



T.C.

**BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KADEMELİ TERMAL BARIYER
KAPLAMANIN BİR DİZEL MOTORDA
YANMA, PERFORMANS VE EGZOZ
EMİSYONLARINA ETKİSİ VE YANMA ODASI
ELEMENLARINDA OLUŞAN TERMAL VE
BASINÇ GERİLME ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Hüsna TOPKAYA

**Danışman
Prof. Dr. Hüseyin AYDIN**

**MART-2023
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Hüsna TOPKAYA tarafından hazırlanan “**Kademeli termal bariyer kaplamanın bir dizel motorda yanma, performans ve egzoz emisyonlarına etkisi ve yanma odası elemanlarında oluşan termal ve basınç gerilme analizi**” adlı tez çalışması 16/03/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hasan BAYINDIR

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

Üye

Prof. Dr. Cumali İLKILIÇ

Üye

Prof. Dr. Bahattin İŞCAN

Üye

Prof. Dr. Şehmus ALTUN

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

Bu tez çalışması TÜBİTAK 2214-A yurt dışı doktora sırası araştırma burs programı tarafından 1059B142000589 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Hüsna TOPKAYA

Tarih:

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KADEMELİ TERMAL BARIYER KAPLAMANIN BİR DİZEL MOTORDA YANMA, PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYONLARINA ETKİSİ VE YANMA ODASI ELEMANLARINDA OLUŞAN TERMAL VE BASINÇ GERİLME ANALİZİ

Hüsna TOPKAYA

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

2023, 98 Sayfa

Jüri

Danışmanın Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

Prof. Dr. Hasan BAYINDIR

Prof. Dr. Cumali İLKILIÇ

Prof. Dr. Bahattin İŞCAN

Prof. Dr. Şehmus ALTUN

İçten yanmalı motorların verimliliğinin artırılması ve emisyon değerlerinin iyileştirilmesi amacıyla farklı yöntemler uygulanmaktadır. Gelişen malzeme teknolojisiyle birlikte uygulama kolaylığı nedeniyle termal bariyer kaplama son yıllarda başvurulan yöntemlerin başında gelmektedir. Pistonların düşük ısı transfer katsayısına sahip malzemeler ile kaplanmasıyla ısı kayıplarını azaltmak ve motor performansını artırmak amaçlanır. Kaplama malzemesi olarak alümina (Al_2O_3), zirkonya (ZrO_2), magnezya (MgO), Berilya (BeO), lantanat ve gadalyum tercih edilir. Mevcut çalışmada piston yüzeylerine plazma sprej kaplama yöntemi kullanılarak Yttria ile stabilize edilmiş zirkonyum seramik malzemesiyle kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplamasız (referans model), tüm yüzey kaplamalı ve iki farklı ölçüde kademeli kaplama yapılan dört piston modeliyle motor performans ve egzoz emisyon deneyleri ve ısı transferi ve yanma analizleri gerçekleştirilmiştir. Piston yüzeyine kademeli kaplama işlemi uygulanarak kaplama tabakasının mukavemetinin artırılması ve aynı zamanda NO_x emisyonlarının düşürülmesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen motor performans ve egzoz emisyon deneylerinde altı farklı yükleme durumu için egzoz emisyon ve motor performans verileri elde edilmiştir. Deneyler sırasında meydana gelen değişimi belirlemek amacıyla emme hattına, egzoz manifolduna, hava soğutma kanat ucuna, hava soğutma kanat dibine, üst kapağa ve motor yağına birer adet termokupl montajı yapılarak deney düzeneğinden sıcaklık değerleri okunmuştur. Sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analizlerde kullanmak için piston modelleri Solidworks 2022 paket programı ile oluşturulmuştur. Oluşturulan piston modellerinin zamana bağlı termal ve yapısal analizlerinin gerçekleştirilmesi için modeller ANSYS Workbench paket programına aktarılmıştır. Bu analizler sonucunda piston, astar tabaka ve kaplama yüzeyi için sıcaklığı dağılımı, ısı akısı, von-Mises gerilme değerleri ve toplam şekil değiştirme miktarı elde edilmiştir. Yanma analizleri için ANSYS Forte paket programında piston modeli oluşturulmuştur ve analizler sonucunda piston içi sıcaklık, piston içi basınç, egzoz emisyon ve ısı transfer verileri elde edilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda kademeli piston modellerinde tüm yüzey kaplamalı piston modeline göre NO_x egzoz emisyon değerlerinde düşüş fakat yakıt tüketiminde artış tespit edilmiştir. HC egzoz emisyon değerlerinde dört piston modeli için %50 yükleme koşullarına kadar yakın değerler tespit edilirken %62.5'lik yükleme durumunda tüm yüzey kaplı piston modelinde en yüksek değer tespit edilmiştir. Zamana bağlı termal analizler sonucunda en yüksek piston yüzey sıcaklığı tüm yüzey kaplı pistonda elde edilmiştir. Tüm yüzey kaplı piston modelinde ısı kayıplarının diğer piston modellerine göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Kademeli kaplama yapılan piston modellerinde ısı akısı miktarı kaplama yapılan yüzeyde az iken kaplama yapılmayan yanma haznesinde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen yanma analizleri sonucunda silindir içi sıcaklık ve basınç değerlerinin tüm yüzey kaplı pistonda en yüksek, kaplamasız piston modelinde en düşük ve kademeli piston modellerinde bu iki değer aralığında ve birbirlerine yakın tespit edilmiştir. Yanma analizleri sonucunda duvardaki ısı transfer oranları karşılaştırıldığında en yüksek transfer kaplamasız piston modelinde görülürken en düşük ısı transferi tüm yüzey kaplamalı piston modelinde tespit edilmiştir. Yanma verimi en yüksek piston modeli tüm yüzey kaplı pistondur fakat NO_x egzoz emisyon verileri diğer piston modellerinden daha yüksektir.

Anahtar Kelimeler: Plazma sprej kaplama, termal bariyer kaplama, yanma analizi, Y₂O₃ zirkonyum, zamana bağlı termal analiz



ABSTRACT

Ph.D THESIS

EFFECT OF PARTITIONED THERMAL BARRIER COATING ON PERFORMANCE AND EXHAUST EMISSIONS IN A DIESEL ENGINE AND THERMAL AND PRESSURE STRESS ANALYSIS OF COMBUSTION CHAMBER ELEMENTS

Hüsna TOPKAYA

**INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
OF BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

2023 Year, 98 Pages

Jury

Advisor Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

Prof. Dr. Hasan BAYINDIR

Prof. Dr. Cumali İLKILIÇ

Prof. Dr. Bahattin İŞCAN

Prof. Dr. Şehmus ALTUN

Different methods can be applied in order to increase the efficiency of internal combustion engines and improve their emissions. Due to the ease of application and developments in material technology, the thermal barrier coating is one of the methods used in recent years. It is aimed to reduce heat losses and increase engine performance by coating the piston surface with low heat transfer coefficient materials. Alumina, zirconia, magnesia, Berrillia, Lantanat and Gadaliun can be used as coating material. In the present study, the engine piston was coated with Yttria stabilized zirconia by plasma spray coating technique. Engine performance and exhaust emission tests, heat transfer, and combustion analyzes were carried out with four piston models with uncoated (reference model), fully coated, and two different partially coated. It is aimed to increase the strength of the coating layer and at the same time reduce NOx emissions by applying a partial coating process on the piston surface. Six different load levels were used in the engine performance and exhaust emission experiments. Six different thermocouples were used to read the temperature change in, the intake line, exhaust manifold, air cooling fin tip, air cooling fin bottom, top cover, and engine oil during the experiments. Piston models were designed using Solidworks 2022 software for using finite element simulations. Piston models were imported to Ansys Workbench 2021 R1 for transient thermal and transient structural analysis. As a result of transient thermal and structural analyzes, temperature distribution, heat flux, von-Mises stress values, and total strain for the piston, lining layer, and coating surface was obtained. For the combustion analysis, the piston model was created in the ANSYS Forte software, and as a result of the analysis, internal piston temperature, internal piston pressure, exhaust emission, and heat transfer data were obtained. As a result of the experiments, it was determined that the NOx exhaust emission values decreased but the fuel consumption increased in the partially coated piston models compared to the fully coated piston model. In the HC exhaust emission values, values close to 50% loading conditions were determined for the four piston models, while the highest value was determined in the whole surface-covered piston model at the 62.5% loading condition. As a result of transient thermal analysis, the highest piston surface temperature was obtained for the fully coated piston model. It has been observed that the heat losses in the fully coated piston model are lower than the other piston models. It has

been determined that the amount of heat flux in the partially coated piston models is low on the coated surface, while it is higher in the uncoated combustion chamber area. As a result of the combustion analyses carried out, the in-cylinder temperature and pressure values were found to be the highest in the fully coated piston, the lowest in the uncoated piston model, and in these two value ranges and close to each other in the partially coated piston models. As a result of the combustion analysis, when the heat transfer rates on the wall were compared, the highest transfer was observed in the uncoated piston model, while the lowest heat transfer was detected in the fully coated piston model. The highest combustion efficiency was observed in the fully coated piston, but the NO_x exhaust emission is higher compared to other piston models.

Keywords: Plasma spray coating, thermal barrier coating, combustion analysis, Y₂O₃ stabilized zirconia, transient thermal analysis



TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın yürütülmesinde her türlü bilgi ve birikimi ile rehberlik ederek desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Hüseyin AYDIN' a en içten şükranlarımı sunarım. Doktora tez çalışmamın yurt dışında gerçekleştirdiğim bölümlerinde birlikte çalışma fırsatı bulduğum Prof. Dr. M. Quenn BREWSTER' a yardım ve destekleri için teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını 2214-A yurt dışı doktora sırası araştırma burs programı kapsamında 1059B142000589 nolu proje ile destekleyen TÜBİTAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımın incelenmesi ve daha iyi hale gelmesi için tez izleme komitesi toplantılarında bilgi ve görüşlerinden istifade ettiğim Prof. Dr. Şehmus ALTUN ve Prof. Dr. Bahattin İŞCAN' a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmasının deneysel araştırmaları sırasında deney düzeneğinin oluşturulması ve deneylerin yapılması için yardımını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi M. Zerakki IŞIK, Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY ve Arş. Gör. Ferhat AKKUŞ'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamda benden hiçbir yardımını esirgemeyen ve yakın ilgi gösteren eşim Dr. Öğr. Üyesi Tolga TOPKAYA' ya teşekkür ederim. Bütün hayatım boyunca bana maddi ve manevi yönden destek olan sevgili aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hüsna TOPKAYA
BATMAN-2023

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	v
TEZ BİLDİRİMİ	vi
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Termal Sprey Kaplama Yöntemleri.....	2
1.2. Termal Bariyer Kaplama	5
1.3. Termal Bariyer Kaplama Malzemeleri	5
1.3.1. Zirkonya (ZrO_2).....	6
1.3.2. Yttria (Y_2O_3).....	7
1.3.3. Magnezya (MgO).....	7
1.3.4. Alüminyum Oksit (Al_2O_3)	7
1.3.5. Nadir toprak elementleri	8
1.4. Dizel Motorunda Yanma Aşamaları	8
1.4.1. Tutuşma gecikmesi	9
1.4.2. Kontrolsüz yanma safhası.....	10
1.4.3. Kontrollü yanma	10
1.4.4. Art yanma	11
1.4.5. Dizel motorlarında emisyon oluşumu.....	11
1.5. Isı Transfer Metotları	12
1.5.1. İletim.....	12
1.5.2. Taşınım	14
1.5.3. Işınım	14
1.6. İçten Yanmalı Motorlarda Isı Transferi	14
1.6.1. Enerji dağılımı	15
1.6.2. Yanma odasındaki ısı transferi	16
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM	27
3.1. Deney Düzenegi.....	27
3.1.1. Pistonlara TBC uygulaması	27
3.1.2. Deney düzeneğinin kurulması	29
3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	32
3.2.1. Zamana bağlı termal analiz.....	32

3.2.2. Yapısal analiz.....	35
3.2.3. Yanma analizi (ANSYS Forte).....	35
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	38
4.1. Motor Egzoz Emisyon ve Performans Deney Sonuçları	38
4.1.1. Egzoz emisyon verileri	38
4.1.2. Performans verileri	50
4.2. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları.....	54
4.2.1. NC pistonu için zamana bağlı termal ve yapısal analiz sonuçları	54
4.2.2. FC pistonu için zamana bağlı termal ve yapısal analiz sonuçları	56
4.2.3. 5 mm NC pistonu için zamana bağlı termal ve yapısal analiz sonuçları	59
4.2.4. 10 mm NC pistonu için zamana bağlı termal ve yapısal analiz sonuçları	62
4.3. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	65
4.3.1. Sıcaklık	65
4.3.2. Toplam ısı akısı.....	67
4.3.3. von-Mises gerilmesi.....	69
4.3.4. Toplam şekil değişimi.....	70
4.4. Yanma Analiz Sonuçları.....	71
4.5. Termokupl Sonuçları	79
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
5.1. Sonuçlar	87
5.2. Öneriler	92
KAYNAKLAR.....	93
ÖZGEÇMİŞ	98

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1 Plazma sprej kaplama	4
Şekil 1.2 Termal bariyer kaplama sistemi	5
Şekil 1.3. Dizel motorlarında yanma safhaları (Prof. Dr. Behçet Safgönül, Prof. Dr. Metin Ergeneman, Prof. Dr. H. Ertuğrul Arslan 1995)	9
Şekil 1.4. Düzlem duvarda ısı iletimi	13
Şekil 1.5. T-x grafiğinde sıcaklık eğimi	13
Şekil 1.6. Silindir duvarı boyunca ısı transferi	16
Şekil 3.1 Talaş kaldırılmış pistonlar (a) 5mm genişliğinde talaş kaldırılmayan piston (b) 10mm genişliğinde talaş kaldırılmayan piston (c) Kumlama yapılmış piston.....	27
Şekil 3.2. Plazma sprej kaplama uygulaması.....	28
Şekil 3.3. Kaplama yapılmış pistonlar (a) Tüm yüzeyi kaplanmış piston (b) Piston üst yüzeyinde 5mm genişliğinde kaplamasız alan bırakılan piston (c) Piston üst yüzeyinde 10 mm genişliğinde kaplamasız alan bırakılan piston	28
Şekil 3.4. Deney düzeneğinin şematik görünüşü.....	30
Şekil 3.5. Deney düzeneği	31
Şekil 3.6. FC piston geometrisi ve kaplama tabakaları	32
Şekil 3.7. Kademeli kaplama uygulanan pistonların geometrisi (a-5 mm NC piston modeli, b-10 mm NC piston modeli)	33
Şekil 3.8. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan termal sınır şartları	34
Şekil 3.9. Yapısal analiz için sınır şartları	35
Şekil 3.10. ANSYS forte için oluşturulan yanma haznesi profili.....	36
Şekil 3.11. Yanma odasının ağ yapısı	37
Şekil 3.12. Yanma analizleri için kullanılan enjeksiyon parametreleri.....	37
Şekil 4.1. Dört farklı piston modeli için yükleme şartlarına göre CO ₂ emisyon grafiği	38
Şekil 4.2. Dört farklı piston modeli için yükleme şartlarına göre CO emisyon grafiği..	41
Şekil 4.3. Dört farklı piston modeli için yükleme şartlarına göre HC emisyon grafiği..	43
Şekil 4.4. Dört farklı piston modeli için yükleme şartlarına göre NO _x emisyon grafiği	45
Şekil 4.5. Dört farklı piston modeli için yükleme şartlarına göre duman koyuluğu grafiği	48
Şekil 4.6. Dört farklı piston modeli için yükleme şartlarına göre yakıt tüketimi grafiği	50
Şekil 4.7. Dört farklı piston modeli için yükleme şartlarına göre özgül yakıt tüketimi grafiği.....	52

Şekil 4.8. (a) NC piston sıcaklık değişimi (b) NC piston sıcaklık dağılımı	54
Şekil 4.9. (a) NC piston ısı akısı değişimi (b) NC piston ısı akısı dağılımı	55
Şekil 4.10. (a) NC piston eşdeğer gerinim (b) NC piston von-Mises gerilme dağılımı .	55
Şekil 4.11. (a) FC piston (b) piston (c) kaplama yüzeyi sıcaklık dağılımı	56
Şekil 4.12. (a) FC piston (b) piston (c) kaplama yüzeyi ısı akısı dağılımı	57
Şekil 4.13. (a) FC piston (b) kaplama yüzeyindeki von-Mises gerilme dağılımı.....	58
Şekil 4.14. (a) FC pistonu eş değer gerinin dağılımı (b) FC pistonu toplam deformasyon dağılımı	59
Şekil 4.15. (a) 5 mm NC piston (b) piston (c) kaplama yüzeyindeki sıcaklık dağılımı .	59
Şekil 4.16. (a) 5 mm NC piston (b) piston (c) kaplama yüzeyindeki ısı akısı dağılımı .	60
Şekil 4.17. (a) 5 mm NC pistonu (b) kaplama yüzeyindeki von-Mises gerileme dağılımı	61
Şekil 4.18. (a) 5 mm NC pistonu eş değer gerinin dağılımı (b) 5 mm NC pistonu toplam deformasyon dağılımı	61
Şekil 4.19. (a) 10 mm NC pistonu (b) piston (c) kaplama yüzeyindeki sıcaklık dağılımı	62
Şekil 4.20. (a) 10 mm NC piston (b) piston (c) kaplama yüzeyindeki ısı akısı dağılımı	63
Şekil 4.21. (a) 10 mm NC piston (b) kaplama yüzeyindeki von-Mises gerilme dağılımı	64
Şekil 4.18. (a) 10 mm NC pistonu eş değer gerinin dağılımı (b) 10 mm NC pistonu toplam deformasyon dağılımı	64
Şekil 4.19. (a) Pistonların üst yüzey sıcaklık değişimi (b) ilk beş çevrim için sıcaklık değişimi (c) son beş çevrim için sıcaklık değişimi	65
Şekil 4.20. (a) 1'den 2'ye yolu boyunca FC pistonu için sıcaklık dağılımı (b) normalize edilmiş mesafe boyunca kaplama yüzeyi sıcaklık dağılımı (c) normalize edilmiş mesafe boyunca astar tabaka sıcaklık dağılımı (d) normalize edilmiş mesafe boyunca alt tabaka piston sıcaklık dağılımı	66
Şekil 4.21. (a) Toplam ısı akısı değişimi (b) ilk çevrim için toplam ısı akısı değişimi (c) son iki çevrim için toplam ısı akısı değişimi	68
Şekil 4.22. (a) von-Mises gerilme değişimi (b) kaplama yüzeyindeki von-Mises gerilme değişimi.....	69
(c) piston yüzeyindeki von-Mises gerilme değişimi.....	69
Şekil 4.23. (a) Toplam şekil değişimi (b) kaplamadaki toplam şekil değişimi	70

Şekil 4.24. NC ve FC pistonunun deneysel ve simülasyon basınç değerlerinin karşılaştırılması.....	71
Şekil 4.25. Farklı piston modelleri için silindir içi basınç değerleri.....	71
Şekil 4.26. Farklı piston modelleri için silindir içi sıcaklık değerleri	72
Şekil 4.27. Farklı piston modelleri için duvardaki ısı transfer oranı	73
Şekil 4.28. Farklı piston modelleri için duvardaki ısı transferinin krank açısına oranındaki değişimi	74
Şekil 4.29. Farklı piston modelleri için ısı salınım oranındaki değişim	74
Şekil 4.30. Farklı piston modelleri ve krank açısına göre silindir içi sıcaklık dağılımı .	75
Şekil 4.31. Farklı piston modelleri için yakıt buharı kütle oranı dağılımı.....	76
Şekil 4.32. TBC'nin egzoz emisyonları üzerindeki etkisi (a) NO _x (b) CO (c) HC.....	77
Şekil 4.33. TBC'nin verimlik üzerindeki etkisi.....	78
Şekil 4.34. TBC'nin duvardaki toplam ısı transfer kayıplarına etkisi.....	79
Şekil 4.35. Dört piston modeli için yağ termokupl verileri.....	79
Şekil 4.36. Dört piston modeli için egzoz termokupl verileri	81
Şekil 4.37. Dört piston modeli için kanat ucu termokupl verileri	82
Şekil 4.38. Dört piston modeli için kanat dibi termokupl verileri.....	83
Şekil 4.39. Dört piston modeli için üst kapak termokupl verileri.....	84
Şekil 4.40. Dört piston modeli için emme manifoldu termokupl verileri.....	85

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Çizelge 1.1. İleri teknoloji seramik malzemelerin özellikleri	6
Çizelge 3.1 Dizel motor özellikleri.....	29
Çizelge 3.2. Emisyon cihazının teknik özellikleri.....	30
Çizelge 3.3. Termokupl bağlantı noktaları	31
Çizelge 3.4. Pistona uygulanan termal sınır şart değerleri	34
Çizelge 3.5. Malzeme özellikleri	35
Çizelge 4.1. CO ₂ emisyon verileri	40
Çizelge 4.2. CO emisyon verileri	42
Çizelge 4.3. HC emisyon verileri	44
Çizelge 4.4. NO _x emisyon verileri	47
Çizelge 4.5. Duman koyuluğu emisyon verileri	49
Çizelge 4.6. Yakıt tüketim verileri	51
Çizelge 4.7. Özgül yakıt tüketim verileri	53

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_p	: Piston yüzey alanı
B	: Çap
C_1	: Sabit
C_2	: Sabit
F_{1-2}	: Gaz ve duvar arasındaki görünüm faktörü
h_g	: Gaz tarafındaki konveksiyonla ısı transferini katsayısı
h_c	: Soğutma tarafındaki konveksiyonla ısı transferi katsayısı
k	: Silindir duvarının ısı iletim katsayısı
k_g	: Silindir içindeki gazın ısı iletkenlik katsayısı
$\dot{m}_{ca}$	: Silindir içindeki havanın kütle akış hızı
$\dot{m}_{cf}$	: Silindir içindeki yakıtın kütle akış hızı
$\dot{m}_f$	: Motordaki yakıt kütlesi
T_g	: Silindir içindeki gaz sıcaklığı
T_c	: Soğutucu sıcaklığı
T_w	: Duvar sıcaklığı
$\dot{W}_{acc}$	: Motor ekipmanlarını çalıştırma gücü
$\dot{W}_b$	: Fren gücü
$\dot{W}_{shaft}$	: Krank mili fren çıkış gücü
$\dot{Q}_{exhaust}$	: Egzoz akışındaki enerji kayıpları
$\dot{Q}_{HV}$	: Yakıtın ısınma değeri
Q_{loss}	: Isı transferi tarafından oluşan diğer bütün enerji kayıpları
μ_g	: Silindirdeki gazın dinamik viskozitesi
η_t	: Termal verim
η_c	: Yanma verimi
$(\eta_t)_{brake}$	: Fren termal verimi
Δx	: Yanma odası duvar kalınlığı
σ	: Stefan-Boltzmann sabiti
ε_g	: Gaz yayılımı
ε_w	: Duvarın yayılımı

Kısaltmalar

Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
APS	: Plazma sprej kaplama
Ar	: Argon
BeO	: Berilya
CGDS	: Soğuk gaz dinamik sprej kaplama
EB-PVD	: Elektron demetiyle fiziksel buhar biriktirme
He	: Helyum
HVOF	: Yüksek hızlı-oksi alev kaplama
H ₂	: Hidrojen
MgO	: Magnezya
N ₂	: Azot
SiC	: Silisyum karbür
Si ₃ N ₄	: Silisyum nitrür
TBC	: Termal bariyer kaplama
VPS	: Vakumlu plazma püskürtme
YSZ	: Yttria ile stabilize edilmiş zirkonyum
ZrO ₂	: Zirkonyum

1. GİRİŞ

Dizel motorlarında gerçekleşen, alev hüzmesi çevresinde yoğunlaşan ve oksijenin yanma alanı çevresinde dağıldığı, difüzyonlu yanma çok verimlidir. Dizel motorlarında, 1980'lerdeki yaklaşık %35 verimlilikten günümüzün %50 civarı olan verime sıçramasını sağlayan önemli gelişmeler olmuştur. Bu, yakıtın yarısının artık faydalı mekanik enerjiye dönüştüğü anlamına gelmektedir. Bu kazanımlar, yüksek basınçlı common-rail yakıt enjeksiyon sistemlerinden, turbo şarjdan ve yanmayı tam olarak hassas kontrol etmek için bilgisayar sistemlerinin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Yanma veriminin artırılmasına yönelik devam etmekte olan temel araştırma konularından biri de; motorun yanma odası yüzeylerinin bir kısmının veya tamamının seramik esaslı maddelerle kaplanması suretiyle yanma odasından dışarıya olan ısı transferini geciktirmek ve ortalama efektif basıncı artırmaktır.

Dizel motorda yanma odasındaki ısı kayıplarından dolayı yakıt enerjisinin yaklaşık %30' u kayıp enerjidir. Bu kayıp enerji miktarını azaltmak için dizel motordaki çalışmalar termal bariyer kaplama üzerine odaklanmıştır. Son yıllarda dizel motorlarda piston yüzeyine, valflere, piston tacına ve silindir kafasına termal bariyer kaplama işlemi gerçekleştirilen çalışmalar gerçekleştirilmektedir. TBC uygulamalarında amaç düşük ısı iletkenliğine ve yüksek ısı kapasitesine sahip malzemeler yardımıyla piston duvarlarındaki ısı akışını azaltmaktır. Yanma odasına TBC (termal bariyer kaplama) işleminin uygulanması yanmayı, motor performans ve egzoz emisyonlarını etkiler (Rupangudi et al. 2014).

Termal bariyer kaplamalı pistonların kullanımıyla düşük setanlı yakıtlar kullanılabilir, NO_x hariç diğer emisyon verilerinde iyileşme gözlenir, ısı verim artış gösterir, yakıtın tutuşma gecikmesi azalır, yakıt tüketimi azalır, yakıt hava karışımı iyileşir ve daha hızlı buharlaşma gerçekleşir. Bunlar TBC kaplı pistonların avantajları olarak sıralanır (Howard and Buckley 2009; Carmona 2014).

Dizel motorlarda termal bariyer kaplama uygulamalarında yaygın olarak Yttrian ile stabilize edilmiş zirkonyum (YSZ) kullanılmaktadır. Kaplamanın yapışmasını iyileştirmek için piston yüzeyi ile TBC yüzeyi arasına termal genleşme katsayısı olan bir astar tabaka uygulanmaktadır. Kaplama kalınlığı 0.1 mm ile 0.5 mm aralığında değişmektedir (Howard and Buckley 2009). Çeşitli yöntemlerle seramik kaplama işlemi gerçekleştirilir ancak en yaygın olarak kullanılan plazma sprej kaplama yöntemidir (Kamo, Assanis, and Bryzik 1989).

Dizel motorlar için termal bariyer kaplamaları son 30 yılda artmış ve çok sayıda yöntem ve seramik malzemeleri araştırılmıştır. Uygulama zorluğu, dizel motorlardaki farklı çalışma koşullarında yatmaktadır. Dizel motorlarda, normal koşullarda dakikada 1500-300 devir civarında bir çevrim frekansı ile yüksek ısı salımlı bir çalışma sıcaklığı vardır. Bu nedenle kaplamalar, çok yüksek oranda ve frekansta ısı ve basınca maruz kalır (Aydın 2013). Bu nedenle kaplama uygulamasının bu yüksek frekanslı ısı ve basınç altındaki çalışma koşullarına dayanması gerekmektedir. Hem kaplama malzemelerinin iyi seçilmesi hem de kaplama uygulamasının bu zor çalışma koşullarına uygun seçilmesi önemlidir. Dizel motorlarında yanma odasındaki çalışma koşulları ile yüzeylerde oluşan basınç ve termal etkilerin analizinin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada; farklı kademeli termal bariyer kaplamanın bir dizel motorda yanma, performans ve egzoz emisyonlarına etkisi araştırılmış ve kademeli kaplama durumlarında yanma odası elemanlarında oluşan termal ve basınç gerilme analizi yapılmıştır.

1.1. Termal Sprey Kaplama Yöntemleri

Endüstride yaygın olarak kullanılan termal spre y yöntemleri özellikle uçak, uzay ile otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Termal spre y; metalik veya metalik olmayan kaplama malzemesinin (toz, tel veya çubuk formunda) erimiş veya yarı erimiş bir durumda ya proses gazı ya da atomizasyon yoluyla hazırlanmış yüzeye uygulandığı işlemdir. Termal spre y tekniğinin farklı uygulama yöntemleri mevcuttur, örneğin alev püskürtme, HVOF, APS ve vakumlu plazma püskürtme (VPS) olarak sıralanabilir (M. K. Gupta et al. 2014). Dizel motorlarda termal spre y kaplama yöntemleri olarak plazma spre y kaplama (APS), yüksek hızlı-oksi alev kaplama (HVOF) ve soğuk gaz dinamik spre y kaplama (CGDS) kullanılır.

APS metal ve seramiklerin kaplanması en fazla tercih edilen yöntemdir. Açık havada tanecikler üfleçten çıkıp çevre ile reaksiyona girerek kaplama yüzeyine ulaşır. Oksidasyon sorunu nedeniyle oksidasyona dirençli malzemeler kaplama malzemesi olarak kullanılır. HVOF kaplama yönteminde yanma odasına yüksek basınçta propan ve hidrojen gibi gazlar gönderilerek yakılır. Basıncın etkisiyle çok hızlı bir şekilde ana malzeme yüzeyine tanecikler gönderilir. Diğer kaplama yöntemlerine göre daha avantajlıdır. CGDS yönteminde süpersonik hızla iki fazın rüzgar tüneli içinden ana malzemeye doğru aktığı bir metottur. Bu yöntemde yüksek sıcaklığa ulaşılmadığı için oksitlenme çok azdır bu yüzden kaplama yüzeyleri temizdir fakat seramik gibi gevrek

malzemelerin kaplama malzemesi olarak kullanılması mümkün değildir. Azot ve helyum gazı kullanılır ve bu gazlar ön ısıtmaya tabi tutularak taneciklerin termal enerjisi artar. Artan termal enerjinin kinetik enerjiye dönüşümü sayesinde süpersonik hıza ulaşılır.

Elektron demetiyle fiziksel buhar biriktirme yönteminde seramik partikülleri yüksek sıcaklıkta ergitilerek vakum altında buharlaştırılır ve kaplanacak malzeme yüzeyinde biriktirilir. EB-PVD yöntemi çok yüksek sıcaklığa dayanabildiği için termal bariyer kaplamalarda tercih edilen bir yöntemdir. Kaplama yüzeyi kolonsal bir mikro yapıya sahip olduğu için termal şoklara ve mekanik gerilmelere direnci yüksektir. APS ise düzgün bir yapıya sahiptir. Plazma sprej kaplama yöntemi maliyet olarak ucuzdur ve seramik malzemelerin kullanıldığı gözeneklilik oranı yüksek olan bir yöntemdir. Yüksek hızlı oksit alev kaplama yönteminin kalitesi yüksektir ve çok sağlam yapışma sağlar. Metal ve metalik alaşımlarda kullanılan bu yöntem soğuk gaz dinamik kaplama yönteminden ucuzdur. CGDS yönteminde gözeneklilik oranı düşüktür ve mekanik özellikleri iyidir.

Maddenin dördüncü hali olarak bilinen plazmada iyonlar ve serbest elektronlar birbirlerinden bağımsız hareket eder. Artı yüklü iyonlarla eksi yüklü elektronların sayıları yaklaşık olarak eşittir. Maddenin plazma halinde atom çekirdeğinden koparılmış elektron ve iyonların rastgele doğrultuda serbest hareket ettikleri görülür. Plazma bir gazı elektronları atom çekirdeğinden kopması için yeterli olan enerjiyi kazanıncaya kadar ısıtarak elde edilir. Madde plazma halindeyken kimyasal tepkimeler daha hızlı gerçekleşir.

Plazma sprej kaplama yöntemi yüksek çalışma sıcaklığına sahip olduğundan tüm malzemeleri ergitebilecek sıcaklıkta çalışmaya imkân verir. Ergime noktası yüksek metal ve alaşımlarıyla çalışılabilir. Plazma sprej kaplama yönteminin diğer bir avantajı da inert ortamlarda kullanılabilmesidir. Toz haline getirilmiş veya belli bir tanecik boyutundaki her malzeme bu yöntemde kullanılabilir (M. Gupta 2010)

Bu yöntemle yapılan kaplamaların oksitlenme, erozyon ve aşınma direnci daha iyi olduğu için dizel motorlarda yaygın olarak kullanılır. Bu yöntem sayesinde seramik ve metallerin iyi özellikleri yeni bir malzemedeki toplanır.

Plazmayı meydana getirmek için tek atomlu Ar ve He (inert gazları) birlikte iki atomlu N_2 ve H_2 kullanılır. Bu gazların tek tek kullanımı olduğu gibi çoğu zaman belli oranlarda karıştırılarak kullanılır. İnert gazlarla hidrojen gazının karışım sıcaklığı 8300 °C' ye ulaşır ve eritilen kaplama malzemesinin tanecikleri ana malzeme yüzeyine püskürtülmesiyle sertleşir. Gaz sıcaklığı 8000 ile 14000 °C aralığına sahip olabilir. İnert

gazları seramik tanelerinin hızını artırır. Bu işlem sırasında hızlı katılaşma olursa amorf bir yapı oluşur (Ciniviz et al. 2012).

Kaplama işleminin en önemli safhalarından birisi yüzeyin hazırlanmasıdır. Ana yüzey ile kaplama arasında mekanik bir bağ oluşur. Taneciklerin ana malzeme ile arasında mikro bir yapı ve kimyasal bağ gibi başka bağlanmalarda meydana gelir. Bu bağların oluşması için ana malzeme yüzeyindeki olumsuz etkenlerin giderilmesi gerekir. Bunlardan bazıları nem, yağ ve oksit film tabakalarıdır. Kaplama ile ana malzeme arasına kullanılan ara tabaka kaplama için uygun zemin hazırlar. Bu ara tabaka sayesinde bağlanma özellikleri iyileşir, ana malzemeyi korozyona karşı korur ve iki malzeme arasındaki termal genleşme farkını azaltır (Yaşar 1997). Şekil 1.1’de plazma sprej kaplama uygulaması gösterilmiştir.



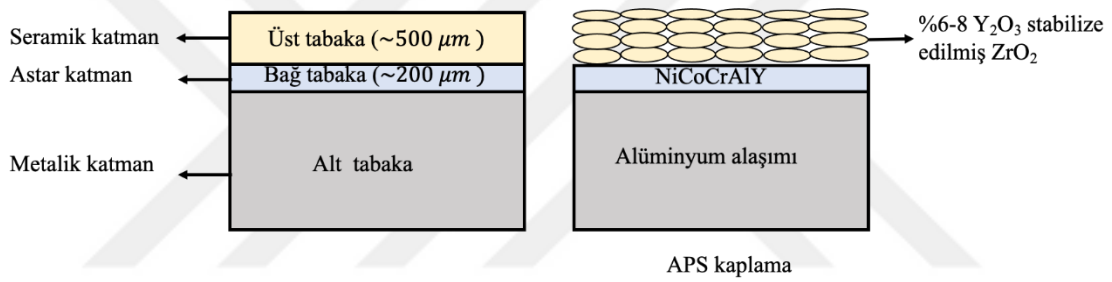
Şekil 1.1 Plazma sprej kaplama

Plazma sprej yöntemini atmosferik plazma sprej, inert plazma sprej, vakum plazma sprej, sualtı plazma spreji olmak üzere dört gruba ayrılır. Vakum plazma sprej yöntemi malzemelerin korozyona dayanıklılığını artırmak için kullanılan bir yöntemdir. Vakum altında yapılan bu kaplama yöntemi sırasında vakumu oluşturmak ve sabit tutabilmek oldukça güçtür. Vakum sabit tutulamazsa sızdırmazlık sağlanamaz ve kaplama istenen seviyede sonuçlanmaz. Plazma sprej yöntemini mikro yapısına göre incelediğimiz zaman geleneksel, nano yapılı ve bölümlenmiş diye üç gruba ayrılır.

Geleneksel mikro yapıya sahip plazma sprej yönteminde kaplama yüzeyinde % 10-15 arası gözenekli yapı oluşur. Piston yüzeyindeki parçacıklar arası delikler doldurulmadığı zaman gözenekler büyük olur (Thibblin 2017).

1.2. Termal Bariyer Kaplama

Şekil 1.2’de gösterildiği gibi ara katman olan astar tabaka, seramik katman ve metalik katman olan ana malzemeden oluşur. Seramikler çoğunlukla metal ve ametal olmayan elementlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan yeni bir malzemedir. Seramik katman düşük termal iletkenliğe sahip olmasının yanında yüksek sıcaklığa dayanıklı ve termal döngü sırasında faz değiştirmemelidir. Genellikle NiCoCrAlY astar tabakası üzerine %6-8 yttria ile stabilize edilmiş zirkonyum seramik malzemesi plazma sprej kaplama yöntemi kullanılarak termal bariyer kaplama işlemi gerçekleştirilir (Davis 2004). YSZ diğer seramik malzemelerine göre düşük termal iletkenliğe ve yüksek erime sıcaklığına sahip bir malzemedir. YSZ’ nin bu özelliklerinden dolayı TBC için iyi bir seçimdir (M. Gupta 2010).



Şekil 1.2 Termal bariyer kaplama sistemi

Astar tabaka, üst tabaka ile alt tabaka arasında kalıcı bir bağ yapının oluşmasını sağlar. Ayrıca, seramik üst tabaka ile metalik alt tabakalar arasındaki termal genleşme katsayılarındaki farklılıktan kaynaklanan ara yüz gerilmelerini azaltır.

Gözenekli yapıya sahip olan seramik üst tabaka yüksek sıcaklıklara ulaştığı için oksijen ve egzoz gazlarının akışına karşı şeffaftır. TGO olarak bilinen, yavaş büyüyen, yapışkan bir alüminyum oksit filmi sağlamak için alüminyumla zenginleştirilmiş bir bağ kaplama bileşimi kullanılır. TGO tabakası alt tabakaya oksidasyon koruması sağlar (M. Gupta 2010).

1.3. Termal Bariyer Kaplama Malzemeleri

Seramikler çoğunlukla metal ve ametal olmayan elementlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan yeni bir malzemedir. Bu bileşikler arasında kovalent ve iyonik bağlar oluşur. İlerleyen teknolojiyle birlikte kullanılan malzemelerin çeşitleri artmıştır ve

İhtiyaçlar çerçevesinde yeni geliştirilen malzemelerin kullanım oranı artmıştır. Yeni geliştirilen bu malzemeler ileri teknoloji malzemeleri olarak tanımlanır. İleri teknolojik malzemeler dünya ekonomisine katkı sağlayan, yüksek performanslı ve ileri bilgi içeriğine sahip olarak tanımlanır. Gelişen teknoloji ile başta havacılık, savunma, otomotiv ve enerji gibi alanlarda ihtiyaç doğrultusunda yüksek performanslı malzemeler üretilmeye başlamıştır (Davis 2004).

Günümüzde dizel motorlarda kaplama malzemesi olarak kullanılan seramiklerin düşük ısı iletim katsayısı, düşük özgül ısı, pistonun ana malzemesine (çelik ve dökme demir) yakın termal genleşme katsayısı, yüksek eğilme dayanımı, kırılma tokluğu ve yüksek termal direnci gibi avantajları vardır. Dizel motorlarda kullanılan ileri teknolojik seramikler alümina (Al_2O_3), zirkonya (ZrO_2), magnezya (MgO), Berilya (BeO) ve oksit olmayan (Si_3N_4 , SiC) seramiklerdir. Kaplama olarak kullanılan ileri teknolojik seramiklerin özellikleri Çizelge 1.1’ de verilmiştir (Yaşar 1997).

Çizelge 1.1. İleri teknoloji seramik malzemelerin özellikleri

Malzeme	Ergime sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Mukavemet (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (kg/mm ²)	Tokluk K _{IC}
Cam	500	2.2	48	7.2	650	0.5
Al_2O_3	2050	3.96	250-300	36-40	1300	4.5
ZrO_2	2700	5.6	113-130	17-25	1200	6-9
SiC	3000	3.2	310	40-44	2800	3.4
Si_3N_4	1900	3.24	410	30-70	1300	5

1.3.1. Zirkonya (ZrO_2)

Zirkonyanın ergime noktası yüksek olduğu için yüksek sıcaklığa dayanabilen yerlerde kullanılır. Erozyon ve korozyon direncine sahip bir malzemedir. Monoklinik, tetragonal ve kübik olmak üzere üç farklı kristal yapıda bulunabilir. 1170 °C’ ye kadar monoklinik, 1170-2370 °C sıcaklıklar arasında monoklinik yapı tetragonal yapıya dönüşür ve 2370 °C’ den yüksek sıcaklıklarda kübik yapıya dönüşür. Kübik yapıdaki zirkonyanın malzeme özellikleri zayıftır. Sıcaklık artışlarına bağlı olarak zirkonyada meydana gelen hacimsel değişimler sonucunda malzemede deformasyon meydana gelir. Oluşan bu deformasyonu önlemek için CaO , MgO , Y_2O_3 ve bunların bileşikler oksit ilavesiyle oda sıcaklığında kübik fazın kararlı durumda kalmasını sağlar. Y_2O_3 ile

stabilize edilen zirkonyanın diğer malzemelere göre çok daha iyi özelliklere sahip olduğu gözlenmiştir (The American Ceramic Society. 2015).

1.3.2. Yttria (Y_2O_3)

Erime sıcaklığı 2410 °C olan Yttria asitlerle çözülebilir, havada kararlı durumdadır ve CO_2 emer. Termal bariyer kaplamalarda ara bağın asıl amacı piston malzemesi ile seramik kaplama arasında termal uyumluluğu sağlamaktır. Ara tabaka malzemesinin piston içindeki sıcaklıktan kaynaklı oluşacak korozyona karşı direnci yüksek olmalıdır. Bu özelliklere sahip NiCrAlY ve NiCoCrAlY alaşımları üretilmiştir. Bu alaşımlar sayesinde kaplamanın uzun süre malzeme özelliklerini koruduğu gözlenmiştir. NiCrAlY oksitlenmesi sonucunda NiO, Cr_2O_3 ve Al_2O_3 malzemelerine dönüşür. %8 yttria ihtiva eden ZrO_2 /NiCrAlY kaplamasının 900 °C' ye kadar sıcaklığa dayandığı tespit edilmiştir. Bu yüzden otomotiv ve uçak sanayisinde tercih edilir (Ciniviz et al. 2012). Motorlarda kullanılan kaplama malzemelerinden kısmi stabilize edilmiş zirkonyum en önemlisidir. Çatlak ve kopma dayanımı olarak en iyi sonucu yttria ile stabilize edilmiş zirkonya vermiştir (The American Ceramic Society. 2015).

1.3.3. Magnezya (MgO)

Termal genleşme katsayısı çok yüksek olup erime noktası 2800 °C' dir. Karbonla temas halindeyken 1800 °C' ye kadar olan sıcaklıklarda sabittir, sıcaklık 2000 °C' nin üstüne çıktığı zaman karbonla reaksiyona girer. 2300-2400 °C' de buharlaşmaya başlar.

1.3.4. Alüminyum Oksit (Al_2O_3)

Çeşitli saflık seviyelerindeki alümina veya alüminyum oksit (Al_2O_3) diğer tüm seramik malzemelerden daha sık kullanılır. Erime sıcaklığı yaklaşık 2000 °C olup saf alüminyumun yaklaşık üç katıdır. Erime noktasının düşük olması kullanım alanlarını sınırlandırmıştır. Mekanik dayanımı 300 ile 630 MPa arasındadır. Isıl iletkenliği 20-30 W/mK, korozyon ve aşınma direnci yüksektir.

1.3.5. Nadir toprak elementleri

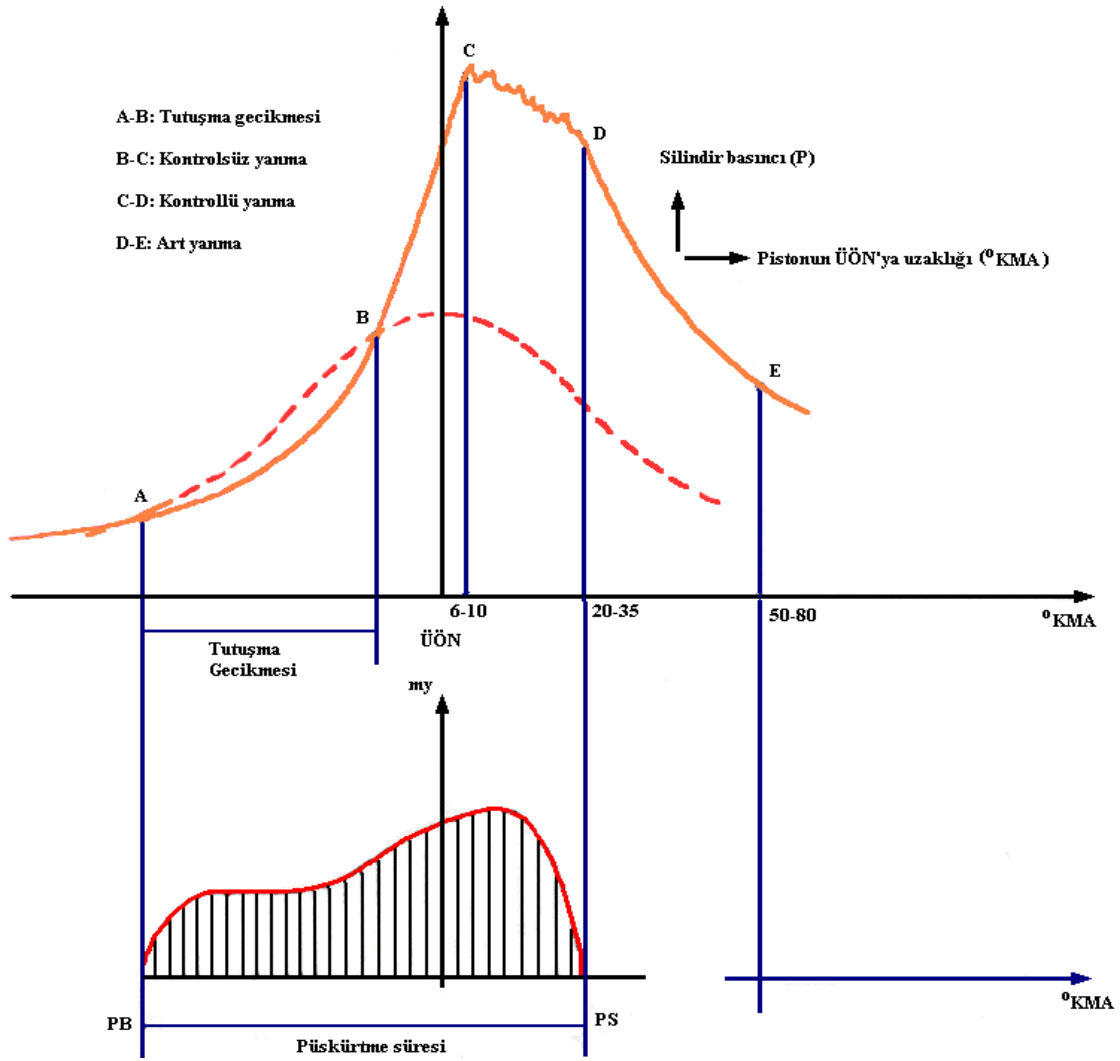
Günümüzde dizel motorlarda kaplama işlemi için en yaygın kullanılan malzeme yttria ile stabilize edilmiş zirkonyumdur. Termal iletkenliği daha fazla düşürmek için zirkonyumun ana malzeme olduğu seramik malzemeler araştırma konusu olmuştur. Yapılan araştırmalarda zirkonyum, zirkonyum bileşenli seramikler (BaZrO_3 , SrZrO_3) ve nadir zirkonatların (Lantanat ve Gadalyum) erime sıcaklığının yüksek olduğu tespit edilmiştir (Vassen et al. 2000). Bu malzemelerin erime sıcaklıklarının yüksek olması TBC uygulaması için uygunluk sağlamaktadır. Termal bariyer kaplamada malzemelerin termal iletkenliğinin düşük olması istenen bir durumdur. Zirkonyum ve zirkonyum alaşımlı seramik malzemelerin termal iletkenlikleri düşüktür (Lehmann et al. 2003).

1.4. Dizel Motorunda Yanma Aşamaları

Yanma, yakıt ve hava arasındaki hızlı kimyasal reaksiyon sürecidir. Bu süreç, ısı ve ışık oluşumuyla sonuçlanır. İçten yanmalı motorlarda, farklı motorlar için farklı yanma aşamaları vardır. Bu bölümde, dizel motorunda yanma aşamalarına odaklanılacaktır. Dizel motorundaki yanma aşamaları, benzin motorlarından tamamen farklıdır.

Dizel veya sıkıştırma ateşlemeli motorda, sıkıştırma strokunda, çok yüksek basınç ve sıcaklıkta sadece hava sıkıştırılır. Sıkıştırma oranı 12 ila 20 aralığında değişebilmektedir. Dizel motorunda, sıkıştırılmış hava içerisine püskürtülen yakıtın uygun şekilde yanması için aşağıdaki dört yanma aşaması mevcuttur.

1. Tutuşma Gecikme
2. Kontrolsüz Yanma Süreci
3. Kontrollü Yanma Süreci (Püskürtme kontrolü)
4. Art Yanma



Şekil 1.3. Dizel motorlarında yanma safhaları (Prof. Dr. Behçet Safgönül, Prof. Dr. Metin Ergeneman, Prof. Dr. H. Ertuğrul Arslan 1995)

1.4.1. Tutuşma gecikmesi

Dizel motorunda yanmanın bu ilk aşamasında, enjeksiyon sisteminden gelen yakıt yanma odasına bir jet şeklinde püskürtülür. Atomizasyon ve buharlaşma sürecinde, bu yakıt, sıkıştırılmış hava içerisinde bir spreyci çekirdeği şeklinde parçalanır. Bu buharlaşma sürecinde yakıt, sıkıştırılmış sıcak çevre havasından ısı alır. Silindirde bir miktar basınç düşüşüne neden olur. Bu basınç düşüşü (AB eğrisi) yukarıdaki şekilde B noktasında gösterilmiştir. Buharlaşma işleminin tamamlanmasının ardından karışımın yanma odasındaki ön alev reaksiyonu başlar. Ön alev reaksiyonu sırasında, enerjinin yavaş bir oranda salınmasıyla silindirde basınç artmaya başlar. Bu ön alev reaksiyonu yavaş başlar ve ardından yakıtın tutuşması gerçekleşene kadar hızlanır. Bu işlem şekilde C noktasında gösterilmiştir. Yakıt enjeksiyonunun başlaması ile yanmanın başlaması arasındaki bu

zaman aralığına tutuşma gecikme süreci denir. Bu gecikme süresi ayrıca iki kısma ayrılabilir, bunlar; Fiziksel gecikme ve kimyasal gecikmedir. Yakıtın enjeksiyon anı ile buharlaşma sırasında kendiliğinden tutuşma sıcaklığına ulaşması arasındaki süreye fiziksel gecikme denir. Fiziksel gecikme tamamlandığında, yakıtın tutuşmasına ve yanma alevinin ortaya çıkmasına kadar geçen zaman aralığına kimyasal gecikme denir. Tutuşma gecikmesi süresinin uzaması dizel motorlarında vuruntu oluşumuna neden olur.

1.4.2. Kontrolsüz yanma safhası

Bu aşama, dizel motorundaki yanmanın ikinci aşamasıdır. Yukarıda belirtilen gecikme süresi sona erdikten sonra, hava ve yakıt karışımı kendi kendine tutuşma sıcaklığına ulaştıkça kendiliğinden tutuşacaktır. Dizel motorlarındaki hava ve yakıt karışımı, benzin motorlarındaki homojenden karışımdan farklı olarak heterojendir. Bu heterojen karışım nedeniyle, stokiyometrik karışımın konsantrasyonunun yüksek olduğu birden fazla yerde alevler görülür. Alev oluştuğunda, diğer karışım, alevlerin yayılmasıyla veya ısı transferi sürecinden dolayı kendi kendine tutuşma nedeniyle yanmaya başlar. Gecikme sırasında biriken yakıt artık son derece hızlı bir oranda yanmaya başlar. Silindir içi basınç ve sıcaklığın ani yükselmesine neden olur. Dolayısıyla, gecikme süresi ne kadar yüksek olursa, basınç artış hızı da o kadar yüksek olacaktır. Bu da belirli bir noktadan sonra dizel vuruntusu oluşturur. Bu aşamada yanan yakıt miktarının kontrolü zordur, bu nedenle bu periyoda kontrolsüz yanma safhası denir. Bu süre, yukarıdaki şekilde BC eğrisi ile temsil edilmektedir.

1.4.3. Kontrollü yanma

Gecikme süresi boyunca biriken yakıt, kontrolsüz yanma periyodunda tamamen yandığında, silindirdeki karışımın sıcaklığı ve basıncı o kadar yüksektir ki, yanma odasında yeterli oksijen bulunması nedeniyle enjektörden yeni püskürtülen yakıt hızla yanacaktır. Yakıt enjeksiyon oranını kontrol ederek silindire giden basıncın yükselmesini kontrol edebilmemizin nedeni budur. Bu nedenle bu yanma periyodu kontrollü yanma periyodu veya enjeksiyon kontrollü yanma periyodu olarak adlandırılır.

1.4.4. Art yanma

Bu aşama, dizel motordaki yanmanın dört aşamasından sonuncusudur. Doğal olarak şekilde görüldüğü gibi E noktasında yanma odasında maksimum basıncın elde edildiği noktada yanma işlemi tamamlanmış olur. Pratik olarak, yanma odasındaki yakıtın yanması, genleşme stroku sırasında devam etmeye devam eder. Bunun arkasındaki ana sebep, ayrılmış gazların ve yanmamış yakıtın yeniden birleşmesidir. Bu nedenle, yanmanın bu son aşamasına ana yanmadan bağımsız olarak art yanma denir.

1.4.5. Dizel motorlarında emisyon oluşumu

Şehirlerde hava kirliliğinin en önemli nedenlerinden biri benzinli ve dizel motorlarının oluşturduğu emisyonlardır. Benzinli motor emisyonları azot monoksitler (NO), az miktarda azot dioksit (NO₂), yani geniş anlamda NO_x bileşenleri, karbon monoksit (CO), organik bileşikler olan yanmamış hidrokarbonlar (HC)'dan oluşmaktadır. Bunların oluşum oranları motor dizaynına ve çalışma koşullarına göre değişmekle beraber, NO_x emisyonları 500-1000 ppm veya 20 g/kg yakıt, CO % 1-2 veya 200 g/kg yakıt, HC emisyonları ise 3000 ppm veya 25 g/kg yakıt olarak değişebilmektedir (Heywood 2018). Pistondan silindir sızan veya buharlaşan yakıt veya motor durmuş iken yakıt tankından veya sisteminden sızan yakıt buharları da diğer yanmamış HC emisyonu kaynaklarıdır. Ancak modern motor dizaynlarında bu sızan gazları biriktiren ve tekrar emme sistemine sevk eden sistemler (karbon kanisteri) geliştirilmiştir. Dizel motorlarından kaynaklanan NO_x emisyonları miktar olarak benzinli motorlarda kaynaklanan emisyon değerlerinden fazladır. Dizel motorlarından kaynaklanan HC emisyonların önemli olmasına rağmen benzinli motorlardan kaynaklanan emisyonlardan çok daha azdır. Dizel motorlarında partikül madde emisyonları önemli kirlilik kaynaklarından biri olup, bu motorlar % 0.2 ile % 0.5 arasında is veya kurum içeren partikül madde emisyonu yayar. Dizel motorları CO emisyonunun önemli kaynaklarından sayılamazlar (Heywood 2018).

Genel olarak içten yanmalı motorlardan kaynaklanan kirlетici emisyonları; kimyasal denklіklerden hesaplanan oranlardan çok farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle kimyasal mekanizmanın yanısıra ve bu işlemin kinetiğinin iyi bilinmesi gerekir.

Azot oksit emisyonları; silindir içerisinde oluşan yüksek sıcaklıklarda, yanmış gazlarda ve alevin hemen arkasında oluşmaktadır. Yanmış gazların sıcaklığı ne kadar

yüksek olursa NO emisyonları o derecede yükselmektedir. CO emisyonları da yanma işlemi sırasında oluşmaktadır. Zengin karışımlarda yakıtın tam olarak yanması için oksijen eksikliği olduğunda, ayrıca çok yüksek sıcaklıklarda karışım fakir olsa dahi CO emisyonları oluşabilmektedir. Genişleme strokunun sonlarından hem ilk önce NO hem de daha sonra CO emisyon oluşumu sıcaklık düşüşü ile sona ermektedir (Heywood 2018).

NO oluşumunun en kritik safhaları; ilk yanma başlangıcı ve maksimum silindir basıncının olduğu durumlardır. Oluşan ilk alev cephesinin silindir basıncını yükseltmesi ve dolayısıyla sıcaklığın yükseltmesi bakımından oldukça önemlidir. Maksimum silindir basıncından hemen sonra silindir içindeki sıcaklık hacim genişlemesi sonucu düşmeye başlar. Silindir içindeki basıncın ve sıcaklığın düşmesi NO oluşum reaksiyonlarının durmasına neden olmaktadır. Bu aşamadan sonra NO tekrar geri parçalanabilmektedir. Silindir basıncı maksimuma ulaştığı anda NO emisyonları da aynı şekilde maksimum bir değere ulaşmaktadır.

1.5. Isı Transfer Metotları

Termodinamiğin birinci kanununa göre bir sistem içindeki enerji yoktan var, vardan yok edilemez sadece biçim değiştirmesine enerjinin korunumu prensibi denir. Bir sistem için:

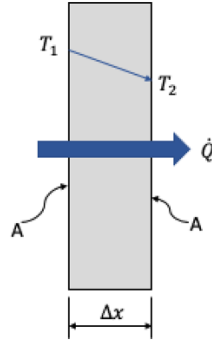
$$\left(\begin{array}{c} \text{Sisteme} \\ \text{giren toplam} \\ \text{enerji} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Sistemden} \\ \text{çıkan toplam} \\ \text{enerji} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Sistemin toplam} \\ \text{enerjisindeki} \\ \text{değişim} \end{array} \right)$$

Isı transfer problemlerinin çözümünde sıcaklık farkından dolayı oluşan enerji dönüşüm şekilleriyle ilgilenir. Bu durumda enerji denklemi 1.1 de verilmiştir.

$$Q_{giren} - Q_{çıkan} + E_{üretim} = \Delta E_{ısı,sistem} \quad (1.1)$$

1.5.1. İletim

Isı sıcaklık farkından dolayı moleküler hareketle katılar ve sıvılar yardımıyla transfer edilir. Yüksek enerjili parçacıklardan daha düşük enerjili parçacığa enerji aktarılmasına iletim denir.



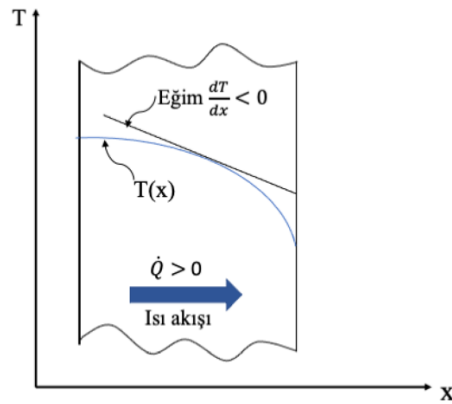
Şekil 1.4. Düzlem duvarda ısı iletimi

Şekil 1.4 de gösterilen kalınlığı Δx , alanı A olan bir düzlem duvar için sıcaklık farkı $\Delta T = T_2 - T_1$ için ısı iletimi denklemi olan Fourier denklemi 1.2 de verilmiştir.

$$\dot{Q}_{iletim} = k \cdot A \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} = -k \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1.2)$$

Şekil 1.4 de gösterilen dT/dx sıcaklık gradyanı T-x grafiğindeki sıcaklık eğrisinin eğimidir. Malzemelerde sıcaklık değişimine bağlı olarak ısıl iletkenlikleri değişir. Bir ortamdaki sıcaklık sadece bir doğrultuda değişiyorsa bu doğrultuda ısı transferi gerçekleşiyorsa, diğer doğrultulardaki sıcaklık değişimine bağlı ısı transferi ihmal edilebilir. Böylece tek boyutlu Fourier ısı iletim kanunu denklemi 1.3 de verilmiştir (Çengel, Yunus A. Ghajar 2011).

$$\dot{Q}_{iletim} = -k \cdot A \frac{dT}{dx} \quad (1.3)$$



Şekil 1.5. T-x grafiğinde sıcaklık eğimi

1.5.2. Taşınım

Isının akışkan hareketi boyunca transfer edilen ve akışkan ile katı arasındaki harekete bağlı olan ısı transferi metodudur. Pistonun emme, sıkıştırma, yanma ve egzoz zamanları boyunca silindir duvarı, valfler, silindir kafası ve silindir içindeki gaz arasında konveksiyonla ısı transferi gerçekleşir. Silindir duvarından sıvı veya gaz olarak soğutucuya doğru ve pistondan yağlayıcı veya diğer soğutuculara doğru taşınım ile ısı transferi gerçekleşir (Heywood 2018). Taşınım ile ısı transferi hesaplamalarında h taşınım katsayısı, yüzey ve akışkan arasındaki sıcaklık farkı ve taşınım olan yüzey alanı hesaba katılır.

$$\dot{Q}_{\text{taşınım}} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (1.4)$$

1.5.3. Işınım

Termodinamik açıdan sıcaklığa sahip olan bir cisim, etrafına bütün yönlerde geniş bir dalga boyunca ışıınım yayar. Belli bir dalga boyunda bir yüzey tarafından yayılan ışıınım enerjisinin miktarı yüzeyin şartlarına, cismin malzeme cinsine ve en önemlisi yüzey sıcaklığına bağlıdır. Bu nedenle aynı sıcaklıkta olan farklı cisimler, birim yüzey alanlarından farklı ışıınım miktarı yayarlar. Bir siyah cismin birim zamanda birim alanından yaydığı ışıınım enerjisinin miktarı 1.5'teki denklemlerle hesaplanır.

$$E_s = \sigma T^4 \quad (1.5)$$

1.6. İçten Yanmalı Motorlarda Isı Transferi

İçten yanmalı motorlarda meydana gelen ısı transferi motorun doğru çalışması için son derece önemlidir. Yakıttaki kimyasal enerjinin yaklaşık %35' i krank milinin çalışmasına ve egzoz akışı sırasında yakıttaki enerjinin yaklaşık %30' u entalpi ve kimyasal enerji olarak motordan uzağa taşınır. Toplam enerjinin yaklaşık üçte biri ısı transferi yöntemleriyle çevreye bırakılır ve bu enerji kayıp enerji olarak bilinir. Bir motorun yanma odasındaki sıcaklık 2700 K ve üstündeki değerler ulaşabilir. Motor malzemeleri bu tür sıcaklığa dayanamaz ve uygun ısı transferi gerçekleşmezse malzemelerde bozulma gözlenir. Isıyı uzaklaştırmak bir motoru ve motor yağını ısı arızadan korumak için çok önemlidir. Diğer taraftan termal verimliliği artırmak için

motorun en yüksek sıcaklıkta çalışması ve ısı transferinin azaltılması istenir. İçten yanmalı motorların soğutmasında iki sistem kullanılır. Su soğutmalı bir motorda motor bloğunda motorda dolaşan soğutma sıvısını içeren bir su ceketiyile çevrilidir. Hava soğutmalı bir motorda ise motor bloğunun üstünde hava akışının yönlendirildiği kanatlı bir dış yüzeye sahiptir (Pulkrabek 2004).

1.6.1. Enerji dağılımı

Bir motorda kullanılan mevcut enerji miktarı:

$$\dot{W} = \dot{m}_f Q_{HV} \quad (1.6)$$

Yakıtın kütle akışı yakıtla reaksiyona girmesi gereken havanın kütle akışı ile sınırlıdır. Fren termal verimliliği krank milinin çıkışında dönüştürülebilen kullanılabilir toplam enerjinin yüzdelik dilimini verir.

$$(\eta_t)_{brake} = \dot{W}_b / \dot{m}_f Q_{HV} \eta_c \quad (1.7)$$

Enerjinin geri kalanı ısı kayıplarına bölünebilir. Toplam tutarlar %100'ün üzerinde olur çünkü sürtünme kayıpları iki kez hesaplanır ilk olarak orijinal kayıp ve daha sonra ortaya çıkan ısı kayıplarıyla ikinci kez hesaplanır. Herhangi bir motor için:

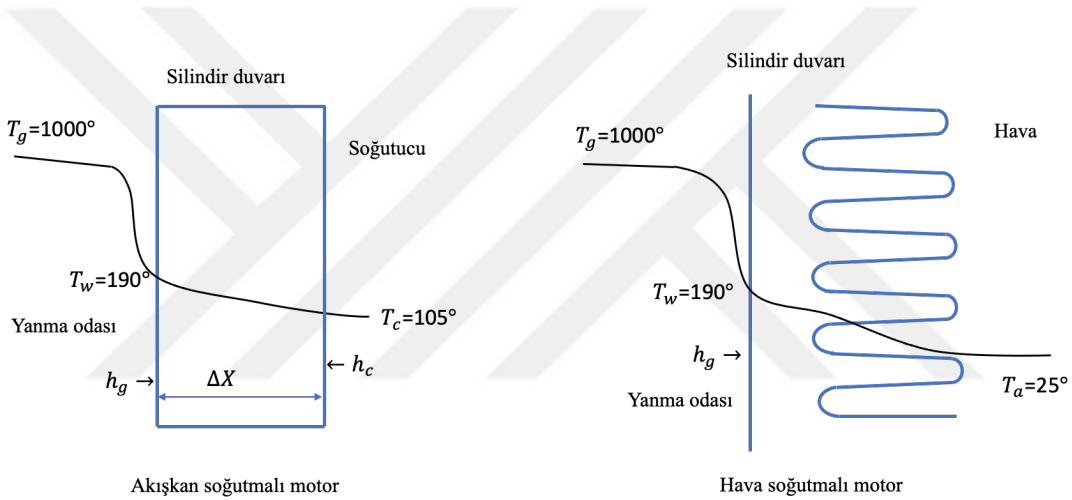
$$\text{Üretilen güç} = \dot{W}_{shaft} + \dot{Q}_{exhaust} + \dot{Q}_{loss} + \dot{W}_{acc} \quad (1.8)$$

Motorun geometrisi ve büyüklüğüne bağlı olarak, çalışma şartlarının yanı sıra shaft güç çıkışı ($\dot{W}_{shaft}$) yaklaşık %20-45'tir. Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda genellikle en yüksek, kıvılcım ateşlemeli motorlarda düşüktür. Egzoz akışındaki enerji kaybı ($\dot{Q}_{exhaust}$) yaklaşık olarak %20-45 civarındır.

Kıvılcım ateşlemeli (SI) motorlardaki kayıpların büyük bir yüzdesi yüksek egzoz sıcaklığı yüzündendir. Kayıp egzoz enerjisi iki kısımdan oluşmaktadır: entalpi ve kimyasal enerjidir. Motor tam yükte çalıştırılırsa kimyasal enerji egzoz kayıplarının yaklaşık yarısını oluşturuyor. Birçok çalışma koşulu altında, motorun çıkış fren gücünü aşar. Diğer ısı kayıpları ($\dot{Q}_{loss}$) yaklaşık %10-35 civarı olur (Pulkrabek 2004).

1.6.2. Yanma odasındaki ısı transferi

Hava yakıt karışımı silindir içindeyken ısı transfer yöntemlerinden iletim, taşınım ve radyasyon ısı transferinde önemli rol oynar. Ek olarak silindir içindeki sıcaklık kalan sıvı yakıtın faz değiştirmesinden etkilenir. Emme stroku sırasında hava yakıt karışımı silindir duvarlarından daha sıcak veya daha soğuk olabilir bunun sonucunda ısı transferi her iki yönde gerçekleşebilir. Sıkıştırma strokunda gaz sıcaklığının artışı ve yanmanın başlamasıyla silindir duvarlarından iletimle ısı transferi başlar. Yanma sırasında silindir içinde en yüksek 3000 K civarında sıcaklık oluşur ve silindir duvarlarının aşırı ısınmasını önlemek için etkili bir ısı transferine ihtiyaç vardır. Konveksiyon ve iletim silindir içinde gerçekleşen temel ısı transfer yöntemleridir (Pulkrabek 2004).



Şekil 1.6. Silindir duvarı boyunca ısı transferi

Şekil 1.6’da gösterilen silindir duvarı boyunca ısı transferi gösterilmiştir. Birim yüzey alanı başına ısı transferi hesaplanırken:

$$\dot{q} = \dot{Q}/A = (T_g - T_c) / \left[\left(1/h_g \right) + (\Delta x/k) + \left(1/h_c \right) \right] \quad (1.9)$$

Yukarıdaki 1.9’da ki denklem bir çevrimde ısı transferini hesaplamak için kullanılır. Yanma odası gaz sıcaklığı T_g bir çevrim boyunca emme strokundaki en düşük sıcaklık değerinden yanma sırasındaki en yüksek sıcaklık değerine kadar geçen sürede büyük ölçüde değişir. Yanma odasının sıcaklığı emme strokunda duvar sıcaklığından daha soğuk olabilir ve anlık olarak ısı transferini tersine çevirebilir. Soğutma sıvısı sıcaklığı T_c uzun çevrim sürelerinde meydana gelen herhangi bir değişiklikte sabit

kalabilir. Gaz tarafındaki konveksiyonla ısı transferi katsayısı h_g gaz hareketi, türbülans, girdap, hız vb. değişiklikler nedeniyle bir çevrim boyunca değişim gösterir. Bu katsayı silindir içindeki bu değişimlere bağlı olarak çeşitli varyasyona sahip olacaktır. Soğutucu tarafındaki konveksiyonla ısı transferi katsayısı h_c soğutma hızına bağlı olarak sabit kalacaktır. Silindir duvarının ısı iletkenlik katsayısı k duvar sıcaklığının bir fonksiyonu olduğu için sabit olacaktır (Pulkrabek 2004).

Silindir iç yüzeyindeki konveksiyonla ısı transferini:

$$q = \dot{Q}/A = h_g(T_g - T_w) \quad (1.10)$$

Duvar sıcaklığının motor yağının termal stabilitesini ve silindir duvarının yapısal mukavemetini sağlamak için $180^\circ - 200^\circ \text{C}$ ' yi aşmaması gerekir. Farklı boyutlara, hızlara ve geometrilere sahip motorlarda akış özelliklerini ve ısı transferini karşılaştırmak için Reynolds sayısını belirlemenin birkaç yolu vardır. En iyi karakteristik uzunluk ve hızı seçmek bazen zordur. Verileri iyi ilişkilendiren motorlarda Reynolds sayısı hesaplamının yolu:

$$Re = [(\dot{m}_{ca} + \dot{m}_{cf})B]/(A_p\mu_g) \quad (1.11)$$

Reynolds sayısını kullanarak yanma odasının içindeki Nusselt sayısı tanımlanır.

$$Nu = h_g B / k_g = C_1 (Re)^{C_2} \quad (1.12)$$

Nu ve silindir duvarının soğutucu tarafındaki taşınım ile ısı transfer katsayısı geleneksel zorlanmış taşınım ile ısı transferi yöntemiyle tahmin edilebilir. Radyasyonla ısı transferi yanma odası duvarı ve silindirdeki gaz arasında:

$$\dot{q} = \dot{Q}/A = [\sigma(T_g^4 - T_w^4)] / \{[(1 - \varepsilon_g)/\varepsilon_g] + [1/F_{1-2}] + [(1 - \varepsilon_w)/\varepsilon_w]\} \quad (1.13)$$

Gaz sıcaklığı çok yüksek olmasına rağmen SI motorlardaki toplam ısı transferinin sadece %10' u radyasyonla gerçekleşiyor. Bu durum gazların sadece belirli dalga boylarında yayılım özelliğine sahip olmasından kaynaklanıyor. Yanmadan önce gazın büyük bir çoğunluğu çok az ısı yayan N_2 ve O_2 ' den oluşurken yanma sonrası ürünlerinden CO_2 ve H_2O radyasyonla ısı transferine daha fazla katkı sağlar.

CI motorlarda yanma ürünlerinde oluşan katı karbon parçacıkları tüm dalga boylarında iyi yayılım yaparlar ve bu motorlarda toplam ısı transferinin %20 -35'i duvarlardan radyasyonla gerçekleşir. Bu duvarlardaki radyasyonla ısı transferi yanma strokunun başlarında gerçekleşir. Bu noktadaki yanma sıcaklığı maksimumdur ve çok büyük ısı akışı üretilir. Bu aynı zamanda CI motorlarda maksimum miktarda karbon isinin olduğu ve radyasyonla ısı akışının daha fazla arttığı zamandır.

Silindir duvarındaki ısı transferi genişleme stroku boyunca devam eder fakat hızlı bir düşüş vardır. Genişlemedeki soğutma ve ısı kayıpları silindir içindeki gaz sıcaklığını maksimum 2700 K'den yaklaşık 800 K olan egzoz sıcaklığına düşürür. Egzoz stroku boyunca silindir duvarlarındaki ısı transferi devam eder fakat büyük ölçüde azalmıştır. Bu sırada silindir gaz sıcaklığı taşınım ile ısı transfer katsayısı gibi çok düşüktür. Bu çevrimde girdap hareketi olmadığı için türbülansın büyük ölçüde azalmasıyla çok düşük taşınım ile ısı transferi gerçekleşir. Yanma sırasındaki çevrimden çevrime olan değişimler silindir duvarındaki ısı transferindeki değişimlere neden olur.

Bir çevrimin bütün stroklarında yüksek akışlardan düşük akışa hatta sıfır veya ters yönde akışa kadar değişen ısı transferi oluşur. Duvarlardan silindir içindeki gaz karışımına ısı akışı örnek olarak verilebilir. Bir motorda belirli bir silindir konumunda emme stroku sırasında ısı akışı her iki yönde de olabilir. Sıkıştırma stroku sırasında hava yakıt karışımının ısınmasıyla duvarlara doğru bir ısı akışı olur. Yanma sırasında sıcaklık ve ısı akışı en yüksek seviyeye çıkar ve egzoz strokunda sıcaklık ve ısı akışı azalmaya başlar. Özellikle yanma sırasında krank açısının birbirine yakın olan konumları farklı ısı akışlarına sahip olabilir (Pulkrabek 2004).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Termal bariyer kaplamalı dizel motorlarla ilgili ilk araştırma 1970'lerin ortalarında Kvernes tarafından yapılmıştır (Vittal et al. 1999). Birçok araştırmacı termal bariyer kaplamanın (TBC) dizel motorlarda ısı kayıplarına ve yakıt verimliliğine etkisini araştırmışlardır. Araştırmalar sonucunda çoğu araştırmacı yakıt tüketiminde düşüş motor performansında iyileşme tespit etmişlerdir (Jaichandar and Tamilporai 2003). Piston yüzeyleri kaplanırken ilk katman çoğunlukla çelik, dökme demir veya alüminyum olan alt tabakadır. Ara kat olarak bilinen astarın iki önemli fonksiyonu vardır. Birincisi alt tabakayı oksidasyondan korumalı ikinci olarak üst tabaka olan kaplama yüzeyiyle mekanik bağlamayı sağlamalıdır (Clarke and Levi 2003). Seramik malzemeden oluşan üst tabaka ısı yalıtımını sağlayan düşük ısı iletkenliği olan bir katmandır.

Termal bariyer kaplama işleminde plazma sprey ve elektron ışını fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD) yöntemiyle birlikte YSZ malzemesi kullanılmaktadır. Düşük ısı iletkenliğe sahip YSZ malzemesinin TBC uygulaması sırasında gözenekli mikro yapısıyla daha düşük ısı iletkenlik elde edilir (Lehmann et al. 2003). Termal bariyer kaplama malzemesi seçiminde düşük termal iletkenlik, yüksek termal genleşme katsayısı, yüksek erime noktası, termal ve kimyasal kararlılık, faz geçişi ve düşük sinterleme aktivitesi önemli rol oynar (Vassen et al. 2000).

Motorlarda yanma olayı sırasında yeterli oksijen olmaması durumunda yakıt içerisindeki karbon molekülleri yanma gerçekleşmeden egzozdan atmosfere atılır. Dizel motorlarda partikül oranını düşürmek için partikül filtresi kullanılacağı gibi motor piston yüzeyi ve supaplar termal bariyer kaplama yapılabilir. Termal bariyer kaplamayla birlikte yanma iyileşeceği için partikül oranı düşecektir. Termal bariyer kaplı motorlarda partikül değerinde %50 oranında azalma, duman koyuluğunda %75 oranında azalma olur (Çakır 2007).

Termal bariyer kaplı motorda ısı kayıpları azalacağı için sıkıştırma sonu gaz sıcaklığı artacaktır. Böylece daha kolay ilk hareket sağlanacağı için kontrolsüz yanma sonucunda oluşacak vuruntu ve sesli çalışma olayı azalacaktır (Çakır 2007).

Büyükkaya ve Cerit (Buyukkaya and Cerit 2007) MgO, ZrO₂, AlSi kullanılarak kaplanmış dizel motor pistonlarını kaplamasız pistonla karşılaştırmış ve termal analiz yardımıyla pistonların ısı davranışlarını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlardan pistonun maksimum sıcaklığını piston yanma haznesi ağzında tespit etmişlerdir. Çelik

pistonun maksimum yüzey sıcaklığı AlSi alaşımından %14 daha yüksektir. Kaplamalı piston yüzeylerinin mukavemetinin arttığını bulmuşlardır.

Ciniviz ve diğ. (Murat Ciniviz, Can Haşımoğlu, İlker Örs 2008) Yttria ile stabilize edilmiş zirkonya ile motor silindir kapağı ve supaplara TBC uygulamışlardır. Kaplama kalınlığını 300-350 mikron ve NiCrAl ara bağlayıcı kalınlığını 30 mikron kullanmışlardır. Seramik kaplamalı motorlarda egzoz gazı sıcaklıklarında %7-20 arasında artış tespit etmişlerdir. Bu ısı enerjisi artışının turbo kombine ile sisteme geri kazandırılması motor performans artışına sebep olacağını belirtmişlerdir.

Pistonların kaplanmasıyla ısı kayıplarını azaltmak ve motor performansını artırmak amaçlanır. Termal bariyer kaplamalar piston yüzeylerinin termal yorulmasını önlemek, motorda yanmayı ve performansı arttırmak ve motor emisyonlarını azaltmak için kullanılır. Dizel motorda yanma odasındaki ısı kayıplarından dolayı yakıt enerjisinin yaklaşık %30' u kayıp enerjidir. Bu nedenle birçok araştırma dizel motorlarda termal bariyer kaplama uygulamaları üzerine odaklanmıştır. Yanma odasının seramikle kaplanması yanmayı, motor performansını ve egzoz emisyonlarını etkiler. Pistonun plazma püskürtmeli termal bariyer kaplanmasıyla verimliliğin termal ve mekanik olarak arttığı tespit edilmiştir (Rupangudi et al. 2014).

Jia ve diğ. (Jia et al. 2016) dizel motor, RCCI ve HCCI motorlar için yanma rejimlerinin ısı kayıplarına etkisini araştırmak için analitik model oluşturarak simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Modelin türetilmesinde akışkan hızının duvara paralel, gazın ideal gaz, basıncın uzayda eşit olduğunu kabul ederek viskoz yayılımı ve radyasyonla ısı transferini ihmal etmişlerdir. HCCI ve RCCI motorlarına göre geleneksel dizel motorunda ısı transfer kayıplarının alevin piston duvarı ile doğrudan etkileşimi nedeniyle daha yüksek ve RCCI motorlarda ısı transfer kayıplarının en düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Yao ve Qian (Z. Yao and Qian 2018) yaptıkları çalışmada kaplama malzemesi olarak Y_2O_3 ile stabilize edilmiş zirkonyum kullanmışlardır. Bir dizel motorda kaplamalı piston yüzeyindeki sıcaklığın kaplanmamış piston üst yüzey sıcaklığından yaklaşık % 44 ve 153 °C daha yüksek olduğunu tespit etmişleridir. Alt tabaka yüzey sıcaklığının kaplamasız pistona göre 43 °C daha düşük olduğunu ve 6-8 PYSZ malzemesinin ömrünün diğer kaplama malzemelerinden daha uzun olduğunu tespit etmişlerdir.

Yao ve diğ. (M. Yao et al. 2018) TBC' nin motor performans ve emisyon değerlerine olan etkisini araştırmak için uygulanan TBC malzemesinin parametrelerini dikkate alarak matematiksel bir model önermişlerdir. Son zamanlarda termal bariyer

kaplamalarda kullanılmaya başlanan nadir zirkonatlardan olan $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ kaplama malzemesi olarak kullanmışlardır. Kaplamalı ve kaplamasız motor modelini Kiva3V CFD paket programında oluşturarak yanma ve emisyon değerlerini sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlar piston duvarlarından kaynaklanan ısı kayıplarının azaldığını ve buna bağlı olarak termal verimliliğin arttığını göstermiştir.

Jena ve diğ. (Jena et al. 2018) yaptıkları çalışmada plazma sprej kaplama yöntemi kullanarak 0.1 mm kalınlığında NiCrAlY astar tabaka üzerine 0.4 mm 8YSZ seramik malzemesiyle piston tacı ve valf yüzeylerine TBC işlemi uygulamışlardır. Dizel yakıtta 0.2 gL^{-1} FeCl_3 katkı maddesi ekleyerek iki farklı yakıt için motor deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Kaplamalı motorda dizel ve katkılı dizel yakıt için yanma sırasında sıcaklık artışıyla enerji dönüşümünün artmasına bağlı olarak fren özgül yakıt tüketiminde azalma tespit etmişlerdir. Kaplamalı motorda her iki yakıt türü için net ısı salınımında iyileşme ve yakıtın daha etkin kullanıldığını gözlemlemişlerdir.

Abbas ve Elayaperumal (S. M. Abbas and Elayaperumal 2019) zirkonyum, zirkonyum + alüminyum oksit ve kaynaşık zirkonyum olmak üzere üç farklı seramik malzemeye dizel motor yüzeyini plazma sprej kaplama yöntemiyle kaplayarak motor performans ve emisyon değerlerini deneysel incelemişlerdir. Sonuçlar incelediklerinde motor performansının, karbon monoksit, karbondioksit, hidrokarbon, NO_x ve duman emisyon değerleri için en iyi sonucu kaynaşmış zirkonyumda elde etmişlerdir. Zr kaplı pistonun egzoz gaz sıcaklığını motorun farklı yükler altında çalışmasında diğer iki kaplamalı pistona göre daha iyi performans verdiğini ve egzoz gaz sıcaklığının %7 oranında azaltılabildiğini tespit etmişlerdir.

Hazar ve diğ. (Hazar, Sevinc, and Sap 2019) tek silindirli hava soğutmalı bir dizel motor pistonunun üst yüzeyini 300 μm kalınlığında Cr_3C_2 malzemesini kullanarak plazma sprej yöntemiyle kaplama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Yakıt olarak iki farklı yakıt karışımı kullanmışlardır. İlk yakıt karışımında ham rezene kök yağından %30 (%30 ham rezene yağı + %70 dizel yakıt) ve ikincisinde %50 (%50 ham rezene yağı + %50 dizel yakıt) oranında kullanmışlardır. Kullandıkları yakıt karışımlarına ön ısıtma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış olarak iki grupta deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Kullandıkları yakıt karışımlarına ön ısıtma işleminin uygulanmasının yakıtın fiziksel özelliklerini iyileştirdiğini, fren termal verimliliğini ve egzoz gaz sıcaklığını artırdığını, egzoz emisyonlarından CO, HC ve dumanda düşüşe ancak NO_x 'te artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir. Kaplamalı motorda gerçekleştirdikleri deneylerde tüm yakıt türleri için CO, HC ve duman emisyonlarında düşüş ve NO_x 'te ortalama %12.48'lik artış tespit

etmişlerdir. Cr_3C_2 kaplama malzemesinin dizel motorda uygulandığı zaman yanma verimliliğinde ve fren termal verimliliğinde ortalama %2.08 ve egzoz gaz sıcaklığında % 5.1 artış tespit etmişlerdir.

Godiganur ve diğ. (Godiganur, Nayaka, and Kumar 2020) yaptıkları çalışmada gaz türbinlerinde TBC kullanımının motor performansında ve motor parçalarının ömürlerinde artış tespit etmişlerdir. TBC uygulamalarında zirkonyum ve nadir elementlerden olan zirkonatlar kullanılmaktadır, en yaygın kullanılan malzeme Yttria stabilize zirkonyum dur. Zirkonyumun Yttria ile stabilize edilmesiyle zirkonyumun termal iletkenliği düşürülmüştür.

Özel ve diğ. (Özel, Vural, and Binici 2020) kaplama yüzeyinin motor torkuna, güç ve fren özgül yakıt tüketimine olan etkisini deneysel ve Taguchi optimizasyon yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Kaplama malzemesi olarak $\text{Al}_2\text{O}_3 + \%13 \text{TiO}_2$, Cr_2O_3 ve $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \%25\text{Al}_2\text{O}_3$ kullanarak plazma spreyl kaplama yöntemiyle tek silindirli dizel motorun piston ve valf yüzeylerine TBC uygulamışlardır. Deneyler sonucunda maksimum silindir basıncını 45.7 bar ve ısı salınım oranı 20.89 J/CA olarak $\text{Al}_2\text{O}_3 + \%13 \text{TiO}_2$ malzemesiyle kaplı piston motorunda tespit etmişlerdir.

Saravanan ve diğ. (Saravanan et al. 2020) termal bariyer kaplı bir dizel motorun farklı yükleme koşullarında silindir basıncına, fren termal verimine ve emisyon değerlerine etkisini araştırmışlardır. Astar tabakası olarak NiCoCrAlY, kaplama malzemesi olarak $\text{ZrO}_2\text{-}\%8\text{Y}_2\text{O}_3$ kullanmışlardır. TBC uygulanan pistonun kaplamasız piston motoruna göre termal veriminin %2 arttığını tespit etmişlerdir. Termal bariyer kaplamalı pistonda emisyon değerlerinde CO emisyonunda %14'lük düşüş, HC'de %38'lik düşüş ve NO_x emisyonunda silindir iç sıcaklığındaki artışa bağlı olarak %21'lik artış tespit etmişlerdir.

Cerit ve çoban (Cerit and Coban 2014) yaptıkları çalışmada dizel bir motorda plazma spreyl kaplama yöntemiyle magnezyumla stabilize edilmiş zirkonyum malzemesi kullanarak kaplama kalınlığının termal gerilme ve sıcaklık dağılımına etkisini incelemişlerdir. Kaplama kalınlığı arttıkça kaplama yüzeyindeki gerilme dağılımının azaldığını, maksimum normal ve kayma gerilmelerinin bağ yapıda oluştuğunu tespit etmişlerdir. En yüksek sıcaklık değeri 1.6 mm kaplama kalınlığında ve kaplama kalınlığının artışıyla piston üst yüzey sıcaklık değerinde artış gözlemlenmiştir.

Ma ve diğ. (Ma et al. 2021) dizel RCCI (Reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli) ve GCI (Benzin sıkıştırma ateşleme) motorları için termal bariyer kaplamanın yanma odası yan duvarlarına ve emisyon değerlerine etkisini araştırmışlardır. Silindir içi akış

sürecini modellerken RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) denklemlerini Kiva3v yazılımını kullanarak sayısal hesaplamalarını yapmışlardır. TBC uygulaması sonucunda yakıt filminin neredeyse tamamen buharlaştığını, yüksek silindir içi sıcaklık ve daha hızlı yanmaya bağlı olarak yanmamış HC ve CO emisyon değerlerinde azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Termal bariyer kaplı motorlarda NO_x artışına rağmen kurum emisyonu azaldığını gözlemlemişlerdir. RCCI motorlarda düşük yükte termal verimlilik %5.1 oranında artarken, yüksek yükte bu değer %7.3'e kadar çıktığını gözlemlemişlerdir.

Wang ve diğ. (Wang et al. 2021) yaptıkları çalışmada nadir zirkonatlı olan $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ malzemesiyle kaplama işlemi uygulanmış bir dizel motorun yanma ve emisyon değerlerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma kaplama yüzeyindeki gözenekli yapının artmasıyla termal iletkenliğin azaldığını ve silindir içi gaz sıcaklığının yaklaşık olarak 100-200 K' ne kadar artırabileceğini tespit etmişlerdir. Özgül ısı kapasitesinin (C_p) ısı salınım üst noktasını etkilediğini ve C_p ' nin artmasıyla termal verimde küçük dalgalanmaların meydana geldiğini görmüşlerdir.

Karaoğlanlı ve diğ. (Karaoğlanlı, Doleker, and Özgürlük 2020) gaz türbinlerinin metal bileşenlerini çatlaklara karşı korumak için çift tabaka TBC uygulamışlardır. Üst yüzey seramik kaplamalarda termal yükler altında yüksek gerilme toleransı sağlayan EB-PVD yöntemi kullanmışlardır. Çift tabakalı TBC' nin tek tabakalıya göre daha uzun ömürlü olduğunu tespit etmişlerdir.

Gehlot ve Tripathi (Gehlot and Tripathi 2016) YSZ malzemesi kullanarak seramik kaplama işlemi uyguladıkları piston yüzeyine 1.5 mm, 2 mm ve 2.5 mm yarı çaplarındaki deliklerin etkisini araştırmışlardır. Delik çapı büyüdükçe kaplama yüzeyinin sıcaklığının arttığını fakat alt tabaka piston yüzey sıcaklığının düştüğünü tespit etmişlerdir. Kaplamalı piston üst yüzey sıcaklığında kaplamasız pistonla göre 71.18 °C artış gözlemlemişlerdir.

Venkadesan ve Muthusamy (Venkadesan and Muthusamy 2019) plazma sprej kaplama yöntemiyle Al-13%Si piston yüzeyini CoNiCrAlY astar tabakasıyla kapladıktan sonra alüminyum oksit ilaveli Y_2O_3 ile stabilize edilmiş zirkonyum (%20 Al_2O_3 /8YSZ) ve seryum oksit ilaveli Y_2O_3 ile stabilize edilmiş zirkonyum (%20 CeO_2 /8YSZ) seramik malzemesiyle termal bariyer kaplama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Kaplamalı pistonlarda termal verimliliğin arttığını, özgül yakıt tüketiminde azalma, egzoz emisyon verilerinde HC, CO ve duman emisyonlarında düşüş ve NO_x emisyon değerinde artış gözlemlemişlerdir.

Karthickeyan (Karthickeyan 2019) plazma sprej kaplama yöntemiyle piston kafası, silindir kafası, emme valfi ve egzoz valfini 100 μm astar tabaka ve 400 μm YSZ

malzemesi kullanarak toplam 500 μm kalınlığında termal bariyer kaplama uygulamıştır. Deneylerde yakıt olarak dizel ve Moringa oleifera yağı kullanarak elde edilen biyodizel kullanmıştır. Kaplamalı motorda biyodizel yakıtta fren termal veriminde artış ve fren özgül yakıt tüketiminde düşüş tespit etmiştir. Egzoz emisyonlarından CO, HC, NO_x ve duman parametrelerinde dizel yakıtı göre biyodizelde düşüş tespit etmiştir.

Termal bariyer kaplamalar için kullanılan seramik malzemeler metallerin aksine oksidasyona, korozyona ve aşınmaya karşı daha dirençlidir ve ayrıca yalıtım özellikleri daha iyidir. Yttria ile stabilize edilmiş zirkonyum en yaygın kullanılan seramik malzemedir. Lantanatlar ve nadir toprak oksitleride termal bariyer kaplamalar için umut verici malzemelerdir (Cao, Vassen, and Stoever 2004).

Thibblin ve diğ. (Thibblin, Jonsson, and Olofsson 2018) dizel motorlarda termal bariyer kaplama malzemesi olarak kullanılan yttria ile stabilize edilmiş zirkonyumun mikro yapısının termal çevrim ömrü ve ısı yalıtım özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Plazma sprej kaplama (APS) ve plazma sprej-fiziksel buhar biriktirme (PS-PVD) yöntemlerini kullanarak TBC işlemi gerçekleştirmişlerdir. Geleneksel APS uygulandığında gözeneklilik oranını %16 olarak tespit etmişlerdir.

Taymaz (Taymaz 2007) plazma sprej kaplama yöntemiyle CaZrO₃ ve MgZrO₃ seramik malzemelerini kullanarak piston üst yüzeyi, silindir kafası, valfler ve piston tacına TBC işlemi gerçekleştirmiştir. Dizel motorlarda yanma sırasındaki aşırı ısı kaybını önlemek için TBC işleminin başarılı bir yöntem olduğunu gözlemlemiştir.

Abbas ve diğ. (M. Abbas, Guo, and Ramzan Shahid 2013) zirkonyum kaplamalı sistemlerde oksit kalınlığının gerilme dağılımına etkisini araştırmışlardır. Nanoyapılı YSZ kaplamadaki çekme radyal ve aksenal gerilmelerin yaklaşık 6–7 mm TGO kalınlığına kadar geleneksel kaplamalardan daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Mittal ve diğ. (Mittal et al. 2013) silindir kafası iç yüzeyi ve valfleri plazma sprej kaplama yöntemiyle ZrO₂ içeren seramik malzemesiyle kaplamışlardır ve n-bütanol ve benzinle oluşturulmuş yakıt karışımlarını kullanarak deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Seramik kaplamalı motorda yanma işleminin kaplanmamış motora göre daha iyi olduğunu ve kaplamalı motorda egzoz emisyon değerlerinden HC ve CO değerlerinde düşüş fakat yanma odasındaki ısı artışından dolayı NO_x değerinde artış tespit etmişlerdir.

Reddy ve Panduranguda (Reddy and Pandurangadu 2014) dokuz ve oniki oluklu pirinç kaplamalı pistonda dizel ve alkolden oluşan beş farklı yakıt türünün performans ve emisyon değerlerini incelemişlerdir. Egzoz gaz sıcaklığının ve fren termal veriminin pirinç kaplamalı pistonda daha yüksek olmasının pirinç malzemesinin termal

iletkenliğinin düşük olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Başarılı bir termal kaplama için seramik malzemenin erime noktası, oksidasyon direnci, termal genleşme katsayısı ve korozyon direncinin yüksek, ısı iletkenlik katsayısının düşük olması gerekir (İlker Turgut Yılmaz, Metin Gümüş 2010).

Fei ve diğ. (C. Fei et al. 2022) yaptıkları deneysel çalışmada termal bariyer kaplama malzemesi olarak YSZ nin kullanıldığı kaplamalı piston ve kaplanmamış pistonda izopropanal- bütanol- ethanol karışımli dizel yakıtın yanma ve emisyon performansına etkisini araştırmışlardır. Termal bariyer kaplama malzemesi olarak YSZ' nin kullanılmasının ısı transfer kaybını etkili bir şekilde azaltırken silindir içi sıcaklığının arttığını ve alkol katkıli yakıtın tutuşma gecikmesi sorununu etkin bir şekilde çözdüğünü tespit etmişlerdir. Gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda YSZ kaplamanın fren yakıt tüketimini azalttığı ancak NOX emisyon değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

Cihan ve diğ. (Cihan et al. 2020) atmosferik plazma sprey kaplama yöntemini kullanarak nadir elementlerden olan $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ile piston ve silindir başını kaplamışlardır. Kaplamalı pistonlarda ilk katmana CYSZ (ceria-yiitra ile stabilize edilmiş zirkonyum) ile kapladıktan sonra üst katmana $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ kullanarak iki katmanlı olarak termal bariyer kaplama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Farklı devirlerde yapılan testlerden elde edilen özgül yakıt tüketimi, egzoz sıcaklığı, silindir basıncı, ısı salınım oranı, basınç artış oranı ve yanan kütle oranını kaplamalı motor ile kaplamasız motoru karşılaştırmışlardır. Kaplamalı motorda silindir basınç, ısı salınım oranı, tork, egzoz sıcaklığı ve basınç artış oranında kaplama sayesinde artış tespit etmişlerdir. Nadir element olan lantanyum ile kaplanan motorda kaplamasız motora göre %1.26 daha düşük fren özgül yakıt tüketimi gözlemlenmiştir.

Vural (Vural 2015) yaptığı çalışmada bir dizel piston üzerine ara tabaka olarak NiCoCrAlY ve bu tabakanın üzerine Al_2O_3 , TiO_2 ve SiC termal bariyer kaplama yaparak bilgisayarda modellenen pistonların termal analizlerini yapmıştır. Termal bariyer kaplamalı pistonlarla kaplamasız pistonun karşılaştırılması sonucunda kaplamalı pistonun yanma odası sıcaklıklarında %32 ile %34 oranında artış tespit etmiştir.

Dizel motorlarında uygulanan yanma odası yüzeylerinin seramik bir malzeme ile kaplandığı TBC uygulamalarında, dökme alüminyum alaşımından yapılan piston alt tabakası, çalışma süreci sırasında TBC'nin başarısız olması nedeniyle yüksek sıcaklıkta ablasyon ile hızlı bir şekilde hasar görecektir. Bu nedenle, TBC'lerin hizmet süreleri boyunca yeterli bir yorulma ömrüne sahip olmaları sağlanmalıdır (Reghu, Shankar, and Ramaswamy 2018). TBC'lerin kaplama analizi, pistonların ömürleri boyunca güvenli bir

şekilde çalışmasını etkili bir şekilde sağlayabilir. TBC'lerin başarısızlığının, termal döngü altında yapıştırma kaplaması ve seramik kaplama arayüzü boyunca çatlağın büyümesinden kaynaklandığı ve TBC'lerin sonunda birkaç faktörün birleşik etkileri altında parçalanacağı gösterilmiştir (Jonnalagadda et al. 2017; Fleck, Cocks, and Lampenscherf 2014). TBC'lerin ömrünün hızlı bir şekilde değerlendirilmesi için doğru ve uygun modellerin keşfedilmesi, TBC'lerin kompozit yapılarda güvenilir bir şekilde uygulanması için önemli mühendislik değerine sahiptir. Bazı araştırmalar, çatlak büyümesinin itici gücü olarak enerji salınımı oranını göstermiş, enerji salınım oranı ile termal şok döngüsü arızası arasındaki bağlantıya dayalı kusurların önemli bir yere sahip olduğunu bildirmişlerdir. TBC'lerin başarısızlığının, yüzeyler arasındaki termal streslerden kaynaklandığı varsayılmıştır (Jonnalagadda et al. 2019).

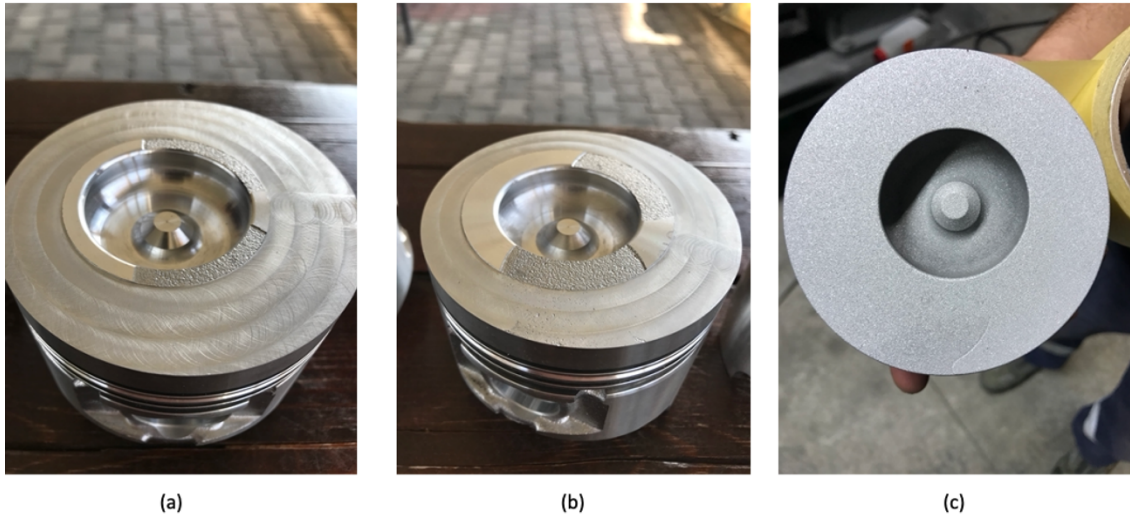
Bu çalışmanın amacı, bu bölümde verilen literatür çalışmaları doğrultusunda; dizel motorlarda termal bariyer kaplama çatlaklarının oluşum mekanizmalarının ve koşullarının tespiti için motor çevrimi sırasında termal geçişlerin analizini yapmak, kaplama yüzeylerinde oluşan termal ve mekanik gerilmelerin termomekanik analizini gerçekleştirmek ve oluşan çatlakların önlenmesine bir çözüm olarak farklı miktarlarda kademeli kaplama uygulamaları gerçekleştirerek bu durumda hem motor performansı ile emisyon oluşuma etkilerinin ortaya çıkarılması hem de yüzeylerde oluşan gerilmelerin analizini yapmaktır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deney Düzenegi

3.1.1. Pistonlara TBC uygulaması

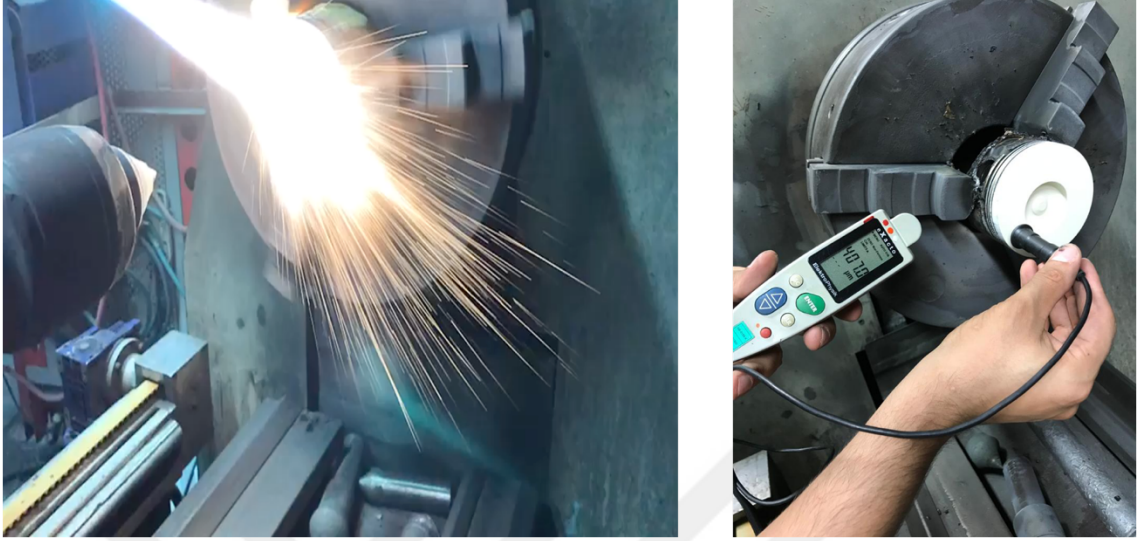
Çalışmada; Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Motor Test Laboratuvarında bulunan tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, doğal emişli ve hava soğutmalı dizel motorda kullanılmak üzere 4 adet piston takımı temin edilmiştir. Temin edilen dört adet pistonun bir adetinde hiçbir işlem uygulanmamıştır. FC olarak tanımlanan pistonu CNC freze tezgahında 500 μ m kalınlığında tüm üst yüzeyine ve yanma haznesine talaş kaldırma işlemi uygulanmıştır. 5 mm NC pistonunun üst yüzeyinin yanma haznesi çevresindeki 5 mm genişliğindeki alana ve yanma haznesine hiçbir işlem uygulanmamış, kalan alana 500 μ m kalınlığında talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilmiştir. 10 mm NC pistonunda üst yüzeyin yanma haznesi çevresindeki 10 mm genişliğindeki alana ve yanma haznesine hiçbir işlem uygulanmamış, kalan bölgeye 500 μ m kalınlığında talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1’de talaş kaldırma işlemi yapılan pistonların görüntüleri verilmiştir.



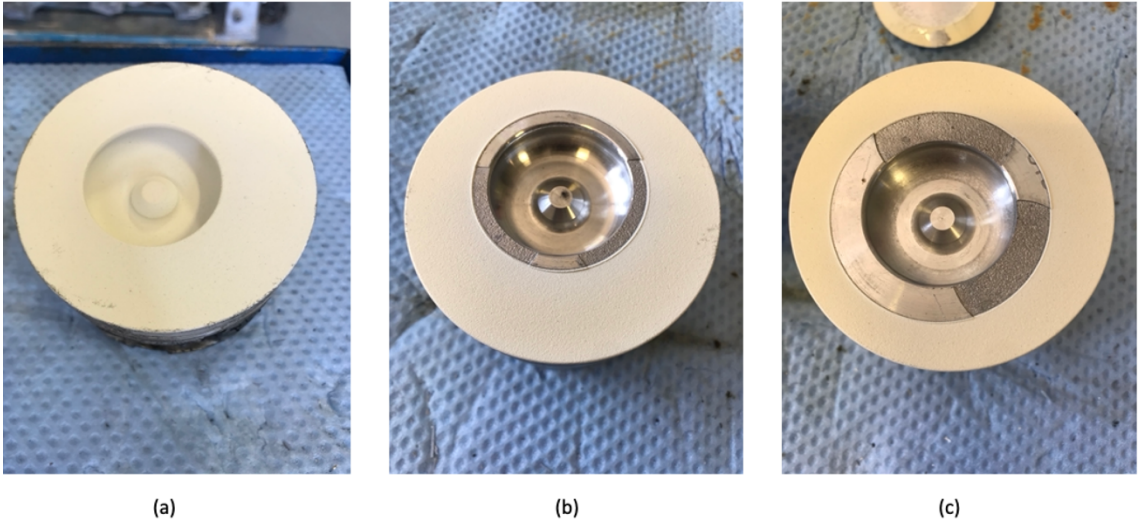
Şekil 3.1 Talaş kaldırılmış pistonlar (a) 5mm genişliğinde talaş kaldırılmayan piston (b) 10mm genişliğinde talaş kaldırılmayan piston (c) Kumlama yapılmış piston

Astar tabakasının piston üst yüzeyine daha iyi yapışmasını sağlamak için kumlama işlemi tercih edilir. Bu nedenle talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilen pistonlara kumlama

işlemi yapılmıştır. Şekil 3.2’de kumlama işlemi gerçekleştirilmiş pistona plazma spray kaplama uygulama görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.2. Plazma spray kaplama uygulaması



Şekil 3.3. Kaplama yapılmış pistonlar (a) Tüm yüzeyi kaplanmış piston (b) Piston üst yüzeyinde 5mm genişliğinde kaplamasız alan bırakılan piston (c) Piston üst yüzeyinde 10 mm genişliğinde kaplamasız alan bırakılan piston

Kumlama işlemi yapılan pistonlara ilk katman olarak 100 μm kalınlığında NiCoCrAlY astar tabaka ve ikinci tabaka olarak 400 μm kalınlığında Y_2O_3 ile stabilize edilmiş zirkonyum kaplanmıştır. Şekil 3.3’de tüm yüzeyi kaplanmış (FC), pistonun yanma haznesi ve üst yüzeyinde 5 mm genişliğinde kaplamasız alan bırakılan piston (5 mm NC) ve son olarak pistonun yanma haznesi ve üst yüzeyinde 10 mm genişliğinde kaplamasız alan bırakılan pistonların (10 mm NC) kaplama işlemi gerçekleştirildikten

sonraki görüntüleri verilmiştir. Hiçbir işlem uygulanmamış piston (NC) referans piston olarak kabul edilmiştir.

3.1.2. Deney düzeneğinin kurulması

Çalışmada Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Motor Test Laboratuvarında bulunan tek silindirli, hava soğutmalı, direkt enjeksiyonlu ve doğal emişli dizel motoru kullanılmıştır. Deneylerin yapılacağı tek silindirli dizel motorun teknik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Kullanılan motorun pistonu alüminyum alaşımından ve supapları çelik alaşımdan üretilmiştir.

Çizelge 3.1 Dizel motor özellikleri

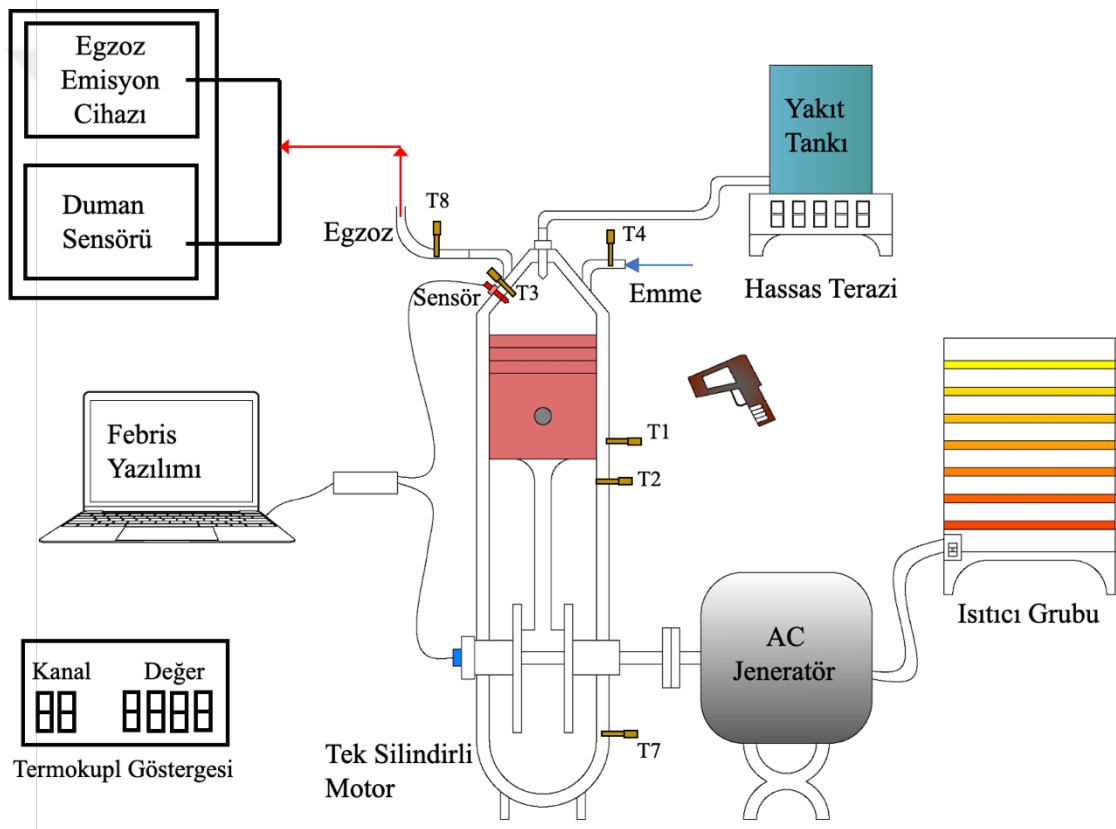
İmalat	:	DDJ9500 E	
Güç Çıkışı	:	10 HP	
Anma Hızı (rpm)	:	1500	1800
Anma Gücü (kw)	:	7,5	8,2
Max Güç	:	8,2	9
Yakıt Tüketimi	:	<270 kg/kWh	
Motor Soğutma Sistemi	:	Hava Soğutmalı	
Emme Sistemi	:	Doğal Emişli	
Motor Modeli	:	DDM192FE	
Çap*Strok (mm)	:	92*75	
Silindir Hacmi (cm ³)	:	498	
Silindir Sayısı	:	1	
Tutuşturma Sistemi	:	Direkt Enjeksiyonlu	
Sıkıştırma Oranı	:	19:1	

Yakıtların emisyon değerlerinin ölçümü için kullanılan CAPELEC CAP3200 marka emisyon ölçüm cihazının teknik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Egzoz sıcaklık ölçümü temassız kızılötesi sıcaklık ölçerle ve egzoz manifolduna yerleştirilen termokupl yardımıyla tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik çizimi Şekil 3.4’de verilmiştir.

Eşdeğer dirençli elektrikli ısıtıcılar yardımıyla motora yükleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Eşdeğer dirençlerin birbiriyle bağlantısı sağlandıktan sonra şalterler yardımıyla kademelendirme yapılmıştır. Bu çalışmada motor yüksüz ve beş farklı yük altında çalıştırılmıştır.

Çizelge 3.2. Emisyon cihazının teknik özellikleri

Parametre	Değer Aralığı	Hassasiyet
HC	0-20,000 ppm	1 ppm
CO ₂	%0-20	%0.1
CO	%0-15	%0.001
O ₂	%0-21.7	%0.01
NO _x	0-5000 ppm	1 ppm
Duman Koyuluğu	%0-99.9	%0.01



Şekil 3.4. Deney düzeneğinin şematik görünüşü

Deney düzeneğini oluşturmak için tek silindirli dizel motor ile emisyon değerlerinin ölçümünde kullanılacak olan CAPELEC CAP3200 emisyon cihazıyla bağlantısı sağlanmıştır. Sıcaklık değerlerinin ölçümü için 6 adet termokupl kullanılmıştır. Emme hattına, egzoz manifolduna, hava soğutma kanat ucuna, hava soğutma kanat dibine, üst kapağa ve motor yağına birer adet termokupl montajı yapılmıştır.

Termokuplların montajının yapıldığı yere göre numaralandırması Çizelge 3.3’de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 3.5’ te verilmiştir.



Şekil 3.5. Deney düzeneği

Çizelge 3.3. Termokupl bağlantı noktaları

Sıra No	Termokupl Numarası	Bağlantı Noktası
1	Termokupl-1	Kanat Ucu
2	Termokupl-2	Kanat Dibi
3	Termokupl-3	Üst Kapak
4	Termokupl-4	Emme Manifoldu
5	Termokupl-7	Yağ
6	Termokupl-8	Egzoz

Termokuplların dijital indikatöre bağlantısı yapıldıktan sonra Euro dizel yakıt kullanılarak kaplamasız piston için ilk deney yapılmıştır. Yakıt sarfiyatını hesaplamak için hassas terazi kullanılmıştır. Motor testleri yüksüz ve beş farklı yük değeri için gerçekleştirilmiştir. 1. kademede motor 1 kW yük altında çalıştırılmıştır. Motor 2. kademede 2 kW yük altında, 3. kademede 3 kW, 4. kademede 4 kW ve 5. kademede 5 kW yük altında çalıştırılarak veriler elde edilmiştir. Beş farklı kademe için motor sırasıyla motor gücünün %12.5, %25, %37.5, %50 ve %62.5’i yük altında çalıştırılarak deneyler

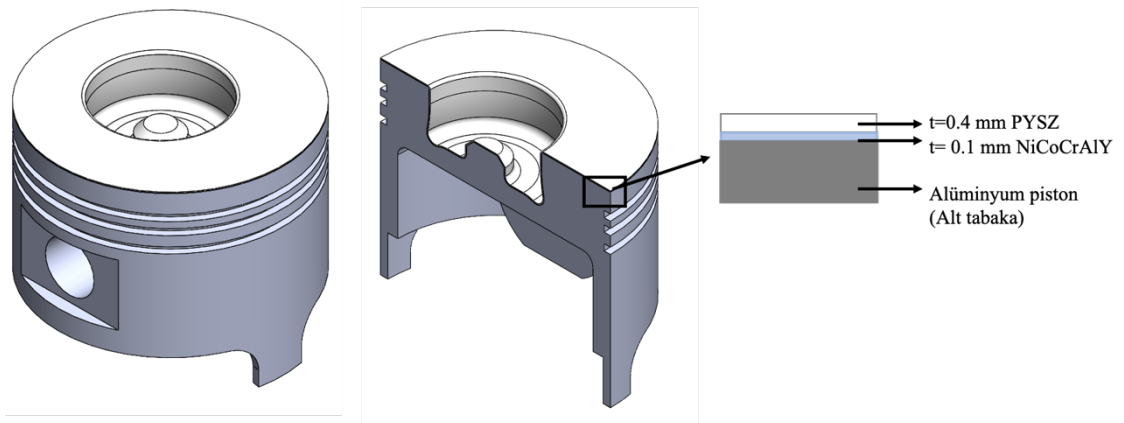
gerçekleştirilmiştir. İlk olarak deneyler NC pistonunda gerçekleştirilmiştir ve elde edilen veriler referans değerler olarak kabul edilmiştir.

Motor testleri gerçekleştirilirken yeni piston montajı yapıldıktan hemen sonra, motor, motor gücünün %50'sine eşdeğer bir yükte 15 saat çalıştırıldıktan sonra, aynı yükte 30 saat çalıştırıldıktan sonra ve yine aynı yükte 45 saat çalıştırıldıktan sonra yakıt sarfiyatı, egzoz emisyon değerleri ve termokupullardaki sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Testler yukarıda belirtildiği gibi 6 farklı yükleme durumu için üçer tekrar şeklinde yapılmıştır. Tüm veriler elde edildikten sonra motor toplam çalışma süresi 50 saat oluncaya kadar çalıştırılmış ve piston değişiklikleri gerçekleştirilmiştir.

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

3.2.1. Zamana bağlı termal analiz

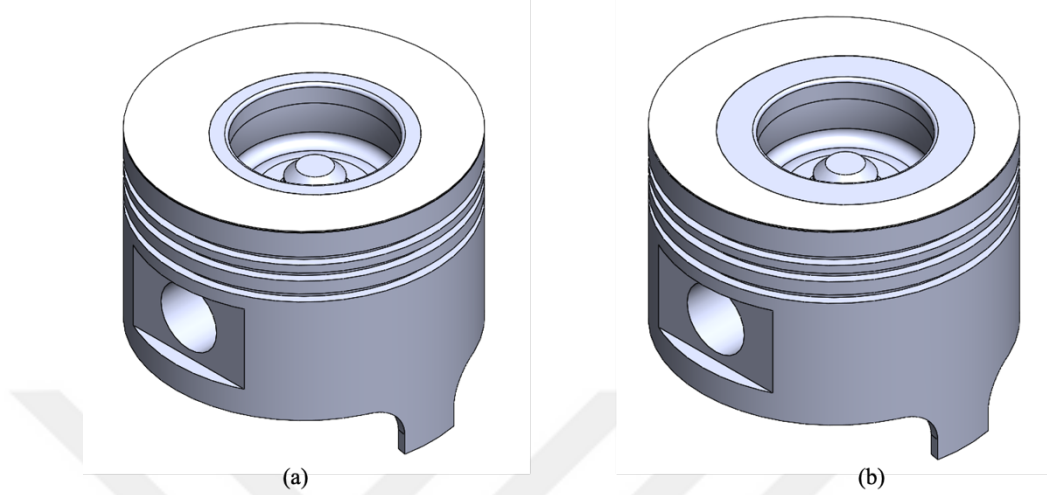
Bu çalışmada kullanılan kaplamasız piston ve üç farklı kaplamalı piston modelleri Solidworks 2022 paket programında oluşturulmuştur. Şekil 3.6 da FC pistonun geometrisi ve kaplama kalınlıkları şematik olarak verilmiştir. FC pistonunun geometrisi oluşturulurken alt tabaka (piston malzemesi), 0.1 mm kalınlığında astar tabaka ve 0.4 mm kalınlığında kaplama yüzeyi olmak üzere üç katman oluşturulmuştur. Üç katmanın montajı sırasında alt tabaka ile astar tabaka, astar tabaka ile piston arasındaki yüzeyler için yapıştırılmış (bonded) sınır şartı tanımlanmıştır. NC pistonunda ise piston modeli tam olarak çizilmiştir.



Şekil 3.6. FC piston geometrisi ve kaplama tabakaları

Şekil 3.7 de kademeli olarak modellenen pistonların geometrisi verilmiştir. 5 mm NC ve 10 mm NC pistonlarında kaplama işlemi uygulanan bölgelerde 0.4 mm kaplama

yüzeyi ve 0.1 mm astar tabaka tanımlanmıştır. Solidworks paket programında çizimler tamamlandıktan sonra zamana bağlı termal ve statik analizlerin yapılabilmesi için piston modelleri ANSYS paket programına aktarılmıştır.

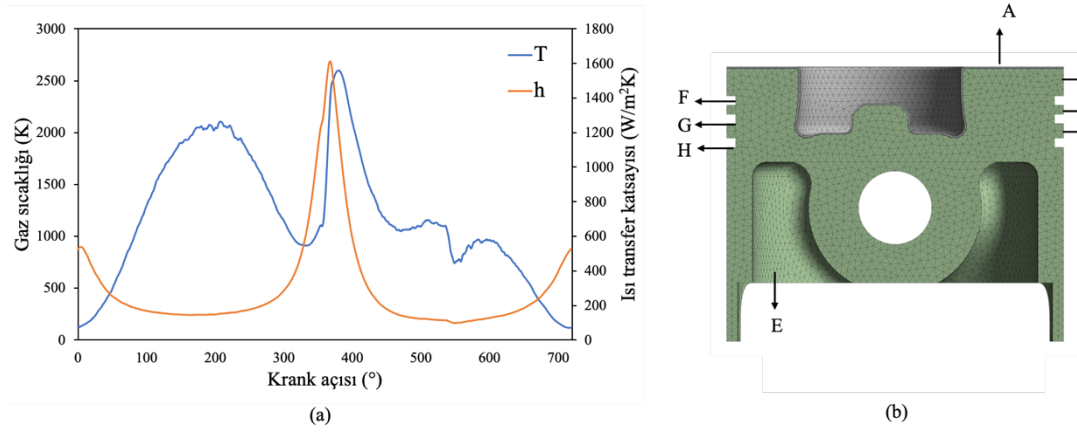


Şekil 3.7. Kademeli kaplama uygulanan pistonların geometrisi (a-5 mm NC piston modeli, b-10 mm NC piston modeli)

Motor deneyleri yapılırken motor 1500 d/d de çalıştırıldığından 1 devir 0,04 saniyede tamamlanır. Analizlerde başlangıç zaman adımı 4.10^{-4} , minimum zaman adımı 4.10^{-5} ve maksimum zaman adımı 4.10^{-3} dir. Yapılan zamana bağlı termal analizler 60 sn için gerçekleştirilmiştir. Analizlerde 60 saniyenin tamamlanması için 1500 çevrim tanımlanmıştır. Analizler adım sayısı 1500, geçerli adım sayısı 1500, adımların biteceği zaman 60 saniye ve zaman integrasyonu açık bir şekilde yapılmıştır.

Analizler yapılmadan önce gerçekleştirilen mesh işlemleri sonucunda NC pistonu için eleman sayısı 11,096 ve düğüm sayısı 20,111 dir. FC pistonunda 81,368 düğüm sayısı ve 40,876 eleman sayısı vardır. Dört model için en fazla düğüm ve eleman sayısı FC pistonundadır. 5 mm NC pistonunda düğüm sayısı 41,162 ve eleman sayısı 16,802 dir. 10 mm NC pistonunda 40,438 düğüm varken 17,884 eleman vardır.

Pistonun başlangıç sıcaklığı 300 °C olarak kabul edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak zamana bağlı termal analizler yapılırken Şekil 3.8 de gösterilen sınır şartları uygulanmıştır. Uygulanan sınır şartlarının sıcaklık ve ısı transfer katsayı değerleri Çizelge 3.4' te verilmiştir.



Şekil 3.8. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan termal sınır şartları

Piston üst yüzeyine uygulanan T_A ve h_A değerleri deneylerden elde edilmiştir. Piston üst yüzeyine bir çevrim boyunca pistonun konumuna bağlı olarak değişen sıcaklık ve ısı transfer katsayısı tanımlanmıştır. Pistonun diğer yüzeylerindeki sınır şartları sıcaklık ve ısı transfer katsayıları değerleri literatürden alınmıştır (Sachit, Nandish, and Mallikarjun 2018; Buyukkaya and Cerit 2007). Şekil 3.8.a’ da bir çevrimdeki sıcaklık ve ısı transfer katsayısının NC piston için krank açısına göre değişimi verilmiştir.

Çizelge 3.4. Pistona uygulanan termal sınır şart değerleri

Termal sınır şartları	Sıcaklık (°C)	Isı transfer katsayısı (W/m²C)
A	Parametrik sınır şartı	Parametrik sınır şartı
B	300	230
C	290	230
D	280	230
E	85	60
F	180	200
G - H	160	200

Piston, astar tabaka ve kaplama malzemelerinin özellikleri Çizelge 3.5’ te verilmiştir. ANSYS paket programında analizler gerçekleştirilirken kaplama malzemesi olarak $ZrO_2-8\%Y_2O_3$, astar tabaka olarak NiCoCrAlY ve piston malzemesi olarak alüminyum alaşım tanımlanmıştır. Malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri referans çalışmalardan alınmıştır (Z. Yao and Qian 2018; C. G. Fei et al. 2021).

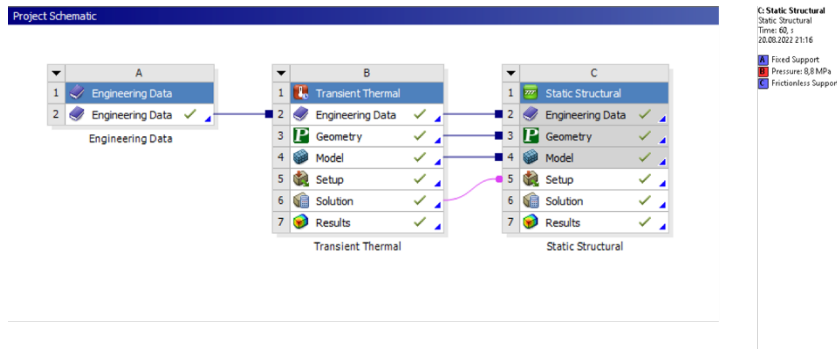
Çizelge 3.5. Malzeme özellikleri

Malzeme	Young's Modülü (GPa)	Poisson's Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ısı kapasitesi (J/kg°C)	Termal iletkenlik (W/m°C)	Termal genleşme 10 ⁻⁶ (1/°C)
Alüminyum Alaşım	71	0.32	2700	960	155	21
NiCoCrAlY	90	0.27	7870	764	16.1	12
PYSZ (ZrO ₂ -8%Y ₂ O ₃)	205	0.25	6010	640	2.12	11.5

Dört piston modeli için yapılan termal analizler sonucunda piston, astar ve kaplama yüzeyindeki sıcaklık ve toplam ısı akısı değerleri tespit edilmiştir. Böylece NC, FC, 5 mm NC ve 10 mm NC pistonlarındaki sıcaklık ve ısı akısındaki değişimleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

3.2.2. Yapısal analiz

Bu çalışmada gerçekleştirilen zamana bağlı termal analiz sonuçlarına bağlı olarak statik yapısal analizler yapılmıştır. Yapısal analizlerde piston pim yuvasından sabitlenmiştir (fixed support). Piston üst yüzeyine deneylerden elde edilen maksimum basınç değeri olan 8,8 MPa uygulanmıştır. Sınır şartları tanımlandıktan sonra termal gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Her piston modeli için yapılan analizler sonucunda toplam şekil değişimi, von-Mises ve eş değer gerinim değerleri tespit edilmiştir.

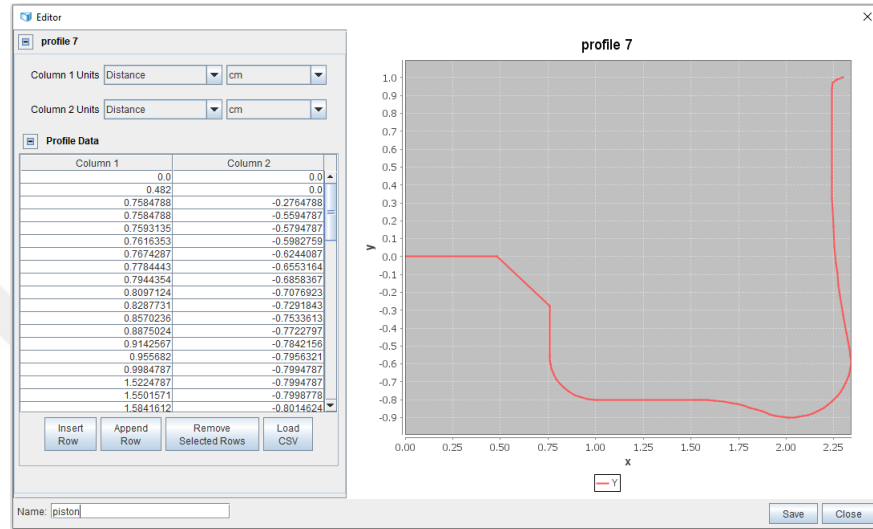


Şekil 3.9. Yapısal analiz için sınır şartları

3.2.3. Yanma analizi (ANSYS Forte)

Dizel motorlarda yanma analizlerini gerçekleştirmek için ilk olarak pistonun yanma haznesi modellenir. Yanma haznesi modellenirken pistonun Solidworks çiziminden x ve y koordinatlarına göre ölçülerden oluşan bir excel dosyası hazırlanmıştır.

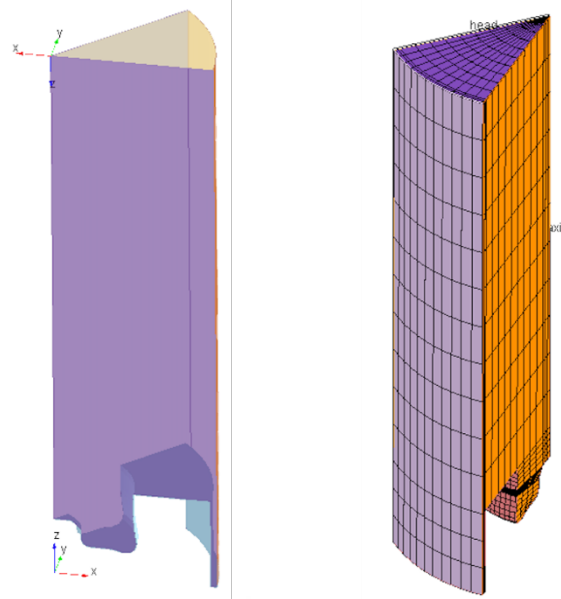
Şekil 3.10 da hazırlanan .csv dosyasının ANSYS Forteye aktarılmış hali verilmiştir. Pistonun 1/8 modelini oluşturmak için sector angle 45° , piston çapı 92 mm ve strok 75 mm olarak tanımlanmıştır. Pistonun mesh yapısının oluşturulması için Ansys Forte kütüphanesinde bulunan Topology 1 kullanılmıştır. Profil üzerinde 5 tane kontrol noktası tanımlanmış ve bu noktalara göre pistonun ağ yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapısının en büyük kafes ölçüsü 1.6 mm ve ağ yapısı 25,952 hücreden oluşmaktadır.



Şekil 3.10. ANSYS forte için oluşturulan yanma haznesi profili

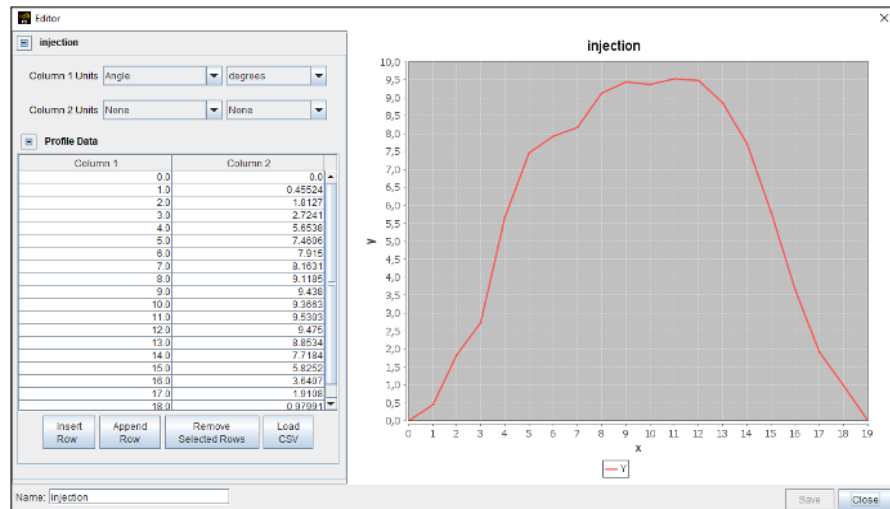
Yanma haznesinin ağ yapısının oluşturulmuş hali Şekil 3.11’de verilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da silindir içi akış sürecini modellerken RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) denklemleri kullanılmıştır (Ma et al. 2021).

Analizlerde başlangıç sıcaklığı 362 K ve başlangıç basıncı 2.215 bar olarak alınmıştır. Literatürde yer alan çalışmalarda termal bariyer kaplama uygulamalarında gözeneklilik oranı %10 ve %30 aralığındadır (Wang et al. 2021). Bu çalışmada piston yüzeyine uygulanan TBC malzemesinin gözeneklilik oranı %10 olarak kabul edilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen 1500 rpm motor devri için 0.062 mg, 0.059 mg, 0.06 mg ve 0.057 mg yakıt kütle değerleri NC, 5 mm NC, 10 mm NC ve FC için kullanılmıştır. Piston modeli için zamana bağlı ısı transferi simülasyonlarında elde edilen piston yüzey sıcaklıkları ve ısı transfer oranları yanma simülasyonlarında kullanılmıştır. Piston kafasının sıcaklığı 470 K ve piston duvar sıcaklığı 420 K olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.11. Yanma odasının ağ yapısı

Geleneksel dizel motor yanma koşulları altında dizel yakıtı temsil etmek için dizel 1comp_35sp.cks kullanılmıştır. Simülasyonlarda enjeksiyon başlangıcı ve enjeksiyon süresi 10 CA ve 7.75 CA olarak tanımlanmıştır. IMEP (İndike ortalama etkili basınç) 0.396 MPa ve zamana bağlı termal analizler sonucunda elde edilen piston yüzey sıcaklıkları kullanılmıştır. Simülasyonlar için başlangıç ve bitiş krank açıları -165 ve 120 olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.12’ de simülasyonda kullanılan enjeksiyon profili parametreleri gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Yanma analizleri için kullanılan enjeksiyon parametreleri

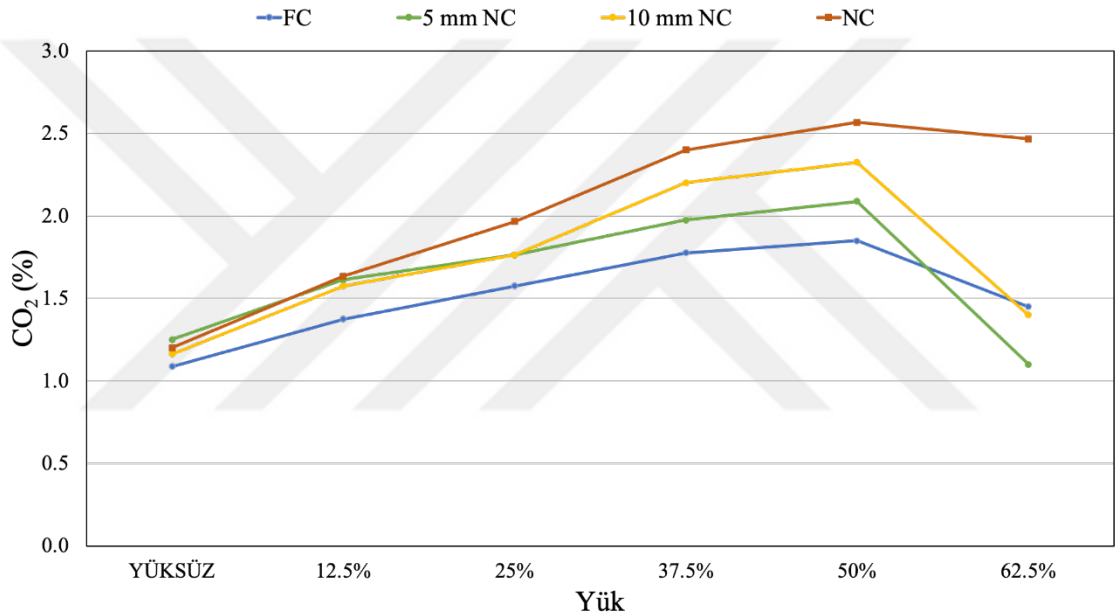
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Motor Egzoz Emisyon ve Performans Deney Sonuçları

Yapılan deneyler sonucunda NC, FC, 5 mm NC ve 10 mm NC pistonları için egzoz emisyon parametreleri, yakıt tüketimi ve özgül yakıt tüketimi için elde edilen verilerin ortalama değerleri alınarak grafiklerde verilmiştir.

4.1.1. Egzoz emisyon verileri

4.1.1.1. Karbondioksit (CO₂)



Şekil 4.1. Dört farklı piston modeli için yükleme şartlarına göre CO₂ emisyon grafiği

Şekil 4.1.'de kaplamasız, tüm yüzey kaplamalı, 5mm kaplamasız ve 10mm kaplamasız piston için yapılan deney sonuçlarından elde edilen verilerle CO₂ emisyon değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Motor yüksüz durumda çalıştırıldığında tüm yüzey kaplamalı, 5 mm kaplamasız, 10 mm kaplamasız ve kaplamasız pistonlar için CO₂ emisyon değerleri sırasıyla %1.1, %1.3, %1.2 ve %1.2 olarak ölçülmüştür. Motor yüksüz durumda çalıştırıldığında dört piston modeli içinde CO₂ emisyon değerleri birbirine yakın okunurken, tüm yüzey kaplamalı pistonda en düşük, 5 mm kaplamasız pistonda en yüksek değer tespit edilmiştir.

%12,5 yükleme durumunda FC pistonda %1.4, 5 mm NC %1.6 ölçülerek ilk yüksüz duruma göre 0.3' lük bir artış, 10 mm NC ve NC pistonda %1.6 ölçülerek 0.4' lük

artış tespit edilmiştir. %25 yükleme durumunda FC, 5mm NC ve 10 mm NC pistonlarda 0.2'lik artışla sırasıyla %1.6, %1.8 ve %1.8, NC pistonda artış 0.4'lük artışla %2 olarak okunmuştur. %37.5 yükleme durumunda FC, 5mm NC pistonlarında 0.2'lik artışla sırasıyla %1.8, %2 ve 10 mm NC, NC pistonlarında artış 0.4'lük artışla sırasıyla %2.2 ve %2.4 olarak okunmuştur. %50 yükleme durumunda FC, 5mm NC ve 10 mm NC pistonlarda 0.1'lik artışla sırasıyla %1.9, %2.1 ve %2.3 NC pistonda 0.2'lik artışla %2.6'dır. Motorun yükleme değeri arttıkça CO₂ emisyon değerlerinde artış gözlemlenmiş ve motorun orta yüklerinden sonra bütün kaplama modelleri ile kaplamasız piston durumu için CO₂ emisyonu değerleri yeniden azalmaya başlamıştır. Ayrıca, kaplamasız ve kademeli kaplama durumları için CO₂ emisyonu değerleri FC çalışma durumuna yakınsamaya başlamıştır. Bu durum yanma odası iç sıcaklığının daha da artmasıyla yanmanın daha iyi seyretmeye başlamasına bağlanabilir. Yük arttıkça FC ve 5 mm NC pistonlarındaki CO₂ emisyon değeri artışı aynı olurken NC pistonunda her yük durumu için CO₂ emisyon değeri artışı bu iki piston modelinin iki katı olarak tespit edilmiştir. 10 mm NC pistonunda CO₂ emisyon değer artışları yüksüz durumdan %12.5 ve %25'ten %37.5'e geçiş durumunda NC pistonundaki artışla aynı olurken, diğer iki yük artış durumunda FC ve 5 mm NC ile aynı artışı göstermiştir.

%62.5 yükte CO₂ emisyon değerleri FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonları için sırasıyla %1.5, %1.1, %1.4 ve %2.5 olarak ölçülmüştür. Motor %62.5 yükte çalıştırıldığında CO₂ emisyon değerlerinde eksik yanmaya bağlı olarak dört piston modeli için düşüş tespit edilmiştir. En az düşüş NC pistonunda, en yüksek düşüş 5 mm NC pistonda tespit edilmiştir. Motorun çalışma koşulları %50 yükten %62.5'lik yüklü duruma getirildiğinde CO₂ emisyon değerlerinde FC pistonunda %21.6'lık, 5 mm NC pistonunda %47.3'lük, 10 mm NC pistonunda %39.18'lik ve NC pistonunda %3.9'luk düşüş tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1'de yapılan deneyler sonucunda elde edilen altı farklı yükleme durumu için CO₂ emisyon değerleri verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kaplamalı piston modellerinde CO₂ emisyon değerleri kaplamasız piston modeline göre daha düşük tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen verilerde olduğu gibi Abbas ve Elayaperumal (S. M. Abbas and Elayaperumal 2019) yaptıkları çalışmada zirkonyum kaplı piston için CO₂ emisyon değerlerini kaplamasız pistonla göre düşük tespit etmişlerdir.

Kaplamalı piston modellerinde kaplama yüzeyi arttıkça CO₂ emisyon değerinde düşüş gözlenmiştir. Motorun %50 yükleme koşuluna kadar olan yükleme durumlarında

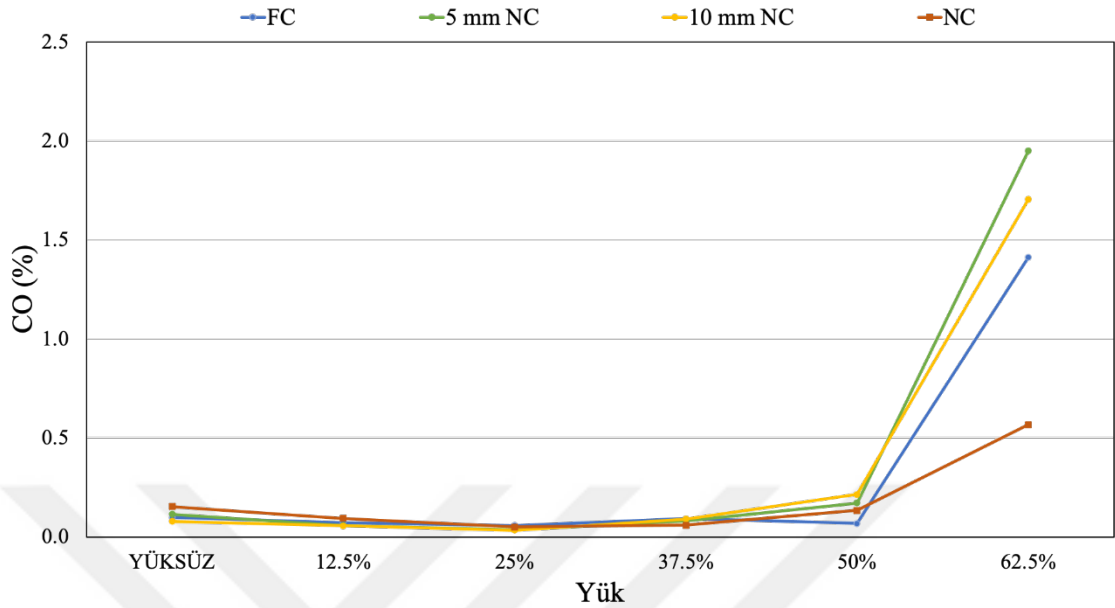
dört piston modeli için CO₂ emisyon değerlerinde artış gerçekleşirken %62.5'lik yükleme durumunda eksik yanmaya bağlı olarak CO₂ emisyon değerlerinde düşüş tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1. CO₂ emisyon verileri

Model CO ₂ Emisyon Değerleri	NC		FC		5 mm NC		10 mm NC	
	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma
Yüksüz	1.24	0.102	1.088	0.114	1.25	0.112	1.163	0.082
%12.5	1.65	0.05	1.375	0.164	1.613	0.124	1.575	0.043
%25	2.00	0.10	1.575	0.083	1.763	0.147	1.763	0.041
%37.5	2.34	0.08	1.77	0.164	1.975	0.192	2.2	0.1
%50	2.55	0.05	1.85	0.166	2.088	0.182	2.32	0.083
%62.5	2.50	0.2	1.45	0.665	1.175	0.083	1.5	0.1

Şekil 4.1 incelendiğinde kaplama işleminin genel olarak oransal CO₂ emisyonlarında azalmaya neden olduğu görülmektedir. Bu azalma ile yanma odası sıcaklıklarını artırmasıyla yanmanın kötüleşmiş olabileceği düşünülebilir. Halbuki, yanma odası sıcaklıklarının artmasının yanmanın iyileşmesi ile sonuçlanması beklenir. Ayrıca, yanma odası sıcaklığının artması alev sönme bölgesinin daralmasını ve dolayısıyla yanma veriminin artmasını beraberinde getirir ki bu CO₂ emisyonlarının oransal olarak düşmesini sağlar. Ancak, dizel motorlarında gaz keleşbeği bulunmadığından ve silindirlere alınan hacimsel hava miktarının aynı devir için sabit kalmasından dolayı, bu durumu etkileyen tek olumsuz unsur olarak yanma odası sıcaklığının artmasıyla beraber silindire alınan havanın yoğunluğunun azalması ve kütleliel hava miktarının azalması yani motorun hacimsel veriminin azalması olduğu şeklinde yorumlanabilir. Kütleliel olarak hava miktarının azalmasına neden olabilecek diğler bir etken de yüksek motor devridir ki bu çalışmada kullanılan motor 3000 d/dk sabit devir ile değışken yüklerde yüklenebilen bir jeneratör dizel motorudur. Silindire alınan hava miktarının kütleliel olarak azalması yanma odasında sıcaklığın artmasına rağmen yeterli hava alınamamasına ve dolayısıyla hem kaplama katmanı genişliğinin artması hem de motor yükünün artmasıyla yanmanın eksik kaldığı ve yanma sırasında oluşan CO formlarının O₂ ile yeteri kadar oksidasyona uğrayamadığı ve CO₂ formasyonunu eksik kaldığı şeklinde yorumlanabilir. Bu durum Şekil 4.2.'de CO emisyonlarının özellikle yüksek yüklerde hızlı artmış olması ile desteklenebilir.

4.1.1.2. Karbonmonoksit (CO)



Şekil 4.2. Dört farklı piston modeli için yükleme şartlarına göre CO emisyon grafiği

Şekil 4.2.'de dört piston modeli için yapılan deneyler sonucunda elde edilen CO emisyon değerleri grafikte verilmiştir. Yüksüz durumda yapılan deneyler sonucunda FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonlarında CO emisyon değeri sırasıyla %0.1, %0.12, %0.08 ve %0.15 olarak ölçülmüştür. Tüm yüzey kaplamalı piston (FC) için %12.5 yükleme durumunda %0.07, %25'lik yük altında %0.06 ve %37.5 yükleme durumunda %0.09 olarak ölçülmüştür. 5 mm kaplamasız (5 mm NC) pistonda %12.5 yükleme durumunda %0.06, %25'lik yük altında %0.04 ve %37.5 yükleme durumunda %0.08 olarak ölçülmüştür. 10 mm kaplamasız (10 mm NC) pistonda %12.5 yükleme durumunda %0.06, %25'lik yük altında %0.03 ve %37.5 yükleme durumunda %0.09 olarak ölçülmüştür. Kaplamasız pistonda (NC) %12.5 yükleme durumunda %0.09, %25'lik yük altında %0.05 ve %37.5 yükleme durumunda %0.06 olarak ölçülmüştür.

Yüksüz durumdan %12.5 ve %12.5' ten %25 yüklü duruma geçişlerde dört piston modeli için CO emisyon değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. %25' ten %37.5'lik yük durumuna geçtikten sonra CO emisyon değerlerinde FC pistonda %50, 5 mm NC %100, 10 mm NC %200 ve NC pistonda %20'lik artış gerçekleşirken en fazla artış 10 mm NC pistonda tespit edilmiştir.

%50 yükleme durumunda CO emisyon değeri FC de %0.07, 5 mm NC de %0.17, 10 mm NC de %0.22 ve NC de %0.13 olarak ölçülmüştür. %62.5'lik yükleme durumunda

FC pistonunda %1.41, 5 mm NC pistonunda %1.95, 10 mm NC pistonunda %1.71 ve NC pistonunda %0.57 tespit edilmiştir. %62.5'lik yükleme durumunda en yüksek CO emisyon 5 mm NC ve %50'lik yükleme durumunda 10 mm NC pistonunda okunmuştur.

Motor %50 den %62.5'lik çalışma şartlarına getirildiği zaman CO emisyon değerlerinde tüm yüzey kaplamalı (FC) pistonda 20.14 kat, 5 mm kaplamasızda (5 mm NC) 11.40 kat, 10 mm kaplamasızda (10 mm NC) 7.77 kat ve kaplamasız (NC) pistonda 4.25 kat artış tespit edilmiştir. CO emisyon değerlerinde en yüksek artış tüm yüzey kaplamalı pistonda, en düşük artış kaplamasız pistonda tespit edilmiştir. Piston yüzeyindeki kaplama oranı azaldıkça CO emisyon değerindeki artış oranı azalmıştır.

Motor yükleme koşullarına göre CO emisyon değerleri Çizelge 4.2'de dört piston modeli için verilmiştir. Dört piston modeli için motorun yüksüz çalıştırılmasında elde edilen CO emisyon değerleri %12.5, %25 ve %37.5 yükleme koşullarına göre yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Motorun yüksüz çalıştırılma şartlarında silindir içindeki türbülansın düşük, buharlaşmanın zayıf ve gaz sıcaklığının düşük olmasından dolayı CO'nun tam olarak CO₂ dönüştürülememesi nedeniyle CO emisyon değeri yüksek tespit edilmiştir. %50 ve %62.5 yükleme durumlarında CO emisyon değerlerinde artış görülmektedir. Dört piston modeli için orta yükleme durumlarında CO emisyon değerlerinde azalma ve yüksek yüklerde artış tespit edilmiştir (Hazar, Sevinc, and Sap 2019).

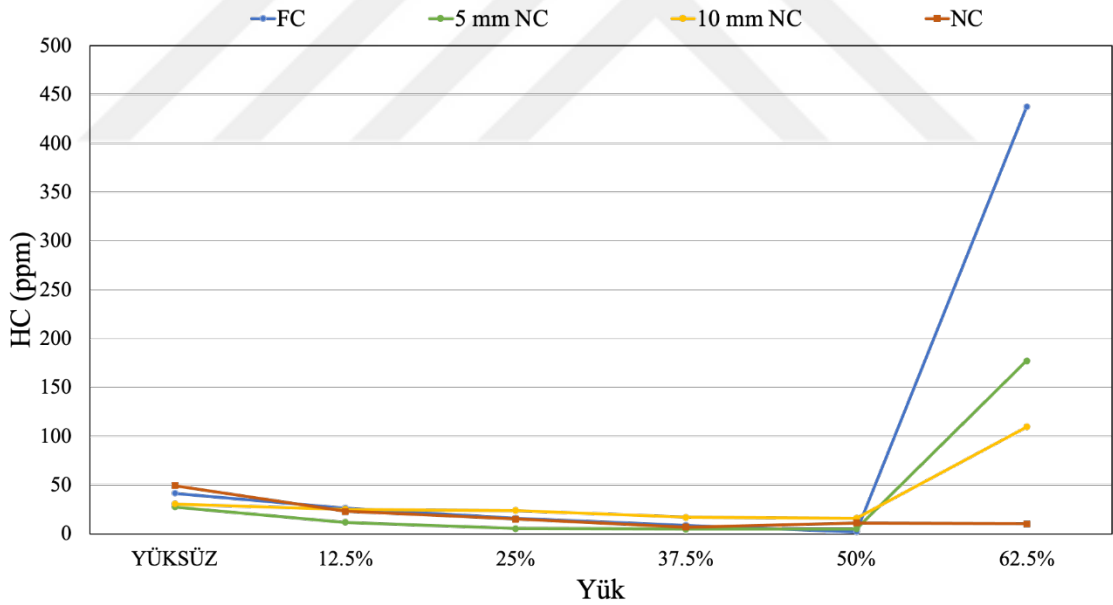
Çizelge 4.2. CO emisyon verileri

Model CO Emisyon Değerleri	NC		FC		5 mm NC		10 mm NC	
	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma
Yüksüz	0.151	0.007	0.105	0.04	0.112	0.015	0.078	0.02
%12.5	0.097	0.013	0.076	0.028	0.056	0.008	0.058	0.012
%25	0.05	0	0.06	0.022	0.036	0.008	0.034	0.005
%37.5	0.062	0.004	0.102	0.056	0.079	0.011	0.098	0.025
%50	0.133	0.004	0.07	0.033	0.167	0.023	0.228	0.092
%62.5	0.567	0.149	1.418	1.058	1.95	0.293	1.7	0.31

Motor yükü arttıkça CO emisyon değerleri dört piston modeli içinde artış, %62.5 yükleme koşulundaki artış daha yüksektir. Kaplamalı piston modellerinde kaplamasız piston modeline göre CO emisyon değerleri düşük tespit edilmiştir. Sankar ve diğ. (Sankar et al. 2019) gerçekleştirdikleri çalışmada kaplamalı pistonda kaplamasız pistona

göre daha düşük CO emisyon değeri tespit etmişlerdir. Hava yakıt (H/Y) oranı yanmadaki CO emisyon miktarını etkileyen en önemli faktördür. Oksidasyonun uygun olmadığı yerde eksik yanmaya bağlı olarak CO değeri artar (Heywood 2018). Şekil 4.2. incelendiğinde motorun düşük ve orta yüklerinde bütün çalışma koşulları için CO emisyonu değerlerini oldukça düşük seviyelerde olduğu ancak yüksek yükte ise hızlı bir şekilde artmaya başladığı görülmektedir. Yukarıda açıklandığı gibi temel olarak motor yükünün artması sonucu motora alınan hava miktarının kütleli olarak azalması nedeniyle yanma odasında yanma için yeterli miktarda O_2 bulunamamasına ve dolayısıyla CO formasyonlarının CO_2 ye oksidasyon reaksiyonlarının eksik kalmasına neden olmuştur. Dolayısıyla hem yükün aşırı artması hem de yanma odasına bakan piston yüzeyinin tamamen kaplanmasının silindir içi sıcaklıkları artırması nedeniyle her iki durum için de CO emisyonları artış göstermiştir.

4.1.1.3. Hidrokarbon (HC)



Şekil 4.3. Dört farklı piston modeli için yükleme şartlarına göre HC emisyon grafiği

Şekil 4.3'te tüm yüzey kaplamalı, 5 mm kaplamasız, 10 mm kaplamasız ve kaplamasız pistonlar için egzoz emisyon parametrelerinden HC nin değişim grafiği verilmiştir. Motor yüksüz durumda çalıştırıldığında FC de 41 ppm, 5 mm NC de 27,5 ppm, 10 mm NC de 31 ppm ve NC pistonunda 49.3 ppm dir. Motor %12.5 yük altında çalıştırıldığında HC emisyonu FC, 5mm NC, 10 mm NC ve NC için sırasıyla 26 ppm,

11.8 ppm, 25 ppm ve 23 ppm olarak okunmuştur. Motor yüksüz durumdan %12.5 yüklü duruma geldiğinde FC pistonunda %36.6 oranında, 5 mm NC pistonunda %57.1 oranında, 10 mm NC pistonunda %19.4 oranında ve NC pistonunda %53.4 oranında HC emisyon değerlerinde düşüş olmuştur.

FC pistonunda %25, %37.5 ve %50 yüklü durumlarda HC emisyon değerleri sırasıyla 16 ppm, 9 ppm ve 2 ppm okunmuştur. 5 mm NC pistonunda %25, %37.5 ve %50 yüklü durumlarda HC emisyon değerleri sırasıyla 5.3 ppm, 4.8 ppm ve 5 ppm dir. 10 mm NC pistonunda %25, %37.5 ve %50 yüklü durumlarda HC emisyon değerleri sırasıyla 24 ppm, 17 ppm ve 16 ppm dir. NC pistonunda HC emisyon değeri %25, %37.5 ve %50 yüklü durumları için sırasıyla 15 ppm, 7 ppm ve 11 ppm dir. %50 çalıştırma şartlarında en yüksek HC emisyon değeri 10 mm kaplamasız pistonda (10 mm NC), en düşük değer tüm yüzey kaplamalı pistonda (FC) okunmuştur.

Motor %62.5 yük altında çalıştırıldığında FC pistonunda 437 ppm, 5 mm NC pistonunda 177 ppm, 10 mm NC pistonunda 110 ppm ve NC pistonunda 10.3 ppm dir. En yüksek HC emisyon değeri FC pistonunda, en düşük HC emisyon değeri NC de tespit edilmiştir. Motor %50' den %62.5 çalışma şartına getirildiği zaman HC emisyon değerinde FC pistonunda 218.5 kat, 5 mm NC pistonunda 35.4 ve 10 mm NC pistonunda 6.88 kat artış tespit edilmiştir. NC pistonunda artış gözlenmezken %25, %37.5, %50 ve %62.5 yük durumlarında HC emisyon değerleri birbirine yakındır.

Çizelge 4.3. HC emisyon verileri

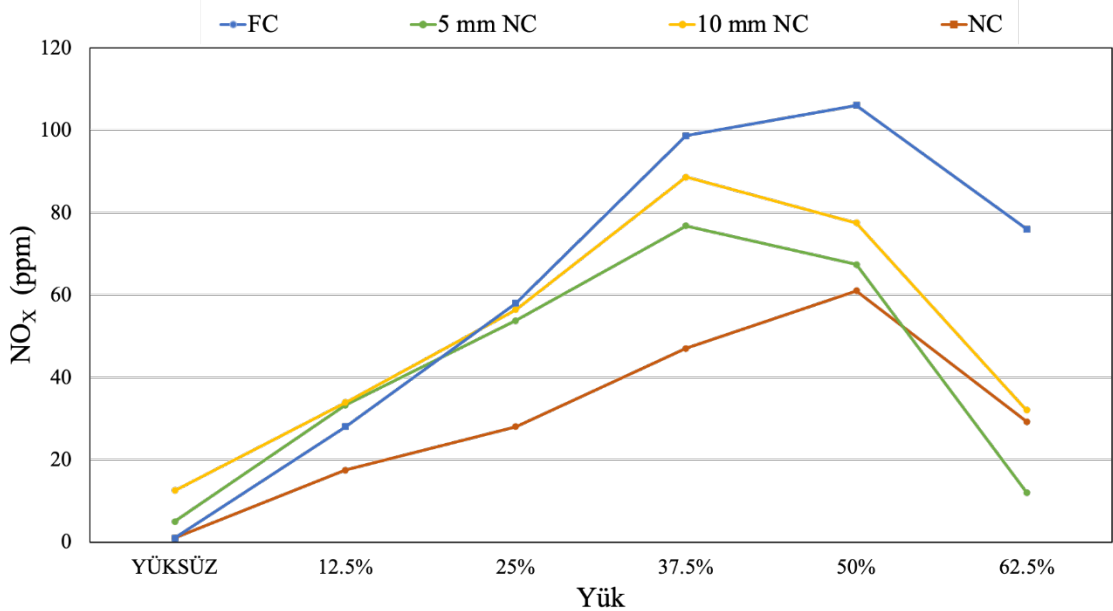
Model HC Emisyon Değerleri	NC		FC		5 mm NC		10 mm NC	
	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma
Yüksüz	49.32	2.921	41.333	17.977	27.5	2.72	35.781	13.171
%12.5	23.0	1.095	26.333	5.759	11.867	2.457	21.0	3.24
%25	15.0	1.265	16.0	3.742	5.35	0.506	17.594	4.126
%37.5	7.0	1.265	8.933	2.760	4.85	0.8	12.938	5.432
%50	11.2	0.98	2.2	0.748	5.0	3.033	12.406	2.674
%62.5	10.3	1.479	437.467	112.849	177.4	31.86	110.5	29.692

Udayakumar ve diğ. (Udayakumar, Sivaganesan, and Sivamani 2022) seryum nano parçacık katkılı YSZ malzemesi ile gerçekleştirdikleri termal bariyer kaplamalı piston ile dizel ve biyodizel yakıt kullanarak tek silindirli bir motorun egzoz emisyon ve performans değerlerini araştırmışlardır. Gerçekleştirdikleri çalışma sonucunda kaplamalı

pistonda kaplamasız pistonla göre HC emisyon değerini yüksüz ve orta yüklerde düşük veya yakın tespit etmişlerdir. Bu çalışmada da kaplamalı piston modelinde HC emisyon değerleri yakın veya düşük tespit edilmiştir.

Çizelge 4.3'te dört piston modeli için egzoz emisyonlarından HC emisyon verileri verilmiştir. HC emisyonlarının oluşum başlıca nedenleri arasında; piston-segman, segman-segman kanalı ile yanma odasının cidarlara yakın olan alev sönme bölgelerinde sıcaklıkların ani olarak düşmesi sonucu yanmanın bitmesi gösterilebilir (Heywood 2018). Dizel motorlarında yük arttıkça yanma odası sıcaklıklarının artması nedeniyle sönme bölgelerinde sıcaklıkların nispeten yüksek seyretmesi ile beraber HC emisyonlarının oluşumu azalır. Bu durum şekil 4.3'te yüksüz durumdan orta ve üstü yüklere kadar HC emisyonlarının tüm deney şartları için azalmış olmasına temel neden olarak gösterilebilir. Motorun daha fazla yüklenmesi ile ve kaplama miktarının artmasına bağlı olarak silindir içi sıcaklıklarının aşırı artması sonucu motorun hacimsel veriminin azalmasına bağlı olarak kütleli olarak silindire alınan yakıt miktarının azalması yanma için gerekli olan O_2 miktarını azaltmış ve dolayısıyla her ne kadar sıcaklıklar arttıysa da eksik yanmaya bağlı olarak HC emisyonları da artmıştır.

4.1.1.4. Azotoksit (NO_x)



Şekil 4.4. Dört farklı piston modeli için yükleme şartlarına göre NO_x emisyon grafiği

Şekil 4.4.'te dört piston modelinde egzoz emisyon parametrelerinden NO_x ' in yüksüz, %12.5, %25, %37.5, %50 ve %62.5 çalıştırma şartlarındaki değişimi verilmiştir. Motor yüksüz durumda çalıştırıldığı zaman FC pistonunda 1 ppm, 5 mm NC pistonunda 5 ppm, 10 mm NC pistonunda 12.6 ppm ve NC pistonunda 1 ppm dir. Motor %12.5 yük altında çalıştırıldığında FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonlarında sırasıyla 28 ppm, 33 ppm, 33,88 ppm ve 17.5 ppm olarak ölçülmüştür. Motorun %12.5 yük altında çalıştırıldığı koşulda 5 mm ve 10mm kaplamasız yüzeye sahip olan pistonlarda NO_x emisyon değeri birbirine yakın ve en yüksek değerlerdir. En düşük değer kaplama işlemi uygulanmamış olan pistonda görülmüştür. %25 yük altındaki motorda FC pistonunda 58 ppm, 5 mm NC pistonunda 54 ppm, 10 mm NC pistonunda 56.45 ppm ve NC pistonunda 28 ppm dir. %25'lik yük altında en yüksek değer FC pistonunda, en düşük değer NC pistonunda tespit edilmiştir.

Motor %37.5 yük altında çalıştırıldığında NO_x emisyon değerleri FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonları için sırasıyla 99 ppm, 77 ppm, 88.35 ppm ve 47 ppm dir. %25 ten %37.5 yükleme durumuna geçtikten sonra motordaki NO_x emisyon değerindeki en yüksek artış %70.69'lik bir artışla FC pistonunda görülmüştür. En düşük NO_x emisyon değeri NC pistonda 47 ppm olarak ölçülmesine rağmen %25'lik yükleme durumuna göre %67.86'lık bir artış tespit edilmiştir. Motor %37.5 yük altındayken piston yüzeyindeki kaplama oranı arttıkça egzozdaki NO_x emisyon değerinde artış tespit edilmiştir.

Motor %50 yükte çalıştırıldığında NO_x emisyon değerleri FC pistonunda 106 ppm, 5 mm NC pistonunda 67 ppm, 10 mm NC pistonunda 77.6 ppm ve NC pistonunda 61 ppm ölçülmüştür. Motorun %50 yük altında çalıştırıldığında %37.5'lik yük altında çalıştırılmasıyla karşılaştırıldığı zaman %50 yük durumunda 5 mm NC ve 10 mm NC pistonlarında NO_x emisyon değerlerinde düşüş, FC ve NC pistonlarında artış tespit edilmiştir.

Motor %62.5 yük altında çalıştırıldığında NO_x emisyon değerleri FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonları için sırasıyla 76.2 ppm, 12 ppm, 32 ppm ve 29.5 ppm dir. %62.5 lik yükleme şartlarında dört piston modeli içinde NO_x emisyon değerlerinde düşüş gözlenmektedir. 5 mm NC pistonunda %82.09'luk azalmayla en fazla düşüş ve %28.3'lük azalmayla en az düşüş FC pistonunda tespit edilmiştir. Motorun altı farklı yük değeri için 5 mm NC ve 10 mm NC pistonlarındaki NO_x emisyon değerleri her yük için benzer eğri grafiği oluşturmuştur.

NO_x emisyon değerleri yanan gazın sıcaklığından ve ateşleme odasındaki oksijen miktarından etkilenir. Kaplamalı piston modellerinde yanma odasının sıcaklığının

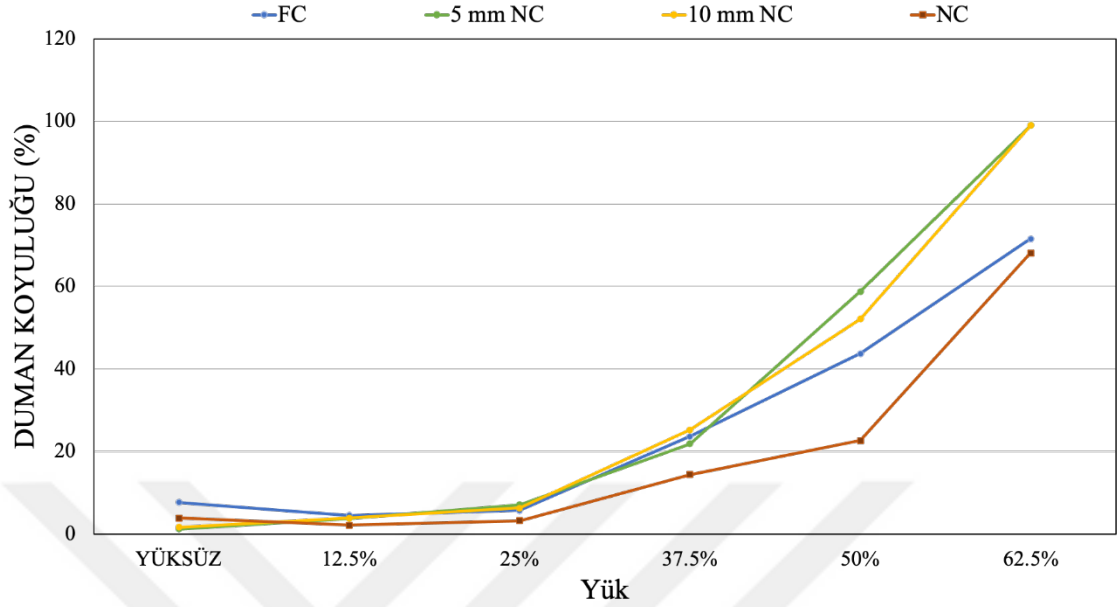
kaplamasız piston modeline göre yüksek olması NO_x değerlerinde artışa sebep olur. Bu çalışmada motorun tüm çalışma şartlarında NO_x değerleri kaplamalı piston modellerinde daha yüksek tespit edilmiştir. Sethi ve diğ. (Kumar Sethi et al. 2022) yaptıkları çalışmada benzer şekilde NO_x emisyonlarında kaplamalı piston modelinde artış tespit etmişlerdir.

Çizelge 4.4. NO_x emisyon verileri

Model NO_x Emisyon Değerleri	NC		FC		5 mm NC		10 mm NC	
	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma
Yüksüz	1	-	1	-	5	2.83	12.6	2.58
%12.5	17.5	1.77	28	3.16	33	1.68	33.8	3.3
%25	28	10.97	58	3.95	54	2.41	56.45	3.84
%37.5	47	2.28	99	1.96	77	2.24	88.35	4.32
%50	61	2.3	106	4.38	67	8.9	77.6	8.59
%62.5	29.5	13	76.2	7.55	12	-	32	0.71

Dört piston modeli için NO_x emisyon verileri Çizelge 4.4'te verilmiştir. NO_x emisyonlarının oluşum nedenleri arasında yanma odası sıcaklıklarının lokal ve genel olarak 1800 K'den yüksek olması ve bu sıcaklıklarda kalış süresinin yeterli olması ile ortamda N_2 ile oksidasyona uğrayacak miktarda O_2 bulunması gösterilebilir (Heywood 2018). Şekil 4.4 incelendiğinde motor yükünü artması ile bütün çalışma koşulları için NO_x emisyonları artış göstermiş ancak motorun aşırı yüksek yüklerinde tekrar azalmıştır. Kaplamalı piston modelleri göz önüne alındığında ise normal kaplamasız motor koşullarına nazaran NO_x emisyonları daha fazla oluşmuştur (Aydın 2014). Yük arttıkça NO_x oluşumun artması beklenen bir durumdur. Çünkü yanma odası sıcaklıkları artar. Ancak aşırı yükleme durumunda daha önce de ifade edildiği gibi tam yanma için gerekli olan O_2 miktarı motorun hacimsel verimindeki azalma ile beraber azalmıştır. Bu durum yüksek sıcaklıklar olmasına rağmen aşırı yüklerde NO_x oluşumu için O_2 miktarındaki azalmaya paralel olarak azalmıştır. Bu durum ayrıca kaplamalı piston modelleri için de gerçekleşmiştir. Bunun nedeni ise ifade edildiği gibi sıcaklıkların kaplama ile beraber artması ile yanma için gerekli hava miktarının kütsel olarak aşırı azalmasına bağlanabilir.

4.1.1.5. Duman koyuluğu



Şekil 4.5. Dört farklı piston modeli için yükleme şartlarına göre duman koyuluğu grafiği

Şekil 4.5'te motorun altı farklı yükleme durumunda dört piston modeli için duman koyuluğunun eğri grafiği verilmiştir. Motor yüksüz durumda çalıştırıldığında FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonları için duman koyuluğu sırasıyla %7.6, %1.19, %1.6 ve %3.83 dir. Motor yüksüz durumda çalıştırıldığında en düşük duman koyuluk değeri 5mm NC pistonunda, en yüksek duman koyuluğu değeri FC pistonda tespit edilmiştir. Motor %12.5 yük durumunda çalıştırıldığı zaman FC pistonda %4.48, 5 mm NC pistonda %3.74, 10 mm NC pistonda %3.8 ve NC pistonunda %2.1 dir. Motorun yüksüz durumdan %12.5'lik yükleme duruma geçtiği zaman FC ve NC pistonlarında duman koyuluğunda az miktarda düşüş, 5 mm NC ve 10 mm NC pistonlarında az miktarda artış tespit edilmiştir.

%25 yük şartlarında motor çalıştırıldığında emisyon parametrelerinden duman koyuluğu FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonları için sırasıyla %5.75, %7.06, %6.24 ve %3.32 dir. Motor %37.5 yük altında çalıştırıldığında FC pistonunda %23.6, 5 mm NC pistonunda %21.85, 10 mm NC pistonunda %25.3 ve NC pistonunda %14.2 olarak ölçülmüştür. %25 yükleme durumundan %37.5'lik yükleme durumuna geçtikten sonra motorda FC pistonunda 4, 5 mm NC pistonunda 3, 10 mm NC pistonunda 4 ve NC pistonunda 4.5 kat artış tespit edilmiştir.

%50 yük altında duman koyuluğu FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonları için sırasıyla %43.75, %58.75, %52.1, %22.67 dir. %62.5 yük altında motor çalıştırıldığında FC pistonunda %71.5, 5 mm NC pistonunda %99, 10 mm NC pistonunda %99 ve NC pistonunda %68.13 dür. %62.5 yük altında en yüksek duman koyuluğu 5 mm NC ve 10 mm NC de, en düşük değer kaplamasız pistonda (NC) tespit edilmiştir. Motorun çalışma koşullarındaki yük artışına bağlı duman koyuluğundaki en fazla artış 5 mm NC ve 10 mm NC pistonlarında tespit edilmiştir.

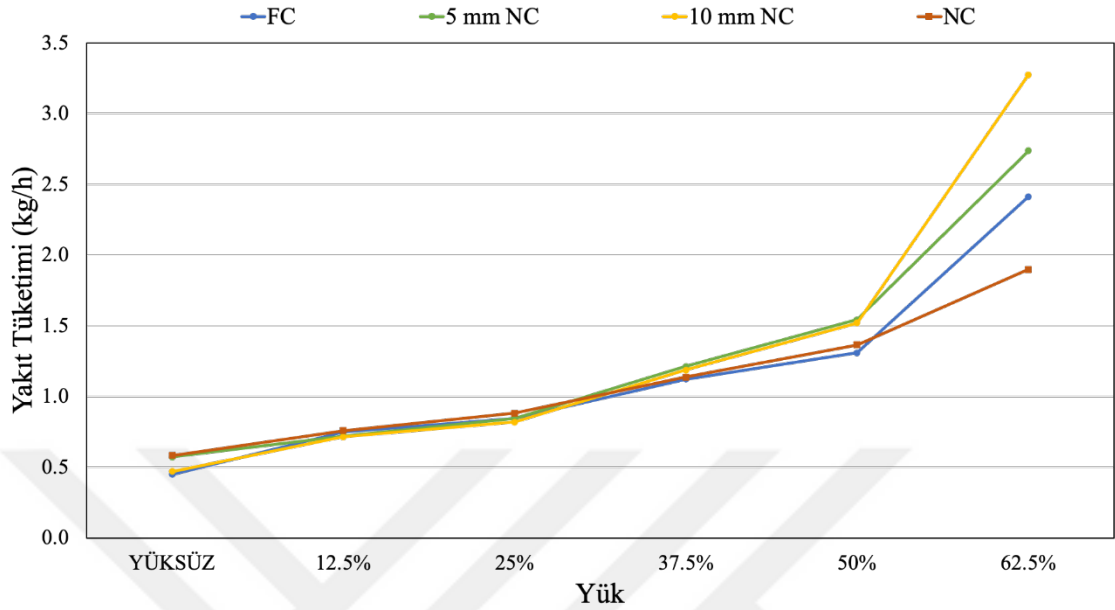
Duman emisyonları; genel olarak yanma odasında oksijen yetersizliğine bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda yakıt moleküllerinin yeteri miktarda O₂ ile birleşmemesi sonucu ortaya çıkan, katı karbon tanecikleri olarak tanımlanan is parçacıklarına, yanmamış HC taneciklerinin yapışması sonucu oluşan PM ile bunlara eşlik eden HC başta olmak üzere diğer eksik yanma ürünleri ile NO_x ve SO_x moleküllerinin toplamından oluşur. Şekil 4.5 incelendiğinde yukarıda anlatılan emisyonlar ve oluşum nedenlerine uyumlu olarak duman koyuluğunun yüksüz durumdan motorun orta yüklerine kadar önce azaldığı daha sonra azalan hacimsel verime paralel olarak yanma odasına alınan hava miktarının kütleli olarak azalması sonucu hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu durum beklendiği gibi kaplama durumunda daha belirgin hale gelmiştir. Çizelge 4.5'te dört piston modeli için yapılan deneyler sonucunda elde edilen duman koyuluğu emisyon verileri verilmiştir.

Çizelge 4.5. Duman koyuluğu emisyon verileri

Model Duman koyuluğu	NC		FC		5 mm NC		10 mm NC	
	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma
Yüksüz	3.83	1.66	7.67	6.46	1.19	0.3	1.56	0.51
%12.5	2.1	1.3	4.48	2.73	3.78	2	3.74	0.97
%25	3.32	1.85	5.75	3.14	7.07	1.72	6.24	1.28
%37.5	14.2	3	23.63	10.17	21.85	0.29	25.31	3.7
%50	22.67	1.56	43.75	21	58.75	7.68	52.15	9.27
%62.5	68.13	4.7	71.5	25.62	99	4.56	99	3.8

4.1.2. Performans verileri

4.1.2.1. Yakıt tüketimi



Şekil 4.6. Dört farklı piston modeli için yükleme şartlarına göre yakıt tüketimi grafiği

Şekil 4.6’da motorun altı farklı yük durumu için dört piston modelindeki yakıt tüketimi grafikleri verilmiştir. Motor yüksüz durumda çalıştırıldığında tüm FC pistonunda 0.47 kg/saat, 5 mm NC pistonunda 0.57 kg/saat, 10 mm NC pistonunda 0.47 kg/saat ve NC pistonunda 0.58 kg/saat dir. Motor yüksüz durumda çalıştırıldığında yakıt tüketimi değerleri FC ve 10 mm NC pistonunda birbirine yakın, NC ve 5 mm NC pistonunda birbirine yakın tespit edilmiştir. Yükleme şartları %12.5’e çıkartıldığı zaman FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonunda sırasıyla 0.75 kg/saat, 0.72 kg/saat, 0.72 kg/saat ve 0.76 kg/saat dir. %25 yük durumunda FC pistonunda 1.02 kg/saat, 5 mm NC pistonunda 0.85 kg/saat, 10 mm NC pistonunda 0.82 kg/saat ve NC pistonunda 0.88 kg/saat olarak ölçülmüştür. Motor %37.5 yük altında çalıştırıldığı zaman FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonunda sırasıyla 1.12 kg/saat, 1.21 kg/saat, 1.19 kg/saat ve 1.14 kg/saat dir. Motor %12.5 ve %37.5 yük durumunda dört piston modeli için ölçülen yakıt tüketim değerleri birbirine yakın tespit edilmiştir. Motorun %25 yük altında çalıştırıldığında yakıt tüketim değerleri kaplamasız ve kademeli kaplamalı piston modelleri için birbirine yakın tespit edilmiştir.

%50 yük altında yakıt tüketimini FC pistonunda 1.3 kg/saat ölçülürken motorun %37.5 yük altında çalıştırılmasına göre %17’lik bir artış tespit edilmiştir. %50 yük altında

5 mm NC pistonunda yakıt tüketimi 1.54 kg/saat, 10 mm NC pistonunda 1.52 kg/saat ve her iki piston içinde %32.5 yük altında çalıştırılmasına göre yaklaşık %27'lik artış tespit edilmiştir. %50 yük altında NC pistonunda 1.36 kg/saat ve %19'luk bir artış tespit edilmiştir.

%62,5 yük altında yakıt tüketimi FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonunda sırasıyla 2.41 kg/saat, 2.74 kg/saat, 3.27 kg/saat ve 1.9 kg/saat dir. 10 mm NC pistonunda motorun %50 yük altında çalıştırılmasına göre %115'lik yakıt tüketiminde artış tespit edilmiştir. NC pistonunda %50 yük altında çalıştırılmasına göre yakıt tüketiminde %40'lık artış vardır fakat en az artış NC pistonundadır. En düşük değer kaplamasız pistonda, kaplamalı pistonlarda kaplama alanının azalmasıyla yakıt tüketiminde artış gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.6' da yakıt tüketimi verileri piston modellerine göre verilmiştir. Tüm yüzey kaplı piston modelinde yakıt tüketimi %50 yük altında çalıştırıldığı duruma kadar kaplamasız pistondan düşük tespit edilmiştir. Abbas ve Elayaperumal (S. M. Abbas and Elayaperumal 2019) yaptıkları çalışmada benzer şekilde zirkonyum kaplı pistonda yakıt tüketimini kaplamasız pistona göre düşük tespit etmişlerdir.

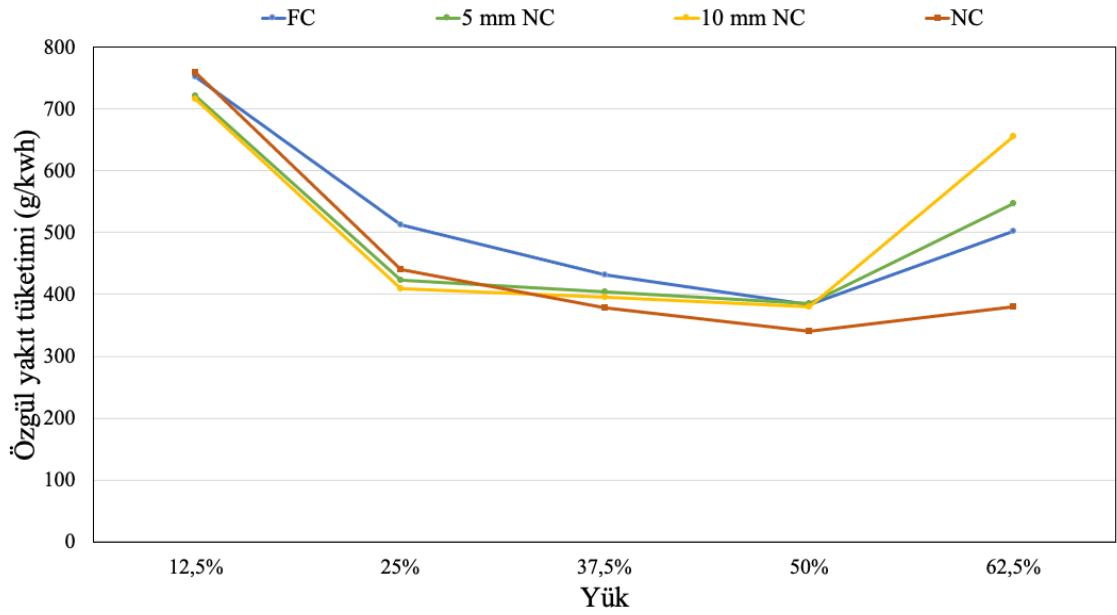
Çizelge 4.6. Yakıt tüketim verileri

Model Yakıt tüketimi	NC		FC		5 mm NC		10 mm NC	
	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma
Yüksüz	0.58	0.03	0.47	0.05	0.57	0.06	0.47	0.07
%12.5	0.76	0.05	0.75	0.01	0.72	0.03	0.72	0.03
%25	0.88	0.25	1.02	0.19	0.85	0.03	0.82	0.02
%37.5	1.14	0.08	1.12	0.18	1.21	0.08	1.19	0.05
%50	1.36	0.16	1.3	0.38	1.54	0.04	1.52	0.17
%62.5	1.91	0.23	2.41	0.23	2.74	0.13	3.27	0.16

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de sunulan kütleli yakıt tüketimi ile özgül yakıt tüketimi grafikleri beraber incelendiğinde motor verimini değerlendirmek gerekirse; motorun düşük ve orta yüklerinde yakıt tüketimi ve özgül yakıt tüketimi değerlerinin kaplamalı motor çalışma koşullarında olumlu bir şekilde etkilendiği ve bu iki değer azaldığı; ancak motor yükün aşırı artmasıyla motorun hacimsel verimindeki azalmaya bağlı olarak kütleli hava miktarının azalması sonucu yanmanın eksik yanmaya doğru yakınsadığı ve dolayısıyla bu durumda yanma verimin düşmesini sembolize eden bu iki değer normal kaplamasız motora göre artış gösterdiği görülmektedir. Bu duruma uygun olarak Şekil

4.7'deki özgül yakıt tüketim grafiği incelendiğinde tüm çalışma şartları için motorun orta ve yüksek yüklerine kadar özgül yakıt tüketimi değerlerinin azaldığı ve aşırı yük durumunda ise hızlıca arttığı görülmektedir.

4.1.2.2. Özgül yakıt tüketimi



Şekil 4.7. Dört farklı piston modeli için yükleme şartlarına göre özgül yakıt tüketimi grafiği

Şekil 4.7'de dört piston modeli için yük artışına göre özgül yakıttaki değişim grafikleri verilmiştir. Motor %12.5 yük altında çalıştırıldığı zaman FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonu için özgül yakıt tüketimleri sırasıyla 750 g/kWh, 721 g/kWh, 715 g/kWh ve 759 g/kWh dir. %25 yük durumunda FC pistonunda 512 g/kWh, 5 mm NC pistonunda 424 g/kWh, 10 mm NC pistonunda 410 g/kWh ve NC pistonunda 441 g/kWh olarak özgül yakıt değerleri hesaplanmıştır. Motor %37.5 yükte çalıştırıldığı zaman FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonu için özgül yakıt tüketimleri sırasıyla 432 g/kWh, 404 g/kWh, 396 g/kWh ve 379 g/kWh dur. Yük % 50 olduğu zaman FC pistonunda 383 g/kWh, 5 mm NC pistonunda 386 g/kWh, 10 mm NC pistonunda 380 g/kWh ve NC pistonunda 341 g/kWh özgül yakıt tüketimi hesaplanmıştır.

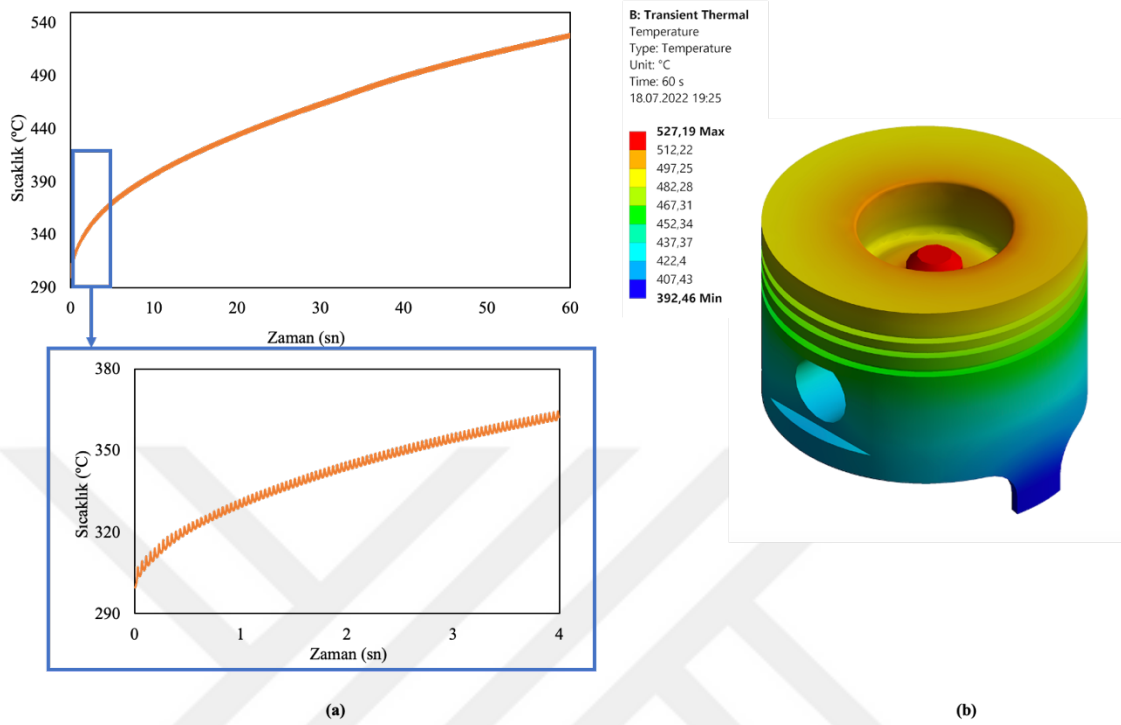
Motor %62.5 yük altında çalıştırıldığı zaman FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonu için özgül yakıt tüketimleri sırasıyla 501 g/kWh, 547 g/kWh, 655 g/kWh ve 380 g/kWh dir. Çizelge 4.7'de piston modellerine göre özgül yakıt tüketim verileri gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Özgül yakıt tüketim verileri

Model Özgül yakıt tüketimi	NC		FC		5 mm NC		10 mm NC	
	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma	Ortalama	STD Sapma
%12.5	759	17.95	750	11.7	721	30.06	715	30.67
%25	441	11.8	512	80.7	424	16	410	7.85
%37.5	379	9.83	432	63.65	404	25.75	396	16.71
%50	341	3.62	383	61.35	386	9.57	380	41.22
%62.5	380	13.7	501	36.93	547	11.5	655	19.34

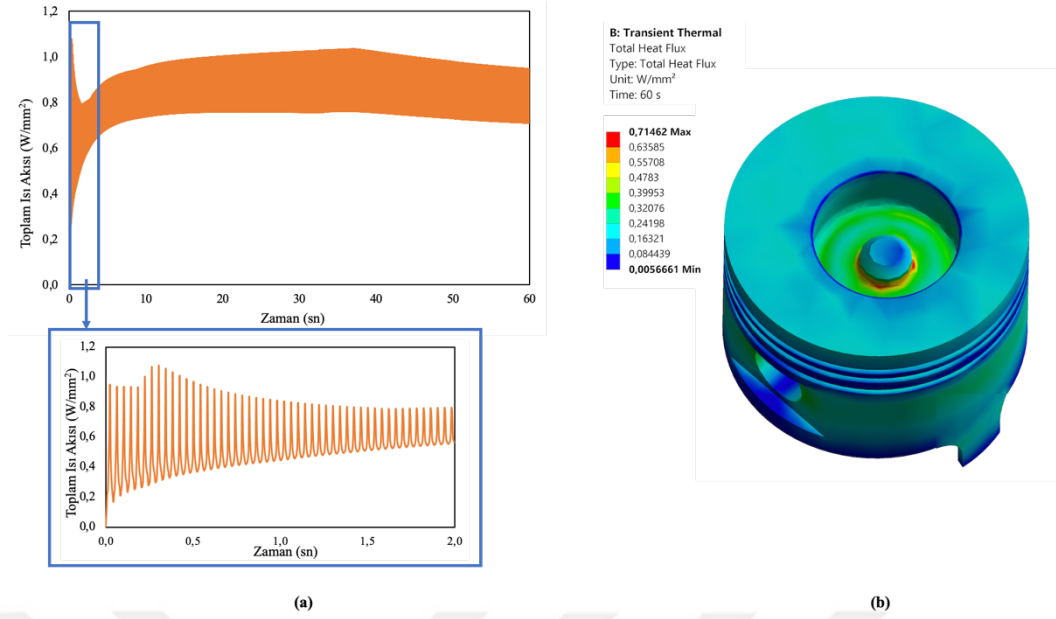
4.2. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

4.2.1. NC pistonu için zamana bağlı termal ve yapısal analiz sonuçları



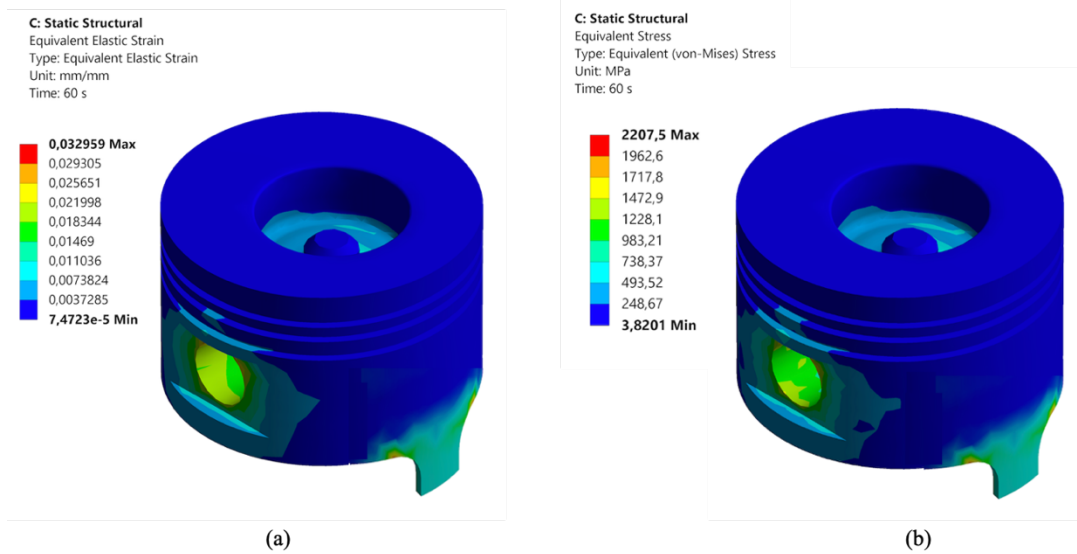
Şekil 4.8. (a) NC piston sıcaklık değişimi (b) NC piston sıcaklık dağılımı

Kaplamasız (NC) piston için sınır şartları uygulandıktan sonra pistonda meydana gelen sıcaklık dağılımı Şekil 4.8’de verilmiştir. 299.6 °C başlangıç sıcaklığı ve 1500 çevrim sonunda sıcaklık piston tacında 527.19 °C değerine çıkmıştır. Yapılan analiz sonucunda en yüksek sıcaklık değeri piston tacında en düşük sıcaklık değeri piston eteğinde görülmüştür. Piston tacında en yüksek sıcaklığın görülmesinin nedeni çevresel olarak piston tacının maruz kaldığı ısı akışıdır (Cerit and Coban 2014). Şekil 4.8.a’da sıcaklığın 60 sn içindeki artışını ve yaptığı salınım gösterilmektedir. 0.04 sn’de sıcaklık 299.6 °C sıcaklıktan 303.95 °C ye yükselmiştir. Bu bir çevrim boyunca uygulanan h_A ve T_A değerlerine bağlı olarak piston yüzeyindeki sıcaklıkta artış ve azalış gerçekleşmiştir. Sıcaklıktaki artış ve azalmaya bağlı olarak sıcaklık grafiği salınım yapmaktadır. Piston üst yüzeyindeki sıcaklık 10. saniyede 395.59 °C, 20. saniyede 432.78 °C, 30. saniyede 462.22 °C, 40. saniyede 488.56 °C ve 50. saniye sonunda 509.34 °C dir. Pistonun üst yüzeyinde ilk 10 saniyede 96 °C, son 10 saniyede 17.85 °C bir artış vardır. İlk çevrimlerdeki sıcaklık artışı son çevrimlere göre daha yüksektir.



Şekil 4.9. (a) NC piston ısı akısı değişimi (b) NC piston ısı akısı dağılımı

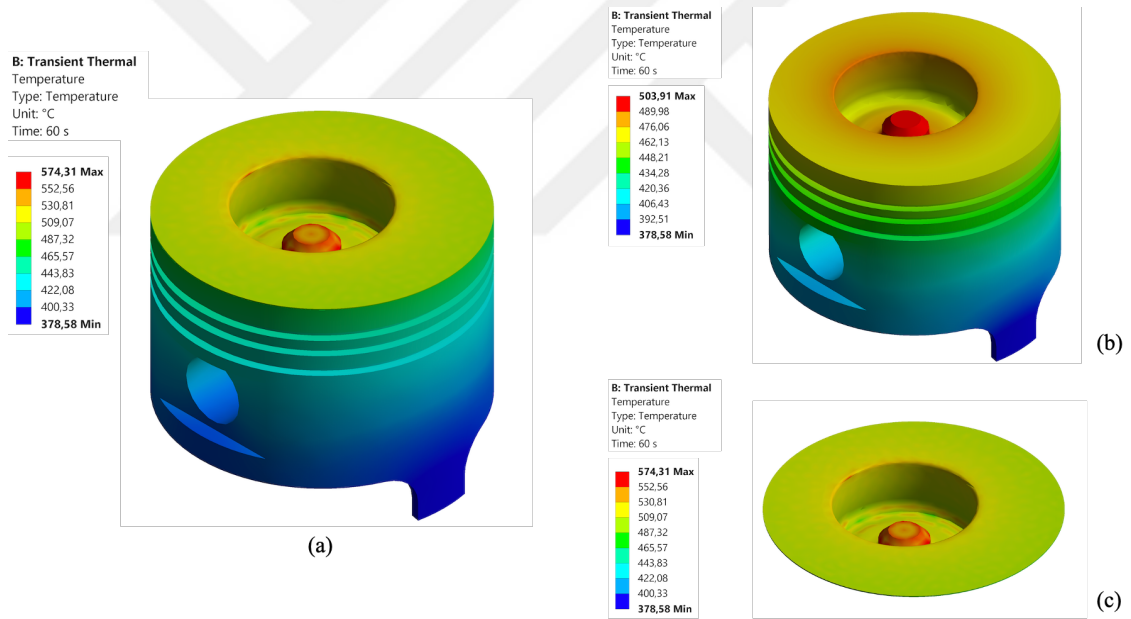
Şekil 4.9’da NC pistonu için toplam ısı akısındaki değişim verilmiştir. Şekil 4.9.a’da pistondaki ısı akısı değişimi 60 sn ve 2 sn için grafik olarak verilmiştir. NC pistonu kullanılarak yapılan zamana bağlı termal analiz sonucunda piston tacının dibinde en yüksek ısı akısı 0.71462 W/mm^2 değeri tespit edilmiştir. Pistonun diğer bölümlerine göre yanma haznesinde daha yüksek ısı akısı değerleri görülmektedir. 0.5 sn’ ye kadar geçen sürede pistonun ısı transfer miktarı fazla olduğu için ısı akısındaki salınım miktarı fazladır. Pistonun sıcaklığı arttıkça ısı akısındaki değişim oranı sabitlenmeye başlamıştır.



Şekil 4.10. (a) NC piston eşdeğer gerinim (b) NC piston von-Mises gerilme dağılımı

Şekil 4.10'da NC pistonunda oluşan von-Mises gerilme ve eşdeğer gerinim dağılımı verilmiştir. İlk çevrimdeki von-Mises gerilme değeri 1340.2 MPa, son çevrimde pistonda oluşan von-Mises gerilme değeri 2207.5 MPa olmuştur. En yüksek gerilme değeri, pistonun pim bağlantı noktalarında tespit edilmiştir. Malzemenin termal genişlemeye maruz kalması neticesinde yanma haznesi içinde oluşan basınç gerilmesine bağlı olarak bu bölgede yüksek von-Mises gerilme değerleri tespit edilmiştir. İlk çevrimde 0.02046 mm/mm olan eşdeğer gerinim değeri analiz boyunca artan sıcaklık değerine bağlı olarak 0.03296 mm/mm olmuştur. En yüksek eş değer gerinim değeri von-Mises gerilim değeriyle aynı bölgede görülmüştür. Kaplamasız pistonda 1. sn de en yüksek 0.4435 mm olan toplam şekil değiştirme değeri 60. sn de 0.7275 mm ulaşarak pistonun üst yüzeyinde tespit edilmiştir.

4.2.2. FC pistonu için zamana bağlı termal ve yapısal analiz sonuçları

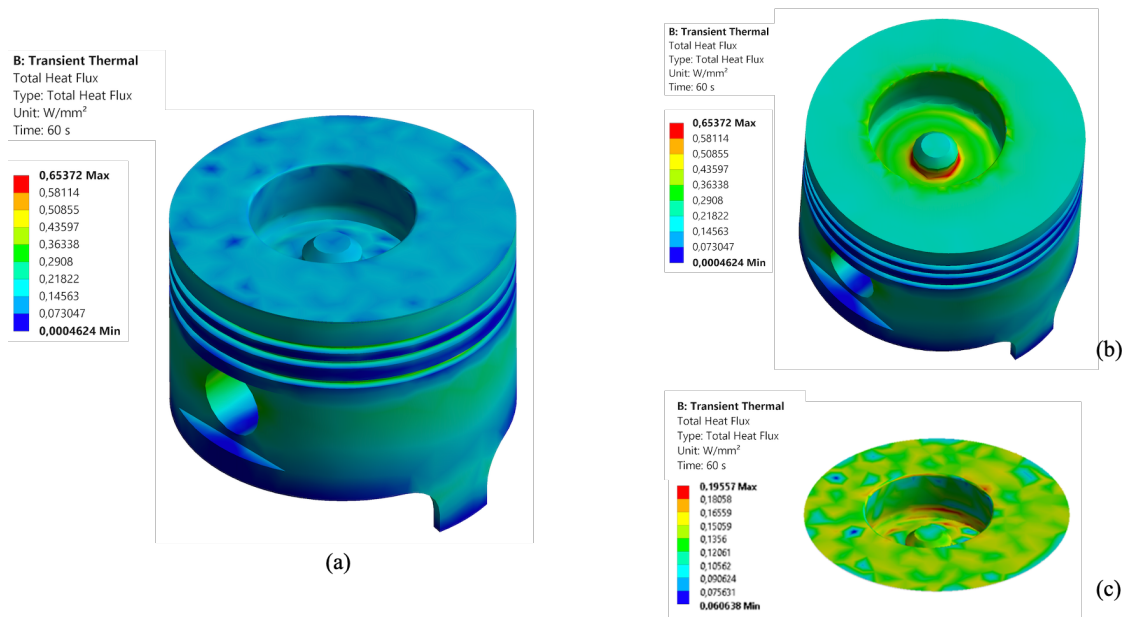


Şekil 4.11. (a) FC piston (b) piston (c) kaplama yüzeyi sıcaklık dağılımı

Tüm yüzey kaplamalı (FC) pistona sınır şartları uygulandıktan sonra pistonda ve kaplama yüzeyinde görülen sıcaklık dağılımı Şekil 4.11'de verilmiştir. 299.6 °C başlangıç sıcaklığı 1500 çevrimin sonunda yanma odası içinde piston tacında 574.31 °C en yüksek değere ulaşmıştır, en düşük sıcaklık piston eteğine doğru olan bölgede görülmüştür. NiCoCrAlY astar tabakasında en yüksek sıcaklık piston tacında 504.01 °C, minimum sıcaklık yanma odası içinde 461.58 °C dir. Piston yüzeyinde oluşan en yüksek

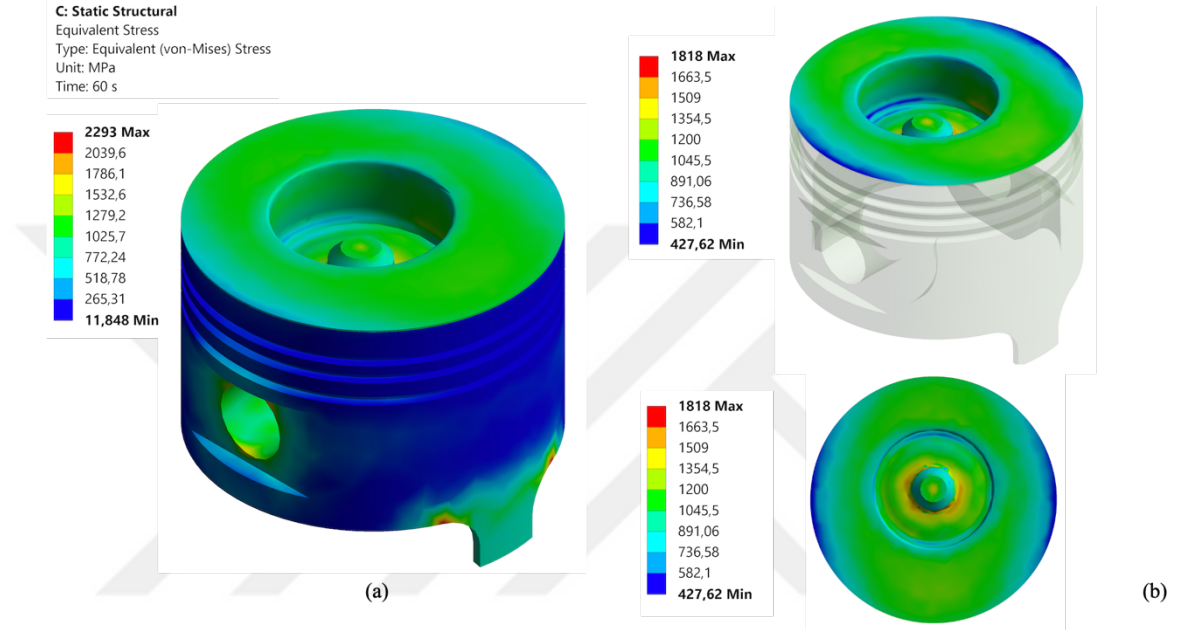
sıcaklık piston tacında 503.91 °C, en düşük sıcaklık 378.58 °C piston eteğine doğru görülmüştür. PYSZ kaplama yüzeyi ile piston yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı yaklaşık 70 °C dir.

Piston yüzeyi ile astar tabaka yüzeyinde oluşan en yüksek sıcaklık değeri birbirine yakındır bunun sebebi astar tabakasının termal iletkenlik katsayısının TBC malzemesine göre yüksek ve kalınlığının 100 µm gibi ince bir tabaka olmasıdır. Cerit ve Çoban (Cerit and Coban 2014) yaptıkları çalışmada alt tabaka ile astar tabakanın sıcaklık değişimini birbirine yakın ve ısı transfer davranışını benzer tespit etmişlerdir. Bu çalışmada benzer sonuç elde edilerek astar tabaka ve alt tabaka sıcaklığı birbirine yakın değerlerde tespit edilmiştir. Yao ve Qian (Z. Yao and Qian 2018) yaptıkları çalışmada doğalgaz yakıtlı bir motorda alüminyum alaşımlı pistona PYSZ termal bariyer kaplamanın pistonda meydana gelen sıcaklık dağılımına etkisini zamandan bağımsız analizlerle araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda en yüksek sıcaklığı kaplama yüzeyinde yanma odasının boğaz kısmında tespit etmişlerdir. Astar tabaka ve piston sıcaklığını birbirine yakın değerlerde ve kaplama yüzeyi sıcaklığından düşük tespit etmişlerdir. Mevcut çalışmada maksimum sıcaklık değeri referans çalışmada olduğu gibi yanma haznesi civarında tespit edilmiştir. Ayrıca kaplama malzemesi, astar tabaka ve piston yüzeyinde gözlemlenen sıcaklık değerleri oransal olarak benzer sonuçlar vermiştir. Mevcut çalışmanın zamana bağlı yapılması ve farklı yakıt tipinin seçilmiş olması gözlemlenen sıcaklık değerlerinin farklı olmasına sebep olduğu düşünülmektedir.



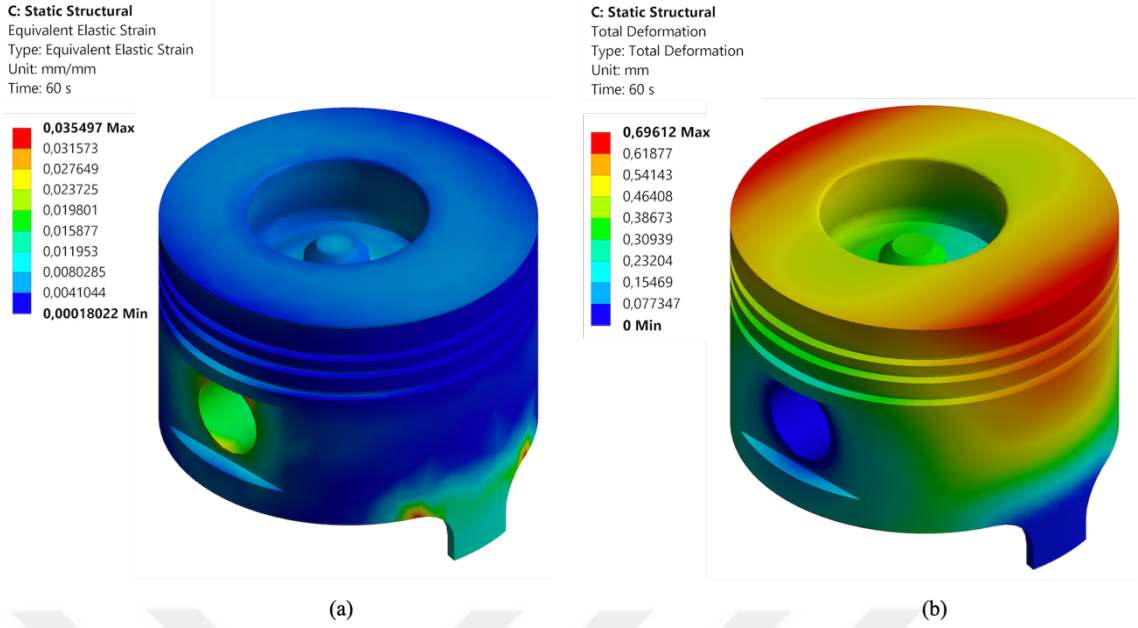
Şekil 4.12. (a) FC piston (b) piston (c) kaplama yüzeyi ısı akısı dağılımı

Şekil 4.12’de tüm yüzey kaplamalı piston için 60 sn sonunda oluşan ısı akısındaki değişim verilmiştir. Piston yüzeyinde en yüksek ısı akısı piston tacının alt bölgelerinde 0.65372 W/mm^2 iken en düşük değer segman kanallarında ve piston eteğinin alt bölgesinde görülmüştür. PYSZ kaplı yüzeyde en yüksek ısı akısı 0.19557 W/mm^2 dir. Seramik kaplama malzemesi olarak kullanılan Y_2O_3 ile stabilize edilmiş zirkonyumun (PYSZ) ısı iletim katsayısı düşük olduğu için ısıнын piston içinde kalmasını sağlar.



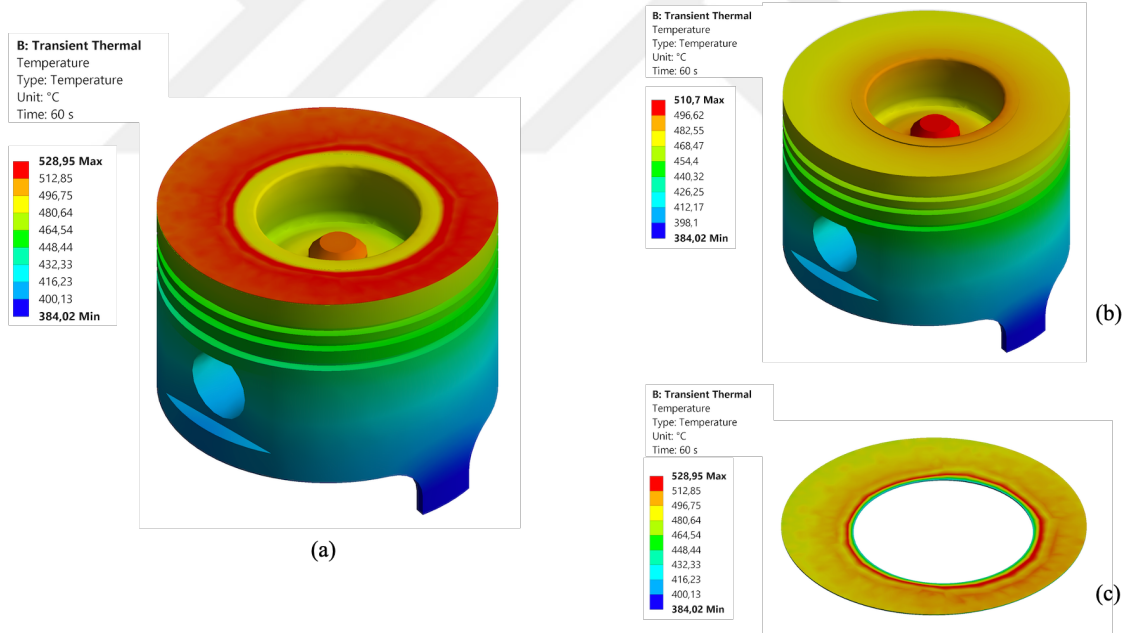
Şekil 4.13. (a) FC piston (b) kaplama yüzeyindeki von-Mises gerilme dağılımı

FC pistonu için gerçekleştirilen zamana bağlı termal analiz sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen yapısal analiz sonucunda elde edilen von-Mises gerilme dağılımları Şekil 4.13’te verilmiştir. Y_2O_3 ile stabilize edilmiş zirkonyum kaplama yüzeyindeki en yüksek gerilme değeri yanma haznesinin içinde piston tacının etrafında 1818 MPa olarak tespit edilmiştir. FC pistonunda en yüksek von-Mises gerilme değeri 2293 MPa olarak piston pim yuvasının etrafında görülmüştür. Şekil 4.14’te FC pistonu için eşdeğer gerinim ve toplam deformasyon değerlerinin dağılımı verilmiştir. FC pistonunda en yüksek eş değer gerinim 0.0355 mm/mm pistonun pim yuvası etrafında görülmüştür. FC pistonunda toplam şekil değiştirmenin en yüksek olduğu yer kaplama yüzeyinde 0.6961 mm dir.



Şekil 4.14. (a) FC pistonu eş değer gerinin dağılımı (b) FC pistonu toplam deformasyon dağılımı

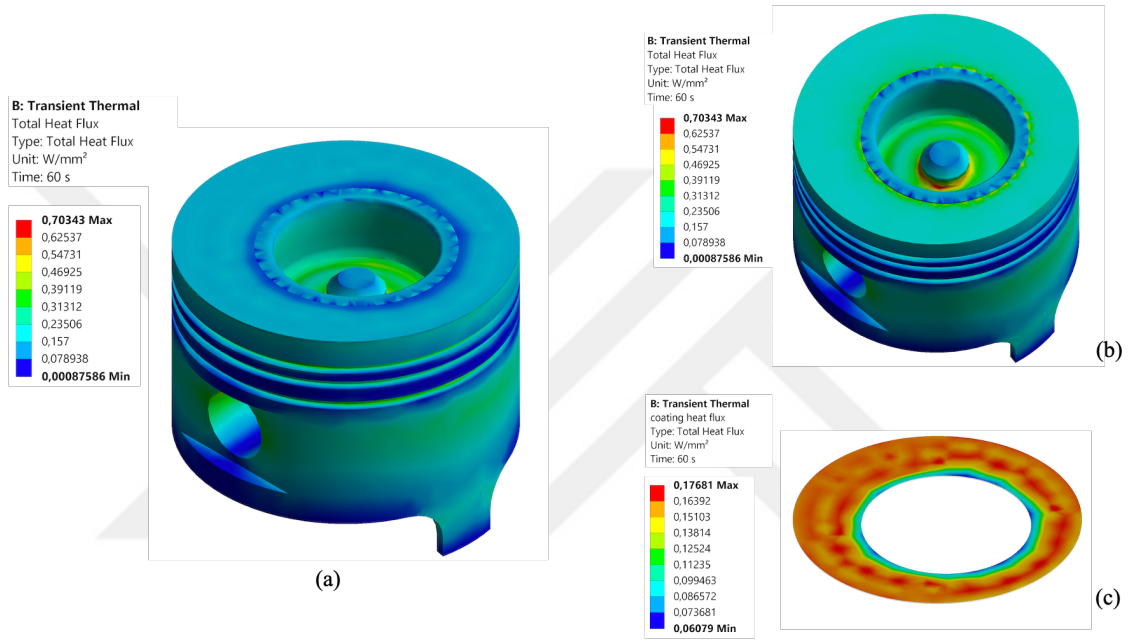
4.2.3. 5 mm NC pistonu için zamana bağlı termal ve yapısal analiz sonuçları



Şekil 4.15. (a) 5 mm NC piston (b) piston (c) kaplama yüzeyindeki sıcaklık dağılımı

5 mm kaplamasız (5 mm NC) piston için gerçekleştirilen zamana bağlı termal analiz sonuçlarından elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 4.15'te verilmiştir. En yüksek sıcaklık kaplama yüzeyinde 528.95 °C, en düşük sıcaklık 384.02 °C piston eteğinde tespit edilmiştir. Pistonun en yüksek sıcaklık değeri piston tacında 510.7 °C ve kaplama yüzeyine yakın bir sıcaklıktır. Astar tabaka bölgesinde en yüksek sıcaklık 489.52 °C ve

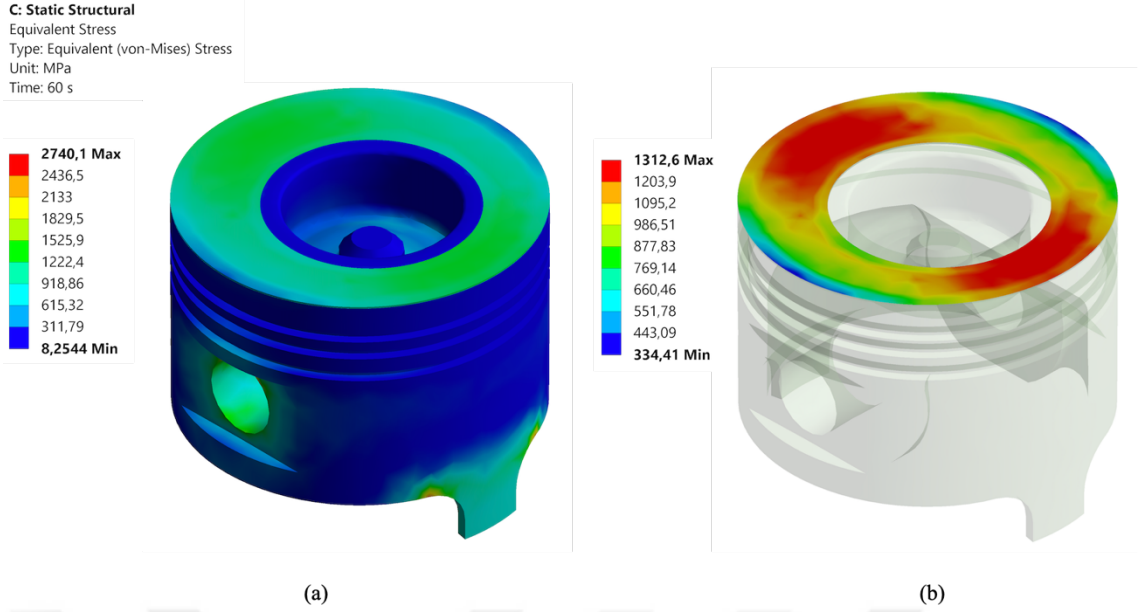
en düşük sıcaklık 470.65 °C piston başı çevre kenarına yakın bölgelerde tespit edilmiştir. Astar tabaka ile piston yüzeyindeki sıcaklık değerleri birbirine yakın tespit edilmiştir (Z. Yao, Hu, and Li 2019). Kaplama yüzeyi ile piston yüzeyindeki en yüksek sıcaklık değerleri arasındaki fark 18.25 °C dir. 5 mm NC pistonunda en yüksek sıcaklık değeri FC pistonundaki gibi kaplama yüzeyinde elde edilmiştir fakat sıcaklık 45.36 °C daha düşüktür. Bunun sebebi yanma haznesi bölgesine termal bariyer kaplama uygulanmamasından dolayı ısı kayıplarının FC pistonuna göre daha fazla olmasıdır.



Şekil 4.16. (a) 5 mm NC piston (b) piston (c) kaplama yüzeyindeki ısı akısı dağılımı

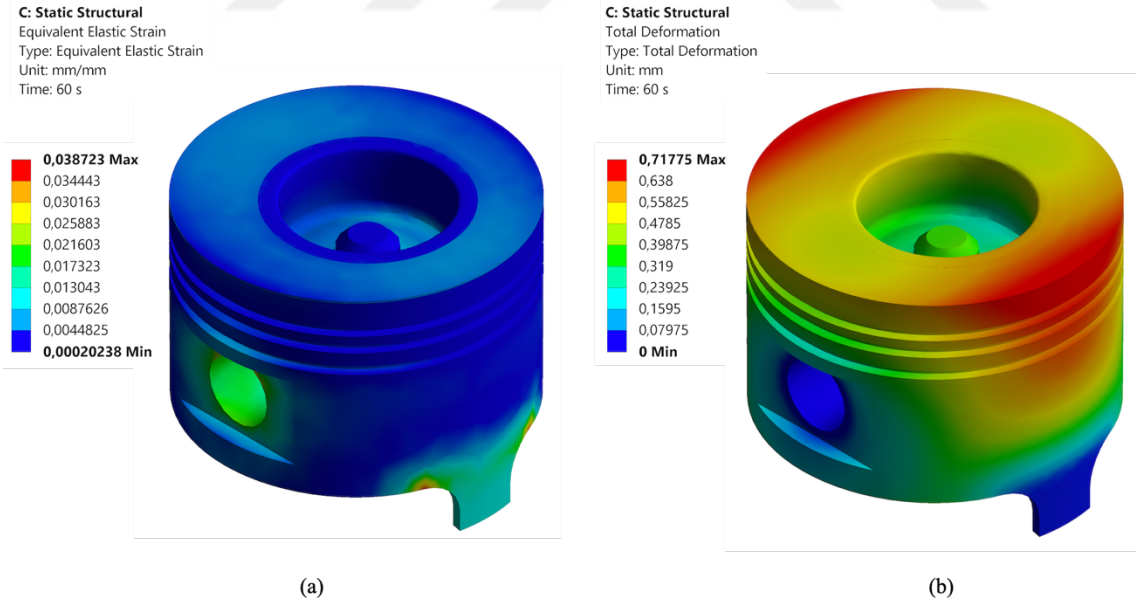
Şekil 4.16’da zamana bağlı termal analiz sonucunda 5 mm kaplamasız piston için elde edilen ısı akısı dağılımı verilmiştir. En yüksek ısı akısı değeri piston tacının alt bölgelerinde 0.70343 W/mm² olarak tespit edilmiştir. Kaplama yüzeyindeki en yüksek ısı akısı değeri 0.17681 W/mm², en düşük ısı akısı 0.06079 W/mm² olarak kaplamasız yüzeyin bitiminde kaplama yüzeyinin başlangıç bölgesinde tespit edilmiştir.

Şekil 4.17’de 5 mm kaplamasız piston için von-Mises gerilme dağılımı verilmiştir. 5 mm NC pistonundaki en yüksek von-Mises gerilme değeri piston pim yuvasının etrafında 2740.1 MPa olarak görülmektedir. Kaplama yüzeyindeki en yüksek von-Mises gerilme değeri kaplamasız yüzeye yakın bölgede 1312.6 MPa dır.



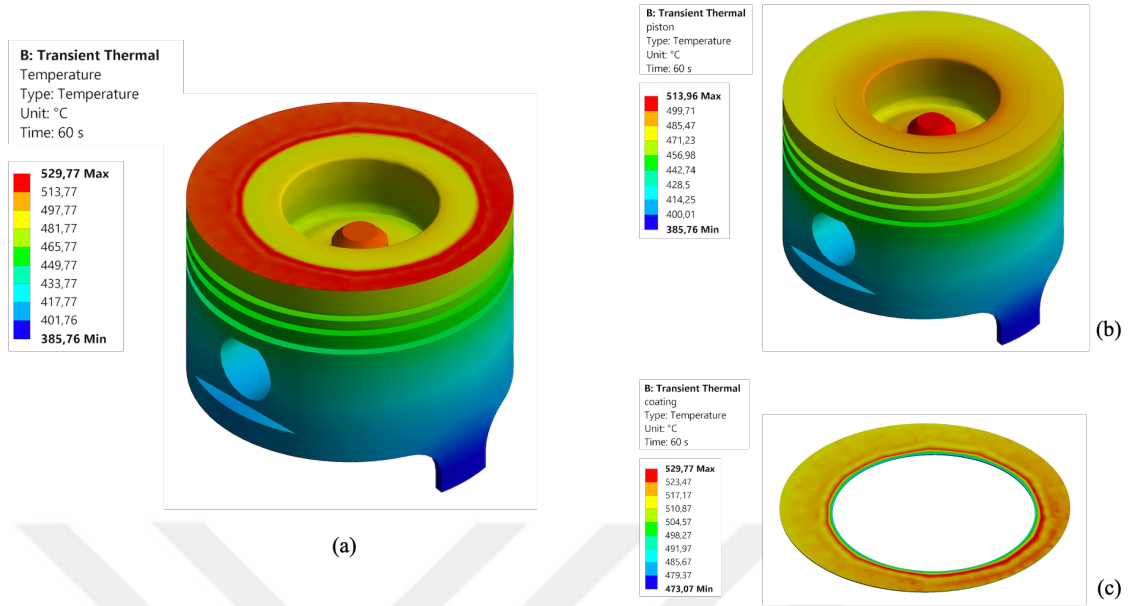
Şekil 4.17. (a) 5 mm NC pistonu (b) kaplama yüzeyindeki von-Mises gerileme dağılımı

Şekil 4.18’de 5 mm NC pistonundaki eşdeğer gerinim ve toplam deformasyon dağılımı verilmiştir. 5 mm NC pistonunda eşdeğer gerinim en yüksek değeri pistonun pim yuvasında 0.0387 mm/mm. 5 mm NC piston için toplam şekil değiştirmenin en yüksek değeri 0.7178 mm dir.



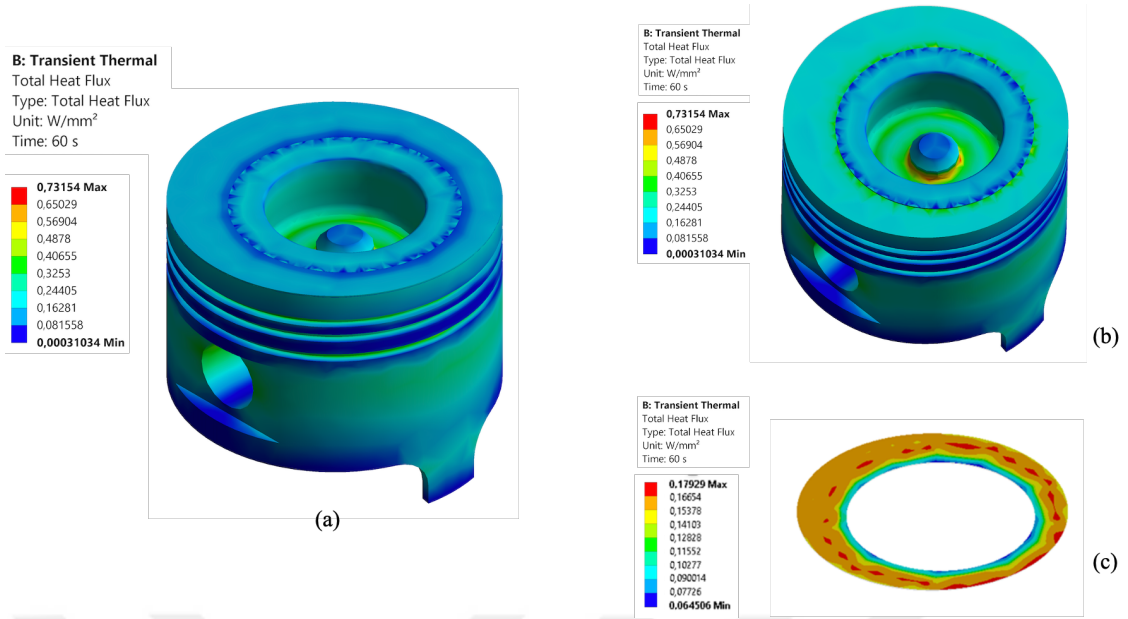
Şekil 4.18. (a) 5 mm NC pistonu eş değer gerinin dağılımı (b) 5 mm NC pistonu toplam deformasyon dağılımı

4.2.4. 10 mm NC pistonu için zamana bağlı termal ve yapısal analiz sonuçları



Şekil 4.19. (a) 10 mm NC pistonu (b) piston (c) kaplama yüzeyindeki sıcaklık dağılımı

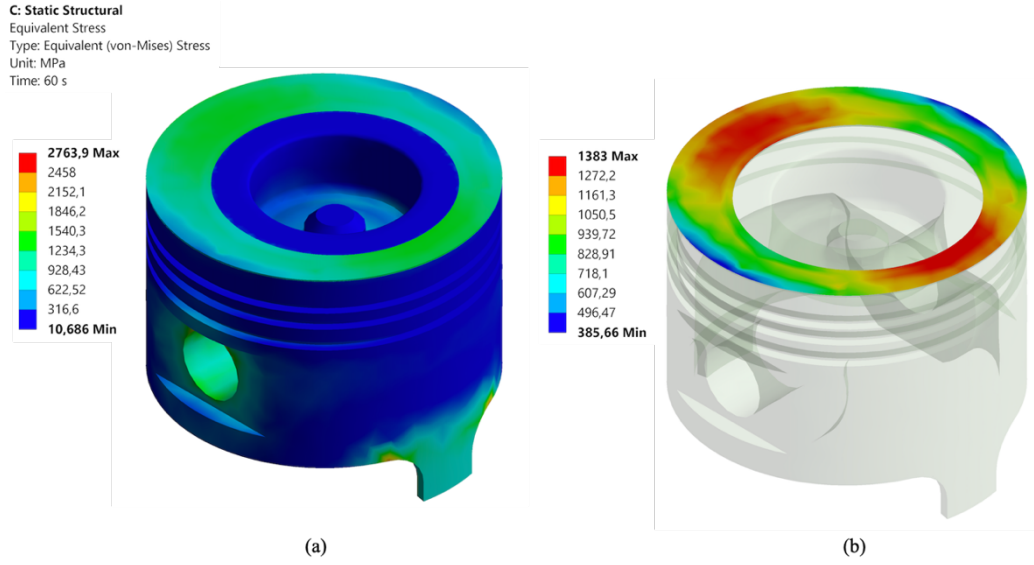
10 mm kaplamasız (10 mm NC) piston için gerçekleştirilen zamana bağlı termal analiz sonuçlarından elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 4.19’da verilmiştir. 10 mm kaplamasız pistonunda en yüksek sıcaklık 529.77 °C kaplama yüzeyinde, en düşük sıcaklık 385.76 °C piston eteğinde görülmüştür. Alt tabaka piston yüzeyinde en yüksek sıcaklık 513.96 °C piston tacındadır. Kaplama yüzeyindeki en yüksek sıcaklık kaplamasız alana yakın kaplama yüzeyindeki geçiş bölgesinde görülmektedir. Geçiş bölgesi piston ve kaplama yüzeyi arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanmaktadır. Kaplama yüzeyindeki en yüksek sıcaklıkla piston yüzeyindeki en yüksek sıcaklık arasında 15.81 °C fark vardır. 10 mm NC pistonunda en yüksek sıcaklık değeri FC ve 5 mm NC pistonundaki gibi kaplama yüzeyinde elde edilmiştir fakat FC pistonundaki sıcaklıktan 44.54 °C daha düşüktür.



Şekil 4.20. (a) 10 mm NC piston (b) piston (c) kaplama yüzeyindeki ısı akısı dağılımı

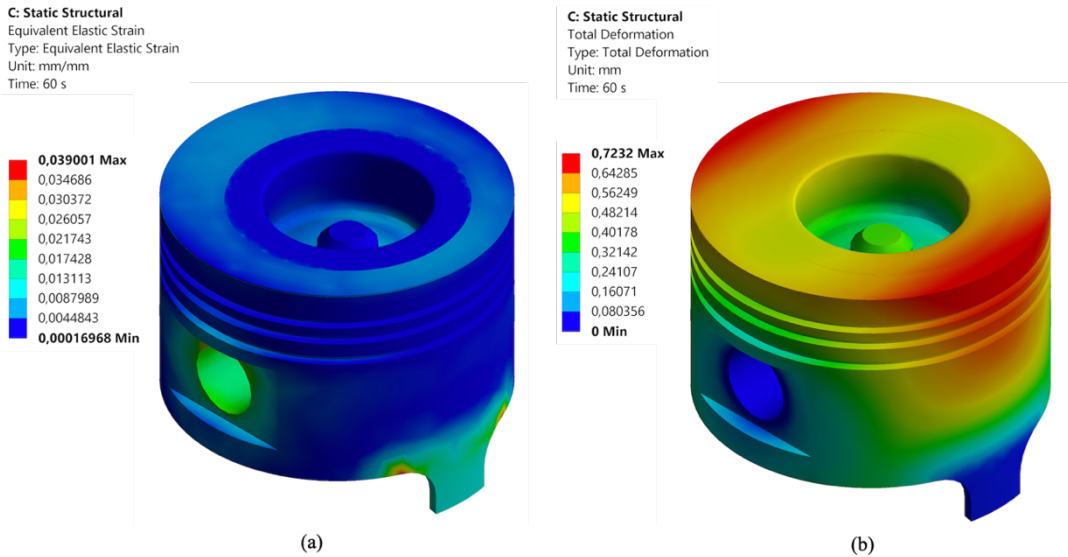
Şekil 4.20’de 10 mm kaplamasız piston için ısı akısındaki dağılım verilmiştir. En yüksek ısı akısı yanma haznesinin içindeki piston tacının alt bölgelerinde 0.73154 W/mm^2 dir. Kaplama yüzeyinde en yüksek değer 0.17929 W/mm^2 olarak piston başı çevre kenarına yakın bölgelerde görülmüştür. Kaplama yüzeyindeki ısı akısının düşük olması kaplama malzemesinin termal iletkenlik katsayısının küçük olmasındandır. Termal iletkenlik katsayısı ne kadar düşük olursa malzemenin yalıtım özelliği o kadar iyi olur ve ısı geçişini engeller.

Gehlot ve Triapthi (Gehlot and Tripathi 2016) 0.1 mm astar tabakasının üzerine 0.4 mm Yttria ile stabilize edilmiş zirkonyum kapladıkları Al-Si pistona zamandan bağımsız termal analiz uygulamışlardır. Kaplama yüzeyine uygulanan $700 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık sonucunda kaplama yüzeyinde maksimum sıcaklık piston tacında ve piston üst yüzeyinde $362.5 \text{ }^\circ\text{C}$, alt tabaka piston yüzeyinde $284.89 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak tespit etmişlerdir. Kaplama yüzeyi ile alt tabaka arasında $77.61 \text{ }^\circ\text{C}$ lik bir sıcaklık farkı oluşmuştur. Kaplamasız pistonda $291.32 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık bulmuşlardır. Yaptığımız çalışmada tüm yüzey kaplamalı pistonda kaplama yüzeyi ile alt tabaka arasındaki sıcaklık farkını $70.3 \text{ }^\circ\text{C}$ bularak benzer sonuç elde edilmiştir.



Şekil 4.21. (a) 10 mm NC piston (b) kaplama yüzeyindeki von-Mises gerilme dağılımı

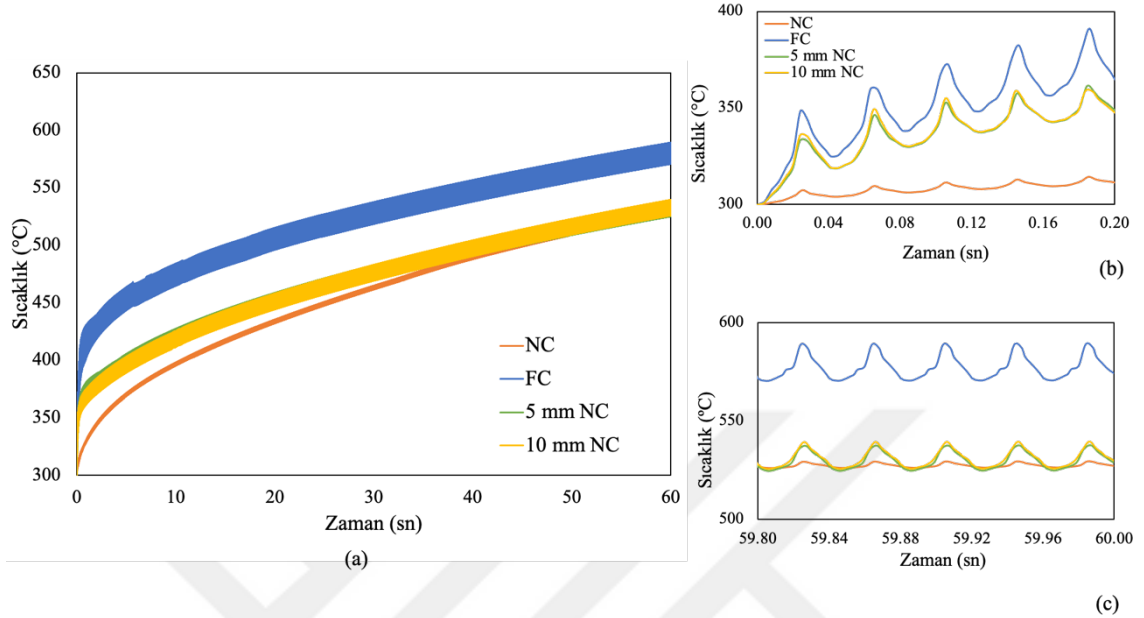
10 mm kaplamasız piston için von-Mises gerilme dağılımı Şekil 4.21’de verilmiştir. En yüksek von-Mises gerilme değeri piston bağlantı pim yuvasında 2763.9 MPa, kaplama yüzeyinde 1383 MPa olarak tespit edilmiştir. Piston yüzeyindeki eşdeğer gerinin en yüksek değeri 0.039 mm/mm, kaplama yüzeyindeki en yüksek eşdeğer gerinin değeri 0.0108 mm/mm kaplamanın başladığı bölgelerde bulunmuştur. 10 mm NC pistonu için toplam şekil değiştirmenin en yüksek değeri 0.7232 mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.18. (a) 10 mm NC pistonu eş değer gerinin dağılımı (b) 10 mm NC pistonu toplam deformasyon dağılımı

4.3. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

4.3.1. Sıcaklık



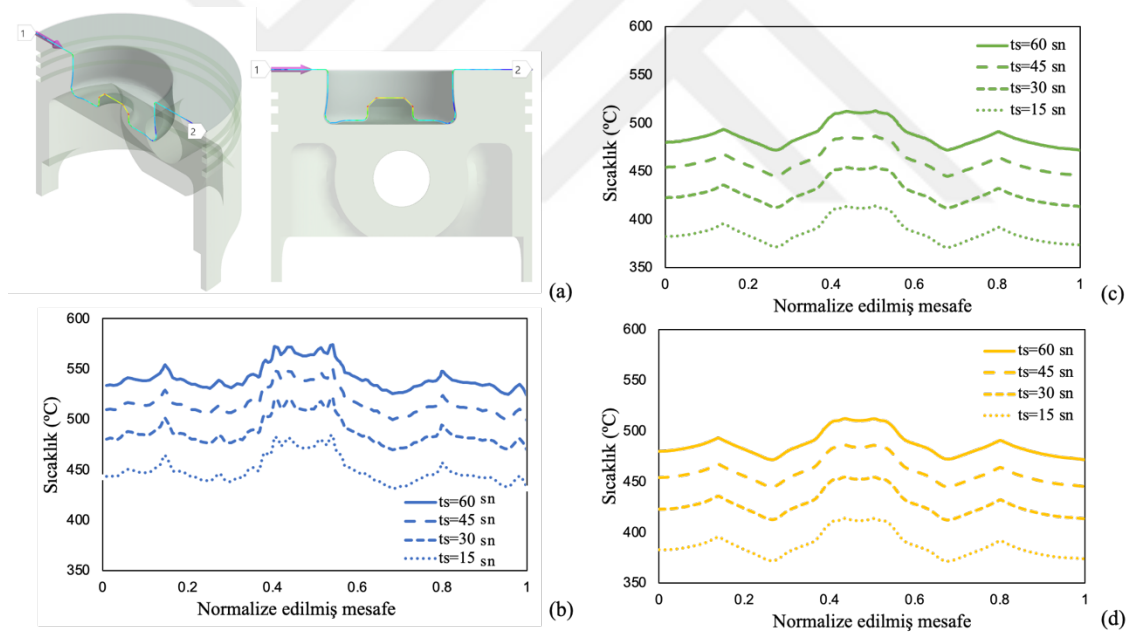
Şekil 4.19. (a) Pistonların üst yüzey sıcaklık değişimi (b) ilk beş çevrim için sıcaklık değişimi (c) son beş çevrim için sıcaklık değişimi

Şekil 4.19’da NC, FC, 5 mm NC ve 10 mm NC pistonundaki sıcaklık değişimi verilmiştir. Şekil 4.19.a’da 60 saniye boyunca piston üst yüzeyinde oluşan sıcaklık değişimi gösterilmektedir. Dört piston modeli için en yüksek sıcaklık değerleri kaplama yüzeyinde tespit edilmiştir. NC pistonunda 527.19 °C, FC pistonunda 574.31 °C, 5 mm NC pistonunda 528.95 °C, 10 mm NC pistonunda 529.77 °C dir. Fei ve diğ. (C. G. Fei et al. 2021) dizel motorda YSZ kaplı piston için gerçekleştirdikleri termal analiz sonucunda en yüksek sıcaklığı kaplama yüzeyinde piston başı üst yüzeyinde yanma haznesine doğru olan bölgede 217.66 °C olarak tespit etmişlerdir. Bu çalışmada yapılan analizler sonucunda kaplama yüzeyindeki sıcaklığın daha yüksek tespit edilmesinde pistona etki eden sınır şartlarının farklı ve analiz zamana bağlı olması etkilidir.

1500 çevrim sonunda NC, 5 mm NC ve 10 mm NC pistonlarında birbirine yakın sıcaklık değerleri görülürken FC pistonunda tüm yüzeyin kaplı olmasından dolayı en yüksek sıcaklık tespit edilmiştir. En yüksek sıcaklık NC ve FC pistonunda piston tacında, 5 mm NC ve 10 mm NC de kaplama yüzeyinde görülmüştür. Sharma ve diğ. (Sharma et al. 2021) yaptıkları çalışmada kararlı hal termal analizi sonucunda 0.4 mm kaplama yüzeyi için en yüksek sıcaklığı piston tacında tespit etmişlerdir.

Şekil 4.19.b’de ilk beş çevrim için sıcaklık değişimi verilmiştir. İlk beş çevrimin sonunda piston yüzeyinde oluşan sıcaklık artışı NC de 11.58 °C, FC de 65.63 °C, 5 mm NC de 49.49 °C ve 10 mm NC de 48.24 °C dir. En az sıcaklık değişiminin NC pistonunda gözlemlenmesinin sebebi ısı kayıplarının fazla olmasıdır. 5 mm NC ve 10 mm NC pistonunda FC pistonuna göre daha az sıcaklık değişimi görülmesi yanma haznesi ve piston yüzeyindeki kaplamasız alanda oluşan ısı kayıplarındandır. Her bir çevrimde üst yüzeye etki eden gazın h_A ve T_A değerlerindeki artış ve azalışa bağlı olarak sıcaklıkta artış ve azalış vardır.

Şekil 4.19.c’de son beş çevrim için sıcaklık değişimi verilmiştir. NC pistonunda sıcaklık değişimi 0.41 °C dir ve diğer piston modellerine göre değişim küçüktür. FC pistonunda 2.51 °C, 5 mm NC ve 10 mm NC pistonunda 1.62 °C sıcaklık artışı vardır. Pistonlardaki her bir çevrim için sıcaklık artışı zamanla azalmıştır çünkü çevrim sayısı arttıkça pistonların yüzey sıcaklıkları artmıştır.



Şekil 4.20. (a) 1’den 2’ye yolu boyunca FC pistonu için sıcaklık dağılımı (b) normalize edilmiş mesafe boyunca kaplama yüzeyi sıcaklık dağılımı (c) normalize edilmiş mesafe boyunca astar tabaka sıcaklık dağılımı (d) normalize edilmiş mesafe boyunca alt tabaka piston sıcaklık dağılımı

Şekil 4.20.b’de FC pistonu için kaplama yüzeyindeki normalize edilmiş mesafedeki zamana bağlı sıcaklık değişimi verilmiştir. 0.44 normalize edilmiş mesafede piston tacında sıcaklık 60. saniyede 574.31 °C, 45. saniyede 554.33 °C, 30. saniyede 525.68 °C ve 15. saniyede 488.55 °C dir.

Şekil 4.20.c’de FC pistonu için astar tabakadaki normalize edilmiş mesafedeki zamana bağlı sıcaklık değişimi verilmiştir. 0.44 normalize edilmiş mesafede piston tacında sıcaklık 60. saniyede 511.93 °C, 45. saniyede 485.54 °C, 30. saniyede 453.94 °C ve 15. saniyede 413.32 °C dir.

Şekil 4.20.d’de FC pistonu için alt tabaka piston yüzeyindeki normalize edilmiş mesafedeki zamana bağlı sıcaklık değişimi verilmiştir. 0.44 normalize edilmiş mesafede piston tacında sıcaklık 60. saniyede 512.26 °C, 45. saniyede 485.85 °C, 30. saniyede 454.23 °C ve 15. saniyede 413.59 °C dir. 1’den 2’ye normalize edilmiş yol boyunca alt tabaka ile astar tabaka sıcaklık değerleri 15, 30, 45 ve 60. saniyelerde birbirine çok yakın tespit edilmiştir.

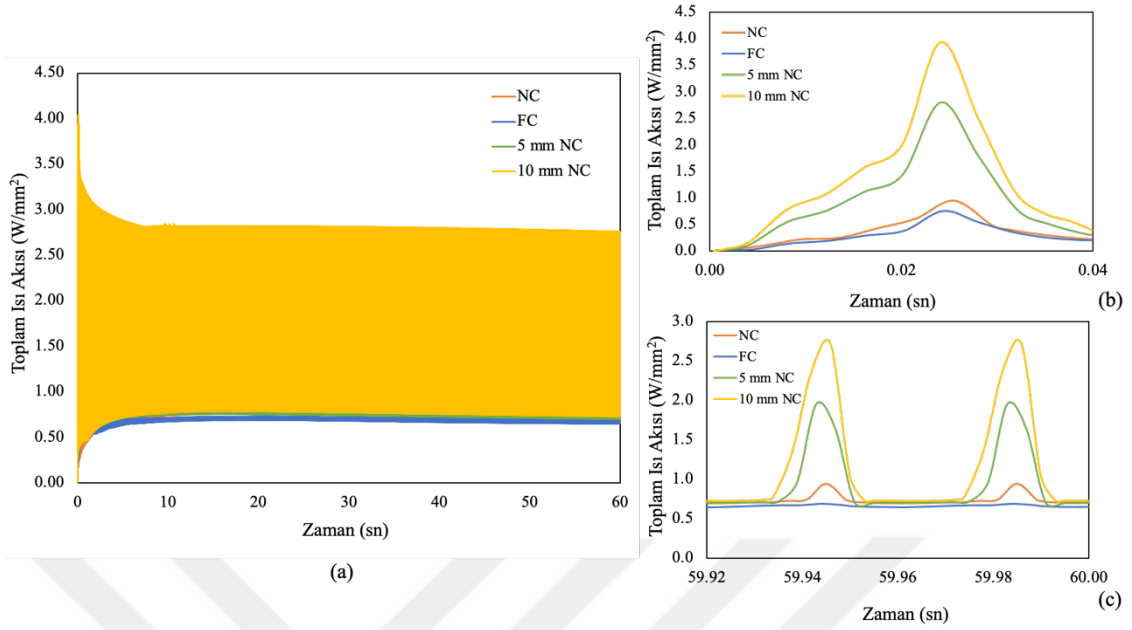
FC pistonunda 1 normalize edilmiş mesafede 60. saniyedeki en yüksek sıcaklıklar YSZ kaplama yüzeyinde 523 °C, astar tabakada 471.55 °C ve alt tabaka piston yüzeyinde 471.79 °C dir.

Bu çalışmada olduğu gibi Fei ve diğ. (C. G. Fei et al. 2021) yaptıkları çalışma sonucunda astar tabaka ve piston üst yüzeyindeki normalize edilmiş mesafedeki sıcaklık dağılım eğrisini birbirine çok yakın, kaplama yüzeyindeki normalize edilmiş mesafedeki sıcaklık dağılım eğrisindeki sıcaklık değerlerini daha yüksek tespit etmişlerdir.

4.3.2. Toplam ısı akısı

Şekil 4.21.a’da NC, FC, 5 mm NC ve 10 mm NC için toplam ısı akısındaki değişim verilmiştir. 1500 çevrim sonunda NC pistonunda en yüksek ısı akısı piston tacının dibinde 0.71462 W/mm², FC pistonunda en yüksek ısı akısı piston tacının dibinde 0.65372 W/mm², 5 mm NC pistonunda piston tacının dibinde 0.70343 W/mm² ve 10 mm NC pistonunda en yüksek ısı akısı yanma haznesinin içindeki piston tacının alt bölgelerinde 0.73154 W/mm² dir. 1500 çevrim tamamlandığında dört piston modeli için en yüksek ısı akısı değerleri aynı bölgede tespit edilmiştir.

Şekil 4.21.b’de 0.04 sn deki ilk çevrim için toplam ısı akısındaki değişim verilmiştir. İlk çevrimde en yüksek ısı akısı NC pistonunda 0.9496 W/mm², FC pistonunda 0.7563 W/mm², 5 mm NC pistonunda 2.8073 W/mm² ve 10 mm NC pistonunda en yüksek ısı akısı 3.9357 W/mm² dir. Isının aktarılmasında sürükleyici kuvvet sıcaklık farkıdır. İlk çevrimde piston ile piston yüzeyine etki eden gaz arasındaki sıcaklık farkı daha yüksek olduğu için toplam ısı akısındaki değişimdeki dalgalanma son çevrimlere göre daha fazladır.

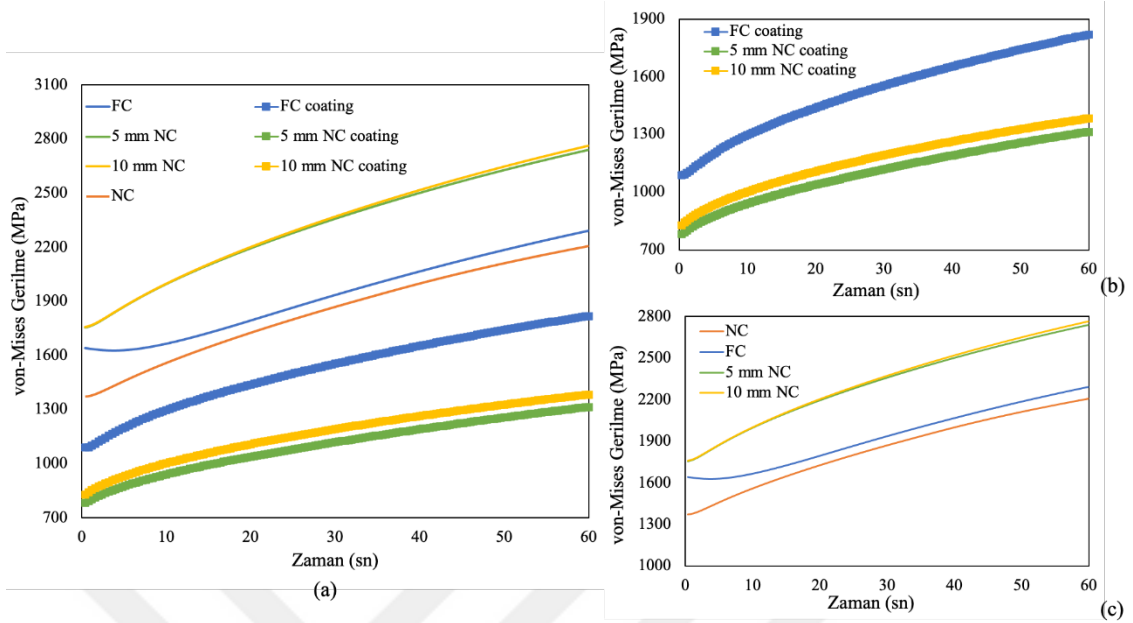


Şekil 4.21. (a) Toplam ısı akısı değişimi (b) ilk çevrim için toplam ısı akısı değişimi (c) son iki çevrim için toplam ısı akısı değişimi

Şekil 4.21.c’de son iki çevrimdeki toplam ısı akısındaki değişim verilmiştir. Son çevrimde en yüksek ısı akısı NC pistonunda 0.9472 W/mm^2 , FC pistonunda $0,6898 \text{ W/mm}^2$, 5 mm NC pistonunda 1.9565 W/mm^2 ve 10 mm NC 2.3684 W/mm^2 dir. 10 mm NC ve 5 mm NC pistonlarının üst yüzeyinde kaplama yüzeyi ile piston yüzeyindeki sıcaklık farkından dolayı ısı akışı gerçekleşmektedir. Aynı zamanda kaplama yüzeyinden alt tabaka piston yüzeyine doğrudan bir ısı geçişi vardır. Isı iletim katsayısı PYSZ malzemesinde astar tabaka ve piston malzemesine göre küçük olduğu için ısının alt katmalara geçiş miktarı daha düşüktür. Piston yüzeyine TBC uygulaması yapılmasındaki amaçlardan biri kayıp ısı miktarını düşürmektir (Carmona 2014). Dört piston modeli içinde en az toplam ısı akısı olan tüm yüzey kaplı olan pistondur.

Attar ve Bhongade (Attar and Bhongade 2017) yaptıkları çalışmada piston üst yüzeyine 0.2; 0.4 ve 0.6 mm kalınlığında TBC işlemi gerçekleştirirken malzeme olarak YSZ kullanmışlardır. Zamandan bağımsız karalı hal için yaptıkları analizlerde kaplama kalınlığı 0,4 mm olduğunda en yüksek toplam ısı akısı 1.95 W/mm^2 , kaplama yüzeyinde 0.65 W/mm^2 ve kaplamasız pistonda 0.95 W/mm^2 tespit etmişlerdir. Bu çalışmada yapılan zamana bağlı termal analizler sonucunda benzer şekilde kaplama yüzeyindeki toplam ısı akısı alt tabaka piston yüzeyine ve kaplanmamış pistona göre daha düşüktür.

4.3.3. von-Mises gerilmesi



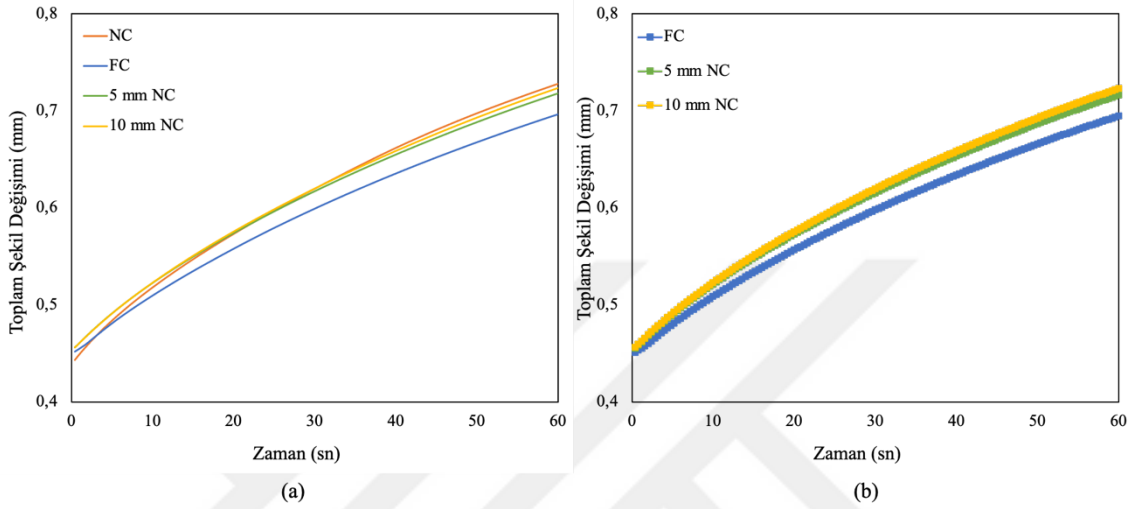
Şekil 4.22. (a) von-Mises gerilme değişimi (b) kaplama yüzeyindeki von-Mises gerilme değişimi (c) piston yüzeyindeki von-Mises gerilme değişimi

Piston modelleri için von-Mises gerilme değişimi Şekil 4.22’de verilmiştir. Piston yüzeyindeki von-Mises gerilme değişimi NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC pistonları için 60 saniye sonunda sırasıyla 2207 MPa, 2764 MPa, 2740 MPa ve 2293 MPa olarak tespit edilmiştir. Kaplama yüzeyindeki von-Mises gerilme değişimi 10 mm NC, 5 mm NC ve FC pistonları için 60 saniye sonunda sırasıyla 1383 MPa, 1313 MPa ve 1818 MPa olarak tespit edilmiştir. 5 mm NC ve 10 mm NC piston modellerinde kaplama ve piston yüzeyinde oluşan von-Mises gerilmeleri birbirine yakın tespit edilmiştir. Zamana bağlı termal analizler sonucunda 5 mm NC ve 10 mm NC piston modellerinin ulaştıkları en yüksek sıcaklıklarda birbirine yakın tespit edilmiştir.

Piston yüzeyindeki TBC yüzey alanı arttıkça kaplama yüzeyinde oluşan von-Mises gerilme değeri artış göstermiştir. En düşük gerilme değeri NC piston modelinde, kaplamalı piston modellerinde von-Mises gerilme değerleri kaplamasız piston modeline göre daha yüksek tespit edilmiştir. Dhayanidhi ve Sakthivel (Dhayanidhi and Sakthivel 2020) yaptıkları analizlerde kaplama malzemesi olarak zirkonyum kullandıklarında von-Mises gerilme değerini en yüksek 4564.8 MPa olarak bulmuşlardır. Piston yüzeyindeki en yüksek gerilme değerleri piston pim yuvasında tespit edilmiştir. Bu çalışmada olduğu gibi Baldissera ve Delprete’de (Baldissera and Delprete 2019) en yüksek von-Mises gerilme değerlerini piston pim yuvasında tespit etmişlerdir.

Yadav ve Mishra (Yadav and Mishra 2015) yaptıkları çalışmada sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirdikleri analizlerde kaplamasız pistonda 524.88 MPa, kaplama piston yüzeyinde 274.53 MPa von-Mises tespit etmişlerdir. Bu çalışmada olduğu gibi kaplama yüzeyindeki gerilme değerini piston yüzeyinden düşük tespit etmişlerdir.

4.3.4. Toplam şekil değişimi

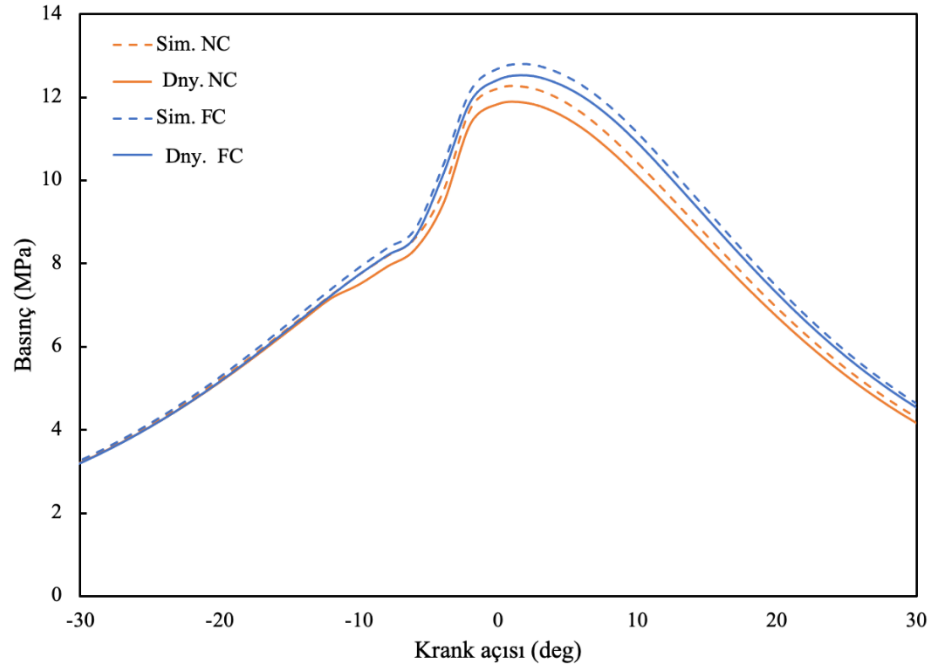


Şekil 4.23. (a) Toplam şekil değişimi (b) kaplamadaki toplam şekil değişimi

Farklı piston modellerindeki toplam şekil değişimi Şekil 4.23 (a)'da ve kaplama yüzeyinde oluşan toplam şekil değişimi Şekil 4.23 (b)'de gösterilmiştir. Piston yüzeyindeki toplam şekil değişimi NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC pistonları için sırasıyla 0.727mm, 0.723 mm, 0.718mm ve 0.696 mm olarak tespit edilmiştir. 10 mm NC, 5 mm NC ve FC pistonları için kaplama yüzeylerindeki toplam şekil değişimi sırasıyla 0.723 mm, 0.716 mm ve 0.694 mm olarak tespit edilmiştir.

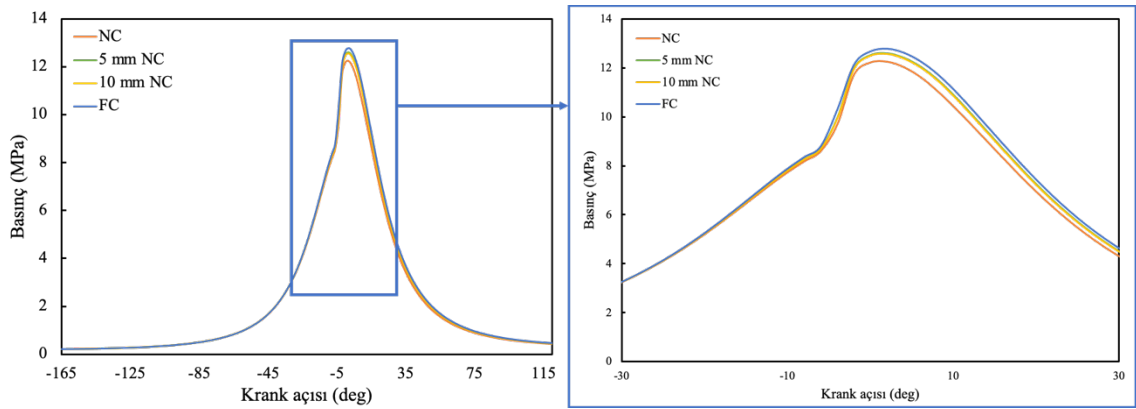
NC, 10 mm NC ve 5 mm NC pistonlarında toplam şekil değişimi birbirine yakın tespit edilirken, FC pistonu için toplam şekil değişimi değeri daha düşük tespit edilmiştir. Dört piston modeli içinde en yüksek şekil değişim oranı piston baş çevre kenarında tespit edilmiştir (Baldissera and Delprete 2019).

4.4. Yanma Analiz Sonuçları



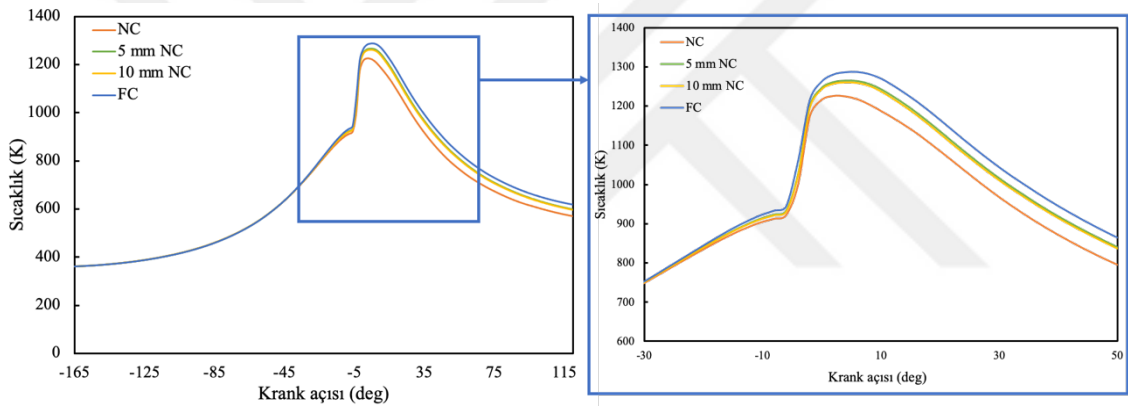
Şekil 4.24. NC ve FC pistonunun deneysel ve simülasyon basınç değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.24'te NC ve FC pistonu için gerçekleştirilen deneysel ve simülasyonlar sonucunda elde edilen basınç değerlerinin değişimi verilmiştir. Motorun silindir içi basınç değerleri FEBRİS yanma analizi paket programı kullanılarak okunmuştur. NC ve FC pistonunda deneysel ve simülasyon sonucunda elde edilen silindir içi basınç değerleri birbirini doğrular şekilde tespit edilmiştir. Piston yüzeyine termal bariyer kaplama uygulanması silindir içi basınç değerinde artışa neden olmuştur. FC pistonu TBC' nin yalıtım özelliğinden dolayı daha yüksek silindir içi basınç değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.25. Farklı piston modelleri için silindir içi basınç değerleri

Tüm simülasyon için toplam krank açısı olan -165 ile 115 derece arasındaki silindir içi basınç değerleri dört piston modeli için Şekil 4.25'te verilmiştir. Silindir içi en yüksek basınç değerleri NC pistonunda 12.24 MPa, 5 mm NC pistonunda 12.6 MPa, 10 mm NC pistonunda 12.5 MPa ve FC pistonunda 12.8 MPa olarak tespit edilmiştir. FC pistonunda NC pistonuna göre daha yüksek silindir içi basınç değeri gözlemlenmiştir. Kaplama yüzeyi miktarındaki artış silindir içi basınç değerlerinde artışa neden olmuştur. Periyannan ve diğ. (Periyannan et al. 2023) termal bariyer kaplama malzemesi olarak zirkonyum kullandıkları seramik kaplı pistonda aspir metil ester katkılı dizel yakıt ile gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda seramik kaplı pistonda silindir içi sıcaklığın artışına bağlı olarak silindir içi basınçta da artış tespit etmişlerdir. Yapılan bu çalışmada da silindir yüzeyindeki kaplama alanındaki artış ile silindir içi basınç değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

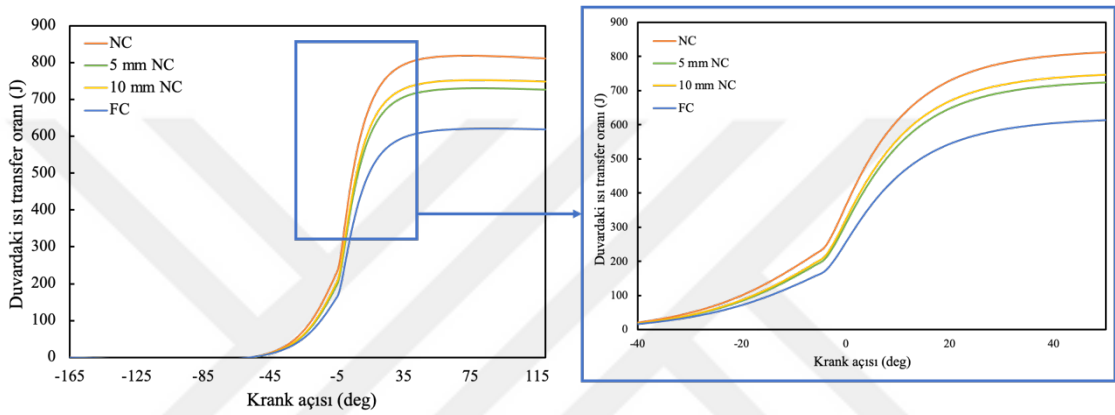


Şekil 4.26. Farklı piston modelleri için silindir içi sıcaklık değerleri

Şekil 4.26'da silindir içi sıcaklık değerleri dört piston modeli için verilmiştir. Silindir içi en yüksek sıcaklık değerleri NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC pistonları için sırasıyla 1225.4 K, 1261 K, 1265.2 K ve 1287 K olarak tespit edilmiştir. Silindir içi sıcaklık NC pistonunda en düşük olarak elde edilmiştir çünkü NC pistonda ısı kayıpları diğer pistonlu modellere göre daha fazladır. 5 mm NC ve 10 mm NC pistonlarının silindir içi sıcaklıkları birbirine yakın olurken en yüksek silindir içi sıcaklık değeri FC pistonlu modelde elde edilmiştir. Fei ve diğ. (C. Fei et al. 2022) YSZ kaplamalı piston modelinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışma sonucunda silindir içi sıcaklığında artış ve piston yüzeyindeki ısı transfer kayıplarında önemli bir azalma tespit etmişlerdir.

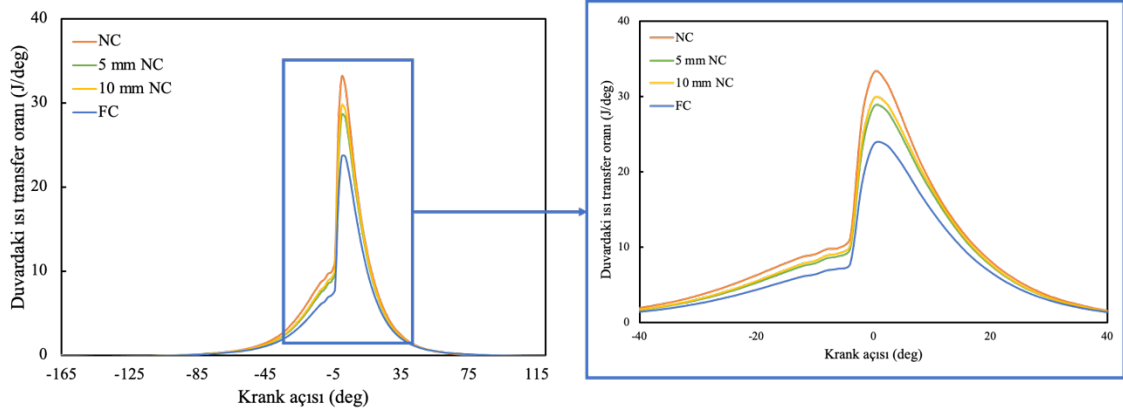
Şekil 4.27'de dört piston modeli için duvardaki ısı transfer oranının krank açısına göre değişimi verilmiştir. -45 °KA karşılık gelen duvardaki ısı transfer oranı NC, 10 mm

NC, 5 mm NC ve FC pistonu için sırasıyla 11, 9.4, 9.2 ve 8.8 J olarak tespit edilmiştir. 80 °KA duvardaki ısı transfer oranları 818, 752, 730 ve 621 J olarak sırasıyla NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC pistonları için tespit edilmiştir. 80 °KA dan sonra duvardaki ısı transfer miktarı sabit devam ediyor. Duvardaki en yüksek ısı transfer miktarı kaplamasız modelde ve en düşük miktar tüm yüzey kaplamalı modelde tespit edilmiştir. Kaplama işlemi uygulanan modellerde kaplama yüzey alanının azalmasıyla silindir içi sıcaklıklarda da düşüş gözlemlendi. Silindir içi sıcaklık değerlerinin düşüşü ısı transfer kayıplarının daha yüksek olmasından kaynaklanır.

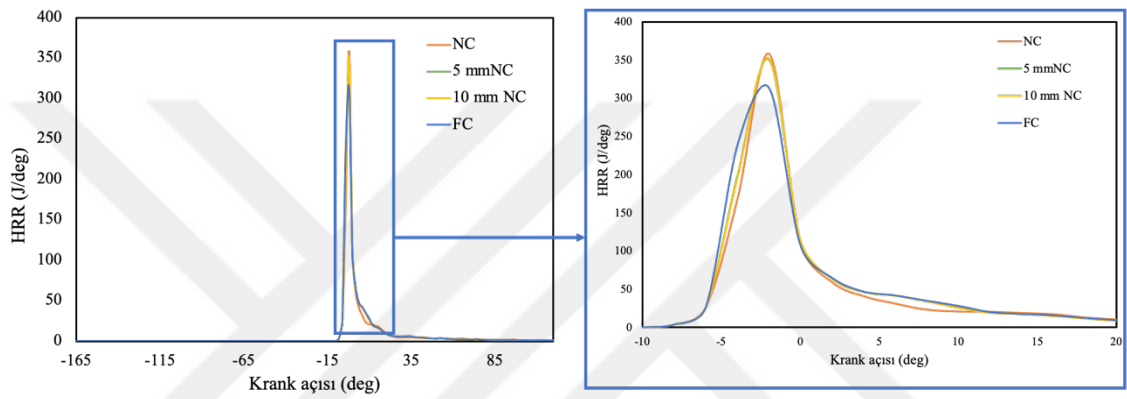


Şekil 4.27. Farklı piston modelleri için duvardaki ısı transfer oranı

Şekil 4.28'deki grafikte duvardaki ısı transfer oranı krank açısına bölünerek elde edilen grafik verilmiştir. 0 °KA'na karşılık gelen duvardaki ısı transfer oranı NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC pistonları için sırasıyla 33 J/deg, 29,6 J/deg, 28,6 J/deg ve 23,6 J/deg olarak gözlemlendi. 16 °KA'na karşılık gelen duvardaki ısı transfer oranı NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC pistonları için sırasıyla 11.3 J/deg, 10.8 J/deg, 10.7 J/deg ve 9.2 J/deg olarak gözlemlendi. Duvardaki ısı transfer oranlarında 0 °KA'ndan sonra düşüş gözlemlendi. 5 mm NC ve 10 mm NC modellerindeki duvardan ısı transfer miktarında benzer değişim gözlemlendi. En yüksek ısı transfer miktarı NC modelinde tespit edildi. 40 °KA'nda 1.56 J/deg, 1.43 J/deg, 1.44 J/deg ve 1.36 J/deg değerleri sırasıyla NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC modellerinde tespit edildi.

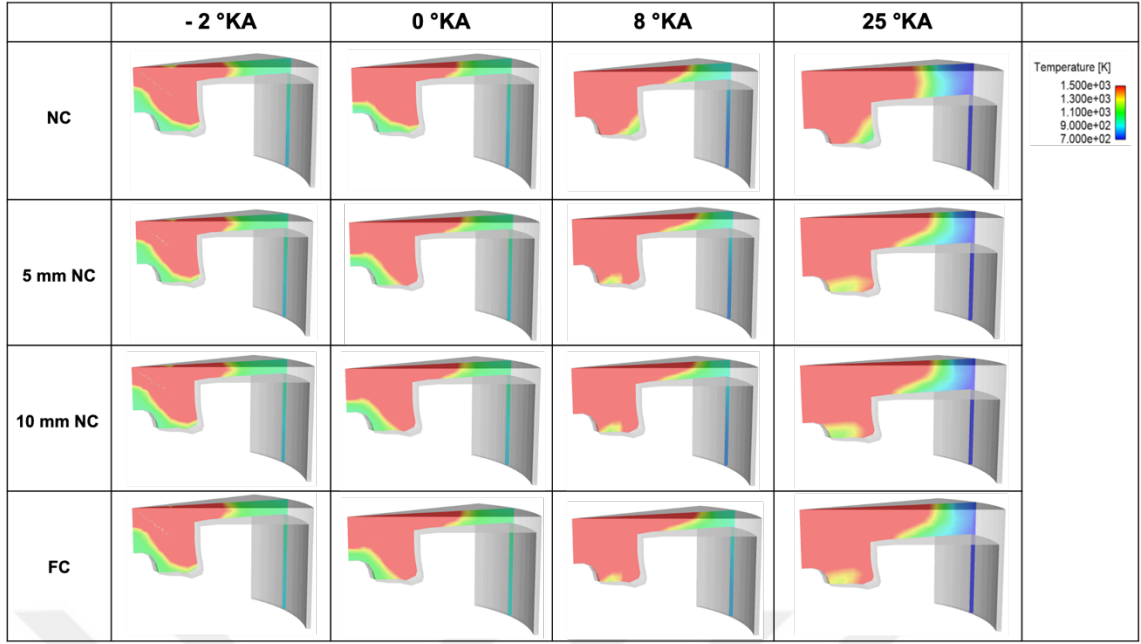


Şekil 4.28. Farklı piston modelleri için duvardaki ısı transferinin krank açısına oranındaki değişimi



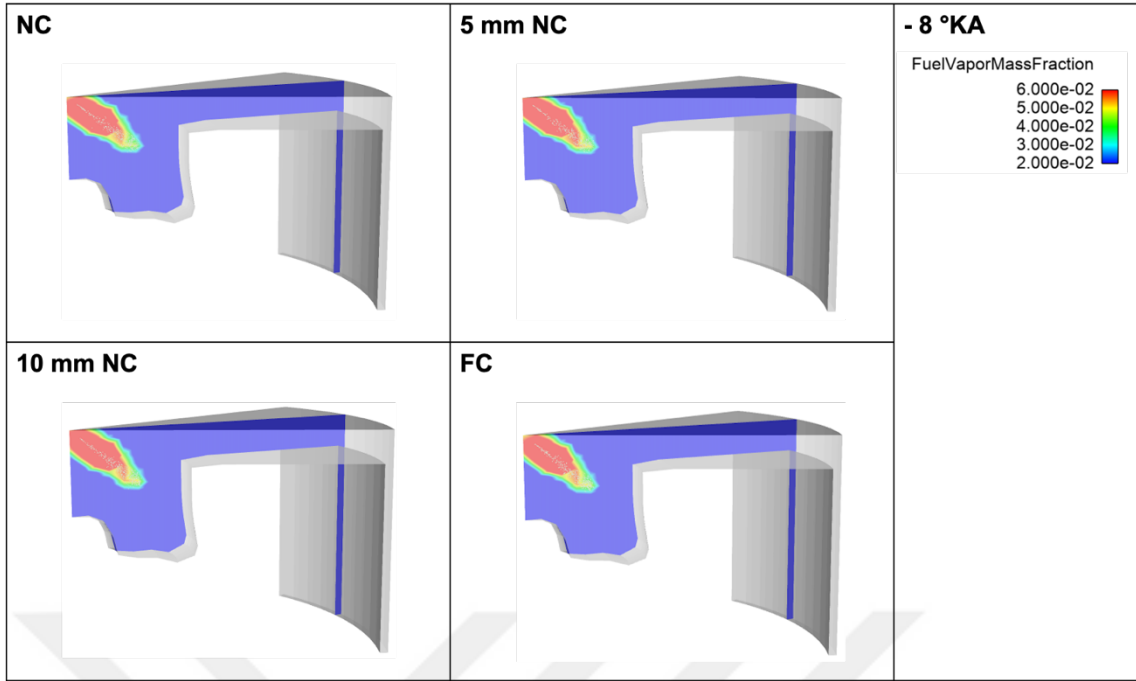
Şekil 4.29. Farklı piston modelleri için ısı salınım oranındaki değişim

Farklı piston modelleri için ısı salınım oranındaki değişim Şekil 4.29'da verilmiştir. En yüksek HRR değerleri bütün piston modelleri için -2°KA 'nda tespit edildi. HRR, NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC pistonları için sırasıyla 357.9 J/deg, 351.6 J/deg, 350.7 J/deg ve 313.1 J/deg olarak gözlendi. FC pistonun silindir içi sıcaklığı diğer pistonlara göre daha yüksek olduğu için ateşleme gecikmesi daha kısadır ve yanma erken başlar. Bu yüzden HRR oranı en düşük model FC olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.30. Farklı piston modelleri ve krank açısına göre silindir içi sıcaklık dağılımı

Farklı piston modelleri ve krank açısına göre silindir içi sıcaklık dağılımı Şekil 4.30'da verilmiştir. -2 °KA'na karşılık gelen silindir içi maksimum sıcaklık NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC pistonlar için sırasıyla 2307,8 K, 2323,9 K, 2328,2 K ve 2330 K olarak gözlemlenmiştir. 0 °KA'na karşılık gelen silindir içi maksimum sıcaklık NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC pistonlar için sırasıyla 2326 K, 2350,8 K, 2352,5 K ve 2361 K olarak gözlemlenmiştir. FC modeli için silindir içi sıcaklık dağılımının daha geniş bir alana yayıldığı ve yüksek olduğu görülmektedir. Yao ve diğ. (M. Yao et al. 2018) yaptıkları çalışma sonucunda yanma odasına TBC uygulandığında piston içindeki yüksek sıcaklık alanının genişlediğini tespit etmişlerdir. Kaplamalı piston modellerinde yanma odasının sıcaklık dağılımı kaplanmamış piston modelinden farklıdır. 8 °KA'na karşılık gelen silindir içi maksimum sıcaklık NC modelinde 2283 K, 10 mm NC modelinde 2297.7 K, 5 mm NC modelinde 2307 K ve FC piston modelinde 2318,5 K olarak gözlemlenmiştir.

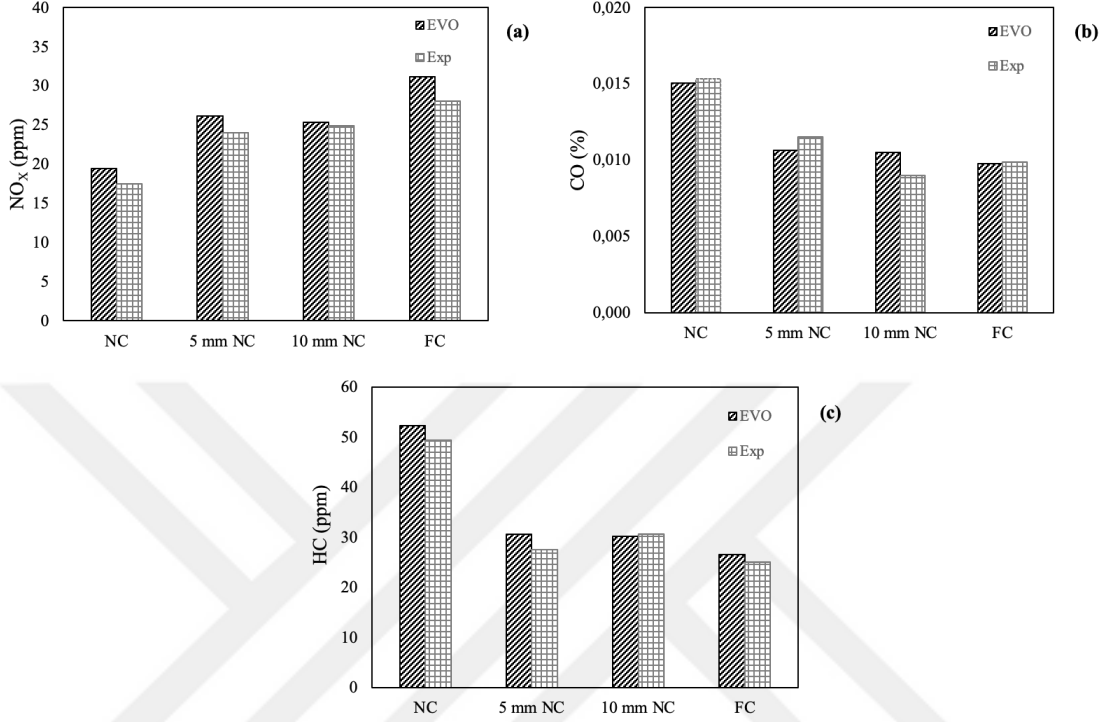


Şekil 4.31. Farklı piston modelleri için yakıt buharı kütle oranı dağılımı

Şekil 4.31’de farklı piston modelleri için yakıt buhar kütle oranının dağılımı gösterilmiştir. -8 °KA’na karşılık gelen yakıt buharı kütle oranı 0.17, 0.16, 0.159 ve 0.158 sırasıyla NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC piston modelleri için tespit edilmiştir.

Şekil 4.32’de TBC’nin egzoz emisyonlarına etkisi gösterilmiştir. EVO (egzoz valfi açık) emisyonu simülasyon sonucunda elde edilen değerleri ve Exp. Deneysel sonuçları temsil eder. NO_x değerinin simülasyon sonuçları NC piston modelinde 19.44 ppm, 10 mm NC de 26.26 ppm, 5 mm NC de 25.36 ppm ve FC de 31.14 ppm olarak gözlemlendi. Hem deneysel hem de simülasyon sonuçlarında en yüksek NO_x değeri tamamen kaplanmış pistonda belirlenmiştir. Farklı piston modellerinde emisyon verileri için simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum bulunmuştur. Piston modellerindeki TBC yüzey alan miktarı arttıkça EVO ve deneysel sonuçlarda el edilen NO_x emisyonu artarken CO ve HC emisyonları azalmaktadır. CO değerinin simülasyon sonuçları NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC için sırasıyla 0.015, 0.011, 0.010 ve 0.009 olarak tespit edilmiştir. Hem deneysel hem de simülasyon sonuçlarında en yüksek CO ve HC değerleri kaplanmamış pistonda belirlendi. Wang ve diğ. (Wang et al. 2021) TBC’nin ısı iletkenliği azaldıkça CO ve HC emisyonları azalırken NO_x emisyonları arttığını tespit etmişlerdir. Abbas ve Elayaperumal (S. M. Abbas and Elayaperumal 2019) yaptıkları çalışmada TBC’nin ısı iletkenliği azaldıkça NO_x emisyonları artarken duman yoğunluğu, karbon monoksit, karbon dioksit ve hidrokarbon emisyonlarının azaldığını tespit

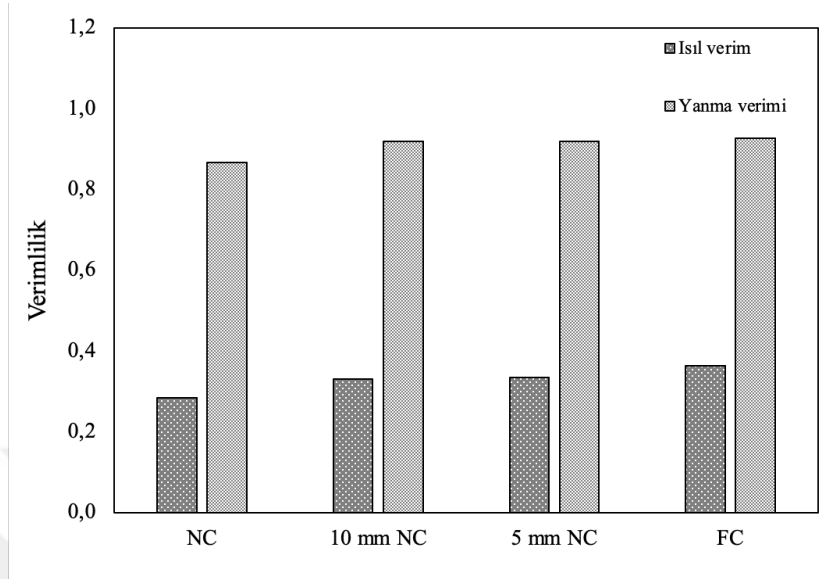
etmişlerdir. Bu çalışmada literatürdeki çalışmalara benzer sonuçlar elde edilmiştir. NO_x emisyonu kaplama yüzey alanı arttıkça artmıştır ve CO emisyonunun düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 4.32. TBC'nin egzoz emisyonları üzerindeki etkisi (a) NO_x (b) CO (c) HC

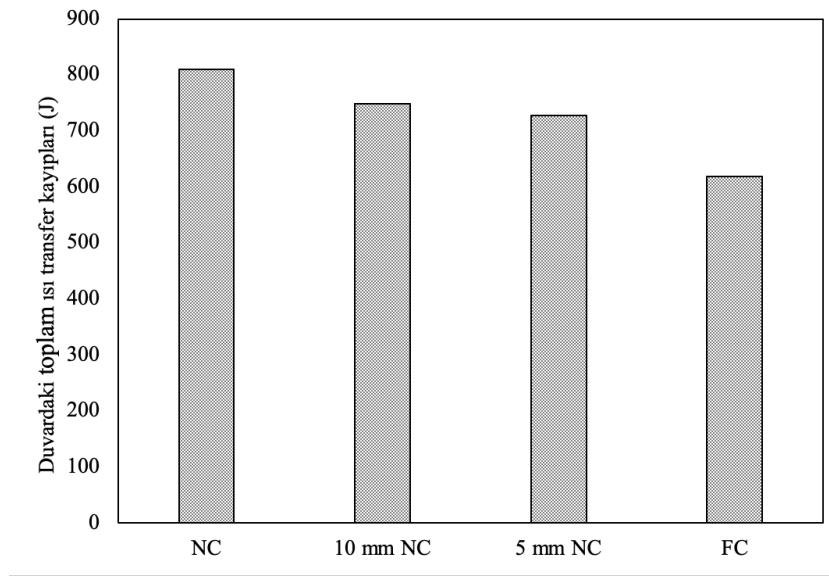
Şekil 4.33'te piston yüzeyine uygulanan TBC'nin termal verim ve yanma verimine etkisi gösterilmiştir. Termal verim değerleri NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC piston modelleri için sırasıyla 0.285, 0.331, 0.336 ve 0.364 olarak tespit edilmiştir. Piston yüzeyine uygulanan kaplama alanı arttıkça termal verim değerlerinde artış gözlemlenmiştir. En düşük termal verim kaplamasız pistonda gözlemlenirken, en yüksek termal verim tüm yüzey kaplı pistonda gözlemlenmiştir. 5 mm NC ve 10 mm NC pistonlarında birbirine yakın termal verim değerleri tespit edilmiştir. NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC modellerinin yanma verimleri sırasıyla 0.869, 0.919, 0.921 ve 0.928 tespit edilmiştir. En düşük yanma verimi kaplamasız pistonda, en yüksek yanma verimi tüm yüzey kaplı pistonda tespit edilmiştir. FC piston modelinde kayıp ısı oranının düşük olmasından dolayı piston iç sıcaklığındaki artış yanmayı iyileştirmiştir. Hem yanma verimi hem de termal verim silindir içi sıcaklığı artışı ve ısı transfer oranı düştüğü zaman artmıştır. Simülasyonlar sonucunda piston yüzeyine kaplama uygulandığı zaman termal verimde

%6.7 artış tespit edilmiştir. Ma ve diğ. (Ma et al. 2021) düşük yüklerde termal verimdeki artışı %5.1 ve yüksek yüklerde %7.3 olarak tespit etmişlerdir.



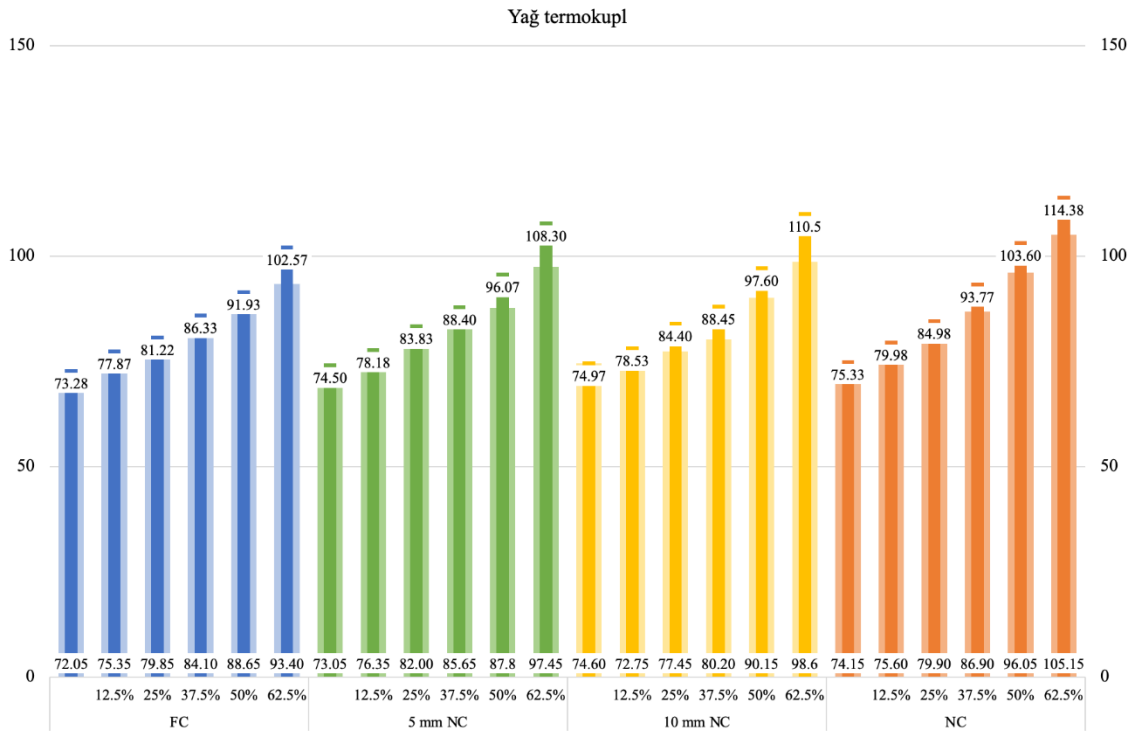
Şekil 4.33. TBC'nin verimlilik üzerindeki etkisi

TBC'nin farklı piston modelleri için duvardaki ısı transfer kayıplarındaki değişimi Şekil 4.34'te verilmiştir. Piston yüzeyindeki kaplama alanı arttıkça duvardaki toplam ısı transfer kayıplarında düşüş gözlenmiştir. En düşük duvardaki toplam ısı transfer kayıpları FC modelinde ve en yüksek değer NC pistonunda gözlemlenmiştir. NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC piston modelleri için duvardaki toplam ısı transfer kayıpları sırasıyla 810.6 J, 748.5 J, 727 J ve 619.3 J olarak tespit edilmiştir. Farklı piston modelleri için yapılan simülasyonlar sonucunda soğutma kayıp oranları NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC modelleri için sırasıyla 0.39, 0.34, 0.33 ve 0.28 bulunmuştur. Piston yüzeyindeki kaplama alanı arttıkça soğutmadaki kayıp oranı düşmüştür.



Şekil 4.34. TBC'nin duvardaki toplam ısı transfer kayıplarına etkisi

4.5. Termokupl Sonuçları



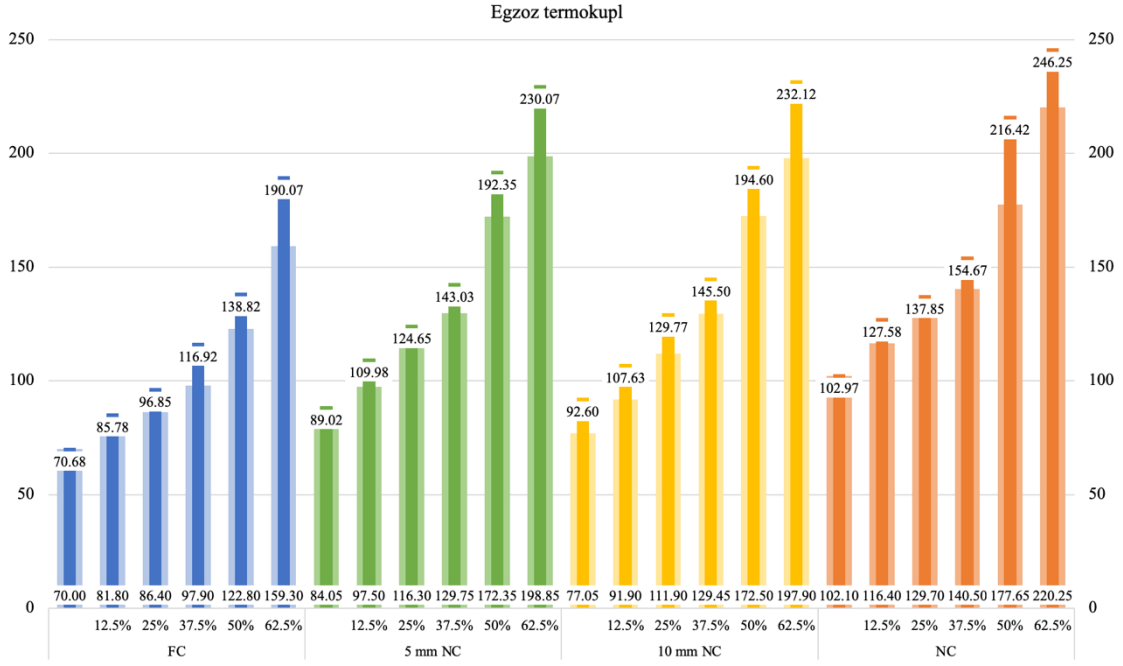
Şekil 4.35. Dört piston modeli için yağ termokupl verileri

Şekil 4.35’de dört piston modeli için deneyler sonucunda elde edilen yağ termokupl verileri gösterilmiştir. Motor %12.5 yük altında çalıştırıldığında NC pistonunda ilk okunan değer 75.6 °C beş dakikanın sonunda sıcaklık 79.98 °C olarak tespit edilmiştir. %12.5 yük altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda FC, 5 mm NC ve 10

mm NC pistonu için sırasıyla 77.87 °C, 78.18 °C ve 78.53 °C sıcaklık değerleri tespit edilmiştir. %12.5 yük için en yüksek yağ sıcaklığı NC pistonunda en düşük sıcaklık değeri FC pistonunda tespit edilmiştir. Kademeli kaplama uygulanan 5 mm NC ve 10 mm NC pistonlarında sıcaklık değerleri birbirine yakın tespit edilmiştir. NC pistonunda ilk an ile beşinci dakikanın sonunda okunan sıcaklık değeri arasındaki fark %12.5 yük altında 4.38 °C, %25 yük altında 5.08 °C, %37.5 yük altında 6.87 °C, %50 yük altında 7.55 °C ve %62.5 yük altında 9.23 °C tespit edilmiştir. 10 mm NC pistonunda sıcaklık farkları %12.5, %25, %37.5, %50 ve %62.5 yük değerleri için sırasıyla 5.78 °C, 6.95 °C, 8.25 °C, 9.45 °C ve 9.9 °C olarak gözlemlenmiştir. 5 mm NC pistonunda artan yük değerleri için sıcaklık farkları 1.83 °C, 2.8 °C, 2.75 °C, 8.27 °C ve 10.85 °C olarak tespit edilmiştir. FC pistonunda sıcaklık farkları %12.5, %25, %37.5, %50 ve %62.5 yük değerleri için sırasıyla 1.52 °C, 1.37 °C, 2.23 °C, 3.28 °C ve 9.17 °C olarak gözlemlenmiştir.

Motor %50 yük altında çalıştırıldığı zaman beş dakika sonunda sıcaklık değerleri NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC pistonları için 103.6 °C, 97.6 °C, 96.07 °C ve 91.93 °C olarak tespit edilmiştir. Piston yüzeyindeki kaplama alanı arttıkça yağda okunan sıcaklık değeri azalmıştır. Bu durum TBC işlemi sayesinde ısı kayıplarının azalarak sıcaklığın piston içinde tutulmasıyla açıklanır.

Motor %62.5 yük altında çalıştırıldığı zaman 9.17 °C, 10.85 °C, 9.90 °C ve 9.23 °C sıcaklık farkları sırasıyla FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonları için gözlemlenmiştir. Bu yük altında FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonları için beş dakikanın sonunda sıcaklık değerleri sırasıyla 102.57 °C, 108.30 °C, 110.5 °C ve 114.38 °C gözlemlenmiştir. En yüksek sıcaklık değeri kaplamasız pistonda, en düşük sıcaklık değeri tüm yüzey kaplı pistonda tespit edilmiştir.



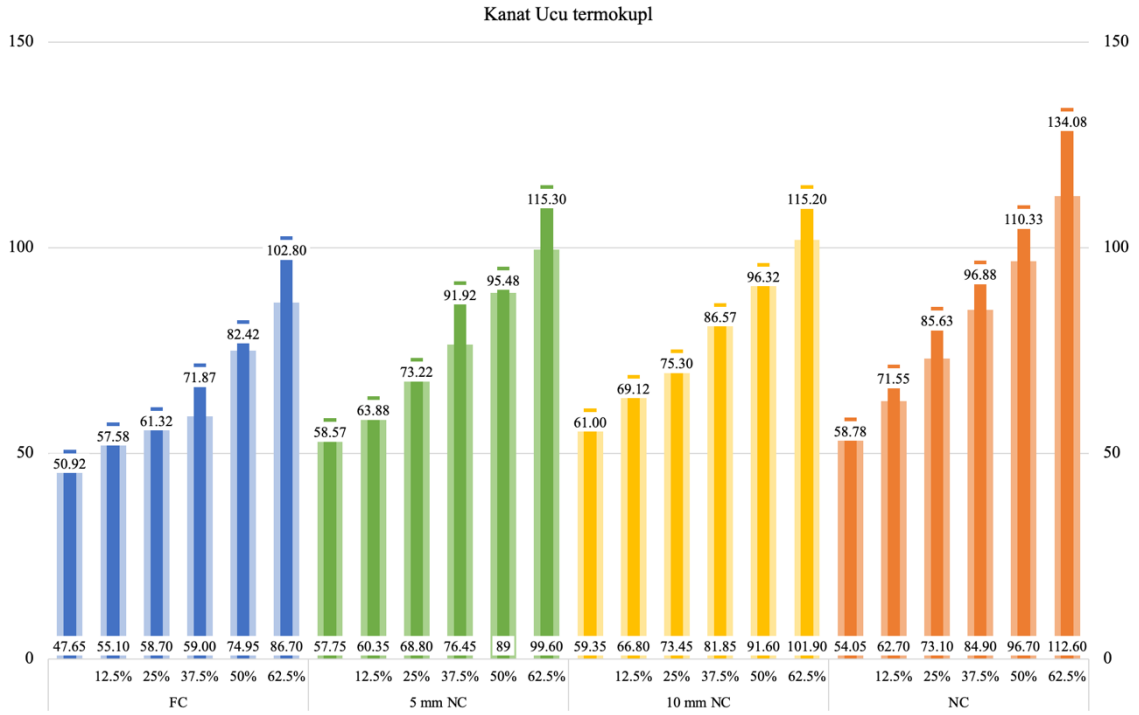
Şekil 4.36. Dört piston modeli için egzoz termokupl verileri

Dört piston modeli için tespit edilen egzoz termokupl verileri Şekil 4.36’da verilmiştir. Motor yüksüz durumda çalıştırıldığında FC, 5mm NC, 10 mm NC ve NC pistonlarında egzoz termokuplundan okunan sıcaklık değerleri 70.68 °C, 89.02 °C, 92.6 °C ve 102.97 °C tespit edilmiştir. Kaplama yüzey alanı arttıkça egzoz termokupl sıcaklık değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. %25 yük altında sıcaklık değerleri FC pistonunda 86.40 °C’ den 96.85 °C, 5 mm NC pistonunda 116.3 °C’ den 124.65 °C, 10 mm NC pistonunda 111.9 °C’ den 129.77 °C ve NC pistonunda 129.7 °C’ den 137.85 °C sıcaklığa yükseldiği tespit edilmiştir.

%37.5 yük altında çalıştırılan NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC pistonlarında sıcaklık değerleri 14.17 °C artışla 154.67 °C’ ye, 16.05 °C artışla 145.5 °C’ ye, 13.28 °C artışla 143.03 °C’ ye ve 19.02 °C artışla 116.92 °C’ ye yükselmiştir. Bu yük durumunda en yüksek artış FC pistonunda gözlemlenmiştir.

Motor %50 yük altında çalıştırıldığında sıcaklık değerleri NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC pistonları için 216.42 °C, 194.6 °C, 192.35 °C ve 138.82 °C olarak tespit edilmiştir. En yüksek değer olan NC pistonu ile en düşük değer olan FC pistonu arasında 77.6 °C fark tespit edilmiştir. 5 mm NC ve 10 mm NC pistonlarında egzoz sıcaklık değerleri ısı transfer kayıplarının ve yanma verimindeki benzer sonuçlardan dolayı benzerlik göstermiştir.

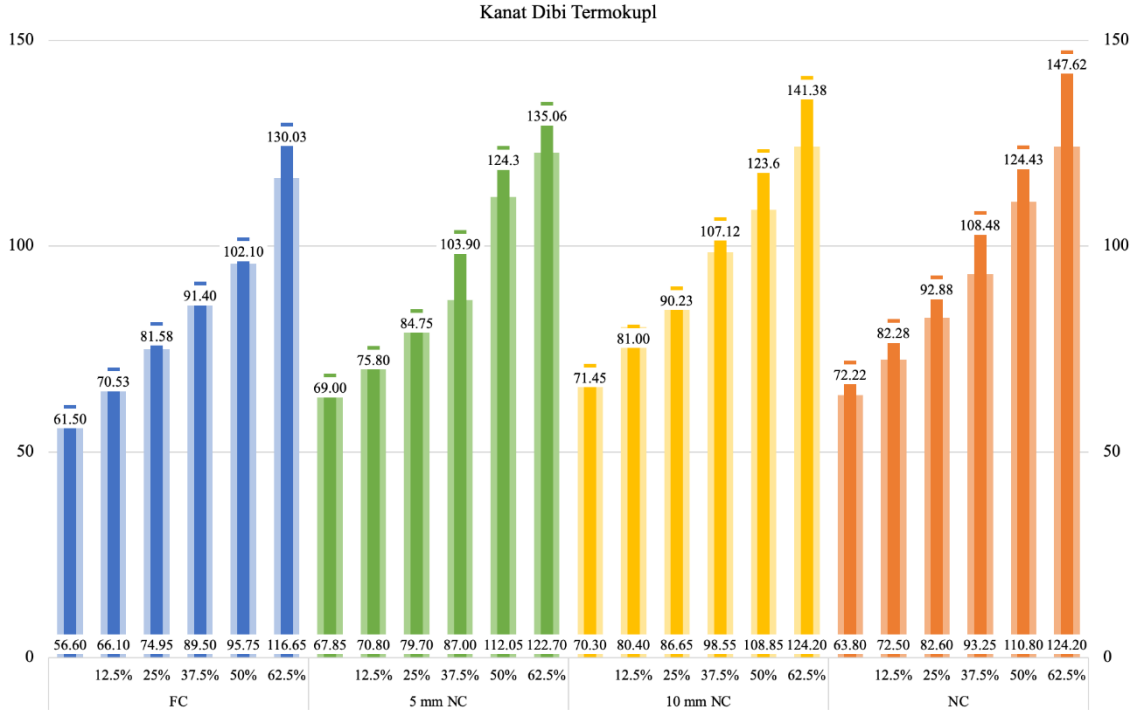
%62.5 yük altında yapılan deneyler sonucunda FC pistonunda 30.77 °C artışla sıcaklık 190.07 °C, 5 mm NC pistonunda 31.22 °C artışla sıcaklık 230.07 °C, 10 mm NC pistonunda 34.22 °C artışla sıcaklık 232.12 °C ve NC pistonunda 26 °C artışla sıcaklık 246.25 °C olarak tespit edilmiştir. NC pistonunda ısı transfer kayıplarının yüksek olmasına bağlı olarak egzoz gaz sıcaklığı kaplamalı piston modellerine göre yüksek tespit edilmiştir.



Şekil 4.37. Dört piston modeli için kanat ucu termokupl verileri

Şekil 4.37’de dört piston modeli için kanat ucu sıcaklık değerlerindeki değişim verilmiştir. Motor %62.5 yük altında çalıştırıldığında FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonları için kanat ucu sıcaklık değerleri 102.8 °C, 115.3 °C, 115.2 °C ve 134.08 °C tespit edilmiştir. %50 yük altında kanat ucu sıcaklık değerleri 82.42 °C, 95.48 °C, 96.32 °C ve 110.33 °C olarak sırasıyla FC, 5mm NC, 10 mm NC ve NC pistonları için tespit edilmiştir. Bütün yük değerleri için en yüksek kanat ucu sıcaklık değerleri NC pistonunda, en düşük kanat ucu sıcaklık değerleri FC pistonunda tespit edilmiştir.

Motor yüksüz durumda çalıştırıldığında en düşük değer 50.92 °C ile FC pistonunda, 5 mm NC pistonunda 58.57 °C, 10 mm NC pistonunda 61 °C ve NC pistonunda 58.78 °C olarak tespit edilmiştir. %25 yük altında FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonlarında kanat ucu sıcaklık değerleri 61.32 °C, 73.22 °C, 75.30 °C ve 85.63 °C gözlemlenmiştir.

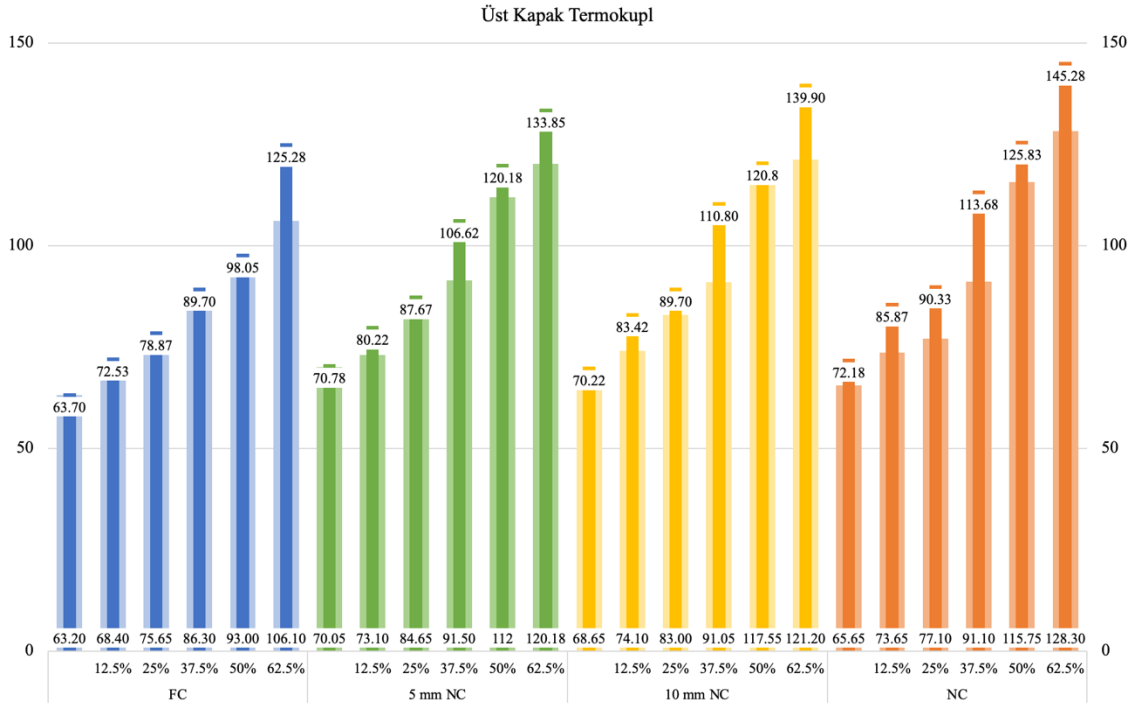


Şekil 4.38. Dört piston modeli için kanat dibi termokupl verileri

Şekil 4.38’de dört piston modeli için kanat dibi sıcaklık değerleri gösterilmiştir. FC pistonu yüksüz, %12.5, %25, %37.5, %50 ve %62.5 yükleme şartlarında motor çalıştırıldığında 61.50 °C, 70.53 °C, 81.58 °C, 91.4 °C, 102.1 °C ve 130.03 °C sıcaklıklar tespit edilmiştir.

Motor %62.5 yük altında çalıştırıldığında NC, 10 mm NC ve 5 mm NC pistonlarında sırasıyla 147.62 °C, 141.38 °C ve 135.06 °C sıcaklık gözlemlenmiştir. NC, 10 mm NC ve 5 mm NC pistonları %50 yüklü durumda çalıştırıldığında 124.43 °C, 123.6 °C ve 124.3 °C sıcaklık tespit edilmiştir. Motor %50 yük altında çalıştırıldığında kademeli kaplama yapılan pistonların ve kaplamasız pistonun kanat dibi sıcaklığı birbirine yakın tespit edilmiştir.

NC pistonunda yüksüz, %12.5, %25 ve %37.5 yükleme durumlarında sırasıyla 72.22 °C, 82.28 °C, 92.88 °C ve 108.48 °C kanat dibi sıcaklığı gözlemlenmiştir. 10 mm NC pistonu için 71.45 °C, 81 °C, 90.23 °C ve 107.12 °C kanat dibi sıcaklıkları sırasıyla yüksüz, %12.5, %25 ve %37.5 yükleme durumları için tespit edilmiştir. 5 mm NC pistonunda yüksüz, %12.5, %25 ve %37.5 yük altında motor çalıştırıldığında 69 °C, 75.8 °C, 84.75 °C ve 103.9 °C kanat dibi sıcaklığı tespit edilmiştir.

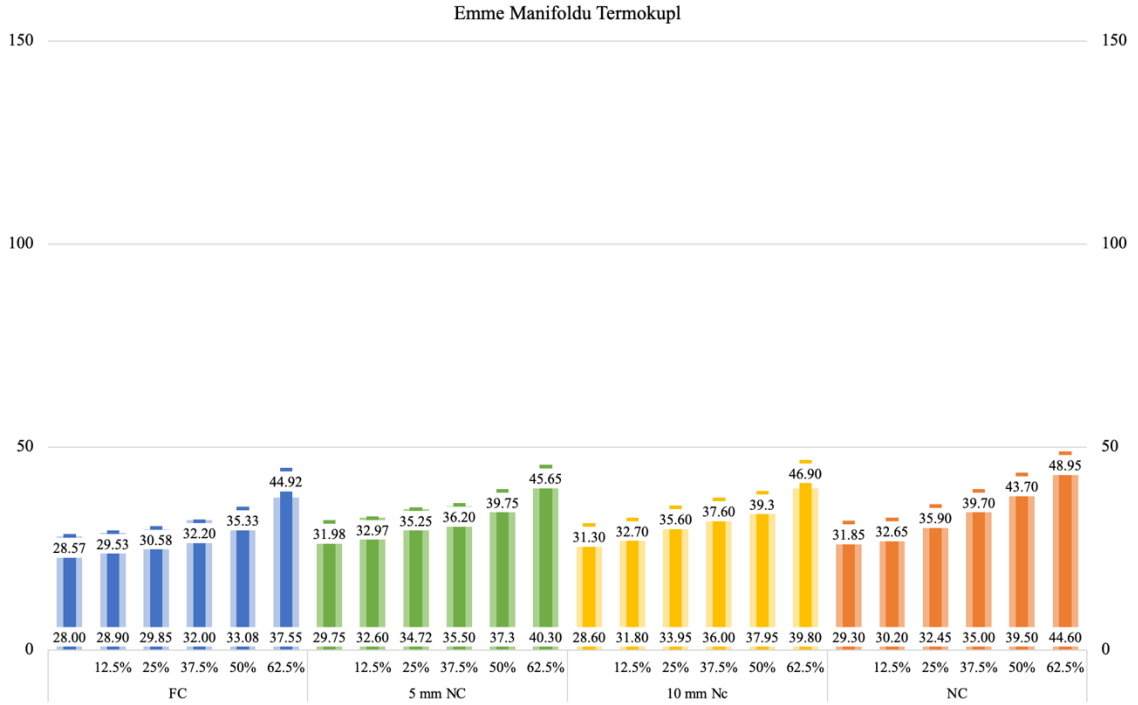


Şekil 4.39. Dört piston modeli için üst kapak termokupl verileri

Dört piston modelinin üst kapak sıcaklık değerleri Şekil 4.39’ da verilmiştir. FC pistonu için yüksüz, %12.5, %25, %37.5, %50 ve %62.5 yükleme durumları için ilk sıcaklıkla beşinci dakikadaki sıcaklık arasında 0.5 °C, 4.13 °C, 3.22 °C, 3.4 °C, 5.05 °C ve 19.18 °C fark tespit edilmiştir.

5 mm NC pistonu için %37.5 yükte 15.12 °C, %50 yükte 8.18 °C ve %62.5 yükte 13.67 °C sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. 10 mm NC pistonu için %37.5 yükte 19.75 °C, %50 yükte 3.25 °C ve %62.5 yükte 18.7 °C sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. NC pistonu için %37.5 yükte 22.58 °C, %50 yükte 10.08 °C ve %62.5 yükte 16.98 °C sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. 5 mm NC, 10 mm NC ve NC piston modelleri için bu üç yükleme durumunda benzerlik tespit edilmiştir. Motor %50 yük altında çalıştırıldığında sıcaklık farkında düşüş ve en yüksek sıcaklık farkının %37.5 yükleme şartı için olduğu gözlemlenmiştir.

Motor %62.5 yükleme durumunda çalıştırıldığında FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonları için üst kapak sıcaklıkları 125.28 °C, 133.85 °C, 139.9 °C ve 145.28 °C tespit edilmiştir. %50 yükleme durumunda FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC pistonları için üst kapak sıcaklıkları 98.05°C, 120.18 °C, 120.8 °C ve 125.83 °C gözlemlenmiştir. Diğer sıcaklık değerlerinde olduğu gibi en yüksek sıcaklıklar NC pistonunda tespit edilmiştir. Piston yüzey kaplama oranı arttıkça üst kapak sıcaklık değerinde düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 4.40. Dört piston modeli için emme manifoldu termokupl verileri

Şekil 4.40’da dört piston modeli için emme manifoldundaki sıcaklık değişimlerini gösteren grafik verilmiştir. Motor %62.5 yük altında çalıştırıldığında FC pistonu 28.57 °C’ den 35.33 °C sıcaklığa, 5 mm NC pistonu 31.98 °C’ den 39.75 °C sıcaklığa, 10 mm NC pistonu 31.30 °C’ den 39.30 °C sıcaklığa ve NC pistonu 31.85 °C’ den 43.70 °C sıcaklığa yükselmiştir. NC pistonu sırasıyla yüksüz, %12.5, %25, %37.5 ve %50 yükte çalıştırıldığında 31.85 °C, 32.65 °C, 35.90 °C, 39.70 °C ve 43.70 °C sıcaklık değerleri tespit edilmiştir. 10 mm NC pistonu sırasıyla yüksüz, %12.5, %25, %37.5 ve %50 yükte çalıştırıldığında 31.30 °C, 32.70 °C, 35.60 °C, 37.60 °C ve 39.30 °C sıcaklık değerleri gözlemlenmiştir.

5 mm NC pistonunda yüksüz durumda 31.98 °C sıcaklığa, %12.5 yükte 32.97 °C, %25 yükte 35.25 °C, %37.5 yükte 36.20 °C ve %50 yükte 39.75 °C sıcaklıklar tespit edilmiştir. Kademeli yapılan piston modellerinde altı yük durumu için elde edilen sıcaklıklar birbirine yakın tespit edilmiştir.

FC pistonu yüksüz, %12.5, %25, %37.5 ve %50 yük altında çalıştırıldığında emme manifoldunda 28.57 °C, 29.53 °C, 30.58 °C, 32.20 °C ve 35.33 °C sıcaklık değerleri gözlemlenmiştir. Emme manifoldunda tespit edilen sıcaklıklar piston yüzeyindeki

kaplama yüzey alanı arttıkça düşmektedir. En yüksek sıcaklıklar NC pistonunda tespit edilmiştir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada içten yanmalı bir dizel motorda termal bariyer kaplama yüzey alanının motor performans ve emisyon değerlerine etkisi deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılmıştır. Deney ve analizler sonucunda elde edilen bulgular maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- Gerçekleştirilen deneyler sonucunda CO₂ emisyon değerleri dört piston modeli için %50 yük değerine kadar artış gösterirken %62.5'lik yükleme durumunda CO₂ emisyon değerlerinde ani düşüş gözlenmiştir. Kademeli kaplama modelleri benzer bir eğilim gösterirken CO₂ emisyon değerleri FC ve NC piston modellerinin aralığında tespit edilmiştir. 5 mm NC, 10 mm NC ve NC piston modellerinde yüksüz ve %12.5'lik yükleme koşullarında çok yakın değerler tespit edilmiştir.
- FC, 5 mm NC, 10 mm NC ve NC piston modelleri için CO emisyon değerleri yüksüz, %12.5, %25 ve %37.5 yükleme koşullarında birbirine yakın değerler, %50 yükleme koşulunda en düşük CO emisyon değeri %0.07 ile FC piston modelinde gözlemlenmiştir. Yanmadaki CO emisyon verilerini etkileyen en önemli faktör H/Y karışımıdır. Dört piston modeli için %62.5'lik yükleme durumunda eksik yanmanın gerçekleşmesiyle CO değerlerinde artış gözlenmiştir.
- Dört piston modeli için yüksüz durumdan orta ve üst yükleme durumlarına kadar HC emisyon değerleri birbirine yakın tespit edilmiştir. %62.5'lik yükleme koşulunda en yüksek piston içi sıcaklık değeri FC pistonunda tespit edilmesine rağmen en yüksek HC emisyon değeri de FC piston modelinde gözlemlenmiştir. Piston içi sıcaklık artmasına rağmen eksik yanma ve piston içindeki yetersiz O₂ miktarına bağlı olarak HC emisyon değerinde artış gözlenmiştir.
- FC, 5 mm NC ve 10 mm NC piston modelleri için yüksüz, %12.5, %25 ve %37.5 yükleme koşullarında NO_x değerlerinde artış, %50 ve %62.5'lik yükleme koşullarında düşüş tespit edilmiştir. Yükleme durumu arttıkça NO_x değerlerinde artış yanma odasının sıcaklığının artmasıyla açıklanabilir. Fakat aşırı yükleme koşullarında yanma için gerekli olan O₂ miktarı hacimsel verimdeki azalma ile azalmıştır. NC pistonunda NO_x emisyon değerindeki

düşüş sadece %62.5'lik yükleme şartında gözlemlenmiştir. Bununla sebebi piston içi sıcaklığın kaplamalı piston modellerine göre düşük olmasıyla açıklanabilir.

- FC ve NC piston modellerinin yakıt tüketim miktarları yüksüz ve %50'lik yükleme koşuluna kadar benzerlik göstermektedir. %62.5'lik yükleme koşullarında FC piston modelindeki yakıt tüketimi NC pistonundan yüksektir. %37.5, %50 ve %62.5'lik yükleme koşullarında en yüksek yakıt tüketimi 10 mm NC piston modelinde tespit edilmiştir.
- Zamana bağlı termal analizler sonucunda NC pistonunda piston üst yüzey sıcaklığı 527.19 °C, FC pistonunda kaplama yüzey sıcaklığı 574.31 °C ve piston üst yüzey sıcaklığı 503.91 °C, 5 mm NC pistonunda kaplama yüzeyinin sıcaklığı 528.95 °C ve piston üst yüzey sıcaklığı 510.7 °C, 10 mm NC pistonunda kaplama yüzey sıcaklığı 529.77 °C ve piston üst yüzey sıcaklığı 513.96 °C olarak tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda 1500 çevrimin sonunda FC piston modelinde tüm yüzeyin kaplı olmasından dolayı en yüksek sıcaklık tespit edilirken kademeli piston modelleri ve kaplamasız piston için sıcaklık değerleri birbirine yakın tespit edilmiştir.
- Zamana bağlı termal analizler sonucunda FC pistonu için normalize edilmiş mesafedeki zamana bağlı sıcaklık değişiminde 15. saniyede 488.55 °C, 30. saniyede 525.68 °C, 45. saniyede 554.33 °C ve 60. saniye sonunda sıcaklık değeri 574.31 °C'ye ulaşmıştır. Aynı mesafedeki normalize edilmiş astar tabakadaki sıcaklık değerleri 15. saniyede 413.32 °C, 30. saniyede 453.94 °C, 45. saniyede 485.54 °C ve 60. saniyede 511.93 °C olarak tespit edilmiştir. alt tabaka piston yüzeyindeki normalide edilmiş mesafedeki zamana bağlı sıcaklık değişimi 15. saniyede 413.59 °C, 30. saniyede 454.23 °C, 45. saniyede 485.85 °C ve 60. saniyede 512.26 °C olarak tespit edilmiştir. Alt tabaka ve astar tabaka sıcaklık değerleri birbirine çok yakın olarak tespit edilmiştir.
- Analizler sonucunda piston yüzeyindeki sıcaklık değişimine piston içi sıcaklık değişiminin etkili olduğu görülmüştür. Her bir çevrim için sıcaklıkta bir pik noktası daha sonra bir miktar düşme gözlemlenmiştir. İlk beş çevrim için pistonun üst tabakasındaki sıcaklık artışı NC, FC, 5 mm NC ve 10 mm NC pistonları için sırasıyla 11.58 °C, 65.63 °C, 49.49 °C ve 48.24 °C tespit

edilmiştir. Son beş çevrim için üst tabakadaki sıcaklık değişimi $0.41\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2.51\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $1.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerleri sırasıyla NC, FC ve kademeli kaplama uygulanan piston modelleri için tespit edilmiştir.

- 1500 çevrim sonunda NC, FC, 5 mm NC ve 10 mm NC için toplam ısı akısındaki değişim en yüksek ısı akısı piston tacının dibinde NC piston modeli için 0.71462 W/mm^2 , FC pistonunda 0.65372 W/mm^2 , 5 mm NC pistonunda 0.70343 W/mm^2 ve 10 mm NC pistonunda en yüksek ısı akısı yanma haznesinin içindeki piston tacının alt bölgelerinde 0.73154 W/mm^2 dir.
- Gerçekleştirilen zamana bağlı termal analizler sonucunda en yüksek ısı akısı değeri dört piston modeli içinde yanma haznesindeki piston tacının dibinde tespit edilmiştir. En düşük ısı akısı değeri termal bariyer kaplamanın etkisiyle FC pistonunda, en yüksek ısı akısı değeri de NC pistonunda gözlemlenmiştir.
- İlk çevrimlerde piston içindeki sıcaklık farkındaki değişim daha yüksek olduğu için toplam ısı akısındaki değişimde dalgalanmalar son çevrimlere göre daha yüksektir. İlk çevrim için toplam ısı akısındaki değişim miktarı kademeli olan 5 mm NC ve 10 mm NC pistonlarında 2.8073 W/mm^2 ve 3.9357 W/mm^2 olarak en yüksek değerler tespit edilmiştir. Toplam ısı akısı NC pistonunda 0.9496 W/mm^2 ve FC pistonunda 0.7563 W/mm^2 olarak tespit edilmiştir. En düşük toplam ısı akısı değişim tüm yüzey kaplamalı piston modelinde tespit edilmiştir.
- Yanma simülasyonları sonucunda silindir içi basınç değerleri NC, 5 mm NC, 10 mm NC ve FC pistonlarında sırasıyla 12.24 MPa , 12.6 MPa , 12.5 MPa ve 12.8 MPa olarak tespit edilmiştir. Kaplama yüzey alanı arttıkça silindir içi basınç değerinde artış gözlemlenmiştir. En yüksek silindir içi basınç değeri tüm yüzey kaplı piston modelinde tespit edilmiştir. Kademeli kaplama modellerinde silindir içi basınç değerleri birbirine yakın tespit edilmiştir.
- Yanma simülasyon verilerine göre en yüksek silindir içi sıcaklık değerleri NC piston modelinde 1225.4 K , 10 mm NC piston modelinde 1261 K , 5 mm NC piston modelinde 1265.2 K ve FC piston modelinde 1287 K olarak tespit edilmiştir.
- En yüksek silindir içi basınç ve sıcaklık değerleri tüm yüzey kaplamalı pistonda, en düşük değerler ise kaplamasız piston modelinde tespit edilmiştir.

5 mm NC ve 10 mm NC kademeli kaplama modellerindeki silindir için sıcaklık ve basınç değerleri birbirine yakın tespit edilmiştir.

- Dört piston modeli için duvardaki ısı transfer oranının krank açısına göre değişime bakıldığında -45°KA 'ndan başlayarak 80°KA 'na kadar artış gözlemlenmiştir. 80°KA dan sonra duvardaki ısı transfer miktarında sabitlenme gözlemlenmiştir. NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC piston modellerinde duvardaki ısı transfer değerleri sırasıyla 11, 9.4, 9.2 ve 8.8 J olarak tespit edilmiştir. Kaplama yüzey alanı azaldıkça silindir içi sıcaklık değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Isı transfer kayıplarının yüksek olması silindir içi sıcaklık değerlerinin düşüne sebep olmaktadır.
- 0°KA 'na karşılık gelen duvardaki ısı transfer miktarı krank açısına oranlandığı zaman NC piston modelinde 33 J/deg, 10 mm NC piston modelinde 29,6 J/deg, 5 mm NC piston modelinde 28,6 J/deg ve FC pistonunda 23,6 J/deg olarak tespit edilmiştir. 16°KA 'na karşılık gelen ısı transfer oranında düşüş 40°KA 'da ısı transfer miktarı neredeyse sıfıra yaklaşmıştır. Bu durum yanma safhasının bitmesiyle egzoz safhasında piston içi sıcaklık değerlerinde düşüşün olmasıyla açıklanabilir. En yüksek ısı transfer miktarı kaplamasız piston modelinde tespit edilmiştir.
- En yüksek HRR değerleri -2°KA 'nda NC, FC, 5 mm NC ve 10 mm NC pistonları için sırasıyla 357.9 J/deg, 313.1 J/deg, 350.7 J/deg ve 351.6 J/deg olarak tespit edilmiştir. En düşük HRR oranı FC piston modelinde tespit edilmiştir. Tüm yüzey kaplı piston modelinin diğer piston modellerine göre piston içi sıcaklığının yüksek olmasından dolayı yanma erken başlar ve ateşleme gecikmesi kısa olur.
- Silindir içi maksimum sıcaklık değerleri 8°KA 'da NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC piston modelleri için sırasıyla 2283 K, 2297.7 K, 2307 K ve 2318.5 K olarak gözlemlenmiştir. Tüm yüzey kaplı ve kademeli kaplama uygulanan piston modellerinde yanma odasının sıcaklık dağılımı kaplanmamış piston modelinden farklıdır.
- Dört piston modeli için deneysel ve simülasyon sonucunda elde edilen egzoz emisyon parametrelerinden NO_x değeri tüm yüzey kaplı piston modelinde en yüksek tespit edilmiştir. Kaplama yüzey alanı arttıkça NO_x emisyon değerinde artış, CO ve HC emisyonlarında düşüş gözlemlenmiştir.

- Yanma simülasyonları sonucunda termal verim NC piston modelinde 0.285, 10 mm NC piston modelinde 0.331, 5 mm NC piston modelinde 0.336 ve FC piston modelinde 0.364 tespit edilmiştir. Kaplama yüzey alanı arttıkça termal verimde artış gözlemlenmiştir.
- Gerçekleştirilen yanma simülasyonları sonucunda NC, 10 mm NC, 5 mm NC ve FC piston modellerinde yanma verimleri sırasıyla 0.869, 0.919, 0.921 ve 0.928 olarak tespit edilmiştir. En yüksek yanma verimi FC piston modelinde, en düşük yanma verimi NC piston modelinde gözlemlenmiştir. Kaplama yüzey alanı arttıkça yanma veriminde artış tespit edilmiştir. Kaplamanın etkisiyle kayıp ısı miktarındaki düşüş ve piston içi sıcaklığın artışıyla yanmayı iyileştirdiği gözlemlenmiştir.
- Yağdaki termokupl değerleri incelendiği zaman kaplama yüzey alanının artmasıyla yağ sıcaklığında düşüş tespit edilmiştir. Bunun nedenini kayıp ısı miktarının düşmesi ve piston içi sıcaklık değerinin kaplama işlemi uygulanan pistonlarda daha yüksek olmasıyla açıklayabiliriz.
- Egzoz termokupl sıcaklık değerleri FC pistonu için yüksüz, %12.5, %25, %37.5, %50 ve %62.5 yükleme koşullarında sırasıyla 70.68 °C, 85.78 °C, 96.85 °C, 116.92 °C, 138.82 °C ve 190.07 °C olarak tespit edilmiştir. Yükleme durumu arttıkça egzoz sıcaklık değeri arttığı tespit edilmiştir. En yüksek egzoz sıcaklığı 246.25 °C ile NC pistonunda gözlemlenmiştir.
- Kanat ucu sıcaklık değerleri %50 yükle koşullarında FC piston modelinde 82.42 °C, 5 mm NC piston modelinde 95.48 °C, 10 mm NC piston modelinde 96.32 ve NC piston modelinde 110.33 °C olarak tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmada kaplamalı piston modelinin kaplamasız piston modeline göre motorun yüksüz ve orta yüklerde CO₂, CO ve HC egzoz emisyon değerlerinde düşüş, NO_x emisyon değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Kademeli kaplamalı piston ve tüm yüzey kaplamalı piston modellerinde yüksüz ve düşük yüklerde yakıt tüketiminin kaplamasız piston modeline göre düşük olduğu fakat %37.5, %50 ve %62.5 yükleme koşullarında kademeli kaplama yapılan piston modellerinde kaplamasız piston modeline göre artış tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada zamana bağlı termal analizler sonucunda kaplamalı piston modellerinde piston üst yüzey sıcaklığında artış ve en düşük toplam ısı akısı miktarının tüm yüzey kaplamalı piston modelinde

olduğu tespit edilmiştir. Kademeli kaplamalı piston modellerinde kaplama yüzeyindeki termal basınç gerilmelerindeki düşüş nedeniyle kaplama malzemesindeki deformasyon miktarında düşüş tespit edilmiştir. Kaplamalı piston modellerinde silindir içi sıcaklık ve silindir içi basınç değerlerinde ısı transfer kayıplarının azalmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir. Kaplamalı piston modellerinde silindir içi sıcaklık artışına bağlı olarak yanma veriminde artış tespit edilmiştir.

5.2. Öneriler

Bu tez konusuna benzer olarak dizel motorlarında seramik kaplama uygulamalarına yönelik çalışmalarda yapılabilecek öneriler aşağıda özetlenmiştir.

- Kademeli pistonlarda dizel yakıtın yanı sıra biyodizel yakıt kullanılarak motor performansı, yanma ve egzoz emisyon parametreleri incelenebilir.
- Kademeli kaplama ve tüm yüzey kaplama uygulamaları ile optik motor uygulamaları ile silindir içinde alevin gelişimi ve dağılımı araştırılabilir.
- Gerek tüm yüzey kaplama, gerekse kademeli kaplama işlemi turbo şarjlı, kademeli dolgulu motorlar ve common rail dizel motorlarda test edilebilir.
- Kademeli ve tüm yüzey kaplama işleminin HCCI ve RCCI gibi düşük sıcaklıklı ve fakir karışımlı motorlarda yanma ve performans üzerindeki etkilerinin olumlu olabileceği değerlendirildiğinden bu tür motor uygulamalarında önerilmektedir.
- Kaplama işlemi piston yüzeyine farklı kalınlıklarda ve farklı malzemelerle gerçekleştirilebilir.
- Kademeli kaplama parametresi belirlendikten sonra zirkonatlar veya nadir zirkonatlar kullanılarak farklı termal bariyer kaplama malzemeleri kullanılarak egzoz emisyon parametreleri karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abbas, Musharaf, Hongbo Guo, and Muhammad Ramzan Shahid. 2013. "Comparative Study on Effect of Oxide Thickness on Stress Distribution of Traditional and Nanostructured Zirconia Coating Systems." *Ceramics International* 39 (1): 475–81.
- Abbas, S. Mohamed, and A. Elayaperumal. 2019. "Experimental Investigation on the Effect of Ceramic Coating on Engine Performance and Emission Characteristics for Cleaner Production." *Journal of Cleaner Production* 214: 506–13.
- Attar, Mohsin, and Prof Ajay Bhongade. 2017. "Thermal Barrier Coating on IC Engine Piston to Enhance Better Utilization of Heat Produced inside the Combustion Chamber Ultimately Improving Engine 's Efficiency," 1603–9.
- Aydin, Hüseyin. 2013. "Combined Effects of Thermal Barrier Coating and Blending with Diesel Fuel on Usability of Vegetable Oils in Diesel Engines." *Applied Thermal Engineering* 51 (1–2): 623–29.
- Aydın, Selman. 2014. "Yanma Odası Yüzeyleri ZrO₂, MgO ve Al₂O₃ Ile Yalıtılmış Bir Dizel Motorunda Biyoyakıt Kullanımının Performans, Emisyon ve Yanma Karakteristiklerine Etkisinin İncelenmesi." Marmara Üniversitesi.
- Baldissera, Paolo, and Cristiana Delprete. 2019. "Finite Element Thermo-Structural Methodology for Investigating Diesel Engine Pistons with Thermal Barrier Coating." *SAE International Journal of Engines* 12 (1): 57–68.
- Buyukkaya, Ekrem, and Muhammet Cerit. 2007. "Thermal Analysis of a Ceramic Coating Diesel Engine Piston Using 3-D Finite Element Method." *Surface and Coatings Technology* 202 (2): 398–402.
- Çakır, Uğur. 2007. "Seramik Kaplı Bir Dizel Motor Yanma Odasının Termal Analizi." Sakarya University.
- Cao, X. Q., R. Vassen, and D. Stoeber. 2004. "Ceramic Materials for Thermal Barrier Coatings." *Journal of the European Ceramic Society* 24 (1): 1–10.
- Carmona, Diego Daniel Vargas. 2014. "Thermal Barrier Coatings for Efficient Combustion," 24.
- Çengel, Yunus A. Ghajar, Afshin J. 2011. *Heat and Mass Transfer*. Mc Graw Hill.
- Cerit, Muhammet, and Mehmet Coban. 2014. "Temperature and Thermal Stress Analyses of a Ceramic-Coated Aluminum Alloy Piston Used in a Diesel Engine." *International Journal of Thermal Sciences* 77: 11–18.
- Cihan, Ömer, İlker Temizer, Mustafa Güven, and Muhammet Karabaş. 2020. "Surface & Coatings Technology Investigation of the Effect of Rare Earth Doped La₂Zr₂O₇ Based Thermal Barrier Coating on Performance and Combustion Characteristics of DI Diesel Engine" 403 (April).
- Ciniviz, M, MS Salman, E Canlı, H Köse, and Ö Solmaz. 2012. "Ceramic Coating Applications and Research Fields for Internal Combustion Engines." *Ceramic Coatings - Applications in Engineering*, 195–234.

- Clarke, D.R., and C.G. Levi. 2003. "Materials Design for the Next Generation Thermal Barrier Coatings." *Annual Review of Materials Research* 33 (1): 383–417.
- Davis, J R. 2004. *Handbook of Thermal Spray Technology. Technology.*
- Dhayanidhi, E, and K Sakthivel. 2020. "Fea Analysis of Ceramic Coated Aluminium Piston by Ansys."
- Fei, Chun Guang, Zuo Qin Qian, Jie Ren, Xiang Jun Zhou, and Si Wei Zhu. 2021. "Numerical and Experimental Research on Thermal Insulation Performance of Marine Diesel Engine Piston Based on YSZ Thermal Barrier Coating." *Coatings* 11 (7).
- Fei, Chunguang, Zuoqin Qian, Ziming Yang, Jie Ren, Siwei Zhu, Yanan Yan, and Zihao Shu. 2022. "Combustion and Emission Performance of Isopropanol-Butanol-Ethanol (IBE) Mixed with Diesel Fuel on Marine Diesel Engine with Nano YSZ Thermal Barrier Coating." *Energy* 256: 124683.
- Fleck, N. A., A. C.F. Cocks, and S. Lampenscherf. 2014. "Thermal Shock Resistance of Air Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings." *Journal of the European Ceramic Society* 34 (11): 2687–94.
- Gehlot, Ravindra, and Brajesh Tripathi. 2016. "Thermal Analysis of Holes Created on Ceramic Coating for Diesel Engine Piston." *Case Studies in Thermal Engineering* 8: 291–99.
- Godiganur, Vishwanath S., Shiavananda Nayaka, and G.N. Kumar. 2020. "Thermal Barrier Coating for Diesel Engine Application – A Review." *Materials Today: Proceedings*, no. Thermal barrier coating.
- Gupta, Mohit. 2010. *Design of Thermal Barrier Coating.* Design of Thermal Barrier Coating.
- Gupta, Mohit Kumar, Lech Pawlowski, Per Nylén, Nicolaie Markocsan, Christer Persson, Ingrid Tano, Per Nylen, et al. 2014. *Design of Thermal Barrier Coatings : A Modelling Approach.*
- Hazar, Hanbey, Huseyin Sevinc, and Serhat Sap. 2019. "Performance and Emission Properties of Preheated and Blended Fennel Vegetable Oil in a Coated Diesel Engine." *Fuel* 254 (January): 115677.
- Heywood, John B. 2018. *Internal Combustion Engine Fundamentals.* Mc Graw Hill.
- Howard, Jens, and Peter Buckley. 2009. "By A Thesis Submitted in Conformity with the Requirements Graduate Department of Aerospace Engineering Copyright c 2009 by Jens Howard Peter Buckley."
- İlker Turgut Yılmaz, Metin Gümüş, Mehmet Akçay. 2010. "Thermal Barrier Coatings for Diesel Engines." In *INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE*, II173–77. GABROVO.
- Jaichandar, S, and P Tamilporai. 2003. "SAE TECHNICAL Low Heat Rejection Engines – An Overview." *Engineering*, no. 724.

- Jena, Shakti P, Saroj K Acharya, Harish C Das, Pragyan P Patnaik, and Shubhra Bajpai. 2018. "Investigation of the Effect of FeCl₃ on Combustion and Emission of Diesel Engine with Thermal Barrier Coating." *Sustainable Environment Research* 28 (2): 72–78.
- Jia, Ming, Eric Gingrich, Hu Wang, Yaopeng Li, Jaal B. Ghandhi, and Rolf D. Reitz. 2016. "Effect of Combustion Regime on In-Cylinder Heat Transfer in Internal Combustion Engines." *International Journal of Engine Research* 17 (3): 331–46.
- Jonnalagadda, Krishna Praveen, Robert Eriksson, Xin Hai Li, and Ru Lin Peng. 2019. "Fatigue Life Prediction of Thermal Barrier Coatings Using a Simplified Crack Growth Model." *Journal of the European Ceramic Society* 39 (5): 1869–76.
- Jonnalagadda, Krishna Praveen, Robert Eriksson, Kang Yuan, Xin Hai Li, Xiaojuan Ji, Yueguang Yu, and Ru Lin Peng. 2017. "A Study of Damage Evolution in High Purity Nano TBCs during Thermal Cycling: A Fracture Mechanics Based Modelling Approach." *Journal of the European Ceramic Society* 37 (8): 2889–99.
- Kamo, Roy, Dennis N. Assanis, and Walter Bryzik. 1989. "Thin Thermal Barrier Coatings for Engines." *SAE Technical Papers*.
- Karaoglanli, Abdullah Cahit, Kadir Mert Doleker, and Yasin Ozgurluk. 2020. "Materials Characterization Interface Failure Behavior of Yttria Stabilized Zirconia (YSZ), La₂Zr₂O₇, Gd₂Zr₂O₇, YSZ / La₂Zr₂O₇ and YSZ / Gd₂Zr₂O₇ Thermal Barrier Coatings (TBCs) in Thermal Cyclic Exposure." *Materials Characterization* 159 (December 2019): 110072.
- Karthickeyan, V. 2019. "Effect of Cetane Enhancer on Moringa Oleifera Biodiesel in a Thermal Coated Direct Injection Diesel Engine." *Fuel* 235 (March 2018): 538–50.
- Kumar Sethi, Chandan, Pragyan Parimita Patnaik, Saroj Kumar Acharya, and Dharendra Nath Thatoi. 2022. "An Efficient Approach for Emission Reduction in Diesel Engine with Ferric Chloride as Catalyst and Yttria Stabilized Zirconia as Thermal Barrier Coating." *Materials Today: Proceedings* 62 (P14): 7438–45.
- Lehmann, Henry, Dieter Pitzer, Gerhard Pracht, Robert Vassen, and Detlef Stöver. 2003. "Thermal Conductivity and Thermal Expansion Coefficients of the Lanthanum Rare-Earth-Element Zirconate System." *Journal of the American Ceramic Society* 86 (8): 1338–44.
- Ma, Tianyu, Dawei Chen, Hu Wang, Mingfa Yao, and Aiguo Xu. 2021. "Influence of Thermal Barrier Coating on Partially Premixed Combustion in Internal Combustion Engine." *Fuel* 303 (May): 121259.
- Mittal, Nitesh, Robert Leslie Athony, Ravi Bansal, and C. Ramesh Kumar. 2013. "Study of Performance and Emission Characteristics of a Partially Coated LHR SI Engine Blended with N-Butanol and Gasoline." *Alexandria Engineering Journal* 52 (3): 285–93.
- Murat Ciniviz, Can Haşimoğlu, İlker Örs, M. Sahir Salman. 2008. "Bir Dizel Motorunda Seramik Kaplamanın Motor Performans ve Isı Kayıplarına Etkisi." *E-Journal of New World Sciences Academy* 3 (4): 153–64.

- Özel, Serkan, Erdiñç Vural, and Murat Binici. 2020. "Optimization of the Effect of Thermal Barrier Coating (TBC) on Diesel Engine Performance by Taguchi Method." *Fuel* 263 (November 2019): 116537.
- Periyannan, L., P. Saravanan, P. Lavanyaa, E. Sivakumar, R. Silambarasan, and Sreekanth Sura. 2023. "Investigation of Ceramic Coating on Operating Characteristic of DI CI Diesel Engine Fuelled with Safflower Methyl Ester." *Materials Today: Proceedings*, no. xxxx: 10–14.
- Prof. Dr. Behçet Safgönül, Prof. Dr. Metin Ergeneman, Prof. Dr. H. Ertuğrul Arslan, Prof. Dr. Cem Soruşbay. 1995. *İçten Yanmalı Motorlar*.
- Pulkrabek, Willard W. 2004. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Prentice Hall.
- Reddy, S. Sunit Kumar, and V. Pandurangadu. 2014. "Investigations on Ceramic Coated Diesel Engine With Brass Piston Material." *Journal of Mechanical Engineering* 44 (1): 10–17.
- Reghu, V. R., V. Shankar, and Parvati Ramaswamy. 2018. "Challenges in Plasma Spraying of 8%Y₂O₃-ZrO₂ Thermal Barrier Coatings on Al Alloy Automotive Piston and Influence of Vibration and Thermal Fatigue on Coating Characteristics." *Materials Today: Proceedings* 5 (11): 23927–36.
- Rupangudi, Suresh Kumar, C.S. Ramesh, Kavadiki Veerabhadhrappa, and Ram Rohit V. 2014. "Study of Effect of Coating of Piston on the Performance of a Diesel Engine." *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* 7 (3): 2014-01–1021.
- Sachit, T. S., R. V. Nandish, and Mallikarjun. 2018. "Thermal Analysis of Cr₂O₃ Coated Diesel Engine Piston Using FEA." *Materials Today: Proceedings* 5 (2): 5074–81.
- Sankar, Vishnu, Manoj Ramachandran, Gireeshkumaran Thampi, and M. K. Jayaraj. 2019. "Combined Effects of Thermal Barrier Coating and Blending of Diesel Fuel with Biodiesel in Diesel Engines." *Materials Today: Proceedings* 11: 903–11.
- Saravanan, S., C. Ramesh Kumar, Arivalagan Pugazhendhi, and Kathirvel Brindhadevi. 2020. "Role of Thermal Barrier Coating and Porous Medium Combustor for a Diesel Engine: An Experimental Study." *Fuel* 280 (May): 118597.
- Sharma, Jai Kumar, Ritu Raj, Sateesh Kumar, Ratan Kumar Jain, and Mukesh Pandey. 2021. "Finite Element Modelling of Lanthanum Cerate (La₂Ce₂O₇) Coated Piston Used in a Diesel Engine." *Case Studies in Thermal Engineering* 25: 100865.
- Taymaz, İmdat. 2007. "The Effect of Thermal Barrier Coatings on Diesel Engine Performance." *Surface and Coatings Technology* 201 (9-11 SPEC. ISS.): 5249–52.
- The American Ceramic Society. 2015. *Progress in Thermal Barrier Coatings. The Effects of Brief Mindfulness Intervention on Acute Pain Experience: An Examination of Individual Difference*. Vol. 1.
- Thibblin, Anders. 2017. *Thermal Barrier Coatings for Diesel Engines*.

- Thibblin, Anders, Stefan Jonsson, and Ulf Olofsson. 2018. "Influence of Microstructure on Thermal Cycling Lifetime and Thermal Insulation Properties of Yttria-Stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings for Diesel Engine Applications." *Surface and Coatings Technology* 350 (July): 1–11.
- Udayakumar, M., S. Sivaganesan, and S. Sivamani. 2022. "Performance and Emissions of Lemon Peel Oil Biodiesel Powered Single Cylinder Direct Injection Diesel Engine Loaded with Ceria Nanoparticles Additives and Stabilized Zirconia Coating." *Materials Today: Proceedings* 66: 1994–2000.
- Vassen, Robert, Xueqiang Cao, Frank Tietz, Debabrata Basu, and Detlev Sto. 2000. "Zirconates as New Materials for Thermal Barrier Coatings" 28: 2023–28.
- Venkadesan, Gnanamoorthi, and Jayaram Muthusamy. 2019. "Experimental Investigation of Al₂O₃/8YSZ and CeO₂/8YSZ Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating on Diesel Engine." *Ceramics International* 45 (3): 3166–76.
- Vittal, M, J A Borek, D A Marks, A L Boehman, D A Okrent, and A P Bentz. 1999. "Effects of Thermal Barrier Coatings on Diesel Engine Emissions." *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 121 (2): 218–25.
- Vural, Erdinç. 2015. "Thermal Analysis of Al₂O₃, TiO₂ and SiC Coatings Combustion of a Diesel Engine Piston 3D Finite Element Method." *International Journal of Scientific and Technological Research* 1 (6): 20–30.
- Wang, Yang, Tianyu Ma, Long Liu, and Mingfa Yao. 2021. "Numerical Investigation of the Effect of Thermal Barrier Coating on Combustion and Emissions in a Diesel Engine." *Applied Thermal Engineering* 186 (December 2020): 116497.
- Yadav, Vinod Kumar, and Yogesh Mishra. 2015. "Design and Structural Analysis of a Ceramic Coated Petrol Engine Piston Using Finite Element Method: A Review." *International Journal of Engineering and Technical Research* 3 (5): 367–70.
- Yao, Mingfa, Tianyu Ma, Hu Wang, Zunqing Zheng, Haifeng Liu, and Yan Zhang. 2018. "A Theoretical Study on the Effects of Thermal Barrier Coating on Diesel Engine Combustion and Emission Characteristics." *Energy* 162: 744–52.
- Yao, Zhimin, Kunsheng Hu, and Rong Li. 2019. "Enhanced High-Temperature Thermal Fatigue Property of Aluminum Alloy Piston with Nano PYSZ Thermal Barrier Coatings." *Journal of Alloys and Compounds* 790: 466–79.
- Yao, Zhimin, and Zuoqin Qian. 2018. "Thermal Analysis of Nano Ceramic Coated Piston Used in Natural Gas Engine." *Journal of Alloys and Compounds* 768: 441–50.
- Yaşar, Halit. 1997. "Termal Bariyer Kaplamanın Turbo Doldurmalı Bir Dizel Motorunun Performansına Etkileri."

ÖZGEÇMİŞ**KİŞİSEL BİLGİLER**

Adı Soyadı : Hüsna TOPKAYA
Uyruğu : TC.

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Üniversite	: Fırat Üniverstites	2007
Yüksek Lisans	: Fırat Üniversitesi	2013
Doktora	: Batman Üniversitesi	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013-2013	Bitlis Üniversitesi	Uzman
2013-	Batman Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Otomotiv

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

