



**BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORUN ISINMA
PERİYODU BOYUNCA ENERJİ DENGESİ VE
EGZOZ EMİSYONLARI ÜZERİNDE FARKLI
TERMAL ENERJİ YÖNETİM STRATEJİLERİNİN
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Galip KALTAKKIRAN

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2020

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORUN ISINMA PERİYODU BOYUNCA ENERJİ
DENGESİ VE EGZOZ EMİSYONLARI ÜZERİNDE FARKLI TERMAL ENERJİ
YÖNETİM STRATEJİLERİNİN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of the effects of different thermal energy management strategies on energy balance and exhaust emissions during warm-up period of an SI engine)

DOKTORA TEZİ

Galip KALTAKKIRAN

Danışman: Prof. Dr. Kadir BAKIRCI

Erzurum
Haziran, 2020

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Galip KALTAKKIRAN tarafından hazırlanan “BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORUN ISINMA PERİYODU BOYUNCA ENERJİ DENGESİ VE EGZOZ EMİSYONLARI ÜZERİNDE FARKLI TERMAL ENERJİ YÖNETİM STRATEJİLERİNİN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı çalışması 30/06/2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Enerji Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Kenan YAKUT <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
Danışman:	Prof. Dr. Kadir BAKIRCI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. M. Akif CEVİZ <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Mustafa ÇANAKCI <i>Kocaeli Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Alırıza KALELİ <i>Samsun Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN

Enstitü Müdürü

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Kadir Bakırcı danışmanlığında sunulan “Buji ateşlemeli bir motorun ısınma periyodu boyunca enerji dengesi ve egzoz emisyonları üzerinde farklı termal enerji yönetim stratejilerinin etkilerinin araştırılması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	4	30
Materyal ve Yöntem	8	35
Bulgular	0	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	3	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Galip KALTAKKIRAN	Prof. Dr. Kadir BAKIRCI
30.6.2020	30.6.2020
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde bilgi ve deneyimleriyle birçok yönde yol gösteren, her türlü konuda desteğiyle yanımda olan ve karşılaştığım problemlerin çözümünde yardımcı olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Kadir BAKIRCI'ya teşekkürlerimi sunuyorum.

Lisansüstü eğitim hayatım boyunca bilgi ve birikimlerinden sürekli faydalandığım, akademik ve özel hayatta daima yardımlarını esirgemeyen, çalışkanlığı, anlayışı ve sabrıyla daima örnek aldığım Sayın Prof. Dr. M. Akif CEVİZ ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Alırza KALELİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Birlikte aynı çalışma ortamını paylaştığım özverili yardımlarını ve desteklerini her daim yanımda hissettiğim Sayın Dr. Erdoğan GÜNER'e, Sayın Arş. Gör. Hüseyin KÖKSAL'a ve Sayın Öğr. Gör. H. İbrahim AKOLAŞ'a teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım süresince her daim yardım ve destekleriyle yanımda olan, manevi desteklerin esirgemeyen Sayın Arş. Gör. M. Fatih ŞANSVEREN ve Sayın Arş. Gör. Selçuk AVCI'ya teşekkür ederim.

Kıymetli öneri ve destekleriyle her zaman katkıda bulunan değerli tez jürisi üyelerine, Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyeleri'ne, kıymetli Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma ve mensubu olmaktan gurur ve mutluluk duyduğum çalışma imkânı sağlayan büyük Atatürk Üniversitesi ailesine teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca üzerimde büyük emek sahibi, yaşam boyu doğru kararlar almamda ve başarılı olmamda büyük rol oynayan, her zaman ve her konuda desteklerini esirgemeyen değerli anneme, babama, eşime, kardeşim Makine Yüksek Müh. Şuheda KALTAKKIRAN'a ve amcam Murat KALTAKKIRAN'a minnet ve şükranlarımı sunuyorum.

Galip KALTAKKIRAN

ÖZET

DOKTORA TEZİ

BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORUN ISINMA PERİYODU BOYUNCA ENERJİ DENGESİ VE EGZoz EMİSYONLARI ÜZERİNDE FARKLI TERMAL ENERJİ YÖNETİM STRATEJİLERİNİN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Galip KALTAKKIRAN

Danışman: Prof. Dr. Kadir BAKIRCI

Amaç: Termal enerji yönetim stratejisinde yüksek verimlilik sağlamak için diğer enerji kayıplarının iyileştirilmesi ve motorun en kısa zamanda kararlı çalışma şartlarına ulaşması gerekmektedir. Bu amaçla içerisinde çeşitli elektromekanik bileşenlerin yer aldığı farklı termal enerji yönetim stratejilerinde içten yanmalı buji ateşlemeli bir motorda soğutma suyu sıcaklığının fren özgül yakıt tüketimi, termal verim ve CO egzoz emisyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Yöntem: Çalışmada farklı yük ve devir koşullarının olduğu beş farklı ısı enerji yönetim stratejine ait deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu konfigürasyonlar; yağlama yağı soğutucusu kullanılması, yağlama yağı soğutucusu kullanılmaması, egzoz gazlarından ısı destek sağlanması, soğutma suyu debisinin %50 ve %25 seviyelerine azaltılması durumlarıdır. Tüm çalışma şartlarında motorun daimi olmayan çalışma zamanı boyunca motor ısınma süresi, enerji dengesi, özgül yakıt tüketimi ve CO emisyonu incelenmiştir.

Bulgular: İlk iki strateji %50 soğutma suyu debisi stratejisi ile karşılaştırıldığında motor ısınma süresinde %3,21-20,83 arasında değişen iyileşme sağlanmıştır. Egzoz gazlarından ısı destek sağlanması stratejisinde tüm testlere göre motor ısınma süresi en kısa sürmüştür. Ayrıca özgül yakıt tüketiminde %1-10,36 azalma elde edilmiştir. Referans hal stratejisine göre %50 soğutma suyu seviyesinde CO emisyonunda %36,89'a varan iyileşmeler görülmüştür.

Sonuç: Bu çalışmada egzoz gazlarından ısı destek sağlanması ve soğutma suyu debisinin azaltılması sayesinde motor ısınma süresinin yağlama soğutucusu ve referans hal şartlarına göre önemli seviyede kısaltılabileceği ortaya konmuştur. Soğutma suyu debisinin azaltılması tüm deneysel çalışma koşullarında özgül yakıt tüketimini azaltmıştır. Isınma süreleri, özgül yakıt tüketimi ve CO emisyonu seviyeleri beraber değerlendirildiğinde elde edilen avantajların düşük devir sayısı ve motor yüklerinde daha baskın olduğu ancak motor yükü arttıkça faydalı etkisinin azaldığı anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: motor ısınma zamanı, enerji dengesi, termal enerji yönetimi, egzoz emisyon, içten yanmalı motorlar.

Haziran 2020, 96 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT THERMAL ENERGY MANAGEMENT STRATEGIES ON ENERGY BALANCE AND EXHAUST EMISSIONS DURING WARM-UP PERIOD OF AN SI ENGINE

Galip KALTAKKIRAN

Supervisor: Prof. Dr. Kadir BAKIRCI

Purpose: In order to achieve high efficiency in the thermal energy management strategy, other energy losses must be improved and the engine must reach steady state operating conditions as soon as possible. For this purpose, the effects of cooling water temperature on brake specific fuel consumption, thermal efficiency and CO exhaust emission in an internal combustion spark ignition engine in different thermal energy management strategies including various electromechanical components.

Method: In the study, experiments of five different thermal energy management strategies with different load and engine speed conditions carried out. These configurations are; Using lubricating oil cooler, not using lubricating oil cooler, providing thermal support from exhaust gases, reducing cooling water flow to 50% and 25%. In all operating conditions, engine warm-up time, energy balance, specific fuel consumption and CO emissions have examined during the non-steady state operating time of the engine.

Findings: When the first two strategies are compared with the 50% cooling water flow strategy, an improvement in engine warm-up time ranging from 3.21-20.83% has been achieved. In the strategy of providing thermal support from exhaust gases, the engine warm-up period took the shortest time according to all tests. In addition, 1-10.36% reduction in specific fuel consumption achieved. According to the reference state strategy, improvements in CO emissions up to 36.89% observed at 50% cooling water level.

Results: In this study, it revealed that the engine warm-up time can be significantly shortened according to the lubricating cooler and reference conditions, by providing thermal support from exhaust gases and reducing the cooling water flow. Reducing the cooling water flow has reduced specific fuel consumption under all experimental operating conditions. When warming times, specific fuel consumption and CO emission levels are evaluated together, it is understood that the advantages obtained are dominant at low revs and engine loads, but the beneficial effect decreases as the engine load increases.

Keywords: engine warm-up period, energy balance, thermal energy management, exhaust emission, internal combustion engine

June 2020, 96 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xi
GİRİŞ.....	1
İçten Yanmalı Motorlarda Termal Enerji Yöntemi Sistemi.....	1
Amaç ve Kapsam	4
KURAMSAL TEMELLER.....	6
İçten Yanmalı Motorlarda Isı Transferi ve Enerji Dengesi Teorisi	6
Motor Isınma Fazında Daimi Olmayan Hal Enerji Dengesi.....	8
İçten Yanmalı Motorlarda Klasik Soğutma Sistemi	9
İçten Yanmalı Motorlarda Egzoz Emisyonları ve Hava Kirliliği	12
Karbonmonoksit (CO) emisyonu.	13
Azot Oksit (NO _x) emisyonu.	13
Hidrokarbon (HC) emisyonu	14
Partikül Madde (PM) emisyonu.....	15
MATERYAL ve YÖNTEM	33
DeneySEL Yöntem.....	33
Güç ölçüm ünitesi (hidrolik dinamometre).....	35
Tork sensörü.....	36
FPGA tabanlı şasi.....	37
Analog giriş modülü (AD Combo).	38
Termokupl ve termistörler.	39
Termokupl modülü.....	40
Motor soğutma sıvısı debi sensörü.....	41
Elektrikli santrifüj pompa.	41
Emme hava debisi ölçüm cihazı.....	42
Gaz keleşi.....	43

Yakıt debisi ölçüm cihazı.....	44
Lambda sensörü.	45
Egzoz emisyon analiz cihazı.	46
Termostat	47
Güç kaynağı.	48
Deneysel Yöntem.....	49
Hazırlanan yazılım	49
İçten yanmalı motorlarda enerji dengesi.....	52
Deneysel Belirsizlikler	53
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	55
2500 d/dk Devir Sayısı ve %25 Motor Yüğü Şartları.....	59
2500 d/dk Devir Sayısı ve %40 Motor Yüğü Şartları.....	64
3250 d/dk Devir Sayısı ve %25 Motor Yüğü Şartları.....	68
3250 d/dk Devir Sayısı ve %40 Motor Yüğü Şartları.....	72
Değişken Koşullu Deneysel Çalışmalar.....	85
Değişken Devir Sayısı ve %25 Motor Yüğü Şartları.....	85
Değişken Devir Sayısı ve %40 Motor Yüğü Şartları.....	87
SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	90
KAYNAKLAR.....	92
ÖZGEÇMİŞ.....	96

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Test Motorunun Teknik Özellikler	34
Tablo 2. Kullanılan Benzin Yakıtın Kimyasal Özellikleri	34
Tablo 3. Kistler 4503A Tork Sensörünün Teknik Özellikleri (Kistler, 2020).....	37
Tablo 4. PTC Sıcaklık Sensörünün Sıcaklık-Direnç Denklemleri.....	40
Tablo 5. NI-9214 Termokupl Modülünün Teknik Özellikleri (National Instruments, 2020) .	40
Tablo 6. Türbin Tipi Debimetrenin Teknik Özellikleri	41
Tablo 7. Elektrikli Su Pompasının Teknik Özellikleri.....	42
Tablo 8. Emme Havası Debi Sensörünün Teknik Özellikleri.....	43
Tablo 9. Yakıt Debisi Ölçüm Cihazının Özellikleri (Kistler 2020).....	45
Tablo 10. Bosch LSU 4,9 Lambda Sensörü Özellikleri (Bosch, 2020).....	46
Tablo 11. Egzoz Emisyon Cihazının Ölçüm Bilgileri	47
Tablo 13. Ölçümü ve Hesaplaması Yapılan Değerlerin Belirsizlik Analizi.....	54
Tablo 14. Farklı Isıl Stratejiler Arasında Motor Isınma Süresindeki İyileşmeler.....	77
Tablo 15. Farklı Isıl Stratejiler Arasında Motor Isınma Süresindeki İyileşmeler.....	79

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Soğutma suyu ve motor yağ sıcaklığının zamanla değişimi (Trapy and Damiral 1990).	3
Şekil 2. Motorlarda enerji akış diyagramı	8
Şekil 3. Soğutma kanallarında dolaşan soğutma suyuna ait kontrol hacmi için enerji dengesi .	9
Şekil 4. Deney düzeneğinin şematik resmi.	33
Şekil 5. Deneylerde kullanılan tork sensörü ve hidrolik dinamometre.	35
Şekil 6. Kistler 4503A Tork sensörü (Kistler, 2020).	36
Şekil 7. FPGA tümleşik devre yapısı (National Instruments 2020).	37
Şekil 8. NI- 9075 Compact RIO şasi (National Instruments, 2020).	38
Şekil 9. AD combo analog giriş modülü ve kanal bilgileri (National Instruments, 2020).	38
Şekil 10. Deneylerde kullanılan K-tipi termokupl.	39
Şekil 11. Deneylerde kullanılan termistör.	39
Şekil 12. Temokupl modülü	40
Şekil 13. Türbin tipi debimetre.	41
Şekil 14. Elektrikli su pompası.	42
Şekil 15. Emme havası debi sensörü.	43
Şekil 16. Motor gaz keleşi kontrol programı.	44
Şekil 17. Yakıt debisi ölçüm cihazı (Kistler 2020).	45
Şekil 18. Bosch LSU 4,9 lambda sensörü (Bosch, 2020).	46
Şekil 19. Bosch BEA-250 egzoz emisyon analiz cihazı.	46
Şekil 20. Labview ortamında hazırlanan egzoz emisyon analiz programı.	47
Şekil 21. Termostat genel görünümü	48
Şekil 22. Kullanılan güç kaynakları ve trafo.	49
Şekil 23. Deneyisel verilerin ölçümü için Labview ortamında hazırlanmış program.	50
Şekil 24. Deney boyunca verilerin izlenmesi ve egzoz emisyonlarının ölçümü.	51
Şekil 25. Motorun çalıştırılmasından itibaren zaman bağılı enerji dengesi değişimi.	52
Şekil 26. Motor soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları ile enerji dengesi değişimi.	56
Şekil 27. Motor soğutma sisteminde yağlama yağı soğutucusu kullanılması durumu.	58
Şekil 28. Motor soğutma sisteminde egzoz gazlarından ısı destek sağlanması durumu.	59
Şekil 29. 2500 d/dk devir sayısı ve %25 motor yükü şartlarında farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisinin değişimi.	61
Şekil 30. 2500 d/dk devir sayısı ve %25 motor yükü şartlarında enerji dengesi değişimi.	64

Şekil 31. 2500 d/dk devir sayısı ve %40 motor yükü şartlarında farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisinin değişimi.	66
Şekil 32. 2500 d/dk devir sayısı ve %40 motor yükü şartlarında enerji dengesi değişimi.	68
Şekil 33. 3250 d/dk devir sayısı ve %25 motor yükü şartlarında farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisinin değişimi.	70
Şekil 34. 3250 d/dk devir sayısı ve %25 motor yükü şartlarında enerji dengesi değişimi.	72
Şekil 35. 3250 d/dk devir sayısı ve %40 motor yükü şartlarında farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisinin değişimi.	74
Şekil 36. 3250 d/dk devir sayısı ve %40 motor yükü şartlarında enerji dengesi değişimi.	76
Şekil 37. Tüm çalışma şartları için motor ısınma süreleri.	77
Şekil 38. Tüm çalışma şartları için fren özgül yakıt tüketimi.	78
Şekil 39. Tüm çalışma şartları için CO emisyonu değişimi.	79
Şekil 40. Tüm deney koşulları ve ısı enerji yönetim stratejileri için efektif verim.	82
Şekil 41. Tüm deney koşulları ve ısı enerji yönetim stratejileri için soğutma suyuna giden enerji.	83
Şekil 42. Tüm deney koşulları ve ısı enerji yönetim stratejileri için egzoz giden enerji.	83
Şekil 43. Tüm deney koşulları ve ısı enerji yönetim stratejileri için diğer enerji kayıpları.	83
Şekil 44. Farklı devir (2000-3000 d/dk) ve sabit (%25) yük deney koşulunda farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisinin değişimi	86
Şekil 45. Farklı devir (2000-3000 d/dk) ve sabit (%25) yük deney koşulunda enerji dengesi değişimi.	87
Şekil 46. Farklı devir (2000-3000 d/dk) ve sabit (%40) yük deney koşulunda farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisinin değişimi	88
Şekil 47. Farklı devir (2000-3000 d/dk) ve sabit (%40) yük deney koşulunda enerji dengesi değişimi.	89

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

ANN	: Yapay Sinir Ağı
BSFC	: Fren özgül yakıt tüketimi
CFD	: Bilgisayarlı Akışkanlar Dinamiği
CO	: Karbonmonoksit
ç	: Çıkış
DC	: Doğru Akım
FPGA	: Alan Programlanabilir Kapı Dizileri
FTP-75	: Federal Test Prosedürü)
g	: Giriş
HC	: Hidrokarbon
HVAC	: Isıtma, Havalandırma ve Soğutma
K	: Kelvin
NEDC	: Model Predictive Control (Model Tahmin Kontrolü)
NEDC	: New European Driving Cycle (yeni Avrupa Sürüş Çevrimi)
NO_x	: Azot oksit
PID	: Orantısal, İntegral ve Türev
PM	: Partikül Madde
PTC	: Pozitif Sıcaklık Katsayısı
Q_{ds}	: Duvardan Suyu olan Isı Transferi
Q_{frie}	: Sürtünmeyle Giden Enerji
Q_{gd}	: Gazdan Duvara Olan Isı transferi
Q_{mb}	: Motor bloğuna Olan Isı transferi
s	: Soğutma sıvısı
T_ç	: Çevre Sıcaklığı
THC	: Toplam Hidrokarbon
T_{mb}	: Motor Blok Sıcaklığı
WLTC	: Dünya çapında uyumlu Hafif araçlar Test Çevrimleri

GİRİŞ

Günden güne gelişimini sürdüren teknoloji beraberinde büyük bir enerji gereksinimini gerektirmektedir. Hızlı teknolojik ilerleme hem yeni enerji kaynaklarına olan yönelimi hem de var olan enerji tüketim sistemlerinin iyileştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Geçmişten bu yana geniş bir yelpazede kullanılan içten yanmalı motorlar bu kapsamda öne çıkan sistemlerden yalnızca birisidir. Dünyada ve ülkemizde içten yanmalı motorlara olan talep artmaya devam etmektedir. Lojistik, ticaret, sanayi, bireysel hareketlilik gibi daha birçok amaca hizmet etme bağlamında içten yanmalı motorlar yaşamın önemli ve vazgeçilmez bir unsuru haline gelmiştir. Hali hazırda dünya genelinde birçok ülke için oldukça önemli olan enerji kaynaklarını yönetme stratejileri içerisinde içten yanmalı motorlarda enerji ve yakıt verimliliği üzerine yapılan araştırma ve geliştirmeler var olan önemini korumaktadır.

Bu araştırmalar arasında içten yanmalı motorlarda ısı enerji yönetim sistemi teknolojisi öne çıkmaktadır. Günümüzde mevcut kullanımına devam edilen geleneksel motor soğutma sisteminin etkili bir termal enerji yönetim sistemine kavuşması büyük önem taşımaktadır.

İçten yanmalı motorlarda, yakıttan elde edilen toplam enerji miktarı %100 olduğunda, egzoz giden enerji miktarı kaybı %34-35, soğutma sistemine giden kayıp %17-26, sürtünme ve radyasyona tabi kayıplar %3-10, eksik yanma %2-5 ve motorun çalışması için kullanılan enerji ise sadece % 25-28'dir. Toplam enerjinin %19-36 kadarını soğutma ve yağlama sistemi ile ilgili enerji kayıpları oluşturduğu için bu sistemlerin geliştirilmesi egzoz emisyonları ve toplam yakıt tüketimi üzerine olumlu katkılar sağlayacaktır (Heywood 1988; Cipollone *et al.* 2013). Böylesine önemli bir orana sahip termal enerji kaybının yönetilmesi motor performansı ve enerji tüketim stratejisi noktasında oldukça önemlidir.

İçten Yanmalı Motorlarda Termal Enerji Yöntemi Sistemi

Günümüzde içten yanmalı motorlar ve bunların kullanıldığı taşıtlarda bulunan bileşenlerin geliştirilmesi konusunda yapılan çalışmalar birçok alt başlıkta devam etmektedir. Bu başlıklardan bir tanesi de motor ısı yönetimidir.

İçten yanmalı motorlarda ısı yönetim, motor blok soğutma sistemi üstünde yoğunlaşmaktadır. Silindir için yanma ürünlerinin sıcaklıkları 2500 K sıcaklık seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Dolayısıyla motor kapağı ve bloğunun soğutulması gerekir. Silindir iç duvar sıcaklığı 180°C sıcaklık seviyesinin altında kalmalıdır. Bu seviyenin altında yağlama

yağının duvar yüzeyinde kalması garanti altına alınmış olur ve aşınma problemleri azaltılmış olur (Heywood 1988).

Doğru tasarlanan motor ısıl yönetimi sayesinde sadece motor parçalarının korunması değil aynı zamanda motor performansının ve veriminin artırılması ve egzoz emisyon karakteristiklerinin geliştirilmesi de mümkündür. Motor performansı silindir içi sıcaklığa bağlıdır dolayısıyla olması gerekenden daha fazla ısı transferi yapılması durumunda motor performansı azalır ve sürtünme kayıpları artar (Ziejewski *et al.* 1991; Kern and Ambros 1997; Arici *et al.* 1999).

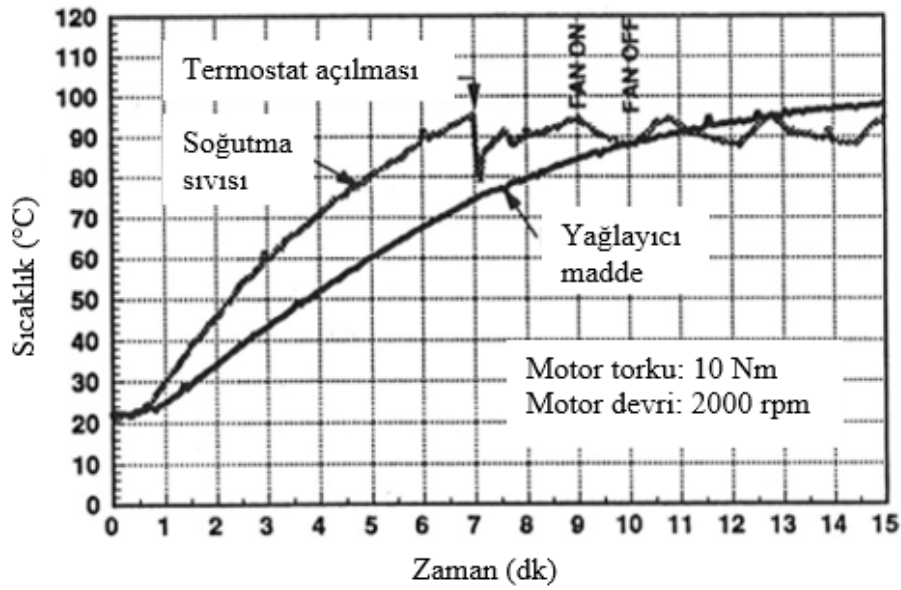
İyi tasarlanmış bir motor soğutma sistemi ve motor ısıl yönetimi sayesinde aşağıda belirtilen avantajlar elde edilebilmektedir (AVL, 2020);

- Tüm çalışma ve çevre şartlarında motorun tüm parçalarının yeterince soğutulduğundan emin olunması,
- Sürtünme kayıplarının azaltılması,
- Motor ısıl veriminin artırılması,
- Egzoz gazları son işlem sistemlerinin aktif hale gelmesi için gereken sürenin minimuma indirilmesi,
- Araç ön camında yoğuşma ve buzlanmanın hızlıca temizlenmesi,
- Araç içi yolcu kabininin üst düzey konfor şartlarında ısıtılması ve soğutulması,
- Zararlı egzoz emisyonlarının azaltılması.

Termal enerji yönetim sisteminde yakıt enerjisinden yüksek verimlilik sağlanması için enerji kayıplarının iyileştirilmesi ve motorun en kısa zamanda kararlı çalışma şartlarına ulaşması gerekmektedir. Motor ısınma süresi boyunca düşük sıcaklıktaki motor bloğu, soğutma suyu ve yağlama yağı sıcaklıkları hızlı bir şekilde yükselmektedir. Bu zaman aralığında ısınmaya başlayan yağ, motor bloğundaki hareketli bileşenlerin yağlanmasını artırarak sürtünmelerin azalmasını sağlamaktadır. Öyle ki, motor çalışma anında yaklaşık 20°C sıcaklıkta bulunan yağ ısınma periyodu sonrasında sürtünmelerden kaynaklanan enerji kayıplarının 2,5 kat iyileşmesine katkı sağlayabilmektedir (Will and Boretti 2011; Will 2012). Böylesine bir fayda soğuk çalıştırma şartlarında incelendiğinde, yakıt tüketiminde yaklaşık % 13,5'e varan bir iyileşme sağlayabilmektedir (Samhaber *et al.* 2001). Bu yüzden yağlama yağı, soğuk çalışma şartlarında ısınma periyodu boyunca motor çalışma sıcaklığı ve sürtünme kayıplarının iyileştirilmesi noktasında oldukça önemli bir rol sahibidir.

Termal enerji yönetim stratejisi kapsamında öncelikle motor soğutma sıvılarının ve motor bileşen sıcaklıklarının termal verim üzerindeki etkisini ve sistemin optimum çalışma sıcaklığına ulaşmasını içeren zaman periyotlarını anlamak gerekmektedir. Bu ifadeyi

anlamlandırmak için Şekil 1’de verilmiş olan grafikte motor yağ ve soğutma sıvısı sıcaklığının zamanla değişimleri incelenmelidir (Trapy and Damiral, 1990).



Şekil 1. Soğutma suyu ve motor yağ sıcaklığının zamanla değişimi (Trapy and Damiral 1990).

Şekil 1’de motorun çalışmasıyla beraber yaklaşık 7 dakika sonrasında termostatin açılmasıyla soğutma sıvısındaki sıcaklık değişim davranışı verilmiştir. Termostatin açılmasına kadar olan zamanda soğutma sıvısı sirkülasyonu bypass hattında gerçekleşmektedir. Termostat açılmasıyla birlikte radyatör hattındaki düşük sıcaklıktaki soğutma sıvısı sirkülasyonu başlamakta ve sıcaklık düşmektedir. Bu süreçte termostat tekrar kapanmaktadır. Bu çevrim birkaç kez tekrarın ardından motorun kararlı çalışma sıcaklığına ulaşmasıyla termostat sürekli açık vaziyette kalmaktadır. Buna karşılık motor yağ sıcaklığı yaklaşık 15 dakika boyunca sürekli değişkenlik göstermiştir. Motor yağının ısınma oranı $0,1^{\circ}\text{C/s}$ iken soğutma suyunun ısınma oranının genellikle $0,25^{\circ}\text{C/s}$ - $0,4^{\circ}\text{C/s}$ aralığında olmasından dolayı ısınma farklılıkları görülmektedir (Andrews *et al.* 2007). Bu yüzden yağın ısınma süresi daha uzundur. Soğutma sıvısının ısınması motorun kararlı çalışma sıcaklığına ulaşabilmesini sağlar. Bu durum soğutma sıvısının sıcaklığın termostat açılma zamanına kadar olan ısınma periyodu boyunca gerçekleşir. Literatürde bu çalışma bölgesi motor ısınma fazı veya motor ısınma süresi olarak adlandırılır. Kararlı çalışma sıcaklığına kadar motorun ısınması için gerekli olan zaman, motorun boyutuna, hızına ve yüküne bağlı olmakla birlikte bu süre bir otomotiv motoru için yaklaşık 10 dakika sürebilir (Ferguson and Kirkpatrick 2001).

Soğutma sistemleri dizel, benzinli ve hibrit araçların tümünde motor performansı ile egzoz emisyonları açısından büyük önem taşımaktadır. Fakat araçların soğutma sistemi diğer sistemlere nispeten fazla gelişim gösterememiş olup, motorlarda güç üretimi ve egzoz emisyon standartlarına verilen önem araçların termal yönetim sistemlerine yeterince verilememiştir. Bu

durumun nedeni soğutma sistemi bileşenlerinin bir kontrolcü yardımıyla kontrolünün sağlanamamasıdır. Bundan dolayı otomotiv firmaları son yıllarda üretimini yapmış oldukları motorlara ait motor soğutma sistemlerinde mekanik pompa yerine kontrol edilebilir özelliğe sahip pompalar tercih etmektedirler (Hakariya *et al.* 2017).

Tüm bu dezavantajlı durumlarla birlikte teknolojinin gelişmesi ve maliyetlerinin azalması göz önüne alındığında geleneksel soğutma sistemi yerini yavaşça elektronik kontrollü soğutma sistemlerine bırakmaya başlamıştır. Elektronik kontrollü soğutma sistemlerinde mekanik elemanlar yerini elektronik kontrol ünitesi tarafından kontrol edilen valflere, pompalara ve fanlara bırakmaktadır. Yapılan tüm bu değişiklik ve yenilikler içten yanmalı motorlarda performans düşüşlerinin, egzoz emisyonlarındaki kötüleşmelerin ve yakıt verimsizliğinin iyileşmesine yardımcı olabilmektedir (Allen *et al.* 2001; Wagner *et al.* 2003).

Motor soğutma sistemlerinin geliştirilmesi kapsamında bazı yeni teknikler barındıran çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları kontrol yöntemlerini içeren elektronik kontrol sistemleri veya kontrol modeli iyileştirmeleridir. Geleneksel yöntemlere göre kontrollü sistemlerin soğutma sisteminde ki bileşenler üzerinde önemli etkiler sağladığı görülmektedir.

İçten yanmalı motorlarda soğutma sistemi üzerindeki araştırmalar sistemin kontrol edilebilirliği, ısı transfer kapasitesi, gürültü seviyesi, güvenilirliği, sistemin maliyeti ve bakımı gibi bazı parametrelerin göz önünde bulundurulmasını gerektirdiğinden bu tez kapsamında soğutma sisteminin motor ısınma fazı boyunca ısı transferi ve enerji balansı kapasitesi konuları üzerine yoğunlaşmıştır.

Amaç ve Kapsam

Termal enerji yönetim sisteminde yakıt enerjisinin yüksek verimlilik sağlaması için diğer enerji kayıplarının iyileştirilmesi ve motorun en kısa zamanda kararlı çalışma şartlarına ulaşması gerekmektedir. Motor soğutma suyu sıcaklığı, bileşenler üzerindeki yakıt tüketimini, gücü, egzoz emisyonlarını ve mekanik yükü etkiler. Ancak değişken hız ve yük koşullarında bu değişkenlerin optimizasyonu ile motor soğutma suyu sıcaklığı farklı değerler alır.

Geleneksel soğutma sisteminin sahip olduğu dezavantajlı durumlara ve bu kapsamda yapılan bazı iyileştirmelere yönelik olarak literatürde çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalarda genel olarak sabit çalışma koşullarında veya sürüş çevrimleri kullanılması koşullarında motor çalışma zamanından itibaren tüm çalışma zamanı bir bütün olarak kümülatif incelenmiştir. Ancak hazırlanan bu çalışma kapsamında beş farklı ısı enerji yönetim stratejisi kurgulaması ile birlikte elektrikli bir pompa ile soğutma sıvısı üzerinde bir kontrol sağlanarak motorun ilk çalışma anından itibaren ısınma zamanı boyunca gerçek zamanlı veri analizi, yakıt

tüketimi, CO emisyonu, ısı transferi ve enerji balansı analizleri yapılmıştır. Tüm analizlerde literatürde yer alan çalışmaların aksine motorun özellikle yakıt tüketimi ve performansının kötü olduğu soğuk çalışma ve motor ısınma zamanı boyunca enerji dengeleri üzerinde durulmuştur.

Çalışmada içerisinde çeşitli elektronik bileşenlerin eklendiği farklı ısıl enerji yönetim stratejilerinin olduğu motor soğutma sistemi motor soğutma sistemi konfigürasyonlarına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Hazırlanan bu çalışmada mekanik pompa bir elektrikli pompa ile değiştirilmiştir. Deneysel yöntem olarak deney düzeneği, yazılım ve algoritmalar ile sonuçların elde edilmesi için bir buji ateşlemeli test motoru üzerinde tasarım ve analiz uygulamaları yapılarak testler gerçekleştirilmiştir. Termal enerji yönetimi stratejileri deneyleri için farklı yük ve devir koşullarında dinamometre tezgahı üzerinde beş farklı konfigürasyon hazırlanmıştır. Hazırlanan bu konfigürasyonlar; yağ soğutucusu ısıl enerjisinden yararlanma durumu, yağ soğutucusu olmadığı durum, yüksek sıcaklıkta dışarı atılan egzoz gazlarının ısıl enerjilerinden faydalanma durumu ve değişken debili soğutma sıvısı kontrolü durumudur. Deneylerde motorun ilk çalışma zamanı ile birlikte ısınma süresi, termostat açılma zamanı ve kararlı çalışma şartları boyunca soğutma sıvısı sıcaklığına bağlı olarak motor ısınma süresi, akışkan sıcaklıkları, ısı transferi ve enerji balansı ve CO egzoz emisyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece elektronik kontrollü soğutma sisteminin referans haldeki sisteme olan üstün yönleri ve elde edilen iyileştirmeler ortaya konulmuştur.

KURAMSAL TEMELLER

İçten Yanmalı Motorlarda Isı Transferi ve Enerji Dengesi Teorisi

İçten yanmalı motorun kendisi bir kontrol hacmi olarak ele alınırsa motora giren ve çıkan enerjiler aşağıdaki şekilde hesaplanabilir. Hesaplamalarda enerji ifadeleri birim zamandaki enerjiyi (kW) ifade etmektedir. Giren enerji: yakıt enerjisi (yakıt ile ilişkili olarak içeri alınan hava); çıkan enerjiler: efektif güç, egzoz kayıpları, soğutma suyu kayıpları, motor çevresinden olan konveksiyon ve radyasyondur.

Bu enerji dönüşüm sistemi için daimî hal birinci kanun analizi Eş. (1) ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Martyr and Plint 2007; Caresana *et al.* 2011);

$$\dot{Q}_y = P_e + \dot{Q}_s + \dot{Q}_e + \dot{Q}_h \quad (1)$$

Bu denklemde ;

$\dot{Q}_y$: Yakıt enerjisi (kW)

P_e : Efektif güç (kW)

$\dot{Q}_s$: Soğutma suyu kayıp enerjisi (kW)

$\dot{Q}_e$: Egzoz kayıp enerjisi (kW)

$\dot{Q}_h$: Hesaplanamayan kayıp enerji (kW)

Bu denklemde yer alan tüm ifadeler ise aşağıda açıklanmıştır.

Yakıt enerjisi Eş. (2) ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_y = \dot{m}_y \cdot H_u \quad (2)$$

Burada, $\dot{m}_y$ yakıt kütle debisi (kg/s) ve H_u yakıt alt ısı değeri. Efektif güç P_e , Eş. (3) yardımıyla hesaplanır. Burada n devir sayısı (d/dk) ve Md döndürme momentidir (Nm). Motorun nasıl çalıştığının yanı sıra motor boyutu ve geometrisine de bağlı olmak kaydıyla kranktan elde edilen efektif güç yakıt enerjisinin yaklaşık %20-45 kadarını kapsamaktadır (Pulkrabek 2003).

$$P_e = \frac{2\pi n M d}{60.1000} \text{ (kW)} \quad (3)$$

Soğutma sıvısına giden enerji ve egzoz kayıp enerjisi Eş. (4) ve Eş. (5) ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_s c_{p,s} \cdot \Delta T_s \text{ (kW)} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_e \cdot c_{p,e} \cdot \Delta T_e \text{ (kW)} \quad (5)$$

Burada $\dot{m}_s$ soğutma sıvısı debisi (kg/s), $c_{p,s}$ soğutma sıvısının özgül ısısı (kJ/kg.K) ve ΔT_s soğutma sıvısının motor bloğuna giriş-çıkış sıcaklık farkıdır (K). Ayrıca hesaplanan kayıp enerji $\dot{Q}_e$ egzoz gazlarının ısı kayıp enerjisidir. Egzoz gazlarındaki toplam güç kaybı ise toplam yakıt enerjisinin yaklaşık %25-45 aralığına denk gelmektedir (Pulkrabek 2003). Egzoz gazları içerisinde bulunan eksik yanma ürünleri dolayısıyla olan kayıp enerji hesaplanamayan kayıp enerji kapsamında düşünülmektedir. Dolayısıyla ΔT_e egzoz gazlarının motor bloğundan çıkış sıcaklıkları (egzoz manifoldunda ki egzoz gaz sıcaklıkları) ve çevre sıcaklığı arasındaki farkı göstermektedir. Diğer iki parametre ise sırasıyla $\dot{m}_e$ egzoz gazlarının debisi (kg/s) ve $c_{p,e}$ egzoz gazlarının özgül ısısıdır (kJ/kg.K). Ancak bu iki parametrenin belirlenmesi ile ilgili belirsizlikler söz konusudur. Her ne kadar egzoz gazlarının debisi, motora alınan hava ve yakıt debilerinin toplamı olsa dahi egzoz gazlarının özgül ısısının tespiti için anlık çok bileşenli egzoz gaz analizi yapmak gerekir. Bunun yerine literatürde egzoz hattına yerleştirilen bir egzoz gaz kalorimetresi (boru tipi zıt yönlü ısı değiştiricisi) kullanılmaktadır. Bu değiştirici için ısı denge denklemi Eş (6) ile hesaplanır.

$$\dot{m}_e \cdot c_{p,e} \cdot \Delta T_{e,kal} = \dot{m}_{su} \cdot c_{p,su} \cdot \Delta T_{kal}. \quad (6)$$

Bu denklemden ihtiyaç duyulan parametreler Eş. (7) ile gösterildiği şekilde hesaplanabilir.

$$\dot{m}_e \cdot c_{p,e} = \dot{m}_{su} \cdot c_{p,su} \cdot \frac{\Delta T_{kal}}{\Delta T_{e,kal}} \quad (7)$$

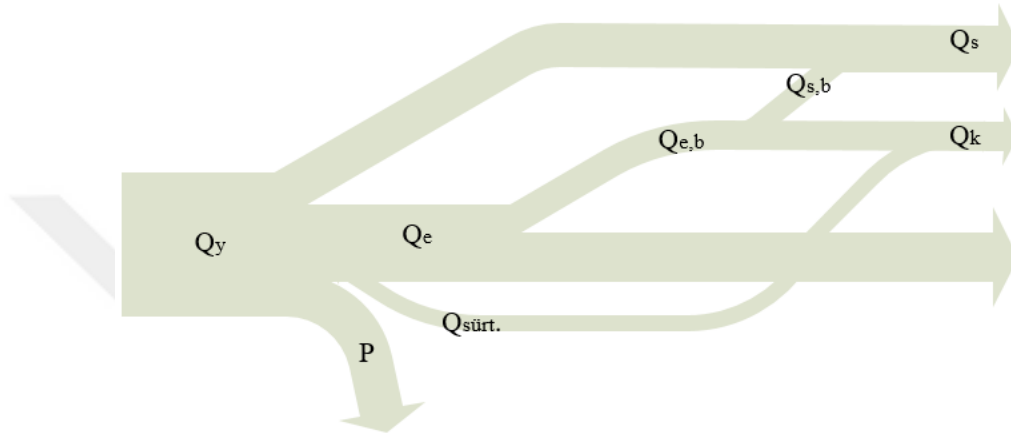
Burada $\dot{m}_{su}$ kalorimetrede dolaşan su debisi (kg/s), $c_{p,su}$ soğutma suyunun özgül ısısı (kJ/kg.K), ΔT_{kal} kalorimetreye giren ve çıkan suyun (K) ve $\Delta T_{e,kal}$ ise kalorimetreye giren ve çıkan egzoz gazlarının sıcaklık farkıdır (K).

Hesaplanamayan kayıp enerji, yukarıda ana başlıklar halinde verilen enerji ifadelerinin termodinamiğin birinci yasası uyarınca Eş. (1)'de yerine yazılmasıyla bulunur ve toplam kayıp enerji Eş. (8) ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_y - (P_e + \dot{Q}_s + \dot{Q}_e) \quad (8)$$

Hesaplanamayan kayıp enerji ifadesinin içinde farklı kayıp enerjiler söz konudur. Bunlar; motor bloğundan taşınım ve ışınlım ile olan ısı kayıp, egzoz gazlarının içindeki eksik yanma ürünlerinden kaynaklanan kimyasal enerji kaybı, yağın soğutulması için gerekli ısı kayıp ve sürtünmelerden kaynaklanan mekanik kayıplar vb. olarak gösterilebilir.

Ancak bu ısıl denge mekanizması aslında oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Şekil 2’de bu enerji etkileşimlerini gösteren diyagram verilmiştir. Şekil 2 daimi hal çalışma durumunda giren yakıt enerjisinin bir bölümünün efektif güç (P) olarak geri alındığını, diğer kısımlarının karmaşık etkileşimler sonucunda kaybedildiğini göstermektedir. Yakıt enerjisinden kaybedilen diğer enerji başlıkları ise şunlardır: Sürtünmelere harcanan enerji ($Q_{sürt.}$), egzoz gazlarıyla dışarı atılan enerji (Q_e), egzoz gazlarından motor bloğuna olan ısı transferi($Q_{e,b}$), soğutma sıvısına transfer edilen enerji (Q_s), soğutma sıvısından motor bloğuna olan ısı transferi ($Q_{s,b}$) ve diğer kayıplardır (Q_k).



Şekil 2. Motorlarda enerji akış diyagramı

Motor Isınma Fazında Daimi Olmayan Hal Enerji Dengesi

Yukarıda verilen birinci kanun analizi ifadeleri daimî çalışma bölgesi için geçerlidir. Oysa motor ilk çalıştırıldıktan sonra daimî çalışma hali olan motor soğutma suyu sıcaklığının sabitlendiği bölgeye kadar soğutma suyu ve diğer tüm mekanik parçaların sıcaklıkları artacaktır. Daimî olmayan bu durum için yakıt enerjisi, efektif güç, egzoz kayıp enerjisi ve hesaplanamayan kayıp enerjilerinin tespiti aynı denklemler ile yapılabilir. Çünkü tüm ölçüm parametreleri sürekli olarak deneysel veri toplama cihazı ile ölçülmektedir.

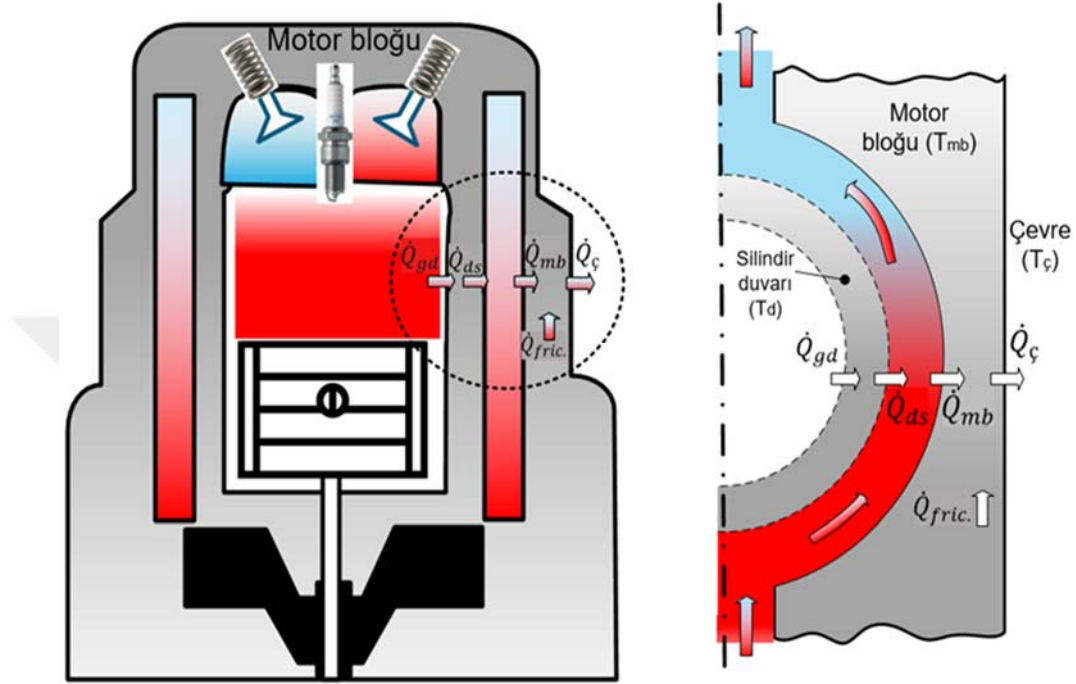
Oysa soğutma suyu ve blok sıcaklıklarının arttığı daimî olmayan bu bölgede soğutma suyu kayıp enerjisinin daha net hesaplanabilmesi için yeni bir yaklaşıma ihtiyaç vardır. Motor bloğundan gerçekleşen ısı transferi ve soğutma kanallarında dolaşan soğutma suyuna ait kontrol hacmi için enerji dengesi Şekil 3 ile verilen şematik resimde detaylıca gösterilmiştir. Şekil 3’te verilen renklendirilmiş soğutma kanallarında dolaşan soğutma suyuna ait kontrol hacmi için enerji dengesi ifadesi Eş. (9) ile ifade edilebilir;

$$\dot{Q}_{ds} + \dot{m}_s \cdot c_{p_s} \cdot \Delta T_{s,g} - \dot{m}_s \cdot c_{p_s} \cdot \Delta T_{s,\zeta} - \dot{Q}_{mb} = \dot{m}_{s,e} \cdot c_{p_s} \frac{dT_{s,e\zeta}}{dt} \quad (9)$$

Burada $\dot{Q}_{ds}$ anlık duvardan soğutma suyuna olan enerji etkileşimi (kW), $\dot{Q}_{mb}$ anlık soğutma suyundan motor bloğuna geçen enerji etkileşimi (kW), $\dot{m}_s$ soğutma suyu debisi (kg/s),

cp_s soğutma suyunun özgül ısısı (kJ/kg.K) ve $\Delta T_{s,g}$ soğutma suyunun motor bloğuna giriş sıcaklığı ve $\Delta T_{s,\phi}$ soğutma suyunun motor bloğundan çıkış sıcaklığı (K) ifadeleridir. Bu denklemde yer alan ve Eş. (10)'da verilen $\dot{Q}_{ds}$ ve $\dot{Q}_{mb}$ ifadelerinin farkı soğutma suyunun net enerji etkileşimini ifade etmektedir.

$$\dot{Q}_{s,net} = \dot{Q}_{ds} - \dot{Q}_{mb} \quad (10)$$



Şekil 3. Soğutma kanallarında dolaşan soğutma suyuna ait kontrol hacmi için enerji dengesi

İçten Yanmalı Motorlarda Klasik Soğutma Sistemi

İçten yanmalı motorlarda sıvı soğutma ve hava soğutma olmak üzere iki tip motor soğutma sistemi vardır. Bu soğutma sistemlerinde genel olarak kullanılan sıvı soğutmalı sistemlerdir. Sıvı soğutma sistemleri hava soğutma sistemlerinden çok daha sessizdir, çünkü soğutma kanalları yanma işlemlerinden gelen gürültüyü emer. Ancak, sıvı soğutma sistemleri donma, korozyon ve sızıntı sorunlarına maruz kalır (Ferguson and Kirkpatrick 2001). Burada soğutma işlevini soğutma sıvısı sağlamaktadır. Silindirlere giren dolgu yanma sonucu ısı enerjisi üretir ve bu ısı enerjisinin bir miktarı motor soğutma sıvısına depolanır. Motor ısındıkça termostat açılır ve soğutma suyunun radyatöre akmasına izin verir. Motor ısınma fazında soğutma işlemine ihtiyaç duyulmazken termostat açılmasıyla depolanan ısı enerjisi motorun kararlı çalışma sıcaklık bandında tutulabilmesi için radyatör vasıtasıyla çevreye atılır.

Tipik bir motorun soğutma sisteminde soğutma sıvısı motora alt taraftan girer ve bloğun içinde akarak yüksek sıcaklıktaki silindir çeperlerinden ısıyı depolar. Soğutma sıvısı silindir çeperlerinin dış yüzeylerinden geçmektedir. Akışkan depoladığı enerjiden dolayı motorun üst

kısımından yüksek özgül entalpi değerinde çıkış yapar. Soğutma sıvısının sistemde dolaşmasını mekanik pompa veya elektrikli pompa sağlar (Pulkrabek 2003).

Motor soğutma sistemi; radyatör, mekanik pompa, termostat, soğutma sıvısı ve radyatör fanından oluşmaktadır. Radyatör; soğutma sıvısına depolanmış ısı enerjisinin çevre ortamına salınmasında kullanılan bir ısı değiştiricisidir. Termostat motorun kararlı çalışma sıcaklığına bir an önce ulaşmasına yardımcı olan mekanik bir valftir. Motor ısınma fazında radyatör hattını kapalı tutarak sıvı sirkülasyonunun bypass hattında gerçekleşmesini sağlar. Kararlı çalışma sıcaklığına ulaşıldıktan sonra yavaşça açılarak sıvının radyatör hattına geçişine izin verir. Radyatör arkasında bulunan fan, soğutma sıvısı sıcaklığının normal değerler üzerinde seyretmeye başladığı anda devreye girerek radyatör üzerinden hızlı bir hava sirkülasyonu sağlar ve soğutma sıvısının sıcaklığını düşürmeye çalışır. Böylece soğutma sıvısı sıcaklık değerini ve dolayısıyla motor çalışma sıcaklığını kararlı bir sıcaklık bandı aralığında tutulmaya çalışılır.

Mekanik pompa motor bloğunda ve hortumlarda soğutma sıvısının sirkülasyonunu sağlar. Hareketini krank milinden aldığı için mekanik pompanın gönderdiği soğutma sıvısı debi miktarı da motor devriyle doğrudan ilişkilidir. Bu durum tüm sürüş şartlarında geçerlidir. Diğer yandan özellikle soğuk hava şartlarında bu devir ve debi ilişkisi mekanik pompanın fazladan ve gereğinden fazla çalışmasına neden olur ve böylece motor ısınma fazı uzun sürmektedir. Bu duruma istinaden motorun kararlı çalışma bölgesine geçişi uzun sürmekte, yakıt tüketimi ve emisyonlar artmaktadır. Benzer bir durum ise yük altında çalışmasını sürdüren motorun daha fazla soğutma ihtiyacı duymasına rağmen mekanik pompanın düşük devirlerde bu ihtiyaca cevap verememektedir. Neticede yeterince soğutma işlevini yerine getiremeyen soğutma sisteminden dolayı motor blok ve bileşenlerinde zararlar ortaya çıkabilmektedir. Bu uç durumlara göre tasarlanan yapısıyla mekanik pompa çalışma zamanının çok az bir kısmında faydalı olurken geriye kalan çoğu zaman diliminde fazladan enerji tüketimi yapmaktadır. Motorun çalışmaya başladığı andan itibaren ısınma periyodu ve kararlı çalışma sıcaklık bandına gelmesinde önemli bir rol sahibi olan mekanik pompa yanında bahsedilen bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bu durum dikkatlerin mekanik pompa üzerine odaklanmasında en temel pay sahibidir.

Klasik soğutma sisteminde elektronik kontrollü elektrikli pompa ve kontrolcü bileşenleri kullanılarak mekanik pompa merkezli sorunların iyileştirilmesine yönelik örnek çalışmalar yapılmıştır (Banjac *et al.* 2014; Bova *et al.* 2015; Lingarde *et al.* 2015; Wang and Wagner 2015). Bu çalışmalar dışında ihtiyaç fazlası sirkülasyon yapan bir mekanik pompanın devir sayısının %65 kadar düşürülmesini sağlamak için bir dişli tür su pompası ve pompa

kanatçıklarını kontrol eden iki ayrı su pompası tasarımı yapılmıştır. Yapılan bu değişimlerin her birinde yakıt tüketimi ve motor ısınma süresinden tasarruf edilmiştir (Shin *et al.* 2013).

Diğer bir sistem bileşeni olan fan da mekanik pompa gibi güç tüketimi bakımından önem arz eder. Radyatör ve fan grubunda hava sirkülasyonu fan radyatör üzerinden hava akımını çekerek hem soğutma sıvısının hem de motor bloğunun soğumasını sağlar. Geleneksel soğutma sistemlerinde fanın güç tüketimi yüksektir. Öyle ki daha düşük devirli bir fan kullanımı nispeten daha düşük bir güç kullanımı ve yaklaşık %3 kadar yakıt tasarrufu sağlayabilmektedir (Phapale *et al.* 2015). Bu yüzden fan optimizasyonu yakıt tasarrufu ve güç çıkışında artış sağlar. Termal enerji yönetim stratejisi kapsamında soğutma sisteminde iyileşmelere yönelik olarak fan kontrolü ve etkilerini incelemek için çok sayıda çalışma yürütülmüştür (Mehanovic 2008; Mitchell *et al.* 2009; Wang and Wagner 2015; Zhou *et al.* 2015).

Motorun radyatör vasıtasıyla gerçekleştirilen soğutma işleminin yeterince etkili olmadığı çalışma bölgelerinde fan kontrolü ile belli zaman dilimlerinde soğutma işlemine önemli katkılar sağlanmaktadır. Çalışma zamanı içerisinde özellikle soğutma prosesinin yoğun olduğu zaman aralıklarında mekanik pompanın çalışması ve fanın da devreye girmesiyle birlikte motordan tüketilen güç miktarında artış meydana gelmektedir.

Enerji tüketimleriyle ön plana çıkan mekanik pompa ve fanın etkilerinin yanında önemli bir soğutma sistemi elemanı da termostattır. Termostat motor ısınma süresini belirleyen bir mekanik sıcaklık sensörüdür. Aynı zamanda ısınma sonrasında bir valf görevi görerek soğutma sıvısının radyatör hattına yönlendirilmesini ve motorun kararlı çalışma sıcaklığı aralığında kalmasını sağlar. Isıl olarak aktifleşen bir valf görevi gören termostat soğutma sıvısı sıcaklığının minimum değerin altına düşmesini önler ve motorun yüksek sıcaklık bandında verimli çalışmasını sağlar (Pulkrabek 2003). Motorun çalışmasıyla beraber blok ve soğutma sıvılarının sıcaklığı da yükselmektedir. Bu artış termostatın açılma sıcaklığına kadar devam eder ve termostatın açılmasıyla son bulur. Bu noktadan sonra soğutma sıvısının sıcaklığının kararlı çalışma sıcaklık bandında tutulması sağlanır. Bu durum termostatın önemini yeterince gösteren bir olgudur. Termostat, sürekli olarak soğutma sıvısı ile temas halindedir. Termostat değişken açıklık miktarıyla soğutma sıvısının çalışma sıcaklığını kontrol altında tutabilmek için uğraşır. Ancak sıcaklık değişimlerine karşılık gösterdiği açıklık değer cevabı oldukça uzun sürmektedir ve motoru ani olarak kararlı çalışma limitleri dışında bırakmaktadır. Bu yüzden soğutma sıvısı sıcaklığı, motor blok sıcaklığı ve soğutma sıvısı debi miktarının kontrol edilebilir değişken konumlu bir elektromanyetik termostatın kullanılmasıyla iyileştirilebileceği belirtilmiştir (Mohamed 2016). Benzer amaçlar taşıyan, termostatın motor performansı, ısı

enerji yönetimi ve emisyonların iyileştirilmesi konusunda birçok çalışma yapılmıştır (Wagner *et al.* 2003; Mitchell *et al.* 2009; Shutty and Pinto 2013; Millo *et al.* 2016).

Elektronik kontrolcü ile kontrol edilen pompa, fan ve valften oluşan soğutma sistemi grubu ile kararlı çalışma bölgesinde daha düşük güç tüketimi sağlamak için gelişmiş termal enerji yönetim stratejileri uygulanabilir. Böyle bir uygulama ile güç tüketiminde yaklaşık %57 oranında bir iyileşme söz konusudur (Zhou *et al.* 2015).

Geleneksel yöntemle gerçekleştirilen soğutma sistemleri incelendiğinde bu sistemler bazı dezavantajları bünyesinde barındırmaktadırlar. Bu durum araştırmacıları motorun değişken çalışma koşulları altında ısı enerji yönetim stratejilerine teşvik etmektedir. Değişken şartlar altında yapılacak soğutma sıvısı sıcaklık kontrolü ile motor etkinliği, yakıt ve enerji yönetiminin sağlanması gerekir. Öyle ki tüm bu parametrelerin motorlarda kontrol edilebilir olabilmesi için öncelikle soğutma sisteminde termal enerji yönetimi uygulamasının gerçekleştirilmesi ve elektronik kontrollü bir soğutma sisteminin geliştirilmesi gereklidir. Bu gelişmiş sistem, klasik soğutma sistemi temel bileşenlerinden mekanik pompanın elektrik pompa ve termostatın ise elektronik kontrollü valf ile yer değiştirilmesiyle gerçekleştirilebilir. (Wang and Wagner 2015; Tao and Wagner 2016).

İçten Yanmalı Motorlarda Egzoz Emisyonları ve Hava Kirliliği

İdeal yanma şartlarında yanma sonu oluşan egzoz gazları su buharı ve CO₂ gazından ibaret olmalıdır. Ancak gerçek yanma işleminde bu ürünlerle beraber zararlı emisyon bileşenlerinin de salınımı yapılmaktadır. Bu kirletici gazların oluşumu yakıt içerisindeki hidrokarbonların yanma sırasında oksijen ile birleşerek farklı yeni formlar oluşturmalarından kaynaklanmaktadır (Sabancı ve Işık 2012).

İçten yanmalı motorların hava kirliliğinde etkileri önemli derecelere ulaşmaktadır. İçten yanmalı motorlarda yanma sonu oluşan egzoz gazları; karbon monoksit (CO), azot oksit (NO_x), yanmamış hidrokarbonlar (THC), partikül maddeler (PM) ve diğer bileşenler hava kirliliğini meydana getiren unsurlardır. Öyle ki motorlardan salınan NO_x, CO ve HC emisyonları toplam kirliliğin yaklaşık yarısını oluşturmaktadır. Bu kirletici gazların sağlık ve çevrenin yanı sıra insan sağlığı üzerine de olumsuz etkileri bulunmaktadır (Ferguson and Kirkpatrick 2001).

Bu tez çalışması kapsamında buji ateşlemeli motorlarda egzoz gazları içerisinde hacim bazında diğer bileşenlere göre önemli bir değere sahip olmasından dolayı sadece CO emisyonu üzerinde durulmuş olup diğer emisyon bileşenleri için sadece teorik bilgiler verilmiştir. Tüm egzoz emisyon bileşenleri ayrı ayrı aşağıda başlıklar halinde sıralanmıştır.

Karbonmonoksit (CO) emisyonu.

İçten yanmalı motorlarda zengin karışım oranı görülen durumlarda karbon monoksit (CO) gazı üretimi olur. CO üretimi aslında yakıtın kimyasal enerjisinin yanma sırasında tamamen kullanılmadığının bir göstergesidir (Canakci *et al.* 2009).

CO zararlı bir emisyon olmakla beraber yanmamış yakıt ve dolayısıyla kayıp kimyasal enerjiyi de temsil etmektedir. Bu gaz renksiz, kokusuz ve zehirli bir gazdır. Yanma sırasında yetersiz oksijenden dolayı yakıtın bir kısmı yanmaz ve karbonun bir kısmı CO gazına dönüşerek yanma sonucunda ortaya çıkar. En önemli sebebi hava-yakıt oranıdır. CO gazı buji ateşlemeli bir motorda toplam egzoz gazları içerisinde %2-5 arasında bir orana sahiptir. En yüksek CO emisyon üretimi genellikle ilk çalıştırmada ve ani yüklenme şartlarında meydana gelmektedir. Bu zaman diliminde homojen olmayan karışım, lokal zengin karışım bölgeleri ve eksik yanmadan dolayı CO oluşumu gerçekleşir (Heywood 1988).

Buji ateşlemeli motorlarda, stokiyometrik yanma kısmi yüklerde ve zengin yanma ise tam yük şartları altında çalışmaktadırlar ve bundan dolayı CO emisyon değerleri ve kontrolü oldukça önem arz etmektedir (Heywood 1988). Fakir karışımlı yanmalarda CO değeri genellikle düşük değerlerde seyreder (Pulkrabek 2003). CO emisyonlarını en aza indirmenin yolu, motorun zengin karışımlı çalışma zamanını en aza indirmektir. (Ferguson and Kirkpatrick 2001).

CO gazının oluşum reaksiyonu Eş. (11) ile verilmiştir.



Azot Oksit (NO_x) emisyonu.

İçten yanmalı motorlarda egzoz gazları içeriğinde yaklaşık 2000 ppm değerine kadar azot oksit gazı bulunabilir. Bu değer büyük bir kısmını azot monoksit (NO) ve az bir kısmını ise azot dioksit (NO₂) ve diğer bileşenler oluşturur. Tüm bu gazların birlikte NO_x gazları olarak isimlendirilir. NO_x oluşumu sıcaklığın bir fonksiyonu olmasının yanında manifold basıncı, motor hızı, hava-yakıt oranı ve silindir içerisinde yanma süresi ile doğrudan ilişkilidir. En yüksek NO_x değerine ateşleme sırasında buji çevresinde ve sıcaklığın en yüksek olduğu bölgelerde ulaşılmaktadır. NO_x oluşumu yüksek sıcaklığa bağlıdır, bu nedenle motorun ilk çalıştırılma ve ısınma periyodu boyunca NO_x emisyonları biraz daha düşüktür ve motor yüküyle orantılı olarak değişmektedir (Ferguson and Kirkpatrick 2001; Pulkrabek 2003).

NO_x oluşumu buji ateşlemeli motorlarda bujinin ateşleme zamanı ve emme basıncıyla da ilişkilidir. Bu motorlarda NO_x üretimi zengin karışımda daha etkin olmakla birlikte fakir karışımlarda etkisi daha azdır. Yanmanın çok fakir şartlarda gerçekleşmesi durumunda ise NO_x

değeri maksimum seviyelere çıkmaktadır. Tez çalışmasında da incelen bir motor çalışma karakteristiği olan soğutma suyu sıcaklığı da NO_x üzerinde etkili bir parametredir. Öyle ki soğutma suyu sıcaklığının yükselmesi de azot oksit emisyonunun artmasına sebep olmaktadır (Ferguson and Kirkpatrick 2001; Pulkrabek 2003).

Buji ateşlemeli motorlarda EGR kullanımı ile taze şarj dolgusunun konsantrasyonun seyreltilmesi NO_x emisyonları üzerinde pozitif bir katkı sağlamaktadır (Ferguson and Kirkpatrick 2001; Pulkrabek 2003). Hava ve çevre kirliliğine başlıca etkileri bulunan bu emisyon gazının değerinin sınırlandırılması için katı standartlar getirilmiştir.

NO oluşumuna yönelik olarak için çok sayıda reaksiyon bulunmaktadır. Tüm bu reaksiyonlar yanma zamanı boyunca ve hemen sonrasında meydana gelmektedir. Bazı oluşum reaksiyonları Eş. (12), Eş. (13), Eş. (14)'de verilmiştir.



Hidrokarbon (HC) emisyonu

Buji ateşlemeli motorlarda egzoz gazları içerisinde yakıtın %1 ile %1,5'ine tekabül eden 6000 ppm civarında yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonu ihtiva edebilirler. Bu değer yaklaşık %60 kadarı reaksiyona girmiş yakıt bileşenlerinden meydana gelir. Geriye kalan kısmı ise yanmamış yakıttır (Ferguson and Kirkpatrick 2001).

HC emisyon karakteri yakıtın bileşenlerine bağlı olarak değişiklik gösterir. HC emisyonlarını yanma odası geometrisi ve motor çalışma parametreleri gibi birden fazla etkileyen ana unsur vardır. Ancak HC emisyonlarının oluşum nedenleri arasında stokiyometrik olmayan hava yakıt oranı en önde gelmektedir. HC emisyonu hav-yakıt oranının bir fonksiyonudur. Bu yüzden zengin karışımlarda yetersiz oksijen bulunduğundan dolayı kalitesiz reaksiyon gerçekleşir ve egzoz emisyonları içerisinde yüksek miktarlarda HC ve CO gazları salınır. Bu zengin karışım durumu ile özellikle motorun ilk çalışma zamanı boyunca karşılaşmaktadır. Ancak hava yakıt oranı fakir bir karışım ise yanma kötüleşeceğinden dolayı HC emisyon oluşumu yine artan bir davranış sergileyebilmektedir. Silindir içerisindeki karışımın uygun stokiyometrik olmasına rağmen eksik yanma meydana gelir ve egzoz gazları içerisinde yine bir miktar HC emisyonu salınır (Ferguson and Kirkpatrick 2001).

Hidrokarbon yakıtlar 10-20 ana türden ve yaklaşık 100-200 alt türden oluşur. Aynı türlerin büyük bir kısmı egzoz gazı içerisinde bulunur. Bununla birlikte, egzoz

hidrokarbonlarının bir kısmı ana yakıtta bulunmaz, ancak tamamlanmayan kimyasal reaksiyonlarla yapısı silindir içinde değiştirilen yakıttan türetilen hidrokarbonlardır. Bu hidrokarbonlar, salınan toplam hidrokarbonların yaklaşık % 50'sine tekabül eder. Buna etki eden diğer faktörler ise homojen alevin cidarlarda sönmesi ve yakıtın yanmamasıdır. Art gazlar içerisinde önceki çevrimden alan yanmamış yakıt genişleme sırasında yanmayı olumsuz etkiler ve alev sönmesi durumunu tetikler. Yakıtın yüksek basınçla silindir içinde dar boşluk hacimlere sıkıştırılması ve yanmayana yakıt karışımının genişleme zamanında boşluktan çıkarak egzoz gazlarıyla dışarıya atılması HC miktarını artıran diğer bir etmendir. Hatta bu durum HC emisyonlarının %38'lik kısmının temel nedenidir (Ferguson and Kirkpatrick 2001). Alternatif oksidasyon yollarından ve ortaya çıkan HC emisyonlarının temelde altı ana durumla ilişkili olduğu ifade edilmektedir. Bunlar; dar boşluklar, cidar yağ tabakaları, karbon yatakları, sıvı yakıt, silindir cidarlarında alevin sönmesi-yanmama ve egzoz supapından olan kaçaklardır (Cheng *et al.* 1993; Pulkrabek 2003).

Dizel motorlarda ise hidrokarbonlar genelde enjektörde kalan yakıttan yani enjeksiyon sonunda geciken yakıtın dışarı atılmasıyla, kalitesiz enjeksiyon, homojen olmayan karışım, silindir duvar cidarlarında kalması gibi olası sebeplerden dolayı oluşmaktadır.

Partikül Madde (PM) emisyonu.

Egzoz gazlarında ki görünür duman veya kurum olarak ifade edilen yüksek konsantrasyonlu partikül madde (PM), küçük boyutlu olup solunması durumunda solunum problemi teşkil edebilmektedir. PM sıkıştırma ateşlemeli motorlar için önemli bir emisyon problemi olmasına rağmen buji ateşlemeli motorlarda düşük yüklerde ve kurşunsuz yakıtın zorunlu kullanımı ile salınan PM miktarının az olmasından dolayı önemli sorun teşkil etmemektedir (Ferguson and Kirkpatrick 2001).

Yanma sırasında zengin karışımın olduğu bölgelerde meydana gelen PM, maksimum oluşum değerine motorun yüklü ve tam gazlı olduğu durumda ulaşmaktadır. Bu partiküller küresel formda yapıya sahip ve katı karbon birikimlerinden meydana gelir. Boyutları 10-80 nm arasında değişmektedir (Pulkrabek 2003). Daha büyük sağlık risklerine sebebiyet veren 2,5 mikrondan küçük olan parçacıklardır ve bunlar iyi parçacık olarak adlandırılır. Diğer yandan çapı 2,5 ila 10 mikron arasında olan parçacıklar ise kaba parçacık olarak tanımlanır. Partikül emisyonları, seyreltme tünelleri, ışık Emilimi, filtre renk değişikliği ve filtre kağıdı sıkışma kütlesi gibi yöntemler ile ölçülmektedir (Ferguson and Kirkpatrick 2001). PM emisyonu bu bölümde sadece teorik bilgi olarak verilmiş olup yapılan tez çalışması kapsamında PM ölçümü yapılmamış olup emisyonlar hakkında bilgi verilmiştir.

Emisyonların incelenmesine yönelik olarak Pang *et al.* (2004) termal faktörlerin dizel motor kalibrasyon sürecine entegrasyonundan NO_x emisyonlarının azaltılması potansiyelini araştırmışlardır. Dizel motor NO_x emisyonlarının enjeksiyon zamanlaması ve EGR oranı gibi ana motor çalışma parametrelerine ek olarak motora uygulanan soğutma seviyesine doğrudan bağlı olan motor çalışma sıcaklığına duyarlı olduğu gösterilmiştir. Testlerini 2,4 lt bir dizel motor üzerinde NEDC sürüş çevrim testi kapsamında yapmışlardır. Test programında dikkate alınan faktörler soğutma sıvısı sıcaklığı, enjeksiyon zamanlaması ve EGR oranıdır. Testlerdeki temel amaçları, soğutma sıvısı sıcaklığındaki ve motor parametrelerindeki değişime göre özgül yakıt tüketimi (BSFC), NO_x, CO, HC ve duman parametrelerinin yanıtlarını karakterize etmek olmuştur. Motor soğutma set değeri de dahil olmak üzere entegre bir kalibrasyon metodolojisinin benimsenmesiyle, yakıt tasarrufunda küçük bir azalma ve CO değerinde artış sağlanmıştır. NO_x emisyonlarının NEDC sürüş çevriminde görülen önemli yüksek devir ve yüklü çalışma noktalarında % 30'a kadar geliştirilebileceğini söylemişlerdir.

NO_x ve benzeri kirleticileri ve egzozu giden yakıt tüketimini iyileştirmeye, motor soğutma sisteminin ağırlığını ve maliyetini düşürmeye yönelik olarak son 20 yılda yapılan yenilikçi yöntemlerinden bazıları Ap and Tarquis (2005) tarafından açıklanmıştır. Yenilikçi motor soğutma sistemlerinin karşılaştırmasında sistem ağırlığı, ambalajı ve maliyeti, yakıt tüketimi ve egzozdaki kirletici maddeler, termal konfor ve motor soğutma sisteminin ısı performansını gibi başlıklar yer almıştır.

İçten yanmalı motorlarda ısı enerjisi yönetim stratejisine yönelik olarak motor soğutma sisteminin etkinliği ve geliştirilmesi öne çıkan bir konudur. Öyle ki bu denli önemli ve araştırılmaya açık bir çalışma alanı birçok araştırmacının kendisine doğru yönelmesini sağlamıştır. Açık literatürde termal enerji yönetim stratejisi kapsamında klasik sistem ve uyarlanmış elektronik kontrollü soğutma sistemine yönelik yapılan çalışmaların temel amaçları ve elde edilen bilgiler aşağıda verilmiştir.

Kontrollü motor soğutma sistemlerinin en önemli stratejilerinden birisi motor ısınma süresinin azaltılmasıdır. Motor termal sisteminin toplu parametre modeli ve model verileri kullanılarak kararlı veya değişken farklı motor çalışma koşullarında ısınma zamanında ki değişken dinamikler simülasyon ortamında incelenmektedir (Samhaber *et al.* 2001). Tasarımcılarının üzerinde önemle durduğu diğer bir nokta ise motor ısınma süresinin ve dolayısıyla yakıt tüketiminin iyileştirilmesidir. Bu bağlamda motorun termal davranışının CFD analizi ile soğuk başlangıç sırasında ısınma sıcaklığı dinamik davranışını incelemek için motor termal modeli geliştirilmiştir. Bu modelde motor kütlesi, soğutma sıvısı ve motor yağı hacmi göz önünde bulundurulmuştur. Bu model sayesinde motorun ısınma zamanı sırasında

soğutma sıvısı ve yağ sıcaklığında azalmalar görülmüştür (Ranjan *et al.* 2016). Benzer bir diğer çalışmada ise buji ateşlemeli, turboşarjlı ve ara soğutmalı bir motorun ısınma davranışı 1-D modelleme yardımıyla sayısal olarak incelenmiştir (Lahuerta *et al.* 2013). Motor ısınma özelliklerinin incelenebilmesi adına motor blok, silindir başlığı ve soğutma sistemlerinde ısı transferi için modeller yapılmıştır.

Motora gelen yakıt enerjisinin büyük bir kısmı yüksek sıcaklıktaki egzoz gazları ve yağlama yağı ile atılmaktadır. Atıl termal enerji olan sıcak egzoz gazları ve yağ arasında termal etkileşimi artırmak için ek ısı eşanjörleri kullanılmasının yakıt tüketimini iyileştirebileceğini belirten Andrews *et al.* (2007) buji ateşlemeli motor üzerinde motor yağ ısıtma oranını yükseltmek için motor yağ-soğutma sıvısı eşanjörü kullanmışlardır. Bunun dışında ek olarak benzer amaçla soğutma suyu ve egzoz gazı arasında da bir ısı değiştiricisi kullanımına gitmişlerdir. Hazırlanan 3 farklı durumdan ilkinde hiçbir modifikasyonun olmadığı, 2. durumda sadece yağlayıcı-soğutucu ısı eşanjörü ve son durum yağ-soğutma suyu ısı eşanjörü ve soğutma suyu-egzoz gazı ısı eşanjörü kullanımına gidilmiştir. İlk durum testlerine göre 2. durumda soğutma sıvısı tepe sıcaklığında 10°C düşüş gözlenmiştir. Böylece, özgül yakıt tüketiminde % 6'lık bir iyileşme sağlanmıştır. Soğutma suyu-egzoz gazı ısı eşanjörü deneylerinde, artan enerji girişi yağa geçen enerjiyi dengelemiştir. Bu durumda soğutma suyu sıcaklığı maksimum 20°C ve yağlayıcı sıcaklığı maksimum 12°C artmıştır. Burada özgül yakıt tüketiminde % 16'lık bir iyileşme elde edilmiştir. Çalışmada her iki yönteminde yakıt tüketimi üzerinde olumlu etkilere sahip olduğu ve farklı alt sistemlerin olumsuz etkilerini dengelemede çeşitli teknolojik yöntemlerle birlikte kullanımının getirebileceği kazanımın önemi gösterilmiştir.

Cahnfreau *et al.* (2003) elektrikli su pompası ve fan sistemlerinin elektronik devreye sokulması ile yeni bir motor soğutma stratejisi araştırmışlardır. Bu gibi kontrollü aktüatörlerin kullanımının gürültü düzeyi, kirletici emisyonlar, yakıt tüketimi, araç konforu ve motor dayanımı üzerinde iyileşmeler sağlanabileceğinden bahsetmişlerdir. Bunun dışında farklı çözümlerinde olduğunu ve birbirleri arasında maliyet-işlev karşılaştırmaları yapmışlardır. Ön plana çıkan aktif akıllı bileşenlerinden birisi klasik termostatının yerine elektrikli valfin kullanımı olmuştur. Bu yeni valfin termal sistem üzerindeki kullanımının etkileri ve araç testi karşılaştırmaları araştırılmış ve test sonuçlarına göre klasik termostatlı sisteme kıyasla emisyon ve yakıt tüketiminde önemli derecede iyileşmelerin olduğu gözlenmiştir.

Motorlarda termal yönetim sisteminin iyileştirilmesi kapsamında temel motor soğutma sistemi bileşeni olan mekanik pompanın görevini elektrikli su pompasını yardımıyla yapılması önerilmiştir (Ribeiro *et al.* 2007). Böylece motor soğutma sıvısı debisinin kontrollü bir şekilde

sirkülasyonu gerçekleştirilebilir. Böyle bir yöntemin tüm motor sisteminde enerji kazançları sağlayacağı belirtilmiştir. Elektrikli su pompası kullanımının, motor soğutma sisteminde önemli bir değişiklik olarak öne çıkmasının yanında ayrıca motorun dayanımı, kirlenme emisyon, yakıt tüketimi ve araç performansı ile ilgili sistem kontrolcüsü olduğunu söylemişlerdir. Motor testlerinden elde etmiş oldukları sonuçlara göre böyle bir uygulama çalışmasının, motor ısınma süresinde yaklaşık %50 kadar bir iyileşme sağladığını görmüşlerdir. Bu iyileşme neticesinde araç içi kabinin de ısınma süresi kısalmış olacaktır. Bunun yanında bazı motor çalışma zaman aralıklarında soğutma sıvısı sirkülasyonuna gerek olmadığı veya soğutma için daha az miktarda akışkan debisine ihtiyaç olduğunu ifade etmişlerdir. Soğutma sıvısı kontrolüne ek olarak elektrikli pompanın konumlandırılabilmesi esnekliğinin olmasının önemli bir avantaj olduğu vurgulanmıştır. Motor bloğunda muhtemel kaynama riskinin ve sonrasında olabilecek durum senaryolarının giderilmesi için elektrikli soğutma sıvısı pompası izlemesi yapılabileceğini söylemişlerdir.

Bir diğer çalışmada, motor soğutma sisteminin bileşen analizi ve ampirik modellemesi yapılarak Chastain and Wagner (2006), gelişmiş motor soğutma sisteminin yanma ortamını iyileştirebileceğini, yakıt verimliliğini artırabileceği söylenmiştir. Bu bağlamda bilgisayar kontrollü elektromekanik vanalar, radyatör fanları ve soğutma sıvısı pompaları yardımıyla öngörülen motor sıcaklık izlemelerini yapmak ve akıllı termal kontrol stratejileri uygulamak için matematiksel modeller ve gerçek zamanlı algoritmalarla yararlanılabileceğini ifade etmişlerdir. Motor soğutma sisteminde kullanılan geleneksel balmumu esaslı termostat, mekanik pompa ve radyatör fan grubu yerine yüksek hızlarda gereksiz motor yüklerini azaltmak ve düşük hızlarda daha iyi soğutma sağlamak için kontrol edilebilir vanalar, elektrikli pompa ve radyatör fanlarının tercih edilebileceğini bildirmişlerdir.

Gelişmiş motor soğutma sisteminde kullanımıyla kontrol edilebilir bir otomotiv soğutma sistemi elde edilebilir. Bu amaca yönelik olarak Choi *et al.* (2009a) elektronik aktüatör kullanarak yüksek soğutma sıvısı sıcaklık kontrolü, hızlı ısınma ve soğutma sonrası soğutma stratejilerini araştırmışlardır. Bu çalışmanın amacı için yüksek hızlı direkt enjeksiyonlu bir motorun soğutma sistemi değiştirilerek yenilenmiş soğutma sisteminin ısınma süresini iyileştirmeye ne denli katkıda bulunacağını NEDC sürüş çevriminde warp-up zamanı boyunca incelenmişlerdir. Geleneksel mekanik pompa motordan ayrılmış ve soğutma sıvısı sirkülasyonu fırçasız bir DC motoruyla elektronik olarak kontrol edilmiştir. Benzer bir değişiklik olarak motor ve soğutma bileşenleri arasındaki soğutma sıvısı hattına valfler takılmıştır. Bu değişiklikler ile hem yakıt tüketiminde hem de toplam HC (THC), CO gibi egzoz gazı emisyonlarında bir iyileşme sağlanmıştır. Bu iyileşme, soğutma sıvısının yüksek

sıcaklığını kontrol ederek düşük devir ve düşük yük sürüş koşullarında özellikle önemli hale gelmiştir. Bununla birlikte soğutma sıvısı kontrolü için elektrikli pompa ve valflerin bağımsız olarak çalıştırılması soğuk çalıştırmada motor ısınma süresinin kısılmasına, zararlı emisyonların ve yakıt tüketiminin iyileşmesine katkıda bulunmuştur. Çalışma sonuçlarına göre, NEDC kısmi yük koşullarında, THC, CO ve BSFC (özellik yakıt tüketimi) değerleri sırasıyla yaklaşık %10, %4 ve %3 oranında azalmıştır. Bununla birlikte, yüksek soğutma suyu sıcaklığı nedeniyle NO_x emisyonu yükselmiştir. Soğutma sıvısı debisinin azaltılması durumunda, THC ve CO emisyonlarında %20 oranında bir iyileşme sağlanmış olup, NO_x emisyonunun NEDC sürüş döngüsünde arttığı gözlenmiştir. Sıfır akışlı ısıtma stratejisi, motor sıcaklığının geleneksel stratejisi ile karşılaştırıldığında motor ısınma süresinde yaklaşık %30 kazanç sağlanmıştır. Hızlı ısınma, THC ve CO emisyonlarının %17 ve %15 oranında azalmasına neden olurken, NO_x emisyonunun % 10 artmasına sebep olmuştur. Ayrıca motor ve yağ soğutucu arasındaki valfi kapatarak ısınma süresinin önemli ölçüde iyileşmesi sağlanmıştır. Böylece yeni soğutma konseptinin emisyon özellikleri geleneksel stratejiye kıyasla geliştirilmiştir.

Mekatronik bileşenlerin kullanımıyla gelişmiş motor termal yönetim sisteminde farklı iyileştirmesine yönelik olarak literatürde benzer çalışmalar bulunmaktadır (Choukroun *et al.* 2001; Eberth *et al.* 2004; Choi *et al.* 2009b).

Soğutma sisteminde iyileştirmeler yapılmasının yakıt tasarrufu ve motorun termal etkinliğine olumlu katkılar sağlamaktadır. Soğuk çalıştırma safhasında emisyonları ve yakıt tüketimini etkileyen faktörlerden birisi de düşük sıcaklıktaki silindir gömleğidir. Bu durum aslından doğrudan motor soğutma sıvısıyla birebir ilişkilidir. Motor ısınma süresince soğutma suyu bypass hattında çevrimini sürdürür. Bu zaman içerisinde termostat kapalı pozisyonundadır ve radyatörden bir ısı transferi gerçekleşmez. Böyle bir soğutma sistemi düşük yük ile yüksek hız gibi uç şartlara göre göre tasarlanmıştır. Aslında bu uç durum mekanik pompanın, motorun çalışması boyunca sadece % 5'lik zaman dilimine uymakta olup geri kalan çalışma zamanı boyunca gerekenden fazla soğutma işlevi yerine getirmektedir (Brace *et al.* 2008).

Soğutma sıvısının motor devrinden bağımsız olarak optimize edilmesi özellikle soğuk çalışma koşullarında ısı verimliliğini iyileştirmek adına önemli bir iyileştirme olacağı önerilmiştir (Kuboyama *et al.* 2011). Önerilen bu yöntemde ilk olarak normal soğuk çalışma daha sonra mekanik pompa çalışmaksızın soğuk çalışma ve son durum 100°C' yağ sıcaklığında soğuk çalışma yöntemleri olmak üzere üç farklı test konfigürasyonu uygulanmıştır. Ayrıca soğutma sıvısı sıcaklığının kararlı şartlar altında ısı verim üzerine olan etkileri incelenmiştir. Araştırmacılar testlerini soğuk ve kararlı çalışma fazında ısı

verimliliğin araştırılması üzerine kurgulamışlardır. Yüksek sıcaklıkla motor iç sürtünmeleri aalarak ısı verimde iyileşmeler sağlanabilir. Böylece soğuk çalışmada yakıt tüketiminde mekanik pompanın kullanılmadığı durumda yaklaşık %2,6 ve ısınmış yağ kullanımında yaklaşık %3,5 oranında iyileşme sağlanmıştır. İkinci ve üçüncü deney konfigürasyonunda silindir duvar cidarlarında değişken sıcaklıklara sebep olabilecek soğutma sıvısı sıcaklığının lokal etkileri görülmemiştir. Hatta yüksek sıcaklıkta bulunan soğutma sıvısının mekanik sürtünmelere olumlu katkıları olmuştur. Tüm bu durumlar neticesinde fren termal verimliliğinde %3 - %5 arasında iyileşme sağlanmıştır.

Motor ısınma periyodunda motor soğutma sıvısı optimizasyonunun olumlu etkilerini gösteren diğer bir çalışmada Gardiner *et al.*(2013) soğutma suyu pompa devrinin motor duvar sıcaklıklarının farklı noktalarındaki değişimleri incelenmiştir. Soğutma sıvısı debisinin duvar sıcaklıkları üzerinde gözle görülür etkiye sahip olmasına karşın, NEDC sürüş testine göre % 0,5 -% 1 arasında bir yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Bent *et al.* (2013) soğutma sıvısı debisinin optimizasyonuna farklı bir yaklaşımda bulunarak buji ateşlemeli bir motorda modifiye bir soğutma suyu devresi kullanmışlardır. Soğutma sıvısı sıcaklığı 60 °C'ye ulaşana kadar mekanik pompa sirkülasyonu durdurulmuş ve daha sonra 30 saniye boyunca akışa izin verilerek ardından tekrar 60 saniye boyunca akış engellenmiştir. Bu durum tekrarlanmıştır. Üst duvar sıcaklığının normal akışa göre 10°C daha yüksek sıcaklıkta olduğu ancak alt duvar bölgelerinde daha düşük sıcaklıklarda olduğu görülmüştür. İlk 250 saniye boyunca; değişken soğutma sıvısı akış stratejisi, yanma koşulları ve piston duvar sürtünmesi gibi etkiler altında deneyler yapılmıştır. HC egzoz emisyonları incelendiğinde klasik sistemli soğutma sıvılı duruma kıyasla yaklaşık% 6'lık bir iyileşme gözlenmiştir.

İçten yanmalı motorlar üzerine yapılan çalışmalarda motor performansı ve emisyonların incelenmesi için seçilen bazı sürüş çevrimleri uygulanmaktadır. Bunlardan birisi olan Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (NEDC) literatürde sıkça kullanılmaktadır. Uzun süredir kullanımda olan HCCI motorlar normal buji ateşlemeli bir motorun modifikasyonla dönüştürülmüş halidir. HCCI motor üzerinde emisyon ve yakıt tüketimine yönelik yapılan çalışmalarda NEDC çevrimi uygulamasına rastlanmaktadır (Pacheco *et al.* 2013). Simülasyon yazılımlarından faydalanılarak artan doğru sonuç elde etme imkânı ile gerçek araç testlerinde duyulan zaman ve maliyet ihtiyacı ortadan kalkmaktadır. Kullanılan simülasyon yazılımları arasında AVL-Cruise yazılımı da yer almaktadır. AVL-Cruise modelleme yürütülen bu çalışmada yakıt tüketiminin %21 ve NOx emisyonunun %53 civarında iyileştirilebileceği belirtilmiştir.

İçten yanmalı motorlarda kullanılan yağlama sistemleri özellikle soğuk çalışma koşullarında etkin bir rol sahibidir. Motorun soğuk bölgelerinde kararlı çalışma sıcaklığına ulaşmış bölgelere nazaran hareketli metal kısımlarda düşük sıcaklığa bağlı olarak sürtünme kayıpları önemli miktarda artmaktadır. Bu sürtünme kayıpları, NEDC gibi sürüş çevrimleriyle kullanılarak karşılaştırıldığında yakıt ekonomisinde % 10'a varan bir sürtünme kaybından söz edilmektedir. 100 °C'nin altındaki motor yağı sıcaklığında, motor soğutma suyu karterdeki motor yağını yoğunlaştırıp inceltiyerek motorun metalik aşınmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, motor yağı sıcaklığının 100°C'nin üzerinde olması yoğunlaşmayla olan motor aşınmasını en aza indirgenmektedir. Bu durum Will *et al.* (2011) tarafından araştırılmış ve 22°C sıcaklığındaki NEDC sürüş çevriminde soğuk başlatmada sürtünme kayıpları incelenmiştir. Çalışmada önemli ölçüde yakıt tüketiminde iyileşme sağlayan yeni bir yöntem sunulmuştur. Şasi dinamometresinde yapılan deneylerde yakıt tüketiminde %7'nin üzerinde bir iyileşme görülmekle birlikte yağ sıcaklığı hızla artarak zararlı emisyonlar önemli ölçüde azalmıştır.

İçten yanmalı motorlarda motorun kararlı çalışma sıcaklık bölgesine ulaşması için geçen zaman boyunca ısınma fazı motor soğutma sistemleri açısından önemli bir parametredir. Bu parametrenin ne denli önemli olduğunu görebilmek için Romero *et al.* (2014) sıkıştırma ateşlemeli bir motorda ısınma periyodu boyunca yakıt enjekte edilmiştir. Enjekte edilen yakıt enerjisinin geri kazanım kapasitesinin zamanla değişimi NEDC sürüş çevrimi boyunca analiz edilmiştir. Bu süreçte egzoz gazları ve soğutma sıvısı ile motordan elde edilen enerji deneysel olarak belirlenmiştir. Yakıt tüketimi ve motor devrinin değişim eğrisi NEDC çevrim profilinin bir fonksiyonu olarak benzer davranışlar sergilemiştir.

İçten yanmalı motorların termal verimleri ısınma periyodunda özellikle soğuk çalışma koşullarında düşüktür. Bu bağlamda araştırmacılar tarafından bu durumun nedenleri ve çözümüne yönelik olarak çalışmalar yapılmaktadır. Literatürde yapılmış olan çalışmalardan elde edilen bilgiler ışığında soğuk koşullardaki yağ viskozitesinin sıcaklığa karşı oldukça duyarlı olduğu ve düşük sıcaklıklarda artan viskozitenin, hedef çalışma sıcaklığında gözlemlenenden daha yüksek sürtünme ve pompalama kayıplarına neden olduğunu vurgulamışlardır. Bu problemin çözümü için literatüre dayanarak faz değiştirme malzemelerinin kullanıldığını ve silindir boşluğunu izole etmek için termal bariyer kaplamasının yapıldığı bir dizi sistem değişikliğine giden yöntemlerin kullanıldığını söz etmişlerdir (Roberts *et al.* 2014).

Motor ısınma fazının kısaltılması için değişik teknikler kullanılmaktadır. Yöntemlerde üzerine en çok odaklanılan önemli bir soğutma sistemi bileşeni olan mekanik pompadır. Bu

bağlamda Pizzonia *et al.* (2016) mekanik pompa yerine kontrol donanımlarına sahip kontrol edilebilen bir elektrikli pompanın kullanılmasını önermişlerdir. Araştırmada özellikle motor ısınma fazı esnasında CO₂ emisyonunun ve yakıt tüketiminin azaltılması için bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Sonuçta daha düşük emisyon değerleri elde edilebileceği ve yakıt tüketiminde iyileşmeler sağlanacağı söylenmiştir.

Bu konu üzerine yapılan diğer bir çalışmada ise Castiglione *et al.* (2016), elektrikli pompa kullanarak soğutma sistemi tasarlamış ve gövde içerisinde dolaşan suyun sıcaklığını çekirdek kaynamanın oluşma sınırına yakın bölgelerde olacak şekilde ayarlamaya çalışmışlardır. Araştırma motorunun kapak kısmına termokupl yerleştirmiş ve bu bölgedeki sıcaklık değerini tasarladıkları denetleyici (PID) ile geri besleme işareti olarak kullanmışlardır. Dolayısıyla motora gönderilmesi gereken suyun debisi ayarlanabilmiştir. Sonuç olarak yapılan deneylerin sonucunda motorun hem ısınma fazının süresinde azalma ve hem de pompanın debisinin ayarlanmasıyla optimum ısı transferi sağlanabildiği grafiksel olarak gösterilmiştir.

Sera gazlarının ve özellikle CO₂ emisyonlarını düzenlenmesinde Dünya üzerinde kullanılan sürüş çevrimleri vardır. Bunlardan bazıları WLTC, NEDC ve FTP-75 (Federal Test Prosedürü) çevrimleridir. Bielaczyc *et al.* (2015) tarafından incelenen bu testlerin enerji tüketimi ve sürdürülebilirlik, yakıt tüketimi, yakıt tasarrufu veya CO₂ egzoz emisyonlarını düzenlediğinden bahsetmişlerdir. Testlerde çoğu kez NEDC testinin, nispeten ön plana çıkmayan hız izine rağmen en yüksek sonuçları verdiğini ifade etmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan üç döngüye ait hız izlerine incelendiğinde maksimum/ortalama hız, maksimum hızlanma, boшта kalma oranı gibi çeşitli parametreler türetilebileceğini ifade etmişlerdir.

Yine benzer yönde diğer çalışmalarda WLTC çevriminin NEDC ve FTP-çevrimleriyle arasındaki ilişki incelenmiştir (Bielaczyc *et al.* 2016). Her üç çevrimin niceliksel karşılaştırmaların oldukça önemli olduğu belirtilmiştir. Çalışmada farklı araçlar üzerinde her üç çevrime ait testler gerçekleştirilmiş olup emisyon analizleri değerlendirilmiştir. Her üç çevrimin de farklı değişkenler için dezavantaj veya avantajları belirlenmiştir. FTP-75 çevriminde tüm gaz emisyon değerleri daha düşük olmasına rağmen parçacık emisyonları daha yüksek değerlerde seyretmiştir.

Orta sınıf bir otomobil için NEDC ve WLTC 'nin bilgisayarlı simülasyon test çevrimlerinin geleceği analiz edilmiştir (Sibiceanu *et al.* 2016). AVL-Cruise kullanarak simülasyon işlemlerinin uygulanması, araç üreticileri için düşük maliyetler ve sürecin herhangi bir aşamasında araç yapısını gözden geçirme fırsatı gibi bir dizi avantajları getireceği ifade edilmiştir. AVL Cruise ile elde edilen veriler neticesinde NEDC'ye göre WLTC

çevriminde geçiş yüklerinde yakıt tüketimi ve CO₂ emisyon değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Manuel şanzımanlı araçlarda NEDC çevrimine kıyasla WLTC testinde yakıt tüketimi 1,9 lt /100 km (% 35,18) ve 50g CO₂ /km (% 37,59) daha fazla gözlenmiştir. Ancak otomatik şanzımanlı araçlarda NEDC çevrimine kıyasla WLTC testinde daha elverişli bir durum görülüş olup, yakıt tüketimi sadece 1.2 lt/100 km (% 18,46) ve 49 g CO₂ /km (% 36,02) kadar artış olmuştur. WLTC test döngüsü çok daha zor ve geçici çalışma aşamaları ile karakterize edilmiş bir sürüş çevrimidir. Bu yüzden WLTC çevriminden daha fazla olumlu cevaplar alabilmek için, içten yanmalı motorların yeni geliştirme stratejisiyle birlikte otomatik şanzıman ve motor kalibrasyon yöntemlerine daha titiz bir yaklaşım kullanmak gerektiği vurgulanmıştır.

Bazı simülasyon programları sayesinde araç ısııl enerji yönetimi optimizasyonu yapılabilmektedir. Bu bağlamda Tang *et al.* (2016) buji ateşlemeli turbo bir motorun NEDC şartları altında soğutma, yağlama, güç üretimi, HVAC, emme ve egzoz sistem modellemeleri yapılmış olup araç ısınma zamanının yakıt tüketimine olan etkilerini incelemişlerdir. Yakıt tüketimine dair çalışma verileri radyatör, termostat ve HVAC sistem açısından değerlendirilmiş olup, optimum termostat açma sıcaklığının 85°C olduğuna, uygun boyutlu (küçültülmüş) radyatör ve HVAC kompresör boyutları ile termal enerji yönetimi modellemeler yardımıyla optimum hale getirilebileceğini ifade etmişlerdir.

Yakıt tüketiminin iyileştirilmesi bağlamında diğer bir çalışma olarak elektrikli eyleyici uygulamasıyla kontrol çalışması yapılmıştır (Lingarde *et al.* 2015). Bu kontrolcü yakıt tasarrufu için bileşen ve alt sistemlere yönelik hazırlanmıştır. Bu bağlamda ısııl enerji yönetim stratejisi, adaptif aerodinamik ve makina-insan etkileşimi gibi üç değişik teknoloji konusu çalışılmıştır. Bu çalışmada MÖD ile soğutma ve batarya sistemine bir entegre kontrolcü tasarlanmıştır. Motorda ki bölgesel sıcaklık noktalarını da dikkate alarak soğutma sıvısı minimize edilmesi gerektiği ve bu minimum miktar işleminin gevşetilmesinin yakıt tüketiminde pozitif katkıları belirtilmiştir.

Çevre kirliliğinde önemli bir role sahip olan içten yanmalı motorların aksine elektrikli araçlar üzerine de odaklanılmış ve benzer araştırmalar elektrikli araçlar üzerinde de yürütülmektedir. Simülasyon ve modelleme programı olan AVL Cruise programı ile elektrikli araç modeli oluşturulmuş olup model ise gerçek bir araca dayandırılmıştır (Cioroianu *et al.* 2017). Böyle bir çalışmada bir elektrikli motor ve batarya takımı kullanımı ile araç yeniden modifiye edilmiştir. Testler diğer bir sürüş çevrimi olan WLTC (Dünya çapında uyumlu Hafif araçlar Test Çevrimleri) çevriminde araç performansı, enerji tüketimi ve menzil gibi

parametrelerin sağlanmasında kullanılmıştır. Böylece, WLTC test çevrimi ile aracın menzilini artırmaya yönelik iyileşmeler elde edilmeye çalışılmıştır.

Cipollone *et al.* (2013) motor soğutma devresine yönelik olarak matematiksel bir model kurmuşlardır. Motor soğutma sisteminin termo-hidrolik alanını çözebilme ve kontrol stratejisini belirlemek için çalışılmıştır. Çalışmada motor soğutma sistemlerinde yeni modellerin incelenmesinin önemini vurgulamışlardır. Motor ısınma süresi için yağ ve soğutma sıvısı üzerinde çalışılmıştır. Şehir içi kullanım ve soğuk çalışma şartlarında yakıt tüketimi ve zararlı emisyonlarda iyileşmelerin öneminden bahsedilmiş ancak zaman ve maddi açıdan zorlukların olduğunu belirtmişlerdir. Çok sayıda devre, bileşen ve denetleyici stratejilerinin araştırılması için genel bir boyutlu bir model hazırlanmış ve deney motoru üzerinde model doğrulanmıştır.

Araç güç aktarma sisten bileşeninin termal denetimi bileşen sayısı ile orantılı olarak değişmektedir. Eyleyici ve sıcaklık limitlerini kontrol etmek için model tahmin kontrolcüsü kullanımı ön plana çıkmaktadır (Bonkoski *et al.* 2017). Kontrolcülerin optimum yerleşiminin belirlenmesi, şasi dinamometresinde yol şartlarının ve denetleyici kontrolünün yapılması ile termal enerji yönetimi incelenmiştir. Söz konusu kontrol uygulamasına radyatör, yağ soğutucusu, kabin ısıtma radyatörü ve mekanik pompa gibi bileşenler dâhil edilmiştir. Radyatör hattı soğutma sıvısı ve termostat açıklığının etkin bir şekilde kontrol edilmesine izin vermek için, termostatin yerine üç yollu bir valf kullanılmıştır.

Gelişmiş termal yönetim teknolojisinin yakıt tüketimini iyileştirmede etkili bir yöntem olduğu yapılan çalışmalarla desteklenmiştir. Buna istinaden Liu *et al.* (2017) çalışmalarında GT-SUITE program tabanlı 1 boyutlu termal yönetim simülasyonu vasıtasıyla, NEDC çevrimi altındaki yakıt tüketiminde en iyi faydasından dolayıyla soğutma suyu kontrol modülü testi üzerine çalışmışlardır. Bu model araç, soğutma sistemi, yağlama sistemi ve tüm sürtünme bileşenleri ile ayrıntılı motor modelini içermektedir. Kontrol valfinin tasarımı ve kontrol stratejisi modelde doğrulanmıştır. Bu çalışma için bir prototip tasarlanmış, yapılmış ve test düzeneğinde doğrulanmıştır. Bu soğutma sıvısı kontrol modülünün prototipi, mevcut 2 litrelik turboşarj GDI benzinli SUV araç üzerinde entegre edilmiştir. Soğutma sıvısı kontrol modülü, radyatör, by-pass, motor yağı soğutucusu, kabin ısıtıcısı ve şanzıman yağı soğutucusu dâhil olmak üzere toplam 5 soğutucu kanalını kontrol edecek şekilde tasarlanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, soğutma sıvısı sıcaklık artış zamanında azalma ve yakıt tüketiminde ise % 1.8 iyileşme görülmüştür. Ayrıca soğutma sıvısı sıcaklık artış süresi 260 saniye kısaltılabilmektedir.

İçten yanmalı motorlarda termal yönetim sistemi motor yağlama yağı ve soğutma sıvısı sistemi ile diğer mekanik ve elektronik bileşenleri kapsamaktadır. Motor yağlama sistemi, hareket eden parçaların birbirleri ve metal yüzeyler arasında sürtünme ve aşınmayı önlemenin yanı sıra malzemelerin yüksek sıcaklıklarda uzun ömürlü olmasına yardımcı olur. Yağlama sistemine benzer şekilde motor soğutma sistemi de benzer işlevlere sahiptir. Bu sistemde ilk hareketle birlikte hızlı bir ısınma periyodu sonrası kararlı çalışma şartlarına ulaşan motorun çalışmasını optimum çalışma sıcaklık bandında devam ettirmesi sağlanır. Bu şekilde bir termal enerji yönetim stratejisinin uygulaması ve var olan sistemlerin geliştirilmesine yönelik olarak değişik yöntemler kullanılmaktadır. Yöntemler içerisinde öne çıkan önemli uygulama örneklerinden biriside elektronik kontrol edilebilir soğutma sistemi bileşenleridir. Motor termal verimliliğin artırılması için elektronik kontrol edilebilen soğutucu termostat kullanılmasının motor soğutma sistemi performansı ve optimizasyonu üzerindeki etkileri incelenmektedir (Bakatwar *et al.* 2018). Motor silindir kapağı ve radyatör giriş hortumu üzerine monte edilen termostat gövdesinde bazı değişiklikler yapılarak, soğutma sıvısı sıcaklığına göre değişken termostat açıklığını kontrol eden bir elektronik kontrol ünitesi tasarlanmıştır. Geliştirilen bu sistemin motor performansı ve soğutma sistemi üzerindeki etkilerinin görülebilmesi için araç üzeri uygulaması yapılmıştır.

Motor soğutma sisteminde kontrol edilebilir termostata ek olarak elektrikli su pompası ve elektrikli fan gibi bileşenlerin kullanılmasıyla yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının iyileştirilmesi için deneylerden elde edilen motor karakteristiği verileri kullanılarak modeller geliştirilmiştir (Haghighat *et al.* 2018). Model çıktıları ışığında NEDC sürüş çevriminde kontrollü soğutma sisteminde klasik soğutma sistemine kıyasla %1,1 yakıt tasarrufunun yanında hidrokarbon ve karbon monoksit emisyonlarında %5,3 ve %6,1 kadar iyileşmeler sağlanmıştır. Motor performansı NEDC çevrimin tüm bölümlerinde iyileştirilmiştir. Yakıt tasarrufu ve emisyonlardaki bu iyileşmeler dikkate alındığında motor verimliliği açısından aktif kontrol edilebilir soğutma sistemi bileşeni kullanımının motor termal enerji yönetim stratejisine olumlu bir katkıda bulunduğu görülmektedir.

Kontrol edilebilir soğutma sistemi bileşenlerinin yanı sıra termal enerji yönetimi stratejileri kapsamında atıl termal enerji olan sıcak egzoz gazı enerjisinden faydalanılarak motor yağ sıcaklığının artırılması ile ısınma süresinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir (Battista and Cipollone 2017). NEDC motor sürüş çevriminde motorun ilk hareketiyle birlikte egzoz gazlarının sahip olduğu ısı enerjisi kullanılarak yağlama yağının daha hızlı bir şekilde ısıtılması düşünülmüştür. Öngörülen bu yöntemle yapılan çalışmalar neticesinde hızla ısınan yağın sürtünme kayıplarını azaltmasından dolayı yakıt tüketiminin azalmasına ve CO₂ kirlenici

emisyon değeriinde %3,6'ya varan iyileşmelere elde edilmiştir. Ayrıca yeni ısıtma yağı teknolojisinin sistem görünümünü elde etmek için değiştirilmiş yağ devresi, motor, soğutma sıvısı devresi ve egzoz hattı arasındaki etkileşim araştırılmıştır.

Isıl ve sürtünme kayıplarının minimuma indirgenmesi, motor verimliliğini artırmak için öne çıkan bir yaklaşımdır. Bu bağlamda literatürde Hölz *et al.* (2019) buji ateşlemeli bir motorda sadece soğutma sıvısı debisinin sayısal olarak kontrolü araştırılmıştır. İki bağımsız model, basitleştirilmiş bir lumped modeli ve üç boyutlu CFD-CHT (CFD-eşlenik ısı transferi) simülasyonu kullanılmıştır. Modelde ileri ve geri beslemeli kontrolörleri gibi farklı kontrol stratejileri incelenmiştir. Amaç odaklı kontrol stratejileri ve parametrelerinin kullanımı ile geniş bir aralık bandında etkin bir motor sıcaklıkları elde edilebileceği belirtilmiştir.

Termal enerji yönetimine yönelik içten yanmalı motorlarda yapılan çalışmaların öncelikli hedeflerinde ki temel odak noktası her bir bileşenin ayrı ayrı enerji dağılım analizlerinin yapılmasıdır. Enerji analizleri ile belirlenen enerji kayıpları veya kazançları motor termal veriminin iyileştirilmesine yardımcı olur. Böyle bir analiz dizel bir motorun kompresör, ara soğutucu, şaft gücü, türbin, soğutma sıvısı, yağlama yağı ve egzoz bileşenleri için yapılmıştır (Gao *et al.* 2019). Farklı motor yükü (%50 - %100) ve devirlerinde (1000-1700 dev/dk) gerçekleştirilen çalışmada enerji analizi yapılmış ve motor termal veriminin %38 değerlerine kadar çıkabileceği görülmüştür. Yüksek ve düşük güç çıkışlarında çalışan bir motorun toplam enerjisinin sırasıyla %30 ile %50 kadarını soğutma sıvısı ile kaybettiği görülmüştür. Yakıt enerjisinden türbin ve intercooler ile kaybedilen enerji miktarı sırasıyla % 10 ve % 6 civarında olmasına rağmen turboşarj ile yakıt enerjisinin % 1-3 'lük kısmı motora tekrar iade edilmektedir. Elde edilen bu enerji analiz sonuçları ışığında soğutma sıvısı ve yağlama yağının termal koşulları optimize edildiğinde emisyonlarda ve yakıt tüketiminde önemli iyileşmelerin sağlanacağını belirtilmiştir.

Zhou *et al.* (2015) sıkıştırma ateşlemeli bir motorda elektrikli pompa, fan ve vananın yer aldığı bir soğutma sistemi tasarlamıştır. Sistem simülasyonu için Matlab ortamında bir model hazırlanmıştır. Modelde soğutma sıvısı ve yağ devresinin bileşik kontrolünün yapılması için ileri ve geri besleme denetleyici stratejileri uygulanmıştır. Tasarlanan bu sistem sayesinde klasik sisteme kıyasla fan ve pompanın tüketmiş olduğu güç miktarında %57 kadar bir iyileşme elde edilmiştir:

Soğutma sisteminde soğutma sıvısını debisi ve motor çıkış sıcaklığını ayarlamaya yönelik elektromanyetik termostatlarda kullanılmıştır (Mohamed 2016). NEDC çevriminde denenmiş ve klasik sistemle kıyaslamaları yapılmıştır. Tasarlanan soğutma sistemi ile motor ısınma fazı süresinde ve yakıt tüketiminde sırasıyla yaklaşık %28,5 ve 5,2'lik bir iyileşme

olduğu görülmüştür. Egzoz emisyonlarında ise toplam HC, CO, CO₂ ve duman opasite değerinde iyileşmeler sağlanmış olup NO_x emisyonu artmıştır.

Isıl enerji yönetim stratejilerinin soğutma sisteminde yakıt tüketimi üzerine olan etkileri incelenmektedir (Millo *et al.* 2016). Bu bağlamda NEDC koşullarında yağ ve soğutma sisteminin dahil olduğu motor termal modeli hazırlanmıştır. Soğutma sıvısı veya yağ akış devrelerine silindir ısı etkileşimi uyarlaması yapılarak geçici koşullarda ısı dağılımını tahmin eden modelleme yapılmıştır. Model doğrulamasında deney verilerinin simülasyon sonuçları ile karşılaştırması yapılmıştır.

Park *et al.* (2017) ısıl model ile soğutma suyunun kontrolünü yaparak yakıt tüketimi iyileştirilmeye çalışılmıştır. Soğutma sisteminde ki her bir bileşenin 1-D sayısal modeli oluşturulmuştur. Böylece bir motorun soğutma ve yağlama bileşenlerini optimizasyonu yapılmıştır. Soğutma sıvısı ve yağ arasındaki ısı transferini ölçmek için modelde bir ticari program kullanılmıştır. Üç aşamadan oluşan deneysel yönetim planı kurmuşlardır. İlk test deneylerini kararlı motor çalışma durumunda 250 d/dk artışla 1000-3500 d/dk arasında ve yük ise %70'e kadar artırılmıştır. İkincil deneylerde motor normal sıcaklıkta 6 bar 1000 d/dk, 8 bar 1250 d/dk ve son olarak 10 bar 1500 d/dk olacak şekilde dörder kez tekrar edilmiştir. Son deney şartlarında debi kontrol cihazında ısınma özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, yakıt verimliliği için soğutma ve sürtünme kaybının minimize edilmesi için vana pozisyonu kontrolü yapılmıştır. Üç adımlı bu doğrulama işleminin gerçek motor deney sonuçlarıyla el olduğu belirlenmiştir. Kontrolcü şartlarının değiştirilmesi sayesinde yakıtta %1,23, soğutma kaybında %1,35 ve sürtünme kaybında %2,21 oranında iyileşmeler sağlanmıştır.

İçten yanmalı motorlarda elektronik kontrollü soğutma sistemi çalışmaları yapılmaktadır. Bu bağlamda Mehanovic (2008) bir DC motorlu soğutma pompası ile yeni bir soğutma sistemi yöntemi sunmuştur. DC pompa ve fan motoruyla birlikte gerçek motor sıcaklığına bağlı olarak ayrılmaz bir sistem düzenlemesi yapılmıştır. Modellemler Simulink programında yapılmış olup veri ölçümleri dinamometre tezgâhı üzerinde yapılmıştır. Testlerde, yeni soğutma sistemi ile motor soğutması daha kısa sürede gerçekleştirilmiştir. Bu durum yanmada istenmeyen durumların ve yanmayan ürünlerin azalmasında olumlu etkiler sergilemiştir. Daha kısa motor çalışma süresi, motor hareketli bileşenlerinin yeterince yağlanmasını olumlu etkilemekte ve motor ömrünün artmasını sağlamaktadır. Üretim safhasında termostat, fan/fan rölesi ve devridaim hortumları olmaksızın yeni bir sistemin öngörülebilir olduğunu söylenmiştir.

Mitchell *et al.* (2009) tarafından soğutma sıvısı sıcaklığı ve sürtünme kayıpları üzerinde ki kontrolle içten yanmalı motorların performansını iyileştirmek için çalışma

yapılmıştır. Isı yönetim sisteminde akıllı valf, değişken devirli pompa ve elektrikli radyatör fanı gibi yeni bileşenlerin kullanıldığını belirten araştırmacılar motor ısınma davranışı ile termostat vana işlemlerinin araştırmak için deneylerinde dört farklı termostat konfigürasyonu çalışmışlardır. Bu konfigürasyonlar fabrika üretimi, vanasız durum ile çift ile üç yönlü vana olma durumlarıdır. Testlerde üç yollu vana ile yüksek ısınma zamanı, sıcaklık izleme ve güç tüketimi bakımından en iyi performansı göstermiştir. Çift yönlü vana ve vananın olmadığı durumlar arasında benzer performanslar görülmüş olup hatta iki yollu bir vananın soğutma sisteminde kullanılmasına gerek olmadığını öne sürmüşlerdir.

Cho *et al.* (2005) motor soğutma sistemi performansı ve yakıt tasarrufu için elektrikli pompa kullanımının GT-Cool programında modelleme yoluyla araştırmasını gerçekleştirmişlerdir. Klasik soğutma sistemine ait simülasyon sonuçları deneysel verilerle belirlenmiştir. İki ayrı konseptte soğutma pompası uygulaması yapılmış olup, elektrikli pompa için kontrol algoritması yapılmıştır. Termostat histerisiz probleminin giderilmesi ile eş etkilerini gözlemişlerdir. Sonuçta soğutma sistemi modelinin soğutma sistemi performans analizinde etkin bir yöntem olarak karşımıza çıktığını ifade etmişlerdir. İki ayrı tipteki elektrikli pompanın mekanik pompa ile karşılaştırılması neticesinde %86 kadar güç tüketiminde iyileşmeler sağlanmıştır. Elektrikli pompa ve düzenlenmiş termostat histerisizinin pompa güç tüketimini nerdeyse % 99 kadar azaltılabileceğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmalar dışında farklı aktüatörler ile giriş motor ısı tepkisini incelemeye yönelik deneysel çalışmalarda gerçekleştirilmiştir (Wang and Wagner 2015). Öyle ki üç yönlü kontrollü vana, değişken devirli pompa ve fan kontrolü ile gelişmiş soğutma sistemi uygulaması çalışmışlardır. Birincil stratejide akıllı valf ve değişken devirli pompa ile sıvı yönlendirilmesi sağlanmış ve soğutma suyu debisi kontrolü ile motor ve radyatör arasındaki ısı transfer etkileşiminin motor sıcaklığı üzerinde ki etkilerini araştırmışlardır. İkincil stratejide soğutma sistemini etkin rol sahibi fanın motor sıcaklığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Değerlendirmelerinde motor sıcaklığının yükselmesinde pompanın %0,5, akıllı valfin %4 ve fanın ise %1,6 kadar bir payının olduğu belirlenmiştir. Fanın diğer iki bileşene nispeten Güç tüketiminde daha etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca yakıt tüketiminde %3 ila %5 arasında bir iyileşmenin elde dileyebileceği söylenmiştir.

İçten yanmalı motorlarının termal yönetimini tahmin etmek için Bruckner *et al.* (2006) tarafından bir çalışma yapılmıştır. Tahmin kontrolcüsü ve elektrikli pompa kullanımıyla sıcaklık kontrolünün yapılabileceğini söylemişlerdir. Elde edilen sonuçlar göre bir model tahmin yaklaşımı ve elektrikli pompanın kullanımının termal salınımı azaltacağını göstermiştir. Öyle ki termal modelde ki bazı değişiklikler ile çok modlu bir modele

geçilebileceği belirtilmiştir. Bu yöntemle motor silindir kafası sıcaklığının sabit tutulabileceği söylenmiştir. Böylece NO_x emisyonlarında iyileşmelerin sağlanacağı vurgulanmıştır.

Literatürde motorlarda ısı yönetim tahminine yönelik pek çok çalışmaya rastlanılmaktadır. Bunlardan birisi de Jander and Baar (2017) tarafında yapılan motor ısınma süresi tahmini, motor sürtünmelerini hesaplama ve yakıt tüketim optimizasyonları için yapay sinir ağlarının kullanıldığı bir çalışmadır.

Bu çalışmada ısı motor davranışı modellemesi yapılmıştır. Isıl motor davranışı, soğutma sıvısı ve yağ sıcaklıklarının hesaplanması için look-up tabloları veya yarı fiziksel modeller kullanılarak model yapılmıştır. Çalışmalarında hızlı ve yüksek hassasiyetli bir yapay sinir ağı (ANN) kullanmış ve motorlarının ısıl davranışını incelemek adına yeni bir model sunmuşlardır. İlgili model girdileri deney tasarımı ile edilmiş olup hesaplanan ve ölçülen sıcaklıklar bazı motor çalışma noktalarında karşılaştırılmıştır. Soğutma suyu debisi, çevre sıcaklığı ve motor torku gibi girdi verilerinin değişim etkileri yeni modelde araştırılmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada yeni bir ısı motor modeli ve model oluşturulması için yeni bir prosedür sunulmuştur.

Farklı soğutma stratejilerinin motor ısınma süresi, emisyonlar ve yakıt tasarrufu üzerindeki etkileri Torregrosa *et al.* (2008) tarafından incelenmiştir. Motor ısınma süresinin kısılmasının, motor soğutma sistemine, soğutma sıvısı debisine ve sıcaklığına bağlı olduğunu söylemişlerdir. Çalışmada öncelikle temel motor soğutma sistemi modellemesi ve model doğrulaması yapılmıştır. Doğruladıkları model ile motor soğutma sisteminde farklı modifikasyonlarının simülasyonlarını uygulamışlardır. Isınma süresini azaltmada en etkili strateji seçilmiş ve yakıt tüketimi ve emisyonlar üzerine olan model performans etkisi test tezgâhında denemiştir. Sağladıkları sonuçlara göre seçilen stratejide ısınma süresinin yaklaşık 159 saniye kadar azaldığı, yakıt tüketiminin %1,62, CO ve HC emisyonlarının %12 ve %16 kadar iyileştiği ancak NO_x ve PM emisyonlarında dikkate değer bir değişim olmadığını söylemişlerdir.

Chalgren (2004) mekanik soğutucu akışkan pompasının ve mum esaslı termostatin bir elektrikli pompa ve elektrikli akış kontrol vanası ile değiştirilmesinin, gelişmiş motor termal yönetimi kontrolü için bir fırsat sağlayacağını belirtmiştir. Yapmış olduğu çalışmada çeşitli soğutma sistemi akış devreler ve bunların ısıtma performansları üzerine olan etkilerini incelemiş, sağlamış olduğu verilerle yolcu konforu ve motor ısınma optimizasyonu yapmıştır. Çalışmasını büyük bir SUV araç üzerinde uygulamıştır. Gelişmiş termal yönetim sisteminin, motorun ısınmasını, kabinin ısınmasını ve ısıtıcı performansını arttırdığı gösterilmiştir.

Robinson *et al.* (1999) içten yanmalı motorlarda soğutma sistemine yönelik olarak yapmış oldukları literatür taraması çalışmalarından doğru soğutmanın "optimize edilmiş bir sıcaklık dağılımı elde etmek için gerekli olan minimum soğutma" olarak tanımlanması gerektiğini ifade etmişlerdir. Yapmış oldukları araştırmada konuyu ilişkin yapılan çalışmaların, geometri etkileri, motor ağırlığının azaltılması, termal gerilmelerin azaltılması, motor ısınma süresinin ve pompa güç tüketiminin azaltılması, HC emisyonlarının ve vuruntunun azaltılması, ısı transferi tahminin mekanizması, soğutma devresi uygulamaları gibi alanlarda olduğunu belirtmişlerdir. Hassas soğutma içeren çalışmaların çoğunun bileşik konvektif ve çekirdek kaynama esaslı ısı transfer bilgilerinin de yer aldığı konvektif ısı transferi üzerine odaklandığını söylemişlerdir.

Sonuç olarak, doğru bir soğutma felsefesi ile soğutma sistemi gereksinimleri, motor tasarım sürecinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bu şekilde termal olarak kritik alanlar yoğun soğutma alırlarken, kritik olmayan kafa ve blok yapıları ısı iletimine dayanabilmektedir. Böylece sıcaklık dağılımı çok daha üniform olmakta, termal gerilmeler azalmakta ve silindir sıcaklık değişimleri en aza indirgenebilmektedir.

Motorun özellikle kısmi yük şartlarında termal yönetiminin daha fazla kontrol edilmesiyle yakıt tüketimindeki önemli azalmalar sağlanabilir. Bu iyileşmeler motorun soğutma sistemi bileşenlerine, konumlandırılmalarına ve kontrolcü sistemiyle doğrudan ilişkilidir. Bu durumundan yola çıkarak Caresana *et al.* (2011) çalışmalarında yeni bir yöntemle bir otomobilin teorik minimum yakıt tüketimini hesaplamaya çalışmışlardır. Bu yöntemi farklı motor soğutma sistemi konfigürasyonlarını karşılaştırırken de referans olarak kullanılmıştır. Aracın güç aktarma sistemi ve soğutma sistemi bileşenleri için model geliştirilmiş ve aracı farklı çevrimlerde simule etmişlerdir. Motor analizinde AVL Boost programından faydalanılmıştır. Geleneksel soğutma sistemine sahip aracın yakıt tüketimi standart devirlerde belirlenmiş ve yakıt tüketiminde sağlanan iyileşmeler geliştirilen yeni soğutma sistemi ile modifiye edilmiş bir aracınki ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların standart testlerde geleneksel ve akıllı soğutma sistemleri arasındaki karşılaştırmalardan sağlandığı ve bunların otomobilin sınıfına, referans olarak seçilen test çevrimine ve soğutma sisteminin ne denli akıllı olduğuna bağlı olduğu ifade edilmiştir. Çalışmanın detaylarında temel gaye olarak yakıt tüketimini doğrudan etkileyen soğutma sisteminin özelliklerinin bulunmasıdır. Soğutma sistemi incelemesinde ilk durum olarak motorun çabuk ısınması ve kararlı sıcaklıkta çalışmasını sürdürdüğü şekilde kabulüdür. İkinci durum olarak gerçek şartlara uygunluğu yüksek olan motor ısınma zamanının adyabatik olarak gerçekleştiğinin kabulüdür. Simulasyon çalışma sonuçlarından elde edilen bilgilere göre motorun kararlı

Çalışma şartlarına ulaşma süresi ve motor sıcaklığının kontrolü ile yakıt tüketimine önemli etkileri ortaya konmuştur. Yeni sunulan soğutma sisteminde en iyi yakıt tüketimi iyileşmesi kısmi yük şartlarında şehir içi kullanım çevriminde olduğu görülmüştür. Geleneksel soğutma sisteminde yağ ve motor ortalama sıcaklık motorun çalışma sıcaklığından daha düşük olduğu motorun sürtünme miktarlarında yükselme görülmüştür.

Diğer yandan hassas soğutma sistemine sahip bir motor, daha düşük sürtünme kaybı, daha hızlı ısınma, yüksek vuruuntu direnci, yakıt tüketiminde ve emisyonlarda azalma gibi potansiyel avantajlar sağlar. Bunlarla birlikte yüksek dayanım, yüksek güç potansiyeli, iyileştirilmiş kabin içi ısıtma, düşük maliyet ve hafiflik gibi diğer avantajlarda söylenebilir.

İçten yanmalı motorlarda termal yönetim de dâhil olmak kaydıyla daha fazla yakıt tasarrufu arayışları tüm alt sistemlerin optimizasyonuna bağlıdır. Bunlar arasında; elektromekanik soğutma sıvısı pompası, radyatör ve fan grubu ve termal valf ve bunların gerçek zamanlı kontrol stratejileridir. Tao and Wagner (2016) yürüttükleri çalışmada askeri bir arazi aracının motor soğutma sistemine doğrusal olmayan bir kontrolcü kurgulamışlardır. Bu kontrolcü yaklaşımı ile pompa, fan ve valf gücü kullanımı minimize edilerek beklenen motor soğutma suyu sıcaklığı takip edilmiştir. Güç tüketimi de dikkate alınarak tahmin edilen referans sıcaklığın takibi için radyatör fanı, soğutma sıvısı pompası ve akıllı valfin çalışmaları eş zamanlı olarak çalışmada önerilen kontrol stratejisi ile kontrol edilmiştir. Optimum doğrusal olmayan bu kontrolcü ile ortalama 0,35°C hata oranıyla toplam soğutma gücünde en az %13 iyileşme sağlanmıştır.

Praveen *et al.* (2020) termal yönetim için iki yönetime odaklanmış ve mekanik pompa elektrikli pompa ile değiştirilmiş olup yağlama sistemine bir termostat eklenmiştir. Her iki yöntemde etkili olmuştur. Soğutma sisteminin, motor sıcaklığını kontrol etmede önemli bir rol oynadığı, mekanik su pompasının elektrikli su pompasına dönüştürülmesinin etkili bir termik yönetim yöntemi olduğunu söylemişlerdir. Elektrikli su pompası ile motor sıcaklığının etkili bir şekilde kontrol edilmesi durumunda egzoz emisyonlarının dolaylı olarak azaldığı ve motorun kullanım ömrünün arttığını ifade etmişlerdir. Eklenen yağ termostadı,ile moyotun kararlı çalışma sıcaklığına daha erken ulaşması sağlanmıştır. Bu yöntemle aynı zamanda tüketilen yakıt ve emisyonlarda azaltılmıştır.

Otonom bir soğutma sistemi tasarımı ve model tahmini kontrol (MÖD) tekniği kullanılarak benzinli yakıtlı içten yanmalı bir motorun analizi yapılmıştır (Kaleli, 2020). MÖD ile tasarlanan sistem, geleneksel soğutma sistemine kıyasla motor termal yönetimi açısından üstün performans sağlamıştır. Bu kontrolör yapısı, çok değişkenli kontrol sistemine kolayca uyarlanabildiği ve ayarlanması nispeten kolay olduğu için seçilmektedir. Çalışmada farklı

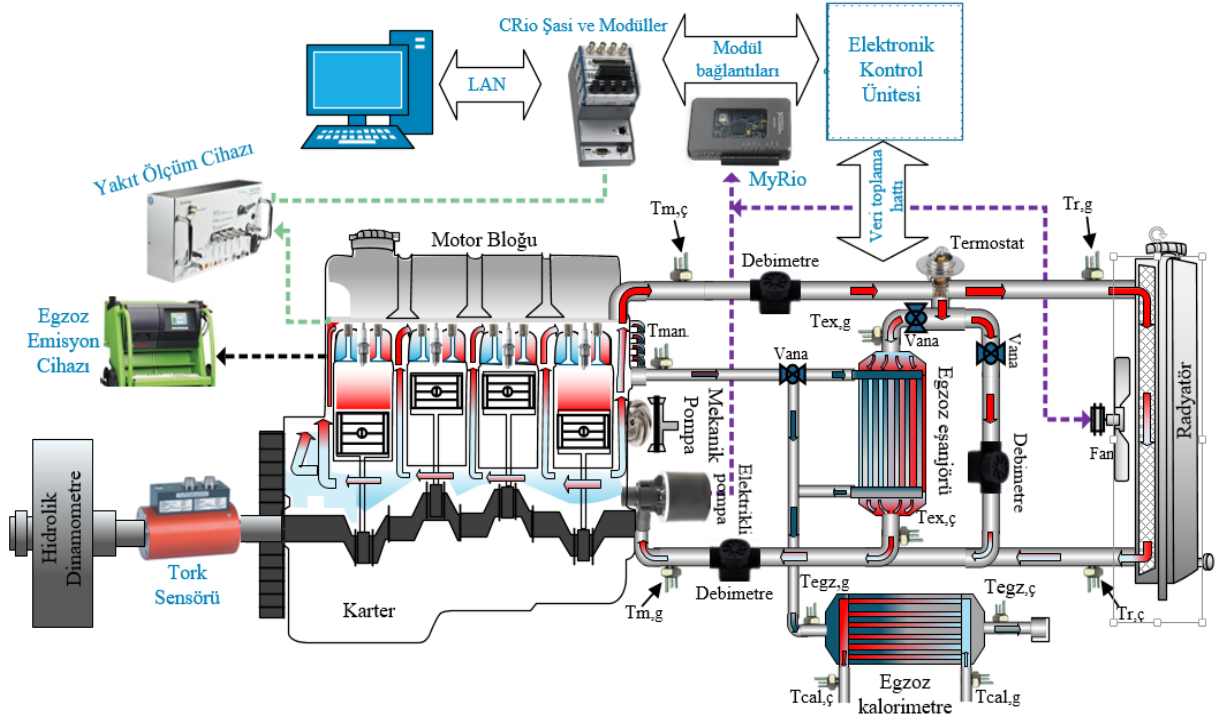
Çalışma koşullarında sistem tanımlama teknikleri kullanılarak bir benzinli motor soğutma sistemi için çok giriş-çıkışlı bir model geliştirilmiştir. Öngörülen tahmini motor soğutma sisteminin performansı, hem sabit hem de geçici motor çalışma koşulları için test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, tasarlanan otonom termal yönetim sisteminin geleneksel soğutma sistemine kıyasla yakıt tüketiminin azaltılması, motorun ısınma süresinin kısalması ve egzoz emisyon özelliklerinin iyileştirilmesi açısından daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir.

Hazırlanan bu tez çalışmasında farklı ısıl enerji yönetim stratejileri için deney düzeneği uygun hale getirilmiştir. Öncelikle gerektiğinde devreye alınması için sisteme elektrikli bir pompa eklenmiştir. Deneysel yöntem olarak deney düzeneği, yazılım ve sensörler ile sonuçların elde edilmesi için bir buji ateşlemeli test motoru üzerinde tasarım ve analiz uygulamaları yapılarak testler gerçekleştirilmiştir. Isıl enerji yönetimi stratejileri deneyleri için farklı yük ve devir koşullarında dinamometre tezgahı üzerinde beş farklı konfigürasyon hazırlanmıştır. Hazırlanan bu konfigürasyonlar; yağ soğutucusu ısıl enerjisinden yararlanma durumu, yağ soğutucusu olmadığı durum, yüksek sıcaklıkta dışarı atılan egzoz gazlarının ısıl enerjilerinden faydalanma durumu ve değişken debili soğutma sıvısı kontrolü durumudur. Deneylerde motorun ilk çalışma ve ısınma süresi boyunca motor ısınma zamanı, akışkan sıcaklıkları, enerji balansı ve CO egzoz emisyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece farklı ısıl stratejilerin ve debi kontrolünün referans haldeki sisteme olan üstün yönleri ve elde edilen iyileştirmeler ortaya konulmuştur.

MATERYAL ve YÖNTEM

Deneysel Yöntem

Hazırlanan doktora tez çalışması kapsamında deneyler hidrolik dinamometre tezgâhı üzerine kurulmuş buji ateşlemeli Ford MVH418 motor kullanılarak yapılmıştır. Hazırlanan deney düzeneğinin gerçek ve şematik genel görünümü Şekil 4 ve test motoruna ait teknik özellikler Tablo 1’de gösterilmiştir.



Şekil 4. Deney düzeneğinin şematik resmi.

Şekil 4 ile deney düzeneği ve soğutma sistemi üzerinde yer alan ölçüm sensörleri şematik olarak gösterilmiştir. Burada debimetre ile bypass ve motor giriş soğutma sıvısı akış oranı ölçülmektedir. T ($T_{m,\zeta}$, $T_{ex,g}$, $T_{r,\zeta}$, ...vb.) ile gösterilen noktalarda soğutma sıvısı ve diğer akışkanların sıcaklıkları termistörler yardımıyla ölçülmektedir. Şekil incelendiğinde sistemde referans hal deneylerin gerçekleştirilmesinde mekanik pompa kullanılmakta olup kontrollü deneylerin gerçekleştirilmesinde elektrikli pompa devreye alınmıştır.

Sensörlerden alınan veriler Şekil 4’de görülen “Elektronik Kontrol Ünitesinde” birleşmekte ve daha sonra toplanan veriler cRIO ve üzerindeki modüllere gönderilmektedir. Gelen veriler cRIO içerisindeki gömülü Labview programıyla işlenerek LAN bağlantısı aracılığıyla bilgisayarda gerçek zamanlı olarak (her 500ms aralığında bir veri) kaydedilmektedir.

Tablo 1. Test Motorunun Teknik Özellikler

Motor tasarım bilgileri	Teknik özellikleri
Motor Tipi	Ford MVH418, Buji Ateşlemeli, Yakıt Püskürtmeli, 4 Stroklu, Sıvı Soğutmalı
Silindir Tipi ve Sayısı	4 Silindirli sıra tipi- DOHC-16V
Ateşleme Sırası	1-3-4-2
Strok	88 mm
Silindir Çapı	80,6 mm
Toplam Strok Hacmi	1796 cm ³
Sıkıştırma Oranı	10:1
Maksimum Güç	6250 d/dk'da 93 kW
Maksimum Moment	4500 d/dk'da 157 Nm
Rölanti Devri	900 ± 50 dev/dk (Soğutma fanı açıkken)
Yakıt	Kurşunsuz Benzin / LPG
Yakıt Enjeksiyon Sistemi	BOSH KE-Jetronik

Deneyisel düzenek yeniden yapılandırılarak hazır hale getirilmiştir. Yapılan bu düzenlemeler ile sistem hem referans hal soğutma sistemine hem de elektronik kontrollü soğutma sistemi koşullarında deney yapılmaya uygun hale getirilmiştir. Motor soğutma sistemi hattı üzerine elektrikli santrifüj pompa ve elektronik kontrol edilebilir 3 yollu bir valf kullanılmıştır. Yapılan deneylerin tamamında Petrol Ofisi'nden alınan özellikleri Tablo 2'de verilmiş olan Kurşunsuz Benzin 95 Oktan yakıtı kullanılmıştır. İlgili yakıtın tüm özellikleri firmanın ürün bilgisi formundan alınmıştır.

Tablo 2. Kullanılan Benzin Yakıtın Kimyasal Özellikleri

Özellik	Birim	Referans Sınır Değerleri	
		En Az	En Çok
Yoğunluk (15°C)	kg/m ³	720	775
Viskozite (40°C)	cSt	0,5	0,75
Buhar basıncı (37,8°C)	kPa	45	90
Kendiliğinden tutuşma	°C	250	-
Parlama noktası	°C	-	-40
Kaynama noktası	°C	25	210
Alevlenirlik limiti	% (V)	1	8
Oksijen içeriği	% (m/m)	-	2,7
Bakır şerit korozyon (3 saat 50°C)	Derece	1	-

Güç ölçüm ünitesi (hidrolik dinamometre).

Motor test düzeneğinde yer alan hidrolik dinamometre için 25 ton kapasiteli bir su tankı kullanılmıştır. Su, yer altındaki tanktan bir pompa yardımıyla hidrolik dinamometreye gönderilmektedir. Hidrolik dinamometrelerin içyapısında motor volanına bağlanan bir rotor ve rotoru çevreleyen yataklar üzerine oturtulmuş bir stator bulunmaktadır. Frenleme işlemi basit olarak rotor üzerindeki kanatçıkların, gövde içerisine gönderilen suya çarpması ile oluşmaktadır. Diğer bir ifadeyle motor tarafından tahrik edilen rotor kanatları suyu dışa doğru fırlatarak çevrede girdap hareketleri yapan bir su tabakasının oluşumuna yardımcı olur. Böylece içerisinde dönme ve radyal hareketleri barındıran bir girdap oluşturarak motorun ürettiği mekanik enerjiyi sönmlemeye çalışır. Bu işleme frenleme denir. Frenleme ile elde edilen moment değeri motor çıkış milini hidrolik dinamometreye bağlayan hat üzerine yerleştirilmiş bir tork sensörü yardımıyla ölçülmektedir. Tork sensöründen gelen sinyaller AD combo analog giriş modülü ile bağlantılı olduğu FPGA tabanlı şasi üzerinden işlenerek elde edilmektedir.

İçten yanmalı motorlarda farklı çalışma koşullarında test yapılabilmesi için motor devri ve yük bilgilerinin belirlenmesi gerekir. Motor çıkış miline uygulanması düşünülen yükleme miktarı bilgisi, deney düzeneğine yakın bir konumda bulunan bir kontrol paneli ile hidrolik dinamometreye gönderilmektedir. Yükleme işlemi tamamlanan motorun çalışma devride elektronik kontrollü gaz keleşbeği modülü ile ayarlanarak farklı çalışma koşulları elde edilmektedir. Söz konusu hidrolik dinamometre ve bağlantılı olduğu tork sensörü Şekil 5 ile gösterilmiştir.



Şekil 5. Deneylerde kullanılan tork sensörü ve hidrolik dinamometre.

Aşağıda numaralı olarak verilmiş olan deney sisteminde kullanılan cihaz ve sensörlerin detaylı bilgileri başlıklar halinde detaylandırılmıştır.

1. Tork sensörü
2. FPGA tabanlı şasi (compact RIO)
3. Analog giriş modülü (AD Combo)
4. Termokupl ve termistörler
5. Termokupl modülü
6. Motor soğutma sıvısı debi sensörü
7. Elektrikli santrifüj pompa
8. Emme hava debisi ölçüm cihazı
9. Gaz kelebeği
10. Yakıt debisi ölçüm cihazı
11. Lambda sensörü
12. Egzoz emisyon cihazı
13. Güç kaynağı
14. Termostat ve 3 yollu valf
15. Hazırlanan kontrol sistemi yazılımları

Tork sensörü.

Dâhili hız sensörlü tork sensörleri gerinim ölçümü yaparak çalışır ve analog veya dijital çıkış sinyalleri üretirler. Deneylerde motor krank milinin dönmesiyle elde edilen gücün veya diğer bir ifade ile motor çıkış gücünün hesaplanabilmesi için Kistler marka 4503 A model bir tork sensörü kullanılmıştır.

Bu tork sensörü ile yüksek devir aralığında hassas ölçümler yapılmaktadır. Söz konusu tork sensörü Şekil 6 ve teknik özellikleri Tablo 3’de gösterilmiştir.



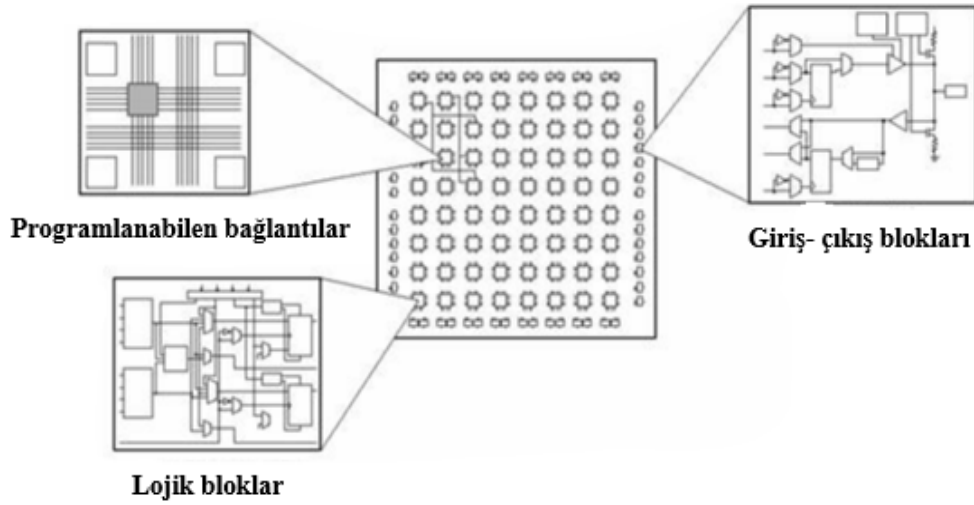
Şekil 6. Kistler 4503A Tork sensörü (Kistler, 2020).

Tablo 3. Kistler 4503A Tork Sensörünün Teknik Özellikleri (Kistler, 2020)

Sensör özellikleri	Değerler
Tork ölçüm değeri	0,2 - 5000 Nm
Devir aralığı	0 - 50000 dev/dk
Voltaj çalışma aralığı	11 - 30 VDC
Çıkış sinyali	0-5 Volt
Standart ölçüm aralığında doğruluk sınıfı	0,1

FPGA tabanlı şasi.

FPGA (Alan Programlanabilir Kapı Dizileri), kullanıcı tarafından sayısal bir fonksiyonu gerçekleştirmek için programlaması yapılan paralel işlem yapabilme kabiliyetine sahip tümleşik bir devre veya programlanabilen lojiktir. Bu paralel işlem yapabilme özelliği sayesinde ses, sinyal ileme görüntü işleme ve çok hızlı kontrol gerektiren sistem tasarımlarında tercih edilmektedirler. Sözü edilen bir FPGA tümleşik devresi Şekil 7’de gösterildiği üzere lojik bloklar, programlanabilir bağlantılar ve giriş- çıkış bağlantıları olmak üzere 3 ayrı yapıdan meydana gelmektedir.

**Şekil 7.** FPGA tümleşik devre yapısı (National Instruments 2020).

Bu tez çalışması kapsamında tüm ölçümler ve kontrolcü programları National Instruments firmasının ürünü olan Labview programında hazırlanmıştır. Labview programlama dili FPGA gibi benzer veri akış yapısıyla aynı mantıkta çalışmaktadır. Bu paralellikten dolayı Labview ile programlanabilen ve FPGA tümleşik devreler içeren Compact RIO (cRIO) kullanılmıştır. Değişken parametrelerin ölçümünde kullanılan tüm modüller bu Compact RIO üzerinde kullanılmıştır. Gerçek zamanlı donanım seçilirken senkronizasyon ve sinyal kaybı yaşanmaması amacıyla FPGA tabanlı donanım seçimine gidilmiştir. Hazırlanan bu tez çalışmasında Şekil 8 ile gösterilmiş olan NI-9075 Compact Rio şasi kullanılmıştır.

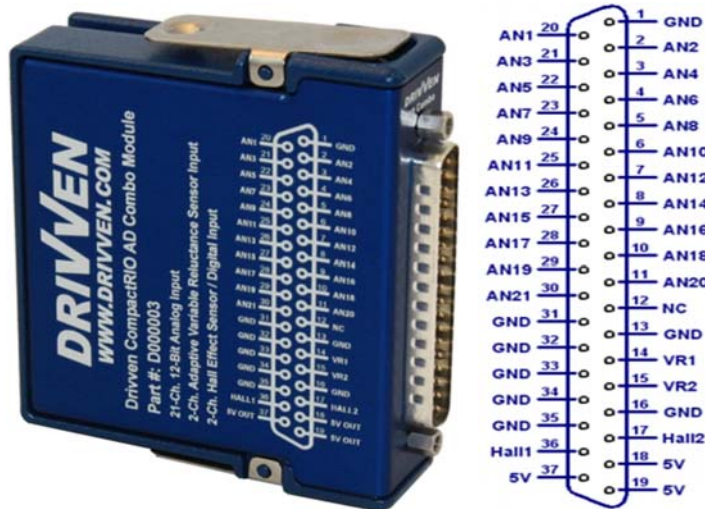


Şekil 8. NI- 9075 Compact RIO şasi (National Instruments, 2020).

Compact RIO şasi, sıcaklık modülü, analog giriş modülü vb. gibi farklı modüllerin kullanımına imkân sağlamaktadır. Buna istinaden bu çalışmada da kullanılan Drivven firması, Compact RIO şasi ile uyumlu çalışabilen ve farklı amaçlara yönelik olarak kullanılması için termokupl modülü, oksijen sensör modülü ve analog giriş modülü (AD Combo) gibi çok sayıda modüller tasarlamıştır. Modüller hakkında detaylı bilgilere ve çalışmada ki kullanım amaçlarına yönelik detaylı bilgiler aşağıdaki başlıklarda verilmiştir.

Analog giriş modülü (AD Combo).

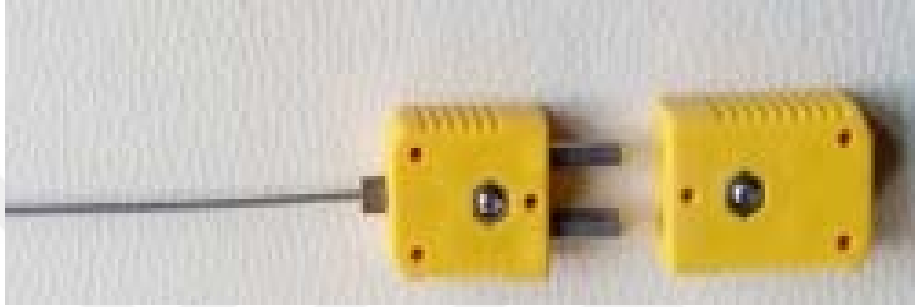
Yapılan tez çalışmasında bazı ölçüm parametrelerinin (sıcaklık, soğutma sıvısı debisi, yakıt ve hava debisi, kam ve krank bilgisi vd.) elde edilmesi gerekmektedir. Bu analog ve dijital sinyalli ölçüm gerektiren deneysel verilerin elde edilmesinde Şekil 9 ile verilmiş olan NI firmasına ait AD combo analog giriş modülü kullanılmıştır (National Instruments 2020). Şekil 6. 'dan görüldüğü üzere AD combo modülü 21 analog girişe, 2 adet VR sensör girişine, 3 adet (5V) sensör güç çıkışına ve 2 adet hall-effect sensör girişine sahiptir. Modülün çalışması için gereken güç ve topraklama ihtiyacı doğrudan cRIO şasi arka panelinden sağlanmaktadır.



Şekil 9. AD combo analog giriş modülü ve kanal bilgileri (National Instruments, 2020).

Termokupl ve termistörler.

Deney sisteminde çevre havası, egzoz gazı, yağ giriş-çıkış, egzoz eşanjörü su giriş-çıkış ile kalorimetre sistemine giren su ve egzoz gazı sıcaklıklarının ölçülebilmesi için Şekil 10 ile gösterilmiş olan K tipi termokupllar (ısıl çiftler) kullanılmıştır. 1200°C sıcaklığa kadar ölçüm yapabilen özel üretim Elimko MI08-1K30(40Ö) model termokupllar kullanılmadan önce su banyosunda kalibrasyon eğrileri oluşturulmuştur. Kalibrasyon değerleri Labview programına gömülen termokuplların bağlantıları NI-9214 termokupl modülüne yapılarak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 10. Deneylerde kullanılan K-tipi termokupl.

Deney sisteminde motor ve radyatör giriş-çıkış sıcaklıkları termistörler yardımıyla ölçülmektedir. Soğutma sisteminde sıcaklık verilerinin kontrolcü ile daha hızlı şekilde haberleşmesi için sıcaklıkla direnci artan PTC tipi termistörler kullanılmıştır. Çalışma ortamı veya temas ettiği yüzeyin sıcaklığı yükseldikçe elektrik direnci artan sıcaklık sensörleridir. PTC sensör 25°C de 1 k Ω direnç ve çalışma Aralığı : -20 / +125°C'dir. Kullanılan termistörler Şekil 11 ile gösterilmiştir. Termokuplda olduğu gibi termistörlerinde kullanılmadan önce kalibrasyonları yapılarak denklem modelleri elde edilmiştir. Labview'de ölçüm programı hazırlanan termistörlerin AD combo analog giriş modülü ile bağlantıları yapılarak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen kalibrasyon verilerinin sıcaklık-direnç denklemleri Tablo 4'de verilmiştir.



Şekil 11. Deneylerde kullanılan termistör.

Tablo 4. PTC Sıcaklık Sensörünün Sıcaklık-Direnç Denklemleri

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c \ln(R)^3$$

$$\begin{matrix} a \\ b \\ c \end{matrix} = \frac{1}{T_2} * \begin{bmatrix} 1 & \ln(R1) & \ln(R1)^3 \\ 1 & \ln(R2) & \ln(R2)^3 \\ 1 & \ln(R3) & \ln(R3)^3 \end{bmatrix}$$

Termokupl modülü

Deney düzeneği üzerinde farklı noktalara yerleştirilmiş temokupllar ile bu noktalarda ki sıcaklıklarının (çevre havası, egzoz gazı, yağ giriş-çıkış, egzoz eşanjörü su giriş-çıkış ile kalorimetre sistemine giren su ve egzoz gazı sıcaklıkları) değişimlerini incelemek için Şekil 12’de gösterilen National Instruments firmasının ürünü olan NI-9214 termokupl modülünden faydalanılmıştır. Termokupl modülü gücünü bağlandığı Compact RIO şasiden almakta olup teknik özellikleri Tablo 5’te verilmiştir.

**Şekil 12.** Temokupl modülü**Tablo 5.** NI-9214 Termokupl Modülünün Teknik Özellikleri (National Instruments, 2020)

Cihaz Özellikleri	Değerler
Kanal sayısı	16
Örnekleme hızı	68 S/s
Ölçüm hassasiyeti	0,02 °C
Analog-dijital dönüşüm (ADC) çözünürlüğü	24 bit
ADC tipi	Delta- Sigma
Voltaj ölçüm aralığı	78,125 mV
Ölçümü yapılan termokupl tipleri	J,K,T,E,N,B,R,S

Motor soğutma sıvısı debi sensörü.

Motorun çalışmaya başladığı andan itibaren motorun giriş ve bypass hatları üzerindeki soğutma sıvısı debisini ölçmek için türbin tipi hall-effect prensibine göre çalışan FS300A tipi debimetreler kullanılmıştır. Şekil 13’da gösterilmiş olan bu debimetreler düşük debilerde ölçüm yapabilme, bakım ve montajda küçük boyutları ile kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Debimetreye ait teknik özellikler Tablo 6’da verilmiştir.



Şekil 13. Türbin tipi debimetre.

Tablo 6. Türbin Tipi Debimetrenin Teknik Özellikleri

Cihaz Özellikleri	Değerler
Minimum çalışma voltajı	4,5 V (DC)
Maksimum çalışma akımı	15mA (DC 5V)
Çalışma voltajı	5V-24V
Debi ölçüm aralığı	1-60 lt/dk
Çalışma sıcaklığı	< 80°C
Sıvı sıcaklığı	< 120°C
Doğruluk	%3 (1 l/dk-10 l/dk)

Elektrikli santrifüj pompa.

İçten yanmalı motorlarda motor soğutma sistemi bileşenlerinden birisi olan mekanik pompa gücünü kayış kasnak desteğiyle birlikte krank milinin hareketinden almaktadır. Motorun kritik çalışma koşullarına göre tasarlanmış olan mekanik pompa ve krank mili devri arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Bu yüzden motorun özellikle soğuk hava şartlarında ve motor ısınma periyodunda gereğinden fazla kapasiteli çalışarak motorun geç ısınmasına neden olmakta ve yakıt tüketimi ile egzoz emisyonları üzerinde olumsuz etkilere sebebiyet vermektedir. Bu duruma istinaden dizayn edilen elektronik kontrollü soğutma sisteminde bu gibi problemlerin iyileştirilmesi ve motor soğutma sıvısı debisinin kontrolünün sağlanabilmesi için bir myRIO kart ile kontrol edilen elektrikli santrifüj su pompası kullanılmıştır. İçerisinde

FPGA tümleşik devresine sahip National Instruments ürünü olan myRIO, LabView programlama dili ile programlanabilen ve yapılandırılma özelliğine sahip bir gömülü sistemdir. Elektrikli santrifüj su pompası ve myRIO kart için Şekil 14’te gösterilen pompanın olan detaylı teknik özellikleri Tablo 7 ile verilmiştir.



Şekil 14. Elektrikli su pompası.

Tablo 7. Elektrikli Su Pompasının Teknik Özellikleri

Cihaz Özellikleri	Değerler
Marka	Kormas santrifüj
Pompa ağırlığı	4,9 kg
Çalışma voltajı	12V DC
Maksimum akım ve güç	7A- 250 Watt
Debi	6000 l/h
Basınç	0,4 bar
Pompa giriş-çıkış çapı	38 mm

Emme hava debisi ölçüm cihazı.

Motor silindirlerine gönderilen taze çevre havasının debisi Şekil 15’de gösterilmiş olan Sierra Marka 628S model akış sensörü kullanılarak ölçülmüştür. Hava debi sensörünün bazı önemli teknik özellikleri Tablo 8’de verilmiştir. Hazırlanmış olan Labview programında sensörün kalibrasyon eğrisi oluşturularak deney düzeneğine uygun montajı yapılarak kullanıma hazır hale getirilmiştir.



Şekil 15. Emme havası debi sensörü.

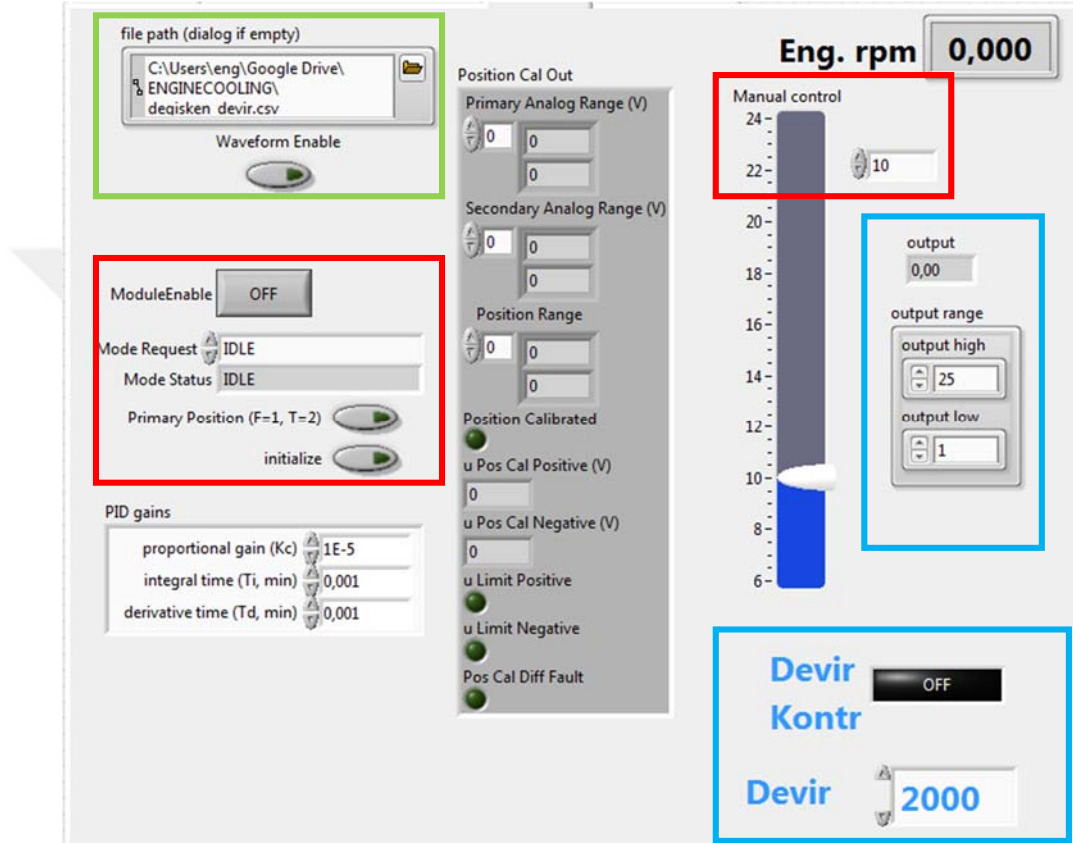
Tablo 8. Emme Havası Debi Sensörünün Teknik Özellikleri

Cihaz Özellikleri	Değerler
Gaz türü	Çevre havası
Güç ihtiyacı	18-30 VDC
Çıkış sinyali	0-5 VDC lineer
Gaz giriş boru çapı	BW2 (2 inç)
Gösterge tipi	LCD dijital gösterge
Cevap süresi	200 ms
Doğruluk	%1

Gaz kelebeği.

Deneylerde motorun sabit devir şartlarında ve Labview programına eklenmiş sürüş çevrimlerini kullanarak çalışabilmesi için elektronik kontrollü bir gaz kelebeği kullanılmıştır. Gaz kelebeğinin kontrolü için Şekil 16’da gösterilen Labview programı hazırlanmıştır. Bu programda üç farklı kontrol uygulaması yapılmıştır. İlk kontrol uygulaması Şekil 13’te gösterilen program görüntüsünde yer alan kırmızı bölgelerle gösterilmiştir. Bu kontrol uygulamasında çalışılmak istenen motor devrine göre gaz kelebek açıklığı manuel olarak ayarlanmaktadır. Öncelikle gaz kelebek modülü “Off” konumundan “On” moduna alınarak “Control” modu aktif edilir ve açıklık oranı girilmektedir. Bu kontrolde motor kendi elektronik kontrol ünitesi ile çalışmasını sürdürmektedir. İkinci kontrol yönteminde, motor ilk kontrol yöntemiyle çalıştıktan kısa zaman sonra hazırlanmış bir PID (orantısal, integral ve türev) kontrolcü aktif edilerek çalışma gerçekleştirilir. Bu kontrol mavi bölgede gösterilmiştir. Benzer şekilde “Devir kontrolü” modu “Off” konumundan “On” moduna alınarak aktif edilir. Böylece PID kontrolcü motorun girilen sabit devir sayısına göre çalışmasını sağlar. Bu yöntemde kontrolcü devirin çalışma boyunca sabit tutulmasını sağlamak için gaz kelebek açıklığını

değiştirerek sürekli ayarlamaya çalışır. Bir diğer yöntem yeşil bölge ile verilmiş olan aktif edilmektedir. Labview programında çalışması için uygun hale getirilen değişken devir şartlarını içeren bir “csv” uzantılı dosya hazırlanarak dosya yolunda tanıtıldıktan sonra motora çalışma haritası yüklenir ve belirlenen sürelerde değişken devir şartlarında çalışması sağlanır. “Waveform Enable” modu aktif edilir ve motor çalıştırılır. Böylece motor, değişken gaz kelebek açıklık pozisyonuyla beraber değişken devirli testin çalışma haritasını takip etmeye başlar.



Şekil 16. Motor gaz kelebeği kontrol programı.

Yakıt debisi ölçüm cihazı.

İçten yanmalı motor testlerinde toplam yakıt tüketiminin anlık olarak ölçülmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, özellikle mobil araç testlerinde yakıt tüketimi ölçümü için tasarlanmış olan Kistler DFL3X-5bar yakıt tüketim ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kullanılan yakıt debisi ölçüm cihazı Şekil 17, cihaza ait özellikler ise Tablo 9 ile verilmiştir.



Şekil 17. Yakıt debisi ölçüm cihazı (Kistler 2020).

Tablo 9. Yakıt Debisi Ölçüm Cihazının Özellikleri (Kistler 2020)

Cihaz Özellikleri	Değerler
Marka /Model	Kistler/DFL3X-5bar
Sensör ölçüm aralığı	0,5-250 l/h
Maksimum pompalama debisi (P=1 bar)	190 l/h
(P=5 bar)	120 l/h
Ölçüm hassasiyeti (1-50 l/h)	$\pm 0,5$ %
Max. Çalışma basıncı	5 Bar

Kistler DFL3X-5bar yakıt tüketim ölçüm cihazı uygulamada kolay kurulum, yüksek ölçüm hassasiyeti, mevcut bütün yakıt destek sistemlerine olan uyumluluğu, nerdeyse tüm yakıt türleri için kullanıma uygun olması (benzin, dizel, biyodizel ve alkol yakıtı) ve farklı türlerde çıkış sinyalleri (CAN/USB/RS-232C) entegrasi ile kullanım kolaylığı ve imkânı sunmaktadır (Kistler,2020).

Lambda sensörü.

Deneysel test motorunda ki yanma sonu ürünü olan egzoz gazlarının içerdiği oksijen miktarını belirlemek için Bosch marka geniş bant LSU 4,9 lambda sensörü kullanılmıştır. Şekil 18’te gösterilen Bosch LSU 4,9 lambda sensörü, ısıtıcı eklenmiş düzlemsel ZrO₂ (zirkonyum dioksit) çift hücre sınırlamalı bir akım sensörüdür. Lambda değerinin 0,65 ve yukarısını ölçebilme kapasitesine sahip evrensel bir sensör olan LSU 4,9 aynı zamanda oksijen miktarını zengin, fakir veya stokiyometrik şartlarda hassas bir şekilde ölçebilmektedir. Bu özelliğinden dolayı sensör benzin veya dizel yakıtlı motorlarda kullanılabilir (Bosch 2020). Kullanılan sensörün bazı teknik bilgileri Tablo 10 ile verilmiştir.



Şekil 18. Bosch LSU 4,9 lambda sensörü (Bosch, 2020).

Tablo 10. Bosch LSU 4,9 Lambda Sensörü Özellikleri (Bosch, 2020)

Sensörün Özellikleri	Değerler
Lambda (λ) ölçüm aralığı	0,65- ∞
Egzoz gaz sıcaklığı	< 930°C
Konnektör sıcaklığı	< 140°C
Maks. titreşim	300 m/s ²
Sensör ağırlığı	120g

Egzoz emisyon analiz cihazı.

Deneysel çalışmaların tamamında yanma sonucu oluşan egzoz gazlarının analizi Bosch marka BEA 250 model egzoz emisyon cihazı ile yapılmıştır. Şekil 19 ile gösterilen egzoz emisyon cihazı üzerine yerleştirilmiş bir kamera ile CO, CO₂, HC, NO, O₂ ve emisyon bileşenlerinin ve lambda (λ) katsayısının ölçümünü yapabilmektedir. Egzoz emisyon cihazının teknik bilgileri Tablo 11 ile verilmiştir.

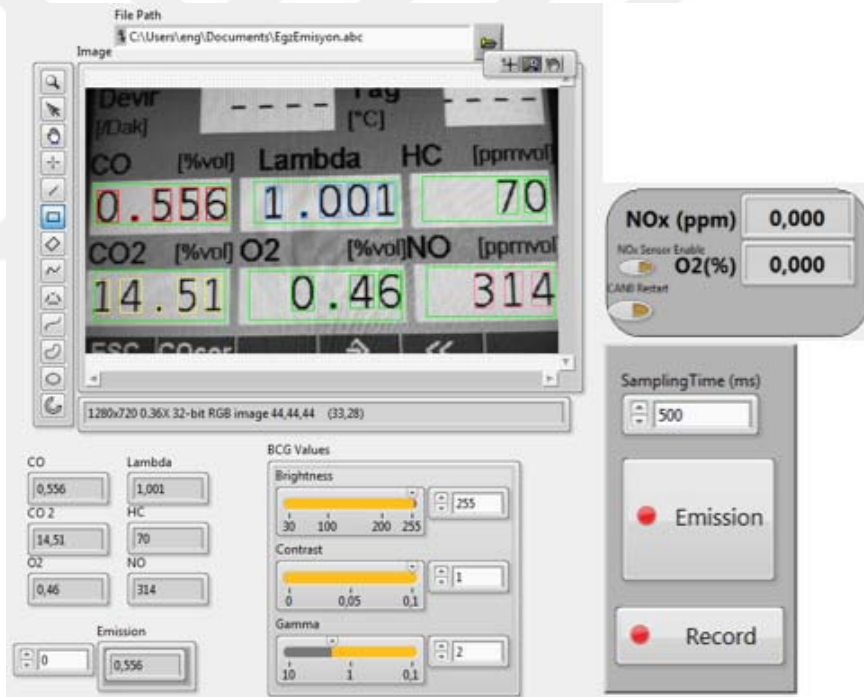


Şekil 19. Bosch BEA-250 egzoz emisyon analiz cihazı.

Tablo 11. Egzoz Emisyon Cihazının Ölçüm Bilgileri

Bileşenler	Ölçme Aralığı	Hassaslık
CO	0,00 – 10,00 % Hacim	0,001 % Hacim
CO ₂	0,00 – 18,00 % Hacim	0,01 % Hacim
HC	0 – 9,999 ppm Hacim	1 ppm Hacim
O ₂	0,00 – 22,00 % Hacim	0,01 % Hacim
Lambda (λ)	0,500 – 9,999	0,001
NO	0 – 5000 ppm Hacim	≤ 1 ppm Hacim

Analiz edilen egzoz emisyonları, Şekil 20’de görüldüğü üzere cihazın ekranına sabitlenmiş bir kamera yardımı bilgisayara aktarılmaktadır. Labview ortamında hazırlanmış program sayesinde her 500 ms zaman aralığında kameradan alınan verilerin takibi ve görüntü işlemesi yapılarak program üzerinden kaydedilmektedir. Söz konusu işleme dair Labview ortamında hazırlanan programın ekran görüntüsü Şekil 20’de sunulmuştur.

**Şekil 20.** Labview ortamında hazırlanan egzoz emisyon analiz programı.

Termostat

İçten yanmalı motorlarda termal yönetim sisteminde en önemli soğutma sistemi bileşenlerinden birisi mekanik termostattır. Herhangi bir kontrolcü içermeyen mekanik termostat motor soğutma sisteminde hem bir sıcaklık sensörü hem de 3 yollu bir valf görevi görmektedir. Motorun çalışmaya başlamasıyla ısınma periyodu boyunca artan soğutma sıvısı sıcaklığını referans alan termostat, motor bloğundan gelen soğutma sıvısının bypass hattında sirkülasyonunu yapması için yönlendirmektedir. Böylece motor bloğunun en kısa zamanda

kararlı çalışma şartlarına geçmesi için ısınması sağlanacaktır. Termostatın belirlediği sıcaklık değerine ulaşan soğutma sıvısı yine termostat tarafından yönlendirilmesi yapılarak bu kez bypass sirkülasyon hattı radyatör hattı olarak yeniden belirlenir. Böylece ısınan motor bloğu belirli bir çalışma sıcaklığı bandında tutulması için radyatör ve fan bileşenleriyle birlikte soğutma işlemi gerçekleştirilir. Mekanik termostat burada motor ısınma süresi üzerinde ve dolayısıyla yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının iyileştirilmesi noktasında önemli bir rol oynamaktadır. Deneylerde termostat açma sıcaklığı 83°C olan genel görünümü Şekil 21 ile gösterilmiş bir termostat kullanılmıştır.



Şekil 21. Termostat genel görünümü

Güç kaynağı.

Deney sisteminde kullanılmakta olan ve kontrolü gereken modül, compact RIO şasi, fan, elektrikli pompa, myRIO gibi farklı cihazlarının ihtiyaç duyduğu düşük voltajlı (5-30Volt) güç gereksinimlerini sağlamak için harici güç kaynakları kullanılmıştır. Farklı değerlerde gerilim elde edebilmek için kullanılan bu cihazlar, sistemdeki ölçüm bileşenlerinin enerji beslemesi ve dolayısıyla kontrollünün yapılmasına imkân vermiştir. Deney düzeneğinde Şekil 22’de görülen, FESTO Didactic marka 24V 5A güç kaynağı, TDK-Lambda marka SWS600-12 model 12V-50A güç kaynağı ve Cata CT-2563 8,5 A-100W trafo kullanılmıştır. Böylece sistemde radyatör fanı veya elektrikli pompa gibi cihazların devirleri kontrol edilerek çalışma süreleri boyunca tüketmiş oldukları toplam gücün belirlenmesi sağlanmıştır.



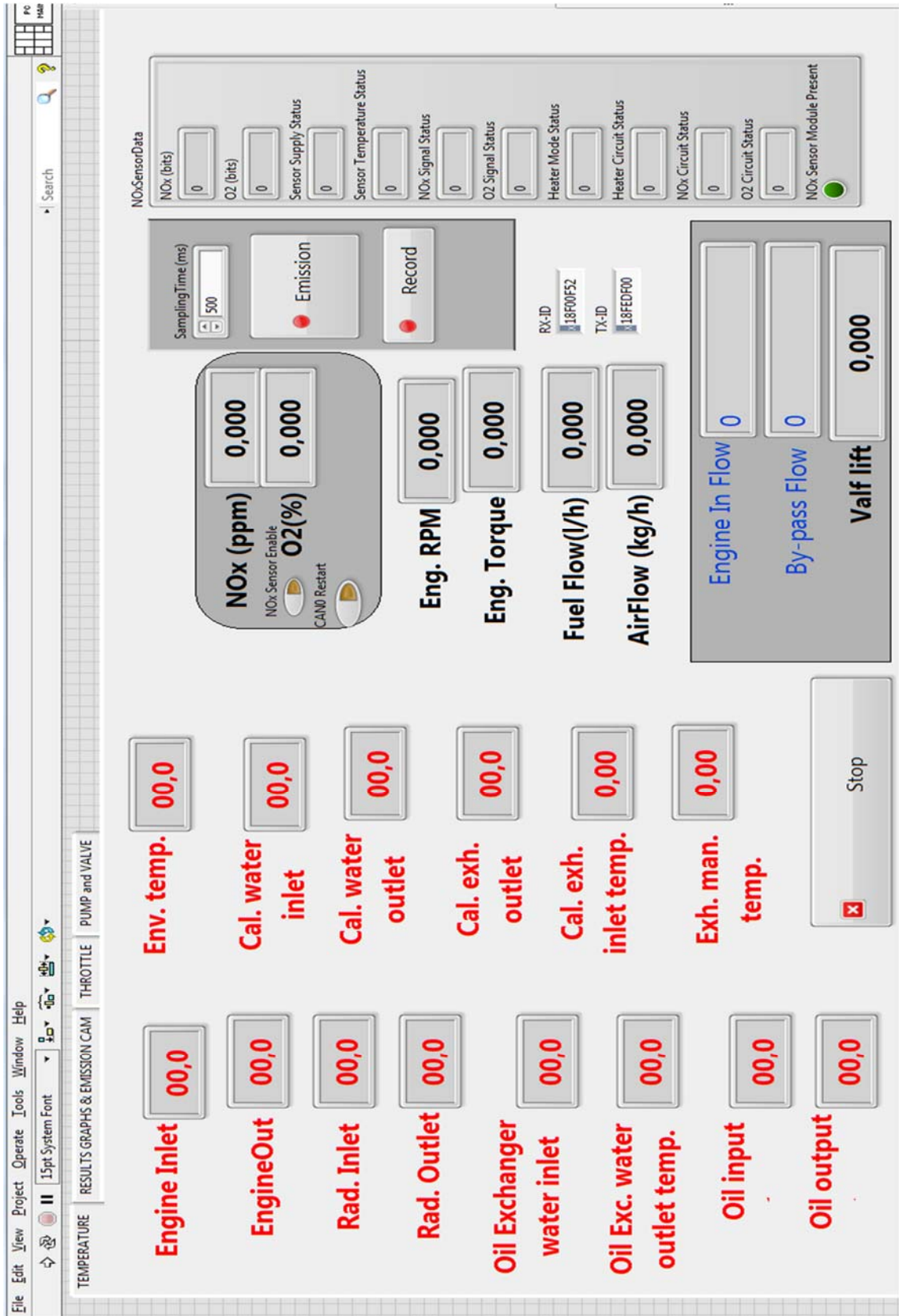
Şekil 22. Kullanılan güç kaynakları ve trafo.

Deneysel Yöntem

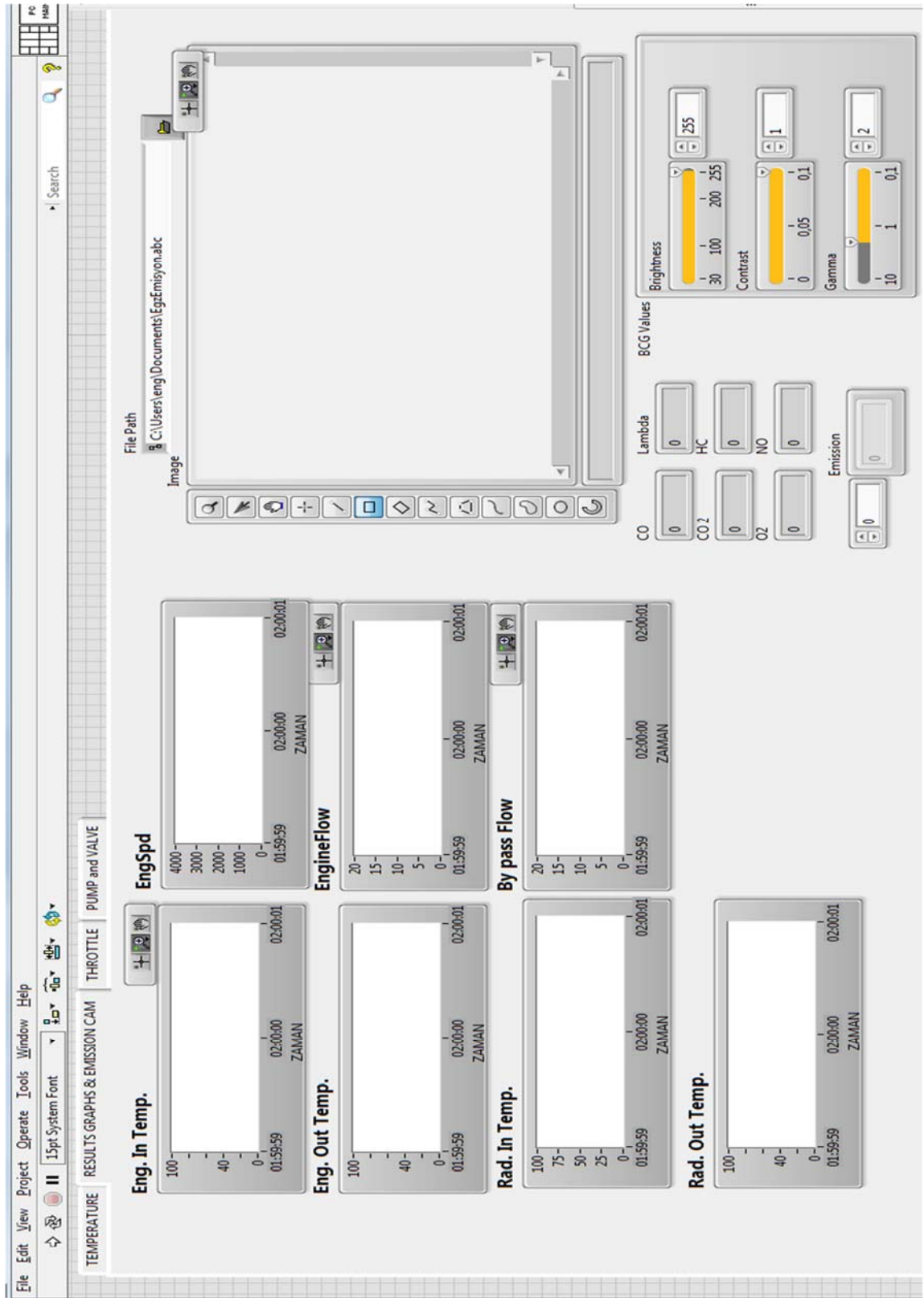
Hazırlanan yazılım

Isıl enerji yönetim stratejin belirlenmesine yönelik deneylerde verilerin gerçek zamanlı olarak ölçülebilmesi ve kaydedilmesi için Labview ortamında kendi hazırlamış olduğumuz program kullanılmıştır. Program deney sistemindeki bütün verilerin (sıcaklık, akışkan miktarı ve egzoz emisyonları) ölçülmesinde ve kaydedilmesinde kullanılmıştır. Elektronik kontrol Labview ortamında sensörlerden alınan verilerin cRIO şasiye gömülmüş yazılım üzerinden elde edilmiştir. Söz konusu programın görüntüsü Şekil 23 ile verilmiştir.

Motor devri, motor soğutma sıvısı sıcaklık ve debisinin gerçek zamanlı olarak grafiksel değişimin izlenmesi için Şekil 24 ile verilen program hazırlanmıştır. Deney sırasında parametrelerin değişiminin anlık olarak ve motor çalışmasından itibaren tüm çalışma zamanı boyunca göstermiş olduğu davranış izlenmektedir.



Şekil 23. Deneysel verilerin ölçümü için Labview ortamında hazırlanmış program.



Şekil 24. Deney boyunca verilerin izlenmesi ve egzoz emisyonlarının ölçümü.

Ayrıca tüm çalışma zamanı boyunca egzoz emisyonlarının anlık değişim davranışları da görüntü işleme yoluyla ölçülmekte ve kaydedilmektedir. Şekil 20’de bilgisi ve kısmen programın bir bölümünün görüntüsü verilmiştir. Burada bir kamera ile emisyon değerlerinin 500 ms zaman aralığında fotoğrafı çekilerek veri işleme yapılmıştır.

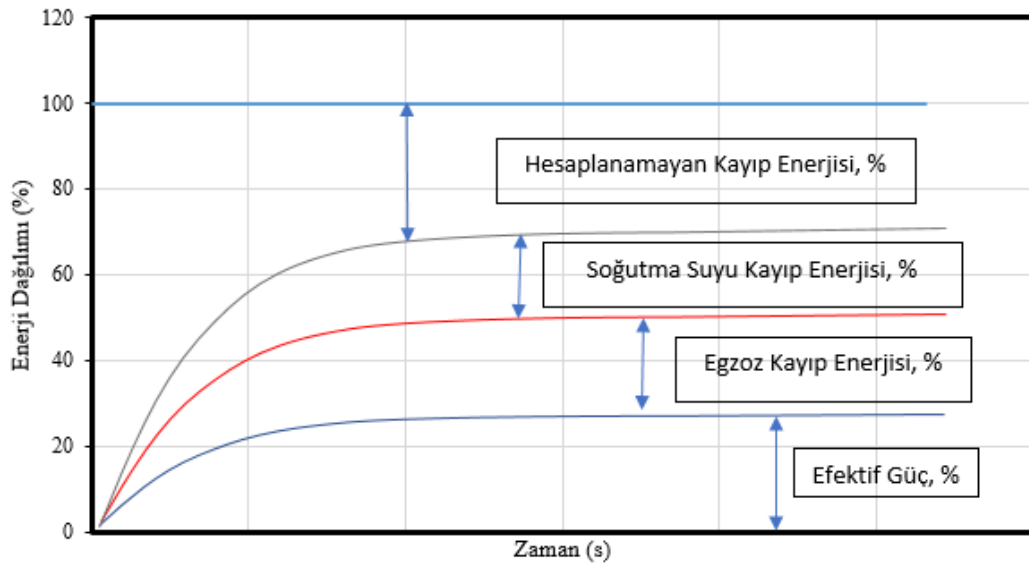
İçten yanmalı motorlarda enerji dengesi

Günümüzde küçük buji ateşlemeli motorların termal verimleri %20 büyük hacimli ve düşük devir sayılı dizel motorların termal verimleri ise %50 aralığındadır (Martyr and Plint 2007). Bu değerler tam yük şartları için söz konusudur ve günümüzde aktif olarak kullanılan en yüksek verimli enerji dönüşüm sistemleri bu dizel motorlarıdır.

Motor üreticileri ve araştırmacıları için maksimum termal verim değerini mümkün olan en yüksek değere çıkarmak önemli bir hedeftir. Termodinamik olarak bu en yüksek değeri belirlemek mümkündür. Yukarıda da bahsedildiği üzere yanma sonucunda açığa çıkan ısı enerjisinin bir bölümünün faydalı işe dönüştüğü kalan bölümünün ise çeşitli yollar ile kaybedildiği bilinmektedir. Dolayısıyla bu kayıpların tespiti ve değerlendirmesi motor testlerinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır.

Şimdiye kadar bu kayıp enerjilerden faydalanma adına birçok çalışma yapılmış ve bunların bir bölümü günümüzde aktif olarak kullanılır hale gelmiştir. Örneğin egzoz hattındaki turbo şarj sistemi sayesinde atık enerji faydalı işe dönüştürülmekte ve motor emme havasını basınçlandıran bir kompresör çalıştırılmaktadır. Ayrıca trijenerasyon sistemleri egzoz hattına yerleştirilen ısı değiştiricileri ile buhar veya sıcak su üretimi sağlamaktadırlar.

Şekil 25’de motorun çalıştırılmasından itibaren enerji dengesi değişimi zaman bağlı olarak sunulmuştur. Bu grafikte birim zamanda harcanan yakıt enerjisinin yüzde dağılımları görülmektedir. Yapılan bu çalışmada tüm deneysel koşullar için alınan ölçümler sayesinde motorun ısınma fazı boyunca enerji dengesi değişimleri ortaya konmuştur.



Şekil 25. Motorun çalıştırılmasından itibaren zaman bağlı enerji dengesi değişimi.

Şekil 25 incelendiğinde motorun ısınma fazı boyunca enerji dengesinin önemli seviyede değiştiği görülmektedir. Başlangıçta yakıt enerjisinin efektif güce dönüşüm oranı çok düşük

seviyedeysen özellikle termostatın açılmasının ardından neredeyse stabil hale geldiği söylenebilir. Ayrıca bu süreç zarfında hesaplanamayan kayıp enerji olarak atılan bölümün çok yüksek seviyelerde kaldığı bilinmektedir. Bu durumun birkaç nedeni bulunmaktadır;

Blok ve silindir sıcaklıkları henüz düşük olduğu için eksik yanma ürünleri oluşmakta ve dolayısıyla yakıt enerjisinin bir bölümü kaybedilmektedir.

Blok, yağlama yağı ve diğer yardımcı ekipmanların sıcaklıkları düşük seviyede olduğu ve giderek sıcaklıkları arttığı için bu malzemeler ısı depo olarak hareket etmekte ve bu durum yakıt enerjisinin faydalı işe dönüşme oranını kısıtlamaktadır.

Düşük sıcaklıklarda yağlama yağının ve yağlama sisteminin yağlama performansı düşük seviyede kaldığı için mekanik sürtünmeler artmakta ve hesaplanamayan kayıp enerji oranı artmaktadır. Dolayısıyla motorun ısınma fazı sürecinde yapılacak en küçük iyileştirme çalışması önem arz edecektir. Bunun dışında atıl termal enerji olan sıcak egzoz gazları kullanılarak motorun hızlı bir ısınma yakalaması sağlanabilir ve yakıt tüketiminde iyileştirmeler elde edilebilir.

Hazırlanan bu deneysel tez çalışmasında temel olarak yukarıda da izah edildiği üzere motor performans karakteristikleri ve CO egzoz emisyon değişimi hazırlanan altı farklı ısı enerji yönetim stratejisi üzerinde analiz ve değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler dört farklı motor çalışma koşullarında (2500 d/dk-%25 yük, 2500 d/dk-%40 yük, 3250 d/dk-%25 yük, 3250 d/dk-%40 yük, değişken devir (2000-3000 d/dk)-%25 yük, (2000-3000 d/dk)-%40 yük) alınmış ve sıcaklık ölçümleri ile hesaplanan enerji dağılım değişimleri motorun ilk çalıştırılmasının ardından tüm ısınma süreci için sunulmuştur. Deneysel çalışmada kurgusu yapılan beş farklı ısı yönetim stratejisinin, çalışma koşullarının ve test sonuçlarının değerlendirmesi “Araştırma Bulguları” bölümünde izah edilmiştir.

Deneysel Belirsizlikler

Deneysel çalışmalarda değişken parametrelerin ölçümü yapıldığı sensör veya cihazlardan elde edilen sonuçların hassasiyetinin belirlenmesi için hata analizi yapılmaktadır. Bu yöntemsel yaklaşım ile muhtemel hatalar için aralıklar tespit edilmektedir. Belirsizlik analizini diğer analiz yöntemlerinden bir adım öne çıkaran temel avantajı sonuçlarda en büyük hataya sebebiyet veren değişkenin hızlıca belirlenmesidir. Deneysel belirsizliğin temelleri Kline ve McClintock tarafından ortaya atılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarının yanında belirsizlik analizi de yapılmaktadır. Ölçülen bağımsız değişkenler ($x_1, x_2, \dots, x_n$) ve hesaplaması yapılan bağımlı değişkenler (R) arasındaki ilişki Eş. (15) ile gösterilmiştir.

Bağımsız değişkene ait hata oranları ($X_1, X_2, \dots, X_n$) olup değişkenlerin toplamından kaynaklanan belirsizlik δR , Eş. (16) ile hesaplanmaktadır (Holman 1971; Moffat 1988).

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (15)$$

$$\delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \delta X_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \delta X_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} \delta X_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \delta X_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Ölçümü yapılan bağımsız değişkenler, bu değişkenlere ait hassasiyet değerleri ve hesaplanan bağımlı değişkenlerin belirsizlik sonuçları Tablo 13’de verilmiştir.

Tablo 12. Ölçümü ve Hesaplaması Yapılan Değerlerin Belirsizlik Analizi

Ölçülen Bağımsız Değişkenler	Hassasiyet
Dinamometre yükü	$\pm 0,1$ kg
Motor hızı	± 1 d/dk
Yakıt tüketimi	$\pm \%0,5$
Debi	$\pm 0,03$
Sıcaklık	$\pm 0,02$ °C
CO emisyonu	$\pm \%0,001$
Yakıt	$\pm 0,005$
Hesaplanan Bağımlı Değişkenler	Belirsizlik
Yakıt enerjisi	$\pm \%0,051$
Efektif güç	$\pm \%1,308$
Soğutma suyu enerjisi	$\pm \%0,233$
Özgül yakıt tüketimi(BSFC)	$\pm \%1,309$
Termal Verim	$\pm \%1,31$

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

İçten yanmalı motorlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar üç ana başlığa ayrılabilir; enerji dağılım deneyleri, motor performans deneyleri ve egzoz emisyon deneyleri. Her üç başlık altında yapılan çalışmalar farklı motor şartlarında gerçekleştirildiğinde ilgili pozisyon için geliştirme amaçlı faaliyetler yürütülebilmektedir. Bu çalışmalardan elde edilen bilgiler ışığında, tüm dünyada otomotiv sanayisinin en önemli sistemi olan içten yanmalı motorlar üzerinde etkin çalışma parametrelerinin sistem cevapları üzerinde etkileri gözlenebilmektedir.

Bu başlıklar kapsamında tekil çalışmalar yapılabileceği gibi birbirleri arasındaki kombine ilişkileri de ortaya konduğunda çok daha fazla bilgi üretilebilmektedir. Çünkü motor performans karakteristikleri ile motor enerji dağılımı arasında bir ilişki olduğu gibi bu çalışmalar esnasında değiştirilen bir çalışma parametresinin egzoz emisyonları üzerinde de değişikliğe neden olabilmektedir. Dolayısıyla daha genel bir yaklaşım olarak bu çalışmaların beraber yürütülmesi gerekir.

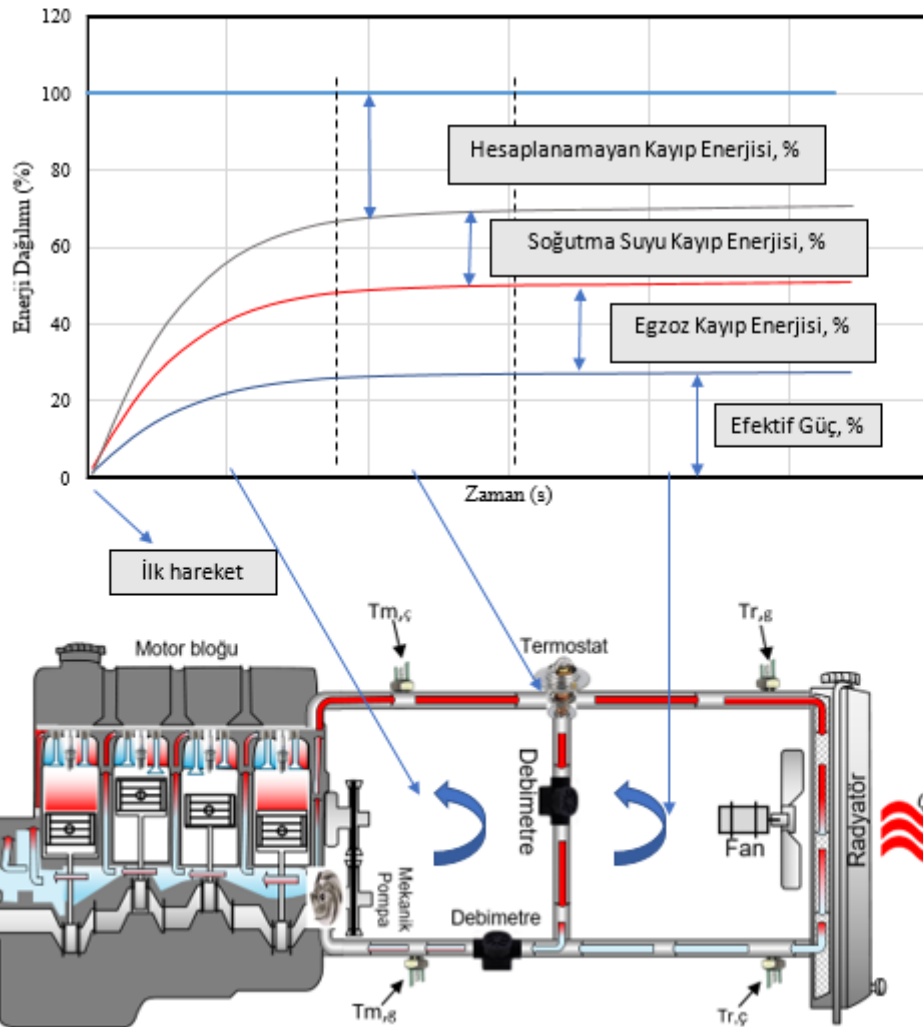
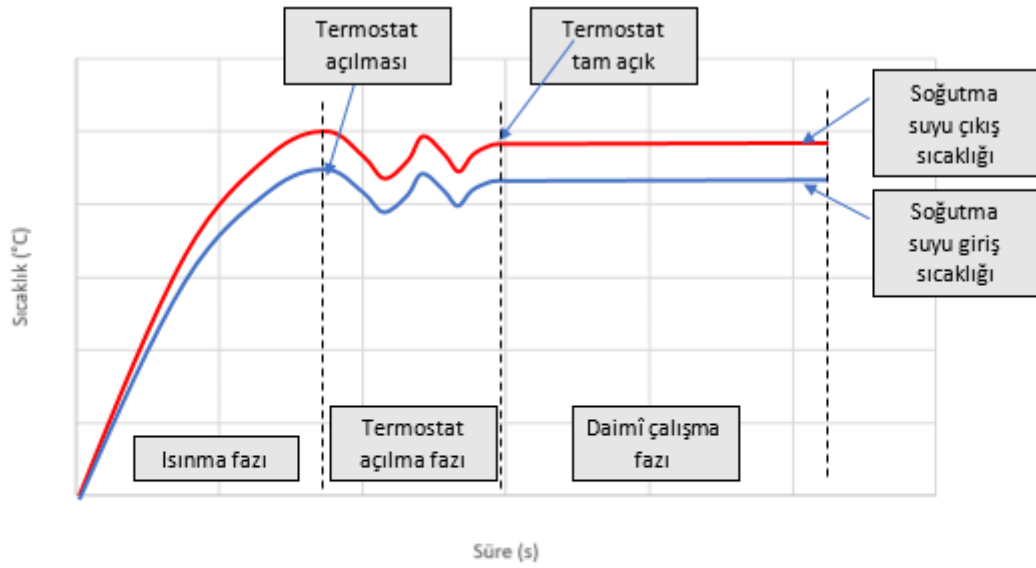
Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar ve bu çalışmalara ait gözlemlerin sunulmasında ilgili yaklaşım takip edilmiştir. Aşağıda ilk olarak dört farklı motor çalışma şartı için sabit devir sayısı ve yük koşullarında alınan sıcaklık ölçümleri ve hesaplanan enerji dağılım değişimleri motorun ilk çalıştırılmasının ardından tüm ısınma süreci için sunulmuştur. Bu çalışma şartları;

1. 2500 d/dk devir sayısında %25 motor yükü şartları
2. 2500 d/dk devir sayısında %40 motor yükü şartları
3. 3250 d/dk devir sayısında %25 motor yükü şartları
4. 3250 d/dk devir sayısında %40 motor yükü şartları
5. Değişken devir (2000-3000 d/dk)-%25 motor yükü şartları
6. Değişken devir (2000-3000 d/dk)-%40 motor yükü şartları

Bu çalışma şartları özellikle motor ısınma fazı boyunca ve şehir içi kullanımlarda genellikle motorun 2500-3250 devir şartlarında ve kısmi yüklerde çalışma aralığında bulunmaktadır. Bu yüzden deneysel çalışma şartları bu durum dikkate alınarak iki farklı devir ve iki farklı kısmi yük olarak belirlenmiştir. Ayrıca değişken devirli şartlarda yine aynı nedenden ötürü motorun şehir içi kullanımlarda özellikle 2000 ile 3000 devir şartlarında değişkenlik göstermesinden dolayı değişken devir çalışma şartı araştırılmıştır.

Ardından bu çalışmalardan elde edilen veriler üzerinden motor performans karakteristikleri ve CO egzoz emisyonu değişimleri sunulmuştur. Bu sayede motor ısınma

sürecinin tümünde motorun cevapları gözlenirken tüm sürecin sonunda da elde edilen değişimlerin genel değerlendirmesi yapılabilmektedir.



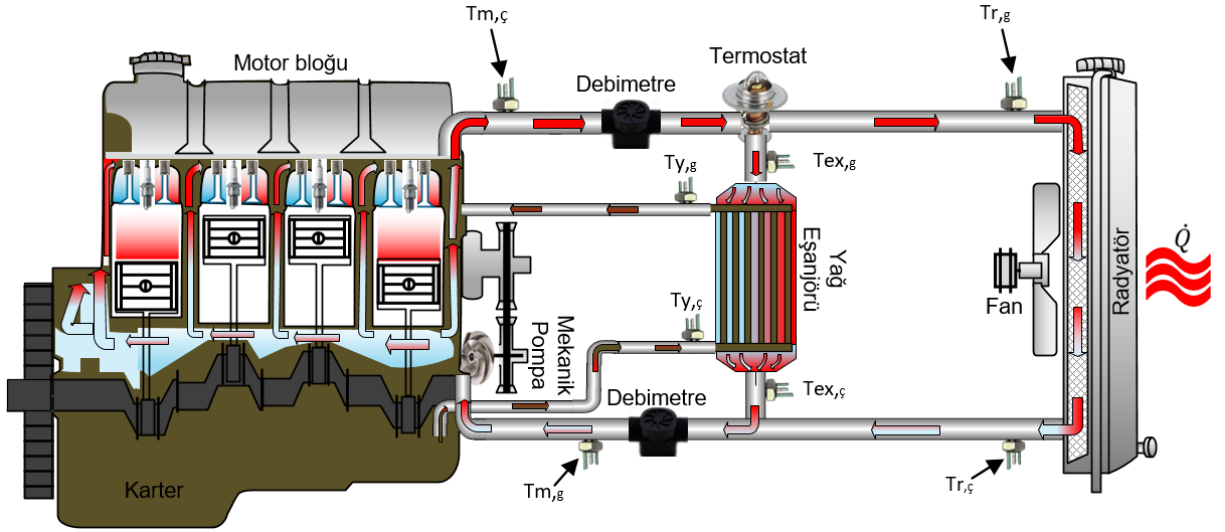
Şekil 26. Motor soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları ile enerji dengesi değişimi.

Bu deneysel gözlemler yapılırken aşağıdaki ısı yönetim stratejileri üzerinde karşılaştırma imkânı yakalanmıştır;

- a.) Yağlama yağı soğutucusu kullanıldığında,
- b.) Yağlama yağı soğutucusu kullanılmadığında,
- c.) Egzoz gazlarından ısı destek sağlanması durumunda,
- d.) Soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda,
- e.) Soğutma suyu debisinin %25 seviyesine azaltılması durumunda.

Motor test düzeneğinin şematik resmi ile eşleştirilmiş motorun çalıştırılmasından itibaren motor soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ve enerji dengesi değişimi zaman bağılı olarak Şekil 26'da sunulmuştur. İlgili şekilde en üstteki grafikte termostatin açılma bölgesi, motor çalışma fazları ve soğutma sıvısı sıcaklık değişiminin genel gösterimi verilmiştir. Burada referans haldeki bir soğutma sistemi için motorun ısınma fazları incelenebilir. Ortadaki grafikte motorun ısınma zamanı boyunca harcanan yakıt enerjisinin yüzdesel olarak enerji değişim ve dağılımları gösterilmiştir. Motora giren enerji olan yakıt enerjisinin tamamı %100 olarak tanımlandığında motorlarda diğer enerji dağılım hesaplamaları ve değişimleri grafikte görüldüğü gibi davranış sergilemektedir. Alttaki grafikte ise motor soğutma sisteminin yağlama yağı soğutucusu olmadığı (referans hal şartları) durumda ki bileşenleri şematik olarak verilmiştir. Motor ısınma fazları ve soğutma sıvısının yönlendirildiği soğutma hattı bölgeleri şematik resim üzerinde detaylıca gösterilmiştir.

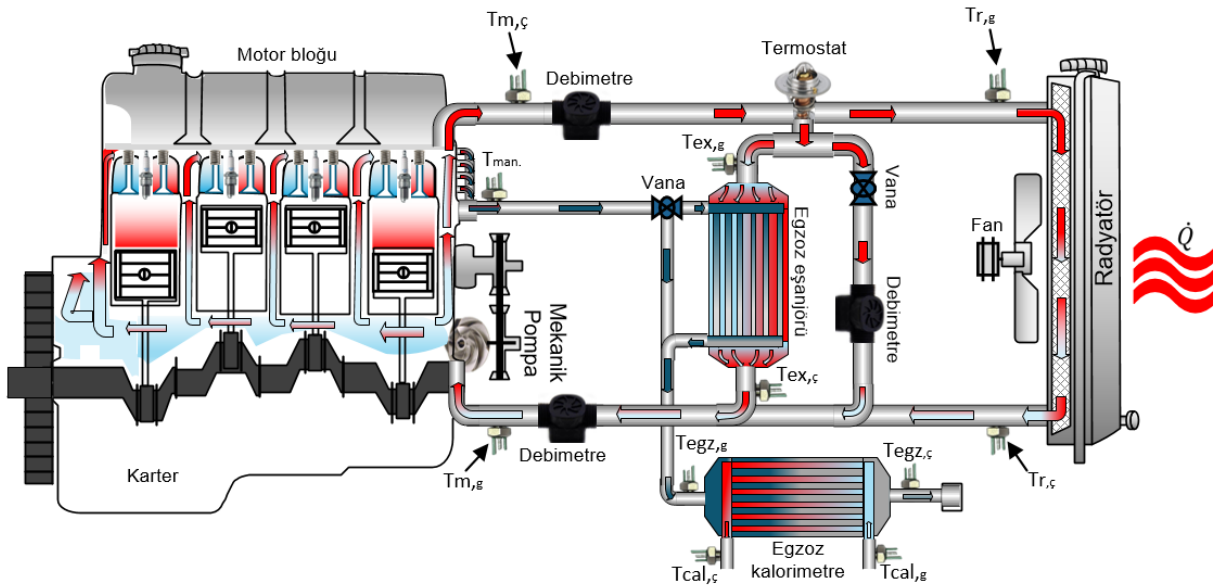
Motor soğutma sisteminde ısı yönetim stratejileri üzerinde karşılaştırma imkânı yakalanması için mevcut soğutma sisteminde yağlama yağı soğutucusu kullanılması (durum a) durumu Şekil 27'de verilmiştir. Burada mekanik pompanın gönderdiği soğutma sıvısı motor ısınma periyodu boyunca termostatin yönlendirmesi ile yağ soğutucusundan geçerek yağ ve soğutma sıvısı arasında ısı transferi gerçekleşmektedir. Yağ soğutucusundan çıkan yağ ve soğutma sıvısı motor bloğuna girmektedir. Bu süreç boyunca bu çevrim motorun ısınma zamanı sonuna kadar devam etmektedir. Isınma periyodu sonunda termostat açılarak soğutma sıvısını radyatör hattına yönlendirmektedir. Her bir yük ve devir koşulu için bu ısı enerji yönetim stratejisi uygulamasının testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 27. Motor soğutma sisteminde yağlama yağı soğutucusu kullanılması durumu.

Motor soğutma sisteminde ısı yönetim stratejileri üzerinde karşılaştırma imkânı yakalanması için mevcut soğutma sisteminde egzoz gazlarından ısı destek sağlanması (durum c) durumu Şekil 28’de verilmiştir. İlgili şematik resim incelendiğinde mekanik pompanın gönderdiği soğutma sıvısı motor ısınma periyodu boyunca termostatin yönlendirmesi ile egzoz ısı değiştiricisinden geçerek sıcak egzoz gazları ve soğutma sıvısı arasında ısı transferi gerçekleşmektedir. Normal bypass soğutma hattı bir vana ile kapatılarak soğutma sıvısı egzoz ısı değiştiricisine yönlendirilir. Egzoz ısı değiştiricisinden geçerek sıcaklığı artan soğutma sıvısı motor bloğuna tekrar girmektedir. Tüm ısınma zamanı boyunca bu çevrim devam etmektedir. Isınma periyodu sonunda termostat açılarak mekanik pompa soğutma sıvısını bu kez radyatör hattına yönlendirmektedir. Bu andan sonra motorun kararlı çalışma sıcaklığına ulaşana kadar ara ara termostatin açılıp kapanma durumu gerçekleşmekte ve bypass hattına soğutma sıvısı akışı olabilmektedir. Bu durumda ısınma zamanı sonrasında egzoz ısı değiştiricisi hattı vanası kapatılarak bypass akışının sadece normal bypass hattından yönlendirilmesi sağlanır.

Motor ısınma süreci boyunca motor egzoz manifoldundan çıkan egzoz gazları egzoz ısı değiştiricisinden geçerek ısı enerjisinin bir kısmını soğutma sıvısına aktarır ve daha sonra egzoz kalorimetresinden geçerek çevreye salınır. Isınma periyodu sonunda aynı soğutma sıvısında olduğu gibi egzoz gazları da bir vana yardımıyla ısı değiştiricisinden ayrılarak doğrudan egzoz hattına bağlanır ve egzoz kalorimetresinden geçerek dışarı atılır. Yakıt enerjisinin ne kadarının egzoz gazlarıyla dışarı atıldığının belirlenmesi için egzoz gaz kalorimetresi kullanılmaktadır. Her bir yük ve devir koşulu için bu ısı enerji yönetim stratejisi uygulamasının testleri gerçekleştirilmiştir.



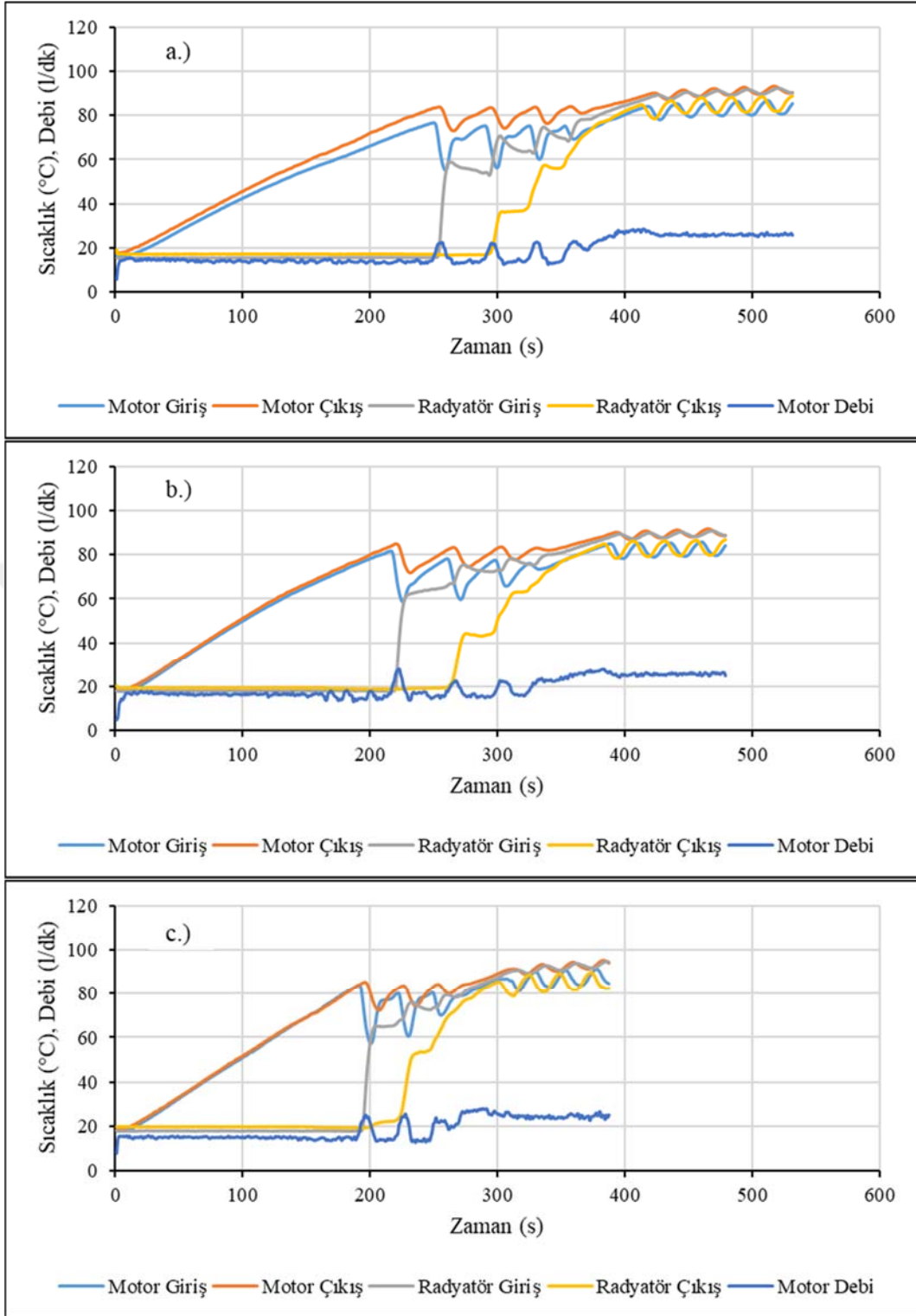
Şekil 28. Motor soğutma sisteminde egzoz gazlarından ısıl destek sağlanması durumu.

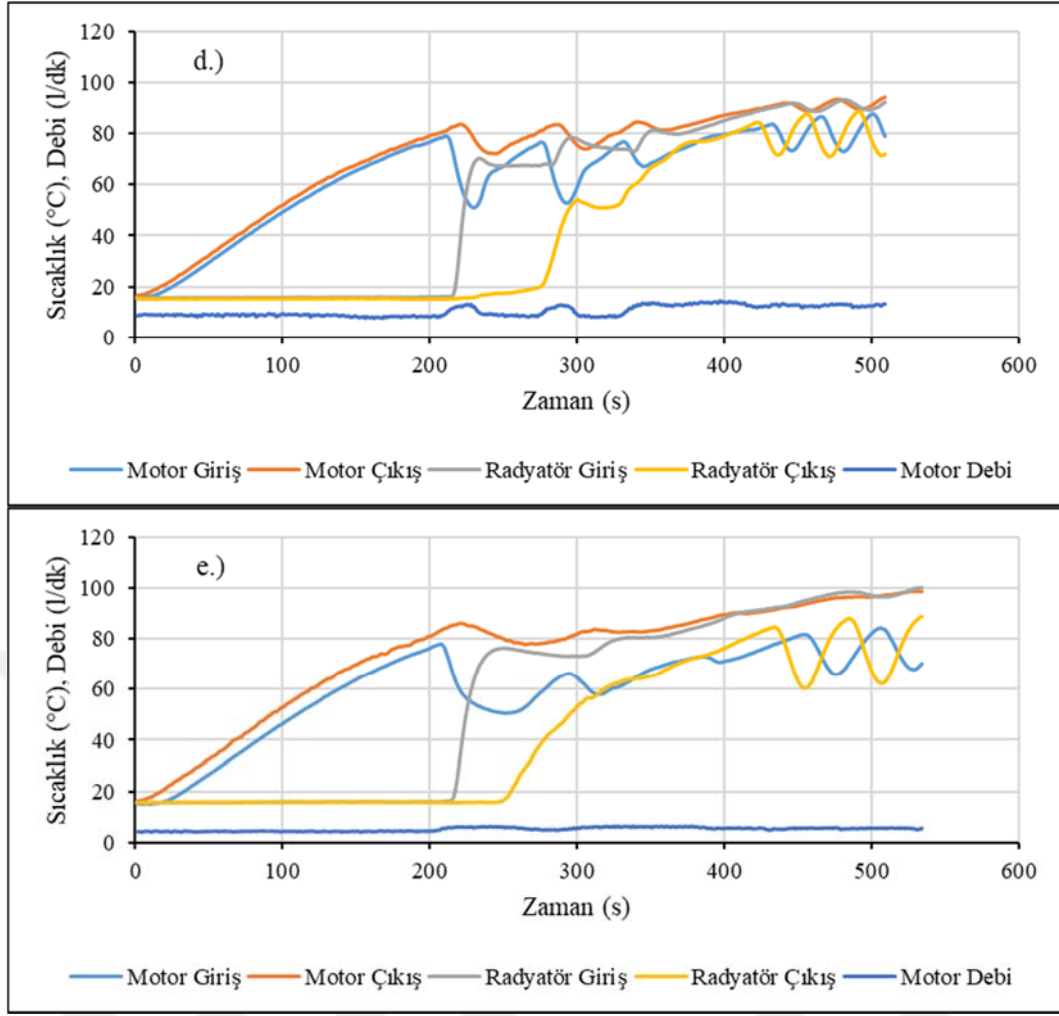
Yapılan bu çalışmada tüm deneysel koşullar için alınan sıcaklık ölçümlerinde motorun ısınma fazı boyunca motor soğutma suyu sıcaklık, enerji dengesi değişimleri ve CO emisyon değişimi incelenmiş olup değişken motor şartlarında yapılan deneyler ile özellikle motor soğutma suyu debisinin kontrol edilmesinin motor ısınma süresi üzerinde ki etkileri detaylıca ortaya konmuştur.

Yukarıda bahsedilen ısıl enerji yönetim stratejisi durumlarının (durum a, b, c, d) deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen deneysel bulgular aşağıda her bir çalışma koşulu başlığı altında detaylıca değerlendirilmiştir.

2500 d/dk Devir Sayısı ve %25 Motor Yüğü Şartları

Şekil 29’da 2500 d/dk devir sayısı ve %25 motor yüğü şartlarında beş farklı deney koşulunda yapılan deneylerden elde edilen farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisi değişimi sonuçları görülmektedir. Grafikte beş farklı konfigürasyon durumu sırasıyla; a.) yağlama yağı soğutucusu kullanıldığında, b.) yağlama yağı soğutucusunu kullanılmadığında, c.) egzoz gazlarından ısıl destek sağlanması durumunda, d.) soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda ve e.) soğutma suyu debisinin %25 seviyesine azaltılması durumunda olmak üzere verilmiştir.





Şekil 29. 2500 d/dk devir sayısı ve %25 motor yükü şartlarında farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisinin değişimi.

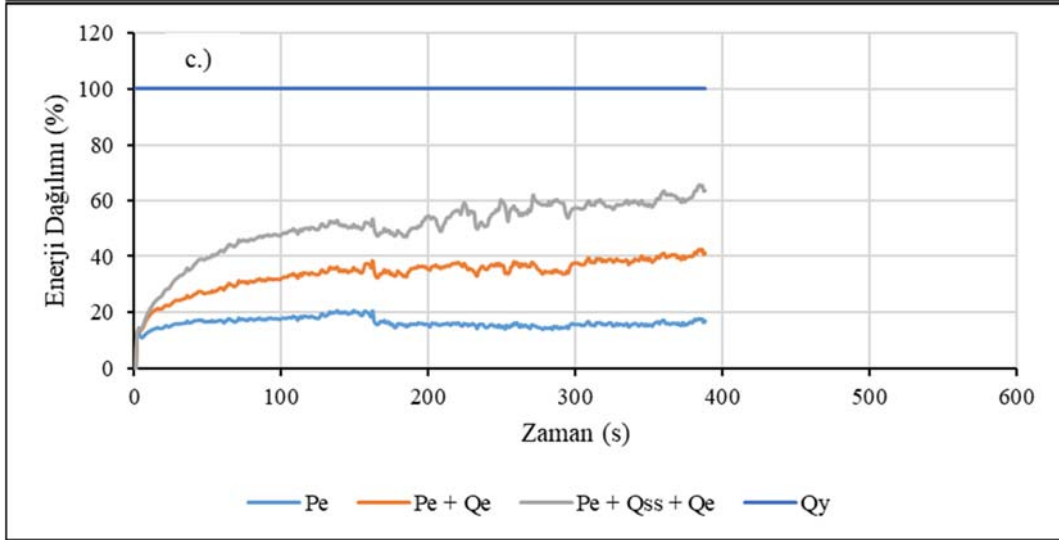
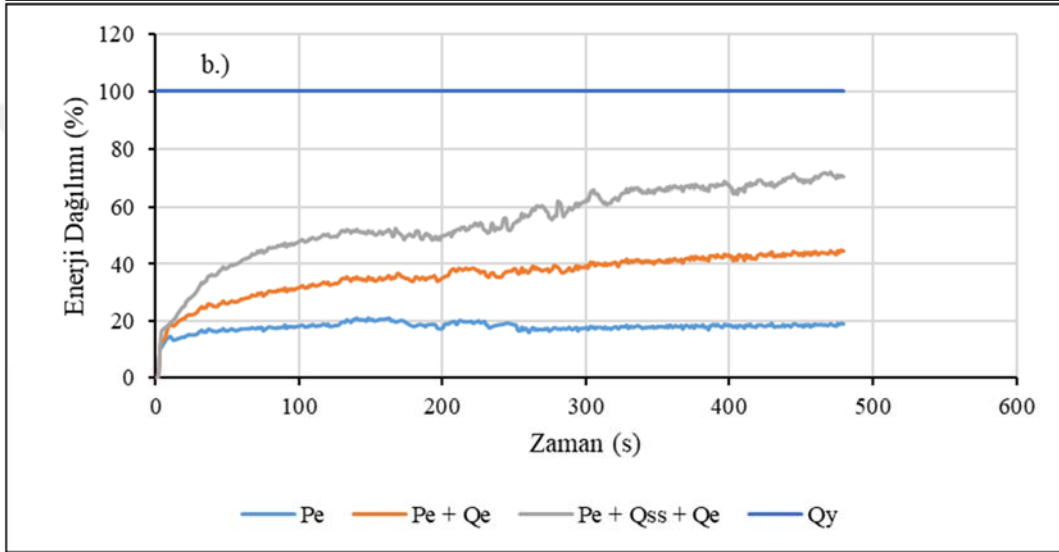
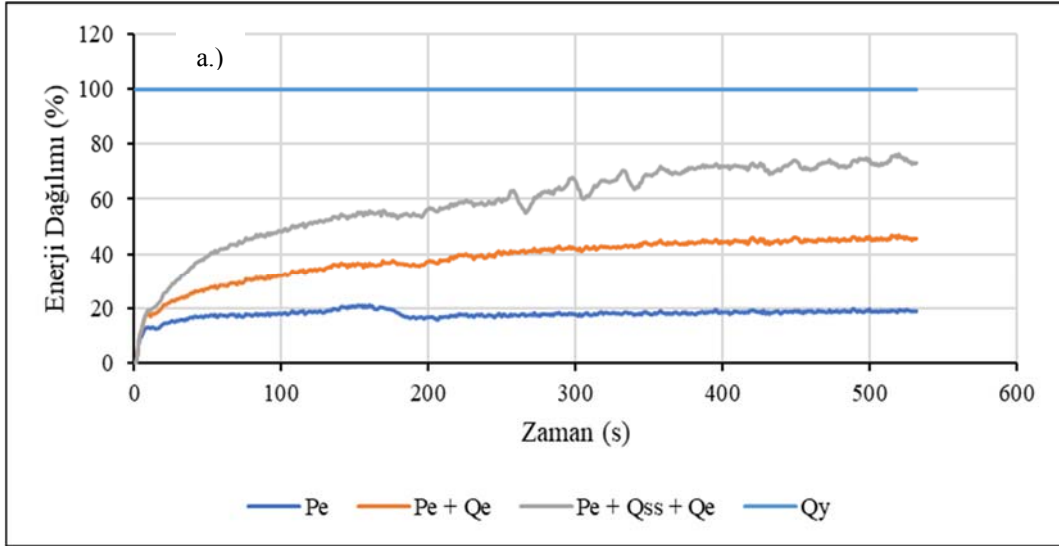
İlgili grafikler incelendiğinde yağlama yapı soğutucusuna motor soğutma suyu gönderilmediğinde ısınma süresinin en uzun olduğu, termostatin 252 s sonra açıldığı ve bu sürenin yağlama yağı soğutucusu kullanılmadığında 218 s, egzoz gazlarından ısı destek sağlanması durumunda 195 s, soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda 211 s ve soğutma suyu debisinin %25 seviyesine azaltılması durumunda 207 s değerinde olduğu görülmektedir. Bu sayede tüm alternatif ısıl yönetim stratejilerinde motor ısınma süresinin azaldığı söylenebilir. (a) grafiği incelendiğinde motor ısınma fazındayken motor giriş çıkış sıcaklıkları arasında belirli düzeyde fark olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni motordan çıkan suyun yağ ısı değiştiricisine ulaşması esnasındaki, ısı değiştiricisinde dolaşımı esnasındaki ve tekrar motor giriş noktasına ulaşması esnasındaki ısı kayıplardır. Bu kayıplar soğutma suyu giriş çıkışı arasında bir sıcaklık farkı oluşumuna neden olmuştur. Oysa (b) grafiği incelendiğinde suyun ısı değiştiricisine gidişi engellendiği için sıcaklık farkı minimum düzeydedir. Ayrıca (c) grafiği incelendiğinde egzoz hattına yerleştirilen ısı değiştiricisinden elde edilen ısı girişinin motor soğutma suyunun sıcaklık artış hızını artırdığı gözlenmektedir.

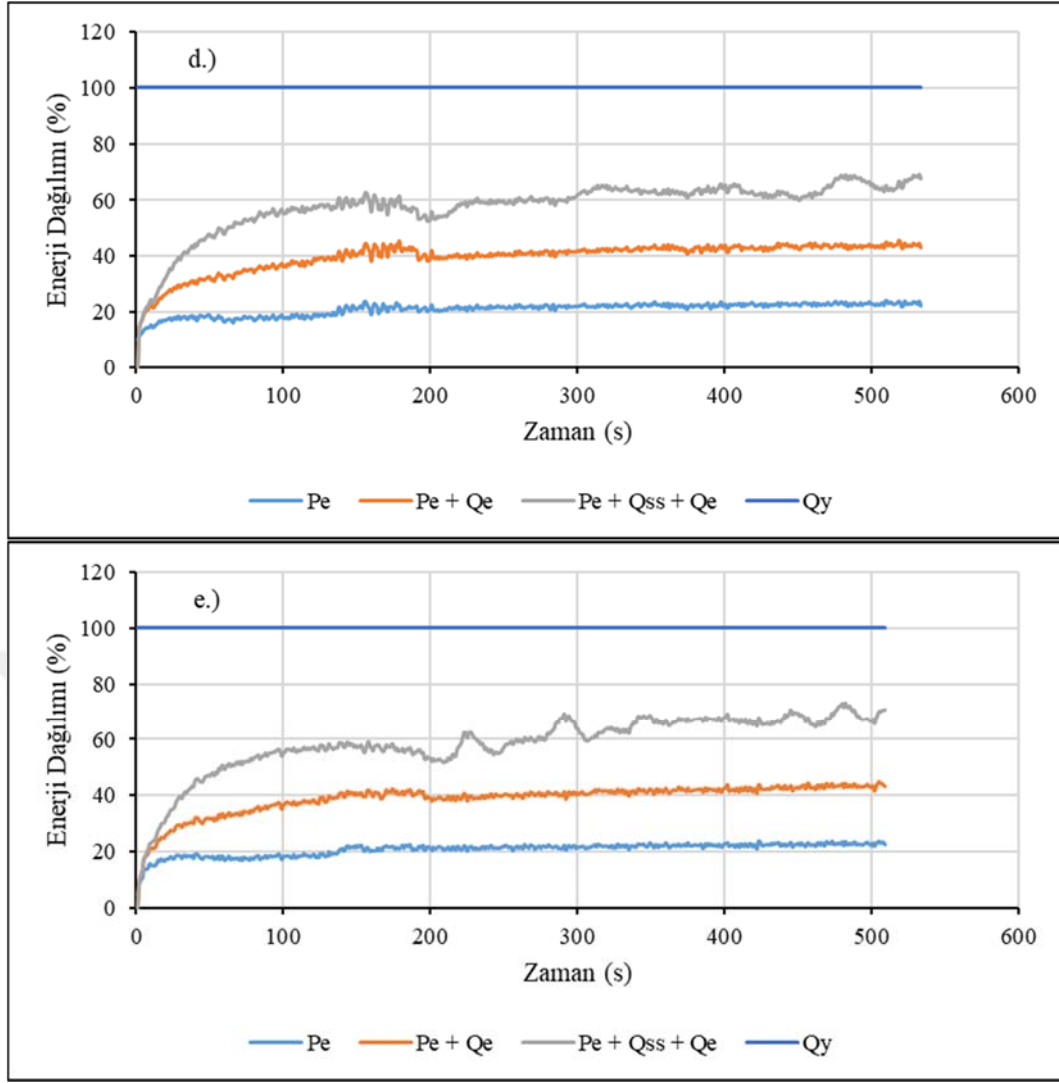
(d) ve (e) grafiklerinde ise sırasıyla verilen %50 ve %25 seviyesinde soğutma suyu debisi kullanım şartlarının dört farklı noktadan alınan sıcaklık verileri üzerindeki etkileri sunulmuştur. Günümüzde özellikle otomotiv sanayisinde üzerinde çalışmaların yoğunlaştırıldığı elektronik kontrollü soğutma suyu debisi kontrol yönteminin etkileri bu grafikler üzerinden değerlendirilebilmektedir. İlgili grafikler analiz edildiğinde motor soğutma suyu debisi azaldıkça soğutma suyunun motor bloğuna giriş çıkışı arasında yeniden belirli düzeyde fark oluşmaya başladığı görülmektedir. Soğutma suyu debisi azaldıkça bloğa giren soğutma suyuna silindirlerden olan ısı geçişi artmış ve bu sayede çıkışa kadar soğutma suyu sıcaklık artış hızı artmıştır. Ancak %25 seviyesinin alt sınır bölge olduğu gözlenmiştir. Bu kadar düşük seviyedeki soğutma suyu debisinin silindir kanallarındaki soğutma suyunun sıcak bazı noktalarda ki kaynama riskini artırmaktadır.

Şekil 30'da 2500 d/dk devir sayısı ve %25 motor yükü şartlarında beş farklı deney koşulunda yapılan deneylerden elde edilen enerji dengesi değişimi sonuçları verilmiştir. Grafikte beş farklı konfigürasyon durumu sırasıyla; a.) yağlama yağı soğutucusu kullanıldığında, b.) yağlama yağı soğutucusu kullanılmadığında, c.) egzoz gazlarından ısı destek sağlanması durumunda, d.) soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda ve e.) soğutma suyu debisinin %25 seviyesine azaltılması durumunda olmak üzere verilmiştir.

Bölüm 2'de kuramsal temeller kısmında yer verilen teorik bilgilere dayanarak ilgili grafikler incelendiğinde motorun ilk çalıştırılmasının ardından tüm ısınma sürecinde yakıt enerjisinin faydalı işe dönüşüm oranının giderek arttığı ve hesaplanamayan kayıp enerjilerin giderek azaldığı görülmektedir. Tüm deneysel koşullar için geçerli olan bu duruma dayanarak motorun ısınma sürecinin azaltılması için yapılacak tüm donanımların önemli avantajlar sağlayacağı görülmektedir.

Alternatif ısıl yönetim stratejileri uygulandığında özellikle hesaplanamayan kayıplar içerisinde yer alan mekanik sürtünme kayıplarının eksik yanma dolayısıyla gerçekleşen kayıpların büyük oranda yaşandığı ısınma fazının giderek daraldığı görülmektedir.

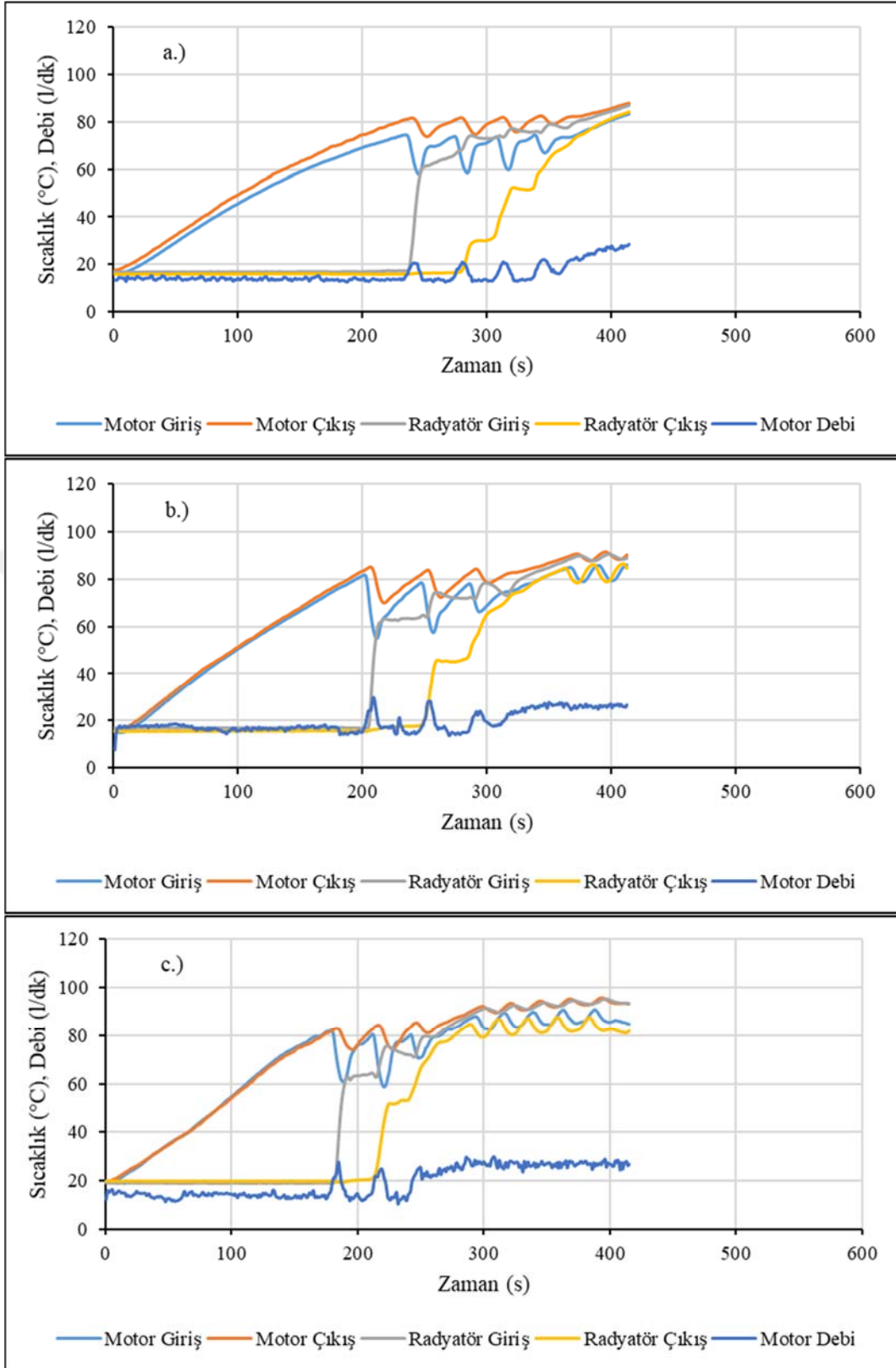


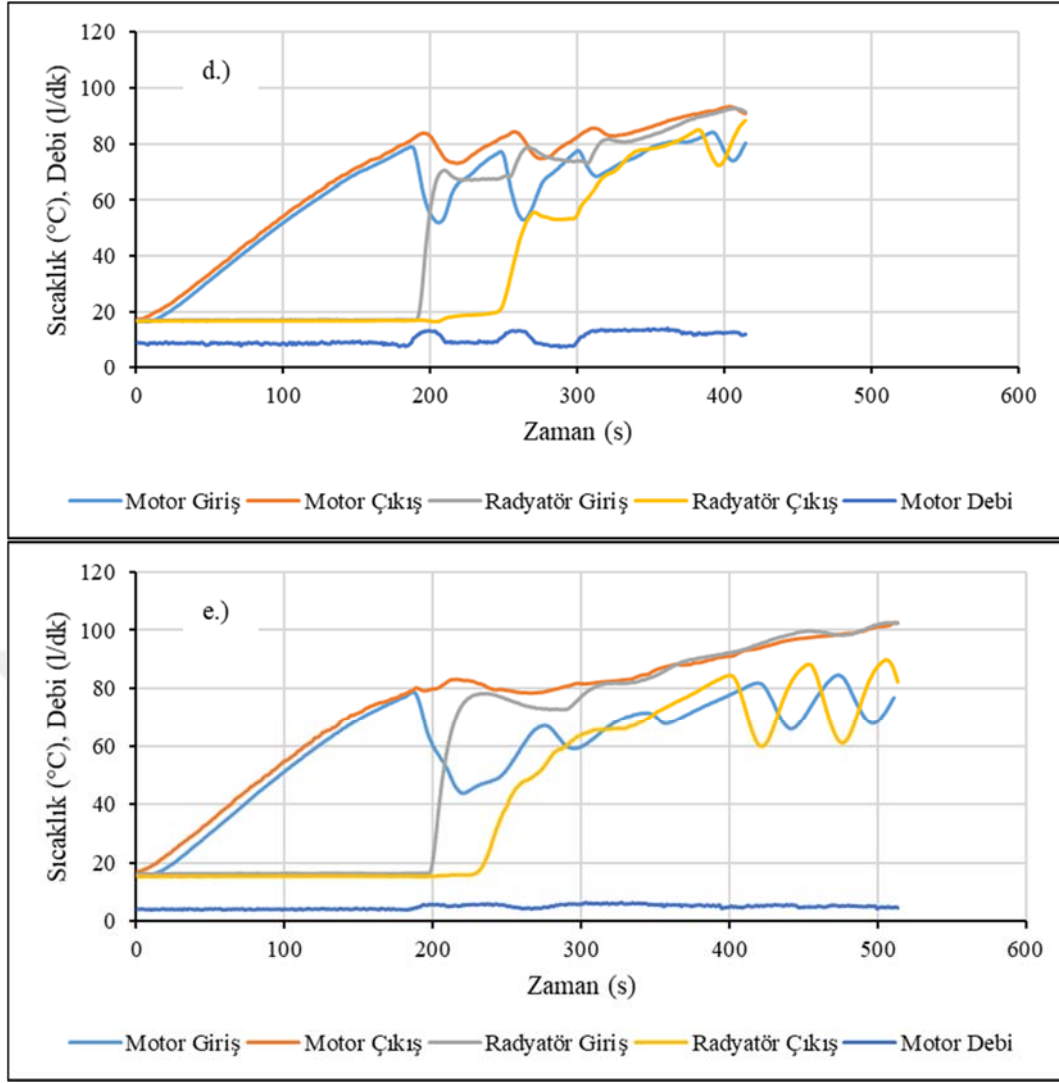


Şekil 30. 2500 d/dk devir sayısı ve %25 motor yükü şartlarında enerji dengesi değişimi.

2500 d/dk Devir Sayısı ve %40 Motor Yükü Şartları

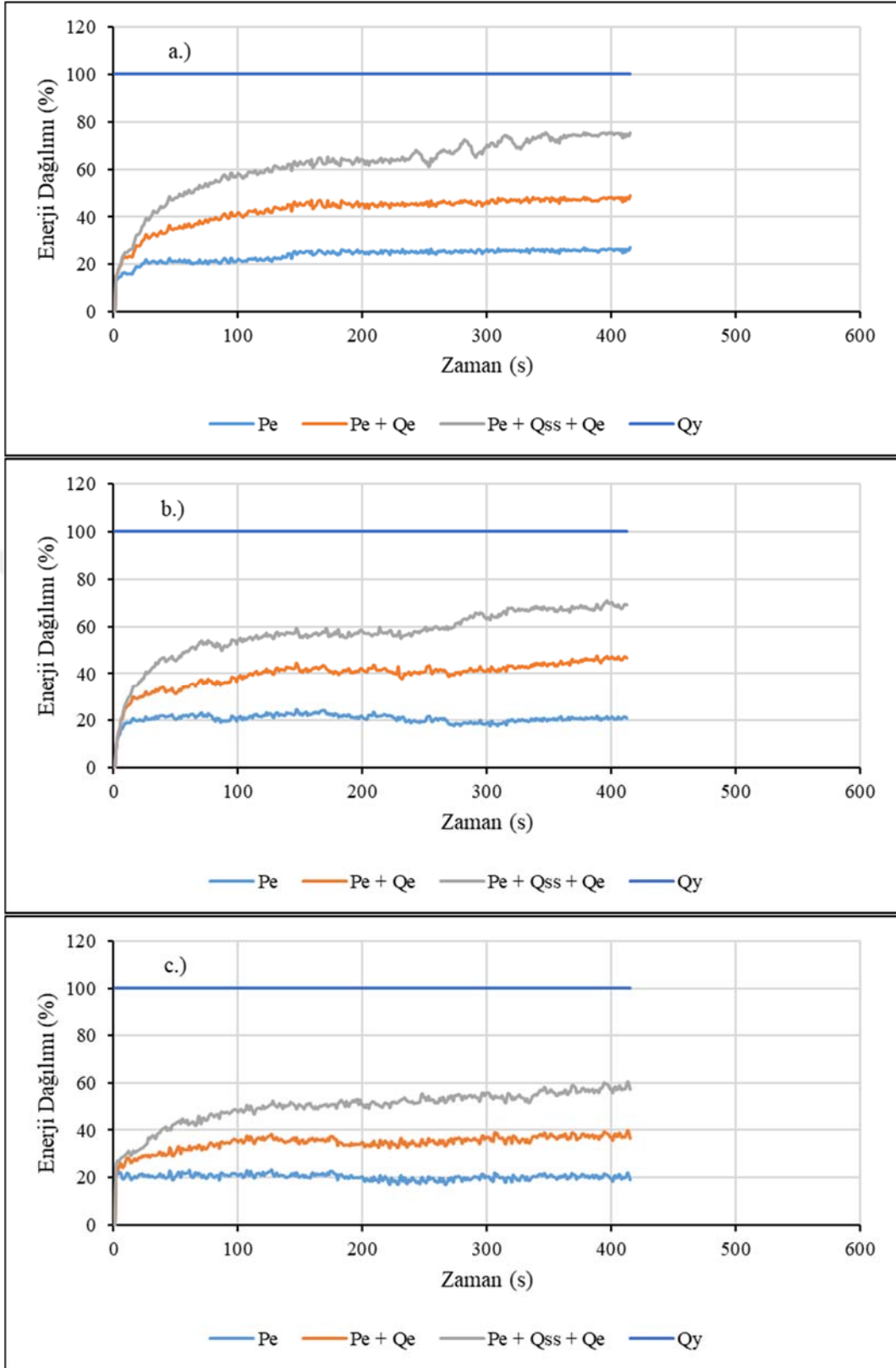
Şekil 31’de 2500 d/dk devir sayısı ve %40 motor yükü şartlarında beş farklı deney koşulunda yapılan deneylerden elde edilen farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisi değişimi sonuçları görülmektedir. Grafikte beş farklı konfigürasyon durumu sırasıyla; a.) yağlama yağı soğutucusu kullanıldığında, b.) yağlama yağı soğutucunu kullanılmadığında, c.) egzoz gazlarından ısı destek sağlanması durumunda, d.) soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda ve e.) soğutma suyu debisinin %25 seviyesine azaltılması durumunda olmak üzere verilmiştir.

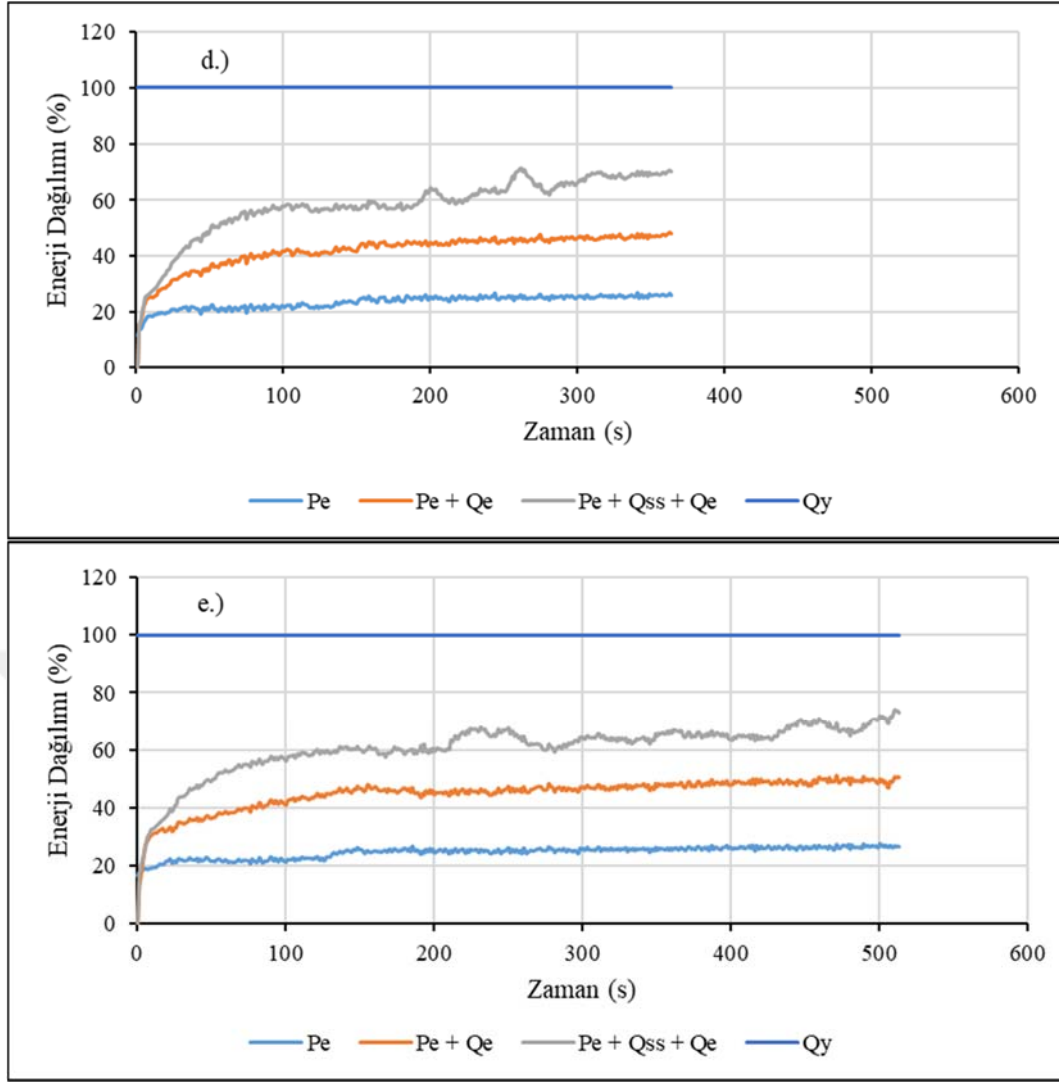




Şekil 31. 2500 d/dk devir sayısı ve %40 motor yükü şartlarında farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisinin değişimi.

Şekil 32’de 2500 d/dk devir sayısı ve %40 motor yükü şartlarında beş farklı deney koşulunda yapılan deneylerden elde edilen enerji dengesi değişimi sonuçları görülmektedir. Grafikte beş farklı konfigürasyon durumu sırasıyla; a.) yağlama yağı soğutucusu kullanıldığında, b.) yağlama yağı soğutucunu kullanılmadığında, c.) egzoz gazlarından ısıl destek sağlanması durumunda, d.) soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda ve e.) soğutma suyu debisinin %25 seviyesine azaltılması durumunda olmak üzere verilmiştir.

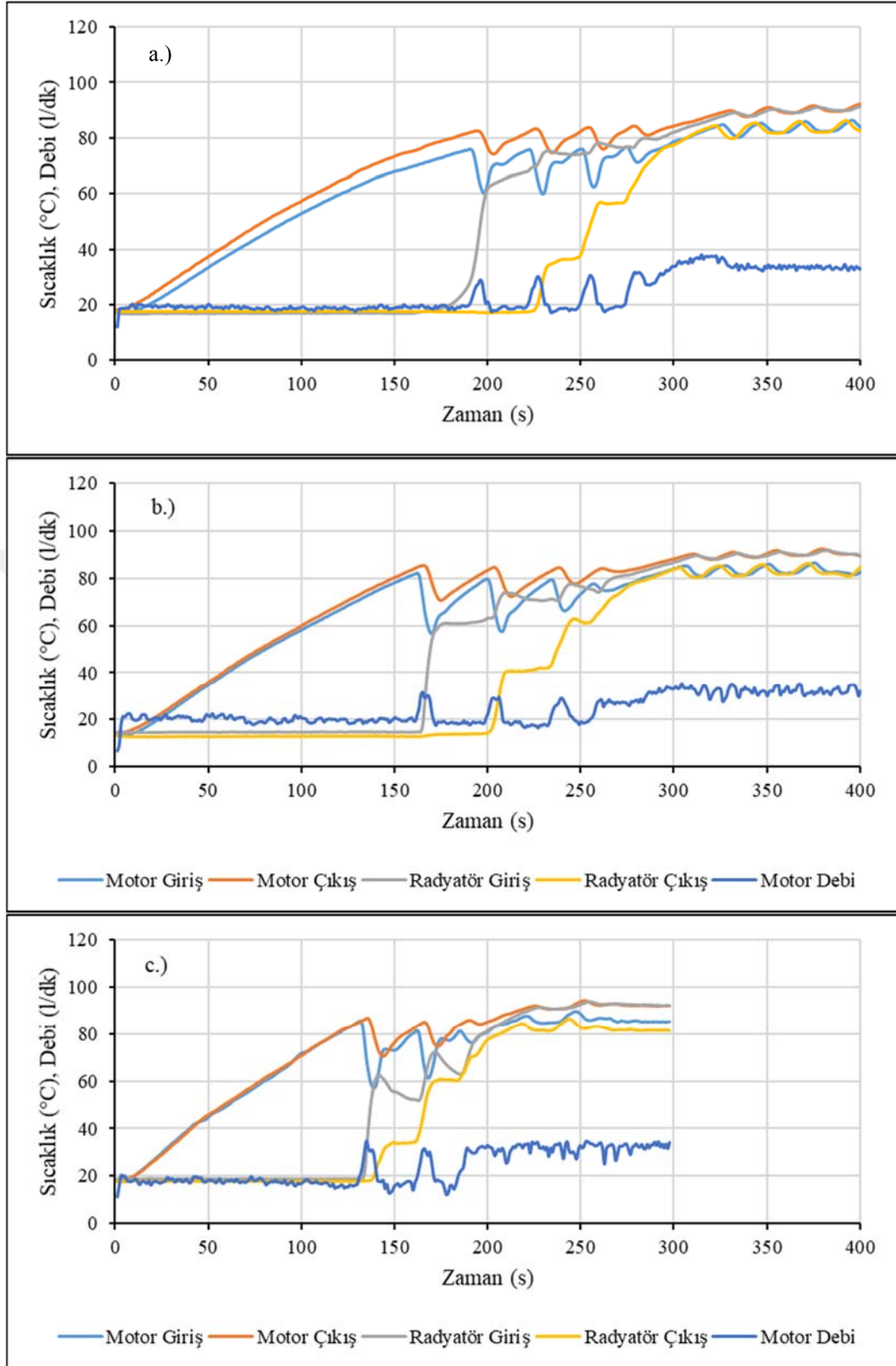


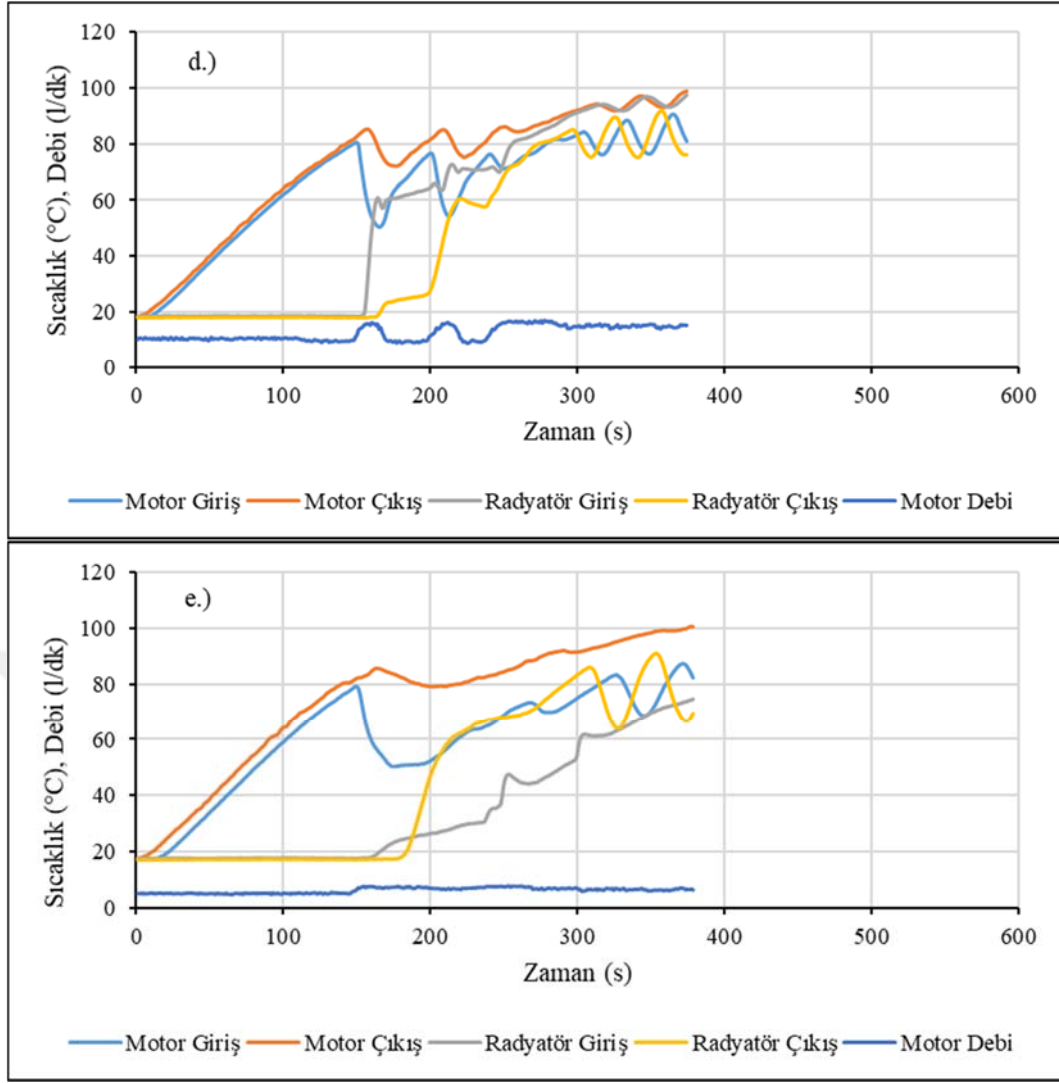


Şekil 32. 2500 d/dk devir sayısı ve %40 motor yükü şartlarında enerji dengesi değişimi.

3250 d/dk Devir Sayısı ve %25 Motor Yükü Şartları

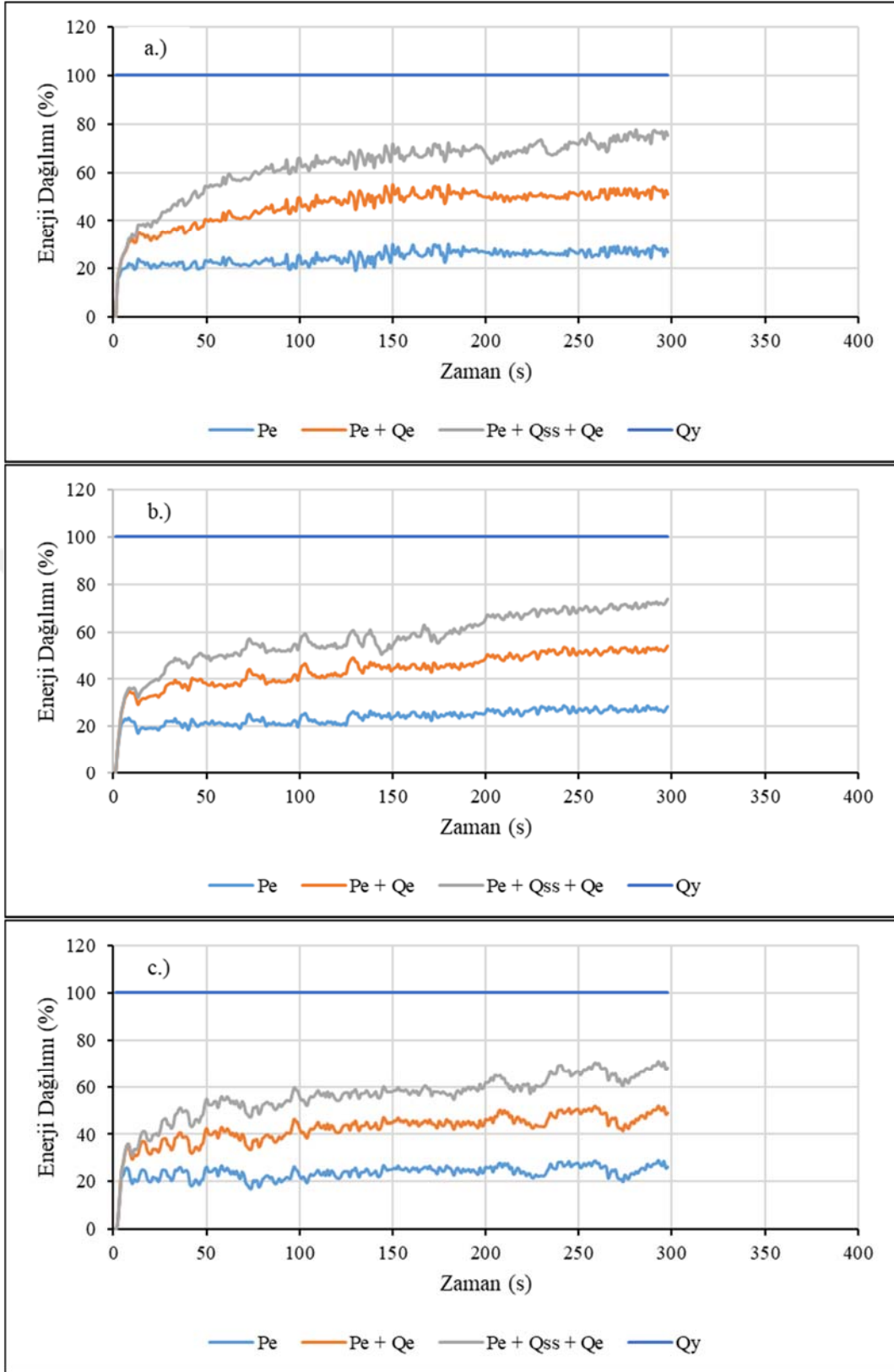
Şekil 33’de 3250 d/dk devir sayısı ve %25 motor yükü şartlarında beş farklı deney koşulunda yapılan deneylerden elde edilen farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisi değişimi sonuçları görülmektedir. Grafikte beş farklı konfigürasyon durumu sırasıyla; a.) yağlama yağı soğutucusu kullanıldığında, b.) yağlama yağı soğutucunu kullanılmadığında, c.) egzoz gazlarından ısı destek sağlanması durumunda, d.) soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda ve e.) soğutma suyu debisinin %25 seviyesine azaltılması durumunda olmak üzere verilmiştir.

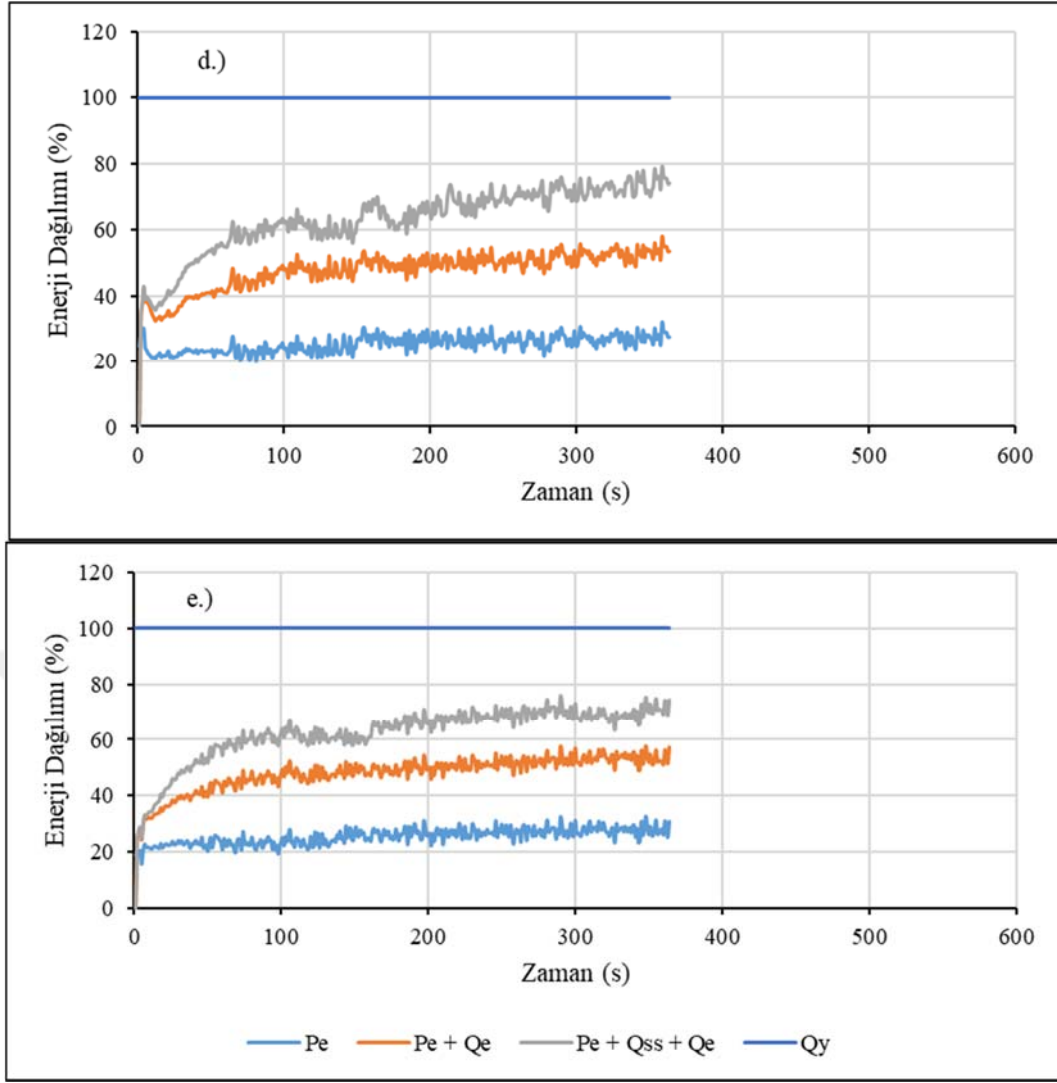




Şekil 33. 3250 d/dk devir sayısı ve %25 motor yükü şartlarında farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisinin değişimi.

Şekil 34'te 3250 d/dk devir sayısı ve %25 motor yükü şartlarında beş farklı deney koşulunda yapılan deneylerden elde edilen enerji dengesi değişimi sonuçları görülmektedir. Grafikte beş farklı konfigürasyon durumu sırasıyla; a.) yağlama yağı soğutucusu kullanıldığında, b.) yağlama yağı soğutucunu kullanılmadığında, c.) egzoz gazlarından ısıl destek sağlanması durumunda, d.) soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda ve e.) soğutma suyu debisinin %25 seviyesinde azaltılması durumunda olmak üzere verilmiştir.

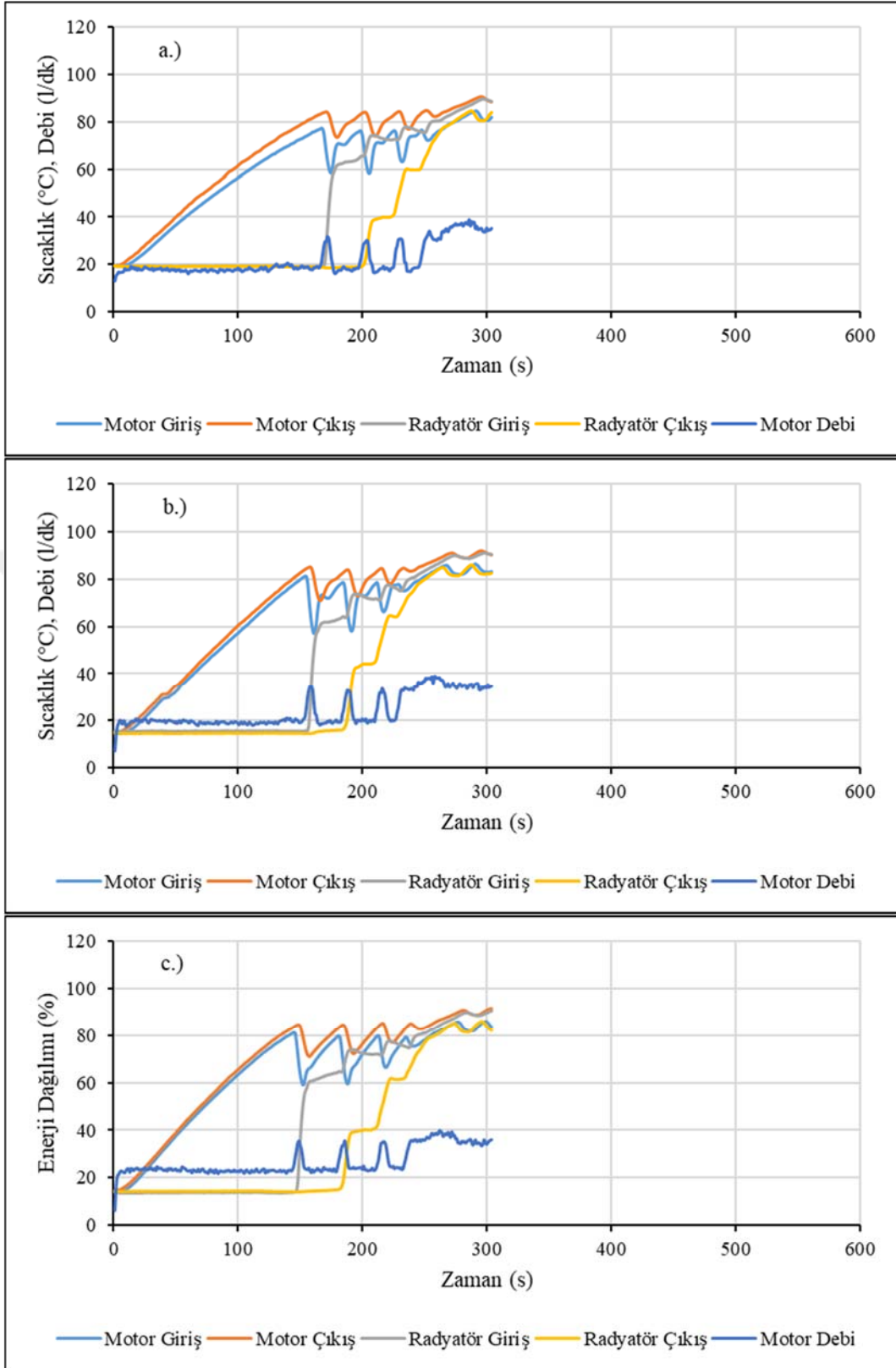


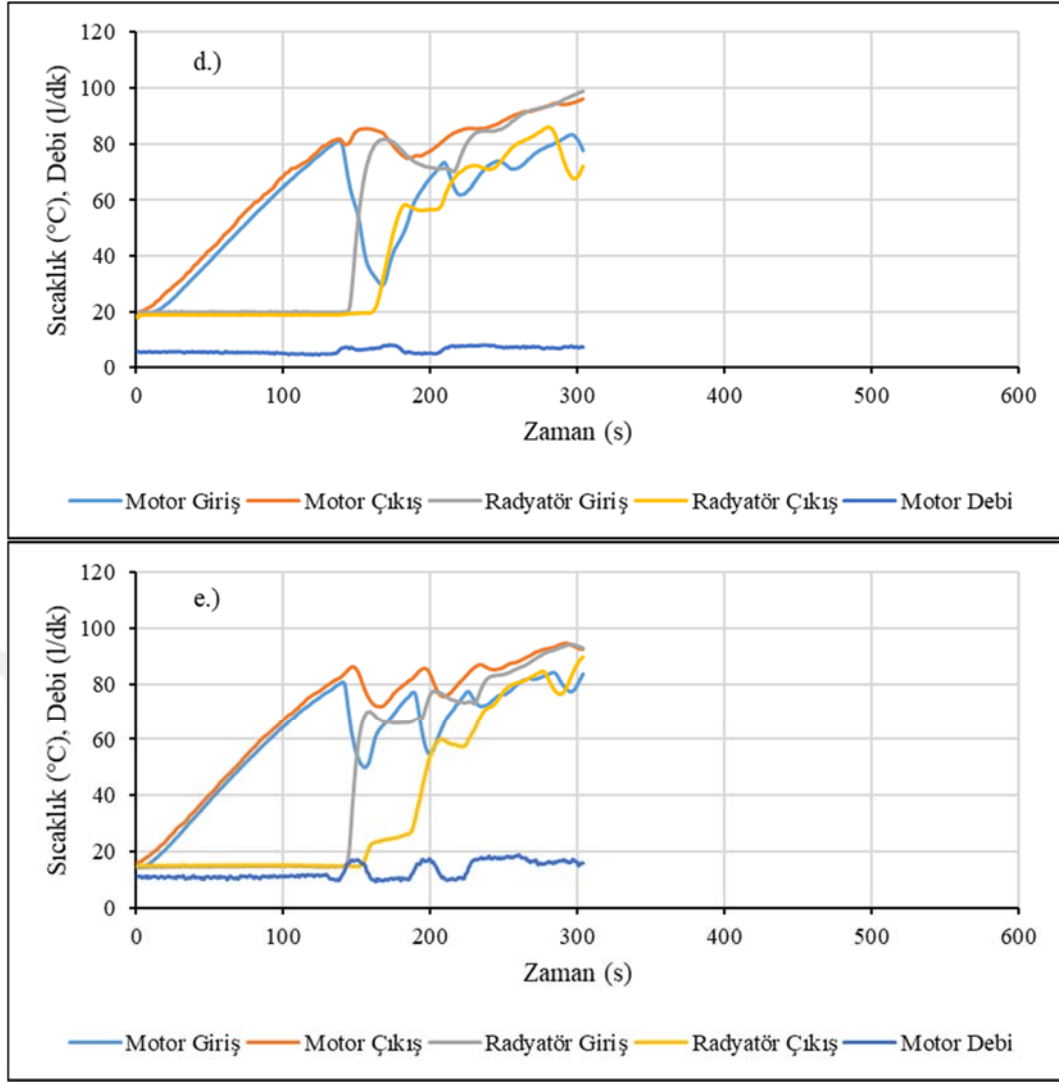


Şekil 34. 3250 d/dk devir sayısı ve %25 motor yükü şartlarında enerji dengesi değişimi.

3250 d/dk Devir Sayısı ve %40 Motor Yükü Şartları

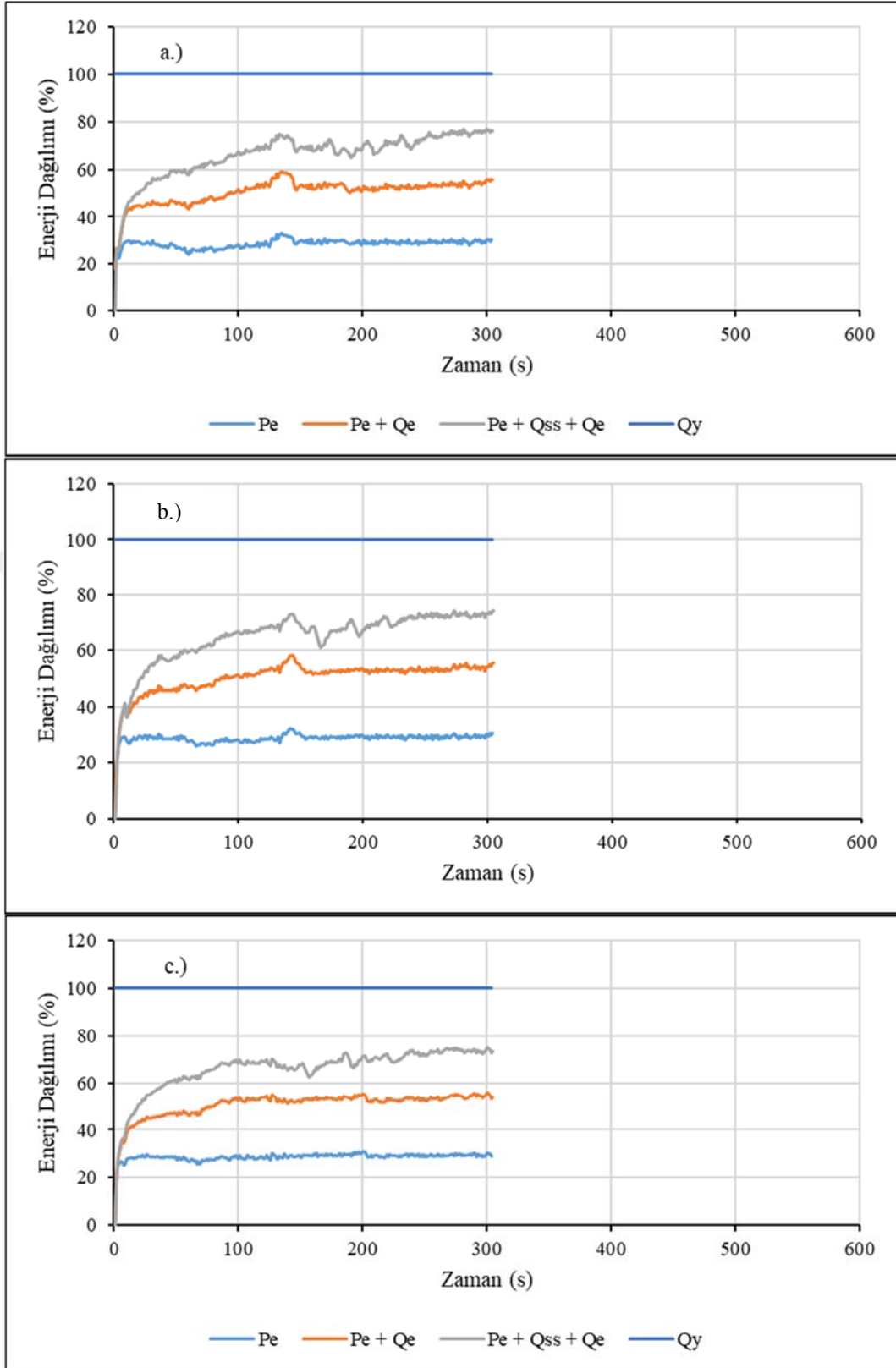
Şekil 35’de 3250 d/dk devir sayısı ve %40 motor yükü şartlarında beş farklı deney koşulunda yapılan deneylerden elde edilen farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisi değişimi sonuçları görülmektedir. Grafikte beş farklı konfigürasyon durumu sırasıyla; a.) yağlama yağı soğutucusu kullanıldığında, b.) yağlama yağı soğutucunu kullanılmadığında, c.) egzoz gazlarından ısıl destek sağlanması durumunda, d.) soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda ve e.) soğutma suyu debisinin %25 seviyesine azaltılması durumunda olmak üzere verilmiştir.

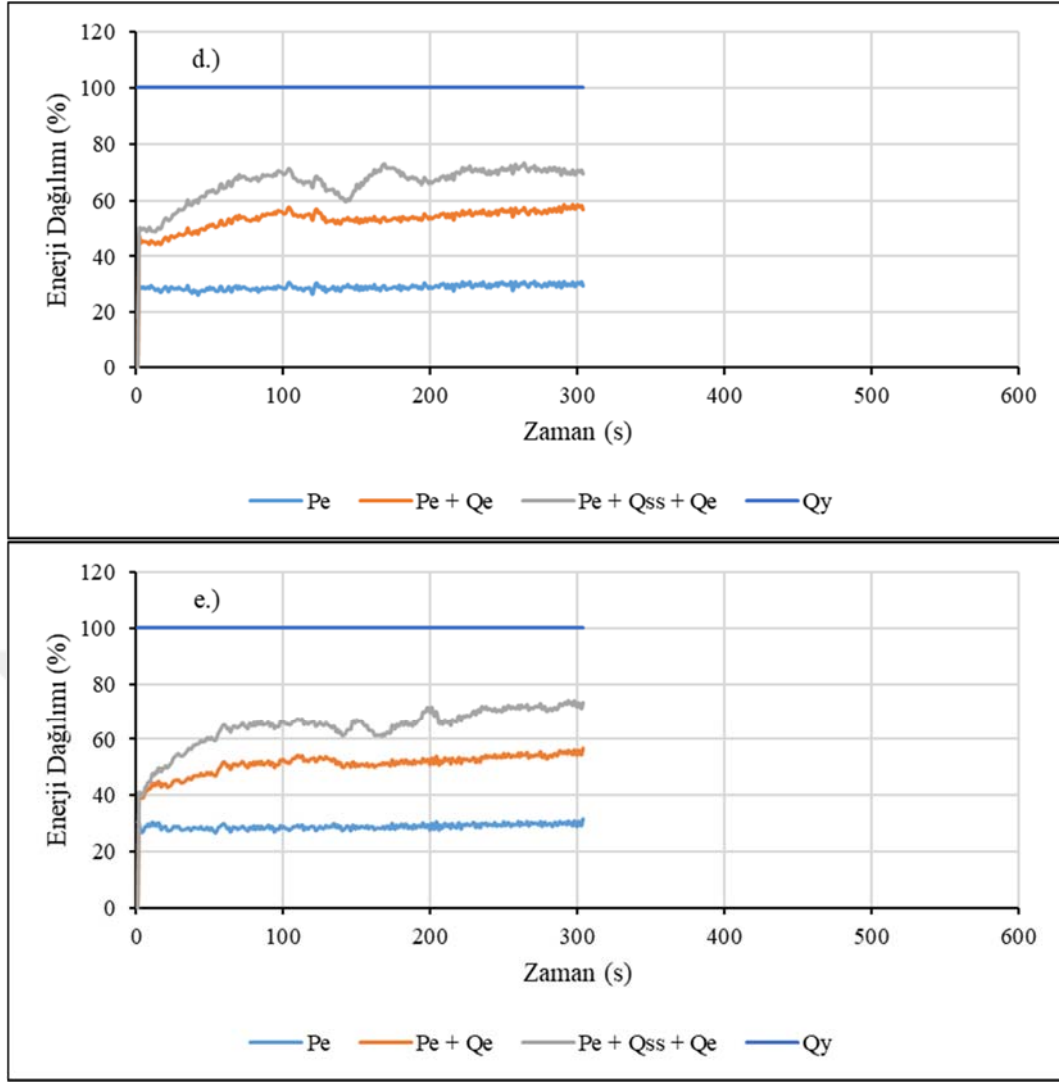




Şekil 35. 3250 d/dk devir sayısı ve %40 motor yükü şartlarında farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisinin değişimi.

Şekil 36’da 3250 d/dk devir sayısı ve %40 motor yükü şartlarında beş farklı deney koşulunda yapılan deneylerden elde edilen enerji dengesi değişimi sonuçları görülmektedir. Grafikte beş farklı konfigürasyon durumu sırasıyla; a.) yağlama yağı soğutucusu kullanıldığında, b.) yağlama yağı soğutucunu kullanılmadığında, c.) egzoz gazlarından ısı destek sağlanması durumunda, d.) soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda ve e.) soğutma suyu debisinin %25 seviyesine azaltılması durumunda olmak üzere verilmiştir.

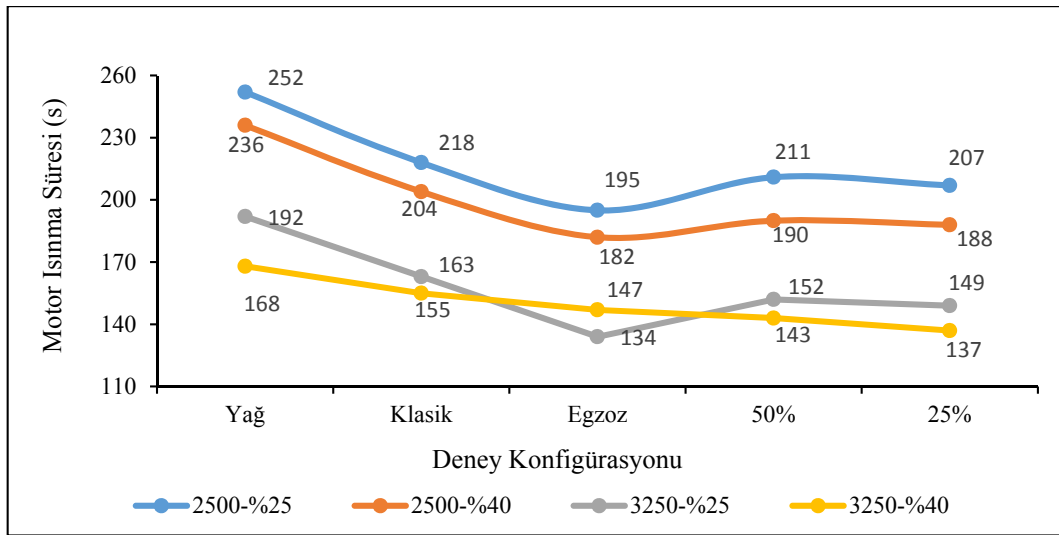




Şekil 36. 3250 d/dk devir sayısı ve %40 motor yükü şartlarında enerji dengesi değişimi.

Şekil 37, 38 ve 39’de tüm çalışma şartları için sırasıyla motor ısınma süresi, özgül yakıt tüketimi ve CO emisyonundaki değişimler görülmektedir. Her üç grafikte yer alan veriler soldan sağa olmak üzere aşağıdaki deneysel çalışmaların sonuçlarını sunmaktadır; Yağlama yağı soğutucusu kullanıldığında, Yağlama yağı soğutucusu kullanılmadığında, Egzoz gazlarından ısıl destek sağlanması durumunda, Soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda, Soğutma suyu debisinin %25 seviyesine azaltılması durumunda. Şekil 37 ile verilen ısınma süreleri, deneylerin başlangıcından soğutma suyunun sıcaklığının azalmaya başladığı nokta olan termostat açılma anına kadar geçen süreleri göstermektedir.

Şekil 37 incelendiğinde motor devir sayısı ve yükünün artması ile birlikte ısınma sürelerinin de düştüğü görülmektedir. Motor devir sayısı ve yükünün artması durumunda sisteme giren enerji olan yakıt enerjisi artmakta ve bu sayede hem motor bloğuna hem de dolayısıyla soğutma suyuna transfer edilen ısıl enerji artmaktadır. Bu durum soğutma suyunun sıcaklığının daha kısa sürede artması ve termostatın daha kısa sürede açılması anlamına gelmektedir.



Şekil 37. Tüm çalışma şartları için motor ısınma süreleri.

Diğer taraftan en uzun ısınma süresinin görüldüğü deneşel şartların birinci durum olan yağlama yağı soğutucusu kullanıldığında gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu durumun nedeni yağlama yağının soğutulmasında kullanılan ısı değıştiricisinin fazladan ısı kayıplara neden olmasıdır. Bu ısı değıştiricisinde, yağ filtresinden çıkan yağ ile motor bloğuna ilerleyen soğutma suyu arasında ısı transferi gerçekleşmektedir. Ancak motor ısınma sürecinde hem ilgili sıvıların ısı değıştiricisine ulaşması için kullanılan hortumlardan ısı kayıplar olmaktadır hem de ısı değıştiricisinin kendisi bir termal kütle gibi davranıp toplamda soğutma suyundan ısı enerji aktarımına neden olmaktadır. Aşağıda Tablo. 14 ile motor ısınma sürelerinde ki iyileşmelerden bazıları tablo halinde verilmiştir. Deneylerde uygulanan beş farklı strateji dikkate alınarak örneğın 2500d/dk ve %25 yük şartında yağ soğutucusu kullanıldığını durumdaki motor ısınma süresinin (252 s), %50 debi miktarında soğutma suyu kullanılması stratejisine göre elde edilen motor ısınma süresine (211s) göre elde edilen iyileşme miktarı %16,27 olmuştur. Benzer şekilde diğer ihtimallerde tabloda verilmiştir.

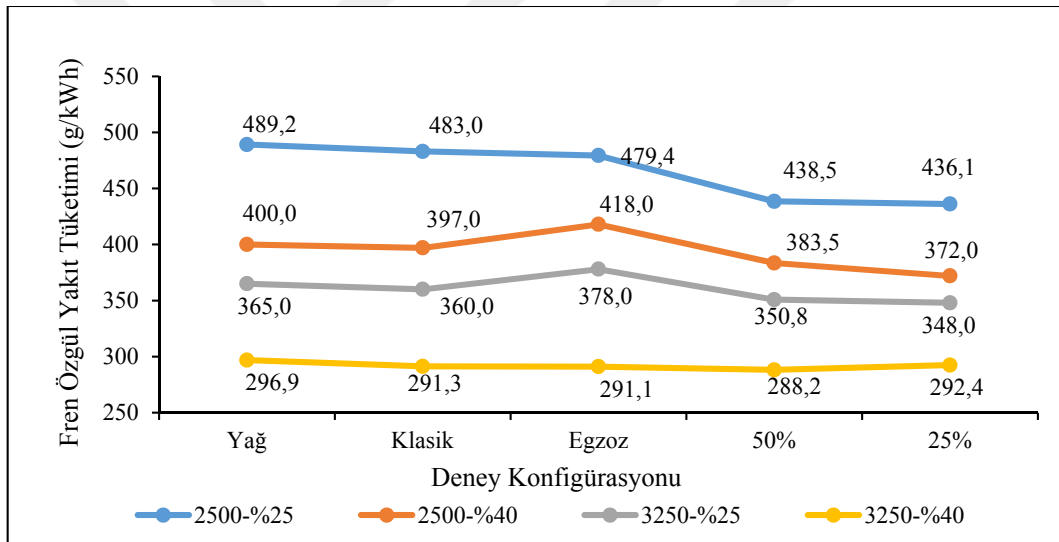
Tablo 13. Farklı Isıl Stratejiler Arasında Motor Isınma Süresindeki İyileşmeler

Deneş koşulu	Motor Isınma Süresi - % İyileşme		
	Yağ - %50	Referans hal - %50	Egzoz - %50
2500-%25	16,27	3,21	-8,21
2500-%40	19,49	6,86	-4,40
3250-%25	20,83	6,75	-13,43
3250-%40	14,88	7,74	2,72

Bilindiğı üzere motor hacmi ve performansının kritik bir değeri aştığı tasarımlarda motor yağlama yağının da soğutulması gerekmektedir. Ancak bu soğutma işlemi motorun daimi hal çalışma şartları için önem arz ederken motor ısınma sürecinde olumsuz etkiler doğurmaktadır. İlgili grafik yağlama yağı ısı değıştiricisine motor ısınma sürecinde motor soğutma suyunun gönderilmesinin engellenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. En uzun

ısınama süresinin gerçekleştiği bu deneysel çalışmanın aynı zamanda en büyük özgül yakıt tüketimi ve CO emisyonu üretimine neden olduğu ise sırasıyla Şekil 38 ve 39'dan görülmektedir. Dolayısıyla motor ısınma zamanı boyunca yağlama yağı ısı değiştiricinin soğutma sıvısıyla etkileşiminin olmadığı tasarımların kullanılmasının önem arz ettiği görülmektedir.

İkinci deneysel çalışma noktasında yağlama yağı soğutucusu kullanılmadığında yapılan deneysel çalışma sonuçları sunulmuştur. Bu durum klasik otomotiv sanayisinde kullanılan motor çalışma şartlarını temsil etmektedir. Küçük hacimli ve nispeten düşük motor performanslı motorların kullanıldığı geleneksel otomotiv uygulamalarında yağlama yağı soğutulmadığından bu deneysel çalışma şartında birinci deneysel çalışmalara göre daha kısa ısınma süreleri görülmüştür. Tüm devir sayısı ve motor yükü şartlarında referans hal uygulamanın ısınma süresinin yağlama yağının soğutulması uygulamasına göre kısa sürdüğü anlaşılmaktadır.

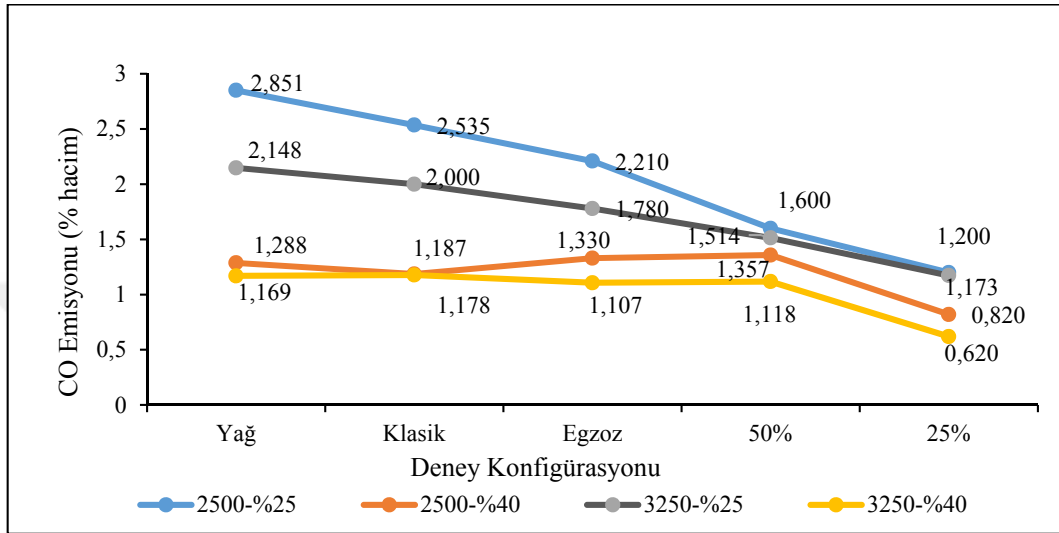


Şekil 38. Tüm çalışma şartları için fren özgül yakıt tüketimi.

Motor fren özgül yakıt tüketimlerinden sağlanan iyileşmelerden bazıları Tablo 15 ile verilmiştir. Deneylerde uygulanan beş farklı strateji dikkate alındığında, örneğin 2500d/dk ve %25 yük şartında yağ soğutucusu kullanıldığı durumdaki fren özgül yakıt tüketimi (489,2 g/kWh), %50 debi miktarında soğutma suyu kullanılması stratejisine göre elde edilen fren özgül yakıt tüketimi (438,5 g/kWh) olarak elde edilmiştir. Burada ki iyileşme oranı ise %10,36 olmuştur. Diğer çalışma koşulları ve stratejiler arasındaki iyileşme değerleri Tablo 15'de verilmiştir.

Tablo 14. Farklı Isıl Stratejiler Arasında Motor Isınma Süresindeki İyileşmeler

Özgül Yakıt Tüketimi - % İyileşme			
Deney koşulu	Yağ - %50	Referans hal - %50	Egzoz - %50
2500-%25	10,36	9,21	8,53
2500-%40	4,13	3,40	8,26
3250-%25	3,89	2,56	7,20
3250-%40	2,94	1,06	1,00

**Şekil 39.** Tüm çalışma şartları için CO emisyonu değişimi.

Şekil 38 ve 39 incelendiğinde referans hal şartlarında, yağlama yağının soğutulmasına göre hem özgül yakıt tüketimi hem de CO emisyonunun daha düşük seviyelerde kaldığı anlaşılmaktadır. Örneğin 2500 d/dk devir sayısı ve %25 yük şartlarında yağlama yağı soğutulduğunda ısınma süresi 252 s olurken bu süre referans hal şartlarda 218 s olmuş ve yaklaşık %13,5 iyileşme sağlanmıştır. Aynı şartlarda özgül yakıt tüketiminde de yaklaşık %1,23 iyileşme sağlanarak 489,2 g/kWh değerinden 483 g/kWh seviyesine düşmüştür. CO emisyonu ise %2,85 hacim seviyesinden %2,53 hacim seviyesine düşmüştür. Ancak bu düşüşün motor devir sayısı ve yükü arttıkça azaldığı anlaşılmaktadır. Çünkü 3250 d/dk devir sayısı ve %40 motor yükü şartlarında özgül yakıt tüketimi yağlama yağı soğutulduğunda 296,9 g/kWh seviyesinden %1,89 azalarak referans hal şartlarda 291,3 g/kWh seviyesine düşmüştür.

Üçüncü deneysel çalışma şartı olan egzoz gazlarından ısı destek sağlanması durumunda yapılan deneysel çalışmalarda, egzoz gazlarının atık ısı enerjisinden motor soğutma suyuna ısı geçişinin yapılmasının motor ısınma süresini azalttığı ve özellikle referans hal şartlara göre özgül yakıt tüketimi ve CO emisyonunda azalma sağladığı anlaşılmıştır. Bu şartlarda yapılan deneylerde ısınma süresinin neredeyse tüm motor çalışma şartlarında en düşük seviyede kaldığı Şekil 39’da görülmektedir.

Egzoz hattına yerleştirilen bir ısı değiştiricisi sayesinde atık egzoz gaz enerjisinin bir bölümünün motor soğutma suyuna aktarılması ısınma sürecinde silindir içi yanma karakteristiklerini iyileştirmiş ve bu sayede hem özgül yakıt tüketimi hem de CO emisyonu azalmıştır. Ancak ısınma süresindeki azalma ile özgül yakıt tüketimindeki azalmanın aynı karakteristikte olmadığı görülmektedir. Bu deneysel şartlarda bir taraftan soğutma suyu sıcaklığı daha kısa sürelerde artmakta ancak diğer taraftan egzoz hattında bulunan ısı değiştiricisinin egzoz akış karakteristikleri üzerindeki olumsuz etkileri yüzünden yanma şartlarına etkide bulunduğu için özgül yakıt tüketimindeki iyileşmeyi sınırlamaktadır. Özellikle egzoz hattı basıncının artması silindir içerisindeki art gaz miktarını artırmaktadır. Dolayısıyla bir taraftan blok sıcaklığının artmasına neden olurken diğer taraftan yanmayı olumsuz etkilediği için özgül yakıt tüketimindeki iyileşmeyi sınırlandırmaktadır. Üstelik 2500 d/dk ve %40 yük ile 3250 d/dk ve %25 yük şartlarında yapılan ilgili enerji yönetim stratejisi kullanımı durumunda, yağ soğutucusu kullanılmadığı durum olan referans hal şartlara göre özgül yakıt tüketiminde belirgin artışlar olduğu gözlenmiştir.

Bu bölüme kadar ilk üç deneysel çalışma şartı olan sırasıyla yağlama yağı soğutucusu kullanıldığında, yağlama yağı soğutucusu kullanılmadığında, egzoz gazlarından ısı destek sağlanması durumunda elde edilen deneysel veriler sunulmuştur. Özellikle egzoz gazlarından ısı destek sağlanması durumunun, motor ısınma süresini azaltması ancak özgül yakıt tüketimindeki etkilerinin sınırlı olması sistemin çok doğru tasarlanması gerektirdiğini ortaya koymaktadır. EGR sisteminde kullanılan bu tür ısı değiştiriciler motorun daimi çalışma şartlarında emme manifolduna yönlendirilen egzoz gazlarının soğutulmasını amaçlamaktadır. Oysa aynı sistemden motorun ısınma sürecinde de faydalanılabilir.

Özellikle son on yıl içerisinde motor soğutma sisteminde farklı kontrol stratejileri geliştirilmiştir. Bu sistemlerde özellikle üç parametre düzenlenerek hem ısınma sürecinde hem de daimi çalışma şartlarında motor performansı, verimliliği ve egzoz emisyonları ile ilgili avantajlar elde edilmektedir. Kontrol edilen bu parametreler soğutma suyunun debisi, termostatin açılma süresi ve fan devir sayısıdır. Soğutma suyunun debisinin kontrolü için mekanik pompa yerine elektrikli bir pompa kullanılarak devir sayısı düzenlenmektedir. Geleneksel termostat yerine üç yollu bir elektrikli valf kullanılmaktadır. Bu iki eleman üzerinde ilgili parametrelerin düzenlenmesi sayesinde özellikle motor ısınma sürecinde avantajlar yakalanabilmektedir.

Bu çalışmada ayrıca motor soğutma suyunun debisinin ısınma sürecine etkileri de deneysel olarak ele alınmıştır. Yukarıda sunulan deneysel koşullar göz önüne alınarak motor soğutma suyunun debisinin azaltılmasının etkileri ortaya konmuştur. Bunun için motorda

mekanik pompa devre dışı bırakılmış ve bir elektrikli pompa ile kontrollü bir şekilde soğutma suyu debisi düşürülmüş ve tüm deneysel çalışmalar yenilenmiştir. İkinci deneysel çalışma gurubu olan yağlama yağı soğutucusu kullanılmadığı şartlar referans alınarak soğutma suyu debisi %50 ve %25 seviyelerine düşürülmüştür. Şekil 37’de bu deneysel çalışmalarda soğutma suyunun debisinin azaltılması sayesinde ısınma süresinin önemli seviyede kısaltılabileceği ortaya konmuştur. Örneğin 2500 d/dk devir sayısı ve %25 yük şartlarında motor ısınma süresi referans hal şartlarda 218 s iken %50 seviyesinde soğutma suyu debisi şartlarında bu süre 211 s seviyesine inmiştir. Bu süre egzoz gazlarından ısıl destek sağlanması durumunda 195 s olmuştur. Şekil 38’den görüleceği üzere özgül yakıt tüketiminde de düşüş kaydedilmiştir. Oysa aynı şartlarda egzoz gazlarından ısıl destek alındığından ısınma süresi azalırken özgül yakıt tüketiminde eşit seviyede olumlu sonuçlar alınamamış ve 479,4 g/kWh değerine ulaşmıştır. Fakat motor soğutma suyunun debisinin azaltılması tüm deneysel şartlarda fren özgül yakıt tüketimini azaltmıştır.

Dolayısıyla soğutma suyunun debisinin kontrolünün motor ısınma periyodu üzerinde çok etkin bir yöntem olduğu anlaşılmaktadır. Kaldı ki motor soğutma suyunun debisinin azaltılması sayesinde CO emisyonu da benzer bir davranış göstererek düşmüştür.

Mekanik soğutma suyu pompaları tasarlanırken uç durumlar olan en yüksek motor yükü ve çevre havası sıcaklığı durumuna göre tasarlanmaktadır ve bu yüzden tüm motor çalışma şartlarında bu uç şartlara göre tasarlanmış yüksek debili soğutma suyu sistemde dolaştırılmaktadır. Bu çalışmanın ana konusu olan motor ısınma süreci için bu durum büyük bir olumsuzluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 38 incelendiğinde referans hal motor deneyleri ile karşılaştırıldığında, motor soğutma suyu debisinin %50 oranında azaltılması durumunda 2500 d/dk ve %25 yükü için özgül yakıt tüketimi değerleri 483 g/kWh seviyesinden 438,5 g/kWh seviyesine; 2500 d/dk ve %40 motor yükü için 397,0 g/kWh seviyesinden 383,5 g/kWh seviyesine; 3250 d/dk ve %25 motor yükü için 360 g/kWh seviyesinden 350,8 g/kWh seviyesine ve son olarak 3250 d/dk ve %40 yük için 291,3 g/kWh seviyesinden 288,2 g/kWh seviyesine düşmüştür.

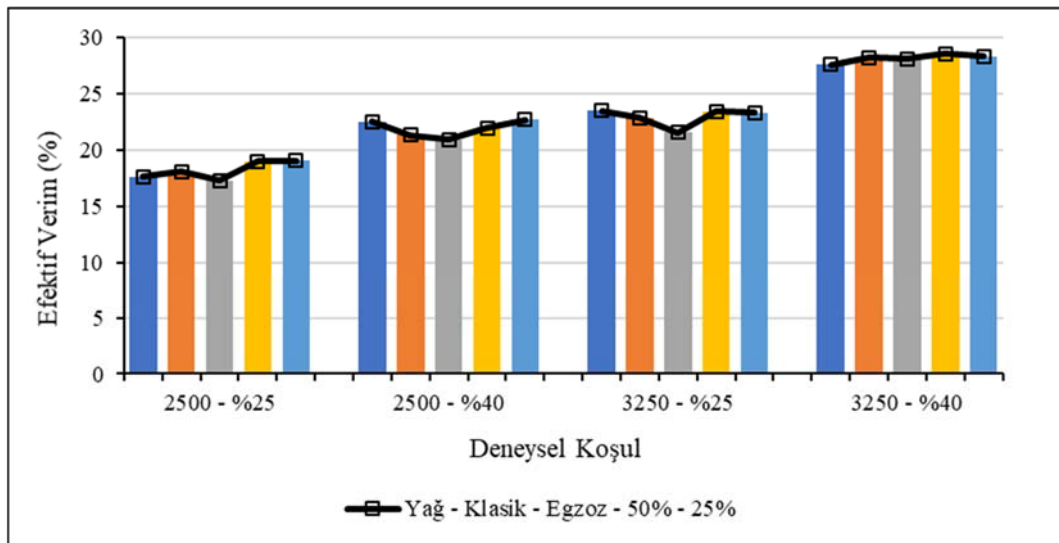
Bu durum, özgül yakıt tüketiminde soğutma suyu debisinin %50 seviyesinde yapılan tüm deneysel şartlar için ortalama olarak birinci gurup deneylere (yağ soğutucusu kullanıldığı) göre %2,94-10,36, ikinci gurup olan referans hal deneylere (yağ soğutucusu kullanılmadığı) göre %1,06-9,21 ve üçüncü gurup deneylere (egzoz gazlarında ısıl destek) göre ise %1-8,53 arasında iyileşme sağlandığını ortaya koymuştur. Dolayısıyla elde edilen bu yüzdesel iyileşme verileri neticesinde klasik otomotiv sanayisinde motor bloğundan dolaşan soğutma suyunun debisinin kontrolünün önemi belirgin bir şekilde anlaşılmaktadır. Öyle ki motor ısınma

sürecinin bu seviyelerde iyileştirilmesi ile elde edilen katkı özellikle şehir içi kullanımlarda gerçekleşen sürekli soğuma ve ısınma şartları için çok daha önemli hale gelmektedir.

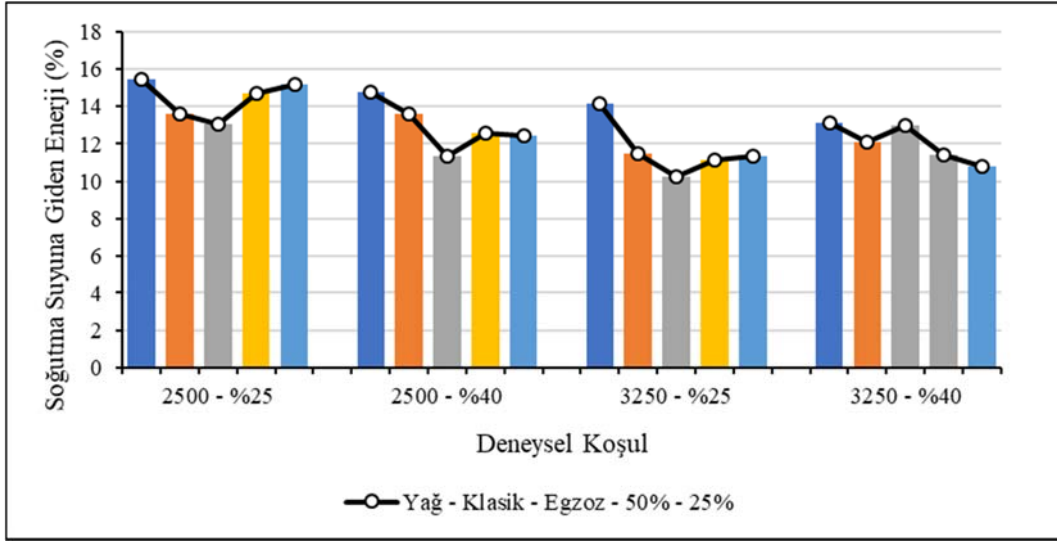
Söz konusu bu iyileşmelere ek olarak soğutma suyunun debisinin referans hal şartlara göre %25 seviyelerine indirilmesi durumunda da benzer iyileşmeler yakalanabildiği görülmektedir. Ancak motor ısınma sürecinde bu seviyede soğutma suyunun azaltılmasının özellikle yüksek devir sayısı ve yük şartlarında soğutma suyunun kaynama riskini artırdığı anlaşılmıştır.

Şekil 37, 38 ve 39 incelendiğinde ısınma süreleri, özgül yakıt tüketimi verileri ve CO emisyonu seviyeleri beraber değerlendirildiğinde ise elde edilen avantajların düşük devir sayısı ve motor yüklerinde daha baskın olduğu motor yükü arttıkça bu olumlu durumun etkisinin azaldığı anlaşılmaktadır. Bu durumun nedeni ise artan giriş enerjisinin motor soğutma suyunu ve blok sıcaklığını baskın bir şekilde artırması ve silindir içi yanma karakteristiklerinin daha az oranda silindir blok sıcaklığından etkilenmesi olarak gösterilebilir.

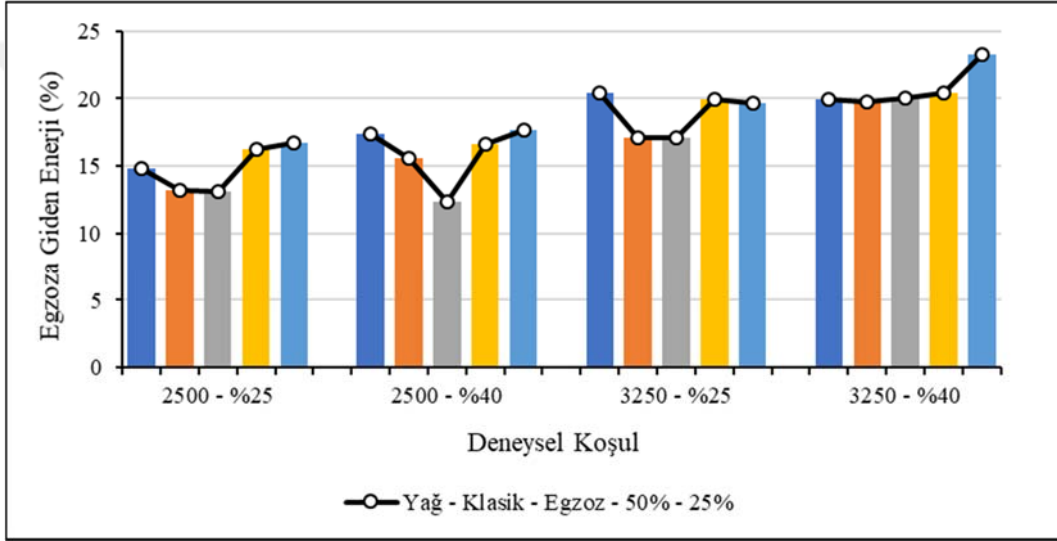
Şekil 40-43 arasında tüm deney şartları için sırasıyla efektif verim ile soğutma suyu, egzoz gazları ve hesaplanamayan kayıp enerjilerin yakıt enerjisindeki oranları yüzdesel olarak verilmiştir. Her bir grafikte sırasıyla 2500 d/dk-%25 yük, 2500 d/dk-%40 yük, 3250 d/dk-%25 yük ve 3250 d/dk-%40 yük şartlarında çeşitli ısıl stratejilerde motor ısınma zamanı boyunca elde edilen ortalama efektif verim ve ortalama enerji dağılım oranları gösterilmiştir. Sütun grafikler sırasıyla yağlama yağı soğutucusu kullanıldığı (yağ), yağlama yağı soğutucusu kullanılmadığı (referans hal), egzoz gazlarından ısıl destek sağlanması (egzoz) ve soğutma suyu debisinin %50 ile %25 seviyelerine azaltılması durumları şeklinde her bir enerji oranının yüzdesel değişimi görülmektedir.



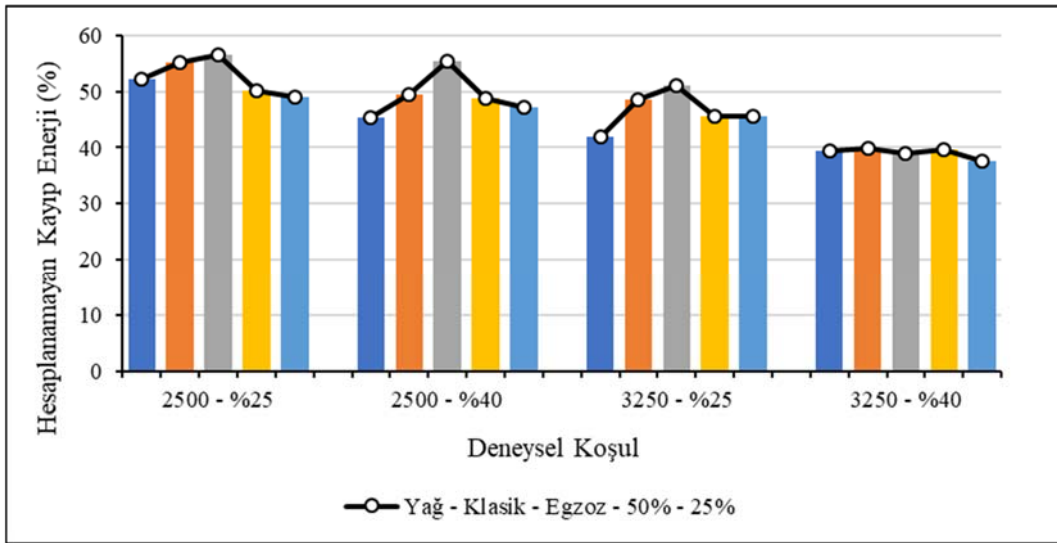
Şekil 40. Tüm deney koşulları ve ısıl enerji yönetim stratejileri için efektif verim



Şekil 41. Tüm deney koşulları ve ısıl enerji yönetim stratejileri için soğutma suyuna giden enerji



Şekil 42. Tüm deney koşulları ve ısıl enerji yönetim stratejileri için egzoz giden enerji.



Şekil 43. Tüm deney koşulları ve ısıl enerji yönetim stratejileri için diğer enerji kayıpları.

Tüm bu grafikler beraber incelendiğinde efektif verimin (yakıt enerjisinin faydalı işe dönüşme oranı) ve egzoz gazları yoluyla kaybedilen enerjinin motor devir sayısı ve yükü

arttıkça arttığı diğer taraftan soğutma suyu yoluyla kaybedilen enerjinin ve hesaplanamayan kayıp enerjilerin toplamının azaldığı anlaşılmaktadır. Bu durumun nedeni artan motor devir sayısı ve yükü şartlarında harcanan toplam yakıt enerjisinden daha yüksek yanma verimi sayesinde daha fazla iş üretilmesidir. Ayrıca egzoz gazları yoluyla kaybedilen enerjinin artmasının nedeni ise motor devir sayısı ve yükünün artması ile birlikte artan egzoz gaz sıcaklıklarıdır. Egzoz gaz sıcaklıkları arttıkça yakıt enerjinin daha büyük bölümü ısı enerjisi olarak kaybedilmektedir.

Ayrıca Şekil 40 incelendiğinde farklı ısı stratejilerin efektif verime etkisinin oldukça düşük düzeyde kaldığı söylenebilir. Tüm ısı strateji yönetim stratejilerinde harcanan yakıt enerjisinin faydalı işe dönüşme oranında yaklaşık $\pm\%1$ 'lik değişim görülmüştür. Oysa yakıt enerjisinin büyük oranda kaybedildiği diğer enerji kayıpları farklı ısı stratejiler için büyük oranda değişim arz etmiştir. Genel eğilim olarak; motor ısınma sürecinde yağlama yağı soğutucusu kullanılmadığında, kullanılması durumuna göre soğutma suyu ve egzoz gazları yoluyla kaybedilen enerjiler azalırken hesaplanamayan kayıp enerjilerde artış gözlenmiştir. Yağlama yağı soğutucusu kullanıldığında soğutma suyu sıcaklığı daha uzun sürede daimî hal bölgesine ulaştığından dolayı hem soğutma suyu hem de blok sıcaklıkları daha düşük seviyelerde seyretmektedir. Blok sıcaklığının düşmesi egzoz gaz sıcaklıklarının da nispeten düşük seviyede kalması dolayısıyla her iki kayıp enerjinin artması anlamına gelmektedir.

Diğer taraftan yağlama yağı soğutucusu kullanılmadığında yağa olan ısı kayıpları soğutma suyu ve egzoz kayıp enerjilerine dâhil edilmediğinden dolayı hesaplanamayan kayıp enerji oranı artmaktadır. Yani bir taraftan soğutma suyuna olan kayıp enerji azalırken diğer taraftan bu değer hesaplanamayan kayıp enerjilerin toplamına kaydığı anlaşılmaktadır.

Üçüncü ısı strateji olan egzoz gazlarından ısı destek sağlanması durumunda ise yine soğutma suyu ve egzoz gazları yoluyla olan kayıplar azalmaya devam etmektedir. Önceki iki stratejiye göre ilgili ısı destek motorun ısınma süresine olumlu yönde etki ederken diğer taraftan egzoz hattı basıncında artışa sebep olmuştur. Basınç artışından dolayı silindir içi karakteristikler olumsuz etkilenerek toplamda hesaplanamayan kayıp enerji içindeki eksik yanma dolayısıyla olan kayıpları artırmıştır.

Dördüncü ısı strateji olan soğutma suyunun %50 seviyesine azaltılması durumunda yapılan deneylerde ise önceki üç adet strateji ile karşılaştırıldığında Şekil 41 ve 42 incelendiğinde soğutma suyu ve egzoz gazları yoluyla olan kayıpların artmaya başladığı görülmektedir. Bu durum artan soğutma suyu sıcaklığının blok sıcaklığı üzerinde ve silindir içi yanma karakteristikleri üzerinde olumlu bir katkısının olması şeklinde açıklanabilir. Dolayısıyla soğutma suyu debisi kontrolü stratejisinin önemli iyileştirme potansiyeline sahip

olduğu ortaya çıkmaktadır. Motorun ısınma süresinde düşük debiler kullanımının özgül yakıt tüketimi ve CO emisyonu üzerindeki olumlu etkileri de göz önüne alındığında sistemin kontrollü debi uygulaması sayesinde daha doğru pozisyonlarda çalıştırılabileceği anlaşılmaktadır. Soğutma suyu debisinin daha fazla azaltılması durumunda (%25 seviyesinde debi) yine soğutma suyu ve egzoz gazları yoluyla olan kayıp enerjiler artmakta ve diğer enerji kayıpları azalma eğilimine devam etmektedir. Ancak soğutma suyu sıcaklıkları, motor ısınma fazının sonuna doğru kritik bölgeye daha hızlı yaklaştığından kaynama riski oluşabileceği için kontrol uygulamasının bu bilgiye göre tasarlanması gerektiği açıktır.

Değişken Koşullu Deneysel Çalışmalar

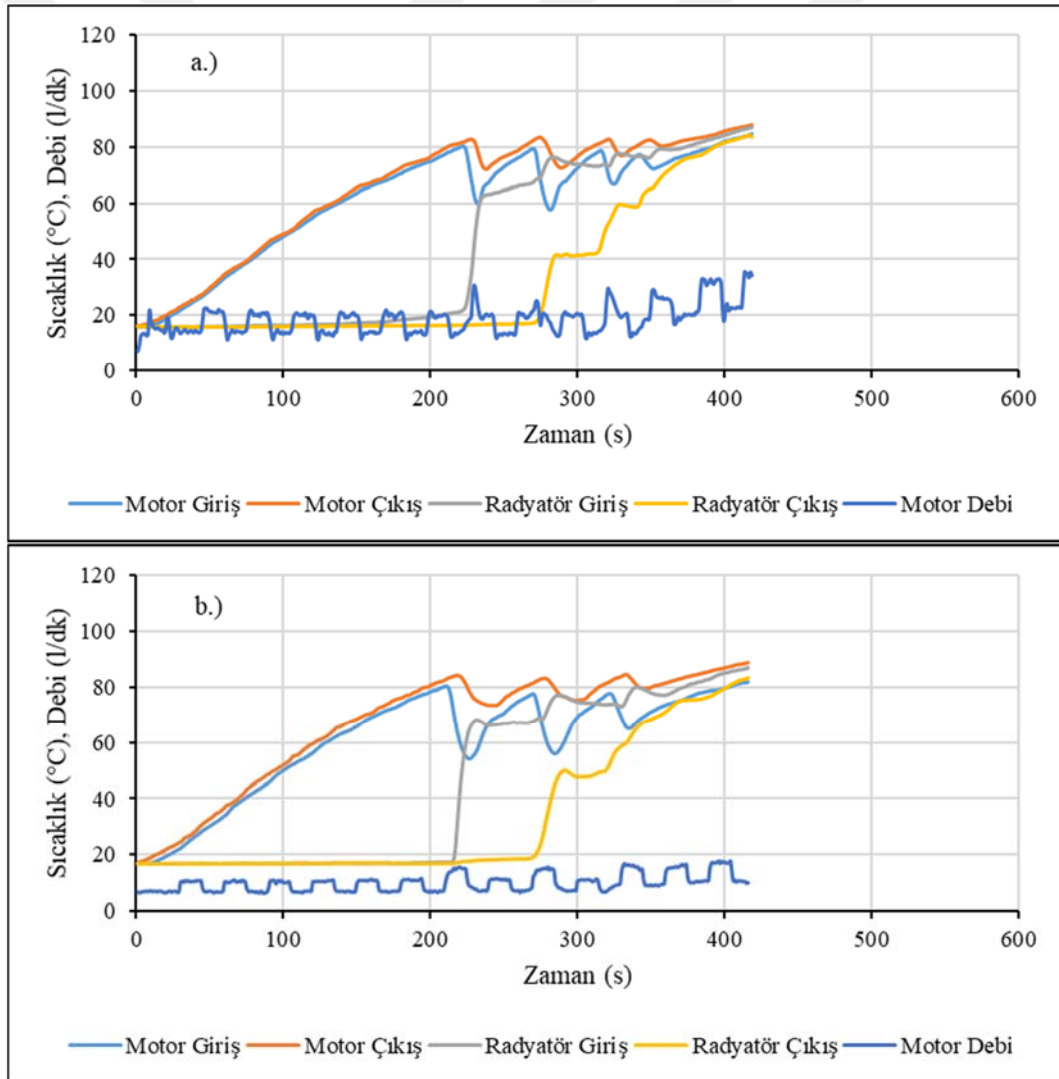
Literatür incelendiğinde motorlarda enerji dengesi üzerinde yapılan çalışmalar çoğunlukla sabit motor devir ve yük şartlarında gerçekleştirilmiştir (Romero *et al.* 2014). Bu durum motor testlerini ve yapılan ölçümleri kolaylaştırmaktadır. Oysa içten yanmalı motorlar çoğunlukla öngörülemeyen değişken devir ve yük şartlarında çalışmaktadırlar. Dolayısıyla bu şartlarda yapılan deneylerden alınan bilgiler önem arz etmektedir çünkü farklı şartlarda yapılan bu tür değişken koşullu deneysel çalışmalar henüz çok kısıtlı düzeydedir. Romero tarafından yapılan çalışmada dizel motorlu bir taşıt üzerinden ısınma sürecinde enerji dengesi gözlenmiş ve EGR soğutucusu ile soğutma yoluyla kaybedilen enerjinin yaklaşık %20 kadarının kazanılabileceği belirtilmiştir.

Bu çalışmada yapılan değişken koşullu deneylerde ise %25 ve %40 olmak üzere iki farklı seviyede motor yükü sabit tutulmuş ve motor 15 saniye boyunca farklı devir sayılarında sürekli olarak çalışırken ölçümler yapılmış ardından alınan sonuçların analizleri yapılmıştır. Devir sayısı değişimlerinin sağlanabilmesi için motorun gaz kelebeği açıklığı üretilen bir elektronik kontrol sistemi tarafından kontrol edilmiştir. Gaz kelebeği açıklığı kontrol edilerek motor ilk çalıştırmanın ardından sürekli olarak 15 s boyunca 2000 d/dk ve 15 s boyunca 3000 d/dk devir sayısında çalıştırılmıştır. Aşağıda bu çalışmalar ait sıcaklık ve enerji dengesi değişimleri grafikler halinde sunulmuştur.

Değişken Devir Sayısı ve %25 Motor Yükü Şartları

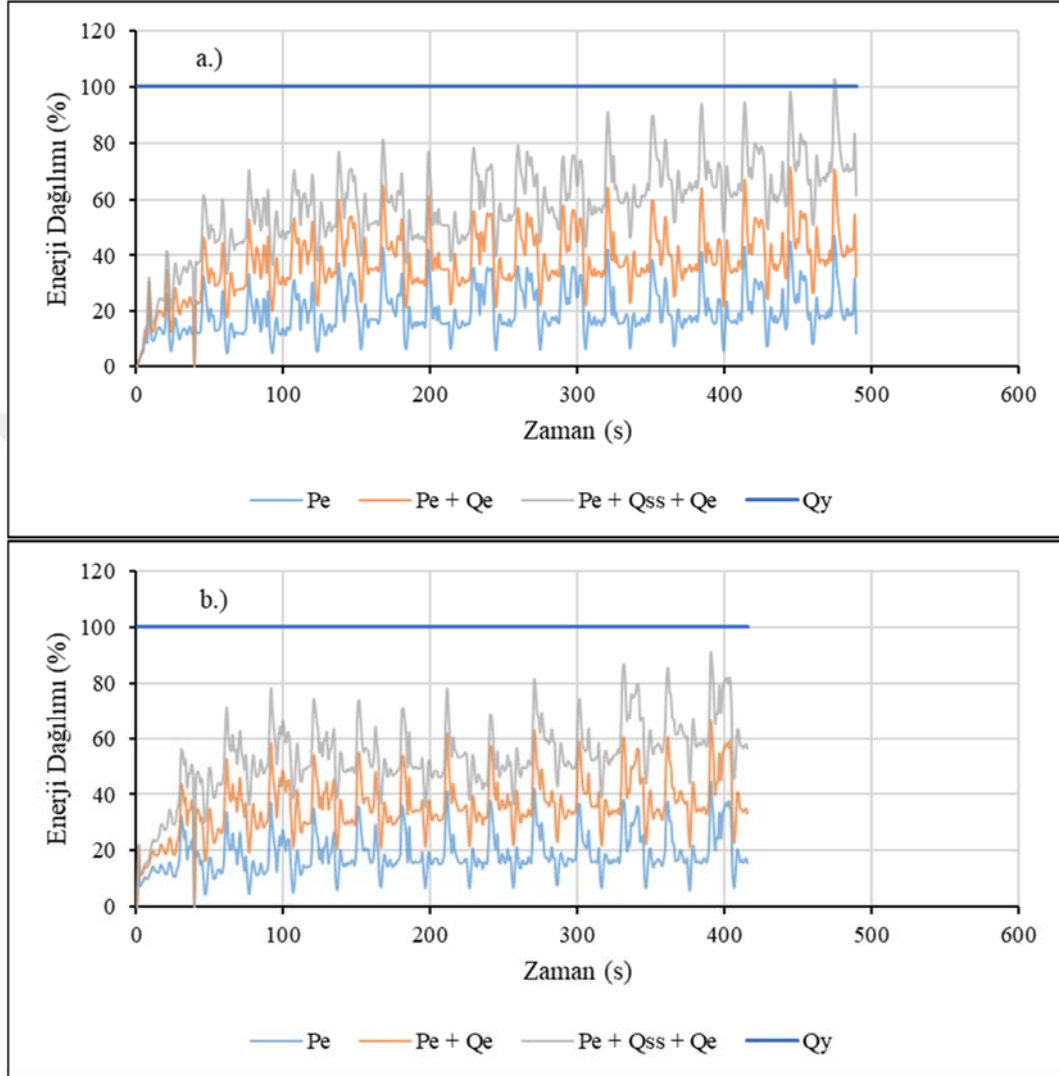
Şekil 44’de farklı devir (2000-3000 d/dk) ve sabit (%25) yük deney koşulunda yapılan deneylerden elde edilen farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisi değişimi sonuçları görülmektedir. Grafikte iki farklı konfigürasyon durumu sırasıyla; a.) yağlama yağı soğutucunu kullanılmadığında ve b.) soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda olmak üzere verilmiştir.

İlk grup deney olan %25 yüklü deneysel çalışmada öncelikle referans hal şartlarda çalışmalar yapılmış ardından soğutma suyu debisi referans hale göre %50 oranında azaltılarak testler yenilenmiştir. Bu testler esnasında Şekil 44 incelendiğinde referans hal şartlarda motor ısınma süresi 226 s olarak gözlenirken soğutma suyu debisi %50 seviyesine azaltıldığında bu değer 212 s seviyesine inmiştir. Böylece motor ısınma süresinde yaklaşık %5,75 kadar bir iyileşme gerçekleşmiştir. Aynı şartlar için motor ısınma zamanı boyunca ortalama özgül yakıt tüketimi 579,8 g/kWh seviyesinden 535 g/kWh seviyesine inmiştir. Bu durumda referans hal şartlara göre soğutma suyu debisinin kontrol edilmesi ile özgül yakıt tüketiminin ısınma sürecinde ortalama %7,72 azaltılabileceği ortaya çıkmaktadır. Aynı şartlar için ortalama CO emisyonu da 0,726 %Hacim seviyesinden 0,698 %Hacim seviyesine düşmüş ve yaklaşık %3,74 iyileşme sağlanmıştır. Efektif verimde %2,03 artış, egzoz enerjisinde %4,72 azalma, diğer kayıplarda %0,61 azalma ve soğutma suyunda %4,87 artış sağlanmıştır.



Şekil 44. Farklı devir (2000-3000 d/dk) ve sabit (%25) yük deney koşulunda farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisinin değişimi

Şekil 45’da farklı devir (2000-3000 d/dk) ve sabit (%25) yük deney koşulunda yapılan deneylerden elde edilen enerji dengesi değişimi sonuçları görülmektedir. Grafikte iki farklı konfigürasyon durumu sırasıyla; a.) yağlama yağı soğutucunu kullanılmadığında ve b.) soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda olmak üzere verilmiştir.



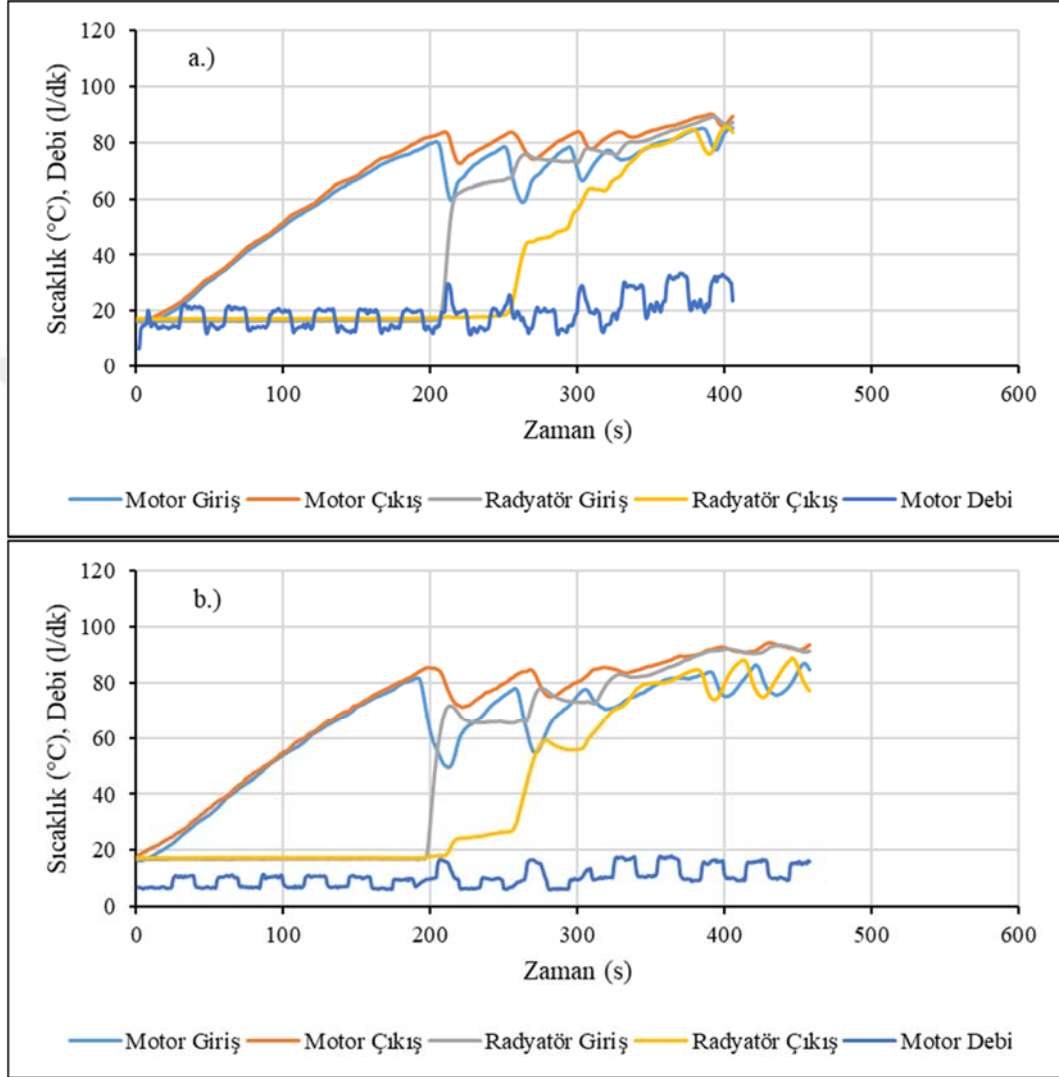
Şekil 45. Farklı devir (2000-3000 d/dk) ve sabit (%25) yük deney koşulunda enerji dengesi değişimi

Değişken Devir Sayısı ve %40 Motor Yüğü Şartları

Şekil 46’da farklı devir (2000-3000 d/dk) ve sabit (%40) yük deney koşulunda yapılan deneylerden elde edilen farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisi değişimi sonuçları görülmektedir. Grafikte iki farklı konfigürasyon durumu sırasıyla; a.) yağlama yağı soğutucunu kullanılmadığında ve b.) soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda olmak üzere verilmiştir.

İkinci grup çalışmalar olan %40 motor yükünde yapılan değişken devir sayılı deneylere ait sıcaklık ve enerji dengesi değişimleri Şekil 47 ve Şekil 47 ile sunulmuştur. Bu çalışmaların

sonucunda motorun ısınma süresinin 206 s seviyesinden 195 s seviyesine indiği Şekil 46 incelendiğinde görülebilmektedir. Böylece motor ısınma süresinde yaklaşık %5,34 kadar bir iyileşme gerçekleşmiştir. Dikkatli incelendiğinde bu değerler %25 yük şartlarına göre daha kısa sürede termostatın açıldığını göstermektedir. Bu duruma motor yükünün artması ile birlikte artan yakıt enerjisinin yani termodinamik sisteme giren enerjinin artması neden olmuştur.

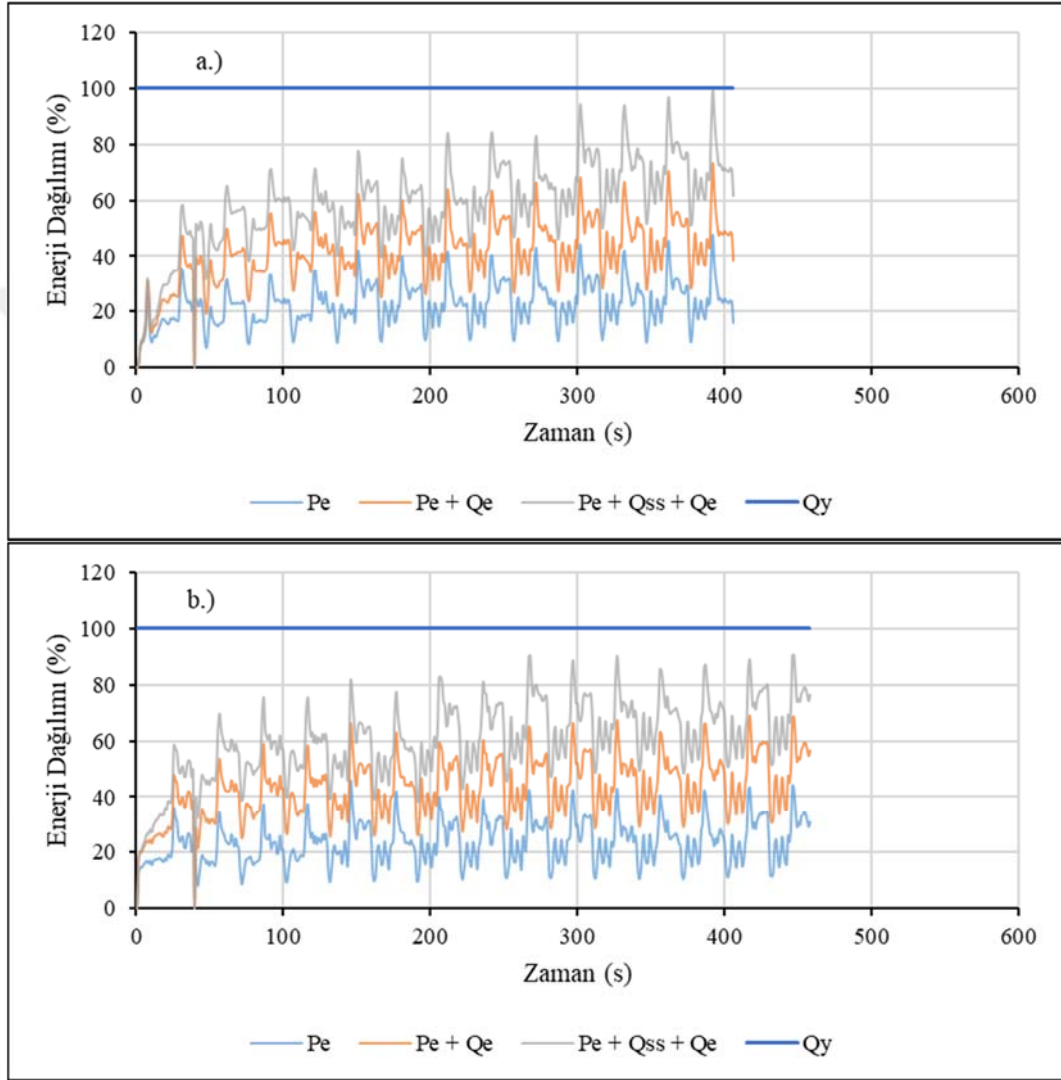


Şekil 46. Farklı devir (2000-3000 d/dk) ve sabit (%40) yük deney koşulunda farklı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri ve motor soğutma suyu debisinin değişimi

Yine aynı şartlarda referans hal deneylerinde özgül yakıt tüketimi 423 g/kWh seviyesinde iken %50 seviyesinde soğutma suyu debisi ile yapılan çalışmalarda bu değer 401 g/kWh seviyesine inmiştir. Bu durum soğutma suyu debisinin kontrolü sayesinde motor ısınma süresinde özgül yakıt tüketiminin %5,2 seviyesinde azaltılabileceğini göstermektedir. Bu değer %25 yük şartlarına göre daha düşük seviyededir. Yani artan motor yükü ile iyileşmenin azaldığı görülmektedir. Bu durum sabit şartlarda yapılan deneyler ile uyum göstermektedir. Aynı şartlarda yapılan deneylerde CO emisyonu seviyesi %7,82'lik bir iyileşme sağlayarak 0,831 %Hacim seviyesinden 0,766 %Hacim seviyesine düşmüştür. Ayrıca efektif verimde %3,3 artış,

egzoz enerjisinin %2,2 artışı, diğer kayıplarda % 2,6 azalma, soğutma suyunda % 1,36 artış sağlanmıştır.

Şekil 47 ile farklı devir (2000-3000 d/dk) ve sabit (%40) yük deney koşulunda yapılan deneylerden elde edilen enerji dengesi değişimi sonuçları görülmektedir. Grafikte iki farklı konfigürasyon durumu sırasıyla; a.) yağlama yağı soğutucunu kullanılmadığında ve b.) soğutma suyu debisinin %50 seviyesine azaltılması durumunda olmak üzere verilmiştir.



Şekil 47. Farklı devir (2000-3000 d/dk) ve sabit (%40) yük deney koşulunda enerji dengesi değişimi

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada buji ateşlemeli benzin yakıtlı bir motorun sabit (stationary) ve değişken (transient) şartlarda ilk hareketinden daimî duruma geçiş süreci olan ısınma fazında gerçekleşen olayların değerlendirilmesi ve bir enerji dengesi oluşturulması amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda elde edilen önemli sonuçlar ve çeşitli öneriler aşağıda liste halinde verilmiştir;

- 1- Bir enerji dönüşüm sistemi olan içten yanmalı motorların ısınma fazında harcanan yakıt enerjisini faydalı işe dönüştürme oranları yani termal verimleri düşük seviyede olup bu fazda harcanan enerjinin büyük bölümünün mekanik kayıplar yoluyla gerçekleştiği görülmüştür. Dolayısıyla ısınma fazının süresinin azaltılması için gerçekleştirilecek olan çalışmaların önemi ortaya konmuştur.
- 2- Motor ısınma fazında yağlama yağı soğutucusuna soğutma suyunun gönderilmesi durumunda ısınma süresi uzamış beraberinde özgül yakıt tüketimi tüm motor çalışma koşulları için artmıştır. Üstelik bu durum CO eksik yanma ürününün de artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla yağlama yağı soğutucusuna ısınma fazı boyunca soğutma suyunun iletimini engelleyecek termostatik veya elektronik kontrollü bir valf kullanımının gerekliliği görülmüştür.
- 3- Harcanan yakıt enerjisinin ısınma fazında yaklaşık %25'i egzoz gazlarının ısı enerjisi olarak kaybedilmektedir. Bu kayıp enerjiden ısınma fazında faydalanmak adına egzoz hattına yerleştirilen bir ısı değiştiricisi ile soğutma suyuna egzoz gazlarından ısı iletimi sağlanmıştır. Bu sayede motor ısınma süresi kısalmış ancak bu donanımın egzoz hattında fazladan basınç artışına neden olması silindir içi yanma karakteristiklerini etkilediği için özgül yakıt tüketiminde beklenen olumlu etki gözlenmemiştir. Öyle ki sabit motor çalışma koşullarında soğuk çalıştırmada test tezgâhında ölçülen yakıt tüketimindeki azalma, % 2,8 ile 4,5 arasında değişmektedir (Cortona, 2000).
- 4- Son yıllarda üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı bir diğer metot olan soğutma sistemlerinde gerçekleştirilen kontrol uygulamalarından biriside soğutma suyunun debisinin bir mekanik pompa yerine elektronik kontrollü elektrik bir pompanın kullanılarak debinin düzenlenmesidir. Mekanik pompalar uç motor çalışma şartlarına göre tasarlandıkları için birçok çalışma şartında soğutma suyu debisini olması gereken seviyeden yukarıda tutmaktadır. Bu durum özellikle ısınma

fazındaki bir motorun daimî çalışma şartlarına ulaşma periyodunun uzamasına neden olmaktadır. Yapılan bu çalışmada referans hal ısı yönetim sistemine göre soğutma suyu debisi %50 ve %25 seviye oranlarında tutularak enerji dengesi analizleri yapılmış ve soğutma suyu debisinin ısınma periyodunda çok etkin bir parametre olduğu görülmüştür. Isınma periyodundaki bir motorda elektronik kontrollü bir elektrikli pompa ile soğutma suyu debisinin kontrol edilmesi sayesinde özellikle düşük devir sayısı ve düşük motor yükü şartlarında ortalama olarak %5 oranında özgül yakıt tüketiminde iyileşme görülmüştür. Motorun sabit şartlarda özellikle de düşük yüklerde çalışmasıyla özgül yakıt tüketimindeki azalma %3,1 ile %7,4 arasında değişebilmektedir (Cortona 2000).

- 5- Yüksek motor yüklerinde de devir sayılarında yapılan çalışmalarda ise termodinamik sisteme giren enerji hızı arttığından ve ısınma periyodu kısa sürdüğünden alternatif yöntemlerin etkinliği düşük seviyede kalmıştır.
- 6- Soğutma suyu debisinin belirli bir değerin altına inmesi durumunda özellikle yüksek motor yüklerinde soğutma suyunun kaynama riski ortaya çıkabileceğinden soğutma suyunun sıcaklığının izlendiği bir kontrol sistemi uygulanması gerektiği düşünülmektedir.
- 7- Isınma fazında üretilen eksik yanma ürünlerinin soğutma suyu sıcaklığından önemli seviyede etkilendiği görülmüştür. Yapılan emisyon ölçümleri konvertör öncesi ölçümlerdir. Motor ısınma süresinde gerçekleştirilecek iyileşmelerin konvertör ısınma süresini de kısaltacağı açıktır.
- 8- Bu çalışmadan elde edilen veriler ışığında soğutma suyu debisini kontrol edilecek farklı motor çalışma şartlarına göre soğutma suyunu sistemde dolaştırabilecek donanım tasarımı gerçekleştirilebilir.
- 9- Egzoz gazlarının atıl ısı enerjisinden faydalanılması için sisteme eklenen ısı değiştiricisinin maliyeti dikkate alındığında (tez kapsamındaki bazı çalışma koşullarında) ekonomik olmadığı ve amortisman süresinin uzun olduğu, fakat motor ısınma süresi ve CO emisyonunda dikkate değer bir iyileştirme sağladığı görülmüştür. Her geçen gün emisyonların azaltılmasının gerekli olduğu günümüzde amortisman süresi uzun olsa da bu enerjiden faydalanılması yapılan bu çalışma neticesinde önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Anonymous, <https://www.avl.com/>, 10 May 2020.
- Allen, D. J., Lasecki, M. P., 2001. Thermal Management Evolution and Controlled Coolant Flow. SAE International, 10.4271/2001-01-1732.
- Andrews, G., Ounzain, A., Li, H., Bell, M., Tate, J., Ropkins, K., 2007. The use of a water/lube oil heat exchanger and enhanced cooling water heating to increase water and lube oil heating rates in passenger cars for reduced fuel consumption and CO₂ emissions during cold start. SAE technical paper 2007-01-2067.
- Arici, O., Johnson, J. H., Kulkarni, A. J., 1999. The Vehicle Engine Cooling System Simulation Part 1 - Model Development. Sae Technical Paper, 1999-01-0240.
- Bakatwar, R., Nesamani, K., Bhargava, A., Jain R., 2018. Performance analysis & optimization of engine cooling system by using electronically controlled thermostat for improving thermal efficiency. SAE Technical Paper (2018) 01-0053.
- Banjac, T., Wurzenberger, J ve Katrašnik, T., 2014. Assessment of engine thermal management through advanced system engineering modeling. Advances in Engineering Software, 71 (2014) 19-33.
- Battista, D. D. and Cipollone, R., 2017. Improving engine oil warm up through waste heat Recovery. Energies, 11, 1-18.
- Bent, E., Shayler, P., La Rocca, A., Rouaud, C., 2013. The effectiveness of stop-start and thermal management measures to improve fuel economy. Vehicle Thermal Management Systems Conference Proceedings (VTMS11), Coventry, UK.
- Bielaczyc, P., Woodburn, J., Szczotka, A., 2015. A Comparison of Carbon Dioxide Exhaust Emissions and Fuel Consumption for Vehicles Tested over the NEDC, FTP-75 and WLTC Chassis Dynamometer Test Cycles. SAE Technical Paper, 2015-01-1065.
- Bielaczyc, P., Woodburn, J., Szczotka A., 2016. Exhaust Emissions of Gaseous and Solid Pollutants Measured over the NEDC, FTP-75 and WLTC Chassis Dynamometer Driving Cycles. SAETechnical Paper, 2016-01-1008.
- Bonkoski, P., Karnik, A. Y., Fuxman, A., 2017. Calibration and Demonstration of Vehicle Powertrain Thermal Management Using Model Predictive Control. SAE Int. J. Engines, 10(2), doi:10.4271/2017-01-0130.
- Bova, S., Castiglione, T., Piccione, R ve Pizzonia, F., 2015. A dynamic nucleate-boiling model for CO₂ reduction in internal combustion engines. Applied Energy, 143 (2015) 271-282.
- Brace, C. J., Hawley, G., Akehurst, S., Piddock, M., Pegg, I., 2008. Cooling system improvements – assessing the effects on emissions and fuel economy. Proc Inst Mech Eng Part D: J Automob Eng., 222, (4), 579-591.
- Bruckner, M., Gruenbacher, E., Alberer, D, Re, L., Atschreiter, F., 2006. Predictive Thermal Management of Combustion Engines. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications Munich, Germany.
- Canakci, M., Ozsezen, A. N. and Ali Turkcan., A., 2009. Combustion Analysis of Preheated Crude Sunflower Oil in an IDI Diesel Engine." Biomass and Bioenergy, 33, 760-767.
- Caresana, F., Bilancia, M., Bartolini, C. M., 2011. Numerical method for assessing the potential of smart engine thermal management: Application to a medium-upper segment passenger car. Applied Thermal Engineering, 31, 3559-3568.
- Castiglione, T., Pizzonia, F ve Bova, S., 2016. A Novel Cooling System Control Strategy for Internal Combustion Engines. SAE Int. J. Mater. Manf. 9(2), doi:10.4271/2016-01-0226.
- Chalgren, R. D., 2004. Thermal Comfort and Engine Warm-Up Optimization of a Low-Flow Advanced Thermal Management System. SAE Technical Paper 2004-01-0047.

- Chastain, J. H. and Wagner, J. R., 2006. Advanced Thermal Management for Internal Combustion Engines – Valve Design, Component Testing and Block Redesign. SAE Technical Paper, 2006-01-1232.
- Cheng, W. K., Hamrin, D., Heywood, J. B., Hochgreb, S., Min, K., Norris, M., 1993. An Overview of Hydrocarbon Emissions Mechanisms in Spark Ignition Engines. SAE paper. 932708.
- Cho, H., Jung, D., Assanis, D. N., 2005. Control strategy of electric coolant pumps for fuel economy improvement. *International Journal of Automotive Technology*, 6(3), 269-275.
- Choi, K. W., Kim, K. B., Lee, K. H. 2009a. Investigation of emission characteristics affected by new cooling system in a diesel engine. *Journal of Mechanical Science and Technology* 23(7), 1866-1870.
- Choi, K. W., Kim, K. B., Lee, K. H., 2009b. Effect of New Cooling System in a Diesel Engine on Engine Performance and Emission Characteristics. SAE Technical Paper, 2009-01-0177.
- Choukroun, A., Chanfreau, M., 2001. Automatic Control of Electronic Actuators for an Optimized Engine Cooling Thermal Management. SAE International, 10.4271/2001-01-1758.
- Cioroianu, C. C., Marinescu, D. G., Iorga, A., Sibiceanu, A. R., 2017. Simulation of an electric vehicle model on the new WLTC test cycle using AVL CRUISE software. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 252, 012060 doi:10.1088/1757-899X/252/1/012060.
- Cipollone, R., Battista, D. ve Gualtieri, A., 2013. A novel engine cooling system with two circuits operating at different temperatures. *Energy Conversion and Management*, 75, 581–592.
- Cortona, K., E., 2000. Engine Thermomanagement for Fuel Consumption Reduction, Doctoral Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Eberth, J. F., Wagner, J. R., Afshar, B. A., Foster, R. C., 2004. Modeling and Validation of Automotive Smart Thermal Management System Architectures. SAE International, 10.4271/2004-01-0048.
- Ferguson, C. R., Kirkpatrick, A. T., 2001. Internal combustion engines: applied thermosciences. New York: John Wiley & Sons, 369, Amerika.
- Gao, J., Chen, H., Tian, G., Ma, C., Zhu, F., 2019. An analysis of energy flow in a turbocharged diesel engine of a heavy truck and potentials of improving fuel economy and reducing exhaust emissions. *Energy Conversion and Management*, 184, 456-465.
- Gardiner, R., Zhao, C., Addison, J., Shayler, P. J., 2013. The effects of thermal state changes on friction during the warm up of a spark ignition engine. *Vehicle Thermal Management Systems Conference Proceedings (VTMS11)*, Coventry, UK.
- Haghighat, A. K., Roumi, S., Madani, N., Bahmanpour, D., Olsen, M. G., 2018. An intelligent cooling system and control model for improved engine thermal management. *Appl. Therm. Eng.* 128, 253–263.
- Hakariya, M., Toda, T., Sakai, M. 2017. The New Toyota Inline 4-Cylinder 2.5L Gasoline Engine. SAE International, 10.4271/2017-01-1021.
- Heywood, J. B., 1988. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Publishing Company, 960, New York.
- Holman J.P., 1971. *Experimental Methods for Engineers*. McGrawHill Book Company, 37-52.
- Hölz, P., Böhlke, T., Kramer, T., 2019. Determining water mass flow control strategies for a turbocharged SI engine using a two-stage calculation method. *Applied Thermal Engineering*, 146, 386-395.
- Jander, B. S. and Baar, R., 2017. Modeling Thermal Engine Behavior Using Artificial Neural Network. Sae Technical Paper 2017-01-0534, 2017.

- Kaleli, A. 2020. Development of The Predictive Based Control of an Autonomous Enginecooling System for Variable Engine Operating Conditions in SI Engines: Design, Modeling and Real-Time Application. *Control Engineering Practice*, 100, 104424.
- Kern, J., Ambros, P., 1997. Concepts for a Controlled Optimized Vehicle Engine Cooling System. *Sae Technical Paper*, 971816.
- Kuboyama, T., Moriyoshi, Y., Iwasaki, M., Hara, J., 2011. A Study of Cooling System of a Spark Ignition Engine to Improve Thermal Efficiency. *SICE Annual Conference 2011*, Waseda University, Tokyo, Japan.
- Lahuerta, J., Samuel, S. 2013. Numerical Simulation of Warm-Up Characteristics and Thermal Management of a GDI Engine. *SAE International*, 10.4271/2013-01-0870.
- Lingarde, O., Feng, L., Tenstam, A., Soderman, M., 2015. Optimal Vehicle Control for Fuel Efficiency, *SAE Int. J. Commer. Veil.* doi:10.4271/2015-01-2875.
- Liu, G., Zhao, Z., Guan, H., Zhang, C., Gao, D., Cao, Y., 2017. Benefit of Coolant Control Module for Thermal Management on SUV. *SAE Technical Paper*, 2017-01-0152.
- Martyr, A., Plint, M. A., 2007. *Engine testing: theory and practice*. Butterworth-Heinemann, III. Edition, 442, Oxford.
- Millo, F., Caputo, S., Cubito, C., Calamiello, A., Mercuri, D., Rimondi, M., 2016. Numerical Simulation of the Warm-Up of a Passenger Car Diesel Engine Equipped with an Advanced Cooling System. *SAE Technical Paper*, 2016-01-0555.
- Moffat, R. J., 1988. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental thermal and fluid science*, 1 (1), 3-17.
- Mohamed, E. S., 2016. Development and analysis of a variable position thermostat for smart cooling system of a light duty diesel vehicles and engine emissions assessment during NEDC. *Applied Thermal Engineering*, 99, 358-372.
- Mitchell, T., Salah, M., Wagner, J., Dawson, D., 2009. Automotive Thermostat Valve Configurations: Enhanced Warm-Up Performance, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 131.
- Mehanovic, S., 2008. Electronically Regulated Cooling System in Internal Combustion Engine, *Transactions of famena*, 32(1), 27-33.
- Pacheco, A. F., Martins, E. S. and Zhao, H., 2013. New European Drive Cycle (NEDC) simulation of a passenger car with a HCCI engine: Emissions and fuel consumption results. *Fuel*, 111, 733-739.
- Park, S., Woo, S., Kim, M., Lee, K., 2017. Thermal modeling in an engine cooling system to control coolant flow for fuel consumption improvement. *Heat Mass Transfer*, 53, 1479-1489.
- Phapale, S., Kommareddy, P., Sindgikar, P., ve Jadhav, N., 2015. Optimization of Commercial Vehicle Cooling Package for Improvement of Vehicle Fuel Economy. *SAE Technical Paper 2015-01-1349*, 2015.
- Pizzonia, F., Castiglione, T., Bova, S., 2016. A Robust Model Predictive Control for efficient thermal management of internal combustion engines. *Applied Energy*, 169, 555-566.
- Praveen, S. M., Saravanan, B., Siddharthan, B., Kumaragurubaran, S. B., 2020. *Materials Today: Proceedings*. In Press.
- Pulkrabek, W.W., 2003. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. New Jersey: Prentice Hall.
- Ranjan, R., Jha, K. K., Brahmasani, L., Khan, P., 2016. Prediction of Engine Thermal Behavior during Emission Cycle Using 1D Four Point Mass Model. *SAE International*, 10.4271/2016-01-0197.
- Ribeiro, E. G., Filho, A. P. A., Meira, J. L. C., 2007. Electric Water Pump for Engine Cooling. *Sae Technical Paper*, 2007-01-2785.

- Roberts, A., Brooks, R., Shipway, P., 2014. Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions. *Energy Conversion and Management*, 82, 327-350.
- Robinson, K., Campbell, N. A. F., Hawley, J. G., Tilley, D. G., 1999. A Review of Precision Engine Cooling. SAE Technical Paper, 1999-01-0578.
- Romero, C. A., Torregrosa, A., Olmeda, P., Martin, J. 2014. Energy Balance During the Warm-Up of a Diesel Engine. SAE International, 10.4271/2014-01-0676.
- Sabancı, A., Işık, A., 2012. İçten Yanmalı Motorlar. Nobel Yayınevi, İstanbul.
- Samhaber, C., Wimmer, A., Loibner, E., 2001. Modeling of Engine Warm-Up with Integration of Vehicle and Engine Cycle Simulation. SAE International, 10.4271/2001-01-1697.
- Shin, Y., Kim, S ve Kim, M., 2013. Use of electromagnetic clutch water pumps in vehicle engine cooling systems to reduce fuel consumption. *Energy*, 57, 624-631.
- Shutty, J. and Pinto, R., 2013. Advanced Thermal Management Strategies. SAE Technical Paper 2013-36-0542, doi:10.4271/2013-36-0542.10.4271/2013-36-0542.
- Sibiceanu, A. R., Iorga, A., Nicolae, V., Ivan, F., 2016. Consideration on the Implications of the WLTC - (Worldwide Harmonized Light-Duty Test Cycle) for a Middle Class Car. International Congress of Automotive and Transport Engineering, CONAT Transilvania University of Brasov.
- Tang, P., Zhang, Y., Xu, Z and Tao, Q., 2016. Fuel Economy Optimization with Integrated Modeling for Vehicle Thermal Management System. SAE Technical Paper, 2016-01-0225, doi:10.4271/2016-01-0225.
- Tao, X and Wagner, J., 2016. An Engine Thermal Management System Design for Military Ground Vehicle - Simultaneous Fan, Pump and Valve Control. SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst. 9(1), doi:10.4271/2016-01-0310.
- Trapy, J. D., Damiral, P., 1990. An investigation of lubricating system warm-up for the improvement of cold start efficiency and emissions of SI automotive engines. SAE technical paper 902089.
- Wagner, J. R., Srinivasan, V., Dawson, D. M., Marotta, E. E. 2003. Smart thermostat and coolant pump control for engine thermal management systems. SAE Technical Papers.
- Wang, T ve Wagner, J., 2015. A Smart Engine Cooling System - Experimental Study of Integrated Actuator Transient Behavior. SAE Technical Paper, 2015-01-1604, doi:10.4271/2015-01-1604.
- Will, F., Boretti, A., 2011. A New Method to Warm Up Lubricating Oil to Improve the Fuel Efficiency During Cold Start. SAE International Journal of Engines, 4(1), 175-187.
- Will, F., 2012. Fuel conservation and emission reduction through novel waste heat recovery for internal combustion engines. *Fuel*, 102, 247–55.
- Zhou, B., Lan, X., b, Xu, X ve Liang, X., 2015. Numerical model and control strategies for the advanced thermal management system of diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 82, 368-379.
- Ziejewski, M., Goettler, H. J., Cook, L. W., Flicker, J., 1991. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emissions from Plant Oil Based Alternative Fuels. Sae Technical Paper, 911765.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Galip KALTAKKIRAN
Doğum tarihi:	17 Şubat 1988
Doğum Yeri:	Yakutiye / Erzurum
Uyruğu:	T.C.
Adres:	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Tel:	-
E-mail:	-
Eğitim	
Lise:	Erzurum Atatürk Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens. Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (2014)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (2020)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Makine Mühendisleri Odası	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	