



**DENİZ ARAÇLARINDA KULLANILAN İÇTEN
YANMALI DİZEL MOTORUN SIVI SOĞUTMALI
EGZOZ MANİFOLDU SOĞUTMA SİSTEMİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ**

Mustafa Sefa GÜZEL



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DENİZ ARAÇLARINDA KULLANILAN İÇTEN YANMALI DİZEL
MOTORUN SIVI SOĞUTMALI EGZOZ MANİFOLDU SOĞUTMA
SİSTEMİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Mustafa Sefa GÜZEL
0009-0009-9759-3060

Prof. Dr. Erhan PULAT
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DENİZ ARAÇLARINDA KULLANILAN İÇTEN YANMALI DİZEL MOTORUN SIVI SOĞUTMALI EGZOZ MANİFOLDU SOĞUTMA SİSTEMİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Mustafa Sefa GÜZEL

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Erhan PULAT

Günümüzde elektrikli motorların kullanımı artarak devam etmektedir. Binek araçlarda dizel motorlara yönelimde azalmalar görülse de, ağır hizmet ve marin sektöründeki yüksek güç isterlerinden dolayı dizel motorlar hala önemini korumaktadır. Marin motorların soğutma sistemleri, kullanım yeri ve loyd standartlarına uygun tasarlanmaktadır. Marin motorun çalıştığı alan incelendiğinde, içerisinden sıcak egzoz gazı geçen manifoldun hem temas edilmesi muhtemel kısımları hem ortamın sıcaklığını arttıracak kısımları yalıtılmalıdır. Marin motorların bazı uygulamalarında egzoz manifoldu soğutma sıvısıyla (su+glikol) soğutulmaktadır. Bu uygulamada da egzoz manifoldunun motor soğutma sıvısıyla soğutulduğu durum göz önüne alınmıştır. Bu çalışmada dizel marin motorun sıvı soğutmalı egzoz manifoldunu optimum soğutabilmek için manifoldu besleyen su hattı belirlenip manifoldun akış ve ısı analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde manifold soğutma hattı, motoru soğutan su miktarı azaltılmadan yapılmıştır. Manifoldun su ve gaz hattının basınç düşümleri hesaplanmıştır. Manifoldun eşlenik ısı analizi yapıldığında hesaplanan sıvı ve belirlenen gaz debisinde gazdan soğutma sıvısına yaklaşık 57 kW ısı transferi yaptığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deniz Motoru, Soğutma, Sıvı Soğutmalı Egzoz Manifold, HAD, Ansys Fluent

ABSTRACT

MSc Thesis

IMPROVEMENT OF THE LIQUID-COOLED EXHAUST MANIFOLD COOLING SYSTEM OF THE INTERNAL COMBUSTION DIESEL ENGINE USED IN MARINE VEHICLES

Mustafa Sefa GÜZEL

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Erhan Pulat

Today, the use of electric motors continues to increase. Although there is a decrease in the preference for diesel engines in passenger vehicles, diesel engines still maintain their importance due to the high power requirements in the heavy duty and marine sectors. Cooling systems of marine engines are designed in accordance with the place of use and Lloyd standards. When the area where the marine engine operates is examined, both the parts of the manifold through which hot exhaust gas passes that are likely to come into contact and the parts that will increase the temperature of the environment should be insulated. In some applications of marine engines, the exhaust manifold is cooled with coolant (water + glycol). In this application, the situation in which the exhaust manifold is cooled by engine coolant is taken into account. In this study, in order to optimally cool the liquid-cooled exhaust manifold of a diesel marine engine, the water line feeding the manifold was determined and the flow and thermal analysis of the manifold was performed. As a result of the studies carried out, the manifold cooling line was constructed without reducing the amount of water cooling the engine. Pressure drops of the water and gas lines of the manifold were calculated. When the conjugate thermal analysis of the manifold was performed, it was observed that approximately 57 kW heat transfer was made from the gas to the cooling liquid at the calculated liquid and determined gas flow rate.

Key words: Marine Engine, Cooling, Liquid Cooled Exhaust Manifold, CFD, Ansys Fluent

TEŞEKKÜR

Bu alıŐma sırasında bana her tŸrlŸ bilgi ve desteğini sunan danışman hocam Prof. Dr. Erhan Pulat'a teŐekkŸrlerimi sunarım.

Çalışma sırasında araŐtırmalarıma imkân sağlayan TŸMOSAN Motor ve Traktör A.Ő. firmasına ve çalışma arkadaŐlarıma teŐekkŸrlerimi sunarım.

Hayatım boyunca bana en çok emeği veren ve desteklerini her daim hissettiğim sevgili aileme teŐekkŸrlerimi sunarım.

Mustafa Sefa GŸzel

.../.../.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 Marin Motorların Tanıtımı Ve Tarihsel Gelişimi.....	3
2.2. Dört Zamanlı Motorun Tarihçesi.....	4
2.3. Gemi Ana Tahrik Sistemi.....	5
2.4. Marin Motor Komponentleri.....	5
2.4.1. Hava Soğutucu.....	5
2.4.2. Deniz Suyu Pompası.....	6
2.4.3. Motor Suyu Isı Değiştiricisi.....	8
2.4.4. Sıvı Soğutmalı Egzoz Manifoldu.....	9
2.5. Literatür Araştırması.....	10
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	17
3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği.....	17
3.1.1 HAD Nerede ve Ne Zaman Kullanılır.....	19
3.1.2 Nümerik Yöntemler.....	19
3.1.2.1 Sonlu Hacimler Yöntemi.....	19
3.1.2.2 Sonlu Farklar Yöntemi.....	20
3.1.2.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	21
3.1.3 Bir HAD Uygulamasının Temel Aşamaları.....	21
3.1.3.1 Ön İşlem.....	21
3.1.3.2 Çözüm.....	22
3.1.3.3 Son İşlem ve Değerlendirme.....	23
3.1.3.4 Test İle Doğrulama.....	23
3.2 Türbülans ve Kullanılan Modeller.....	23
3.2.1. Standart k-ε Modeli.....	25
3.2.2. RNG k-ε Modeli.....	25
3.2.3. Realizable k-ε Modeli.....	26
3.2.4. Standard k-ω Modeli.....	26
3.2.5. SST k-ω Modeli.....	26
3.2.6. Reynolds Stress Modeli.....	27
3.2.7. Detached Eddy Simulation (DES) Modeli.....	28
3.2.8. Large Eddy Simulation (LES) Modeli.....	29
3.3. Korunum Denklemleri.....	30
3.5. Temel Isı Transfer Modları.....	31
3.6. Marin Motor ve Soğutma Sitemi.....	31
3.7. Motor Su Çekmelerinin Analize Hazırlığı.....	34
3.8. Sıvı Soğutmalı Egzoz Manifoldu Analiz Hazırlığı.....	36
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	39
5. SONUÇ.....	44
KAYNAKLAR.....	46



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
C_p	Özgül Isı (J/kgK)
ϵ	Türbülans kinetik enerji yayılımı
h	Isı transfer katsayısı
k	Isı iletim katsayısı
k	Türbülans kinetik enerji
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
μ	Dinamik viskozite (kg/ms)
m	Debi (kg/s)
T	Sıcaklık (K)
t	Zaman (s)
Θ	Viskoz dağılım fonksiyonu
u	x yönündeki hız bileşeni
w	z yönündeki hız bileşeni
v	y yönündeki hız bileşeni
σ	Stefan-Boltzman sabiti
Q	Isı Transferi

Kısaltmalar	Açıklama
HAD (CFD)	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
DNS	Doğrudan Sayısal Simülasyon
LES	Büyük Girdap Simülasyonu
RANS	Reynolds Ortalamalı Navier Stokes
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
kW	Güç (kilowatt)
NO _x	Nitrojen Oksit
SST	Shear Stress Transport
CPU	Merkezi İşlem Birimi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1.	Gemi motoru RT-flex96C (Dizel makine, 2024)..... 1
Şekil 2.1.	Deniz aracı tahrik sistemi (Dokkum, 2003)..... 5
Şekil 2.2.	Hava soğutucu şeması (Newsdetail,2024)..... 6
Şekil 2.3.	Isı değiştirici şeması (Prajapati ve ark. 2024)..... 8
Şekil 2.4.	Sıvı soğutmalı egzoz manifoldu şeması..... 9
Şekil 2.5.	Sıvı soğutmalı egzoz manifold sıcaklık görseli (Assari ve ark. 2018)..... 10
Şekil 2.6.	Akışkan sıcaklık dağılımı (Pai ve ark. 2018)..... 11
Şekil 2.7.	Motor su ceketi basınç görseli (Fatallah ve ark. 2007). 12
Şekil 2.8.	Motor silindir çevresi hız görseli (Fatallah ve ark. 2007) 13
Şekil 2.9.	Egzoz manifold su ceketi (Milanovic ve ark. 2003)..... 15
Şekil 3.1.	HAD disiplinleri (Tu ve ark. 2018)..... 17
Şekil 3.2.	2 boyutlu hücre yapısı (Fluent)..... 22
Şekil 3.3.	3 boyutlu hücre yapısı (Fluent)..... 22
Şekil 3.4.	Türbülanslı akışın herhangi bir noktasında hızın zamana bağlı çalkantıları (Tu ve ark. 2018)..... 24
Şekil 3.5.	Marin motor şeması..... 32
Şekil 3.6.	Tümosan marin motor görseli..... 33
Şekil 3.7.	Silindir bloğu örneği (Engine block,2024)..... 33
Şekil 3.8.	Silindir kafası örneği..... 34
Şekil 3.9.	Silindir kafa, blok ve manifold su ceketleri (versiyon 1) 34
Şekil 3.10.	Ağ yapısı (versiyon 1)..... 35
Şekil 3.11.	Silindir kafa, blok ve manifold su ceketleri (versiyon 2) 35
Şekil 3.12.	Ağ yapısı (versiyon 2)..... 36
Şekil 3.13.	Sıvı soğutmalı egzoz manifold yapısı..... 37
Şekil 3.14.	Sıvı soğutmalı egzoz manifoldu ağ yapısı..... 38
Şekil 3.15.	Analizi yapılan sıvı soğutmalı egzoz manifoldu..... 38
Şekil 4.1.	Silindir kafa, blok ve manifold akım çizgileri (versiyon 1) 39
Şekil 4.2.	Silindir kafa, blok ve manifold akım çizgileri (versiyon 2) 40
Şekil 4.3.	Motor su ceketleri akış analizi residual kriterleri..... 40
Şekil 4.4.	Manifold soğutma sıvısı debiye bağlı basınç düşüm eğrisi 41
Şekil 4.5.	Manifold akış ve ısıl analizi residual kriterleri..... 41
Şekil 4.6.	Manifold su ceketi akım çizgileri..... 42
Şekil 4.7.	Manifold egzoz gazları akım çizgileri..... 42
Şekil 4.8.	Manifold sıcaklık dağılımı (Arka)..... 42
Şekil 4.9.	Manifold sıcaklık dağılımı (Ön)..... 43
Şekil 4.10.	Manifold kesit sıcaklık dağılımı..... 43

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Analizde kullanılan motor suyu termofiziksel özellikleri..	36
Çizelge 3.2. Analizde kullanılan manifoldun özellikleri.....	37
Çizelge 3.3. Analizde kullanılan manifold giriş koşulları.....	38



1. GİRİŞ

Günümüzde denizlerde kullanılan araçlarda genellikle yüksek güç isteri olan içten yanmalı dizel motorlar tercih edilmektedir. Her içten yanmalı motor, termal enerjiyi mekanik işe dönüştürme prensibiyle çalışır. Motor silindirlerinde yakıtın yanması sırasında ısı açığa çıkar ve bu ısının belli bir kısmı soğutma sıvısı ile dışarıya atılmaktadır. Deniz tahrik motorunun soğutulması, ekonomik, güvenli çalışma ve verimlilik açısından önemlidir. Soğutma sıvısı, ısıtılan bileşenlerin termal yükü ve dizel motorunun termal verimliliğini doğrudan etkiler.

Motor teknolojisinin gelişmesiyle birlikte modern motor gücü çok gelişmiş ve ısı yükü son derece yüksektir. Bundan dolayı soğutma sistemi tasarımı üzerine yapılan araştırmalara daha fazla önem verilmektedir. Dizel motorun soğutma sistemindeki soğutma sıvısı ceketleri için 3 boyutlu HAD hesaplaması ve 1 boyutlu soğutma sistemi simülasyonu etkili bir yaklaşımdır.



Şekil 1.1. Gemi motoru RT-flex96C (Dizel makine, 2024)

Gelişen dünyada her geçen gün ihtiyaçlar ve talepler farklılık göstermektedir. Kurum ve kuruluşlar bu talepleri belli bir standarta getirip uygulanmasını sağlamaktadırlar. Marin sektörü için Türkiye’de ve diğer ülkelerde farklı loyd standartları mevcuttur. Marin

sektöründe mühendislik çalışmaları yapılırken bu standartlar belli ölçütlere uygun tasarım ve üretim yapılması gerektiğini göstermektedir.

Türk Loydu kurallarına göre, deniz araçlarının kapalı alanlarında 220°C'nin üzerinde sıcaklığa ulaşabilen makineler, buhar hatları, kızgın yağ hatları, egzoz boruları, susturucular, kazanlar ve turbo şarjlar gibi ekipmanlar yanmaz malzemelerle yalıtılarak korunmalıdır. Bu sayede, sıcak yüzeylerden kaynaklanabilecek yangın ve yaralanma riskleri önlenir. Yalıtım malzemesi seçerken yağ emme veya yağ geçirgenlik gibi özellikler göz önünde bulundurulmalıdır. Yağ emici veya yağ geçirgen yalıtım malzemeleri kullanılıyorsa, bu malzemeler çelik zırh veya eşdeğer bir malzeme ile korunmalıdır. Bu sayede, yalıtım malzemesinin yağ ile kirlenmesi ve işlevini kaybetmesi engellenir(Türk Loydu, 2022). Sıvı soğutmalı egzoz manifoldu da bu isterleri karşılamak için tasarlanmış motor komponentlerinden biridir.

Bu tez kapsamında deniz motorlarının soğutma sistemi incelenmiştir. Araştırmalarda deniz motorları soğutma kaynağı olarak deniz suyunu kullandıkları gözlenmiştir. Deniz suyu farklı komponentlerden geçip ısındıktan sonra tekrar denize boşaldığı görülmüştür. Egzoz manifoldu içten yanmalı pistonlu motorlar için önemli bir parçadır. Sıvı soğutmalı egzoz manifoldları da deniz araçlarının motorlarında kullanılmaktadır. Sıvı soğutmalı manifoldlarının analiz edilmesi, bileşenlerin verimliliğini ve genel motor performansını artırmak için önemlidir. Çalışmada sıvı soğutmalı egzoz manifoldun akış ve ısıl analizleri yapılmıştır. Ansys Fluent ile yapılan analizlerde üretilmesi planlanan motorun su ceketinden sıvı soğutmalı egzoz manifolduna giden ve çıkan hatlar incelenmiştir. Verimli soğutmanın yapılacağı hat göz önüne alınarak sıvı soğutmalı egzoz manifoldunun analizi yapıp yorumlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Marin Motorların Tanıtımı Ve Tarihsel Gelişimi

Denizde gemi tahrikinin en eski örnekleri, makineler ve motorlar yerine doğal olaylara dayanıyordu. Rüzgâr, deniz taşıtlarının ana itici gücü kaynağıydı. Mezopotamya eserlerinde keşfedildiği üzere, yelkenli teknelerin MÖ 5500 gibi erken bir tarihte var olduğu biliniyor. İlkel çağdaki bireyler de yüzücünün su üzerinde ilerleme yöntemini dikkate almış ve bu yöntemi uygulayarak kürek kullanımına başlamışlardır. Bu, çok sayıda kürekçinin kullanıldığı bir gemi olan kadırgalara doğru genişlemiştir. Kadırgalar boyutları ve hızları nedeniyle MÖ 800 civarına kadar savaşlarda kullanıldı. İlk buharlı motorlar, gemilere güç sağlamak için odun, kömür ve akaryakıt kullanıyordu. Ateş, buhar üretmek için suyla dolu bir kazanı ısıtıyordu. Buhar, kazanın makine sistemine giden bir dizi bağlantı tarafından yönlendiriliyordu. 1807'de ticari açıdan başarılı ilk deniz buhar motoru Amerikalı mühendis ve mucit Robert Fulton tarafından piyasaya sürüldü. Buhar gücüyle çalışan gemi, Hudson Nehri'ni New York City'den Albany'ye saatte 5 mil hızla geçti.

Buhar türbini, buharlı motorlarda kullanılan pistonların bir gelişimi olarak icat edilmiştir. Buhar türbini, yüksek verimli bir makine üretmek için rüzgar türbinleri ve su türbinlerinin optimum özelliklerini birleştirdi. Bir buhar türbininin dönen kanatları bir rüzgâr türbininin kanatlarına benzemektedir. Buhar türbinleri, türbinin daha kompakt bir boyuta sahip olması nedeniyle deniz araçlarında kullanmak için buhar motorlarından çok daha uygun bulunmuştur.

Benzer şekilde, gaz türbini de tahrik araçlarına güç sağlamak için dönen kanatlardan yararlanır. Motor tarafından genellikle doğal gaz, propan, gazyağı veya jet yakıtı yakılarak basınçlı bir gaz üretilir. Yanan yakıttan gelen ısı nedeniyle hava genişler, sıcaklığı artar ve yüksek hızda akarak türbinin kanatlarını döndürür. Gaz türbininin son derece kullanışlı olduğu görülmekle birlikte, deniz araçlarına uygulandığında çeşitli dezavantajları vardır. Deniz ortamında havada da tuz bulunması, türbin bileşenleri

üzerinde tortu birikmesine yol açmaktadır bundan dolayı motor parçalarının korozyona ve performans düşüşüne karşı korunması gerekir.

Adını mucidi Robert Stirling'den alan Stirling motoru 1816 yılında icat edilmiştir. Isıyı motorun çalışma gazına aktararak mekanik enerji çevirir. Tamamen yalıtılmış bir sistem içindeki gaz, daha sonra motorun pistonlarının hareketini başlatır. Temel avantajı, kapalı sistem içindeki sabit gaz miktarında yatar ve gerektiğinde basınç ve sıcaklığın etkileşmesine izin verir. Bununla birlikte, ısı dışarıdan sağlandığı için motorun ısınması ve güç değişimlerinde bir gecikme gözlemlenebilir. Stirling motorları, benzinli veya dizel motorlardan potansiyel olarak daha verimli olsa da, yalnızca sessiz çalışmanın kritik olduğu özel uygulamalarda kullanılabilirler. Denizaltılar ve yatlar için birincil veya yardımcı güç jeneratörleri olarak kullanılabilir. (Alturki, 2017).

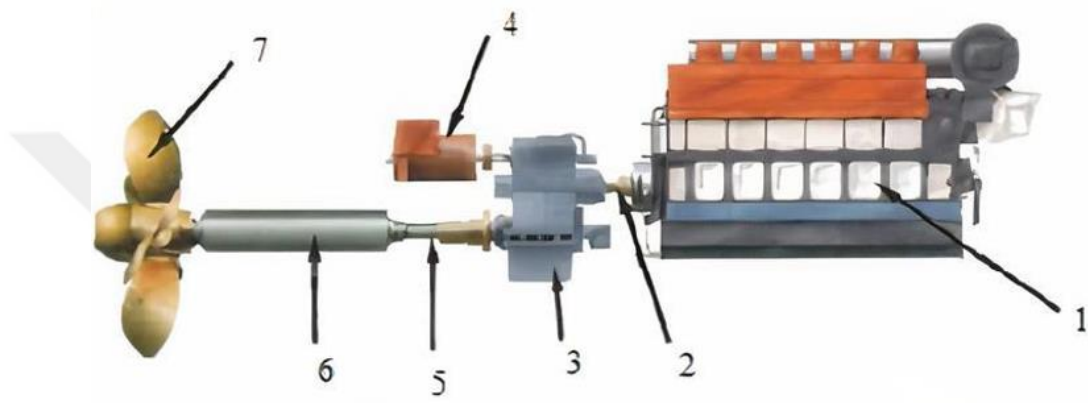
Günümüzde teknolojik açıdan verimli ve kullanım yerine göre pistonlu ve gaz türbinli motorlar ana tahrik veya jeneratör amacıyla deniz araçlarında kullanılmaktadır.

2.2. Dört Zamanlı Motorun Tarihçesi

Dört Zamanlı Motor çoğunlukla Alman mühendis Nicolaus Otto'ya atfedilir. Motorun çalıştırılması Belçikalı mühendis Jean J. Lenoir'ın iki zamanlı kömürlü gaz motorları üzerindeki çalışmasıyla gerçekleşmiştir. Otto, verimsizliğinin çeşitli nedenlerine dikkat çekerek Lenoir'ın tasarımını geliştirmeye çalışmıştır. Bunun nedenlerinden biri, iki zamanlı motorda kullanılan gazın sıkıştırılmaması ve dolayısıyla prosesin verimliliğinin azalmasıydı. Otto çevrimi yıllar içinde daha da geliştirildi ve sonunda 1877'de patenti alındı. Bu yenilik, otomotiv çağını başlatan motor geliştirmenin yolunu açtı. Dört zamanlı dizel motorların kullanıldığı belgelenen ilk deniz aracı Selandia'dır. Bir geminin inşasında ana sevk makinesinin seçimi kritik kararlardan biridir. Dört zamanlı ve iki zamanlı motorların her ikisi de piyasada yaygın olarak kullanılmaktadır ancak büyük deniz gemileri için özellikle de okyanusa açılanlar için iki zamanlı motor daha yaygın olarak kullanılır. Dört zamanlı motor, kompakt bir tesis boyutuna ve daha yüksek bir devir hızına sahip olmasına rağmen, birkaç faktörde iki zamanlı motor tarafından gölgede bırakılmaktadır (Alturki, 2017).

2.3. Gemi Ana Tahrik Sistemi

Gemi ana tahrik sistemleri kullanım yerlerine ve ihtiyaçlara göre pistonlu ve gaz türbinli olabilir. Şekil 2.1’de tahrik motorundan pervaneye kadar olan sistemin görseli bulunmaktadır. Deniz aracının isterine göre bir veya birden fazla ana tahrik motoru ile pervane bulunabilir. Motorda üretilen güç ara elemanlar ile pervaneye iletilir ve geminin hareketi sağlanmış olur.



- | | |
|-------------------------|--------------|
| 1- Dizel Motor | 5- Stern Tüp |
| 2- Motor Şaftı | 6- Şaft |
| 3- Devir Düşürücü Dişli | 7- Pervane |
| 4- Şaft Jeneratörü | |

Şekil 2.1. Deniz aracı tahrik sistemi (Dokkum, 2003)

2.4. Marin Motor Komponentleri

2.4.1. Hava Soğutucu

Dizel motorlar söz konusu olduğunda hava soğutucular motorun genel verimliliğinde ve performansında önemli rol oynar.

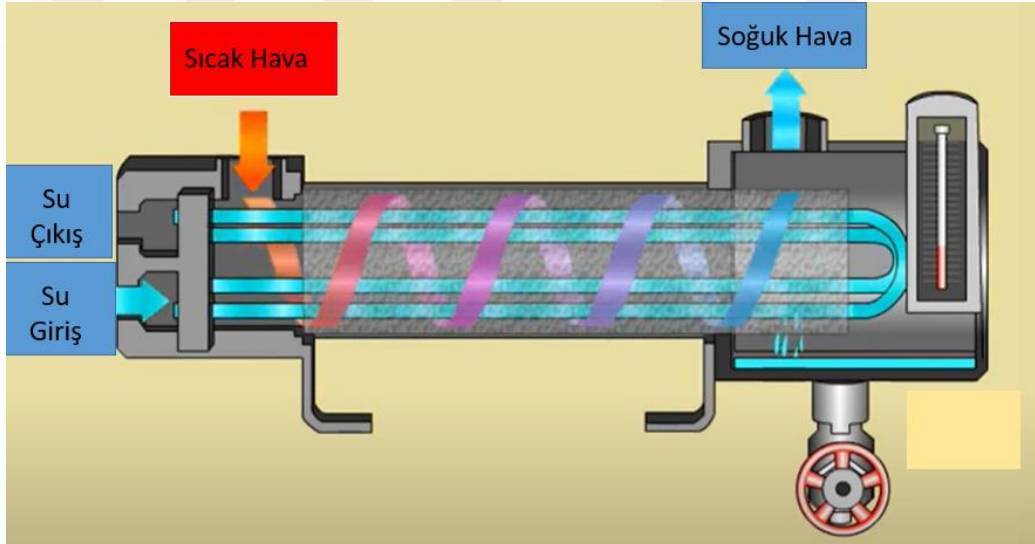
Hava soğutucu, turboşarjdan gelen basınçlı havayı motorun yanma odasına girmeden önce soğutan bir cihazdır. Turboşarj kompresöründen gelen basınçlı hava sıcaktır ve hava soğutucu onu soğutarak havanın yoğunluğunu artırır, bu da yanma odasına daha fazla

oksijenin girmesine izin vererek daha verimli yanma ve motordan daha fazla güç çıkışı sağlar.

Bu tip soğutucular, dizel motorun soğutma sisteminin temel bileşenleridir ve motorun optimum sıcaklıklarda ve performans seviyelerinde çalışmasını sağlamak için birlikte çalışırlar. Bu bileşenlerin düzenli bakımı ve muayenesi, düzgün çalıştıklarından emin olmak motora gelebilecek olası hasarları önlemek açısından önemlidir.

Ayrıca hava soğutucu emisyonlar açısından da önemlidir. Daha soğuk emiş havası, yanma sıcaklığını düşüreceğinden daha düşük emisyonlara neden olacak ve bu da üretilen NOx (nitrojen oksitler) miktarını azaltacaktır.

Hava soğutucular, deniz motorlarında önemli bir rol oynayan ve motor gücünü, verimliliğini ve ömrünü artıran bir bileşendir. Doğru hava soğutucu seçimi ve bakımı, deniz motorunun en iyi şekilde çalışmasını sağlar.



Şekil 2.2. Hava soğutucu şeması (Newsdetail,2024)

2.4.2. Deniz Suyu Pompası

Deniz suyu pompası, birden fazla uygulama için deniz suyunu aktarmak veya sirküle etmek için kullanılan makinedir. Deniz suyu pompası, deniz suyunu bir makinenin içinde

sirküle etmek için su soğutma sisteminde kullanılabilir. Ayrıca deniz suyundan mineralleri ve tuzu uzaklaştıran işlem olan tuzdan arındırma işleminde de kullanılabilir. Deniz suyunun korozyonuna karşı koymak için deniz suyu pompası esas olarak paslanmaz çelikten veya bronz gibi korozyona dayanıklı diğer malzemelerden yapılır. Bronz pompalar, paslanmaz çelik pompalara kıyasla daha düşük maliyetli olmalarından dolayı tercih edilebilirler.

Deniz suyu pompası veya tuzlu su pompası olarak da bilinen deniz suyu pompası, özellikle deniz suyunun pompalanması için tasarlanmıştır. Tekne motorları için soğutma sistemleri, tuzdan arındırma tesisleri ve açık deniz platformları gibi denizcilik uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Bir deniz suyu pompasının çalışması tipik olarak aşağıdaki adımları içerir.

Giriş: Deniz suyu pompası, deniz suyunu çevredeki ortamdan çeken bir giriş veya emme portuna sahiptir. Bu giriş portu genellikle döküntülerin, deniz canlılarının ve diğer büyük parçacıkların pompaya girip hasara neden olmasını önlemek için bir süzgeç veya filtreyle donatılmıştır.

Pervane: Pompanın kalbi olarak nitelendirilebilecek pervane, gövdenin içerisinde yer alan ve kavisli kanatlara sahip dönen bir bileşendir. Bu kanatlar, elektrik motoru, içten yanmalı motor veya farklı bir güç kaynağı tarafından çalıştırılan mile bağlıdır. Merkezkaç kuvveti pervane döndükçe oluşur.

Merkezkaç kuvveti: Pervane döndükçe kavisli kanatlar deniz suyunu pervanenin dış kenarlarına doğru iter. Bu merkezkaç kuvveti pervanenin merkezinde düşük basınç alanı oluşturarak deniz suyunun pompanın içine çekilmesine neden olur.

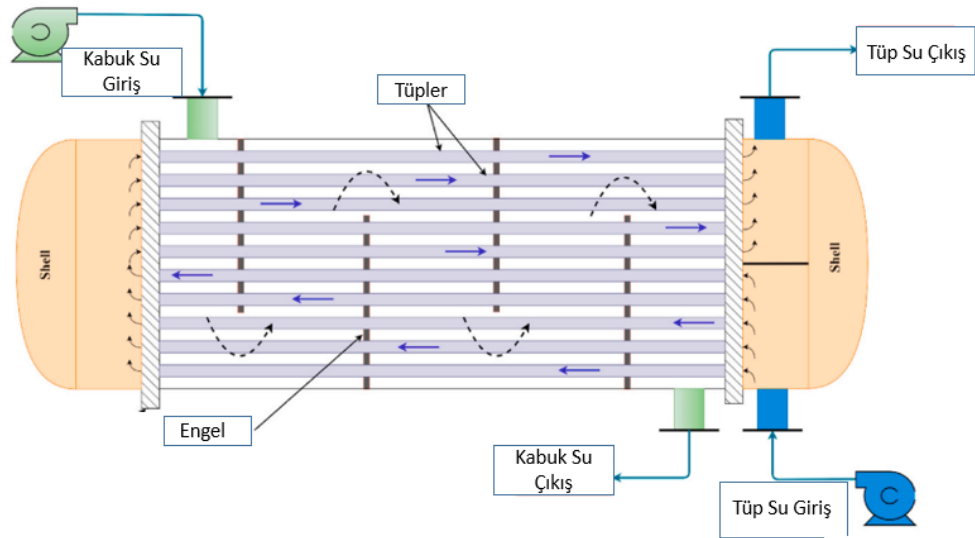
Basınç ve akış: Deniz suyu pervanenin merkezinden pompaya çekilirken, merkezkaç kuvveti onu pompanın çıkışına veya boşaltma portuna doğru iter. Pervane kanatlarının kavisli şekli ve dönüş hızı, basınç oluşturur ve deniz suyunu artan hız ve akış hızıyla pompadan dışarı çıkmaya zorlar.

Çıkış: Deniz suyu pompanın çıkış ağzından tahliye edilerek istenilen yere veya uygulamaya yönlendirilir. Örneğin deniz soğutma sistemlerinde deniz suyu, motoru veya makineyi soğutmak için kullanılabilir ve daha sonra tekrar denize atılabilir.

Deniz suyu pompalarının, bronz, paslanmaz çelik veya diğer uygun alaşımlar gibi korozyona dayanıklı malzemeler kullanılarak deniz suyunun aşındırıcı doğasıyla baş edecek şekilde tasarlandığını belirtmekte fayda vardır. Pompanın performansının düzenli bakımı ve izlenmesi, verimli çalışmayı sağlamak ve tuzlu suya maruz kalmanın neden olduğu hasarları önlemek açısından önemlidir (Pump work,2024).

2.4.3. Motor Suyu Isı Değiştiricisi

Bir geminin motorları da diğer sıradan motorlar gibi soğutulmaya ihtiyaç duyar. Gemi motorlarını soğutmak için kara araçlarından farklı olarak deniz suyu kullanır. Ana dizel motordaki soğutma işlemi kapalı tip bir soğutma sistemdir. Bu tip sistemlerde motor önce antifiriz suyu ile soğutulur, tatlı su daha sonra deniz suyu ile eşanjörler vasıtasıyla soğutulur. Bu kapalı tip soğutma sistemi, tüm modern orta ve yüksek devirli dizel motorlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

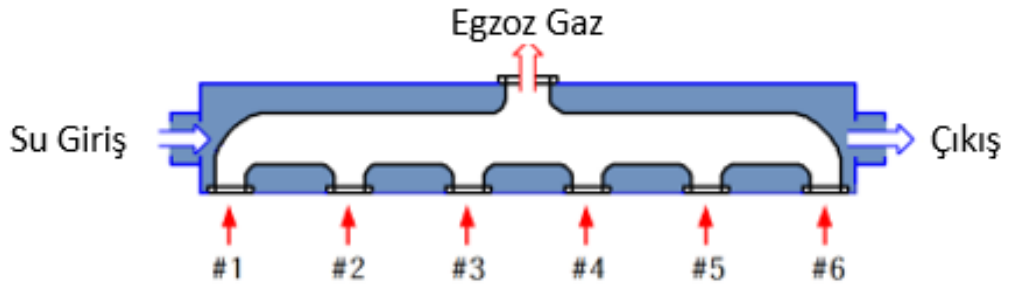


Şekil 2.3. Isı değiştirici şeması (Prajapati ve ark. 2024)

Isı değiştiriciyi aşındırıcı tuzlardan korumak için, ısı değiştiriciye çinko anot vidalanır. Bu anot, düzenli bakımın bir parçası olarak periyodik olarak değiştirilmelidir.

2.4.4. Sıvı Soğutmalı Egzoz Manifoldu

Sıvı soğutmalı egzoz manifoldları denizcilik, petrol sanayi ve diğer uygulamalara yönelik turboşarjlı motorlarda kullanılır. Kullanım amaçları, sıcak egzoz gazlarını motordan turboşarja yönlendirmektir. Sıcak yanma gazları turboşarjda genişir ve elde edilen iş, emme havasını sıkıştıran kompresörü tahrik etmek için kullanılır, böylece daha iyi bir genel motor performansı sağlanır. Marin sektöründe güvenlik düzenlemeleri, açıkta kalan herhangi bir motor yüzeyinin maksimum sıcaklığının yaklaşık 200°C üstü olmamasını talep ediyor. Egzoz gazı sıcaklıkları bu sıcaklığı önemli ölçüde aşar. Bu gereksinimi karşılamamanın bir yöntemi egzoz manifoldunu motor soğutma sıvısıyla çevrelemektir.

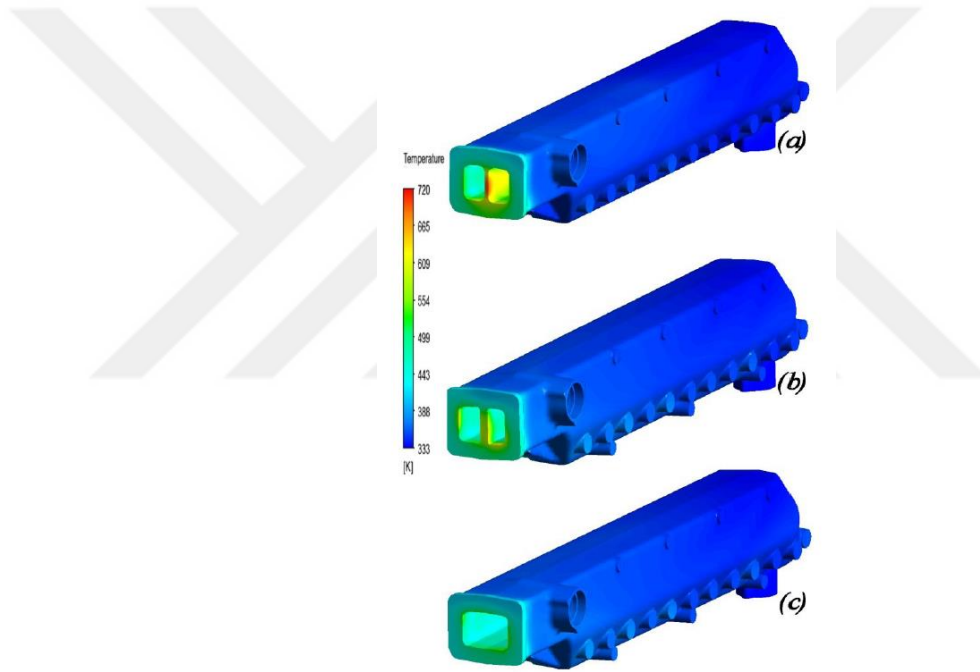


Şekil 2.4. Sıvı soğutmalı egzoz manifoldu şeması

Manifold içindeki akış, karmaşık 3 boyutlu geometri ve sıkıştırılabilirlik etkilerini artıran yüksek hızlar nedeniyle oldukça karmaşıktır. Egzoz manifoldu çok yüksek sıcaklıklara ulaşan bir bileşendir. Egzoz manifoldundan geçen yanma ürünleri yaklaşık 1000 Kelvin sıcaklıktadır. Denizcilik uygulamalarında egzoz manifoldunun yüzey sıcaklığının azaltılması önemlidir. Yüksek sıcaklıklar teknede motorun bulunduğu kapalı alandaki havanın ısınmasına neden olur ve tekne güvenliği açısından ciddi tehlike oluşturabilir. Motor performansını verimli bir şekilde kullanmak için bilgisayar destekli hesaplamalar yapılabilir. Bilgisayar destekli HAD ile manifold içindeki akış alanını anlamak, performans kayıplarının üstesinden gelmek ve manifold tasarımını geliştirmek için kullanılabilir.

2.5. Literatür Araştırması

Assari ve ark. (2018) endüstriyel problemleri çözmek için Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin kullanılması, doğru inceleme ve optimum tasarıma ulaşmanın en hızlı ve en az maliyetli yolu olduğunu öne çıkarmışlardır. Bu çalışmada, gövde malzemesini veya yeni ekipmanı değiştirmeden geometri konfigürasyonunda yapılacak hafif bir değişikliğin, daha iyi termal gradyen kontrolüne yol açabileceği gösterilmiştir. Manifold ampirik incelemesine ve endüstriyel birim raporlarına göre çatlak oluşumu, yanma gazı yollarına soğutucu sızıntısına neden olmaktadır. Böylece turbo şarjın ve motorun çalışması kesintiye uğrayacaktır.



Şekil 2.5. Sıvı soğutmalı egzoz manifold sıcaklık görseli (Assari ve ark. 2018)

Üç boyutlu model kullanılarak, manifold soğutucu geçişlerinde düşük basınçta aşırı soğutulmuş kaynama akışında iki fazlı akış özelliklerinin sayısal incelemesi gerçekleştirilmiştir. Düşük basınç koşulu için değiştirilmiş yeni bir kabarcık ayrılma çapı modeli, tanımlanan modele ve diğerlerinin korelasyonuna dayalı olarak gerçekleştirildi. Bu model Ansys-CFX yazılımı ile hayata geçirilmiştir. Sayısal çözüm yönteminin doğruluğunu anlamaya yönelik bir yaklaşım benimsenmiştir. En önemli sonuçlar şunlardır:

- Çift kanallı model olarak çıkış duvarında soğutma sıvısı için bir yol oluşturulması, daha iyi ısı gidermesine rağmen bu modelin düzgün bir sıcaklık dağılımı sağlayamayacağını göstermektedir.
- Çıkış ayırıcı duvarın tek kanallı model olarak kaldırılması egzoz gazlarının geçişinde sorun yaratmadan, bu çalışmanın asıl amacı olan sıcak nokta oluşturma sorununu ve çatlak oluşma riskini ortadan kaldırmaktadır.
- Çıkış ayırıcı duvarın ortadan kaldırılması, egzoz gazları için daha fazla alan ve manifold gövdesinde daha iyi sıcaklık dağılımı sağladığı görülmektedir.
- Manifold gövdesinin termal dağılım sonuçları, maksimum sıcaklığın 720 K'den 523 K'ye %27,36'ya kadar bir düşüş olduğunu göstermektedir.

Pai ve ark. (2018) Bu araştırmada, manifoldların tasarımı, sorun giderme ve optimizasyonu için daha iyi anlayış ve daha iyi karar verme amacıyla manifoldların termal gerilimlerini analiz etmek ve görselleştirmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ve sanal gerçeklik görselleştirmesinin entegrasyonuna odaklanmaktadır. Egzoz manifoldları turboşarjlı dizel motorlar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Egzoz manifoldunun amacı, sıcak gazları yanma odasından turboşarja veya kabul edilebilir bir egzoz çıkışına yönlendirmektir. Egzoz manifoldlarındaki yüksek gaz sıcaklıkları çok yüksek termal gerilimlere yol açar. HAD egzoz manifoldundaki sıcaklık dağılımını elde etmek için kullanılır. Daha sonra sıcaklık verilerini kullanarak SEA egzoz manifoldundaki termal gerilimleri belirlemek için gerçekteştirilir. SEA analizinin sonuçları kullanılarak egzoz manifoldundaki termal gerilimleri görselleştirmek için 3 boyutlu bir sanal model oluşturulmuştur. Bu tür bir entegrasyon için metodolojiler geliştirilmiş ve endüstriyel manifoldlara uygulanmıştır.



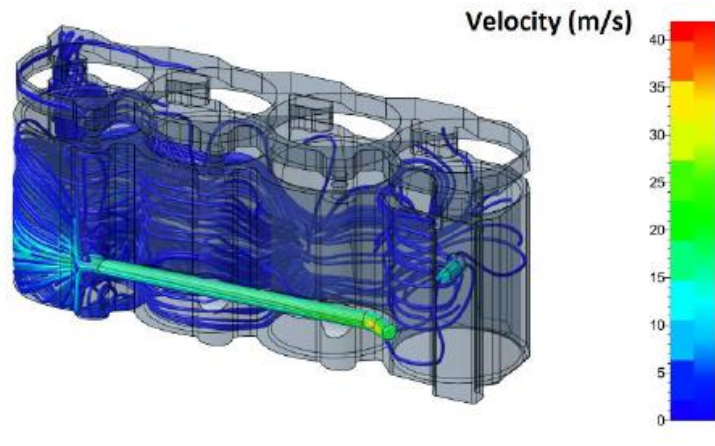
şekil 2.6. Akışkan sıcaklık dağılımı (Pai ve ark. 2018)

Fathallah ve ark. (2017) bu makalede araştırma analizi sonucunda şu sonuca varılmıştır: Simülasyon, ceket soğutma sisteminin tasarımıyla başlar. Tasarım silindir bloğu ve silindir kafası ölçülerine göre yapılmıştır. Tasarım, sıvının cekete girişi ve sıvının ceketten çıkana kadar soğumasını gösteren bir yapıdadır. Çalışmada su ceketinin soğutma sistemi simülasyonunda kullanılacak veriler kütle akışı, akışkanın sıcaklığı, ceket soğutmanın duvar sıcaklığı ve ısı transferidir. Tüm veriler 1 boyutlu simülasyon yazılımında simüle edilmesiyle elde edilecektir.



Şekil 2.7. Motor su ceketi basınç görseli (Fathallah ve ark. 2007)

Numeca yazılımı kullanılarak ceket soğutma sistemindeki sıvı akışını ve akışkanın sıcaklığını göstermek için verilere ihtiyaç duyulacaktır. 93 kW deniz dizel motorundaki ceket soğutma tasarımı ile ceket soğutma sistemindeki akış yeterli olduğu gözükmemektedir. Ancak bu tasarımda ceket soğutma sisteminde çok fazla türbülanslı akış vardır ve bu durum ceket soğutma sisteminin verimliliğinin düşük olmasına neden olabilir.



Şekil 2.8. Motor silindir çevresi hız görseli (Fatallah ve ark. 2007)

Simülasyondan, en yüksek motor devrinde ceket soğutma sistemine giren akışkanın hızı artıracaktır çünkü motorun yüksek devirlerinde silindir bloğunu soğutmak için daha fazla sıvı akışına ihtiyaç duymaktadır. Düşük motor devrinde de girin akışkanın hızının azalmasına neden olacaktır çünkü silindir bloğu sıcaklığı bu devirlerde yüksek devirlerdeki silindir bloğunun sıcaklığından daha düşüktür. Ceket soğutma sistemi tasarımı aynı boyuttaki 93 kW deniz dizel motorunda kullanılabilir ancak giriş ve çıkışın konumu değiştirilirse ceket soğutma sistemindeki akışkan akışı daha iyi olacaktır. Giriş ağzının düşük, çıkış ağzının yüksek olması ceket soğutma sisteminde farklı bir akışkan akışı sağlayabilecektir. Her silindirde giriş ve çıkış olması daha iyi olabilir, yani 4 giriş ve 4 çıkış tasarımı yapılabilir. Böylece akış, ceket soğutma sisteminin tüm alanına ulaşacaktır.

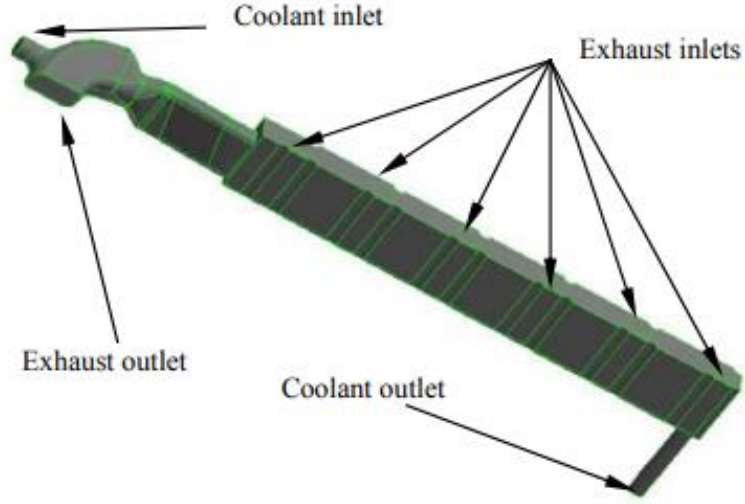
Nahim ve ark. (2015) bu çalışmada motorun farklı noktalarındaki basınç, sıcaklık, verim, yakıt oranı, emisyonlar ve ısı salınımını tahmin eden bir deniz dizel motoru modeli oluşturulmuştur. Motor soğutma, yağlama, enjeksiyon, emisyon, hava sistemi ve yanma olarak alt sistemlere ayrılmıştır. Her biri ayrı ayrı ele alınmakta ve daha sonra deniz dizel motorunun dinamik modelini oluşturmak için bir araya getirilmektedir. Simülasyonun doğruluğunu ve hızını önemli ölçüde artıran modellemeyi basitleştirmek amacıyla bazı ampirik ve yarı ampirik denklemler önerilmiştir. Simülasyon sonuçları, simülasyon tahminlerinin deneyle uyumlu olduğunu gösterdi. Bu araştırmanın gelecekteki geliştirilmesinde simülasyon, hatalı yakıt enjektörü, sızdıran silindir, aşınmış yakıt pompası

gibi en yaygın deniz dizel motoru arızaları için arıza parametrelerinin değerlerinin değişmesinin alt sistem motorunun çıkışı üzerindeki etkisini araştırmak için kullanılabilir. Böylece simülatör, dizel motorun tüm alt sistemlerindeki arızaların teşhis ve incelemek için kullanılabilir.

Cao ve ark. (2015) bu çalışmada, kargo gemisi uygulamasına yönelik motor atık ısıyla çalışan soğutma sisteminin platformunda geçici simülasyonu yapılmıştır. Soğutma sistemindeki çeşitli temel bileşenler modellenmiş ve doğrulanmıştır. Atık ısıyla çalışan emme çevrimli soğutma sisteminin yolcu gemisinde uygulanması, toplam enerjide %8,23 oranında tasarruf sağlayabilir. Gemi uygulamalarındaki absorpsiyonlu soğutma sistemindeki zorluklar da potansiyel çözümler önerilerek ele alınmaktadır.

Guojin ve ark. (2013) bu çalışmada yüksek güçlü, düşük hızlı deniz dizel motorunun artan güç, ekonomi ve emisyon gereksinimlerini karşılamak amacıyla, soğutma sistemini farklı çalışma koşullarında eşleştirmek ve optimize etmek amacıyla soğutma suyunu kontrol etmek için değişken akış yöntemi uygulamışlardır. En iyi yanma odası sıcaklığını elde etmek için soğutma ısı salınımının farklı koşullarda kontrol edilmesi, yalnızca genel güvenilirliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda yanma ısı kaybını da azaltır ve termal verimliliği artırdığını farketmişlerdir. Kısmi yükte soğutma suyu pompasının akışını azaltmak, soğutma sisteminin mekanik güç kaybını azaltarak tüm ekonomiyi iyileştirebileceğini söylemektedirler. NOx emisyonunu azaltmak için hava soğutucu ve gövde soğutma sisteminde birbirleriyle etkileşimi önlemek amacıyla bağımsız bir set kullanılması, hava soğutucu sonrası hava sıcaklığının istikrarlı kalmasını sağlayabileceğini öngörmüşlerdir.

Milanovic ve ark. (2003) tarafından gerçek bir motor çevriminde sıvı soğutmalı bir manifoldun gerçek geometrisi, HAD yazılımı Fluent kullanılarak sayısal olarak analiz edilmiştir. Doğrulama yapılmış ve çalışma parametrelerinin etkileri araştırmışlardır.



Şekil 2.9. Egzoz manifold su ceketi (Milanovic ve ark. 2003)

Yeni parametreler arasında soğutma sıvısı giriş sıcaklığı ve kütle akış hızının yanı sıra motorun dönüş hızını da göz önüne almışlardır. Çalışma, her parametrenin motor verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini göstermektedir. Bu çalışmanın ana katkısı, soğutucu hacminin simülasyona eklenmesi ve böylece daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlamasıdır. Parametrik çalışmaya daha fazla fiziksel anlam taşıması için yeni parametreler eklemiştir. Bu çalışma manifoldların içindeki akış özelliği dağılımlarının görselleştirilmiş resimlerini sağlamaktadır. Bazı akış modelleri endüstride karşılaşılan bazı sorunların yanıtlarını ve çözümlerini göstermektedir. Parametrik çalışmaların eğilimleri deneysel gözlemler ve ısı transferi teorisi ile tutarlıdır. Tüm sonuçlar HAD'ın manifold tasarımı ve performansının iyileştirilmesi için yararlı bir araç olabileceğini göstermektedir.

Lawrence ve ark. (2001) bu yazıda, dizel motor performans tahminleri için bilgisayar tabanlı bir bilgisayar simülasyon paketi olan DECSIM anlatılmıştır. Program modüler bir konsept kullanılarak tasarlanmıştır ve bu nedenle genişletilmesi kolaydır. DECSIM'in tahminleri iki adet orta hızlı dört zamanlı ve iki adet yavaş hızlı iki zamanlı deniz dizel motoruyla karşılaştırılmıştır. Bu motorların sabit durum çalışma koşulları altında tahmin edilen performansı, deneysel olarak ölçülen değerlerle iyi bir uyum içerisindeydi. En büyük sapma iki zamanlı dizel motorlarda görüldü. Bunun nedeni DECSIM'de iki zamanlı motorlar için kullanılan ve şarj verimliliğini olduğundan düşük tahmin etme

eğiliminde olan tek bölgeli süpürme modelinden kaynaklanıyor olabilir. DECSIM'in devam eden gelişiminin bir parçası olarak iki zamanlı motorlar için daha kapsamlı bir model araştırılmaktadır. Ancak elde edilen sonuçlar analizden elde edilecek sonuçlar için DECSIM'in kullanımını doğrulamaktadır.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

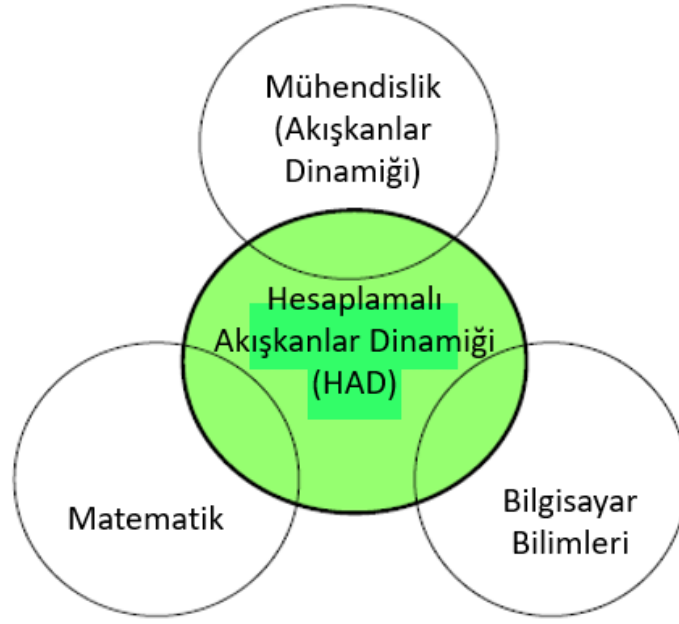
3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Günümüzde hesaplamalı akışkanlar dinamiği, endüstriyel uygulamalarda ve akademik araştırmalarda önemli bir yer tutmaktadır. Genellikle HAD (CFD) kısaltması ile anılan bu popüler çalışma alanı, başlangıçta sadece uzay ve havacılıkla ilgili yüksek teknoloji mühendisliği uygulamalarında ün salmış olsa da şimdilerde artık modern mühendislik uygulamalarında karşılaşılan karmaşık problemlerin çözümü için yaygın olarak kullanılan bir yöntem haline gelmeye başlamıştır. Akışkanlar mekaniği ve ısı transferi disiplinlerinden türeyen HAD, özellikle proses, kimya, inşaat ve çevre mühendisliği gibi önemli alanlarda da yer edinmeye başlamıştır.

Hesaplamalı simülasyonlar yoluyla yeni ve daha iyi sistem tasarımlarının oluşturulması ve mevcut ekipmanların optimizasyonu verimlilik artışıyla birlikte işletme maliyetlerinde de düşüş sağlamaktadır. Küresel ısınma ve dünyadaki nüfus artışı kaygılarıyla birlikte, enerji üretim sektörlerinde çalışan mühendisler geliştirme ve yenileme masraflarını azaltmada HAD analizlerine artık daha fazla bel bağlamaktadır. Sayısal hesaplama dayalı bu çalışmalar, günümüzde daha çok temiz ve yenilenebilir enerji teknolojileri ile ilgili sorunları ele almak, emisyon kontrolü ve çevresel kirleticilerin azaltılmasını sağlamak üzere sıkı yönetmelik şartlarını karşılamak için yapılmaktadır.

Bununla birlikte “hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) aslında nedir?” sorusu halen ortada durmaktadır. Geçmişe bakıldığında HAD'ın, akışkanlar mekaniği disiplinlerini sadece matematikle değil, aynı zamanda Şekil 3.1'de gösterildiği gibi bilgisayar bilimleriyle de bütünleştiren yeni bir dal haline geldiği görülmektedir.

Akışkanlar mekaniği esas itibariyle akışkanların hareketli (akışkanlar dinamiği) veya durgun (akışkanlar statik) hallerinin incelenmesiyle ilgilenir. HAD daha çok bunlardan ilki olan hareket halindeki akışkanlara ve özellikle akış davranışının ısı transferi ve yanmalı akışlardaki olası kimyasal reaksiyonları da içeren prosesleri nasıl etkilediği konularına odaklanmıştır.



Şekil 3.1. HAD disiplinleri (Tu ve ark. 2018)

Bu durum terminolojide karşılaşılan akışkanlar dinamiği tarifine doğrudan etki yapmaktadır. Buna ilave olarak akışkan hareketinin fiziksel yönleri çoğunlukla, göz önüne alınan bir prosesi tanımlayan ve HAD denklemleri olarak adlandırılan kısmi diferansiyel denklem biçimindeki temel matematiksel denklemlerle tarif edilebilir. Çözümleme için bu matematiksel denklemler bilgisayar bilimcileri tarafından ileri seviye programlama dilleri kullanılarak bilgisayar kodlarına ve yazılım paketlerine dönüştürülmektedir. (Tu ve ark. 2018)

Simülasyonlarda kullanılan temel denklemler, momentum, ısı ve kütle transferi gibi süreçleri tanımlayan Navier-Stokes denklemleridir. Bu kısmi diferansiyel denklemler, 19. yüzyılın başlarında türetilmiş olsalar da, analitik çözümleri oldukça karmaşık ve çoğu zaman imkansızdır. Neyse ki, modern bilgisayar teknolojisi sayesinde bu karmaşık denklemler sayısal yöntemler kullanılarak çözülebilmektedir.

Euler yöntemi, akışkan akışlarının davranışını modellemek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Deneysel verilerle beslendiğinde, akış hızı, basınç ve sıcaklık gibi önemli değişkenler hakkında bilgi sağlayarak birçok pratik uygulama için ideal bir çözüm sunar.

3.1.1 HAD Nerede ve Ne Zaman Kullanılır

- Modelleme ve analitik çalışmalarda kullanılabilir
- Modellerde simülasyon yapmak için kullanılabilir.
- HAD ile deneysel çalışmalara nispeten daha uygun maliyetli ve daha hızlı sonuca ulaşılabilir.
- HAD ile deneysel çalışmalara nispeten gözlemlenmek istenen bölge daha ayrıntılı incelenebilir.
- Test sırasında ölçülemeyen ve gözlemlenemeyen verileri HAD sayesinde hızlı ve kolay ulaşılabilir.
- Test yapılmasının zor ya da imkânsız olduğu koşullarda bilgisayarda destekli modeller kullanılarak sonuçlar değerlendirilebilir.
- Denizaltılarda pervane ve kule konumlarının akustik performansa etkisini deneysel olarak belirlemek oldukça zor ve maliyetlidir. Tam ölçekli benzetimler, bu karmaşık etkileşimi sanal ortamda yüksek hassasiyetle simüle ederek tasarım optimizasyonuna önemli katkılar sağlar.
- Kasırga simülasyonlarının yanı sıra, tam ölçekli benzetimler sel, deprem ve tsunami gibi diğer doğal afetlerin etkilerini de incelemek için kullanılabilir. Bu sayede afetlere karşı daha hazırlıklı olmak ve riskleri en aza indirmek mümkündür.
- Bu yöntem, deneysel verilerle doğrulanarak akışkan fiziği modellerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmaya yardımcı olabilir.
-

3.1.2 Nümerik Yöntemler

Sonlu hacimler ve sonlu farklar, sonlu elemanlar, yöntemleri en yaygın bilinen nümerik yöntemlerdir.

3.1.2.1 Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu hacimler yöntemi korunum denklemlerinin integral formunu doğrudan fiziksel uzayda ayrıklaştıran bir yöntemdir. İlk kez McDonald (1971), MacCormack ve Paullay (1972) gibi araştırmacılar tarafından zamana bağlı, iki boyutlu Euler denklemlerinin

çözümü için önerilmiş ve daha sonra Rizzi ve Inouye (1973) tarafından üç boyutlu akışlar için genişletilmiştir. Bu yöntemde hesaplama bölgesi, sonlu sayıda ve birbirine komşu kontrol hacimlerine bölünür. Her bir kontrol hacmi için ilgili özelliklerin tam korunumu ifade edilir ve merkez noktasında değişken değerleri hesaplanır. Kontrol hacmi yüzeylerindeki değerleri ifade etmek içinse merkezdeki değerler kullanılarak interpolasyon yapılır. Yüzey ve hacim integrallerinin yaklaşık çözümünü bulmak için ikinci dereceden yüzey formüller uygulanır. Sonuç olarak her bir kontrol hacmi için komşu düğümlerin değerlerini de içeren bir cebirsel denklem elde edilir.

Sonlu hacimler yöntemi, ağ kesişim noktaları yerine kontrol hacimleri ile çalıştığından dolayı her türlü çözüm ağına uygulanabilir. Düzenli çözüm ağları yerine kontrol hacimlerinin şeklinin ve yerinin belirlenmesinde çok sayıda olanak tanıyan düzensiz çözüm ağları kullanılabilir. Çözüm ağı sadece kontrol hacmi sınırlarına göre oluşturulduğundan, aynı sınırları paylaşan kontrol hacimlerine aynı yüzey integralleri uygulandığı müddetçe korunum yasaları sağlanır. Sonlu farklar yöntemine göre dezavantajı ise üç boyutta, ikinci mertebeden daha yüksek fark yaklaşımlarının geliştirilmesinin daha zor olmasıdır. Bunun nedeni, interpolasyon ve integrasyon içeren iki aşamalı bir yaklaşımın gerekliliğidir. Buna rağmen sonlu hacimler yönteminin avantajları, dezavantajlarından fazladır. Yöntemin önemli bir özelliği, 'sonlu eleman' tipindeki çözüm ağlarının kullanılabilmesidir. Bu çözüm ağı iki boyutta üçgen veya dörtgen şeklindeki elemanların, üç boyutta ise dörtyüzlü ve altı yüzlü elemanların birleştirilmesi ile oluşturulabilir. Böyle bir düzensiz çözüm ağı, karmaşık geometrilerin ele alınmasında büyük bir esneklik sunar. Bir diğer ilgi çekici özellik ise sonlu hacimlerin, sonlu farklar yöntemindeki cisme uygun koordinat sistemi dönüşümündeki gibi bir denklem dönüşümüne ihtiyaç duymamasıdır (Tu ve ark. 2018).

3.1.2.2 Sonlu Farklar Yöntemi

Kısmi diferansiyel denklemlerin sayısal çözümü için geliştirilmiş yöntemlerden en eskisidir. İlk olarak 1768 yılında Euler tarafından diferansiyel denklemleri elle hesaplayarak sayısal çözüm elde etmek için geliştirildiği düşünülmektedir. Bu yöntemde akış bölgesini oluşturan çözüm ağının her bir düğüm noktasında Taylor seri açılımı

kullanılarak temel denklemlerin kısmi türevleri için sonlu farklar yaklaşımı yapılır. Yerlerine sonlu farklar konulmuş olan bu türevler, çözüm için her bir düğüm noktasında bir cebirsel denklem verir. Esasen sonlu farklar yöntemi her tipteki ağ sistemine uygulanabilir. Ancak pratikte, yüksek mertebeden düzene sahip çözüm ağlarına ihtiyaç duyulduğundan genellikle düzenli çözüm ağlarında kullanılmaktadır. Düğüm noktaları arasındaki adımlar üniform olmak zorunda değildir, ancak doğruluğu bozabileceği için çözüm ağına uygulanacak uzatma veya çarpıtma miktarları belirli limitler içerisinde olmalıdır. Sonlu farklar yöntemindeki düzenli bir çözüm ağ, topolojik olarak genel bir koordinat sistemine uymak zorundadır. Genel koordinat sistemine bir örnek olarak, kartezyen çözüm ağlarından oluşmuş altı yüzlü bir hesaplama bölgesi verilebilir. Öte yandan koordinatlar arası geçişi sağlayacak, geometriye özel bir koordinat sistemi varsa önemli geometrik kısıtlamalar ortadan kaldırılabilir ve karmaşık şekiller modellenabilir. Sonlu farklar yönteminde, düzene sahip çözüm ağlarında yüksek mertebeden fark yaklaşımlarının kullanımına müsaade ettiği için daha yüksek doğruluk derecesinde çözümler elde edilir. Ancak buradaki önemli bir dezavantaj, dikkat edilmediği takdirde korunum özelliğinin sağlanamamasıdır (Tu ve ark. 2018).

3.1.2.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Pek çok açıdan sonlu hacimler yöntemine benzeyen sonlu elemanlar yöntemi ilk başta yapısal analiz problemlerinde gerilme ve şekil değiştirme miktarını belirlemek için bir mühendislik çözümü olarak geliştirilmiştir. Hem sonlu elemanlar hem de sonlu hacimler yöntemi düzensiz hesaplama bölgeleri için uygundur, bir başka deyişle karmaşık geometrilerde kullanılabilir. Sonlu elemanlar yönteminin ayırt edici bir özelliği, temel denklemlerin tüm hesaplama bölgesinde integre edilmesinden önce şekil fonksiyonları ile çarpılması şeklinde bir yaklaşım yapılmasıdır (Tu ve ark. 2018).

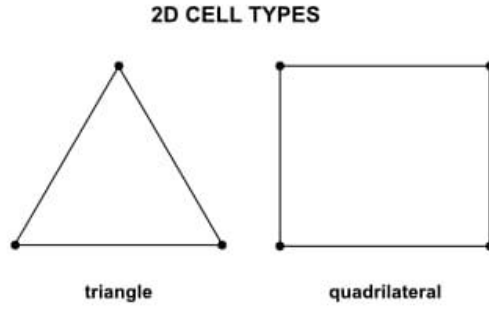
3.1.3 Bir HAD Uygulamasının Temel Aşamaları

3.1.3.1 Ön İşlem

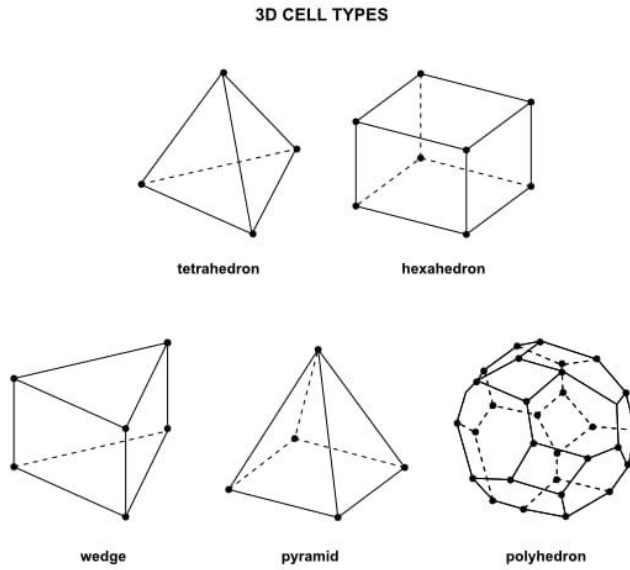
Tasarımı analize hazırlamak için ilk adımdır. Geometri düzenlenip ağ yapısı oluşturulur. Akış ve ısıl probleminin çözümü için gerekli olan sınır koşulları tanımlanır. Çözüm

öncesi yapılması gerekenler bu aşamada tamamlanır. Geometri çözüme uygun hale getirilir.

Hesaplama alanları, matematiksel çözümlerin daha kolay yapılabilmesi için küçük alt alanlara bölünür. Bu alt alanlara ağ (mesh) yapısı denir. Ağ yapısında yapılan hesaplamalar birleştirilerek tüm hesaplama alanı için nihai çözüme ulaşılır.



Şekil 3.2. 2 boyutlu hücre yapısı (Fluent)



Şekil 3.3. 3 boyutlu hücre yapısı (Fluent)

3.1.3.2 Çözüm

Problemin cinsine ve karmaşıklığına uygun bir çözüm metodu ile hesaplamalar yapılır.

3.1.3.3 Son İşlem ve Değerlendirme

Akışkan akış problemlerinin sayısal çözümü tamamlandıktan sonra, elde edilen sonuçların titizlikle değerlendirilmesi ve analiz edilmesi oldukça önemlidir. Bu değerlendirme aşaması, problemin doğru şekilde çözüldüğünden ve elde edilen sonuçların gerçeğe uygun olduğundan emin olmamızı sağlar.

3.1.3.4 Test İle Doğrulama

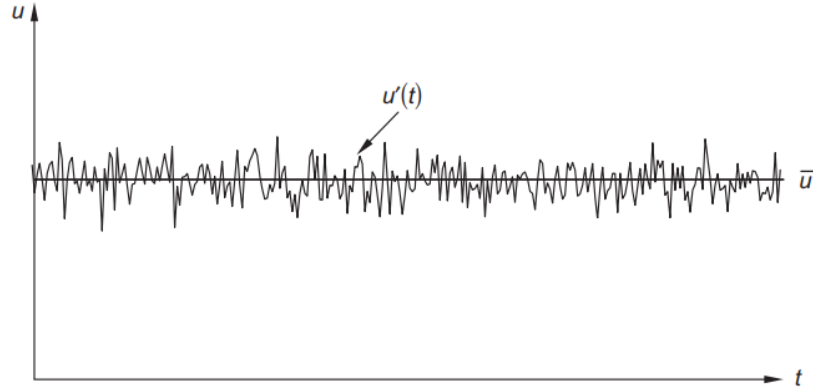
Elde edilen sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini teyit etmek için deneysel verilerle karşılaştırılması kritik önem taşır. Bu karşılaştırma aşaması, simülasyonun problemin karmaşık gerçekliğini ne kadar iyi yakaladığını ve problemin asıl çözümüne ne kadar katkıda bulunduğunu değerlendirmemizi sağlar.

3.2 Türbülans ve Kullanılan Modeller

Mühendislik açısından önemli birçok akış doğası gereği türbülanslıdır. Türbülanslı akış rejimi bu nedenle akademisyenler arasında sadece teorik açıdan dikkat çekilmekle kalmaz, aynı zamanda günlük problemlerin çözümünde türbülans etkilerini belirleme ihtiyacı duyan mühendisler için de önemli bir konudur. Laminer akışlar daha önce söz edildiği gibi tamamıyla süreklilik ve momentum denklemleri ile tanımlanır, Bu denklemler basit durumlarda analitik çözülebilir. Öte yandan daha karmaşık akışlar HAD teknikleri ile sayısal olarak ele alınmalıdır. Bir laminer akışa ait akım çizgisinde oluşan bozukluklarla ilişkili küçük çalkantıların sonunda kaotik ve rastgele bir hareket olan türbülansa yol açabileceği iyi bilinmektedir. Bu türden düzensizlikler akışkan hareketine ait serbest akım kaynaklı olabileceği gibi, akış yönünde güçlenen türbülanslı akışın olduğu yüzey pürüzlülüğünden de ileri gelebilir.

Türbülans, akışkan içerisindeki rastgele çalkantıların varlığı ile ilişkilidir. Bu davranış, Şekil 3.4'te görülen türbülanslı akış içerisinde herhangi bir konumda zamanın fonksiyonu olarak tipik noktasal hız ölçümü ile örneklendirilebilir. Akışın rastgele doğası, denklemlere bağlı hesaplamaları hemen hemen olanaksız kılar. Korunum denklemleri uygulanabilir olduğu halde, Şekil 3.4'te gösterilen zamana bağlı hız dağılımında olduğu

gibi bağımlı değişken anlık hız gibi ele alınmalıdır. Zira çalkalanan hızın zamanla rastgele değişiminden ötürü tahmin edilmesi son derece zordur (Tu ve ark. 2018).



Şekil 3.4 Türbülanslı akışın herhangi bir noktasında hızın zamana bağlı çalkantıları (Tu ve ark. 2018)

Süreklilik yaklaşımı ile düşük Reynolds sayılarında viskoz akışkanın hareket denklemini basitçe çözülebilir. Reynolds sayısı arttıkça, atalet kuvvetleri viskoz gerilmelere hakim hale gelir ve türbülans adı verilen kararsız akış rejimi oluşur. Akış hızı ve basınç dalgalanmaları, akışın türbülanslı hale gelmesine ve üç boyutlu bir karakter kazanmasına neden olur. Bu tür akışlara daimi olmayan akış denir. Bu durum oluştuğunda akışın türbülanslı olduğunu söyleyebiliriz. Genellikle mühendislikte bütün akışlar türbülanslıdır. Roketler, uçaklar, gemiler ve otomobillerin etrafındaki akışlar, ısı eşanjörleri, türbin palleri ve termik santrallerden atmosfere salınan yanma gazları, yüksek Reynolds sayısına sahip ve viskoz kuvvetlerin atalet kuvvetlerine yenildiği türbülanslı akış rejimine girer. Türbülans her zaman dikkate alınması gereken bir kriterdir. Günümüzde bir çok araştırma yapılmasına rağmen klasik fizikte türbülans tam anlamıyla çözülememiş bir ana problem olarak önemini korumaktadır. (Wilcox, 2002). HAD programlarında, birçok farklı türbülans modeli sunar. Bu modeller, türbülanslı akışların simülasyonunda kullanılır ve akışkan hareketinin daha doğru bir şekilde modellenmesine yardımcı olur.

3.2.1. Standart k-ε Modeli

İki denklemlı türbülans modelleri, iki ayrı taşıma denkleminin çözülmesiyle hem türbülans uzunluğunun hem de zaman leğinin belirlenmesine olanak tanır. ANSYS Fluent'teki standart model, bu model sınıfına girer ve Launder ve Spalding tarafından önerildiğinden beri pratik mühendislik akış hesaplamalarının temel taşı haline gelmiştir. Çok çeşitli türbülanslı akışlar için sağlamlık, ekonomi ve makul doğruluk, endüstriyel akış ve ısı transferi simülasyonlarındaki popülerliğini açıklamaktadır. Yarı deneysel bir modeldir. Standart model, türbülans kinetik enerjisi (k) ve onun dağılma hızı (ε) için model taşıma denklemlerine dayanan bir modeldir. k-ε modelinin türetilmesinde, akışın tamamen türbülanslı olduğu ve moleküler viskozitenin etkilerinin ihmal edilebilir olduğu varsayımı vardır. Bu nedenle standart model yalnızca tam türbülanslı akışlar için geçerlidir (Fluent).

3.2.2. RNG k-ε Modeli

RNG modeli, renormalizasyon grup teorisi adı verilen istatistiksel bir teknik kullanılarak türetilmiştir. Biçim olarak standart modele benzer, ancak aşağıdaki iyileştirmeleri içerir:

- RNG modelinin denkleminde, hızla zorlanan akışlar için doğruluğu artıran ek bir terim bulunur.
- Girdabın türbülans üzerindeki etkisi RNG modeline dahil edilerek dönen akışların doğruluğu artırılır.
- RNG teorisi türbülanslı Prandtl sayıları için analitik bir formül sağlarken, standart model kullanıcı tarafından belirlenen sabit değerleri kullanır.
- Standart k-ε modeli, yüksek Reynolds sayısı modelidir. RNG teorisi, düşük Reynolds sayısı etkilerini hesaba katan etkili viskozite için analitik olarak türetilmiş bir diferansiyel formül sağlar. Bununla birlikte, bu özelliğin etkili kullanımı, duvara yakın bölgenin uygun şekilde işlenmesine bağlıdır.

Bu zellikler RNG k-ε modelini standart k-ε modelinden daha geniş bir akış sınıfı için daha doğru ve güvenilir kılar. RNG tabanlı k-ε türbülans modeli, Navier-Stokes denklemlerinden türetilir(Fluent).

3.2.3. Realizable k-ε Modeli

Realizable k-ε modeli standart k-ε modelinden iki önemli açıdan farklılık gösterir:

- Realizable k-ε modeli türbülanslı viskozite için alternatif bir formülasyon içerir.
- Dağılım hızı için değiştirilmiş bir aktarım denklemi ε , ortalama kare girdap dalgalanmasının aktarımı için tam bir denklemden türetilmiştir.
- “Realizable” terimi, modelin türbülanslı akışların fiziği ile tutarlı olarak Reynolds gerilmeleri üzerindeki belirli matematiksel kısıtlamaları karşıladığı anlamına gelir(Fluent).

3.2.4. Standard k-ω Modeli

ANSYS Fluent'teki standart model, düşük Reynolds sayısı etkileri, sıkıştırılabilirlik ve kesme akış yayılımı için modifikasyonları içeren Wilcox modeline dayanmaktadır. Wilcox modelinin zayıf noktalarından biri, çözümlerin kayma katmanı dışındaki k ve ω değerlerine duyarlılığıdır (serbest akış duyarlılığı). ANSYS Fluent'te uygulanan yeni formülasyon bu bağımlılığı azaltmış olsa da yine de önemli bir etkiye sahip olabilir. Standart model, türbülans kinetik enerjisi (k) ve spesifik dağılım hızı (ω) için model taşıma denklemlerine dayanan ampirik bir modeldir ve bu aynı zamanda k'nin ω ' ye oranı olarak da düşünülebilir. k- ω modeli yıllar içinde değiştirildiğinden, hem denklemlere üretim terimleri eklenmiştir, bu da modelin serbest kayma akışlarını tahmin etme doğruluğunu arttırmıştır (Fluent).

3.2.5. SST k-ω Modeli

Kayma gerilimi taşınımı (SST) k- ω modeli, duvara yakın bölgedeki k- ω modelinin sağlam ve doğru formülasyonunu uzak alandaki k-ε modelinin serbest akış bağımsızlığıyla etkili bir şekilde harmanlamak için Menter tarafından geliştirilmiştir. Bunu başarmak için k-ε modeli k- ω formülasyonuna dönüştürülür. SST k- ω modeli standart k- ω modeline benzer ancak aşağıdaki iyileştirmeleri içerir:

- Standart k- ω modeli ve dönüştürülmüş k-ε modelinin her ikisi de bir harmanlama fonksiyonuyla çarpılır ve her iki model birbirine eklenir. Harmanlama fonksiyonu,

standart $k-\omega$ modelini etkinleştiren duvara yakın bölgede bir ve dönüştürülmüş $k-\epsilon$ modelini etkinleştiren yüzeyden sıfır uzakta olacak şekilde tasarlanmıştır.

- SST modeli ω denkleminde sönümlü bir çapraz difüzyon türevi terimini içermektedir.
- Türbülanslı viskozitenin tanımı, türbülanslı kayma geriliminin taşınmasını hesaba katacak şekilde değiştirilmiştir.

Bu özellikler SST modelini standart modele göre daha geniş bir akış sınıfı (örneğin ters basınç gradyanlı akışlar, kanat profilleri, transonik şok dalgaları) için daha doğru ve güvenilir kılar (Fluent).

3.2.6. Reynolds Stress Modeli

Reynolds stres modeli (RSM), ANSYS Fluent'in sağladığı en ayrıntılı RANS türbülans modelidir. İzotropik girdap-viskozite hipotezini terk eden RSM, Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerini, dağılma hızı denklemiyle birlikte Reynolds gerilmeleri için taşıma denklemlerini çözerek kapatır. Bu, 3 boyutta da çözülen yedi ek taşıma denklemine kıyasla 2 boyutlu akışlarda beş ek taşıma denkleminin gerekli olduğu anlamına gelir.

RSM, akış çizgisi eğriliği, girdap, dönme ve gerinim hızındaki hızlı değişikliklerin etkilerini, tek denklemler ve iki denklemlerden daha kesin bir şekilde hesaba kattığından, karmaşık akışlar için doğru tahminler verme potansiyeli daha yüksektir. Bununla birlikte, RSM tahminlerinin doğruluğu, Reynolds gerilmeleri için tam taşıma denklemlerindeki çeşitli terimleri modellemek için kullanılan kapanma varsayımları nedeniyle hala sınırlıdır. Basınç-gerinim ve dağılma oranı terimlerinin modellenmesi özellikle zordur ve çoğu zaman RSM tahminlerinin doğruluğundan ödün verilmesinden sorumlu olduğu düşünülmektedir.

RSM, ek hesaplama masrafını garanti altına almak için her zaman tüm akış sınıflarında daha basit modellerden açıkça üstün olan sonuçlar vermeyebilir. Ancak ilgi konusu akış özellikleri Reynolds gerilmelerindeki anizotropinin sonucu olduğunda RSM'nin

kullanılması şarttır. Örnekler arasında siklon akışları, yanma odalarındaki yüksek derecede girdaplı akışlar, dönen akış geçitleri ve kanallarda stres kaynaklı ikincil akışlar yer alır. Reynolds gerilim taşıma denklemlerinin tam formu, tam momentum denkleminin momentleri alınarak elde edilebilir. Bu, dalgalanmalar için tam momentum denklemlerinin dalgalanan hızlarla çarpıldığı ve ortalamasının alındığı, daha sonra ürünün Reynolds ortalamasının alındığı bir süreçtir (Fluent).

3.2.7. Detached Eddy Simulation (DES) Modeli

ANSYS Fluent, bağımsız girdap simülasyonu için dört farklı model sunar: Spalart-Allmaras modeli, Realizable k- ϵ model, SST k- ω modeli ve Transition SST modelidir. DES yaklaşımında sınır tabakasında kararsız RANS modelleri kullanılırken, ayrılan bölgelere LES işlemi uygulanır. LES bölgesi normalde büyük kararsız türbülans ölçeklerinin baskın bir rol oynadığı çekirdek türbülans bölgesi ile ilişkilidir. Bu bölgede DES modelleri LES benzeri alt ızgara modellerini kapsar. Duvara yakın bölgede ilgili RANS modellerini kapsamıştır.

DES modelleri, duvara yakın çözümlenmeli LES maliyetinin çok fazla olacağı yüksek Reynolds sayılı sınırlı akışları ele almak üzere özel olarak tasarlanmıştır. LES modelinin farkı, yalnızca sınır katmanlarındaki gerekli RANS çözünürlüğüne dayanmasıdır. Bununla birlikte, DES'in uygulanması hala önemli miktarda CPU kaynağı gerektirebilir ve bu nedenle genel bir kılavuz olarak, çoğu pratik hesaplama için Reynolds ortalamalı yaklaşımı kullanan geleneksel türbülans modellerinin kullanılması tavsiye edilir. Çoğunlukla hibrit LES/RANS modelleri olarak anılan DES modelleri, yüksek çözünürlüklü harici aerodinamik simülasyonları gibi uygulamalar için RANS modellemesini LES ile birleştirir. ANSYS Fluent'te DES modeli, tek denklemlilik Spalart-Allmaras modelini, Realizable k- ϵ modeli, SST k- ω modeli ve Transition SST modelini temel alır. DES modellerini kullanırken hesaplama maliyetleri, LES hesaplama maliyetlerinden daha az, ancak RANS'tan daha yüksektir (Fluent).

3.2.8. Large Eddy Simulation (LES) Modeli

Türbülanslı akışlar, geniş bir uzunluk ve zaman ölçeği aralığına sahip girdaplarla karakterize edilir. En büyük girdapların boyutu tipik olarak ortalama akışın karakteristik uzunluğuyla (örneğin kesme tabakası kalınlığı) karşılaştırılabilir. En küçük ölçekler türbülans kinetik enerjisinin dağılmasından sorumludur. Teorik olarak, doğrudan sayısal simülasyon (DNS) olarak bilinen bir yaklaşımı kullanarak türbülanslı ölçeklerin tüm spektrumunu doğrudan çözmek mümkündür. DNS'de modellemeye gerek yoktur. Ancak DNS, yüksek Reynolds sayısı akışlarını içeren pratik mühendislik problemleri için uygun değildir. DNS'nin tüm ölçek aralığını çözmesi için gereken maliyet, türbülanslı Reynolds sayısı olan ile orantılıdır. Açıkçası, yüksek Reynolds sayıları için maliyet çok fazla hale gelir. LES'te büyük girdaplar doğrudan çözümlenirken küçük girdaplar modellenir. Bu nedenle büyük girdap simülasyonu (LES), çözümlenen ölçeklerin oranı açısından DNS ile RANS arasında yer alır. LES'in arkasındaki mantık şu şekilde özetlenebilir:

- Momentum, kütle, enerji ve diğer pasif skalerler çoğunlukla büyük girdaplar tarafından taşınır.
- Büyük girdaplar daha çok soruna bağlıdır. İlgili akışın geometrileri ve sınır koşulları tarafından belirlenirler.
- Küçük girdaplar geometriye daha az bağımlıdır, daha izotropik olma eğilimindedir ve dolayısıyla daha evrenseldir.
- Küçük girdaplarda evrensel türbülans modeli bulma şansı çok daha yüksektir. Yalnızca büyük girdapların çözülmesi, LES'te DNS'ye göre çok daha kaba ağ ve daha büyük zaman adımı boyutlarının kullanılmasına olanak tanır. Ancak LES hala RANS hesaplamaları için tipik olarak kullanılanlardan çok daha ince ağlara ihtiyaç duyuyor. Ek olarak, modellenen akışın kararlı istatistiklerini elde etmek için LES'in yeterince uzun bir akış süresi boyunca çalıştırılması gerekir. Sonuç olarak, LES'in hesaplama maliyeti normalde bellek ve CPU zamanı açısından sabit RANS hesaplamalarına göre çok daha yüksektir. Bu nedenle yüksek performanslı bilgi işlem (örneğin paralel hesaplama), özellikle endüstriyel uygulamalar için LES için bir zorunluluktur. LES'in ana eksikliği, yüksek çözünürlük gereksinimlerinde yatmaktadır (Fluent).

3.3. Korunum Denklemleri

Akışkanın zamanla değişen akımda süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Üç boyutlu halde sıkıştırılmayan akışkanlar için sürekli rejimde süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

Sıkıştırılabilen akışkanlar için sürekli rejimde süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

Momentum denklemleri:

x-momentum denklemi:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial P'}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x \quad (3.4)$$

y-momentum denklemi:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{\partial P'}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + F_y \quad (3.5)$$

z-momentum denklemi

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \frac{\partial P'}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + F_z \quad (3.6)$$

Enerji denklemi:

$$\begin{aligned} \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial x} + u \frac{\partial T}{\partial y} + v \frac{\partial T}{\partial z} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ = \left(\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} + w \frac{\partial P}{\partial z} \right) + k \left(\frac{\partial^2 v}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 v}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 v}{\partial^2 z} \right) + \mu \Phi \end{aligned} \quad (3.7)$$

3.5. Temel Isı Transfer Modları

İletimle olan ısı transfer formülü (Fourier kanunu)

$$Q = kA \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (3.8)$$

Taşınım ile olan ısı transfer formülü (Newton soğuma kanunu)

$$Q = hA(T_2 - T_1) \quad (3.9)$$

Işınım ile olan ısı transfer formülü (Stefan-Boltzman kanunu)

$$Q = \varepsilon \sigma A (T_2^4 - T_1^4) \quad (3.10)$$

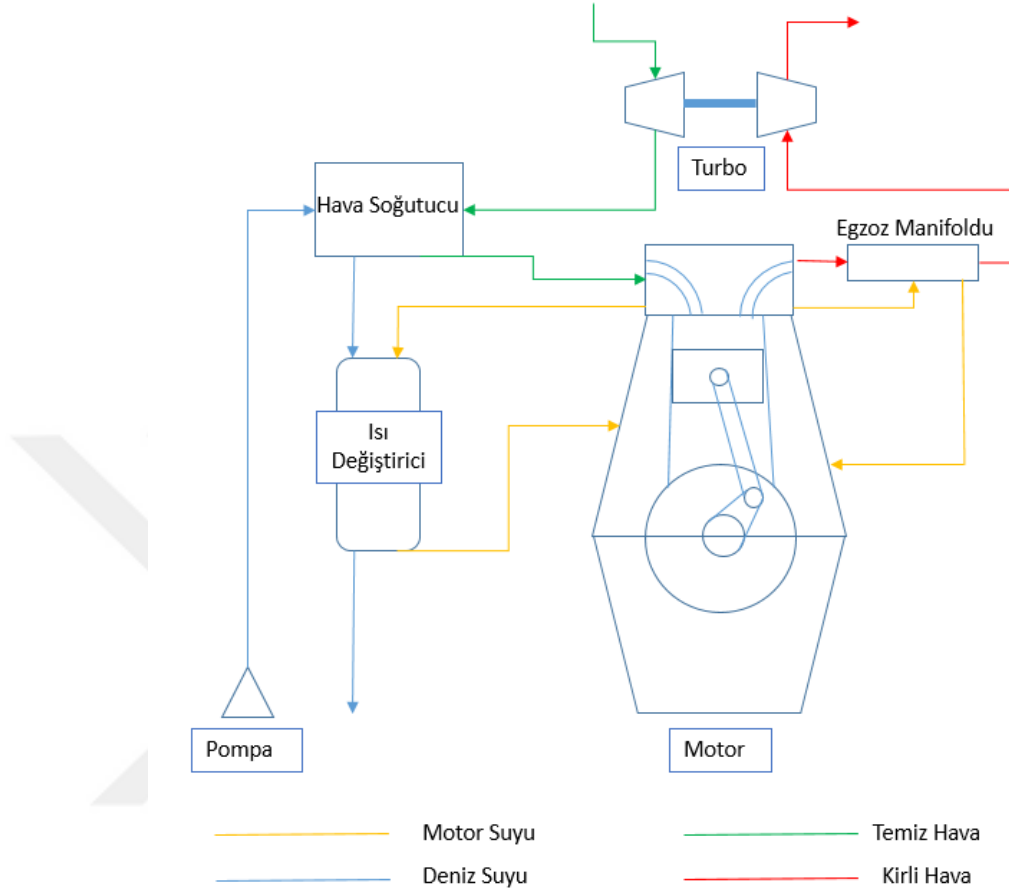
Isı enerjisi

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_g - T_c) \quad (3.11)$$

3.6. Marin Motor ve Soğutma Sistemi

Deniz araçlarında soğutma kaynağı olan deniz suyu, pompa vasıtasıyla araç içine pompalanır. Her aracın kendi gereksinimlerine göre tesisatı vardır. Şekil 3.5'te uygulamada olan bir deniz aracının tesisat sistemi gözükmektedir. Pompadan gelen deniz

suyu ilk önce hava soğutucuya oradan motor suyu ısı değiştiricisine geçer. Bundan sonra farklı yağ soğutucu gibi ısı değiştiricilere uğrayarak denize boşaltılır.



Şekil 3.5. Marin motor şeması

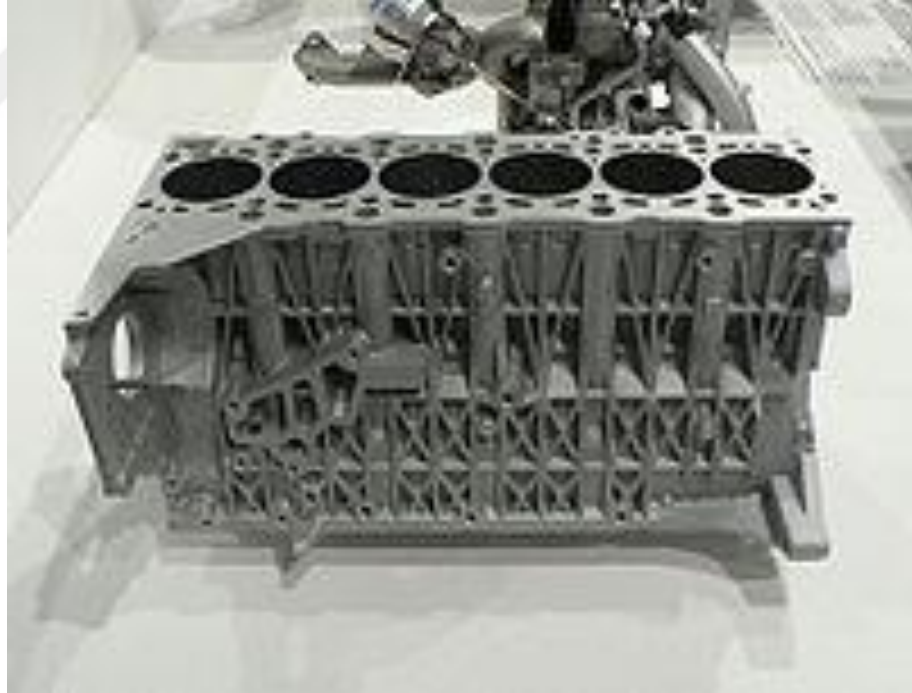
Turbonun kompresöründen gelen sıcak hava, hava soğutucuda soğutulduktan sonra motora gönderilir. Motorda yakıt ile karışıp yanan hava, sıvı soğutmalı egzoz manifoldundan ve turboşarjdan geçip aracın dışına gönderilir. Motor suyu ısı değiştiricisinden soğumuş olarak gelen su, motor bloğuna pompa vasıtasıyla basılır. Motor bloğu ve kafasından geçen su egzoz manifolduna ve ısı değiştiriciye gönderilir. Termostatın açıklık durumuna göre ısı değiştiriciye giden suyun debisi değişim göstermektedir.

Şekil 3.6’da içten yanmalı pistonlu bir motor görseli bulunmaktadır. Şekil 3.7’de silindir bloğu Şekil 3.8’de silindir kafası örneği görülmektedir. Silindir kafası ve bloğunun

içyapısında su ceketleri dediğimiz soğutma kanalları mevcuttur. Bu kanallar vasıtasıyla soğutma sıvısı, motoru ısıl yüklerden kaynaklanan deformelere karşı korumaktadır.



Şekil 3.6. Tümosan marin motor görseli



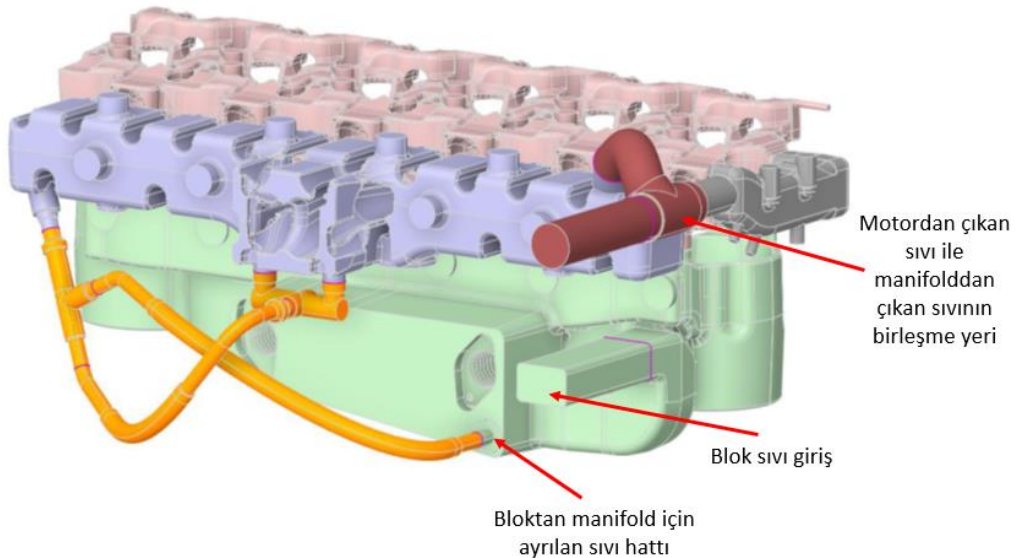
Şekil 3.7. Silindir bloğu örneği (Engine block,2024)



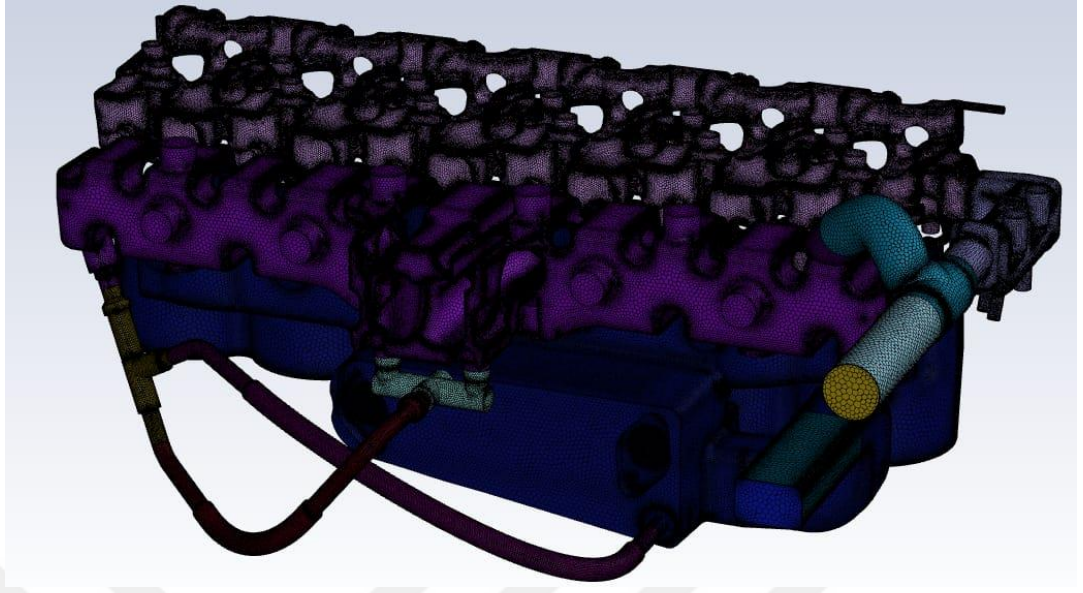
Şekil 3.8. Silindir kafası örneği

3.7. Motor Su Ceketlerinin Analize Hazırlığı

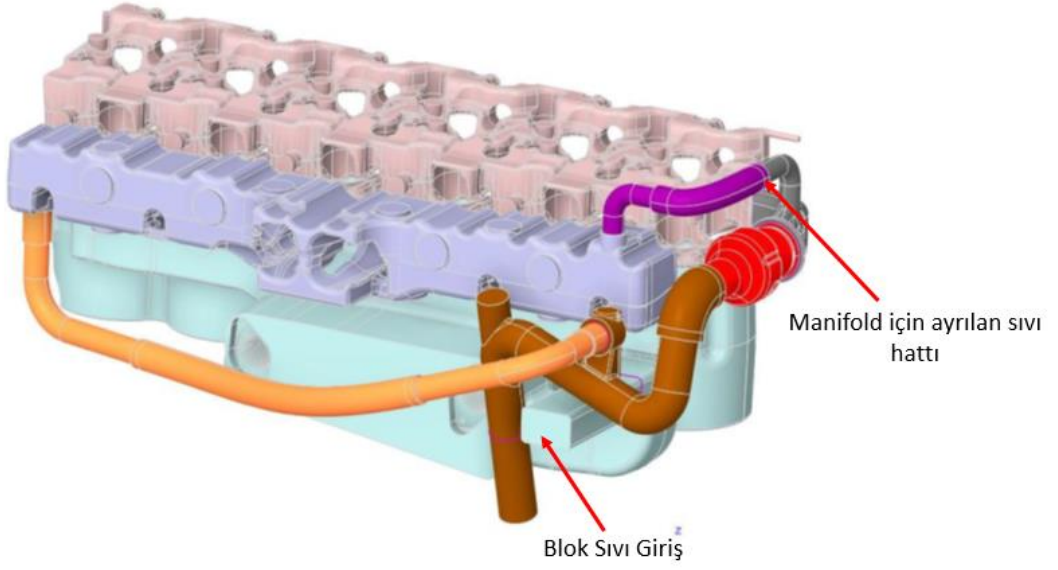
Geometriler Space Claim'de Şekil 3.9 ve Şekil 3.11 da görüldüğü gibi ağ yapısı oluşturmak için hazırlanmıştır. Hazırlanan geometriler Şekil 3.10 ve 3.12'de görüldüğü gibi Fluent Meshing'de yaklaşık 27 milyon çok yüzlü (polyhedral) eleman olacak şekilde modellenmiştir. Sınır tabakaya sık bir şekilde ağ yapısı oluşturulmuştur. Eleman sayısı yeterli ve kalite değeri uygun elemanlar ile modellendiği için ağdan bağımsızlık çalışmasına ihtiyaç duyulmamıştır. Türbülans modeli realizable k- ϵ scalable wall function türbülans modeli kullanılmıştır. Enerji denklemi aktif edilmemiştir. Akışkana (glikol katkılı su), sıkıştırılmaz, sabit yoğunluk ve ısıl genleşme özellikleri tanımlanmıştır.



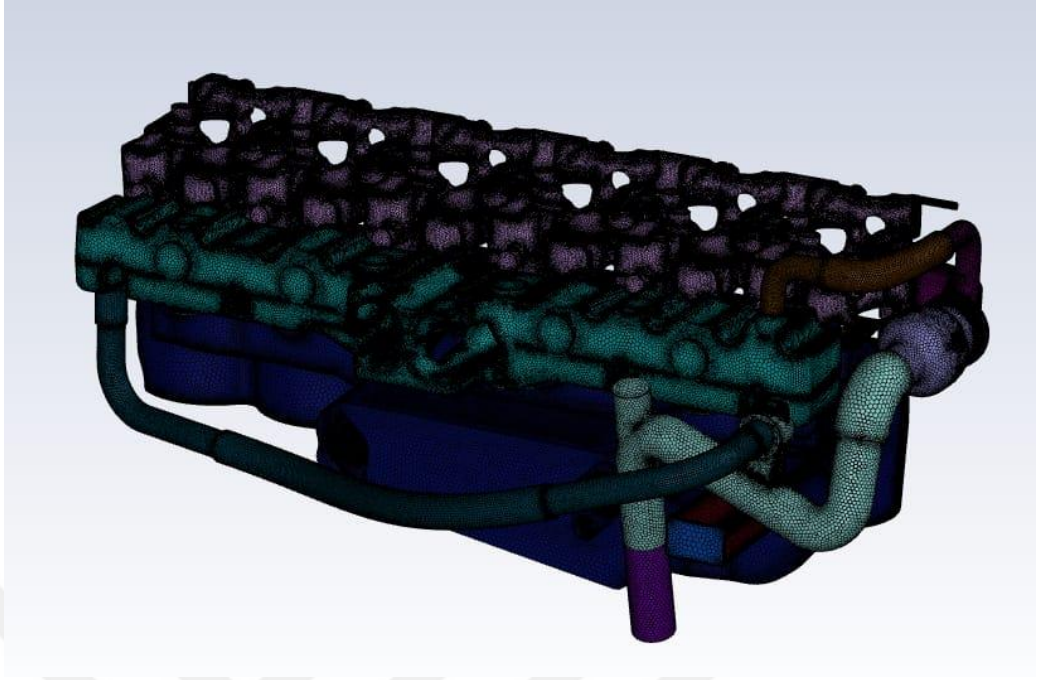
Şekil 3.9. Silindir kafa, blok ve manifold su ceketleri (versiyon 1)



Şekil 3.10. Ağ yapısı (versiyon 1)



Şekil 3.11. Silindir kafa, blok ve manifold su ceketleri (versiyon 2)



Şekil 3.12. Ağ yapısı (versiyon 2)

Çizelge 3.1. Analizde kullanılan motor suyu termofiziksel özellikleri

Motor Suyu Termofiziksel Özellikleri	
ρ (kg/m^3)	1034
Pr	8.15
ν (m^2/s)	9.477×10^{-7}
k (W/mK)	0.411
μ ($Pa.s$)	9.8×10^{-4}
C_p ($J/kg/K$)	3600

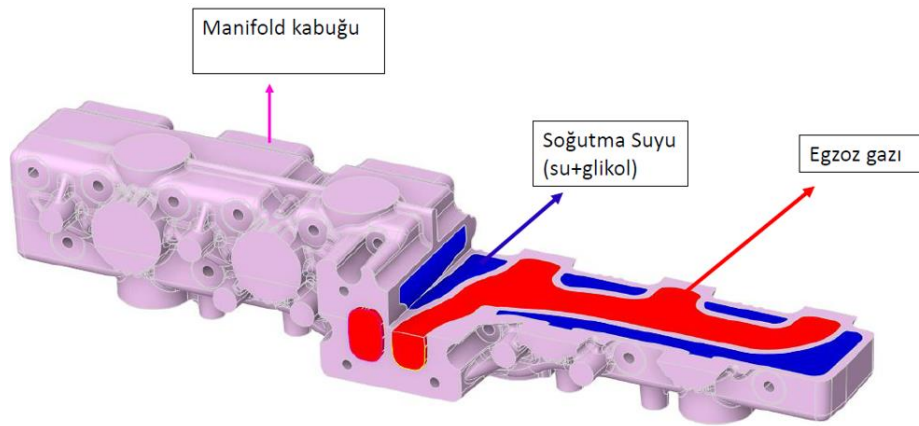
3.8. Sıvı Soğutmalı Egzoz Manifoldu Analiz Hazırlığı

Geometri Space Claim'de Şekil 3.13'de görüldüğü gibi hem akışkan tarafı hem katı tarafı ağ yapısı oluşturmak için hazırlanmıştır. Hazırlanan geometri Şekil 3.14'te görüldüğü

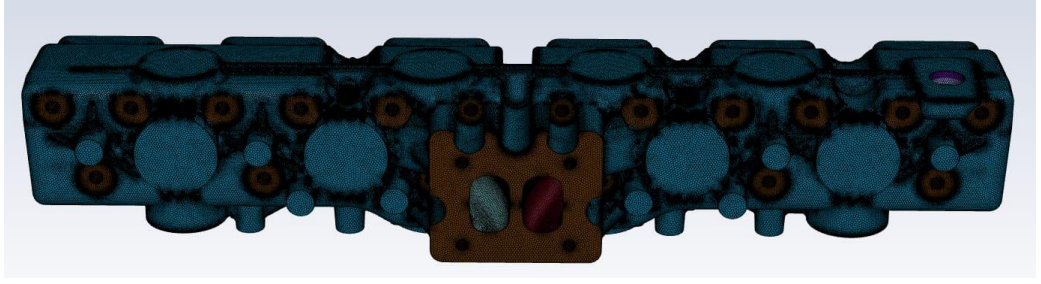
gibi Fluent Meshing’de yaklaşık 45 milyon çok yüzlü (polyhedral) eleman olacak şekilde modellenmiştir. Sınır tabakaya sık bir şekilde ağ yapısı oluşturulmuştur. Eleman sayısı yeterli ve kalite değeri uygun elemanlar ile modellendiği için ağdan bağımsızlık çalışmasına ihtiyaç duyulmamıştır. Türbülans modeli SST k- ω türbülans modeli kullanılmıştır. Enerji denklemi aktif edilmiştir. Egzoz gazı ideal gaz olarak tanımlanmış, ısı genleşme ve ısı kapasitesi değerleri sıcaklığa bağlı tanımlanmıştır. Manifold malzemesi yüksek çalışma koşullarında çalıştığı için sıcaklığa bağlı olarak tanımlanmıştır. Soğutma sıvısı aynı bir önceki analizdeki gibi glikol katkılı su özellikleri tanımlanmıştır. Manifoldun özellikleri Çizelge 3.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Analizde kullanılan manifoldun özellikleri

Manifoldun Özellikleri	
ρ (kg/m^3)	7250
Cp (j/kg-K)	450-800
k (W/mK)	40-50
Manifold Boyutları	765x115x105 mm
Manifold Malzemesi	EN GJL 300
Sıvı hacmi	3 litre



Şekil 3.13. Sıvı soğutmalı egzoz manifold yapısı

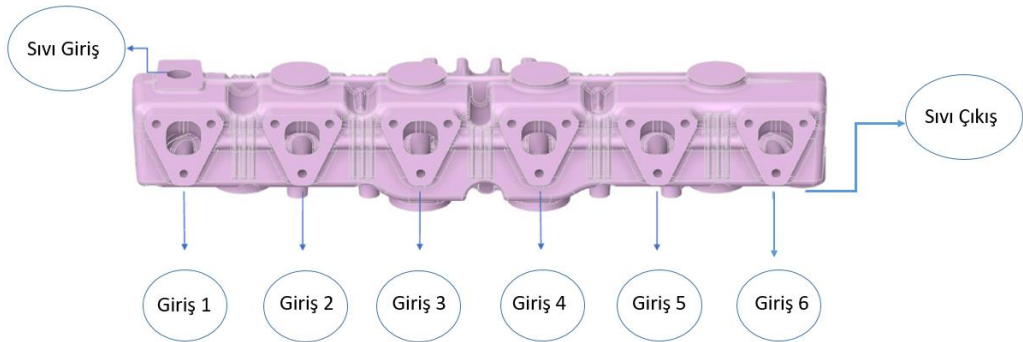


Şekil 3.14. Sıvı soğutmalı egzoz manifoldu ağ yapısı

Şekil 3.15'te su ve egzoz gazının giriş yerleri gösterilmiştir. Çizelge 3.3'teki değerler analiz giriş koşulu olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 3.3. Analizde kullanılan manifold giriş koşulları

Giriş koşulları		
	Sıcaklık (K)	Debi (kg/s)
Port Giriş 1	1050	0,085
Port Giriş 2	1050	0,085
Port Giriş 3	1050	0,085
Port Giriş 4	1050	0,085
Port Giriş 5	1050	0,085
Port Giriş 6	1050	0,085
Su Giriş	363	2,6



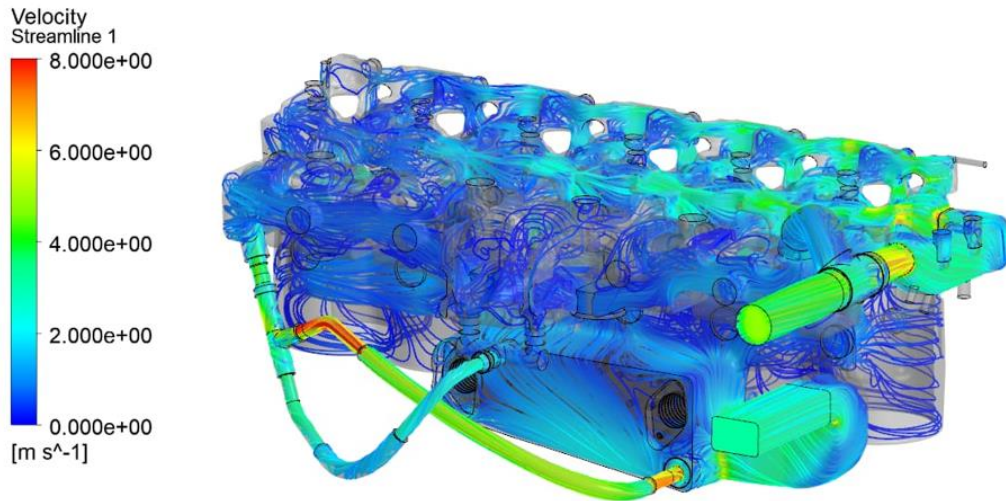
Şekil 3.15. Analizi yapılan sıvı soğutmalı egzoz manifoldu

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

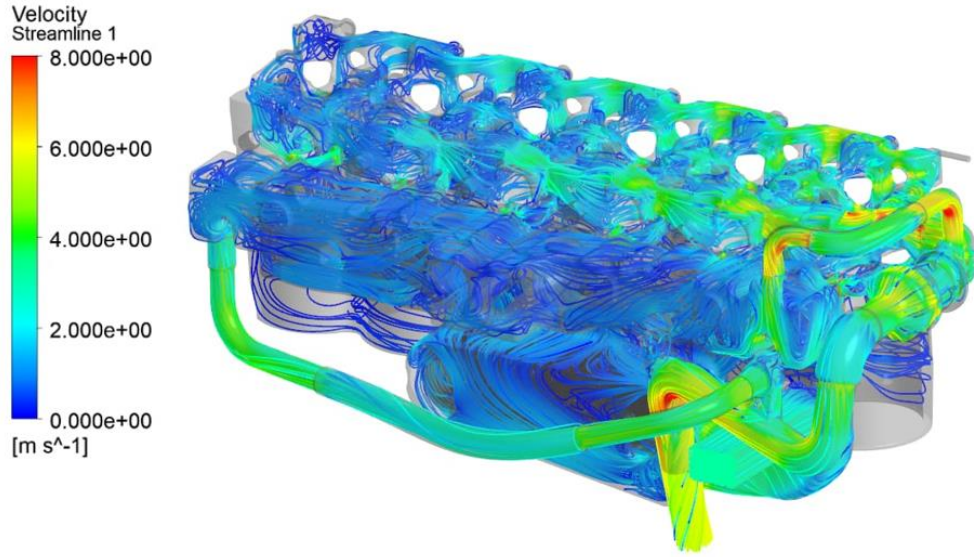
Motor su ceketlerinin analizi hibrit başlatılıp yaklaşık 2500 iterasyonda Şekil 4.3'te belirtilen residual kriterlerine yakınsamıştır. Sıvı soğutmalı egzoz manifoldu analizi hibrit başlatılıp yaklaşık 5000 iterasyonda Şekil 4.5'te belirtilen residual kriterlerine yakınsamıştır. Şekil 4.1 de ve Şekil 4.2 de su ceketlerinin hız akım çizgileri elde edilmiştir.

Bloktan 7.5 kg/s debide akışkan tanımlandığında versiyon 1'de manifolda giden debi 1.2 kg/s iken versiyon 2'de 2.6 kg/s olarak hesaplanmıştır. Manifolda giden debinin fazla olması ve motorun silindirlerine giden debinin azalmaması açısından versiyon 2'nin avantajlı olduğu düşünülmüştür. Manifold analizi, hem motor hem manifoldun soğutulması için avantajlı olan ikinci versiyon sonuçlarına göre yapılmıştır.

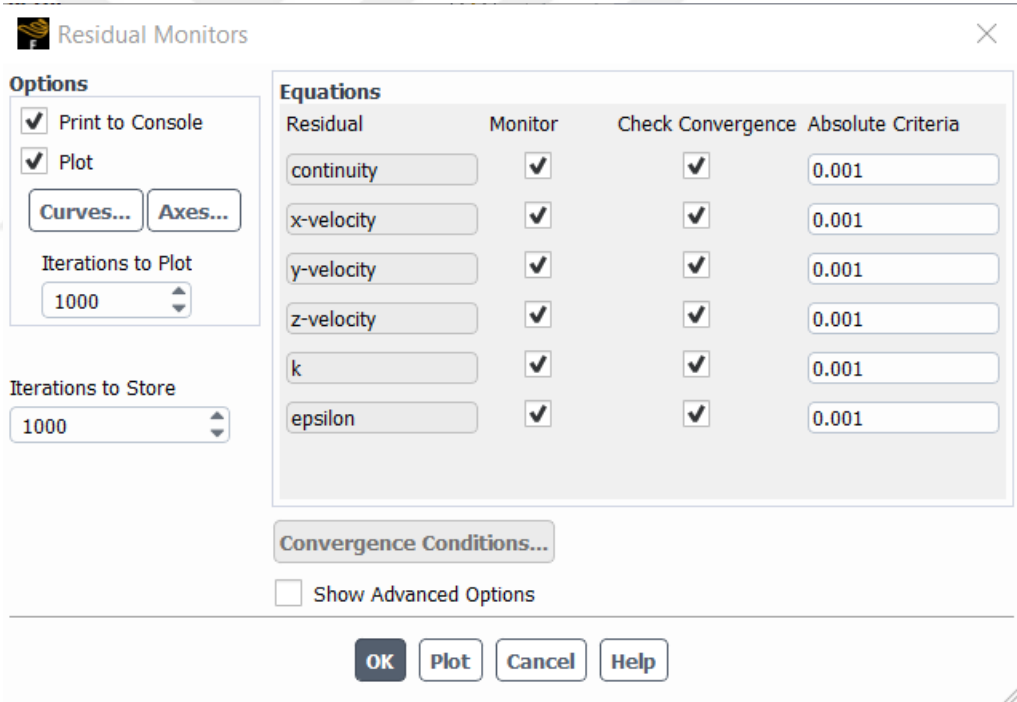
Akım çizgileri incelendiğinde ikinci versiyonda motor içinde ve manifoldda daha hızlı çizgiler gözükmemektedir. Bunun basınç düşümünü arttıracak düşünülüp santrifüj pompa kullanılması durumunda motor devrine bağlı hareket eden pompada debinin bir miktar düşebileceği bilinmelidir.



Şekil 4.1. Silindir kafa, blok ve manifold akım çizgileri (versiyon 1)

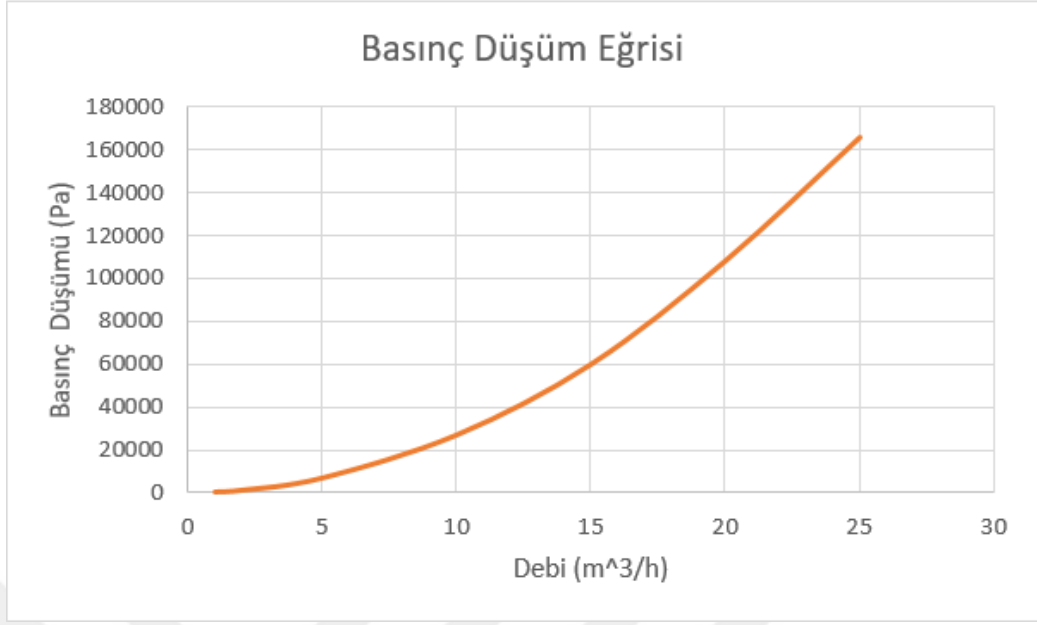


Şekil 4.2. Silindir kafa, blok ve manifold akım çizgileri (versiyon 2)

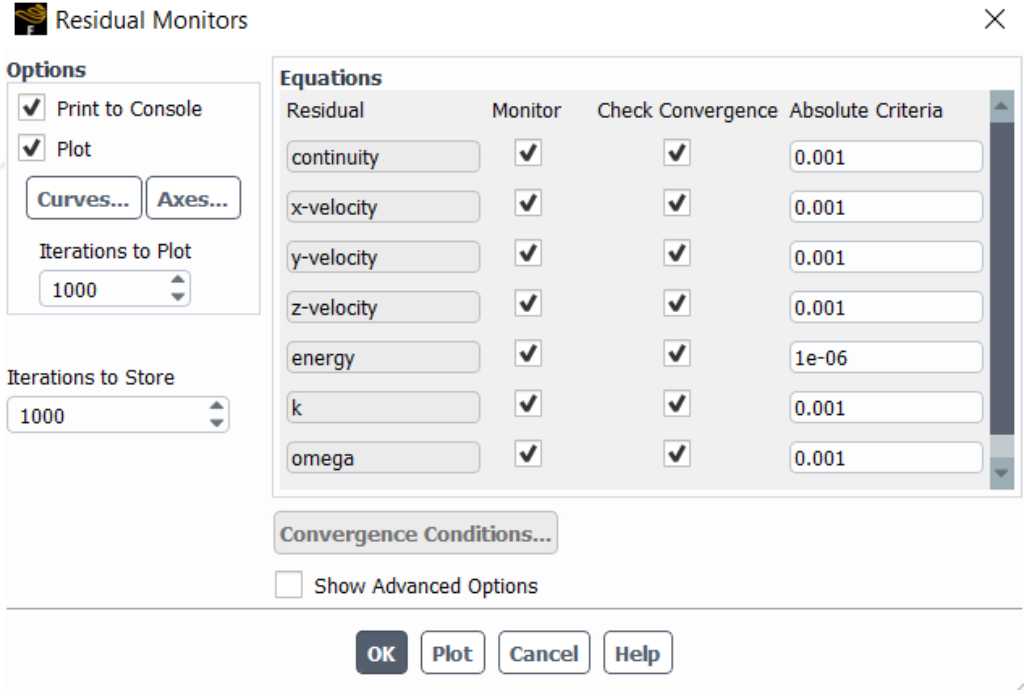


Şekil 4.3. Motor su ceketleri akış analizi residual kriterleri

Şekil 4.4 te sadece manifoldta farklı debiler vererek debiye bağlı basınç düşüm eğrisi oluşturulmuştur. Bu eğri ile hangi debide ne basınç düşümü yapacağı görülmüştür.



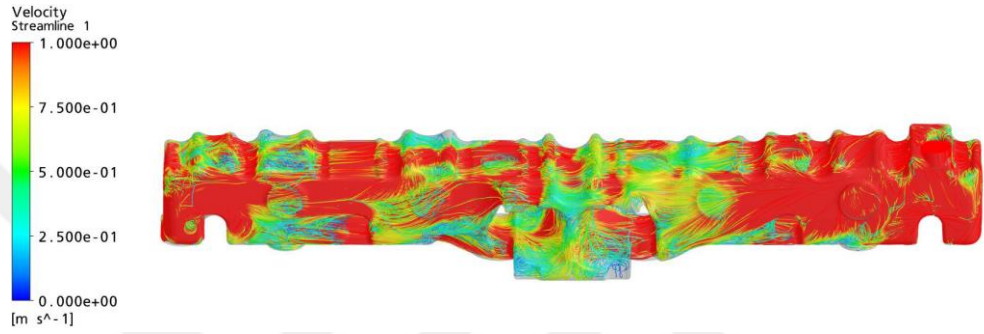
Şekil 4.4. Manifold soğutma sıvısı debiye bağlı basınç düşüm eğrisi



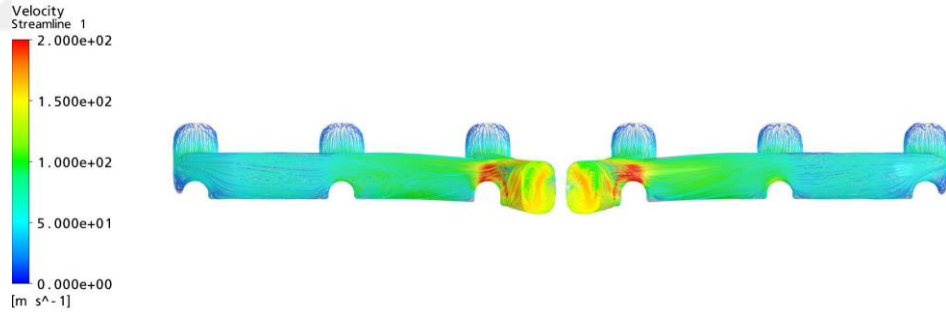
Şekil 4.5. Manifold akış ve ısıl analizi residual kriterleri

Manifold üçüncü bölümdeki gibi analize hazırlanıp eşlenik ısıl analizi yapılmıştır. Şekil 4.6'da manifoldun su ceketlerindeki akım çizgileri elde edilmiştir. Şekil 4.7'de egzoz

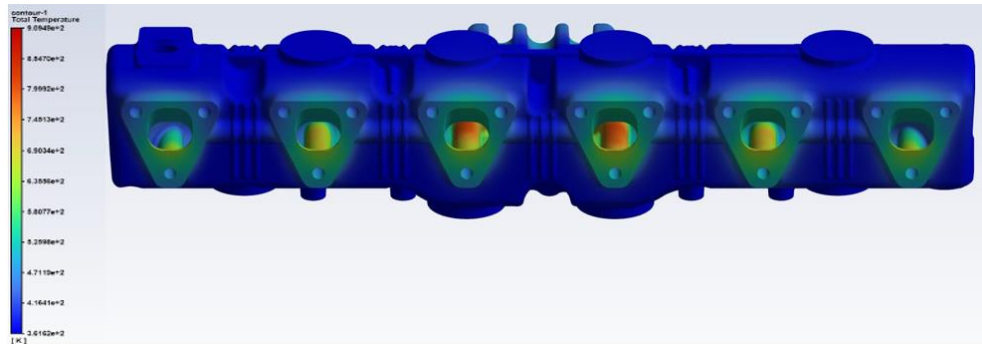
gazlarının akım çizgileri elde edilmiştir. Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da manifolddaki sıcaklık dağılım görselleri elde edilmiştir. Manifolda 2.6 kg/s debide 363 K sıcaklığında su girdiğinde ve altı portun her birinden 0.085 kg debide 1050 K sıcaklığında gaz verildiğinde suyun 369 K olarak çıktığı, manifoldun su tarafında yaklaşık 13400 Pascal basınç düşümü olduğu hesaplanmıştır. Manifoldun gaz tarafında yaklaşık 7750 Pascal basınç düşümü olduğu sıcak egzoz gazlarının suya yaklaşık 57 kW ısı aktardığı hesaplanmıştır.



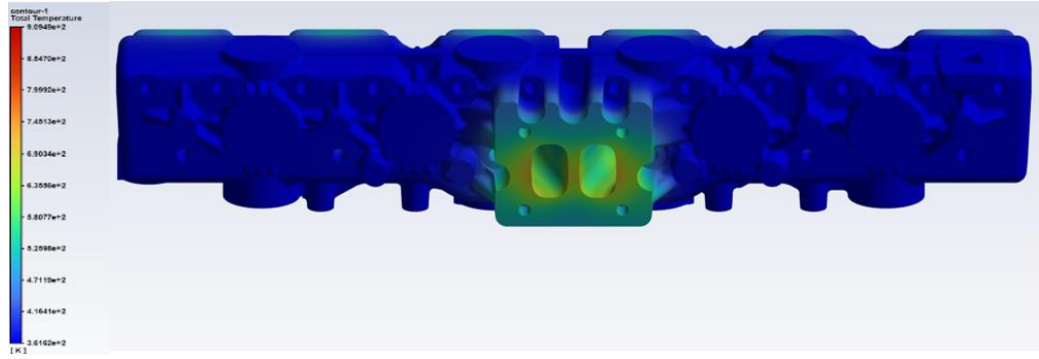
Şekil 4.6. Manifold su ceketini akım çizgileri



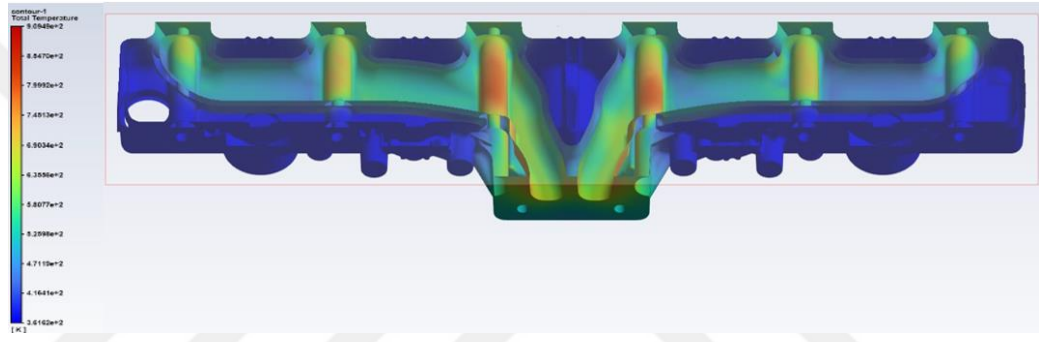
Şekil 4.7. Manifold egzoz gazları akım çizgileri



Şekil 4.8. Manifold sıcaklık dağılımı (Arka)



Şekil 4.9. Manifold sıcaklık dağılımı (Ön)



Şekil 4.10. Manifold kesit sıcaklık dağılımı

5. SONUÇ

Bu tezde deniz araçlarında kullanılan ana tahrik motorlarının soğutma sistemi incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda deniz suyu ile sıvı soğutucunun hangi aşamalardan geçerek soğutma yaptığı araştırılmıştır. Motor su ceketleri ile sıvı soğutmalı egzoz manifolduna Ansys Fluent'te bilgisayar destekli analizler yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda;

- Motor su ceketlerindeki ikinci versiyon tasarımda, motorun kafa ve bloğundaki suyu azaltmadan manifoldun soğutulması sağlanmıştır. Böylece kafa ve blokta oluşacak yapısal hasarların önüne geçilmesi düşünülmektedir. Özellikle yanma bölgesine yakın olan su ceketleri incelendiğinde su debisinin artmasından dolayı hızların arttığı gözlenmiştir.
- Aynı zamanda manifolddaki su debisinde de artış gözlenmiş bundan dolayı manifolddaki durgun akışlı bölgelerde hızların arttığı görülmüştür. Manifolda gelen akışkanın sıcaklığı artmış olsa da kaynama olmadan manifoldu terk edebileceği düşünülmektedir. İlerleyen çalışmalarda manifold için kaynama modülü aktif edilip çok fazlı akış uygulamaları yapılarak inceleme sağlanabilir.
- Akışkanın debisi arttığı için zorlanmış taşınım ile olan ısı transferi artacağı ve manifolddaki gazın suya aktardığı enerji artacağı düşünülmektedir. Bu nispeten gazdaki enerjinin soğutucu akışkana geçmesine ve turbo performansının düşmesine yol açabilir. Aynı zamanda ısı değiştiricide motor suyundan deniz suyuna olan ısı transferi artacağı düşünülmektedir. Isı değiştiricinin kapasitesini göz önüne alıp, kapasite artırımına gidilebilir.
- Manifolddaki yapısal hasarların önüne geçebilmek için gri dökme demir yerine küresel dökme demir veya silisyum molibden katkılı küresel dökme demir kullanımının uygun olabileceği düşünülmektedir. Silisyum molibden katkılı dökme demirlerde silisyum ve molibden oranına dikkat edilmesi gerektiği bilinmektedir. Küresel dökme demirin elastisite modülü, gri dökme demire göre daha yüksek olduğundan termal genişleme durumunda bu elastiklik parçada çatlak gibi olumsuz durumların oluşmamasını sağlayabileceği bilinmektedir.
- Versiyon 1'de manifold için tasarlanan hortum çapı artırılarak manifolda giden hattın basınç düşümü azaltılıp soğutma sıvısının manifolda gitmesi artırılabilir.

Versiyon 1'deki gibi bir üretim yapılırsa manifolda gönderilmesi istenen optimum sıvı miktarının boru çapı ile belirlenebileceği düşünülmektedir.

- Versiyon 2'de termostat öncesi manifolda giden hortum çapı ile çıkış yapan hortum çapı üretim ve tasarım açısından en büyük seçilerek manifolda giden sıvı 2.6 kg/s olarak hesaplanmıştır. Manifolda giden sıvı termostat tamamen kapalı olacak şekilde hesaplanmıştır. Motor çalıştıktan sonra soğutma sıvısının sıcaklığının artması buna bağlı olarak termostat açılacağı bilinmektedir. Termostat açıldıktan sonra sıvı ısı değiştiriciye gideceği bundan dolayı hattaki basınç düşümü artacağı buna bağlı olarak da manifolda giden soğutma sıvısının debisinin artacağı ön görülmektedir.
- Fluentte yapılan analiz çalışmalarına göre manifoldun Türk Loydu standartlarına uygun olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

Fathallah, A. Z. M., Busse, W., & Clausthaldi, F. R. (2017). Fluid Flow Analysis of Jacket Cooling System for Marine Diesel Engine 93 Kw. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 1(2). <https://doi.org/10.12962/j25481479.v1i2.2028>

Mojtahed M., Le N., Desoto J.W. (2016). Weldment Analysis Of A Diesel Engine Exhaust Manifold, *Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, November 11-17, 2016, Phoenix, Arizona, USA.

Guojin, C., Miaofen, Z., Zhongmin, L., Tingting, L., Shaohui, S., & Yijiang, C. (2013). Study on Air Intake and Cooling System for Marine Diesel Engine. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 12(2), 998-1004. <https://doi.org/10.11591/telkomnika.v12i2.4213>

Pai B., Wang Y., Zhou C.Q., Fu D. (2012). Analysis and Visualization of Thermal Stresses in Exhaust Manifolds, *Proceedings of the ASME 2012 Summer Heat Transfer Conference*, July 8-12, 2012, Rio Grande, Puerto Rico

Cao, T., Lee, H., Hwang, Y., Radermacher, R., & Chun, H.-H. (2015). Performance investigation of engine waste heat powered absorption cycle cooling system for shipboard applications. *Applied Thermal Engineering*, 90, 820-830. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.070>

Lawrence, N., & Kortekaas, H. Y. P. (2001). DECSIM—A PC-based Diesel Engine Cycle and cooling system simulation program. *Mathematical and Computer Modelling*, 33(6-7), 565-575. [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(00\)00262-4](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(00)00262-4)

Nahim, H. M., Younes, R., Nohra, C., & Ouladsine, M. (2015). Complete modeling for systems of a marine diesel engine. *Journal of Marine Science and Application*, 14(1), 93-104. <https://doi.org/10.1007/s11804-015-1285-y>

Assari, M. R., Adeli, sajjad, & Ebn Abbas, A. (2018). New design and analysis of diesel exhaust manifold to control thermal gradient. *AUT Journal of Mechanical Engineering, Online First*. <https://doi.org/10.22060/ajme.2018.14440.5729>

Milanovic, R., Zhou, C. Q., Majdak, J., & Cantwell, R. (2003). CFD Modeling of Flow and Heat Transfer Inside a Liquid-Cooled Exhaust Manifold. *Heat Transfer: Volume 3*, 785-792. <https://doi.org/10.1115/HT2003-47294>

Dokkum, K. V. (2003). Ship Knowledge A Modern Encyclopedia, DOKMAR, Enkhuizen, Netherlands.

Haliloğlu, H. (t.y.). Askeri Gemilerde Kullanılan Üç Farklı Ana Tahrik Dizel Motorunun Performans Parametrelerinin İncelenmesi.

Fluent User's Guide, versiyon2, 2022, Ansys Incorporated, Cannonsburg, PA, USA.
Alturki, Eng. W. (2017). Four-Stroke and Two-Stroke Marine Engines Comparison and Application. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 07(04), 49-56. <https://doi.org/10.9790/9622-0704034956>

Tu, J., Yeoh, G.-H., & Liu, C. (2018). Introduction. *Computational Fluid Dynamics*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101127-0.00001-5>

Wilcox, D.C., (2002). Turbulence Modeling for CFD. *DCW Industries*. Inc.La Canada, California, USA.

ANSYS Fluent Theory Guide. 15.0 Realese

Prajapati, P., Raja, B. D., Savaliya, H., Patel, V., & Jouhara, H. (2024). Thermodynamic evaluation of shell and tube heat exchanger through advanced exergy analysis. *Energy*, 292, 130421. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130421>

Türk Loydu. (2022) *Kısım 4 – Makina Kuralları*. <https://www.turkloydu.org/tr-tr/yayinlar/turk-loydu-kurallari.aspx>

Dizel makine. (2024, 6 Haziran). Erişim adresi: <https://dargeb.com/wartsila-rt-flex96c-rekor-kiran-dizel-makine/>

Newsdetail. (2024, 2 Mayıs). Erişim adresi: <https://www.smctraining.com/en/newpage/newsdetail/1488>

Pump work. (2024, 15 Mayıs). Erişim adresi: <https://www.quora.com/How-does-a-seawater-pump-work>

Engine block. (2024, 28 Mayıs). Erişim adresi: https://en.wikipedia.org/wiki/Engine_block