 Antalya, Turkey.