

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR İÇTEN YANMALI MOTORDA PİSTON SOĞUTMA GALERİSİ
TASARIMININ ISI TRANSFERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN NÜMERİK
ANALİZİ**

Refik ÇEVİRME

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Programı

Danışman
Dr. Öğretim Üyesi Övün IŞIN

Mayıs, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR İÇTEN YANMALI MOTORDA PİSTON SOĞUTMA GALERİSİ
TASARIMININ ISI TRANSFERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN NÜMERİK
ANALİZİ**

Refik ÇEVİRME tarafından hazırlanan tez çalışması 16.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğretim Üyesi Övün IŞIN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğretim Üyesi Övün IŞIN, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Tarkan SANDALCI, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğretim Üyesi Erdem UZUNSOY, Üye

Bursa Teknik Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Övün IŞIN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Bir İçten Yanmalı Motorda Piston Soğutma Galerisi Tasarımının Isı Transferi Üzerine Etkisinin Nümerik Analizi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Refik ÇEVİRME

İmza



*Başta ailem olmak üzere
bütün sevdiklerime*

TEŞEKKÜR

İçten yanmalı motorlarda ısı transferi konusunda bilgilerini paylaşan ve bir içten yanmalı motorda piston soğutma galerisi tasarımının ısı transferi üzerine etkisi konulu yüksek lisans tez çalışması yapmama vesile olan tez danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Övün IŞIN'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca fikir alışverişinde bulunduğum ve bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan Samet GÖNER'e desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen ve hep arkamda olan aileme teşekkür ederim.

Refik ÇEVİRME

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 Giriş.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	16
1.3 Hipotez	17
2 İçten Yanmalı Motorlarda Pistonun Soğutulması	18
2.1 İçten Yanmalı Motorlarda Yanma ve Sıcaklık Etkileri	18
2.1.1 Piston Sıcaklığı Profili.....	20
2.1.2 Sıcaklığın Segmanlar Üzerindeki Etkisi.....	21
2.2 Piston Sıcaklıklarını Düşürme Yöntemleri	22
2.2.1 Soğutmasız Pistonlar	22
2.2.2 Püskürtme Jeti ile Soğutmalı Pistonlar	22
2.2.3 Soğutma Galerili Pistonlar	23

2.3 Soğutma Yağı Kaynağı	27
2.4 Pistonlarda Isı Akışı.....	30
3 Kullanılan Metot ve Yapılan Çalışma.....	31
3.1 Piston Modeli	31
3.2 Soğutma Galerisi Tasarımları	33
3.3 Kararlı Durum Termal Analiz	35
3.4 Termal Analizlerin Gerçekleştirilmesi	38
4 Sonuç ve Öneriler	46
4.1 Farklı Piston Tasarımlarının Analiz Sonuçları	46
4.2 Analiz Sonucu Isı Akış Oranlarının Karşılaştırılması	50
4.3 Isı Akış Oranlarının Piston Malzemesine Bağlı Değişimi	55
4.4 Sonuç	62
Referanslar.....	64
Tezden Üretilmiş Yayınlar	67

SİMGE LİSTESİ

1D	Bir Boyut
2D	İki Boyut
3D	Üç Boyut
A	Alan
CO	Karbonmonoksit
E	Elastisite Modülü
F	Kuvvet
h	Konveksiyon Isı Transfer Katsayısı
H1	Soğutma Galerisi Yüksekliği
H2	Soğutma Galerisi Yan Yüzey Uzunluğu
k	Yay Sabiti
k	Malzeme Isıl İletkenlik Katsayısı
K	Kelvin
l	Litre
L	Uzunluk
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N	Newton
NO _x	Azot Oksitler
q	Birim Alanda Isı Akışı
Q	Birim Zamanda Akan Isı
R	Yarıçap
T _s	Yüzey Sıcaklığı
T _∞	Yüzeyden Uzaktaki Akışkan Sıcaklığı
u	Yer Değiştirme
W	Watt
W1	Soğutma Galerisi Üst Yüzey Genişliği
W2	Soğutma Galerisi Alt Yüzey Genişliği
α	Yağ Jeti Yayılma Açısı
β	Soğutma Galerisi Yağ Dolum Oranı
°C	Derece Celcius
%	Yüzde
Ø	Çap

KISALTMA LİSTESİ

CFD	(Computational Fluid Dynamics) Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
EGR	(Exhaust Gas Recirculation) Egzoz Gazları Devridaimi
fps	(Frame per Second) Saniyelik Görüntü Sayısı
max	Maksimum
min	Minimum
NEDC	(New European Driving Cycle) Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi
PCI	(Peripheral Component Interconnect) Yan Bileşen Bağlantısı
rpm	(Revolutions per Minute) Dakikalık Devir Sayısı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Soğutma galerisi kesit gösterimi [20].....	12
Şekil 2.1	Diesel motorlarında alev cephesi [26]	19
Şekil 2.2	Piston üst yüzeyinde dalgalı sıcaklık profili [26]	19
Şekil 2.3	Farklı piston tipleri için sıcaklık profilleri [26]	20
Şekil 2.4	Sıcaklık artışına bağlı piston bölgelerinde yorulma direnci [26]	21
Şekil 2.5	Diesel motor pistonunda püskürtme jeti ile soğutma [26]	23
Şekil 2.6	Salt-Core soğutma galerili piston [26]	24
Şekil 2.7	Soğutulmuş taşıyıcı segmanlı piston [26]	25
Şekil 2.8	Merkezi vida bağlantısı ve çalkalayıcı soğutmalı kompozit piston [26]	26
Şekil 2.9	Çoklu vida bağlantısı ve delik soğutma ile kompozit piston[26]	26
Şekil 2.10	Soğutma yağının piston konumlarına göre etki noktaları [26].....	28
Şekil 2.11	Püskürtme jeti ile soğutma sisteminde yağın izlediği yol [26]	29
Şekil 2.12	Soğutma galerili pistonlarda yağın izlediği yol [26]	29
Şekil 2.13	Soğutma çeşitlerine göre pistonlarda ısı akışı [26]	30
Şekil 3.1	Tasarlanan piston modelinin temel boyutları.....	31
Şekil 3.2	Tasarlanan piston modelinin perspektif görünüşü.....	32
Şekil 3.3	Tasarlanan piston modelinin üst yüzeyi ve alttan görünüşü	32
Şekil 3.4	Tasarlanan piston modelinin ön görünüşü	32
Şekil 3.5	Birinci soğutma galerisi tasarımı	33
Şekil 3.6	İkinci soğutma galerisi tasarımı	34
Şekil 3.7	Üçüncü soğutma galerisi tasarımı.....	34
Şekil 3.8	Örnek kuvvet yay sistemi[27]	36
Şekil 3.9	Piston üst yüzeyi (top)	39
Şekil 3.10	Piston üst yüzeyindeki büküm bölgesi (bowlrim).....	39
Şekil 3.11	Piston üst yüzeyi ile alfin bölgesi arasında kalan bölge (topland)	39
Şekil 3.12	Alfin üst bölgesi (alfintop).....	40
Şekil 3.13	Alfin alt bölgesi (alfinbottom).....	40
Şekil 3.14	Üst segman yuvası (topgroove).....	40
Şekil 3.15	Üst segman ile orta segman arasında kalan bölge (midland).....	40
Şekil 3.16	Orta segman yuvası (midgroove)	41
Şekil 3.17	Orta segman ile yağ segmanı arasında kalan bölge (oiland)	41
Şekil 3.18	Yağ segmanı yuvası (oilgroove)	41
Şekil 3.19	Pin yuvası (pinboss)	42
Şekil 3.20	Pin yuvası 1. bölgesi (pinface1).....	42
Şekil 3.21	Pin yuvası 2. bölgesi (pinface2).....	43
Şekil 3.22	Pin yuvası 3. bölgesi (pinfacetop)	43
Şekil 3.23	Piston etek bölgesi (skirt)	44
Şekil 3.24	Piston etek bölgesi iç kısmı (undecut).....	44

Şekil 3.25	Piston kafası iç alt yüzeyi (innershape)	45
Şekil 3.26	Soğutma galerisi (coolinggallery).....	45
Şekil 4.1	Piston üst yüzeyi çukur geometrisi sıcaklık profilleri.....	47
Şekil 4.2	Analiz sonucu birinci tasarım piston sıcaklık dağılımı	47
Şekil 4.3	Analiz sonucu ikinci tasarım piston sıcaklık dağılımı	48
Şekil 4.4	Analiz sonucu üçüncü tasarım piston sıcaklık dağılımı.....	48
Şekil 4.5	Analiz sonucu birinci tasarım pin yuvası sıcaklık dağılımı	48
Şekil 4.6	Analiz sonucu ikinci tasarım pin yuvası sıcaklık dağılımı	49
Şekil 4.7	Analiz sonucu üçüncü tasarım pin yuvası sıcaklık dağılımı.....	49
Şekil 4.8	Analiz sonucu birinci tasarım üst segman yuvası sıcaklık dağılımı.....	49
Şekil 4.9	Analiz sonucu ikinci tasarım üst segman yuvası sıcaklık dağılımı.....	50
Şekil 4.10	Analiz sonucu üçüncü tasarım üst segman yuvası sıcaklık dağılımı.....	50
Şekil 4.11	Birinci tasarım soğutma galerisi sıcaklık profili	50
Şekil 4.12	İkinci tasarım soğutma galerisi sıcaklık profili	51
Şekil 4.13	Üçüncü tasarım soğutma galerisi sıcaklık profili	51
Şekil 4.14	Birinci tasarımda ısı akışının bölgesel dağılımı	52
Şekil 4.15	İkinci tasarımda ısı akışının bölgesel dağılımı	52
Şekil 4.16	Üçüncü tasarımda ısı akışının bölgesel dağılımı.....	53
Şekil 4.17	Birinci tasarımın malzemeye bağlı ısı akış oranları değişimi.....	56
Şekil 4.18	İkinci tasarımın malzemeye bağlı ısı akış oranları değişimi.....	57
Şekil 4.19	Üçüncü tasarımın malzemeye bağlı ısı akış oranları değişimi	58

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Soğutma galerisi tasarıları [20].....	13
Tablo 4.1 Birinci tasarımda piston bölgelerine bağlı ısı dağılım yüzdeleri.....	54
Tablo 4.2 İkinci tasarımda piston bölgelerine bağlı ısı dağılım yüzdeleri.....	54
Tablo 4.3 Üçüncü tasarımda piston bölgelerine bağlı ısı dağılım yüzdeleri.....	54
Tablo 4.4 Birinci tasarımın malzemeye bağlı ısı akış oranları değişimi.....	59
Tablo 4.5 İkinci tasarımın malzemeye bağlı ısı akış oranları değişimi.....	60
Tablo 4.6 Üçüncü tasarımın malzemeye bağlı ısı akış oranları değişimi	61

ÖZET

Bir İçten Yanmalı Motorda Piston Soğutma Galerisi Tasarımının Isı Transferi Üzerine Etkisinin Nümerik Analizi

Refik ÇEVİRME

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Övün IŞIN

İçten yanmalı motorlar insan hayatını kolaylaştıran önemli makinelerdir. İçten yanmalı motorlarda, yakıt hava ile karıştırılarak yanma odası adı verilen bir hacimde yakılır ve bu yanmanın etkisiyle oluşan ısı enerjisi mekanik enerjiye çevrilir. Yanma sonucu meydana gelen yüksek basınç ile piston harekete geçer. Pistonun doğrusal hareketi biyel kolu vasıtasıyla dairesel harekete çevrilerek krank miline aktarılır. İçten yanmalı motorlar her geçen gün performans olarak gelişmekte ve daha yüksek güç yoğunluklu motorlar üretilmektedir. Bununla birlikte sıkı emisyon ve yakıt ekonomisi standartları otomotiv üreticilerini çevreci motorlar üretmeye zorlamaktadır. Üreticiler bu standartlara uygun motorlar üretirken aynı zamanda performansı düşürmemek için çeşitli çalışmalar yapmaktadırlar. Bu

Çalışmaların en önemlilerinden biri termal yönetimin geliştirilmesidir. Termal yönetimin geliştirilmesi için yanma süreci boyunca yüksek basınç ve sıcaklıklara maruz kalan içten yanmalı motor pistonlarının iyi bir şekilde soğutulması önemli bir husustur.

Bu çalışmada; bir içten yanmalı motor pistonunun kafa bölgesinde bulunan soğutma galerisi için farklı tasarımlar kullanılarak tasarım farklılıklarının piston soğutması üzerine etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda farklı soğutma galerisi tasarımları için bir içten yanmalı motor pistonunun termal analizleri gerçekleştirilmiş ve her bir tasarımın analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca analiz sonuçları literatürde yer alan ısı transfer oranları ile karşılaştırılarak uygunluğu doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İten yanmalı motorlar, pistonlar, soğutma galerisi, ısı transferi, termal analiz.

ABSTRACT

Numerical Analysis of the Effect of Piston Cooling Gallery Design on Heat Transfer in an Internal Combustion Engine

Refik ÇEVİRME

Department of Mechanical Engineering

Master's Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Övün IŞIN

Internal combustion engines are important machines that make human life easier. In internal combustion engines, the fuel is mixed with the air and burned in a volume called as combustion chamber and the heat energy generated is converted into mechanical energy by this combustion process. The piston is actuated by high pressure resulting from the combustion. The linear motion of the piston is converted into the circular movement by the connecting rod and transmitted through the connecting rod to the crankshaft. Internal combustion engines are developing day by day and higher power density engines are produced. Besides, strict standards of emission and fuel economy are forcing automotive manufacturers to produce

environment-friendly engines. While manufacturers produce engines in accordance with these standards, they also do various studies in order not to reduce performance. One of the most important of these studies is the development of thermal management. Good cooling of internal combustion engine pistons which are exposed to high pressures and temperatures during the combustion process is an important consideration for the development of the thermal management.

In this study; it is aimed to investigate the effect of design differences on piston cooling by using different designs for the cooling gallery located in the head region of an internal combustion engine piston. For this purpose, thermal analysis of an internal combustion engine piston was performed for different cooling gallery designs and the results of the analysis of each design were compared. In addition, the results of the analysis were compared with the heat transfer ratios in the literature.

Keywords: Internal combustion engines, pistons, cooling gallery, heat transfer, thermal analysis.

1.1 Literatür Özeti

Yapılan literatür araştırması sonucunda bugüne kadar içten yanmalı motorlarda termal yönetimin geliştirilmesi adına gerek genel olarak motorlarda ısı transferi çalışmaları, gerekse özel olarak piston üzerinde ısı transferi çalışmaları olmak üzere birçok çalışma yapıldığı görülmüştür.

İçten Yanmalı Motorlarda Genel Isı Transferi Çalışmaları

Luptowksi ve arkadaşları [1] soğutma sistemi kontrolünün motor performansı üzerine etkilerini araştırmak amacıyla bir araç motoru soğutma sistemi simülasyonu geliştirmişlerdir. Çalışmalarında aktif olarak kontrol edilebilen bir elektrikli soğutma sistemi geliştirilmesi ve simüle edilmesi için bir ağır vasıta diesel motoru referans alınarak modellenmiştir. Soğutma sistemi, mekanik fan, hava soğutucu radyatör, yağ devresi, mekanik soğutma pompası, kabin ve kabin ısıtıcı modellenmiştir. Soğutma sistemi grafiksel bir programlama ile modellenirken motor çevrim analizi bir simülasyon yazılımı üzerinde yapılmış ve iki model dinamik olarak birbirine bağlanmıştır. Yapılan çalışma ile düşük, orta ve yüksek yük ve ortam sıcaklıklarında farklı testler üzerinde durulmuş ve sonuçlar geleneksel bir motorun çalışmasıyla kıyaslanarak incelenmiştir. Modele motor hızı, yakıt akış hızı, kompresör giriş sıcaklığı, barometrik basınç ve zaman bilgileri girilmiştir. Çalışmanın sonucunda kontrollü sistemde soğutucu akış hızının geleneksel bir

motora oranla daha fazla zamana bağılı olduğu ortaya çıkmıştır. Düşük yük ve ortam sıcaklığında kontrollü pompa ile geleneksel sistemdeki pompaya oranla %27'lik güç tüketiminin azaldığı gözlenmiştir. Değerlendirilen ana parametreler motor soğutucu giriş sıcaklığı ve gaz tarafı silindir duvarı sıcaklığının belirli değerlerde korunabilmesi olmuş ve kontrollü sistemde motor giriş sıcaklığının geleneksel bir motor çalışmasına kıyasla daha yavaş arttığı ve gaz tarafı silindir sıcaklığının 187 °C'ye ulaşarak bu değerde korunduğu gözlenmiştir. Soğutma sistemi kontrolünün bir diğer amacı da motor çıkış sıcaklığını 90 °C'ye kadar korumak olmuş ve yapılan çalışmalar neticesinde motor çıkış sıcaklığının ortalama olarak 84 °C olduğu görülmüştür. Ortalama olarak kontrollü motor çıkış sıcaklığının geleneksel motor çıkış sıcaklığından 2 °C düşük olduğu saptanmıştır. Yüksek yük ve ortam sıcaklığında motor girişi soğutma suyu sıcaklığının ortalama olarak geleneksel motor çalışma durumundan 3 °C düşük olduğu, bunun yanında yapılan bütün testlerde piston kafası ortalama sıcaklığının geleneksel motor çalışmasına kıyasla daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Soğutma sisteminin kontrollü olmasının güç tüketimini azalttığı, silindir duvar sıcaklığı dalgalanmalarını da azaltarak termal gerilmeleri düşürdüğü ve yapılan testlerde en iyi sonuçların düşük yük ve düşük ortam sıcaklığı şartlarında elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Senatore ve arkadaşları [2] 8 silindirli bir motorun soğutma sisteminin termo-akış-dinamik analizinin yapılması amacıyla soğutma devresi parametrelerinin simüle edildiği standart bir test simülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Sistemin genleşme deposundaki ve diğer önemli noktalarındaki sıcaklık ve basınç değerleri analiz edilmiştir. Çalışmada yüksek motor devirlerinde pompa kavitasyonunun önlenmesi amacıyla pompa girişindeki basınç mümkün olduğunca sabit tutulmuş, kavitasyon analizi yapılmamış ve yalnızca motorun çalışması sırasındaki ısı değişimi ile ilgilenilmiştir. Termal denge ve modelin termal kalibrasyonu, daha önce yapılan testlerde elde edilen öngörülen basınç ve akış verileri ile klasik ısı transfer denklemleri kullanılarak sağlanmıştır. Yapılan çalışma rüzgâr tüneline motor hızının belirli bir rpm değerinde 900 saniye boyunca sabit tutulduğu bir testten oluşmaktadır. Bu zaman aralığı sonunda, sistemin tüm fiziksel değişkenleri sabit bir duruma ulaştığında, hava akışının sıfıra indirilmesiyle bir ısı indüklenir ve böylece aracın aniden durması simüle edilmiş olur. Böylece soğutma sisteminin kritik

koşullar altında davranışı değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma ile birlikte spesifik soğutma sisteminin işleyişi ve içerdiği dinamikler derinlemesine anlaşılabilmiştir. Elde edilen tam modelin, soğutma sisteminin fiziksel değişkenlerini herhangi bir çalışma durumunda tahmin edebildiği ve sistemin kritik koşullarda performansını değerlendirmek için bir soğutma sistemi tasarım aşamasında kullanılabileceği belirtilmiştir.

Sangeorzan ve arkadaşları [3] bir 3.5l diesel motoru piston, yağ ve soğutucu sıcaklıklarını modellemek için 1D analitik motor termal yönetim aracı geliştirmişlerdir. Model; yağ akış oranlarını, basınç düşüşlerini, ısı transfer oranlarını ve yağ filtresini içeren bir yağlama sistemi; soğutucu akışkan hızlarını, basınç düşüşlerini ve ısı transfer oranlarını içeren ayrıntılı bir soğutma sistemi ve çevreye ısı transferini içeren bir turboşarj modeli ile motor parçalarını içeren ısı modellerden oluşturulmuştur. Çalışmada 1500 rpm - 5500 rpm hız aralığı seçilmiştir. Birden fazla sistemi modellemek, analiz etmek ve çoklu disiplin performanslarını tek bir yazılım ortamında öngörmek için kullanılabilecek 1D bir simülasyon paketi geliştirilmiştir. Bir grafik arayüzü vasıtasıyla kullanıcı tarafından sistemin gerçek hidrolik, pnömatik, elektrik veya mekanik davranışını temsil eden yerleşik analitik model bileşenleri bağlanarak bir sistem ve alt sistem oluşturulmuştur. Uygun malzeme, sıvı özellikleri, boyutlar, bileşen kütleleri, ısı transfer katsayıları, sınır ve çevre koşulları simülasyon paketine tanımlanmıştır. Piston sıcaklıklarının tahmini için bölgesel ısı transfer katsayılarının iyi bilinmesi gerekmektedir ve bu katsayılar literatürde yer alan ısı transfer katsayıları referans alınarak seçilmiştir. Sangeorzan ve arkadaşlarının çalışmalarında herhangi bir yanma analizi yer almamaktadır, modelin amacı kararlı durum piston sıcaklıklarının tahmini ile yağ ve soğutma suyu sıcaklıklarının doğru bir şekilde belirlenmesini içermektedir. Yapılan çalışma sonucunda soğutma suyu, yağ ve piston sıcaklıkları elde edilmiş, yağ ve soğutma suyu sıcaklıklarının 2500 rpm - 5000 rpm devir aralığında deneysel sonuçlarla mükemmel bir uyum sergilediği, 1000 rpm devirde ise 4-5 °C'lık küçük bir hata verdiği gözlenmiştir. Çalışma neticesi olarak daha fazla kalibrasyon ile piston sıcaklığının ve yağ sıcaklığındaki değişimlerin piston sıcaklığı üzerine etkilerinin daha iyi araştırılabileceği belirtilmiştir.

Gokhale ve Karthikeyan [4] doğal emişli motorların soğutma mekanizmalarını simüle etmek amacıyla bir yazılım ile 3D CFD analizleri yapmışlardır. Silindir kafasının ve silindir bloğunun kanatlı tasarımı, çoğunlukla motorun hava soğutma mekanizmasında önemli bir parametredir. Motor modeli farklı çalışmaların test sonuçlarından elde edilen veriler ile kurulmuştur. CFD analizi ile silindir kafasındaki sıcaklık dağılımının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Yanma odasından, silindir gömleğinden, supaplardan, emme ve egzoz kanallarından ısı aktarımı iletim ile, kanatçıklar yüzeyinden ısı aktarımı konveksiyon ile kontrol edilmiştir. Kanatçıkların parametrik çalışması için kanatçık boyunca ısı akışının sabit tutulduğu, kanatçık yüzeyinde ısı kaynağı olmadığı, kanatçık sıcaklığının kalınlıktan bağımsız olduğu, kanatçık malzemesinin ısıl iletkenliğinin sabit kaldığı varsayılmış ve radyasyon ile ısı transferi ihmal edilmiştir. Çalışmanın sonucunda kanatçıklar boyunca ısı transferinin değerlendirmesinde, yalnızca kanatçık uzunluğu ve hava hızındaki değişimin kanatçık ısı transferinde etkili olduğu görülmüştür. Kanatçık uzunluğundaki artış ile kanatçık sıcaklığında düşüş net bir şekilde ortaya çıkarılmıştır. Blok kanat uzunluğu arttıkça yüzey artışına bağlı olarak konveksiyon ısı transfer oranı ve motordan atılan ısı miktarının arttığı saptanmıştır. Ortalama olarak motor parçaları sıcaklığında %19'luk düşüş gözlenmiştir.

Ginrich ve arkadaşları [5] tek silindirli bir diesel araştırma motorunun ateşlemeli, homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli ve reaktif kontrollü sıkıştırma ateşlemeli yanma koşullarında pistonu olan ısı transferinin incelenmesi amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Araştırma motoru deneyin yapıldığı ortam havasıyla beslenen hava akış ölçüm sistemi ile donatılmıştır. Hava sıcaklığının ayarlanması için elektrikli ısıtıcı kullanılmıştır. Ayrıca motor bir EGR sistemi içermektedir. Ayrı yakıt sistemlerine sahip iki port enjektör, iki farklı yakıt tedarik ederken üçüncü bir yakıtın doğrudan enjeksiyonuna izin veren ek bir yüksek basınçlı Common-Rail yakıt enjektörü ile egzoz dalgalanması dinamiklerini sönümlemek için bir egzoz dalgalanma tankı kullanılmıştır. Motor, bir yazılım sistemi ile, yakıt enjeksiyon sistemi PCI kontrol kartları ile kontrol edilmiştir. Sistem; motor hava akışı, emisyon verileri, EGR valfi, basınçlar ve diğer kritik motor parametrelerini kontrol eden ve kaydeden bir sistemdir. Piston bir alüminyum alaşımdan imal edilmiştir. Yaptıkları çalışmalar sonunda Ginrich ve arkadaşları reaktif kontrollü sıkıştırma ateşlemeli ve

homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli bütün çalışma koşulları için konvansiyonel diesel ateşlemesinden daha düşük bir pik ısı akısına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Konvansiyonel diesel ateşlemeli sistemde ısı akısını etkileyebilecek is oluşmaktadır. Homojen yanmada pik ısı akısı ile reaktif kontrollü yanma ısı akıları benzerlik göstermiştir. Girdap oluşumunun bu iki koşulda ısı akısında artış sağladığı sonucuna varılmıştır.

Benajes ve arkadaşları [6] yakıtın kimyasal enerji dengesinin hesaplanması, farklı motor çalışma koşullarının radyasyon ile ısı transferi üzerine etkisinin araştırılması ve is oluşumunun incelenmesi amacıyla termokupllar ile donatılmış 4 silindirli direkt püskürtmeli hafif diesel motoru üzerinde deneyler yapmışlardır. Bu deneyin gerçekleştirilmesi için optik olarak erişilebilir tek silindirli motor ve çok silindirli motor kullanılmıştır. Tek silindirli araştırma motoru düşük devirli 500 rpm bir motordur. 4 silindirli motor Common-Rail yakıt enjeksiyon sistemine sahip 1.9l diesel motorudur. Yanma odası basıncı ve sıcaklığının üniform olduğu varsayılmıştır. Gaz sıcaklığını hesaplamak için ideal gaz yasası kullanılmıştır. Gazın özgül ısısı hem sıcaklığa hem de bileşime bağlıdır. Basınç ve atalet nedeniyle oda hacmi deformasyonu basit bir deformasyon modeli ile hesaplanmaktadır. Oda duvarlarındaki ısı transfer katsayısı, Woschni benzeri bir modelle hesaplanmıştır. Motor hızının radyasyon üzerinde bir etki oluşturduğu kanıtlanmıştır. Silindir içi alev sıcaklığı farklı motor koşulları altında karakterize edilmiştir. Alev sıcaklığı, 2200K ila 2600K arasındadır. Odadaki toplam ısı transferinde nispi ağırlık analiz edilip sadece %0,7 ila %7,6'sının radyasyona bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Eiglmeier ve arkadaşları [7] direkt püskürtmeli diesel motorlar için bir ısı transfer modeli geliştirmişlerdir. Çok bölgeli yanma modelleri için akış alanına bağlı bir ısı transfer modeli kullanılmış, konveksiyon ve is radyasyonu ile ısı transferleri incelenmiştir. Konveksiyon ısı transferinin hesaplanması için, silindir içindeki akış, girdap ve türbülansa bölünmüş ve iç termal sınır tabaka kalınlığı, tek boyutlu enerji denklemi temelinde belirlenmiştir. Radyasyon ısı akısı, basit iki denklemlilik model ve geometrik varsayımlar temelinde basitleştirilmiş radyasyon taşıma denkleminde belirlenmiştir. Önerilen ısı transferi modelini doğrulamak için yanma odası duvarlarının alt yüzeyleri ısı akıları hesaplanmış ve literatürde yer alan tek silindirli

bir test motorundan elde edilen deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucu, konveksiyon ve radyasyonla ısı transferinin lokasyon ile motor devri, yük ve basınç gibi motor parametrelerine büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir.

Winter ve arkadaşları [8] farklı çalışma koşulları altında yanma ve ısı transferi simülasyonları gerçekleştirmiş ve sonuçlarını incelemişlerdir. Hesaplamalar, CFD yazılım ile gerçekleştirilmiştir. Motor geometrisi modellenmiş ve sınır koşulları ile gerekli parametrelerin girişi sağlanmıştır. Bu çalışma ile türbülanslı taşıma ve karışımın oluşma süreçlerinin reaksiyon üzerine etkisi ele alınmıştır. Yanma ürünleri; yakıt, hidrokarbon, oksijen, azot, karbon dioksit ve su bileşenlerinden oluşmuştur. Daha sonra bu simülasyondaki yanma ve ısı transferi verilerinin doğrulanması için tek silindirli bir test motoru üzerinde deneyler yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda alev cephelerinin simülasyon ile büyük ölçüde uyumlu olduğu gözlemlenmiş ve ısı transferlerinin iyi hesaplanması için ısı akısı sensörleri ile ayrıntılı bir çalışma önerilmiştir.

İçten Yanmalı Motor Pistonlarında Isı Transferi Çalışmaları

Varghese ve arkadaşları [9] ağır hizmet diesel motor pistonunun yağ jeti ile soğutulması için sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanarak hesaplamalı bir model geliştirmişlerdir. Uygun sınır koşullarında genel ısı transfer denklemi çözülmüştür. Jet yüzeyi ısı transfer katsayısını hesaplamak için Steven ve Webb korelasyonu uygulanmıştır. Yapılan çalışma ile birlikte piston sıcaklıklarının yağ jetli soğutma kullanıldığında yaklaşık 40 °C kadar düştüğü gözlemlenmiş, artan jet hızıyla soğutmanın daha iyi gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Maksimum sıcaklığın piston üst yüzeyinin merkezinde olduğu saptanmıştır. Simülasyon sonuçları ile literatürdeki deneysel değerler arasında ortalama fark %1,6'dır. Bu da yapılan çalışmanın oldukça başarılı olduğunu göstermiştir.

Panayi ve arkadaşları [10] piston tasarım özelliklerinin değerlendirilmesinde bir parametrelili model kullanmanın avantajlarını göstermek için bir yazılımda bir benzin motoru pistonunun basitleştirilmiş, parametrelili modelini tasarlayarak sonlu elemanlar analizi ile simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Termal ve mekanik yükler dikkate alınarak analiz gerçekleştirilmiş ve karşılaştırma yapılmıştır.

Mekanik yükleme için ortam basıncını, yanma gazlarının etkilerini ve yağlama basıncının etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki termal yükleme durumunda piston ekseninde, mekanik yükleme altında piston merkezine doğru, her iki yükleme durumunda piston merkezinden bir deformasyon söz konusu olur. Yapılan çalışma ile basitleştirilmiş bir modelin tam model oluşumunda referans bir çalışma olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Luff ve arkadaşları [11] piston soğutma jetlerinin; piston sıcaklıklarına, emisyonlara ve yakıt tüketimine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında bir 4 silindirli, 2,4l hafif diesel motor kullanmışlardır. Motor yağ jetlerinin açılıp kapanabildiği, ayrı bir boru hattından beslenebildiği şekilde modifiye edilmiş ve yağ jetleri açık ve kapalı şekilde deneyler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yağ jetleri kapatıldığında pistonda 28-30 °C 'lık bir artış, NO_x değerinde %3'lük küçük bir artış ve tamamen sıcak sabit durum çalışma koşulunda CO değerinde %5-10'luk bir düşüş olduğu tespit edilmiştir. Yapılan genel değerlendirmeler bir NEDC çevriminde yakıt ekonomisi iyileştirmelerinin bu çalışma için göz ardı edileceğini, CO değerinde düşüş ve NO_x değerinde küçük bir artış olacağını göstermiştir.

Juan Du [12] yaptığı çalışmada bilinmeyen sınır koşullarının tanınması için dalgacık nöral ağı kullanarak piston sıcaklık alanını hesaplama yöntemi sunmuştur. Çok bölgesi ısı transfer katsayılarının belirlenmesi ve sınır koşulları altında pistonun sıcaklık alanını hesaplama üzerinde durmuştur. Öncelikle sonlu elemanlar yöntemi kullanarak bir analiz gerçekleştirmiş ve ileriye dönük analiz sonuçlarının alındığı dalgacık sinir ağı ters ısı iletim problem modeli oluşturarak belirli bir girdi koşulu altında bilinmeyen bir çıkışın öngörülmesini sağlamıştır. Piston boyutlarına ve malzeme parametrelerine göre model oluşturulmuştur. Isı transfer katsayılarının değişim koşulları altında her ölçüm noktasına karşılık gelen sıcaklık hesaplanmış ve kaydedilmiştir. Ağ 100 kez eğitilmiş ve ölçülen sıcaklık verileri ağa girilmiştir. Bir yazılımda ısı transfer katsayıları altında ölçüm noktalarında sıcaklıklar hesaplanarak sonuçlar analiz edilmiştir. Piston üzerinde 11 noktada ölçüm yapılmış ve kullanılan bu yöntem ile 20 bölgede ısı transferi belirlenebilmiştir. Çalışma sonucunda daha fazla girdinin sağlanmasıyla daha sağlıklı ve detaylı sonuçlar elde edilebileceği belirtilmiştir.

Vagenas ve arkadaşları [13] bir içten yanmalı motor pistonunun soğutma galerisinde aktif olarak kullanılan soğutma jetlerinin kullanım ve potansiyel avantajlarını göstermek ve ısı transfer etkilerini incelemek için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma için bir test aygıtı geliştirilmiş ve galerinin ön yüzü optik gözlemlere izin veren camdan oluşturulmuş, diğer yüzü farklı jet konfigürasyonlarını kolaylaştırmak için düzenlenmiştir. Jet stratejileri ile talep edilen, bir soğutucu yan yüzey metal sıcaklığını muhafaza etmek olmuştur. İki farklı kontrol kriteri değerlendirilmiştir. Değişen sıcaklık akısı koşulları altında sabit bir yüzey sıcaklığına ulaşılması için jet akışı kontrolü ve sabit bir ısı akısı için talep edilen yüzey sıcaklığını elde etmek için jet akışı kontrolü değerlendirilmiştir. Sonuç olarak sıvı metal ara yüzeyi ısı transfer koşulları iyileştirilmiş ve böyle bir sistemin bir motora dahil edilmesi ile ilgili değerlendirme kısmına ihtiyaç duyulmuştur.

Kajiwara ve arkadaşları [14] piston sıcaklığını ve soğutma galerisi için ısı transfer katsayılarını hesaplamak amacıyla CFD yazılımı kullanarak bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Önceki çalışmalarda pistonun soğutma galerisindeki ısı transfer katsayısı; yağ dolum oranı, galeriye yağ kaynağı, galeri şekli, yağ çıkış deliği alanı ve motor çalışması sırasında pistonun hızlanması parametreleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Mevcut çalışmada ısı transfer katsayısı, soğutma galerisindeki yağ dolum oranı ve piston hızlanması ile doğrudan CFD kodu ile hesaplanmıştır. Piston sıcaklığı, soğutma galerisindeki ısı transfer katsayısı ve diğer sınır koşullar kullanılarak hesaplanmıştır. Soğutma galerisindeki yağ dolum oranı, yağ kaynağı miktarı, pistona uygulanan eylemsizlik kuvveti ve soğutma galerisi şekli göz önünde bulundurularak hidrolik denklemlere dayalı olarak hesaplanabilmektedir. Soğutma galerisi, sonsuz uzunlukta 2 boyutlu bir delik olarak modellenmiştir. Sıcaklık dağılımı ve ısı dağılımı, açıklanan yöntemle ve bilinen besleme yağı sıcaklığı ile öngörülen soğutma galerisindeki ısı transfer katsayısı ile sonlu elemanlar analizi kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda her bölgede sıcaklık tahminleri farklı ölçüm sonuçlarıyla uyumlu tespit edilmiştir. Bu tekniğin yağlama sisteminin optimum spesifikasyonu olarak bir motor tasarımının ilk aşamasında tasarlama sürecine referans oluşturabileceği belirtilmiştir.

Pan ve arkadaşları [15] bir piston soğutma galerisindeki ısı transfer analizi için 3D CFD yöntemi kullanmışlardır. Galeride yer alan detaylı yağ akışı ve ısı transferi süreci simüle edilmiş, galeri yüzeylerinde yağ akış özelliklerine göre ayrıntılı ısı transfer katsayıları verilmiştir. Yağ dolum oranının galeri ısı transfer katsayısı üzerindeki etkilerini incelemek için daha fazla CFD analizi yapılmıştır. 2D ve 3D CFD analizlerinden tahmin edilen ortalama ısı transfer katsayısı, piston sıcaklık analizi için sonlu eleman analizine girilmiş ve bir diesel motor için ölçülen piston sıcaklıklarıyla karşılaştırılmıştır. Mevcut çalışmada, galerilerle piston soğutması üzerinde yoğunlaşmıştır. CFD ile piston soğutma analizinde soğutma yağı, yağ nozulünden galeriye giriş deliğine enjekte edilir, galeri etrafında çevresel yönde akar ve çıkış deliğinden çıkar. Galeride kalma süresi boyunca, soğutma galerisi yüzeyine yüksek hızda gelen yağ, pistonun hareketiyle “fırçalama” şeklinde yukarı ve aşağı süzülür ve yüksek ısı transfer katsayısı elde edilir. Modellemenin basitleştirilmesi için soğutma galerisinde yalnızca yağ dolaştığı varsayılmış, arayüzdeki fazlar arası sıcaklık ihmal edilmiştir. Galeride hava ve yağ akışının türbülanslı olduğu düşünülmüş ve standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Yapılan çalışma ile hafif diesel motoru pistonu soğutma mekanizmasının motor çalışma koşulları altında modellenerek simüle edilmesinin mümkün olduğu ve maliyetli deneysel çalışmalara talebin azaltılabileceği gösterilmiştir. Isı transfer katsayılarının hesabı için ampirik ifadeler ve deneylerden elde edilen değerlere alternatif olarak simülasyon yöntemi sunulmuştur. Yapılan çalışma ile edilen piston sıcaklık dağılımları motorda ölçülen piston sıcaklıklarına çok yakın değerler seyretmiştir.

Thiel ve arkadaşları [16] piston soğutma galerisinin piston sıcaklığına etkisini araştırmak için bir binek taşıt diesel motorunda deneysel çalışma yapmışlardır. Soğutma galerileriyle birleştirilmiş farklı yağ jeti tasarımları test edilmiştir. Motora harici bir yağ devresi bağlanmıştır. Bu devre bir tank ve elektrikli yağ pompası ile yağ besleme sisteminden oluşmaktadır. Termokuplar sıcaklık sensörleri olarak kullanılmıştır. Toplam 6 farklı jet tipi kullanılmış, bu yağ jetlerinin hepsi silindir eksenlerine karşı eğimli bir püskürtme yönüne sahip olacak şekildedir. Tek yağ jetine sahip iki farklı soğutma galerisi, iki yağ jetli aynı girişten beslenen soğutma galerisi ve iki yağ jetli karşılıklı girişlerden beslenen soğutma galerisi olmak üzere 4

farklı konfigürasyon oluşturulmuştur. Tek yağ jetine sahip deneylerde tipik olarak galeri giriş tarafındaki sıcaklıkların çıkış tarafından daha düşük olduğu gözlemlenmiş ve soğutma galerisinin değiştirilmesinin sıcaklık düşüşlerini etkilediği saptanmıştır. İki yağ jetine sahip aynı girişten beslenen soğutma galerili deneyde önemli ölçüde sıcaklık düşüşü gözlenirken iki yağ jetine sahip karşılıklı konfigürasyonda mükemmel piston sıcaklığı düşüşü elde edilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde farklı konfigürasyonların piston sıcaklığında düşüş sağladığı kanıtlanmış ve çift nozül ile yağ jeti kullanılmasının piston soğutma verimliliğini önemli ölçüde arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Yi ve arkadaşları [17] 3D bir soğutma galerisi modellemişler ve soğutma jetinin hareketini, soğutma galerisindeki ısı transferini FLUENT yazılımı ile simüle etmişlerdir. Piston alt ölü nokta ve üst ölü nokta pozisyonlarındayken soğutma galerisi ısı transfer katsayıları incelenmiştir. Yapılan çalışma ile ısı transfer katsayısının yağ jetinin kuvvetli bir şekilde çarpmasıyla girişte maksimum değere ulaştığı ve girişten uzaklaştıkça düştüğü görülmüştür. Yağ sıcaklığı, galeri girişinden çıkışına doğru lineer bir artış göstermiştir. Ayrıca bu çalışma ile motor devri ve nozül çapı üzerinde duyarlılık çalışması yapılmış ve motor devri azaldıkça galeriye yağ dolumunun arttığı ve daha yüksek ısı transfer katsayısı sağlandığı tespit edilmiştir. Nozül çapının azaltılmasının galerideki doluluk oranını azalttığı ve ısı transfer katsayısında düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir.

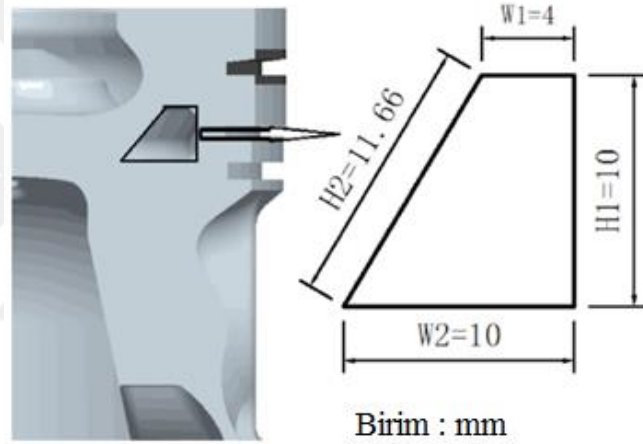
Belmonte ve arkadaşları [18] çalışmalarında bir benzin motoru pistonunun ısı transferi ve mekanik gerilme etkilerini CFD yazılımı kullanarak incelemişlerdir. Ayrıca soğutma galerisi bulunan bir pistonda analizler yaparak soğutma galerisinin ısı transferine ve dolaylı olarak emisyonlara etkisini ortaya koymuşlardır. ısı transfer katsayılarının hesaplanmasının karmaşıklığı sebebiyle ısı transfer katsayılarını literatürdeki farklı çalışmalardan seçmişlerdir. Soğutma galerisine sahip piston modeli ile galerisiz piston modeli sıcaklık sonuçları karşılaştırılmış ve soğutma galerisinin varlığı ile; piston kafası bölgesinde 33 °C, segman bölgesinde 36 °C, etek bölgesinde 25 °C, piston kafası alt bölgesinde 31 °C ve pim yuvasında 29 °C sıcaklık düşüşü sağlandığı gözlemlenmiştir. Piston üst yüzeyine gelen ısı piston bölgelerinde ısı atım oranları incelendiğinde galerisiz pistonda segman-etek

bölgesinden pistona gelen ısıнын %50'si atılırken, soğutma galerili pistonda bu bölgede %39'luk bir atım gerçekleştiği görülmüştür. Bu çalışmaya göre piston yüzeyine gelen ısıнын %27'si soğutma galerisi ile atılmıştır. Çalışmanın devamında gerilme analizi için piston kafası, piston kafası alt kısmı ve piston pim yuvası olmak üzere üç bölge seçilmiş ve piston gerilmeleri ile güvenlik faktörleri hesaplanmıştır. Daha sonra soğutma galerisi ile piston segman ve etek bölgesi sıcaklıklarının düşürülmesiyle birlikte piston, silindir duvarı ve birinci segman arasındaki ölü hacmi azaltmak amacıyla birinci segman yuvası, modelde sırasıyla 1 mm ve 2 mm yukarı taşınmış ve yeniden gerilmeler hesaplanmıştır. Standart durumda gerilme 80 MPa iken, soğutulmuş pistonda gerilme 111 Mpa, birinci segman yuvasının 1 mm yukarı taşınması durumunda 106 Mpa ve 2 mm yukarı taşınması durumunda 90 Mpa'a yükseldiği görülmüştür. Yapılan çalışma neticesinde soğutma galerisi kullanılmasının segman bölgesinde 30-50 °C sıcaklık düşüşü sağladığı, bu sıcaklık düşüşünün birinci segman bölgesinde düzenlemeye olanak tanıyarak piston bölgelerinde gerilmenin değişkenlik gösterdiği sonuçlarına ulaşılmıştır.

Kelleher ve Ajotikar [19] nozül tasarımının yağ akışına etkisini araştırmak için bir CFD analiz yaklaşımı oluşturmuşlardır. Geliştirilen basitleştirilmiş CFD yaklaşımı ile gerçek yağ jetini modellemişlerdir. Analizde nozül bileşeni modellenerek nozül ucundaki akış koşulları tahmin edilmektedir. Dikkate alınan önemli tasarım parametreleri; borunun bükülme yarıçapı, dirsekten önceki ve sonraki boru uzunluğu, tüpün iç çapı, tüp uzunluğu ve piston soğutma nozülünün silindir bloğuna takılması olmuştur. Birçok nozül tasarımları için yağ jeti, bir CFD modelindeki akışı simüle ederek ve daha sonra yağın yüksek hızlı görüntülerini elde ederek değerlendirilmiştir. Nozüller uzunluklarına göre; uzun, ek 48 mm tüp uzunluğu ve 14 mm bükülme yarıçapına sahip nozül; orta uzunlukta, ek 20 mm tüp uzunluğu ve 14 mm bükme yarıçapına sahip nozül; kısa, ek tüp uzunluğu olmayan ve 10 mm bükülme yarıçapına sahip nozül ve referans, ek 48 mm tüp uzunluğu olan ve bükülme olmayan nozül olarak sınıflandırılmıştır. Referans nozülün CFD modeli, yukarı yönde 90 derecelik bir dirsek bağlantısı içermediği için nozül çıkış düzleminde oldukça düzgün bir hız dağılımı görülmüştür. Diğer nozüller ise 90 derecelik bir dirsek montajına sahip olduğundan nozül ucunda asimetric bir hız dağılımına neden olmuştur. Uzun ve orta uzunluktaki nozüller, yağ akışının,

bükümden sonraki ek uzunluğa bağlı olarak hızın düzelimi mümkün olabilirken kısa nozül için yağ akışı, çıkışa kadar tamamen ayrılmaya devam etmiştir. Bu çalışmada geliştirilen model deneysel olarak doğrulanmış CFD modelinin nozül tasarımını optimize etmek için tasarım aşamalarında uygulanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. CFD modelindeki tekdüze bir akış hızından daha büyük sapmanın, yağda daha türbülanslı, dağınık bir yağ püskürtmesi veren daha yüksek kesme kuvvetlerine yol açtığı gösterilmiştir.

Zhu ve arkadaşları [20] piston soğutma galerisinde salınım yapan yağın soğuma karakteristikleri üzerine etkisini incelemek amacıyla simülasyon araştırması yapmışlardır. Yağ galerisi modellenmiş, yağ dolum oranının soğutma üzerine etkisi araştırılmış ve ısı transferine odaklanılmıştır.



Şekil 1.1 Soğutma galerisi kesit gösterimi [20]

Tablo 1.1 Soğutma galerisi tasarıları [20]

Tasarı	W1(mm)	H1(mm)	β /%
1	5.6	9.4	53
2	3	10	57
3	4.8	10.6	51
4	7	11.4	47
5	8	9.2	50
6	6.6	8	60
7	6.2	10.8	49
8	4	8.6	43
9	7.6	9.8	46
10	5.2	8.2	40
11	4.4	12	44
12	3.4	11.8	41
13	7.2	10.2	59
14	5.8	8.8	54
15	3.8	11.2	56

15 farklı tasarıda çalışma yapılmış ve numaralandırılan bu çalışmaların sonuçlarına göre parametreler değerlendirilmiştir. 6 ve 13 numaralı galeri tasarımlarında ortalama cidar sıcaklığının en iyi seviyede olduğu görülmüştür. Bu durum daha yüksek doldurma oranının soğutma üzerine iyi bir etki yapması olarak yorumlanmıştır. W1 değeri arttıkça ortalama cidar sıcaklığı önce azalan daha sonra artan bir eğilim göstermiştir. Bu da soğutma galerisi için tasarımın optimum değerlerde olmasıyla iyi sonuçlar alınabileceğini göstermiştir. Yapılan çalışmaların sonuçları göz önünde bulundurularak tasarım parametrelerinin etkileri incelendiğinde doldurma oranının %64,6, W1 değerinin %19,8 ve H1 değerinin %15,6 etki oranına sahip olduğu saptanmıştır. Bu çalışmanın sonucuna göre en uygun tasarım parametre değerleri; 6,6 mm W1 soğutma galerisi üst genişliği, 10,8 mm H1 soğutma galerisi yüksekliği ve %60'luk dolum oranı olduğu görülmüştür. CFD hesaplaması ile bu optimum değerlerde analiz yapıldığında orijinal motor duvarının ortalama sıcaklığından 8 °C sıcaklık düşüşü gözlenmiştir.

Binder ve arkadaşları [21] bir kızılötesi kamera kullanarak sıcaklık ölçümlerine dayalı olarak soğutma galerisindeki mekansal ısı transfer katsayılarını belirlemek amacıyla bir ters ısı transfer yöntemi sunmuşlardır. Piston başlangıçta oda sıcaklığındayken soğutma galerisine enjekte edilen ılık bir yağ ile ısıtılmıştır.

Pistonun dış yüzey sıcaklık geçişi kızılötesi kamera ile yakalanmıştır. Isı transfer katsayısı akışkanın Prandtl sayısına, yüzey pürüzlülüğüne ve akışkanın göreceli hızına bağlıdır, bu nedenle yönü değiştirmek mümkündür. Bu deneyde de pistondan yağa doğru ısı transferi yerine yağdan pistona doğru bir ısı transferi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kızılötesi kamera ile alınarak ısı transfer katsayısı bölgesel olarak belirlenmiştir. Isı transferinin yönü gibi malzeme kalınlığı da ısı transfer katsayısını etkilemez. Bu nedenle çok ince bir sac kullanılmıştır. Isı transfer katsayıları kızılötesi kameradan gelen verilerden her pikseldeki yüzey sıcaklığı değişimi kullanılarak bir ters ısı transferi çözücüsü ile hesaplanmıştır. Hesaplanan ısı transfer katsayısı her bir pikselden yansıtılan iç yüzeye karşılık gelir. Bu nedenle bu yöntem tek boyutlu ısı transferi ve geçici olarak sabit bir ısı transfer katsayısı olduğu varsayılarak soğutma galerisinde çözülmüş bir ısı transfer katsayısı dağılımı sağlamıştır. Yapılan deneyde piston alt ölü noktada tutulmuştur. Yağ galeriye gönderildiği anda fotoğraf makinesi 5 fps'lik bir kare hızında çalışmaya başlamış ve 60 °C'ye kadar önceden ısıtılmış yağın piston soğutma galerisine girişi sağlanmıştır. Piston soğutma galerisinin ve özellikle çarpışma bölgesinin geçici ısıtma işlemi, 34 saniye boyunca kızılötesi kamera ile yakalanmıştır. Bu çalışma ile basit bir durum için yöntemin, soğutma galerisinde ısı transferi için uygulanabilirliği kanıtlanmıştır.

Gonera ve Sandin [22] bir diesel taşıt motoru pistonunun tüm termal yüklerinin belirlenmesi amacıyla bir analiz modeli geliştirmişlerdir. Bu modelde termal sınır koşulları belirlenmiş ve bu sınır koşullarına göre analiz yapılmıştır. Termal sınır koşulları piston yüzey sıcaklıkları, ortam sıcaklıkları, ısı transfer katsayıları ve konvektif yükler olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu analiz için CFD simülasyonlarından ve piston sıcaklık ölçümlerinden alınan yanma verileri kullanılmıştır. Ortam ve piston yüzeyleri sıcaklık verileri önceki simülasyon çalışmalarından temin edilirken ısı transfer katsayısı hesaplamaları literatürde yer alan çalışmalara benzer şekilde piston yüzeylerindeki ısı atım oranları göz önünde bulundurularak bu oranlara uygun şekilde yinelemeli olarak kalibre edilmiştir. Bu kalibrasyon optimizasyon kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Termal analiz piston modeli, nominal yük durumları, yani ölçüm verilerinin mevcut olduğu yük durumları ile ölçüm verileri bulunmayan varsayılan yük durumları için değerlendirilmiştir. Farklı yük durumlarında, referans ölçüm sıcaklıkları, analiz sonucu sıcaklıklar ve piston

yüzeyleri üzerindeki ısı akışı, piston üreticisi tarafından belirlenen değerlerle karşılaştırarak model doğrulanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda piston termal analizinin piston üzerindeki sıcaklık alanı ve yüzeylerden ısı akışı açısından doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Sonuçların daha önceki deneysel sonuçlarla yüksek tutarlılık göstermesi ile bu çalışmanın uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Peng ve arkadaşları [23] piston soğutma galerisi için iki tür nanoyağ oluşturmak üzere bir çalışma yapmışlardır. Sırasıyla bakır ve elmas nanoparçacıklarını geleneksel motor yağına dahil etmişlerdir. Nanoyağ sayısal simülasyonu basitleştirmek için tek fazlı bir sıvı olarak kabul edilmiştir. Çalışmada bir CFD ANSYS ile gerçek piston verileri kullanılarak oluşturulan modelin soğutma analizi yapılmıştır. Galeri içerisindeki detaylı yağ akışı ve ısı transfer süreçleri simüle edilerek farklı krank açıları altında yağ dolum hızı ve ısı transfer katsayıları elde edilmiştir. Nanoyağın anlık akışı ve ısı transfer mekanizmasını farklı konsantrasyonlardaki etkisini keşfetmek için çok sayıda CFD incelemesi yapılmıştır. Daha sonra sayısal sonuçların doğrulanması için yaygın olarak kullanılan ampirik formüllerle karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda nanoyağın geleneksel motor yağı ile karşılaştırmasına bakılarak pistondan ısı atımı konusunda çok önemli avantajları olduğu görülmüştür. Simülasyon ile piston galerisindeki yağ akışı mükemmel bir şekilde görüntülenmiş ve galeri yüzeyindeki akış özellikleri hakkında doğru bilgiler elde edilmiştir. Nanoyağ, soğutma galerisinden geleneksel yağ kadar kolay bir şekilde atılamaz, bu da yağ dolum oranında artış sağlar. Yapılan çalışmalarda elmas nanoyağı akışkanının yağ doldurma oranının bakır nanoyağı akışkanı yağ doldurma oranına kıyasla biraz daha yüksek olduğu görülmüştür. Nanoyağ içerisinde elmas kullanımının bakır kullanımına kıyasla daha fazla ısı transfer katsayısı sağladığı görülmüştür. Analiz sonucunda yağın %1'inin, %2'sinin ve %3'ünün nanoyağı olmasıyla ısı transfer katsayısının sırasıyla %7,77, %17,08 ve %29,33 arttığı görülmüştür.

Liu ve arkadaşları [24] ağır ticari bir taşıtın piston örneğini alarak yağ galerisi ve piston bölgelerinin ısı transfer sınırlarını silindir içi yerel ısı transfer sınır koşulları kullanarak hesaplamış ve CFD analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar

hesaplanan değerlerin piston ölçüm noktalarındaki deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermiştir.

Umut Canvar [25] yaptığı çalışmasında, genel olarak pistonun yapısal ve termal açıdan gerilmelerini incelemiş ve bu gerilmelere bağlı olarak da kritik bölgelerdeki ortalama gerilmenin etkilerini inceleyerek yorulma analizlerini gerçekleştirmiştir. Öncelikle CFD analizleri kullanılarak yanma odasını oluşturan çukur geometrisinde dayanım açısından bazı noktalar göz önünde bulunurularak 4 farklı geometri oluşturulmuştur. Geometrilere piston katı modeline aktarılmış ve motor özelliklerine bağlı olarak gerekli parametreler kullanılarak her piston için yüzey sıcaklıkları elde edilmiştir. Belirlenen bu sıcaklıklar baz alınarak termal analiz yapılmış ve daha sonra farklı devirlerdeki yanma basıncına bağlı oluşan gerilmeler incelenmiştir. Yorulma için sonlu elemanlar programı kullanılarak yapısal ve termal analiz için model oluşturulmuştur. Sonrasında sonlu elemanlar modeli yorulma için tekrar kullanılmıştır. Son olarak da yapısal ve termal analiz sonucu elde edilen gerilme-gerinim değerleri yorulma analizinde veri olarak kullanılmıştır. Yapılan analiz sonucunda yanma sonrası oluşan ısının %35'lik kısmının yağ galerisi ile atıldığı saptanmıştır. Analiz sonucunda gözlemlenen deformasyonların tasarım esaslarını karşılar yönde olduğu, en fazla deformasyonun piston kafasının silindir dayanma tarafında meydana geldiği görülmüştür. Elde edilen güvenlik katsayıları açısından kritik bölgeler yağ kanalı, piston çukuru tabanı ve yağ galerisinin giriş bölgeleri gösterilmiştir. Bu bölgelerdeki güvenlik katsayısını arttırmak için çukur tabanının piston pim eksenindeki bölgede enjektörün kendi eksenini etrafında uygun bir açıda döndürülebileceği, yağ galerisinin yüksekliğinin arttırılabileceği, yağ galerisinin giriş kısmındaki bölge için yağ galerisi kesit geometrisinin açılı hale getirilebileceği belirtilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

İçten yanmalı motorlarda termal yönetimin geliştirilmesinin birkaç farklı yöntemi bulunmaktadır. Soğutmalı egzoz manifoldu kullanımı, emme ve egzoz supaplarının sodyumla doldurulması, ultra kısa EGR bağlantıları ve yağ ile soğutulan piston kullanımı bu hususta önemli yöntemler olarak öne çıkmaktadır [18]. Pistonun yağ

ile soğutulması birkaç farklı şekilde olabilmektedir. En etkili piston soğutması ise piston kafası segman bölgesinde piston iç kısmına konumlandırılan bir soğutma galerisi içerisinde yağ dolaştırılması ile sağlanmaktadır.

Bu tezde amaç; bir içten yanmalı motor pistonunda piston kafası içerisinde konumlanmış olan soğutma galerisinin tasarım farklılıklarının piston termal yönetimine etkisini incelemektir.

1.3 Hipotez

Bu çalışmada farklı soğutma galerisi tasarımlarının piston termal analizi üzerine etkileri incelenecektir. Soğutma galerisi tasarımı, galeri içerisindeki yağ dolum oranını ve yağ akışını etkileyen önemli bir husustur. Değişen tasarıma bağlı olarak yağ dolum oranı ve galeri içerisindeki yağ akışı, soğutma galerisi ısı transfer katsayısını değiştirmektedir. Çalışmanın sonucunda soğutma galerisi tasarımındaki değişikliğin piston soğutma galerisi üzerinden atılacak ısı oranını değiştirmesi beklenmektedir. Ayrıca aynı tasarımlarda piston malzemesinin değiştirilmesi sonucunda ısı akışının da değişmesi beklenmektedir.

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA PİSTONUN SOĞUTULMASI

2.1 İçten Yanmalı Motorlarda Yanma ve Sıcaklık Etkileri

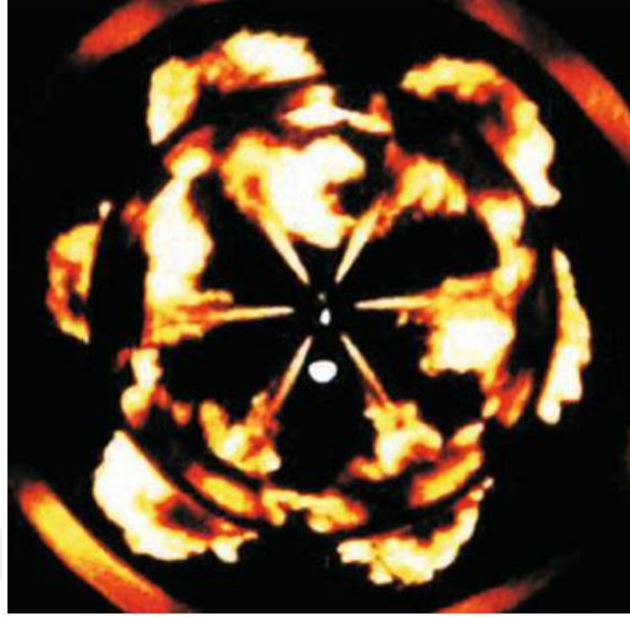
Modern içten yanmalı motorlarda spesifik güç çıkışı arttıkça pistonlar daha fazla termal yüklere maruz kalmaktadırlar. Motorun güvenli çalışmasının sağlanması için verimli piston soğutmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Yakıtta depolanan kimyasal enerji, yanma sırasında silindir içerisinde ısı enerjisine dönüştürülür. Piston, yanma odasının hareketli bir elemanı olarak bu ısının bir kısmını mekanik işe dönüştürür ve biyel kolu vasıtasıyla krank milini tahrik eder. Mekanik işe dönüştürülemeyen ısı kısmen egzoz gazı ile dağılırken kalan kısım konveksiyon ve radyasyon yoluyla yanma odasıyla temas halinde olan motor parçalarına aktarılır. Mekanik gerilmelere ek olarak yüksek sıcaklıklar bileşenlerin termal yüklenmesine yol açar.

Benzin motorlarında buji yakıt-hava karışımının yanmasını başlatır. Alev cephesi her yönde dengeli bir şekilde genişler, böylece yanma odasını çevreleyen tüm yüzeyler gaz sıcaklığına maruz kalır. Bu, yanma odasından pistona doğru bir sıcaklık gradyanı oluşturur.

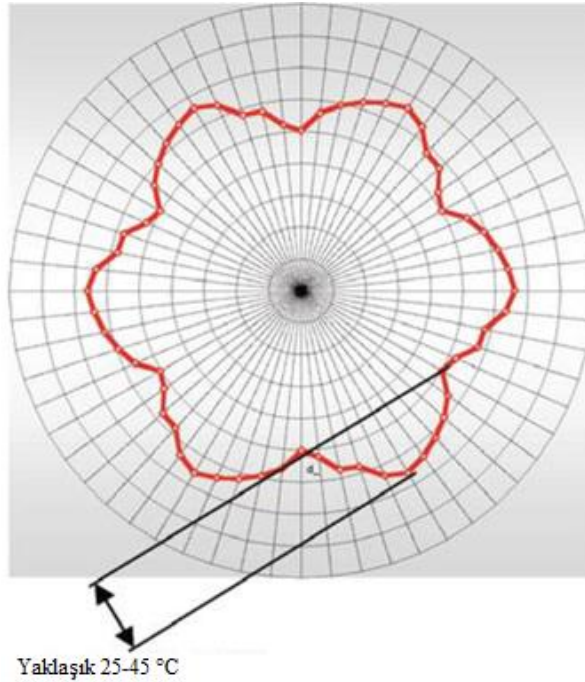
Direkt püskürtmeli diesel motorlarında yanma, enjeksiyon nozülü çevresinde başlar çünkü yanıcı karışım ilk olarak bu noktada bulunur. Bu alandaki karışım kendiliğinden ateşlendikten sonra, yanma lobları şeklinde birkaç alev cephesi,

yanma odasını çevreleyen yüzeylere doğru genişler. Bu, özellikle yanma odasında pistona doğru homojen olmayan bir sıcaklık alanı oluşturur. [26]



Şekil 2.1 Diesel motorlarında alev cephesi [26]

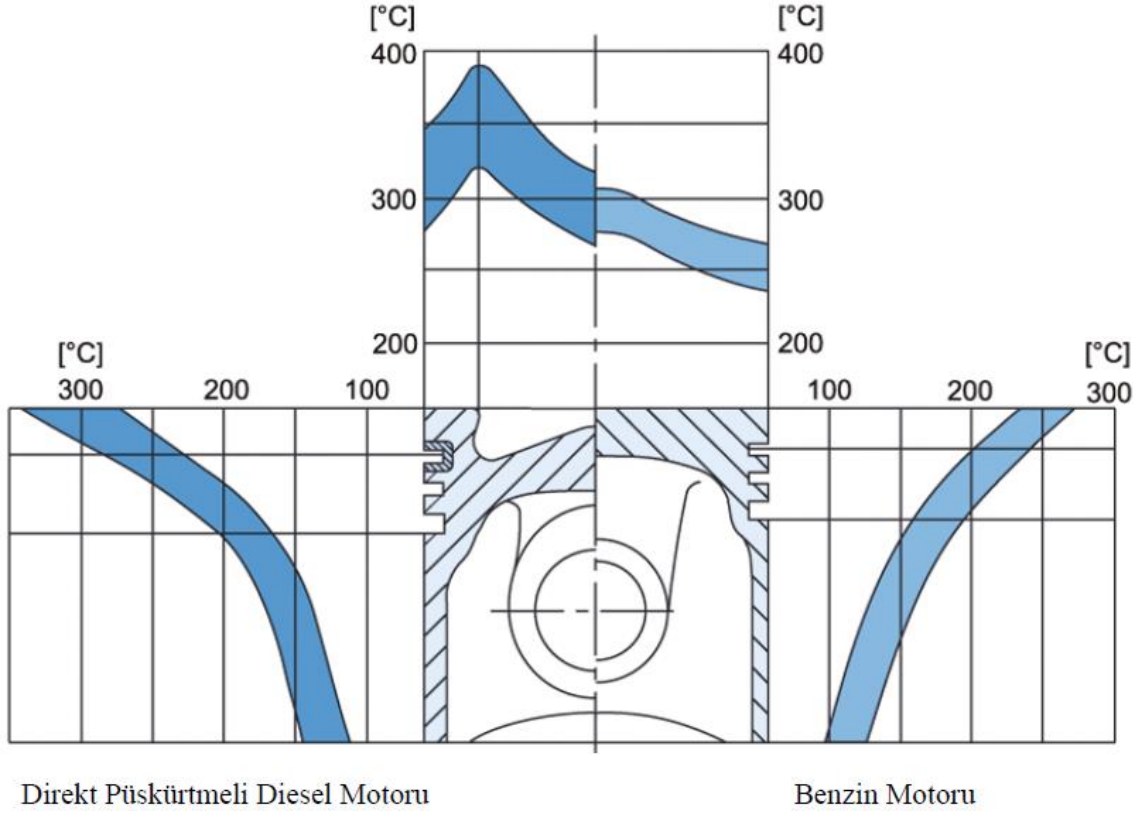
Yanma sonucunda, yanma lobları yoluyla ısı diesel motoru piston üst yüzeyinde bir dalgalı sıcaklık profili oluşturulur. Bir yanma lobunun tepe ve çukur bölgeleri arasındaki sıcaklık farkı 40 °C'yi aşabilir. [26]



Şekil 2.2 Piston üst yüzeyinde dalgalı sıcaklık profili [26]

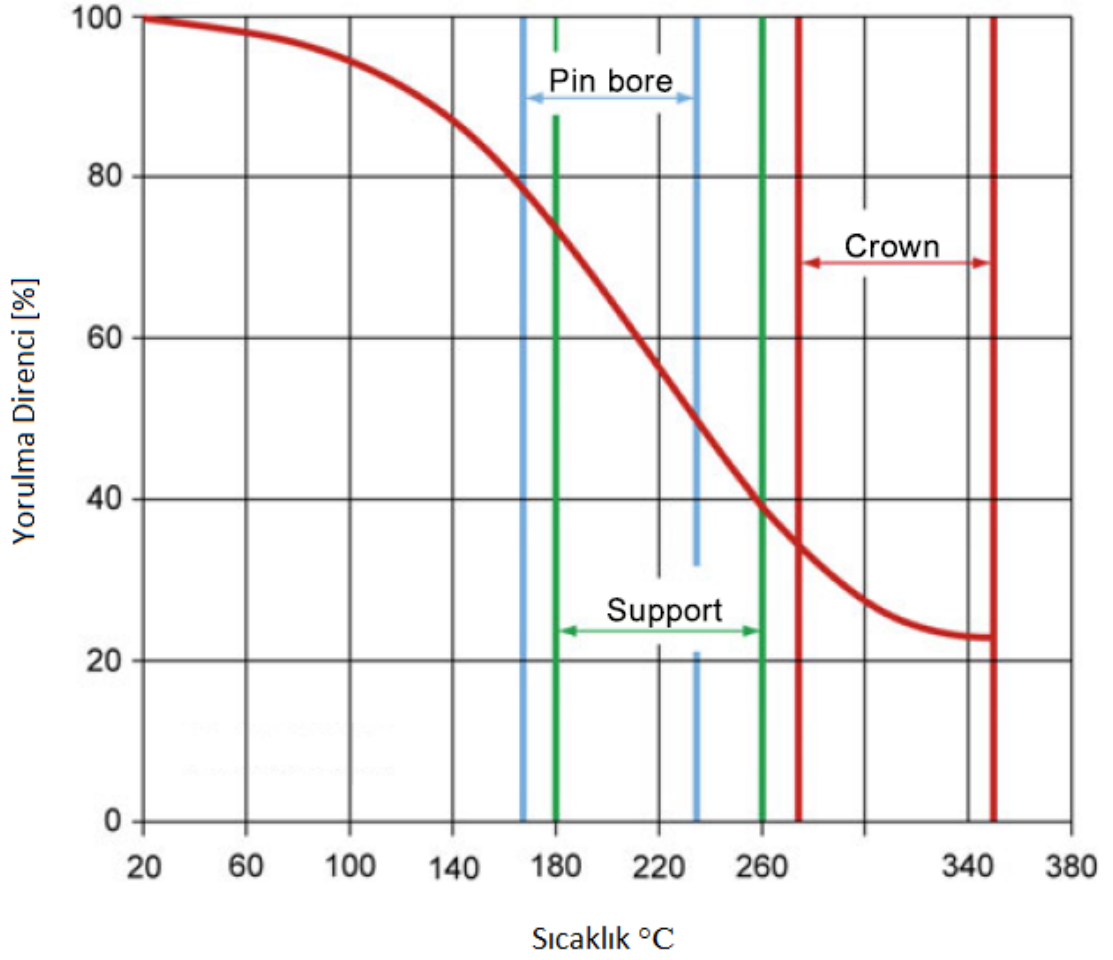
2.1.1 Piston Sıcaklığı Profili

Çeşitli yanma süreçleri ve sonuçları ve farklı piston geometrileri nedeniyle, diesel ve benzin motorlarının pistonları farklı sıcaklık profilleri sergiler.



Şekil 2.3 Farklı piston tipleri için sıcaklık profilleri [26]

Pistondaki ısı yükleri ve yüksek sıcaklıkların etkisiyle sıcaklık profilleri piston üzerinde farklı etkilere sebep olabilir. Özellikle deformasyon, termal yük ve malzeme mukavemeti üzerinde etkiye sahiptir. Termal yük ve ortaya çıkan yerel sıcaklık bileşenleri, pistonun yorulma direncini önemli ölçüde azaltır. Tipik olarak 160 ila 260 °C'lik bir sıcaklık seviyesine ulaşan pim yuvası ve destek alanlarının, oda sıcaklığı özelliklerine kıyasla %20 ila %60 daha düşük yorulma mukavemeti sergilediği anlamına gelir. 300 ila 400 °C sıcaklıklara ulaşabilen diesel motor pistonlarının, piston kafası ve piston üst yüzeyinde yorulma direnci %80 kadar düşer. Demir içeren malzemeler 400 °C'ye kadar sıcaklıklarda önemli ölçüde daha az hassastır. [26]



Şekil 2.4 Sıcaklık artışına bağlı piston bölgelerinde yorulma direnci [26]

2.1.2 Sıcaklığın Segmanlar Üzerinde Etkisi

Segman bölgesinde tolere edilebilir maksimum sıcaklık aşılsa özellikle birinci segman yuvasında plastik deformasyon meydana gelebilir. Yağlayıcının termal olarak neden olduğu kimyasal parçalanma ek olarak yuva içerisinde karbon birikimine neden olabilir. Bu artıklar daha sonra piston segman bölgesinde izolatör görevi yaparlar ve pistondan silindir duvarına ısı transferini azaltırlar. Aynı zamanda piston segmanı hareketini engelleyebilir ve hatta tamamen bloke edebilirler. [26]

2.2 Piston Sıcaklıklarını Düşürme Yöntemleri

Motor çalışma koşullarının ve pistondaki ısı akışlarının piston sıcaklıkları üzerine önemli bir etkisi vardır. Motor hızı, motor yükü, ateşleme zamanlaması, enjeksiyon başlangıcı, hava, su ve yağ sıcaklıkları bu anlamda önemli parametrelerdir. Biyel kolu bitişinden bir püskürtme jeti ile soğutma, karter üzerinde sabit bir püskürtme jeti ile soğutma ve piston içerisinde bulunan soğutma galerisinde yağ dolaşımı ile soğutma sistemleri piston sıcaklığında azaltma sağlayan önemli sistemlerdir. Tasarıma bağlı olarak ilk piston segmanı yuvasında 50 °C'ye kadar sıcaklık düşüşü elde edilebilir.

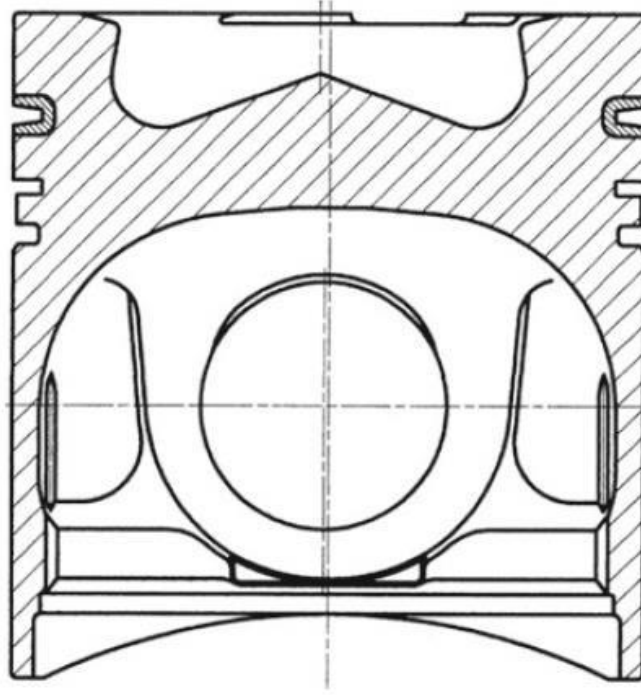
Pistondan yeterli ısı yayılımını sağlamak ve kritik piston bölgelerindeki sıcaklığı azaltmak için, dağıtılacak olan ısıнын miktarına ve yanma prosesine bağlı olarak çeşitli soğutma türleri kullanılır. [26]

2.2.1 Soğutmasız Pistonlar

Soğutmasız pistonlar, daha düşük ısı yüklemeleri nedeniyle benzin motorlarında ve düşük güç çıkışı olan diesel motorlarında kullanılır. Bu pistonların sıcaklık profili, ölçüm noktasına bağlı olarak, püskürtme jeti ile soğutmalı sisteme kıyasla 20 °C daha yüksek olabilir. [26]

2.2.2 Püskürtme Jeti ile Soğutmalı Pistonlar

Pistonu soğutmanın en kolay yolu, püskürtme jeti ile soğutma şeklindedir. Pistonun iç kısmı, bir soğutma yağı nozülünden gelen yağ ile mümkün olduğu kadar geniş bir alana sürekli olarak püskürtülür. Bu teknoloji, benzin motorlarında en yaygın olanıdır çünkü düşük sıkıştırma oranı genellikle soğutma kanalları için yer bırakmaz. Direkt püskürtmeli benzin motorlarında, piston üst yüzeyinin kâse benzeri şekli nedeniyle bir soğutma kanalının kullanılması daha kolay olacaktır. Püskürtme jeti ile soğutma, düşük güç çıkışı segmentindeki diesel motorlarında da kullanılır. [26]

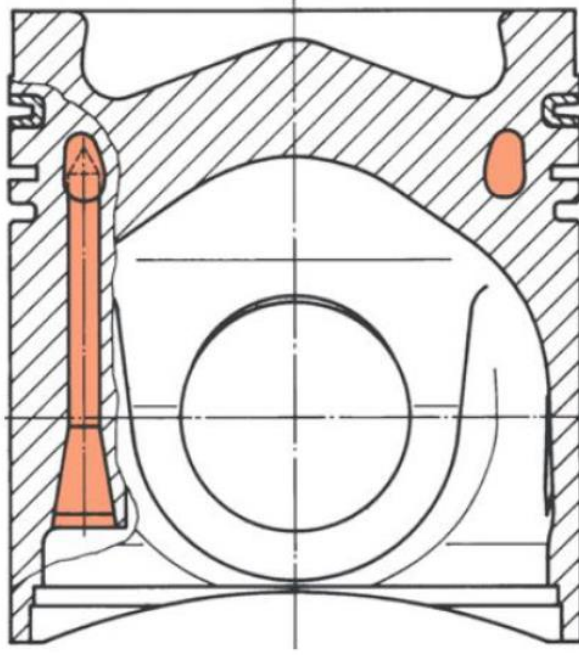


Şekil 2.5 Diesel motor pistonunda püskürtme jeti ile soğutma [26]

2.2.3 Soğutma Galerili Pistonlar

Pistonun sıcaklığı püskürtme jeti ile soğutma sistemiyle yeterince düşürülmezse, soğutma kanallı pistonlar kullanılmalıdır. Soğutma yağı, çalışma sırasında sürekli olarak soğutma kanalından geçirilir. Bir veya daha fazla sayıda yağ püskürtme memesi, soğutma yağını soğutma galerisine besler. Soğutma yağı, soğutma galerisinde bir veya daha fazla tahliye deliğinden geçer. Motor çalışma koşulları altında, soğutma galerisinin tamamen doldurulması mümkün değildir ve soğutma yağı, pistonun salınım hareketi ile soğutma galerisinde yukarı ve aşağı hareket eder. Bu, yüksek bir ısı transfer katsayısı ile soğutma galerisinde oldukça türbülanslı akışa yol açar. Üretim sürecine bağlı olarak soğutma galerileri; salt-core soğutma galerileri, soğutulmuş segman taşıyıcıları ve işlenmiş soğutma galerileri olarak sınıflandırılır.

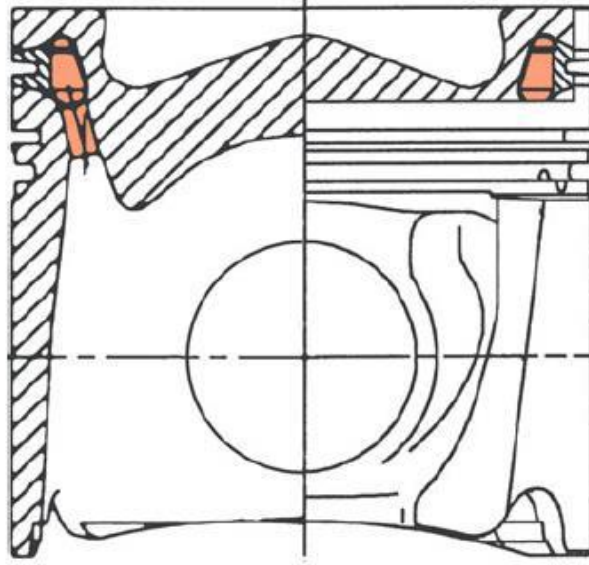
Salt-core soğutma galerileri olan pistonlar için soğutma galerileri, pistonun içerisinde, dökümden önce döküm kalıbına yerleştirilen bir salt-core kullanılarak üretilir. Döküm tamamlandıktan sonra, salt-core çözülür ve yüksek basınç altında su kullanılarak pistondan tamamen çıkartılır. [26]



Şekil 2.6 Salt-Core soğutma galerili piston [26]

Bu tasarım mümkün olan en iyi yağ kaynağını ve dolayısıyla soğutma galerisindeki en iyi soğutmayı sağlar. Salt-core soğutma galerisi, piston üst yüzeyine mümkün olduğunca yakın yerleştirilmelidir. Salt-core soğutma galerisi, püskürtme jeti ile soğutma sistemi ile karşılaştırıldığında, piston kafası bölgesinde sıcaklığı 20 °C kadar düşürür.

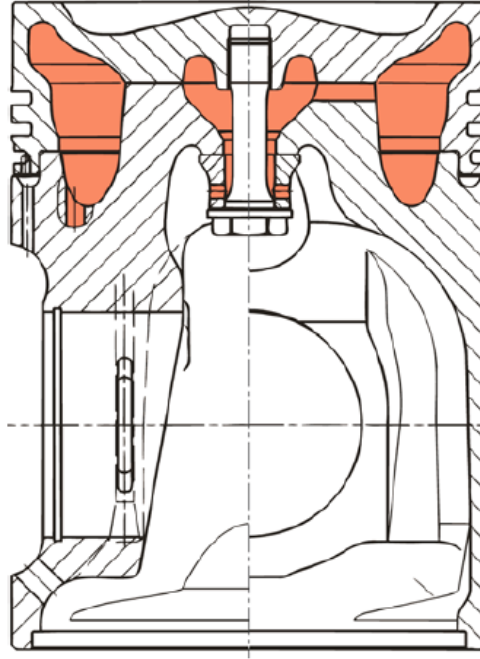
Soğutulmuş segman taşıyıcısı olan pistonlar için, Niresist segman taşıyıcının üzerine bir metal levha kanalı kaynaklanır, bu da kapalı bir soğutma kanalı oluşturur. Pistonun dökülmesinden önce bu bileşen alfin banyosuna yerleştirilir, döküm kalıbının içine sokulur ve pistonun boşluğuna dökülür. Besleme ve boşaltma delikleri, sac metalden delme yoluyla oluşturulur. Giriş ve çıkış alanları için, soğutma yağı nozülünün püskürtme yönüne bağlı olarak, salt-core soğutma galerisi olan bir pistondaki tasarım kriterleri geçerlidir. Soğutulmuş segman taşıyıcılar, bir salt-core soğutma galerisi ile karşılaştırıldığında, piston kafası bölgesinde sıcaklık düşüşü daha azdır. [26]



Şekil 2.7 Soğutulmuş taşıyıcı segmanlı piston [26]

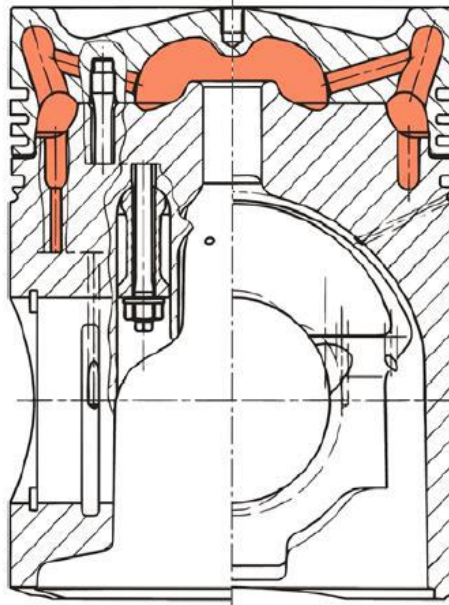
Soğutulmuş bir segman taşıyıcı, birinci piston segmanının sıcaklığının 50 °C kadar azaltılmasına yardımcı olur. Soğutma kanalındaki yüzey sıcaklığı, soğutma kanalının yeri yanma odası yüzeyine yaklaştıkça artmaktadır.

Kompozit pistonlarda, soğutma boşlukları kullanılır. Çoklu tasarım, bu soğutma boşluklarının tam olarak işlenmesini sağlar. Segman yuvaları arkasındaki dış soğutma kanalına ek olarak, kompozit pistonlar ayrıca bir iç soğutma boşluğuna da sahiptir. Dış soğutma kanalının şekli ve boyutu esas olarak yanma odası geometrisi ve piston segmanlarının yeri tarafından belirlenir. İç soğutma boşluğunun geometrisi, yanma odası geometrisi ve pistonun civata bağlantı düzenlemesinin tipi tarafından önemli ölçüde etkilenir. Merkezi cıvatalı bağlantıya sahip pistonlarda, iç soğutma boşluğu, orada bulunan somun dişi nedeniyle daha küçüktür ve soğutma boşluğundaki yağ vida etrafında akmaktadır. [26]



Şekil 2.8 Merkezi vida bağlantısı ve çalkalayıcı soğutmalı kompozit piston [26]

Çoklu cıvata bağlantılı pistonlar için cıvatalar, soğutma boşlukları arasındaki temas yüzeyine yerleştirilir. Bu nedenle iç soğutma boşluğu önemli ölçüde daha büyük olabilir. [26]



Şekil 2.9 Çoklu vida bağlantısı ve delik soğutma ile kompozit piston [26]

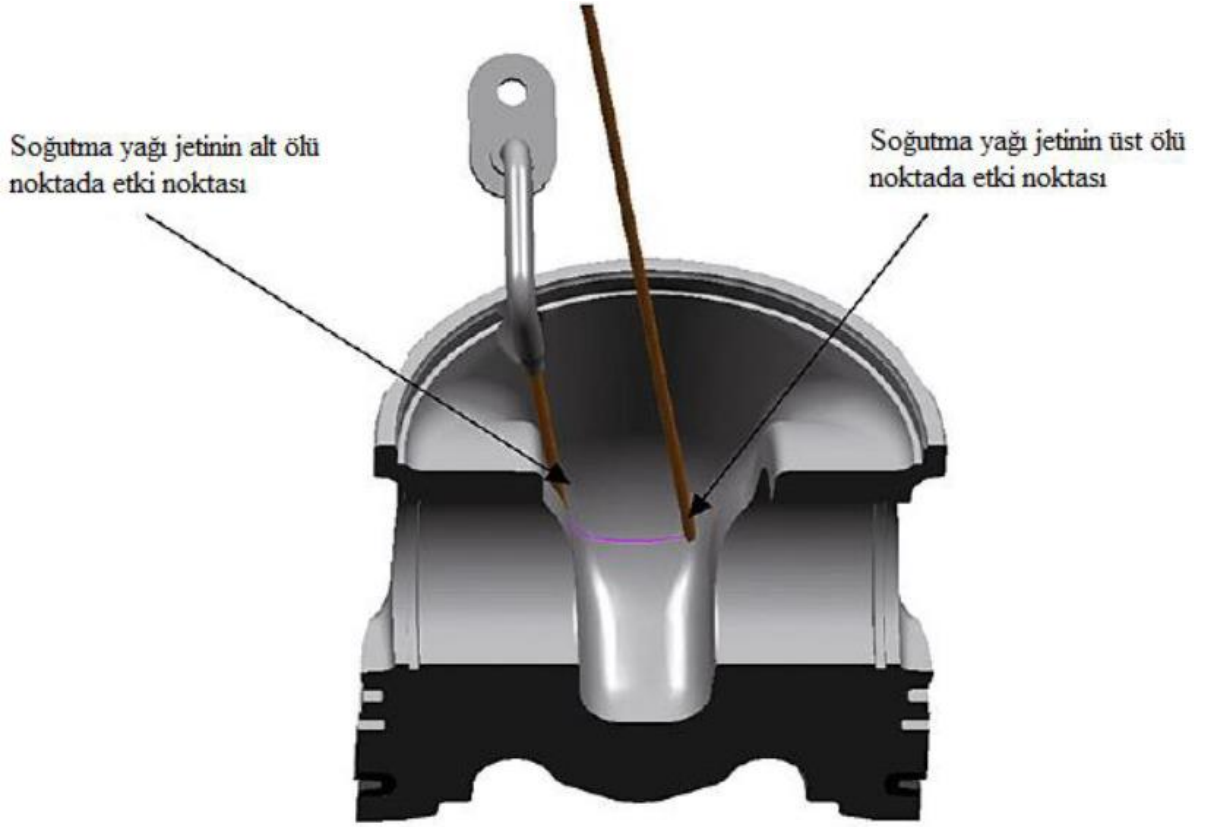
Dış ve iç soğutma boşluğu birbirine birden fazla boşaltma deliği ile bağlanır. Soğutma yağı tipik olarak dış soğutma boşluğuna beslenir. Çıkış açıklıkları hem dış hem de iç soğutma boşluğunda bulunur. İstisnai durumlarda, giriş deliği iç soğutma boşluğu içinde ortalınır. Çıkış açıklıkları daha sonra sadece dış soğutma boşluğunda bulunur. Dıştan iç soğutma boşluğuna tipik akış yönü ile, kompozit pistonlardaki soğutma yağı akışı, dış çıkışın iç çıkış kesiti ile yaklaşık olarak oranına bölünür. Yağ akışının bir kısmı, dış soğutma boşluğu içinden geçtikten sonra pistondan çıkar, ikinci kısmı yağ akışı, boşaltma delikleri içinden iç soğutma boşluğuna girer ve buradan krank karterine geri akar. [26]

2.3 Soğutma Yağı Kaynağı

Pistonun soğutulması için soğutma aracı motor yağıdır. Motor yağı pompası tarafından verilen soğutma yağı önce filtrelenir, kısmen soğutulur ve daha sonra karterdeki kanallar üzerinden dağıtılır. Pistona soğutma yağını beslemek için esasen iki yöntem vardır.

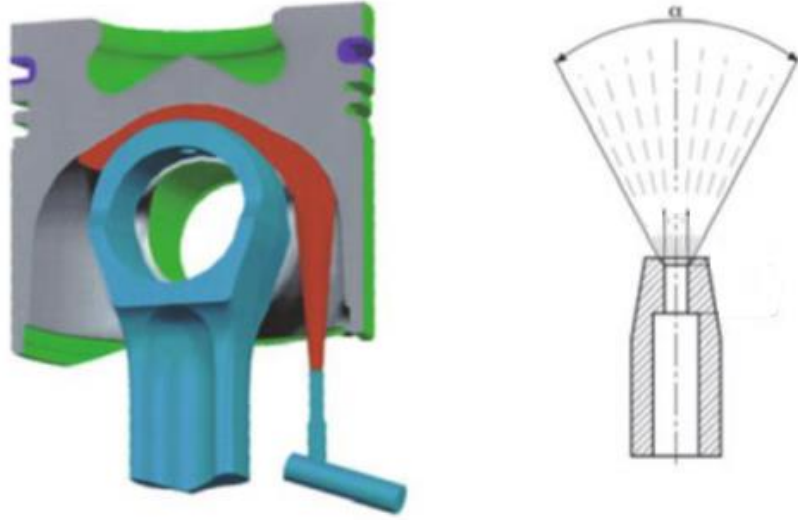
Yağ soğutma galerisine bir jet vasıtasıyla, krank karterine monte edilmiş ağızlıklar ile beslenebilir. Bu çözüm binek otomobil ve ticari araç motorları için tipik bir çözümdür. Büyük çaplı pistonlarda, yağın krank milinden pistona biyel kolu ile aktarılması alternatif olarak uygulanır.

Soğutma yağı, krank karterine yağ kanallarından ulaşır ve buradan soğutma kanalı giriş deliğine doğru bir jet olarak çıkar. Bir basınç düzenleme valfi tipik olarak karterdeki ve nozüldeki yağ kanalı arasında yer alır ve soğutma yağının nozüle sadece önceden belirlenmiş bir çalışma basıncının üzerinde akmasına izin verir. Bu, motorun yanı sıra düşük hızlarda çalıştırıldığında tüm yatak bölgelerinin yeterli yağlama yağı ile donatılmasını sağlar. Düşük termal yük çalışma koşullarında pistonun soğutulması gerekli değildir. [26]



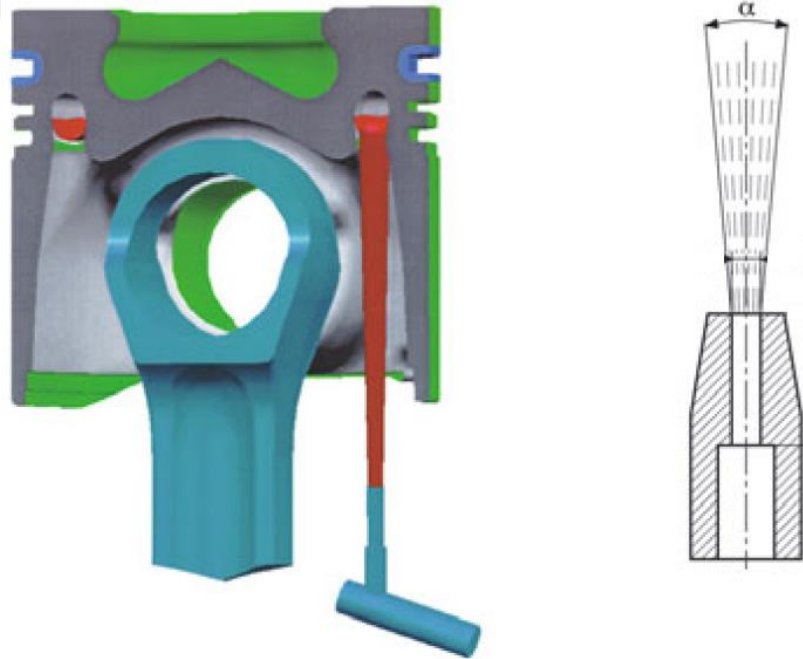
Şekil 2.10 Soğutma yağının piston konumlarına göre etki noktaları [26]

Püskürtme jeti soğutması için soğutma yağı nozülleri, soğutma yağının iç kontura geniş bir şekilde beslenmesi için yağ jetinin geniş yayılma açısını oluşturmalıdır. Yağ jeti, nozülünden çıktıkça genişler. Yayılma açısı α , soğutma yağı nozülünün geometrisine ve şekline önemli ölçüde bağlıdır. [26]



Şekil 2.11 Püskürtme jeti ile soğutma sisteminde yağın izlediği yol [26]

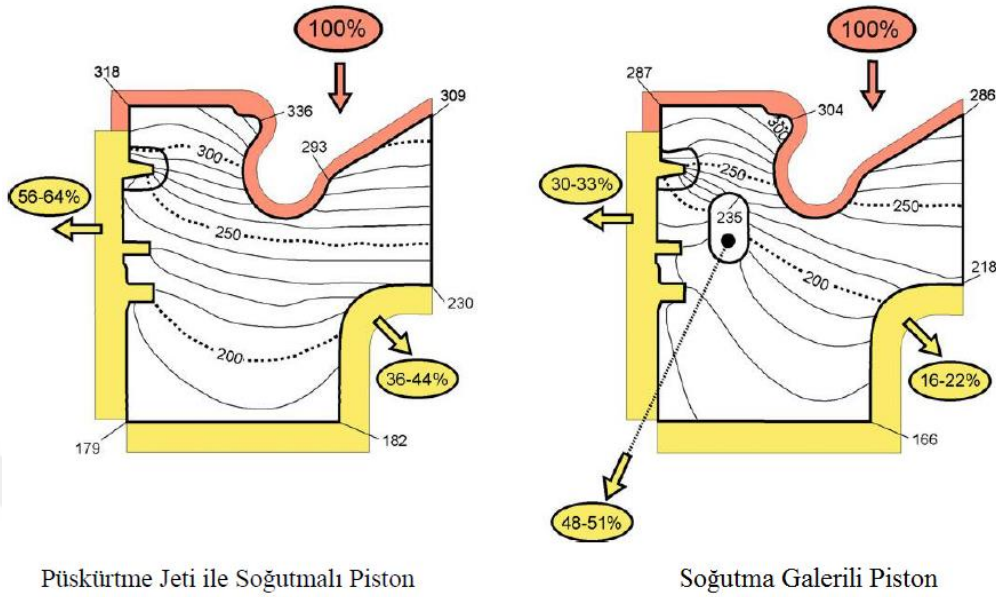
Soğutma galerileri ve soğutma boşlukları için soğutma yağı ağızları mümkün olduğunca küçük bir yayılma açısına sahip olmalıdır, böylece jet tüm piston stroku boyunca soğutma kanalının giriş açıklığına ve soğutma boşluğuna güvenilir bir şekilde çarpacaktır. [26]



Şekil 2.12 Soğutma galerili pistonlarda yağın izlediği yol [26]

2.4 Pistonlarda Isı Akışı

Pistondaki ısı akışı, piston soğutma tipine bağlıdır.



Şekil 2.13 Soğutma çeşitlerine göre pistonlarda ısı akışı [26]

Isı akışları, pistonun içine akan toplam ısı, pistondan akan toplam ısıya eşit olması gerektiğini belirten enerjinin korunumu ilkesine uygun olmalıdır. Püskürtme jeti ile soğutmalı bir pistonda, ısı akışının yaklaşık %55 ila 65'i, piston segmanı seti ve buna bağlı segman alanı yüzeyleri silindir çeperi üzerinden aktarılır. Kalan %35 ila 45, iç kontur ve soğutma yağı boyunca ve ayrıca pim yuvası dahil piston eteğinin alt kısmı boyunca dağılır.

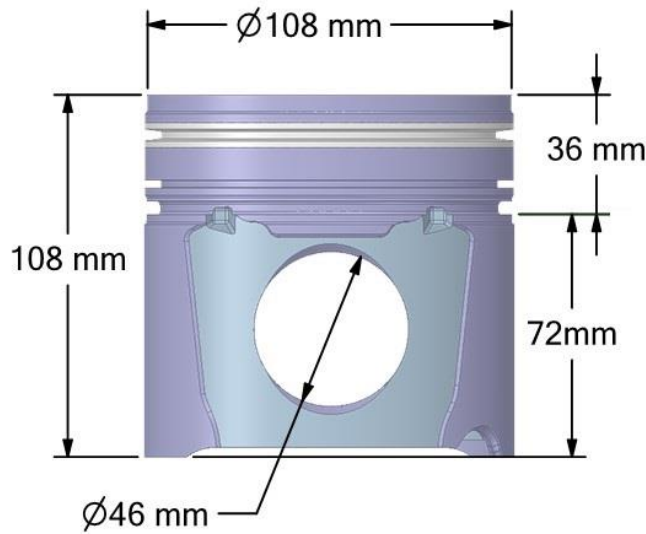
Püskürtme jet soğutması yerine soğutma galerileri kullanılıyorsa, piston segmanı setinden yayılan ısı akışı, soğutma galerisinin konumuna bağlı olarak %30 ila 40'a düşürülür. İç hattan yayılan ısı akışı ve piston eteğinin alt kısmı %15 ila 25'e düşürülür. Kalan %35 ila 55'lik ısı akışı, soğutma yağı tarafından atılır.

Salt-core soğutma galerileri, pistonda genellikle yağ segmanı yuvası seviyesine yerleştirilir. Soğutulmuş bir halka taşıyıcısına kıyasla, piston üst yüzeyinden piston segmanı setine ve iç kontur bölgesine ısı akışını daha düşük bir dereceye kadar azaltırlar. Soğutulmuş segman taşıyıcı, ısı akışının silindir duvarına doğrudan yolunda bulunur ve bu nedenle ısı akışının önemli ölçüde daha büyük bir kısmını emebilir. [26]

KULLANILAN METOT VE YAPILAN ÇALIŞMA

3.1 Piston Modeli

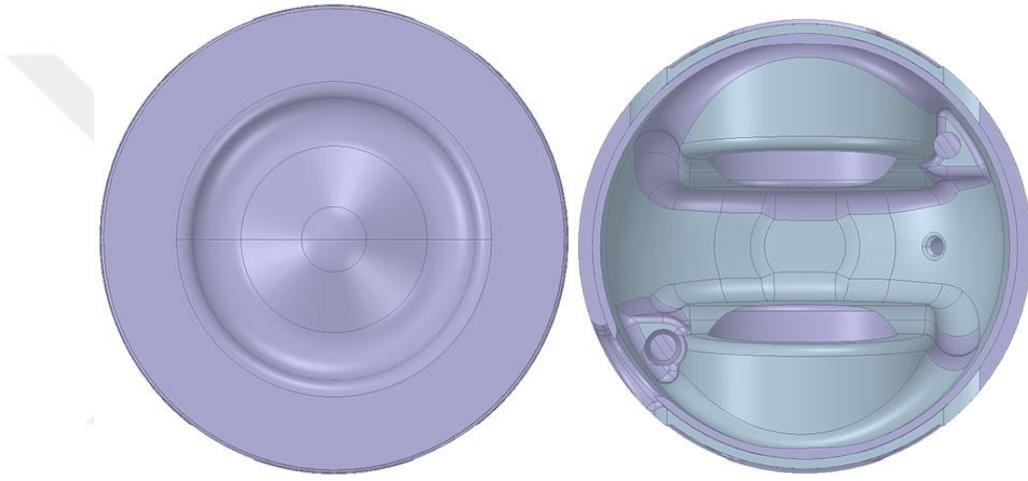
Bu çalışmada bir içten yanmalı motorda piston kafası soğutma galerisi tasarımının ısı transferine etkisinin incelenmesi amacıyla 4 zamanlı, 16,1:1 sıkıştırma oranına sahip, doğrudan püskürtmeli, 8,8l hacimli bir diesel motor pistonu referans alınarak bir piston modeli oluşturulmuş ve bu piston modeli üzerinde farklı soğutma galerileri tasarlanarak ANSYS simülasyon yazılımında kararlı durum termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan piston modeli temel boyutları Şekil 3.1’de, perspektif görünüşü Şekil 3.2’de, üst görünüşü Şekil 3.3’te ve ön görünüşü Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.1 Tasarlanan piston modelinin temel boyutları

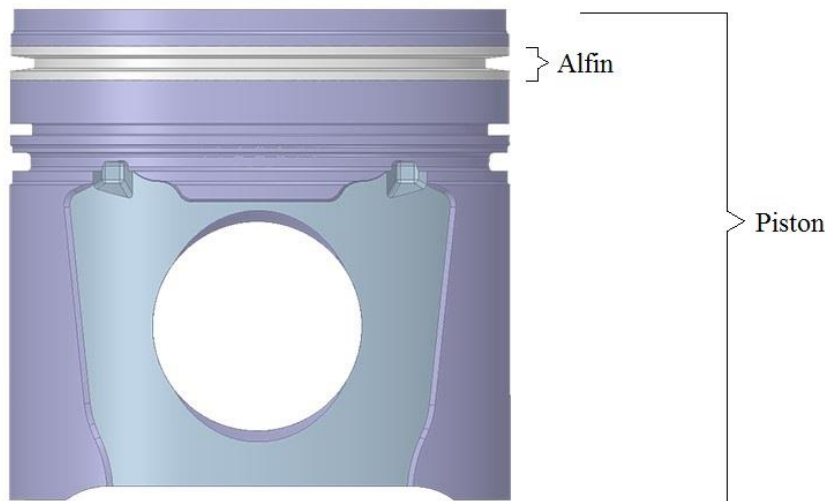


Şekil 3.2 Tasarlanan piston modelinin perspektif görünüşü



Şekil 3.3 Tasarlanan piston modelinin üst yüzeyi ve alttan görünüşü

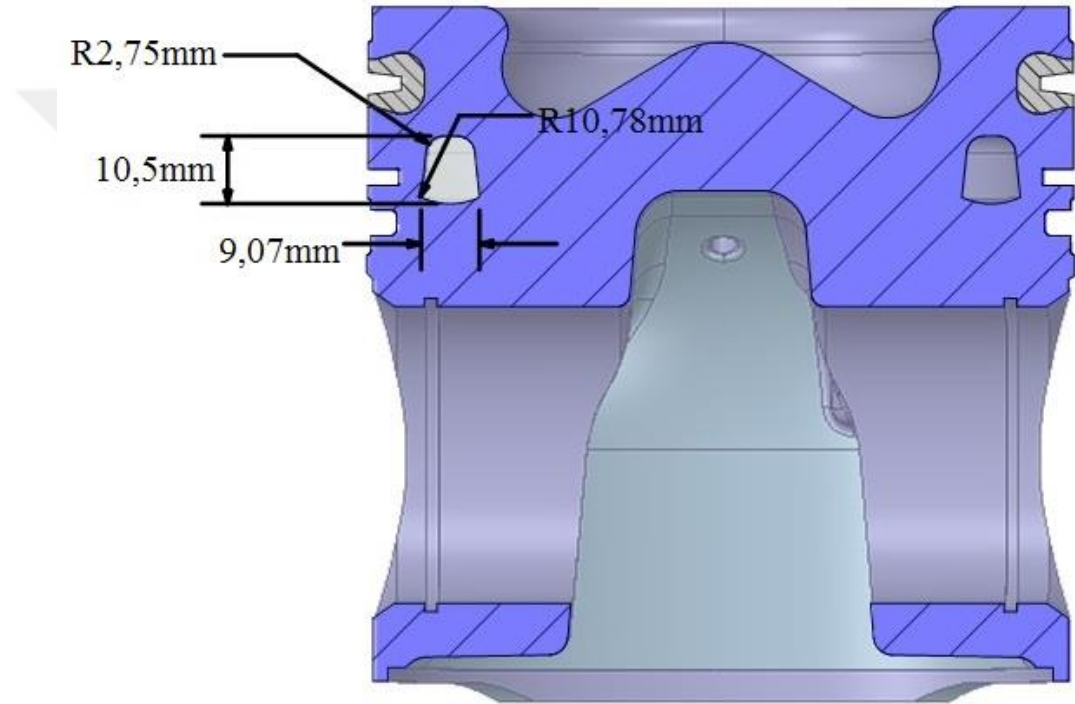
Tasarlanan piston basit olarak iki bölümden oluşmaktadır.



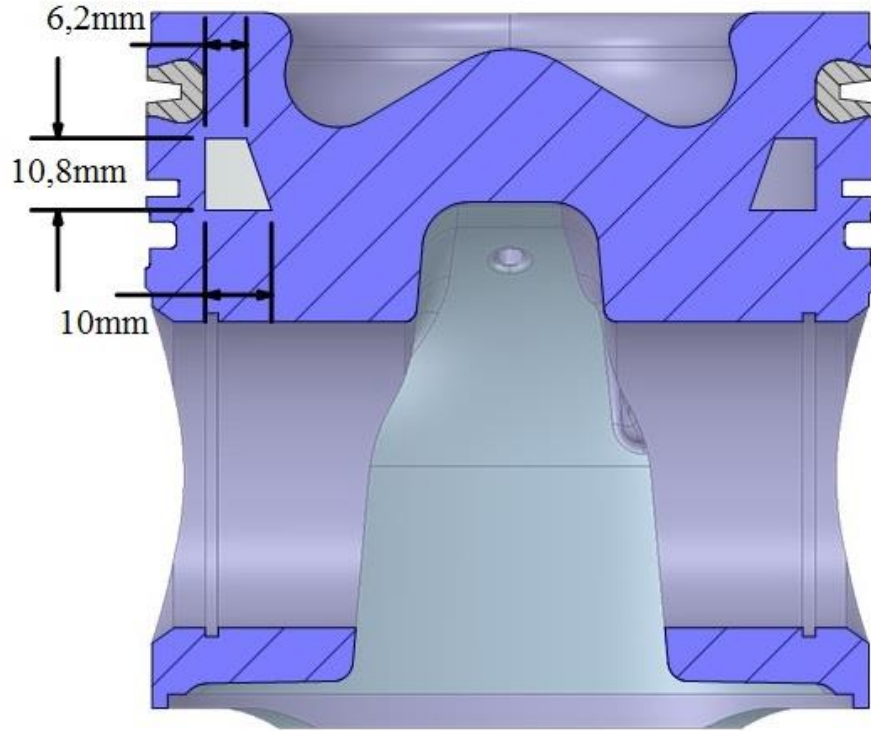
Şekil 3.4 Tasarlanan piston modelinin ön görünüşü

3.2 Soğutma Galerisi Tasarımları

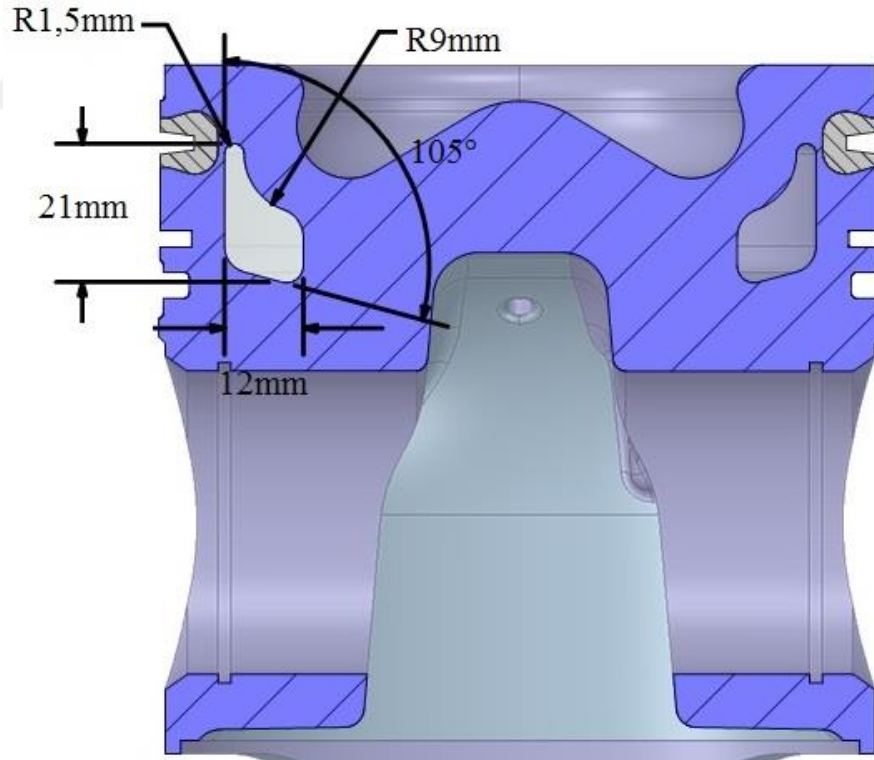
Piston modeli kesit görünüşü alınmış ve piston kafası iç bölgesine literatürde yer alan üç farklı soğutma galerisi seçilerek tasarımları gerçekleştirilmiştir. Birinci tasarım simetrik, sık rastlanan bir soğutma galerisidir. İkinci tasarım asimetrik ve birinci tasarıma göre daha uzun, üçüncü tasarım ise soğutma yağının galeri içerisinde fırçalama/çalkalama hareketi yapmasına olanak sağlayacak geometri ve uzunluktadır.



Şekil 3.5 Birinci soğutma galerisi tasarımı



Şekil 3.6 İkinci soğutma galerisi tasarımı



Şekil 3.7 Üçüncü soğutma galerisi tasarımı

3.3 Kararlı Durum Termal Analiz

Mühendislik uygulamalarında, ısı genellikle bir konumdan diğerine ve gövdeler arasında aktarılır. Bu transfer, sıcaklıktaki farklılıklar tarafından yönlendirilir ve yüksek sıcaklıktaki konumlardan düşük sıcaklıktakilere gider. Bu sıcaklık farkları yapılarda termal genleşme katsayıları nedeniyle mekanik gerilmelere neden olur. Isı transferinin miktarı, sıcaklık gradyanının büyüklüğü ve ilgili malzemelerin ısı direnci ile doğrudan orantılıdır. Mühendislik uygulamalarında, üç temel mekanizma vardır: iletim, taşınım ve radyasyon.

Konveksiyon (taşınım), akışkanların gözlenebilir ve ölçülebilir hareketi nedeniyle oluşan bir ısı transfer mekanizmasıdır. Akışkan hareket ettikçe, kendisiyle birlikte ısı taşır. Mühendislik uygulamalarında, bu olgu aşağıdakilerle karakterize edilebilir:

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (3.1)$$

q: birim alandaki ısı akışı (W/m^2)

T_s : yüzey sıcaklığı ($^{\circ}C$)

T_∞ : yüzeyden uzaktaki akışkan sıcaklığı ($^{\circ}C$)

h: konveksiyon ısı transfer katsayısı ($W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$)

Fourier Yasası denklemi:

$$Q = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (3.2)$$

Q: birim zamanda akan ısı (W)

k: malzeme ısı iletkenlik katsayısı ($W/(m \cdot ^{\circ}C)$)

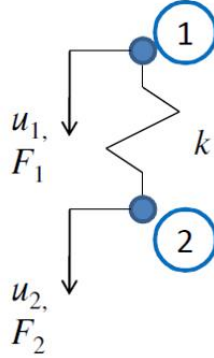
A: ısı akış yönünde normal kesit alanı (m^2)

dT/dx : sıcaklık gradyanı ($^{\circ}C/m$)

Sonlu Elemanlar Yöntemi, bir örnek sistemde incelendiğinde bir yapının sistem denklemlerinin “ayrıklaştırılmasındaki” iki temel konsepte dayanmaktadır. [27]

İlki, “sonlu elemanlar” olarak adlandırılan karakteristik alt alanlar üzerinde genel bir çözüm bulma üzerine kuruludur.

İkincisi, paylaşılan “düğümler” arasında yer değiştirme uyumluluğunun güçlendirilmesidir.



Şekil 3.8 Örnek kuvvet yay sistemi [27]

Sonlu elemanlar yönetiminin ilk kısmı için, karakteristik alt alan üzerindeki yönetim denklemleri türetilmelidir. Bu, ilk önce bir düğümü sabitlemek ve karşılık gelen yer değiştirmeyi çözmek için yapılabilir. [27]

$$F_2 = ku_2 \quad (3.3)$$

$$F_1 = -ku_2 \quad (3.4)$$

$$F_1 = ku_1 \quad (3.5)$$

$$F_2 = -ku_1 \quad (3.6)$$

F: yaya uygulanan kuvvet (N)

u: yer değiştirme (m)

k: yay sabiti (N/m)

Denklemler matris biçiminde şöyle yazılabilir:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -k \\ 0 & k \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} k & 0 \\ -k & 0 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

Bir yay için tam sonlu elemanlar denklemi matrislerin toplamıdır.

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} k & -k \\ -k & k \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (3.9)$$

Çubuk veya makas elemanları tam olarak yay elemanlarıyla aynı şekilde elde edilebilir. Bununla birlikte, bunlar “azaltılmış süreklilik” elementleridir, çünkü şekil fonksiyonlarına ve dolayısıyla eleman alanı üzerinde karşılık gelen düz gerilim/gerinim alanına sahiptirler.

$$\frac{EA}{L} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

A: kesit alanı (m²)

E: elastisite modülü (N/m²)

L: elemanın uzunluğu (m)

Sıcaklık için Fourier Yasası denkleminin q yönünden çözümü, (3.10) denklemine benzer bir denklemle ifade edilir.

$$\frac{kA}{L} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

Benzer şekilde konveksiyon denklemi şu şekilde elde edilebilir:

$$hA \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} T_s \\ T_\infty \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

h: konveksiyon ısı transfer katsayısı (W/ (m².°C))

A: ısı akış yönünde normal kesit alanı (m²)

T_s: yüzey sıcaklığı (°C)

T_∞: yüzeyden uzaktaki akışkan sıcaklığı (°C)

Kararlı hal termal analizi Fourier Yasası denklemine dayanmaktadır. [27]

Katı içindeki ısı akışı, Fourier Yasası'nın temelini oluşturur. Bu tür analizde, konvektif sınır koşulları için sıcaklığa bağlı ısı transfer katsayıları girilebilir. Bu nedenle, bu analiz tipi bu çalışmaya uygun olarak kabul edilmiştir.

3.4 Termal Analizlerin Gerçekleştirilmesi

Tasarlanan pistonlar ANSYS yazılımında kararlı durum termal analizine yüklenmiştir.

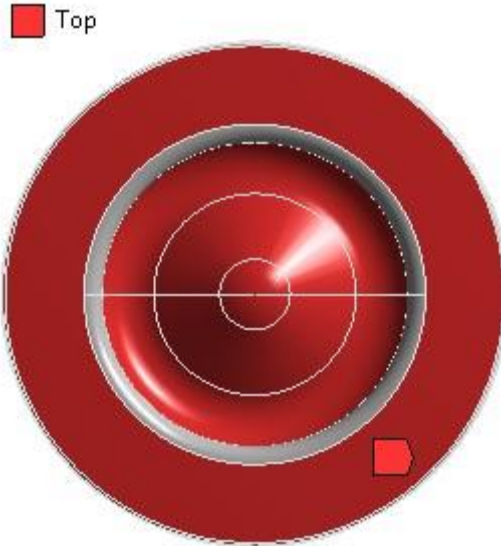
Kararlı durum termal analizi altı bölümden oluşmaktadır. Öncelikle modelin hangi malzemeden oluşacağını belirlediği mühendislik verileri bölümünden istenilen malzemeler seçilmektedir.

Oluşturulan geometrilerin yüklendiği geometri bölümünün ardından model bölümünde malzemeler modele uygulanmakta, koordinat sistemi ve bağlantılar ayarlanmakta, piston bölgeleri isimlendirilerek bölgelere göre ağ yapılabilir.

Kurulum bölümünde piston bölgelerine göre belli bir yüzeye ısı akışı, sıcaklık, ısı transfer katsayısı ve yanma verisi gibi birçok veri tanımlanabilmekte, çözüm kısmında analizden istenilen sonuçlar girilmektedir.

Bu çalışmada yanma analizi ile ilgilenilmemiş, her üç tasarım için de 1000 rpm ralanti işletme koşullarındaki yanma verisi kullanılarak yalnızca piston bölgelerindeki ısı akışlarının değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır.

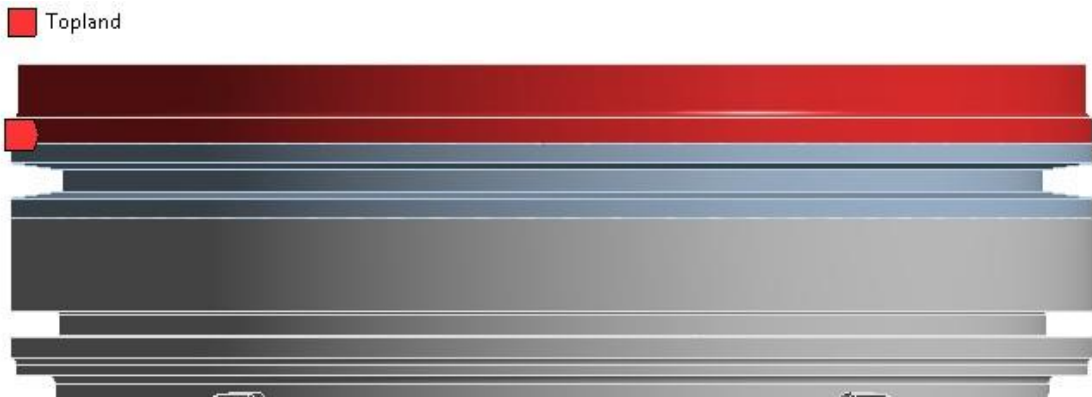
Bu doğrultuda piston malzemesi olarak piston bölgesi alüminyum alaşım ve alfin bölgesi gri dökme demir seçilmiştir. Daha sonra pistonun bölgeleri ayrıntılı olarak isimlendirilmiştir. İsimlendirme yapılırken piston bölgelerinin terimsel ifadeleri kullanılmıştır. Piston üst yüzeyi “top” (Şekil 3.9), piston üst yüzeyindeki büküm bölgesi “bowrim” (Şekil 3.10), piston üst yüzeyinden üst segman bölgesinde bulunan alfin üst kısmına kadar olan bölge “topland” (Şekil 3.11), alfin üst bölgesi “alfintop” (Şekil 3.12), alfin alt bölgesi “alfinbottom” (Şekil 3.13), alfin üst ve alt bölgeleri arasında kalan üst segman yuvası “topgroove” (Şekil 3.14), üst segman yuvası ile orta segman yuvası arasındaki bölge “midland” (Şekil 3.15), orta segman yuvası “midgroove” (Şekil 3.16), orta segman yuvası ile yağ segmanı yuvası arasındaki bölge “oilland” (Şekil 3.17), yağ segmanı yuvası “oilgroove” (Şekil 3.18) olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 3.9 Piston üst yüzeyi (top)

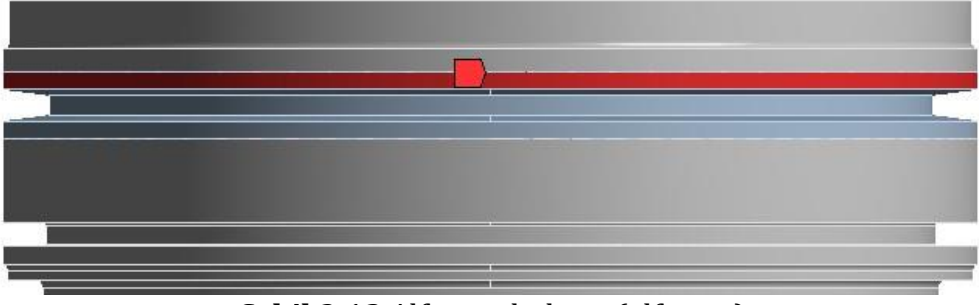


Şekil 3.10 Piston üst yüzeyindeki büküm bölgesi (bowlrim)



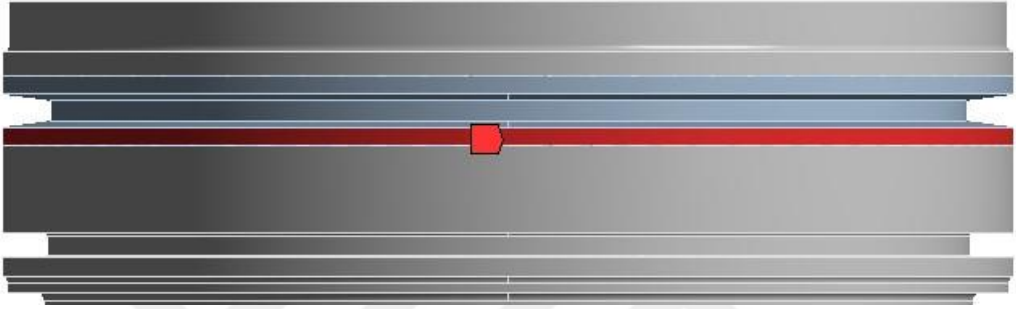
Şekil 3.11 Piston üst yüzeyi ile alfin bölgesi arasında kalan bölge (topland)

Alfintop



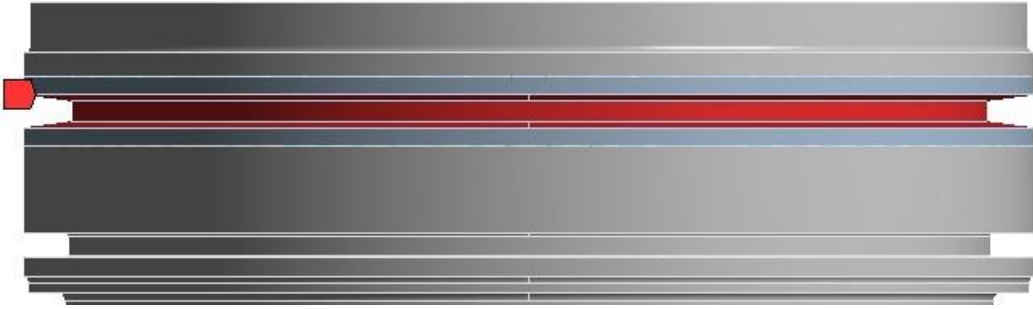
Şekil 3.12 Alfin üst bölgesi (alfintop)

Alfinbottom



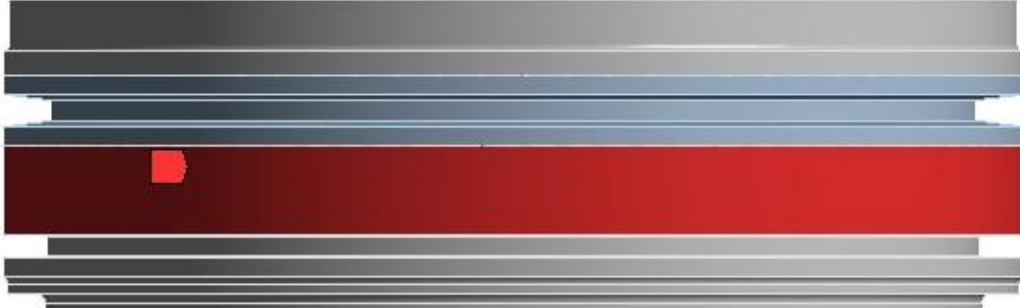
Şekil 3.13 Alfin alt bölgesi (alfinbottom)

Topgroove

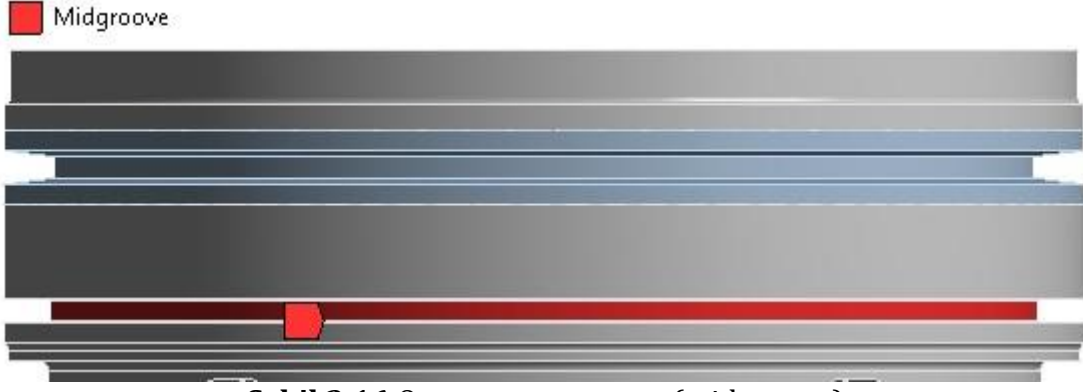


Şekil 3.14 Üst segman yuvası (topgroove)

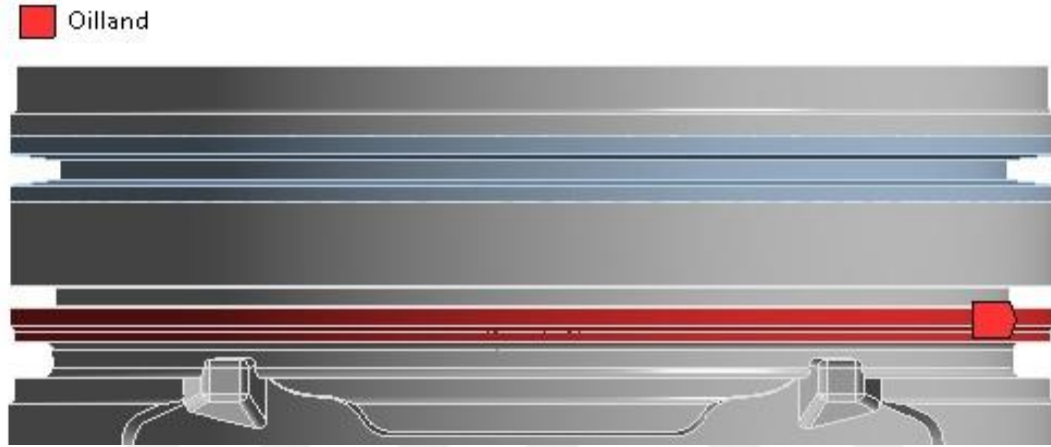
Midland



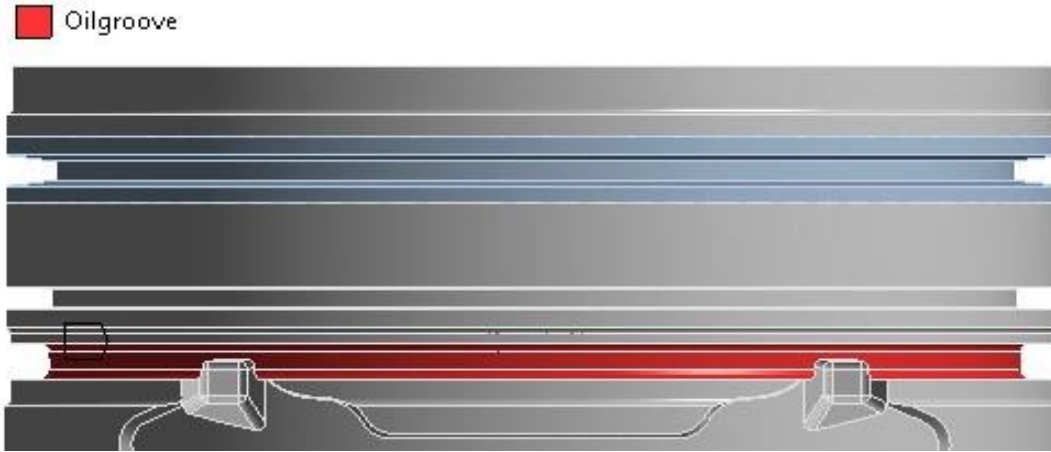
Şekil 3.15 Üst segman ile orta segman arasında kalan bölge (midland)



Şekil 3.16 Orta segman yuvası (midgroove)



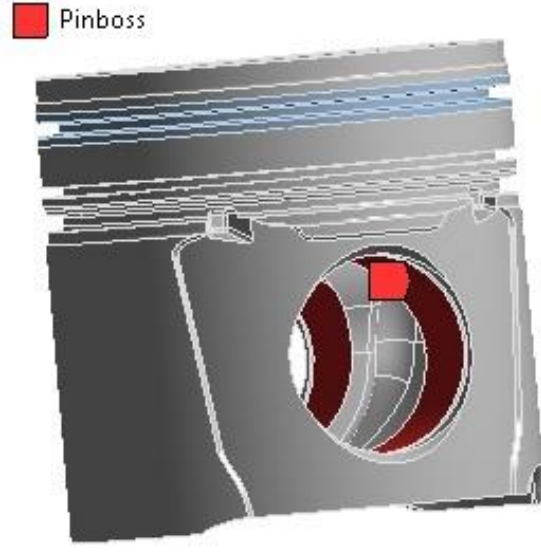
Şekil 3.17 Orta segman ile yağ segmanı arasında kalan bölge (oiland)



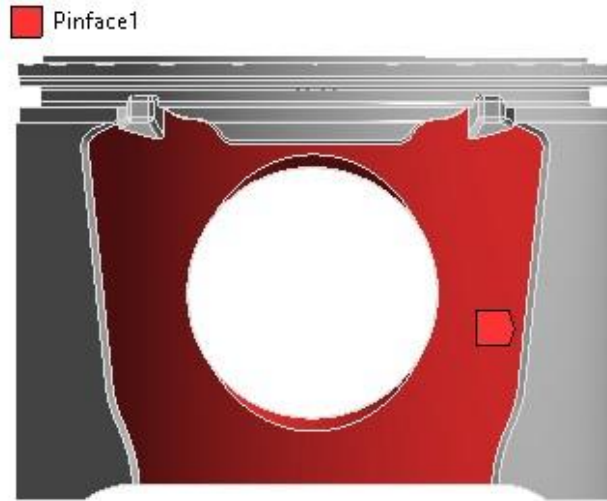
Şekil 3.18 Yağ segmanı yuvası (oilgroove)

Piston üst yüzeyi ve segman bölgesinin dışında kalan bölgelerden pin yuvası “pinboss” (Şekil 3.19), pin yuvasının üst kısmında kalan bölgeler “pinface1” (Şekil 3.20), “pinface2” (Şekil 3.21) ve “pinfacetop” (Şekil 3.22), etek bölgesi “skirt” (Şekil 3.23), piston etek bölgesinin iç kısmı “undercut” (Şekil 3.24), piston kafasının iç alt

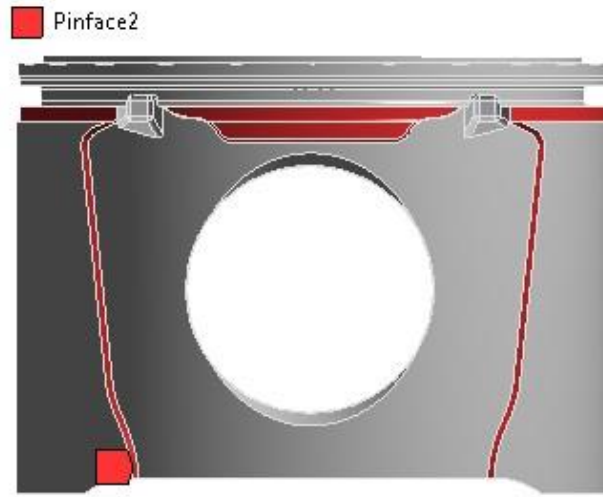
kısmı “innershape” (Şekil 3.25) ve soğutma galerisi “coolinggallery” (Şekil 3.26) şeklinde isimlendirilmiştir.



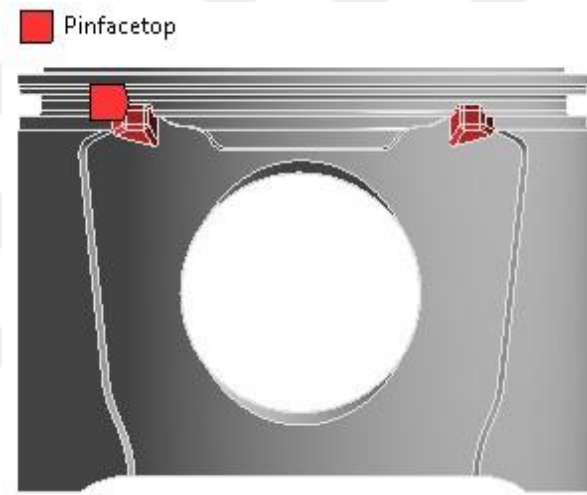
Şekil 3.19 Pin yuvası (pinboss)



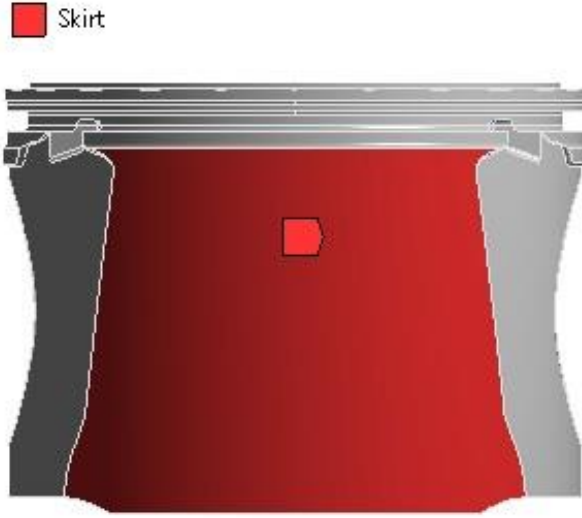
Şekil 3.20 Pin yuvası 1. bölgesi (pinface1)



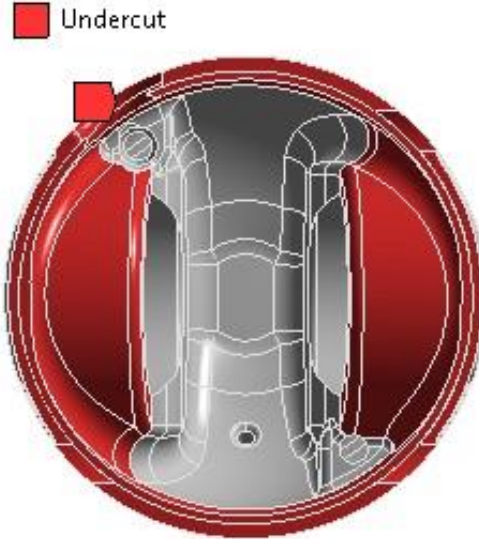
Şekil 3.21 Pin yuvası 2. bölgesi (pinface2)



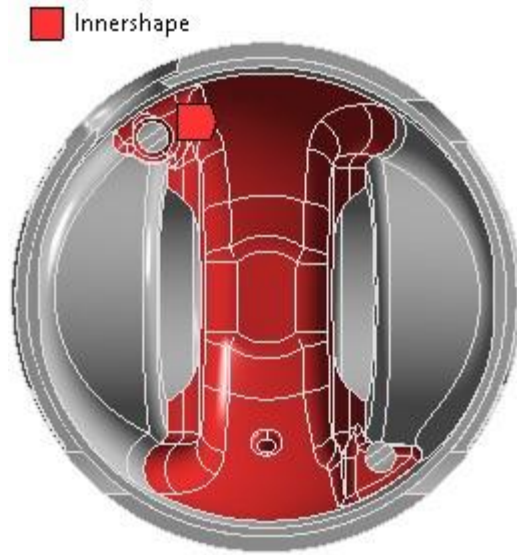
Şekil 3.22 Pin yuvası 3. bölgesi (pinfacetop)



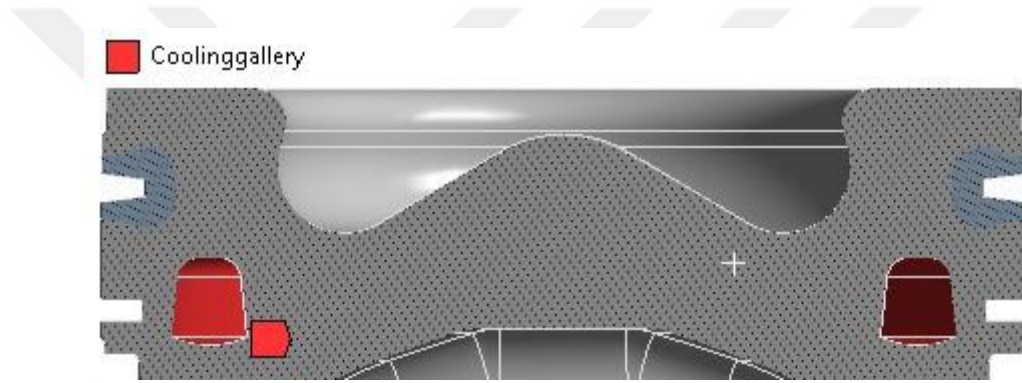
Şekil 3.23 Piston etek bölgesi (skirt)



Şekil 3.24 Piston etek bölgesi iç kısmı (undercut)



Şekil 3.25 Piston kafası iç alt yüzeyi (innershape)



Şekil 3.26 Soğutma galerisi (coolinggallery)

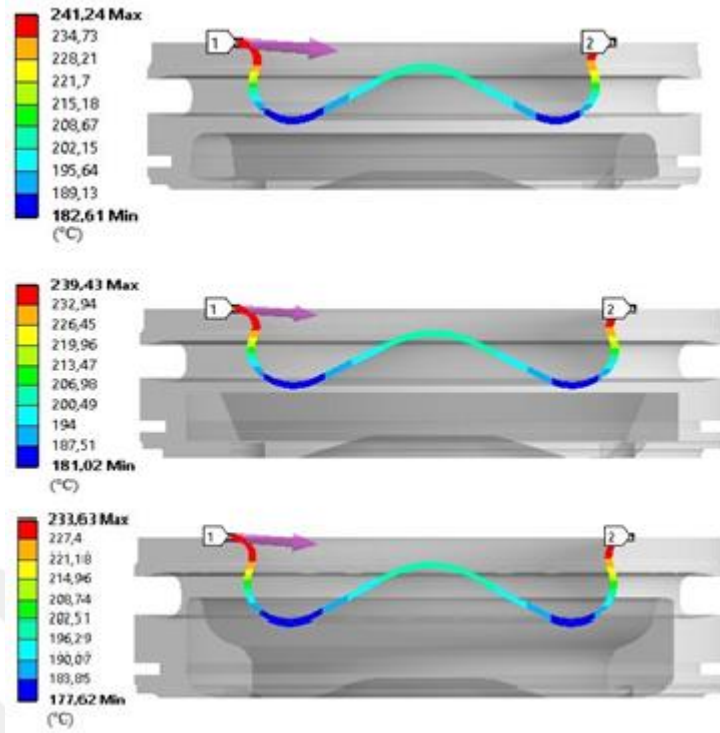
Bu isimlendirmenin ardından modele 144.106 eleman, 247.982 düğüme sahip ortalama yüzey alanı $3,72 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ve minimum uzunluğu $1,04 \times 10^{-4} \text{ m}$ olan orta seviye düzgünleştirilmiş standart mekanik ağ yapısı atanmıştır. Daha sonra isimlendirilen bölgelere literatürden ([14], [15], [22]) elde edilen bölgesel ısı transfer katsayıları ve sıcaklık değerleri tanımlanmıştır. Çözüm bölümünde, analizden tüm piston yapısının, üst segman bölgesinin, soğutma galerisinin, pin yuvasının, piston üst yüzeyinin sıcaklıkları ve isimlendirilen bütün piston bölgelerinin ısı akışları istenerek analizler gerçekleştirilmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1 Farklı Piston Tasarımlarının Analiz Sonuçları

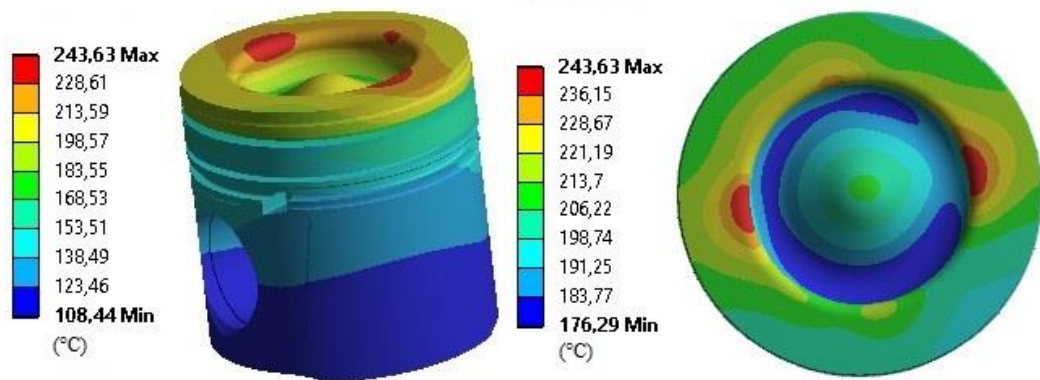
Analiz sonucu genel piston yapısı, pin yuvası, üst segman yuvası ve piston üst yüzeyi sıcaklık profillerinin her üç tasarım için de benzerlik gösterdiği, maksimum ve minimum sıcaklık değerlerinde küçük farklılıklar olduğu gözlenmiştir.

Piston üst yüzeyi çukur geometrisi sıcaklık profilleri incelendiğinde maksimum sıcaklık birinci tasarım piston üst yüzeyinde 241,24 °C, ikinci tasarım piston üst yüzeyinde 239,43 °C ve üçüncü tasarım piston üst yüzeyinde 233,63 °C'dir. Her üç tasarımda da minimum sıcaklıklar çukur geometrisinde çukur bölgelerinde gözlenmiş, çukur geometrisi tepe noktası ile piston üst yüzeyinin çukur geometrisi dışında kalan bölgelerinde sıcaklığın arttığı saptanmıştır.

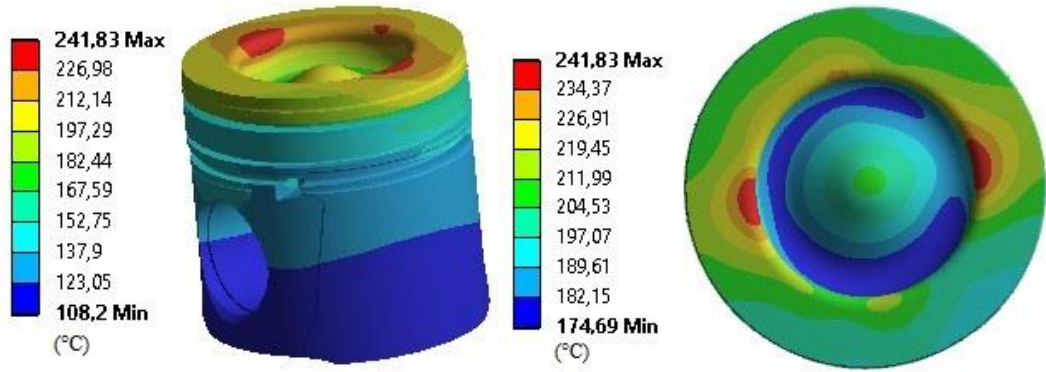


Şekil 4.1 Piston üst yüzeyi çukur geometrisi sıcaklık profilleri

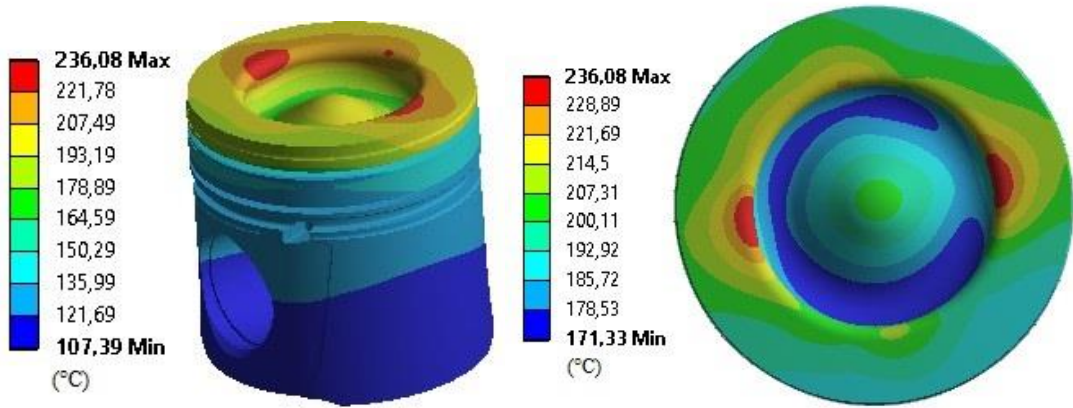
Genel piston yapısı sıcaklık dağılımlarına bakıldığında piston üst yüzeyinden piston etek bölgesine doğru sıcaklık kademeli olarak azalmıştır. Maksimum sıcaklıklar arasındaki fark 7,5 °C iken, minimum sıcaklıklar arasındaki fark yaklaşık olarak 1 °C'dir. Piston modelinin üç tasarımda da termal analizi sonucu üst görünümüleri incelendiğinde çukur geometrisinde sıcaklığın piston üst yüzeyinin geneline kıyasla daha düşük olduğu net olarak görülmektedir.



Şekil 4.2 Analiz sonucu birinci tasarım piston sıcaklık dağılımı

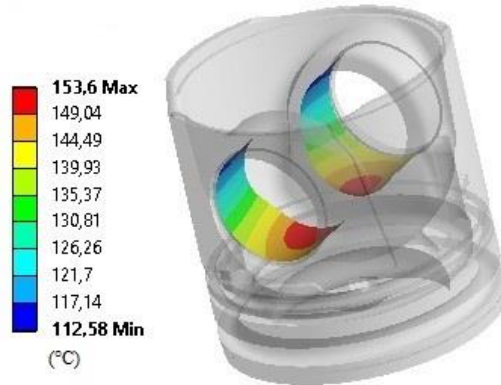


Şekil 4.3 Analiz sonucu ikinci tasarım piston sıcaklık dağılımı

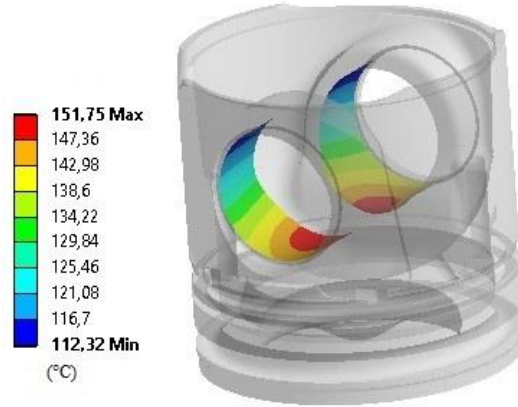


Şekil 4.4 Analiz sonucu üçüncü tasarım piston sıcaklık dağılımı

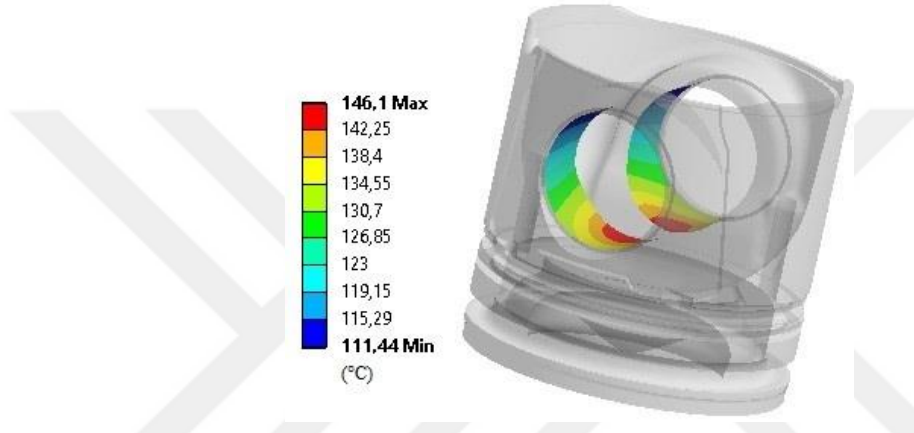
Tıpkı pistonun diğer bölgelerinde olduğu gibi pin yuvası sıcaklık dağılımlarında da birinci tasarımın maksimum ve minimum sıcaklıklarının ikinci ve üçüncü tasarıma göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Pin yuvası maksimum sıcaklıklarının sırasıyla 153,6 °C, 151,75 °C, 146,1 °C ve minimum sıcaklıkların sırasıyla 112,58 °C, 112,32 °C, 111,44 °C olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.5 Analiz sonucu birinci tasarım pin yuvası sıcaklık dağılımı

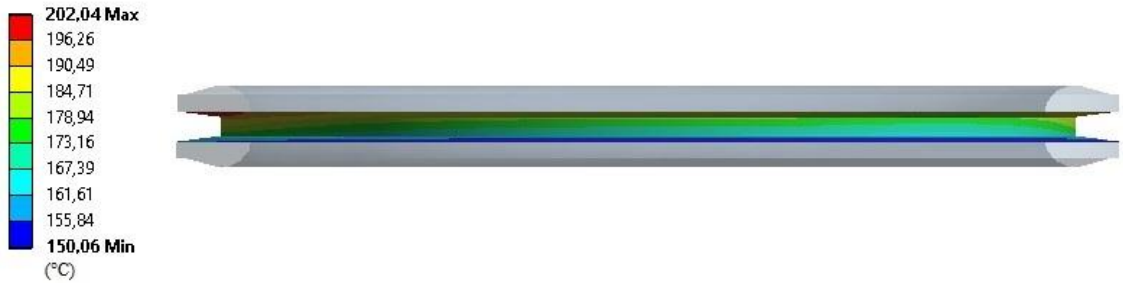


Şekil 4.6 Analiz sonucu ikinci tasarım pin yuvası sıcaklık dağılımı

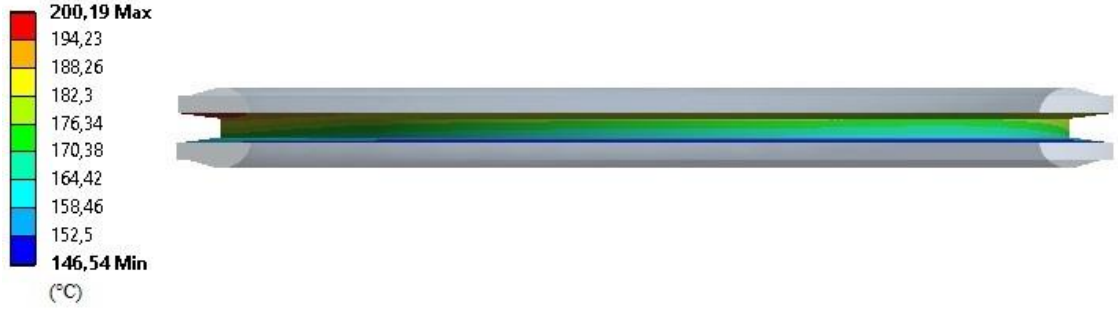


Şekil 4.7 Analiz sonucu üçüncü tasarım pin yuvası sıcaklık dağılımı

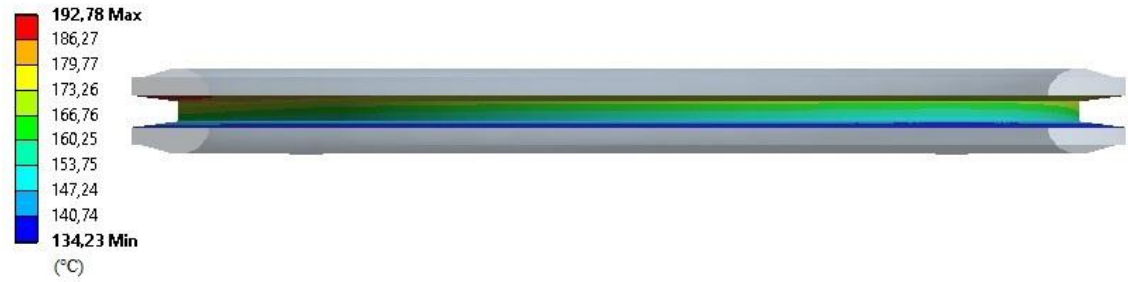
Üst segman yuvası sıcaklıkları incelendiğinde birinci tasarıma kıyasla ikinci tasarım soğutma galerisi kullanılması maksimum sıcaklığı 2 °C ve üçüncü tasarım soğutma galerisi kullanılması maksimum sıcaklığı yaklaşık 10 °C düşürmüştür. Ayrıca üst segman yuvası minimum sıcaklıklarında da pistonun diğer bölgelerine göre daha fazla düşüş sağlandığı dikkat çekmiştir.



Şekil 4.8 Analiz sonucu birinci tasarım üst segman yuvası sıcaklık dağılımı



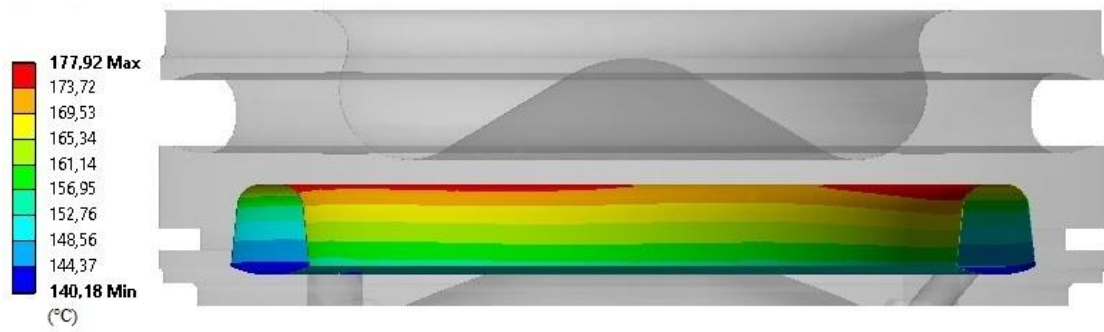
Şekil 4.9 Analiz sonucu ikinci tasarım üst segman yuvası sıcaklık dağılımı



Şekil 4.10 Analiz sonucu üçüncü tasarım üst segman yuvası sıcaklık dağılımı

4.2 Analiz Sonucu Isı Akış Oranlarının Karşılaştırılması

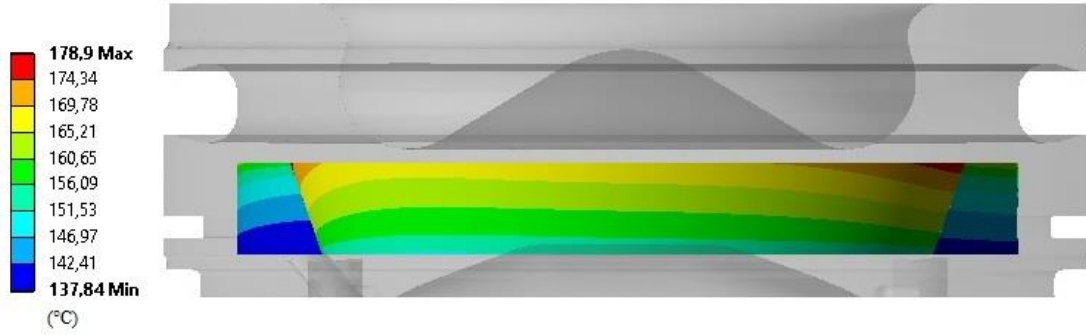
Yapılan çalışma sonucunda tasarımların bölgesel ısı verileri elde edilmiştir. Soğutma galerileri sıcaklık profilleri pistonun diğer bölgelerinin aksine farklılık gösterirken maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasında da farklar gözlenmiştir.



Şekil 4.11 Birinci tasarım soğutma galerisi sıcaklık profili

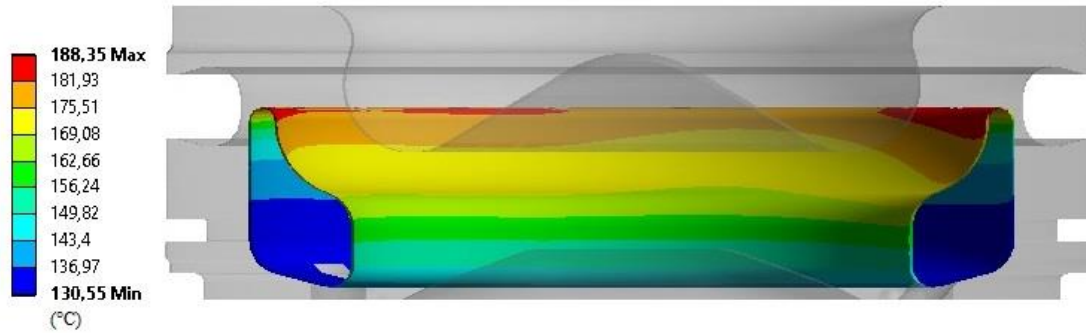
Pistonun farklı bölgelerinde maksimum ve minimum sıcaklıklar incelendiğinde birinci tasarımın maksimum ve minimum sıcaklıklarının yüksek olduğu görülmüştür. Ancak soğutma galerisi sıcaklık profillerine bakıldığında maksimum sıcaklık değerinin tam tersi durumda olduğu gözlenmiştir. Birinci tasarım soğutma galerisinde maksimum sıcaklığın 177,92 °C ile soğutma galerisi üst yüzeyinde

olduğu, minimum sıcaklığın ise 140,18 °C ile soğutma galerisi alt yüzeyinde olduğu görülmüştür. Profil incelendiğinde alt ve üst yüzey arasında sıcaklık kademeli olarak düşüş göstermiştir.



Şekil 4.12 İkinci tasarım soğutma galerisi sıcaklık profili

İkinci tasarım soğutma galerisinde maksimum sıcaklık değeri 178,9 °C ve minimum sıcaklık değeri 137,84 °C'dir. Bu verilere göre ikinci tasarımda soğutma galerisinde birinci tasarım soğutma galerisine göre maksimum sıcaklığın daha yüksek, minimum sıcaklığın ise daha düşük olduğu görülmüştür. Alt ve üst yüzey arası sıcaklık profili birinci tasarıma benzer şekilde üst yüzeyden alt yüzeye doğru kademeli olarak düşüş göstermiştir.

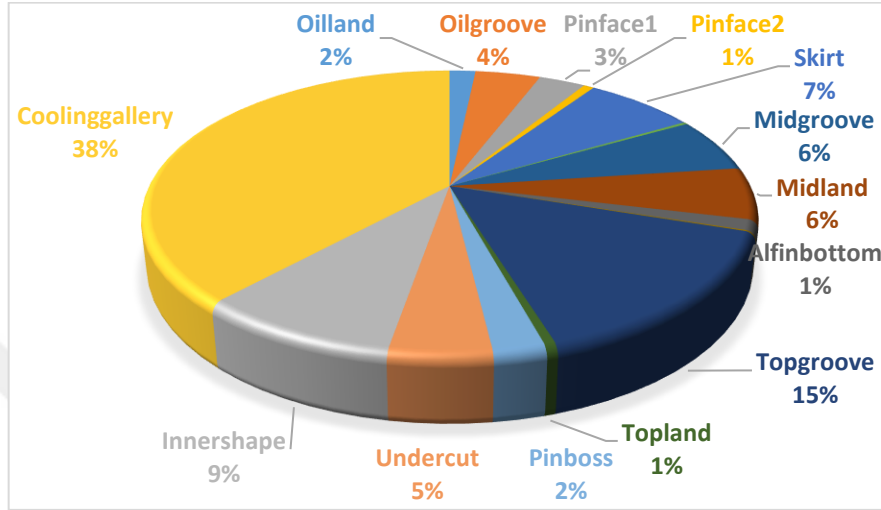


Şekil 4.13 Üçüncü tasarım soğutma galerisi sıcaklık profili

Üçüncü tasarım soğutma galerisinde diğer iki tasarımın soğutma galerilerine göre maksimum sıcaklığın 188,35 °C ile daha yüksek, minimum sıcaklığın 130,55 °C ile daha düşük olduğu görülmüştür.

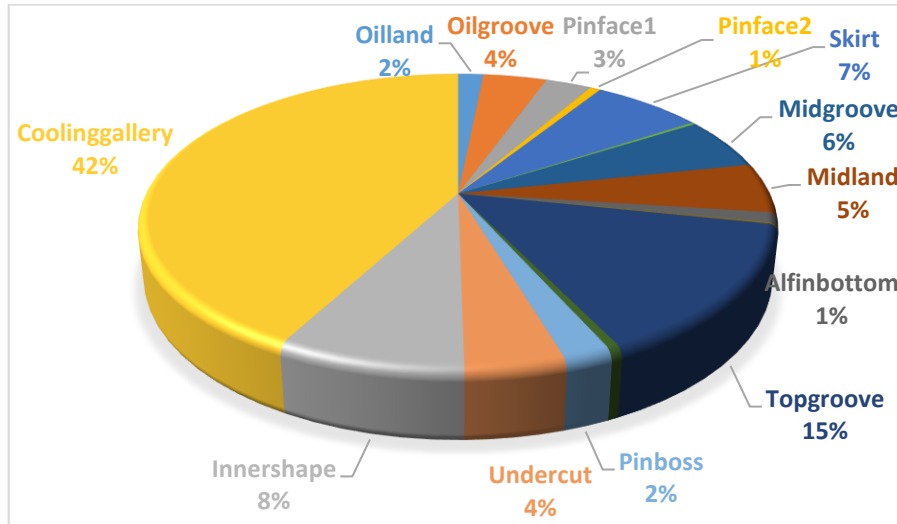
Analizler öncesinde detaylı olarak isimlendirilen piston bölgelerinin tamamından atılan ısı miktarları ayrı ayrı elde edilerek karşılaştırması yapılmıştır. Analizler

neticesinde yaklaşık olarak bütün tasarımlarda pistondan atılan ısı miktarı eşitken pistonun farklı bölgelerinden atılan ısı oranlarının tasarımlara bağlı farklılık gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.



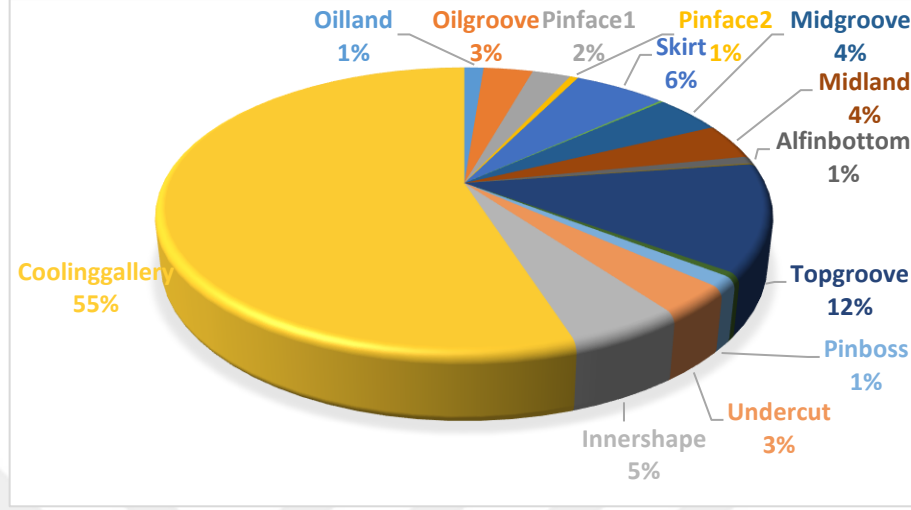
Şekil 4.14 Birinci tasarımda ısı akışının bölgesel dağılımı

Birinci tasarımda soğutma galerisi üzerinden atılan ısı toplam ısının %38'i, üst segman bölgesi üzerinden atılan ısı ise toplam ısının %15'idir. Bu iki bölgenin ardından ısının en yüksek oranda atıldığı bölge %9 ile piston kafası iç alt bölgesi olan innershape olmuştur.



Şekil 4.15 İkinci tasarımda ısı akışının bölgesel dağılımı

İkinci tasarımda soğutma galerisinden atılan ısı oranı %42 ile birinci tasarıma göre artış göstermiş ancak üst segman bölgesinden atılan ısı oranı değişmemiştir. Innershape bölgesinden atılan ısı oranı ise birinci tasarıma göre %1 düşmüştür.



Şekil 4.16 Üçüncü tasarımda ısı akışının bölgesel dağılımı

Üçüncü tasarımda soğutma galerisinden atılan ısı oranı %55 ile birinci tasarıma göre oldukça artış göstermiş aynı zamanda üst segman bölgesinden atılan ısı oranının %12'ye ve innershape bölgesinden atılan ısı oranının %5'e düştüğü görülmüştür.

Literatürde piston geometrisi ve soğutma çeşitlerine bağlı olarak piston bölgelerinden atılan ısı oranları farklılık göstermektedir. Her piston ve piston soğutma geometrisinin ayrı referans değerleri bulunmaktadır. Yapılan bu çalışmada birinci tasarım soğutma galerisinden atılan ısı oranı dışında bütün bölgelerde atılan ısı oranları literatürde [26] yer alan referans değerlerle uyum göstermiştir.

Analizin gerçekleştirilmesi için piston çeşitli bölgelere ayrılarak isimlendirilmişti. Analiz sonucunda ayrı ayrı atılan ısı oranlarının değerlendirildiği bu bölgelerin bazıları birlikte düşünülerek genel bölgeler değerlendirilmiş ve referans değerlerle karşılaştırması yapılmıştır. Değerlendirmede piston, "soğutma galerisi", segman yuvaları ve segman yuvalarının arasında kalan bölgeleri içeren "segman bölgesi", innershape ve undercut olarak isimlendirilen bölgeleri içeren "piston iç bölgesi", "piston eteği", pinface1, pinface2 ve pinfacetop olarak isimlendirilen "piston pin tarafı yüzeyi" ve "pin yuvası" olmak üzere altı bölgede incelenmiştir.

Tablo 4.1 Birinci tasarımda piston bölgelerine bağlı ısı dağılım yüzdeleri

Piston Bölgeleri	Isı Dağılım Yüzdesi	Referans Değerler
Soğutma Galerisi	%38	40-60
Segman Bölgesi	%35	25-45
Piston İç Bölgesi	%14	5-15
Piston Eteği	%7	5-10
Piston Pin Tarafı Yüzeyi	%4	0-5
Pin Yuvası	%2	0-10

Birinci tasarımda soğutma galerisi üzerinden atılan ısı oranı %38 ile referans değerlere oldukça yakınken segman bölgesi üzerinden atılan ısı oranının %35 ile soğutma galerisi bölgesinden atılan ısı oranına çok yakın olması dikkat çekmiştir.

Tablo 4.2 İkinci tasarımda piston bölgelerine bağlı ısı dağılım yüzdeleri

Piston Bölgeleri	Isı Dağılım Yüzdesi	Referans Değerler
Soğutma Galerisi	%42	40-60
Segman Bölgesi	%33	25-45
Piston İç Bölgesi	%12	5-15
Piston Eteği	%7	5-10
Piston Pin Tarafı Yüzeyi	%4	0-5
Pin Yuvası	%2	0-10

İkinci tasarımda soğutma galerisi ısı atım oranı %42 iken segman bölgesinden atılan ısı oranı birinci tasarıma kıyasla %33 ile düşüş göstermiştir.

Tablo 4.3 Üçüncü tasarımda piston bölgelerine bağlı ısı dağılım yüzdeleri

Piston Bölgeleri	Isı Dağılım Yüzdesi	Referans Değerler
Soğutma Galerisi	%55	40-60
Segman Bölgesi	%26	25-45
Piston İç Bölgesi	%8	5-15
Piston Eteği	%6	5-10
Piston Pin Tarafı Yüzeyi	%3	0-5
Pin Yuvası	%1	0-10

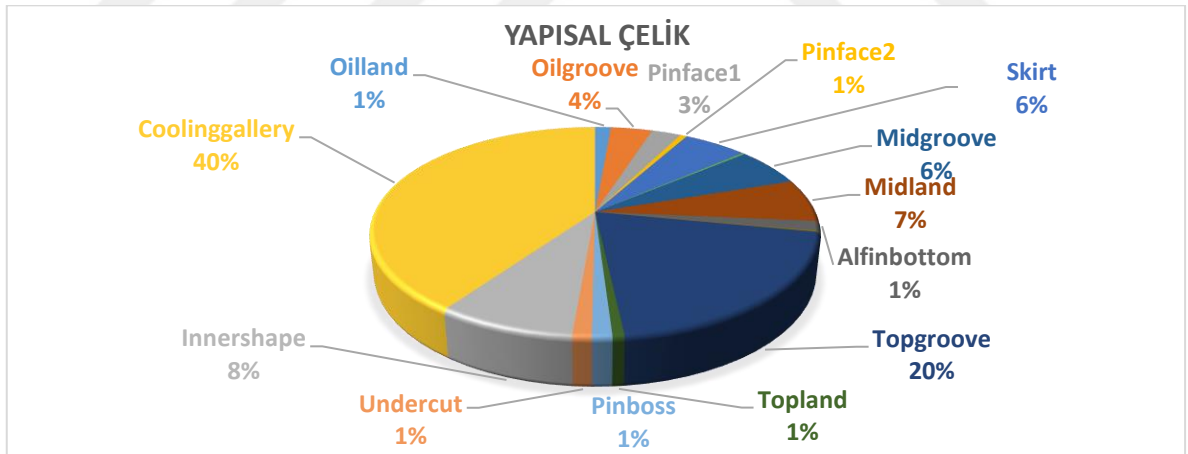
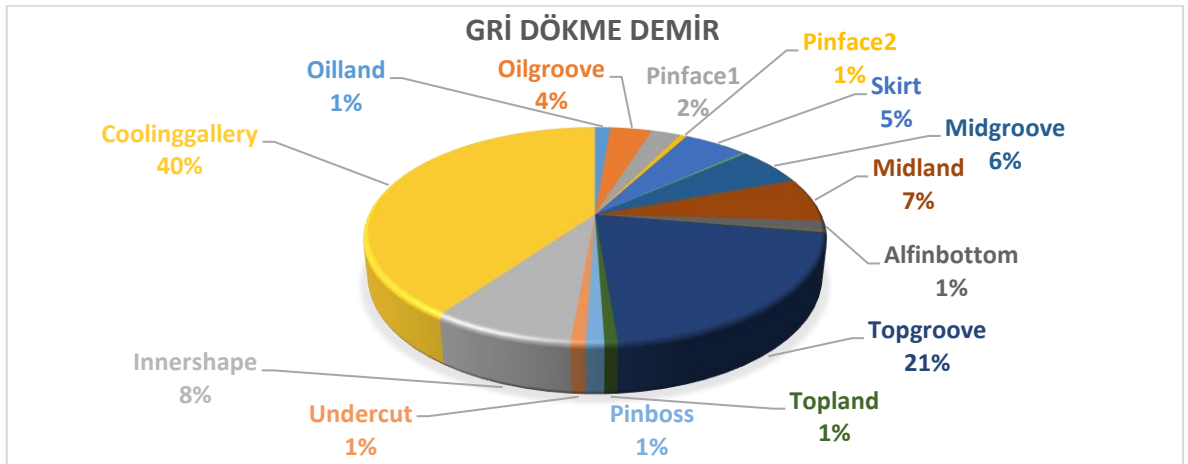
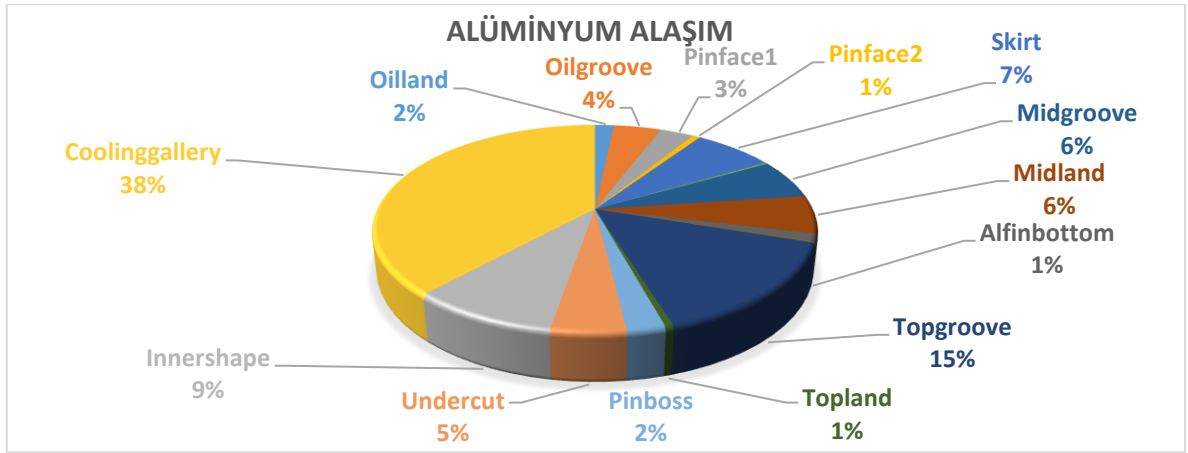
Üçüncü tasarımda soğutma galerisi ile atılan ısı %55 ile diğer tasarımlara göre oldukça yükselmiş bunun yanında segman bölgesinden atılan ısı oranında ise dikkate değer bir düşüş olmuştur.

Yapılan bu çalışma ile aynı piston geometrisinde farklı tipte soğutma galerisi kullanılmasının soğutma galerisinden atılan ısı oranının artmasını ve bir başka deyişle pistonun özellikle segman bölgesinden atılan ısı yükünün azaltılmasını sağlayabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

4.3 Isı Akış Oranlarının Piston Malzemesine Bağlı Değişimi

Isı akışlarının farklı soğutma galerileri kullanıldığında ortaya çıkan değişimleri analiz edildikten sonra piston malzemesinin ısı akış oranlarına etkisinin incelenmesi için pistonda farklı malzemeler kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. İlk analizlerde piston malzemesi olarak alüminyum alaşım ve alfin malzemesi olarak gri dökme demir kullanılırken malzemeye bağlı değişimin incelenmesi için ek olarak bütün piston yapısının gri dökme demir ve bütün piston yapısının yapısal çelik olduğu modeller ile analizler yapılmıştır.

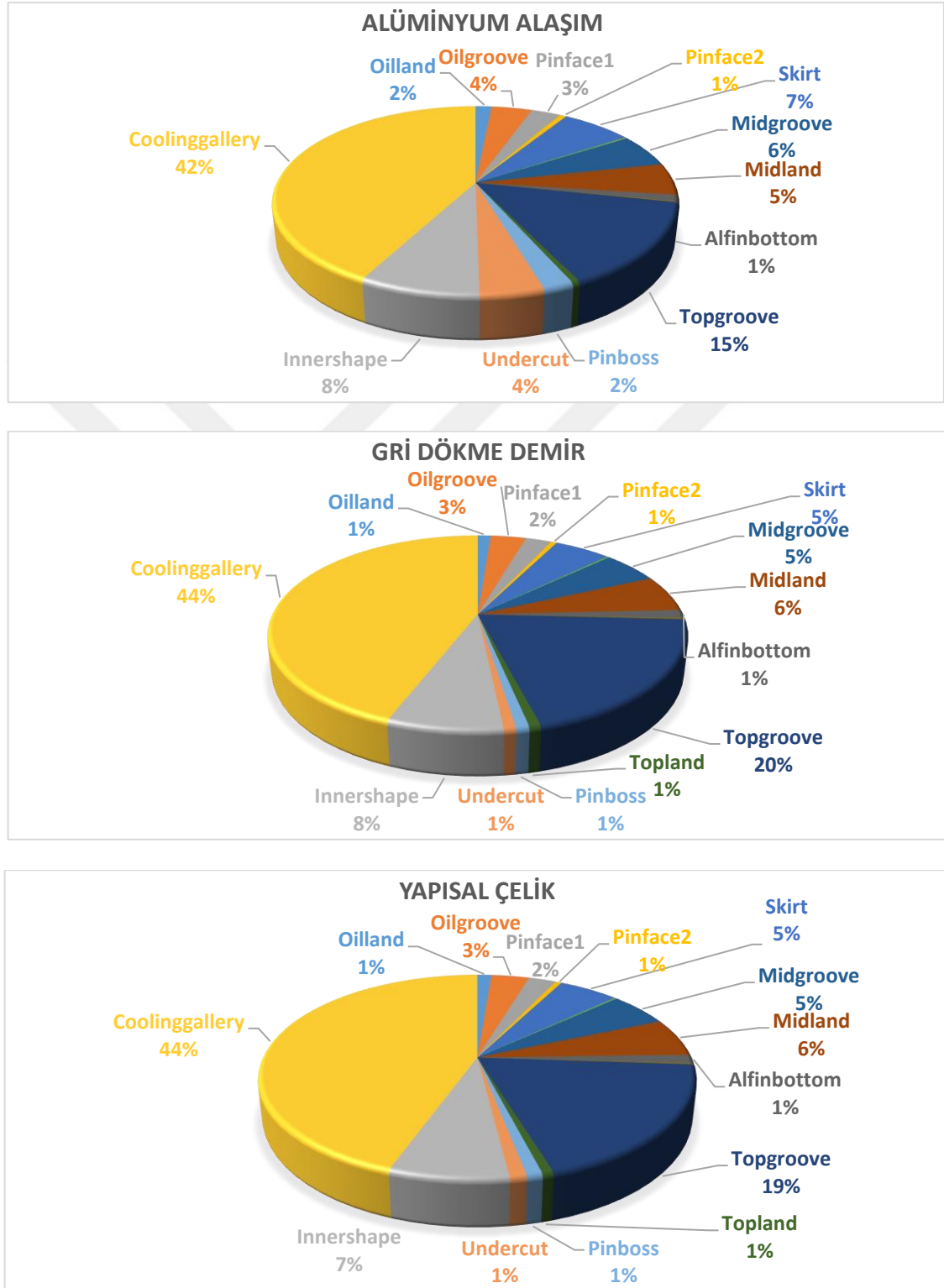
Birinci tasarım analiz sonuçlarında piston malzemesi olarak alüminyum alaşım yerine gri dökme demir ve yapısal çelik malzemelerinin tercih edilmesiyle soğutma galerisi üzerinden atılan ısı oranları %2 artış göstererek her iki malzeme için de %40 değerine çıkmıştır. Bunun yanında üst segman bölgesi ısı atım oranı da aynı şekilde bir artış göstererek gri dökme demir malzemesi ile yapılan analizde %21'e, yapısal çelik malzemesi ile yapılan analizde ise %20'ye çıkmıştır.



Şekil 4.17 Birinci tasarımın malzemeye bağlı ısı akış oranları değişimi

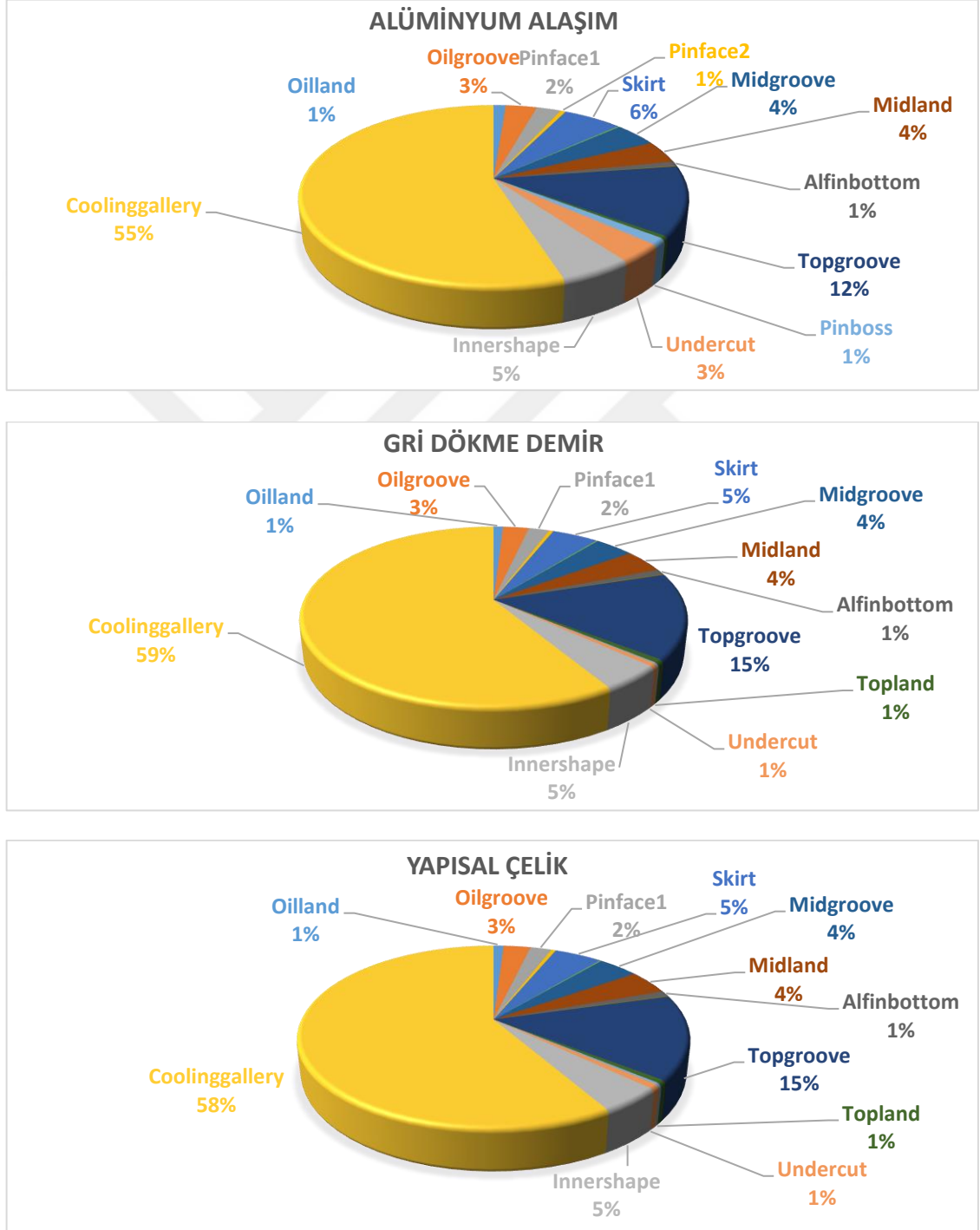
İkinci tasarımda malzemeye bağlı değişim analizleri incelendiğinde tıpkı birinci tasarımda gözlendiği gibi gri dökme demir ve yapısal çelik malzemelerinin kullanımı soğutma galerisi üzerinden atılan ısı oranını %2 değiştirmiş ve alüminyum alaşımın kullanıldığı pistonda %42 olan değer gri dökme demir ve yapısal çelik malzemeleri ile %44'e çıkmıştır. Aynı şekilde üst segman üzerinden atılan ısı oranında da artış

gözlenmiş ve alüminyum alaşım kullanılan analizde %15 ölçülen değer, gri dökme demir kullanılan analizde %20'ye ve yapısal çelik kullanılan analizde %19'a yükselmiştir.



Şekil 4.18 İkinci tasarımın malzemeye bağlı ısı akış oranları değişimi

Üçüncü tasarımda soğutma galerisi üzerinden atılan ısı oranı malzeme değişimiyle daha fazla artış göstermiş ve alüminyum alaşım ile yapılan analizde %55 olan değer gri dökme demir ile yapılan analizde %59'a, yapısal çelik ile yapılan analizde ise %58'e yükselmiştir. Bunun yanında üst segman bölgesinden atılan ısı oranında da diğer iki tasarıma benzer şekilde artış görülmüştür.



Şekil 4.19 Üçüncü tasarımın malzemeye bağlı ısı akış oranları değişimi

Malzemeye bağılı değişimlerin incelenmesi için yapılan analizlerin, detaylı bölgesel ısı atım oranlarının ardından tıpkı tasarıma bağılı analizlerde yapıldığı gibi isimlendirilen bölgeler birleştirilerek aynı altı bölge üzerinden genel tabloları oluşturulmuştur. Buna göre birinci tasarımda soğutma galerisi üzerinden ısı oranı malzemeye bağılı artış gösterirken, segman bölgesinden atılan ısı oranı da artış göstermiştir.

Tablo 4.4 Birinci tasarımın malzemeye bağılı ısı akış oranları değişimi

Alüminyum Alaşım		
Piston Bölgeleri Isı Dağılımı	Isı Dağılım Yüzdesi	Referans Değerler
Soğutma Galerisi	%38	40-60
Segman Bölgesi	%35	25-45
Piston İç Bölgesi	%14	5-15
Piston Eteği	%7	5-10
Piston Pin Tarafı Yüzeyi	%4	0-5
Pin Yuvası	%2	0-10
Gri Dökme Demir		
Piston Bölgeleri Isı Dağılımı	Isı Dağılım Yüzdesi	Referans Değerler
Soğutma Galerisi	%40	40-60
Segman Bölgesi	%41	25-45
Piston İç Bölgesi	%9	5-15
Piston Eteği	%5	5-10
Piston Pin Tarafı Yüzeyi	%3	0-5
Pin Yuvası	%1	0-10
Yapısal Çelik		
Piston Bölgeleri Isı Dağılımı	Isı Dağılım Yüzdesi	Referans Değerler
Soğutma Galerisi	%40	40-60
Segman Bölgesi	%40	25-45
Piston İç Bölgesi	%10	5-15
Piston Eteği	%6	5-10
Piston Pin Tarafı Yüzeyi	%3	0-5
Pin Yuvası	%1	0-10

Birinci tasarıma benzer şekilde ısı atım oranları ikinci tasarımda da soğutma galerisi ve segman bölgesinde artış göstermiştir. Piston iç bölgesi, piston eteği, piston pin tarafı yüzeyi ve pin yuvasında küçük düşüşler olmuştur.

Tablo 4.5 İkinci tasarımın malzemeye bağlı ısı akış oranları değişimi

Alüminyum Alaşım		
Piston Bölgeleri Isı Dağılımı	Isı Dağılım Yüzdesi	Referans Değerler
Soğutma Galerisi	%42	40-60
Segman Bölgesi	%33	25-45
Piston İç Bölgesi	%12	5-15
Piston Eteği	%7	5-10
Piston Pin Tarafı Yüzeyi	%4	0-5
Pin Yuvası	%2	0-10
Gri Dökme Demir		
Piston Bölgeleri Isı Dağılımı	Isı Dağılım Yüzdesi	Referans Değerler
Soğutma Galerisi	%44	40-60
Segman Bölgesi	%38	25-45
Piston İç Bölgesi	%8	5-15
Piston Eteği	%5	5-10
Piston Pin Tarafı Yüzeyi	%3	0-5
Pin Yuvası	%1	0-10
Yapısal Çelik		
Piston Bölgeleri Isı Dağılımı	Isı Dağılım Yüzdesi	Referans Değerler
Soğutma Galerisi	%44	40-60
Segman Bölgesi	%37	25-45
Piston İç Bölgesi	%9	5-15
Piston Eteği	%5	5-10
Piston Pin Tarafı Yüzeyi	%3	0-5
Pin Yuvası	%1	0-10

Üç tasarımda alüminyum alaşım yerine piston malzemesi olarak gri dökme demir ve yapısal çelik malzemeleri kullanımı soğutma galerisinden atılan ısı oranını yükseltmiş, bunun yanında segman bölgesinden atılan ısı oranında da artışa neden olmuştur.

Tablo 4.6 Üçüncü tasarımın malzemeye bağlı ısı akış oranları değişimi

Alüminyum Alaşım		
Piston Bölgeleri Isı Dağılımı	Isı Dağılım Yüzdesi	Referans Değerler
Soğutma Galerisi	%55	40-60
Segman Bölgesi	%26	25-45
Piston İç Bölgesi	%8	5-15
Piston Eteği	%6	5-10
Piston Pin Tarafı Yüzeyi	%3	0-5
Pin Yuvası	%1	0-10
Gri Dökme Demir		
Piston Bölgeleri Isı Dağılımı	Isı Dağılım Yüzdesi	Referans Değerler
Soğutma Galerisi	%59	40-60
Segman Bölgesi	%29	25-45
Piston İç Bölgesi	%5	5-15
Piston Eteği	%5	5-10
Piston Pin Tarafı Yüzeyi	%3	0-5
Pin Yuvası	%0	0-10
Yapısal Çelik		
Piston Bölgeleri Isı Dağılımı	Isı Dağılım Yüzdesi	Referans Değerler
Soğutma Galerisi	%58	40-60
Segman Bölgesi	%29	25-45
Piston İç Bölgesi	%5	5-15
Piston Eteği	%5	5-10
Piston Pin Tarafı Yüzeyi	%3	0-5
Pin Yuvası	%0	0-10

4.4 Sonuç

Yapılan analizler genel olarak değerlendirildiğinde bir içten yanmalı motorda piston soğutma galerisi tasarımının pistonun çeşitli bölgelerindeki ısı transfer oranlarını etkilediği görülmüştür. Analizler neticesinde birinci tasarımda piston bölgelerinden atılan ısı oranları referans değerlerle büyük ölçüde uyum göstermiştir. İkinci tasarımda soğutma galerisi yüksekliğinin ve genişliğinin artmasıyla birlikte değişen yağ dolum oranına bağlı olarak seçilen ısı transfer katsayısı farklılık göstermiş, birinci tasarıma göre soğutma galerisi üzerinden atılan ısı oranı %4 artış göstermiş ve segman bölgesinden atılan ısı oranı %2 düşüş göstermiştir. Üçüncü tasarım ise geometrik olarak soğutma galerisine giren yağın galeri içerisinde çalkalama hareketine uygun olarak seçildiği için ısı transfer katsayısı ilk iki tasarıma kıyasla daha yüksek olmuş ve buna bağlı olarak soğutma galerisi üzerinden atılan ısı oranı birinci tasarıma göre %17 ve ikinci tasarıma göre %13 artış göstermiştir. Aynı zamanda soğutma galerisi kullanılmasının en önemli hedefi olan segman bölgesinden atılan ısı oranının düşürülmesi açısından en iyi sonucu yine üçüncü tasarım vermiştir. Birinci tasarımda %35 olan segman bölgesi ısı atım oranı, ikinci tasarımda %33'e, üçüncü tasarımda ise %26'ya kadar düşebilmiştir. Bunun yanında piston iç bölgesinde de tasarım farklılığına bağlı olarak küçük değişimler gözlenmiştir. Birinci tasarımda %14 olan piston iç bölgesi ısı atım oranı, ikinci tasarımda %12'ye, üçüncü tasarımda ise %8'e düşmüştür.

Malzemeye bağlı ısı transfer oranlarının analizinde üç tasarım için de sonuçlar benzer olarak elde edilmiştir. Gri dökme demir ve yapısal çelik malzemelerinin kullanıldığı analizlerde soğutma galerisinden atılan ısı oranları yaklaşık olarak aynı olmakla birlikte alüminyum alaşım malzemesinin kullanıldığı analize kıyasla birinci ve ikinci tasarımda %2, üçüncü tasarımda ise %3-4'lük bir artış göstermiştir. Burada dikkat çeken bir başka sonuç alüminyum alaşım malzemesinin kullanılmadığı analizlerde soğutma galerisi ile birlikte segman bölgesi üzerinden atılan ısı oranlarında da artış tespit edilmiştir. Alüminyum malzemesi kullanılan analizlere kıyasla segman bölgesi üzerinden atılan ısı oranı gri dökme demir kullanıldığında birinci tasarımda %6, ikinci tasarımda %5, üçüncü tasarımda %3; yapısal çelik kullanıldığında ise birinci tasarımda %5, ikinci tasarımda %4, üçüncü tasarımda ise

%3 artış göstermiştir. Kalan piston bölgelerinde ısı akış oranları azalmış ve piston genelinden atılan toplam ısı miktarında da düşüş gözlenmiştir.

Soğutma galerilerinden atılan ısı transfer oranının artış gösterebilmesi için alüminyum alaşımdan farklı malzemelerin kullanımı mümkündür. Ancak soğutma galerisi ısı akış oranı artarken aynı zamanda segman bölgesi ısı akış oranının da artış göstermesi ve pistondan atılan toplam ısı miktarının düşüş göstermesi sebebiyle yapılan analizler neticesinde en iyi verimle ısı akışının piston malzemesinin alüminyum alaşım, alfin bölgesinin gri dökme demir olduğu ve üçüncü tasarım soğutma galerisine sahip olan piston modeli üzerinde gerçekleştiği görülmüştür.

Yapılan bu çalışma detaylı bir deneysel çalışmaya referans olabilir ve deneysel çalışma ile doğrulanabilir.

REFERANSLAR

- [1] Luptowksi, B. J., Arici, O., Johnson, J. H. ve Parker, G. G., (2005). "Development of the Enhanced Vehicle and Engine Cooling System Simulation and Application to Active Cooling Control", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2005-01-0697.
- [2] Senatore, A., Cardone, M., Buono, D., Doria, E.P. ve Dominici, A., (2007). "Thermo-Fluid-dynamic Analysis of a High Performance Engine Cooling System", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2007-24-0061.
- [3] Sangeorzan, B., Barber, E. ve Hinds, B., (2011). "Development of a One-Dimensional Engine Thermal Management Model to Predict Piston and Oil Temperatures," SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2011-01-0647.
- [4] Gokhale, A. ve Karthikeyan, N., (2012). "Optimization of Engine Cooling Through Conjugate Heat Transfer Simulation and Analysis of Fins", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2012-32-0054.
- [5] Ginrich, E., Ghandi, J. ve Reitz, R., (2014). "Experimental Investigation of Piston Heat Transfer in a Light Duty Engine Under Conventional Diesel, Homogeneous Charge Compression Ignition, and Reactivity Controlled compression Ignition Combustion Regimes", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2014-01-1182.
- [6] Benajes, J., Martin, J., Garcia, A. ve Villalta, D., (2015). "An Investigation of Radiation Heat Transfer in a Light-Duty Diesel Engine", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2015-24-2443.
- [7] Eiglmeier, C., Lettmann, H., Stiesch, G. ve Merker, G. P., (2001). "A Detailed Phenomenological Model for Wall Heat Transfer Prediction in Diesel Engines", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2001-01-3265.
- [8] Winter, H., Kogler, G., Schnessl, E., Wimmer, A. ve Jauk, T., (2003). "Investigation on Combustion and Heat Transfer in a Large Gaseous Fuelled Engine", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2003-01-0562.

- [9] Varghese, M. B., Goyal, S. K. ve Agarwal, A. K., (2005) "Numerical and Experimental Investigation of Oil Jet Cooled Piston", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2005-01-1382.
- [10] Panayi, A., Schock, H., Chui, B. K. ve Ejakov, M., (2006). "Parametrization and FEA Approach for the Assessment of Piston Characteristics", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2006-01-0429.
- [11] Luff, D. C., Law, T., Shayler, P. J. ve Pegg, I., (2012). "The Effect of Piston Cooling Jets on Diesel Engine Piston Temperatures, Emissions and Fuel Consumption", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2012-01-1212.
- [12] Du, J., (2012). "A Wavelet Neural Network Method to Determine Diesel Engine Piston Heat Transfer Boundary Conditions", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2012-01-1760.
- [13] Vagenas, A., Hawley, J. G., Brace, C. J., Robinson, K. ve Campell, N. A. F., (2003). "Actively Controlled Cooling Jets", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2003-01-0614.
- [14] Kajiwarra, H., Fujioka, Y. ve Negishi, H., (2003). "Prediction of Temperatures on Pistons with Cooling Gallery in Diesel Engines using CFD Tools", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2003-01-0986.
- [15] Pan, J., Nigro, R. ve Matsuo, E., (2005). "3-D Modeling of Heat Transfer in Diesel Engine Piston Cooling Galleries", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2005-01-1644.
- [16] Thiel, N., Weimar, H. J., Kamp, H. ve Windisch, H., (2007). "Advanced Piston Cooling Efficiency: A Comparison of Different New Gallery Cooling Concepts", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2007-01-1441.
- [17] Yi, Y., Reddy, M., Jarret, M., Kinsey, P. S. C., Alcenius, T. ve Inal, K., (2007). "CFD Modeling of the Multiphase Flow and Heat Transfer for Piston Gallery Cooling System", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2007-01-4128.
- [18] Belmonte, M. A. R., Copeland, C. D., Hislop, D., Hopkins, G., Schmieder, A., Bredda, S. ve Akehurst, Sam, (2015). "Improving Heat Transfer and Reducing Mass in a Gasoline Piston Using Additive Manufacturing", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2015-01-0505.
- [19] Kelleher, J. ve Ajotikar, N., (2016). "Piston Cooling Nozzle Oil Jet Evaluation Using CFD and a High Speed Camera", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2016-01-8100.
- [20] Zhu, N., Dong, F., Zong, M. ve Ni, J., (2017). "Simulation and Optimization on Oscillating Cooling Characteristics in High-Enhanced Piston Oil Cooling Gallery", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2017-01-1049.

- [21] Binder, C., Vasant, E., Norling, D. ve Cronhjort, A., (2018). "Experimental Determination of the Heat Transfer Coefficient in Piston Cooling Galleries", SAE Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, Paper No: 2018-01-1776.
- [22] Gonera, M. ve Sandin, O., (2015). "Thermal Analysis of a Diesel Piston and Cylinder Liner using Inverse Heat Conduction Method", Yüksek Lisans Tezi, Chalmers Teknik Üniversitesi, Uygulamalı Mekanik Bölümü Malzeme ve Hesaplama Mekaniği Anabilim Dalı, Göteborg.
- [23] Peng, W., Jizu, L., Minli, B., Yugan, W., Chengzhi, H. ve Liang, Z., (2014). "Numerical Simulation on the Flow and Heat Transfer Process of Nanofluids Inside a Piston Cooling Gallery, An International Journal of Computation and Methodology, 65:4, 378-400.
- [24] Liu, X., Cheng, D., Zhou, J., Zheng, Q., Mi, X., Li, S. ve Li, G., (2017). "Fluid-Structure Interaction Heat Transfer of Piston with Consideration of Oil Oscillating Cooling and In-Cylinder Local Heat Transfer", The Italian Association of Chemical Engineering, 61, 973-978.
- [25] Canvar, U., (2011). "Diesel Motor Pistonunun Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapısal ve Termal Analizi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] Junker, H. K., (2012). Piston and Engine Testing, Birinci Baskı, Springer Wieveg Tubner, Berlin.
- [27] Grishin, A., (2013). Heat Transfer and Multiphysics Analysis, [http://www.padtinc.com/mae323/Lecture9 Heat Transfer Multiphysics.pdf](http://www.padtinc.com/mae323/Lecture9%20Heat%20Transfer%20Multiphysics.pdf). (22/02/2019)

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: refikcevirme@gmail.com

Makale

1. Işın, Ö., Çevirme, R., (2019). “Numerical Analysis of the Effect of Piston Cooling Gallery Design on Heat Transfer in an Internal Combustion Engine”, International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT), Volume.5, Issue 3, pp.88-94.