



**İÇTEN YANMALI MOTORLARDA ATIK ISI GERİ
KAZANIMI İÇİN R134a ve R245fa GAZLARININ RANKİNE
ÇEVİRİMİ ANALİZLERİNİN AVL CRUISE™ M İLE
YAPILMASI**

Taha Kubilayhan KAYAALP

**Yüksek Lisans Tezi
Makine mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ**

**2023
Her hakkı saklıdır.**



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İÇTEN YANMALI MOTORLARDA ATIK ISI GERİ KAZANIMI İÇİN R134a ve
R245fa GAZLARININ RANKİNE ÇEVİRİMİ ANALİZLERİNİN AVL CRUISE™
M İLE YAPILMASI**

Taha Kubilayhan KAYAALP

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2023

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

12 / 07 / 2023

Taha Kubilayhan KAYAALP

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA ATIK ISI GERİ KAZANIMI İÇİN R134a ve R245fa GAZLARININ RANKİNE ÇEVİRİMİ ANALİZLERİNİN AVL CRUISE™ M İLE YAPILMASI

Taha Kubilayhan KAYAALP

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ

İçten yanmalı motorlarda harcanan yakıt enerjisinin yalnızca bir bölümü faydalı işe dönüşürken özellikle soğutma suyu ve egzoz gazları yoluyla önemli miktarda enerji kaybı gerçekleşir. Hem mobil hem de sabit içten yanmalı motor kullanılan sistemlerde bu atık ısı enerjisi bir Rankine çevrimli ısı makinesi kullanılarak faydalı işe dönüştürülebilir ve önemli avantajlar söz konusu olur. Soğutma suyu ile atılan enerji düşük sıcaklıklı kaynağa sahipken egzoz gazları yoluyla enerji geri kazanımı potansiyeli, yüksek sıcaklık sayesinde daha yüksektir. Her iki kaynaktan eş zamanlı enerji geri kazanımı için farklı iş akışkanları kullanımı gerekmektedir çünkü iş akışkanları kaynak ve kuyu sıcaklıklarından doğrudan etkilenmektedir. Bu çalışmada soğutma suyundan enerji geri kazanımı için R134a ve egzoz gazlarından enerji geri kazanımı için R245fa kullanılmış ve AVL CRUISE™ M programında oluşturulan Rankine çevrim modeli ile kaynak sıcaklığı ve iş akışkan debisinin çevrim performansına etkileri incelenmiştir. Egzoz gazlarından enerji geri kazanım uygulaması için üç farklı kaynak sıcaklığı 450, 500 ve 550°C ve iş akışkanı debisi 12, 14 ve 16 l/dk olmak üzere toplam dokuz durumda analizler yapılmıştır. Benzer şekilde soğutma suyundan enerji geri kazanım uygulaması için kaynak sıcaklıkları ve iş akışkanı debisi sırasıyla 80, 90 ve 100°C ve 2, 2.5 ve 3 l/dk seviyesinde tutularak dokuz farklı durum oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçları atık ısıdan enerji geri kazanımı sistemlerinde kaynak sıcaklığına göre iş akışkanının debisinin seviyesinin sistem performansını önemli seviyede etkilediği göstermiştir.

2023, 56 sayfa

Anahtar Kelimeler: Organik Rankine Çevrimi, AVL CRUISE™ M, Atık Isı, R134a, R245fa

ABSTRACT

MS. Thesis

ANALYSIS OF RANKINE CYCLE OF R134a AND R245fa GASES WITH AVL CRUISE™ M FOR WASTE HEAT RECOVERY IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Taha Kubilayhan KAYAALP

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ

While in internal combustion engines only a fraction of the spent fuel energy converts into useful work, a significant amount of energy loss occurs, especially through cooling water and exhaust gases. In systems in which both mobile and stationary internal combustion are used, this waste thermal energy can be converted into useful work using a Rankine cycle heat engine, and there happens significant advantages. While the energy discharged through cooling water has a low temperature source, the potential for energy recovery through exhaust gases is higher due to the high temperature. Simultaneous energy recovery from both sources requires the use of different working fluids because the working fluids are directly affected by the source and well temperatures. In this study, R134a was used for energy recovery from cooling water and R245fa for energy recovery from exhaust gases and the effects of source temperature and working fluid flow rate on the cycle performance were investigated with the Rankine cycle model created in AVL CRUISE™ M programme. For the exhaust gas recovery application, analyses were performed at three different source temperatures 450, 500 and 550°C and working fluid flow rates 12, 14 and 16 l/min for a total of nine cases. Similarly, for the cooling water recovery application, nine different cases were created by keeping the source temperatures and working fluid flow rates at 80, 90 and 100°C and 2, 2.5 and 3 l/min, respectively and the results obtained were compared. The results of the study showed that the level of the flow rate of the working fluid according to the source temperature in waste heat energy recovery systems significantly affects the system performance.

2023, 56 page

Keywords: Organic Rankine Cycle, AVL CRUISE™ M, Waste Heat, R134a, R245fa

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca her türlü fedakârlığı gösteren bilgi ve tecrübesini benimle samimi bir şekilde paylaşan her zaman yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ'e samimi duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca beni destekleyen, haklarını asla ödeyemeyeceğim annem ve babama teşekkürlerimi sunarım.

Taha Kubilayhan KAYAALP
Temmuz 2023

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Egzoz Gaz Resirkülasyon Sistemleri	3
1.2.1. EGR sistem elemanları.....	4
1.2.1.1. EGR valfi	4
1.2.1.2. EGR soğutucu	4
1.2.1.3. EGR Selonoidi	5
1.3. Egzoz Gaz Sistemleri	7
1.4. Motor Soğutma Sistemi	8
1.5. İdeal Rankine Çevrimi	8
1.6. Organik Rankine Çevrimi	10
1.6.1. Rejeneratif organik rankine çevrimi.....	12
1.6.2. Süperkritik organik rankine çevrimi	14
1.7. Organik Rankine Çevrimi Sistemlerin Avantajları	14
1.8. Organik İş Akışkanları	15
1.9. Atık Isı Geri Kazanım Sistemleri	17
1.9.1. Atık ısı geri kazanım sistemlerinin kullanım alanları	18
1.9.2. Atık ısı geri kazanım sistemlerinin avantajları.....	20
1.9.3. Atık ısı geri kazanım sistemlerinin önemi	21
2. KAYNAK ÖZETLERİ	22
3. MATERYAL ve YÖNTEM	29
3.1. Materyal	29
3.1.1. AVL'ye genel bakış	29

3.1.2. CRUISE™ M'ye genel bakış	29
3.1.3. AVL CRUISE™ M modüler yapısı	31
3.1.4. AVL CRUISE™ uygulama alanları ve fonksiyonları.....	31
3.2. Yöntem.....	33
3.2.1. Motorlarda enerji dengesi hesaplamaları	33
3.2.2. Oluşturulan rankine çevrim modeli.....	35
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	38
4.1. R245fa İş Akışkanı İçin Çalışma Sonuçları	38
4.2. R134a İş Akışkanı İçin Çalışma Sonuçları	43
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	50
KAYNAKLAR	52



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
η	Verim
d	Devir
dak	Dakika
h	Entalpi
K	Kelvin
S	Zaman
T	Sıcaklık

Kısaltmalar

CO	Karbonmonoksit
DOC	Dizel Oksidasyon Katalizörü
DPF	Dizel Partikül Filtresi
ECU	Elektronik Kontrol Ünitesi
EGR	Egzoz Gaz Resirkülasyon
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HC	Hidrokarbon
HVAC	Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme
NEDC	Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü
NO _x	Azot Oksit
ORÇ	Organik Rankine Çevrimi
PM	Partikül Madde
PPTD	Sıkıştırma Noktası Sıcaklık Farkı
SAE	Otomobil Mühendisler Derneği
SCR	Seçici Katalitik İndirgeme Aracı
TEMS	Termal Enerji Yönetim Sistemi
VEMS	Araç Enerji Yönetim Sistemi
VTMS	Araç Termal Yönetim Sistemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Motor soğutma suyu ve egzoz gazı ısı geri kazanım çevrimi.....	2
Şekil 1.2. Egzoz gaz resirkülsayon sisteminin şematik görünüşü	4
Şekil 1.3. EGR soğutucu.....	5
Şekil 1.4. Elektronik kontrollü EGR valfi	6
Şekil 1.5. Motor egzoz gaz hattı	7
Şekil 1.6. Motor soğutma sistemi elemanları	8
Şekil 1.7. Tipik bir Rankine çevrimi elemanları.....	9
Şekil 1.8. Tipik bir Rankine çevrimi T-S diyagramı	9
Şekil 1.9. Basit ORÇ sistemi	11
Şekil 1.10. ORÇ sıcaklık entropi (T-S) diyagramı	12
Şekil 1.11. Rejeneratif organik rankine çevrimi (ORÇ) hat ieması.....	13
Şekil 1.12. Rejenaratif organik rankine çevriminin T-S diyagramı.....	13
Şekil 1.13. Süperkritik organik rankine çevriminin T-S diyagramı.....	14
Şekil 1.14. Islak, kuru ve izentropik iş akışkanlarının T-S diyagramları	17
Şekil 1.15. ORÇ (Organik Rankine Çevrimi) teknolojisi.....	18
Şekil 1.16. Atık ısı geri kazanım sistemlerinin kullanım alanları.....	19
Şekil 1.17. Egzoz gazlarıyla atık ısı geri kazanımı.....	20
Şekil 2.1. 30 kW bir motorun sankey diyagramı	22
Şekil 2.2. Yapılan çalışmada kullanılan ekipmanlar.....	23
Şekil 2.3. Yapılan çalışmada ortaya konan sıcaklıklar	24
Şekil 2.4. Önerilen tek döngülü bir organik rankine sistemi	25
Şekil 2.5. Kullanılan atık ısı geri kazanım ünitesi şeması	25
Şekil 3.1. Entegre simulasyon yaklaşımı ile model tabanlı AVL geliştirme süreci	29
Şekil 3.2. AVL CRUISE™ M genel bakış	30
Şekil 3.3. AVL CRUISE™ M modüler yapısı	31
Şekil 3.5. Motorlarda enerji dengesi (Sankey) diyagramı	33
Şekil 3.6. Yüksek sıcaklıklı organik rankine çevrimi modeli.....	36
Şekil 3.7. Düşük sıcaklıklı organik rankine çevrimi modeli.....	36
Şekil 4.1. R245fa için farklı durumlarda basınç-entalpi değişimi	39
Şekil 4.2. R245fa için farklı durumlarda sıcaklık-entropi değişimi.....	41
Şekil 4.3. R245fa iş akışkanı kullanımında farklı durumlar için termal verim.....	43
Şekil 4.4. R134a için farklı durumlarda basınç-entalpi değişimi.....	45

Şekil 4.5. R134a için farklı durumlarda sıcaklık-entropi değişimi.....	47
Şekil 4.6. R134a iş akışkanı kullanımında farklı durumlar için termal verim.....	48



TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Çalışmada kullanılan soğutucu akışkan özellikleri.....	16
Tablo 4.1. R245fa çalışma durumları	38
Tablo 4.2. R134a çalışma durumları	44
Tablo 4.3. R134a ve R245fa iş akışkanlarının kullanıldığı çeşitli çalışmalar	49



1. GİRİŞ

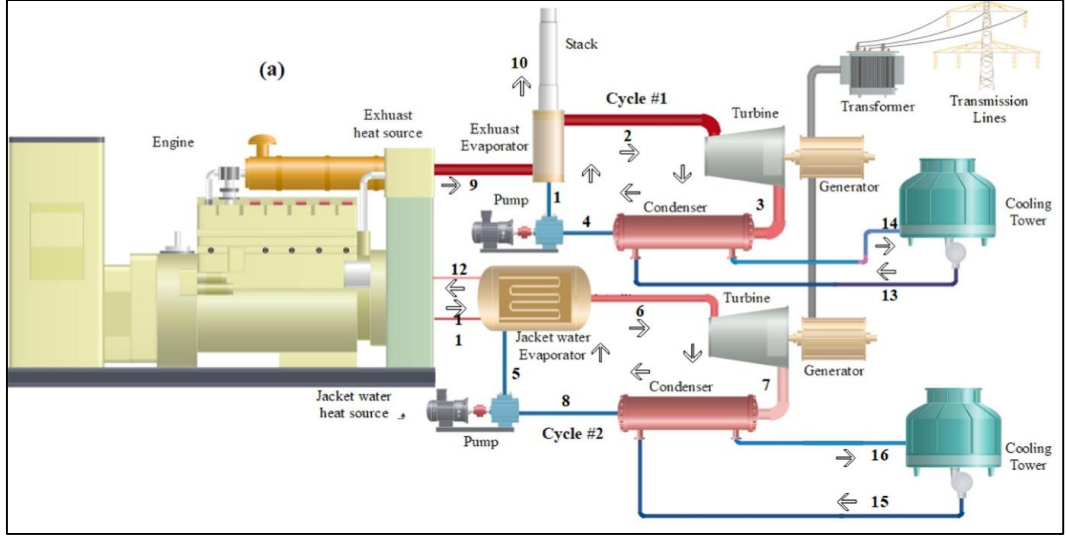
1.1. Genel Bilgiler

Taşımacılık sektöründe kullanılan mobil içten yanmalı motorların ısı verimlerinin yaklaşık %30-45 dolaylarında olduğu bilinmektedir. Yakıt enerjisinin kalan bölümü atık enerji olarak kullanılmadan kaybedilir. Benzer şekilde, çimento ve kireç, cam vb. gibi farklı endüstrilerde önemli miktarda atık ısı mevcuttur (Kumar and Rakshit 2021). Özellikle soğutma suyu ve egzoz gazları yoluyla önemli seviyede ısı enerji kaybı gerçekleşir. Enerji analizi yapıldığında yaklaşık toplam %65-70 civarındaki enerji kaybının yaklaşık %35-40'ı egzoz gazları ile ve yine yaklaşık %30'u soğutma suyu yoluyla kaybedilmektedir (Burnete et al. 2022). Bu iki enerji kayıp mekanizması ile yaklaşık eşit seviyede enerji kaybı gerçekleşir ancak soğutma suyu yaklaşık 370 K sıcaklıktayken egzoz gazları 1.200 K seviyelerindedir (Galloni 2022). Dolayısıyla her iki kaynaktan enerji geri kazanım uygulamasının tasarımı farklılıklar arz etmektedir.

Bu mekanizmalar ile kaybedilen ısı enerji Kaline Rankine Çevrimi, Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), Brayton çevrimi ve termoelektrik jeneratörler ile enerji geri kazanımı uygulamaları yapmak mümkündür. Ancak bunlar arasında ORÇ en etkin yöntemdir. Bu yöntem ile yüksek sıcaklıklı egzoz gazlarından ve egzoz gaz resirkülasyon sisteminden faydalanılabilir. Ayrıca düşük sıcaklıklı soğutma suyu sisteminden ve emme havasından enerji geri kazanımı mümkündür (Chintala et al. 2018). Velez ve Chintala (Chintala et al. 2018; Vélez et al. 2012) gibi araştırmacılar Organik Rankine Çevrimi ile motorlardan enerji geri kazanımı konusunda analizler yapmışlardır.

ORÇ sistemi, uzak bölgelere elektrik tedarikini, kendi kendine enerji üretimini, günlük kullanım için deniz suyunun tuzunu gidermeyi ve hatta endüstriyel alanlarda enerji verimliliğini artırmayı kolaylaştırabilir (Vélez et al. 2012). Şekil 1.1'de Asadi et al. (2022) tarafından yapılan çalışmada kullanılan sisteme ait şematik resim görülmektedir. Bu sistemde hem motor soğutma enerjisinden hem de egzoz gaz enerjisinden faydalanılarak kazanılan enerji iki farklı jeneratör ile elektrik enerjisine dönüştürülerek şebekeye aktarılmaktadır (Asadi et al. 2022).

1. GİRİŞ



Şekil 1.1. Motor soğutma suyu ve egzoz gazı ısı geri kazanım çevrimi (Asadi et al. 2022)

Şekil 1.1'de görülen Çevrim 1'de egzoz gazı kaynaklı Rankine çevrimidir. Çevrim 2'de ise soğutma suyu kaynaklı Rankine çevrimidir. Her iki çevrim buharlaştırıcı, türbin, yoğuşturucu ve pompadan oluşmakta ve türbin çıkışında mekanik enerji elektrik enerjisine dönüşürken yoğuşturucuda ısı atımı için bir soğutma kulesi ile bağlantı kurulmuştur.

Rankine çevrimi ile bu atık ısıdan enerji geri kazanımı gerçekleştirilebilir. Rankine çevriminde genellikle iş akışkanı olarak su kullanılır. Su zehirli değildir ve yüksek özgül ısıya sahiptir. Ancak suyun üçlü noktası çok yüksektir. Ayrıca yoğuşma sıcaklığını mümkün olduğu kadar düşük seviyede tutmak için yoğurtucunun vakum altında çalışması gerekir. Bu ise sistemi karmaşık hale getirmektedir.

Birçok çalışmada içten yanmalı motorlar için organik iş akışkanları önerilmiştir. Organik iş akışkanlarının kullanıldığı çevrimler Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) olarak adlandırılır. Bu çalışmalarda çeşitli teorik ve deneysel analizler ile iş akışkanlarının çevrim performanslarına etkileri de incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en iyi iş akışkanı değil uygulamaya göre uygun iş akışkan seçiminin önemli olduğu görülmektedir.

Aşağıda sırasıyla egzoz gaz resirkülasyon sistemleri, egzoz gaz sistemleri ve soğutma suyu sistemlerinden atık ısı geri kazanım sistemleri tanıtılacak, ardından bu alanlarda yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilecektir.

1.2. Egzoz Gaz Resirkülasyon Sistemleri

Egzoz gaz resirkülasyon sistemleri (EGR), içten yanmalı motorlardan yayılan azot oksit (NOx) emisyonlarını azaltmak için kullanılan bir emisyon kontrol teknolojisidir. Bilindiği üzere yanma odasında gerçekleşen reaksiyonlar sonucu oluşan NOx emisyonlarının miktarı sıcaklık ve oksijen konsantrasyonu ile değişmektedir. EGR sisteminin temel çalışma prensibi egzoz gazlarının belirli bir bölümünü tekrar emme sistemindeki hava ile karıştırmak ve bu sayede yanma odasına giren oksijen konsantrasyonunu düşürerek yanma odası sıcaklığını kontrol altına almaktır. EGR valfi, EGR soğutucusu ve EGR selenoidi olmak üzere üç ana parçadan oluşan EGR sistemleri otomobiller, iş makineleri ve endüstriyel makinelerde aktif olarak kullanılmaktadır. EGR sisteminin kontrolünde açılan EGR valfi egzoz gazlarının bir bölümünü emme sistemine yönlendirerek yanma prosesini optimize eder ve NOx emisyonlarını azaltmış olur.

Sistemin önemli bir parçası olan EGR soğutucusu resirküle edilecek egzoz gazlarını emme manifolduna aktarmadan önce soğutma üzere tasarlanmıştır. Şayet egzoz gazları soğutulmadan resirküle edilirse yanma odasında sıcaklık artışına neden olabilmekte ve bu durum NOx emisyonunun olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır.

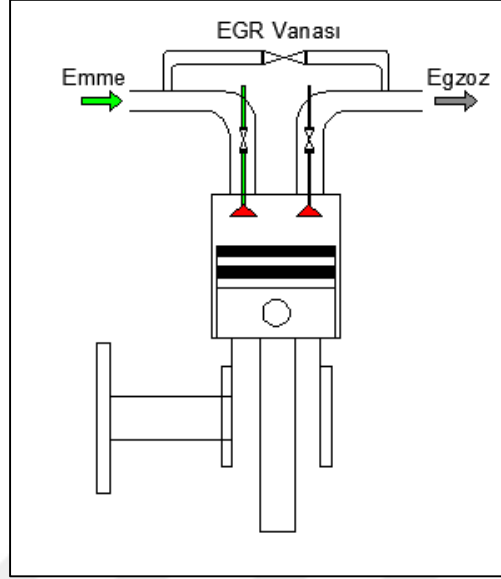
Klasik EGR sistemlerinde EGR soğutucusunda egzoz gazlarından motor soğutma suyuna ısı transferi yapılarak soğutma işlemi gerçekleşir. EGR soğutucusu gövde boru tipi bir ısı değiştiricisidir ve klasik sistemlerde su-antifriz karışımları, egzoz gazlarının geçtiği borular üzerindeki pasajlardan akarak ısı transferi yapar.

EGR gazlarından alınan ısı enerjisi ise motor soğutma sistemi yoluyla çevre havasına atılır. Kullanılmadan atılan bu enerjinin geri kazanımı yoluyla sistemin toplam enerji verimliliği artırılabilir.

EGR sistemlerinde oluşan atık ısı Rankine çevrimi kullanılarak geri kazanılabilir. Bu atık ısı Rankine çevrimi için gerekli ısı enerjisi girişini sağlamaktadır. Su ya da organik akışkanların kullanılabileceği iş akışkanına transfer edilen ısı enerjisi, akışkanı yüksek basınçlı buhar haline getirir ve buhar türbine aktararak genişlemesi sağlanırken iş üretilir. Türbin çıkışındaki düşük basınçlı buhar ise yoğunlaştırularak tekrar sıvı fazında sisteme pompalanır ve çevrim tamamlanmış olur. Türbinden üretilen mekanik enerji

1. GİRİŞ

elektrik enerjisine dönüştürülerek hem sistemin genel verimi artmış olur hem de EGR gazları soğutulmuş ve atık ısı geri kazanımı uygulaması gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 1.2. Egzoz gaz resirkülsasyon sisteminin şematik görünüşü

1.2.1. EGR Sistem Elemanları

1.2.1.1. EGR valfi

Isı değiştiriciler, akış dñzenlemesi ve yapı tipine gñre çeşitli sınıflandırmalara tabi tutulabilirler. Eş merkezli tñpler olarak adlandırılan çift borulu ısı değiştiriciler, basit yapılarına rağmen akış dñzenlemesi paralel veya ters olabilen birçok uygulamada kullanılır. Kanatlı veya kanatsız olabilen ısı değiştiricilerin başka bir formu ise ters akışlı ısı değiştiricilerdir. Boru geçişlerinin ve kabuk geçişlerinin sayısına gñre farklılık gñsteren gñvde borulu ısı değiştiriciler de yaygın olarak kullanılmaktadır (Hoard et al. 2009).

1.2.1.2. EGR soğutucu

Şekil 1.3'de gñrñldñęñ gibi, EGR gazları bu ısı değiştiriciler vasıtasıyla soğutulurak NOx salınımı etkili bir şekilde azaltılabilmektedir. EGR sistemindeki soğutulmuş gazlar, egzoz gazlarının geri dñnñřñmñ sırasında bir ısı değiştiriciden

1. GİRİŞ

geçirilerek soğutulur ve EGR gazları tarafından emilen ısı miktarı artar. EGR gazlarının soğutulması, aynı zamanda EGR valfi ve diğer EGR parçalarının dayanıklılığını da artırır.



Şekil 1.3. EGR soğutucu

1.2.1.3. EGR Selonoidi

EGR valfi, dizel motorlarda egzoz gazının silindirlerdeki yanma işlemine yönlendirilmeden önce, egzoz gazı akışını ve vakumunu kontrol eden önemli bir elemandır. EGR valfleri genellikle pnömatik ve elektrikli olmak üzere iki farklı tipte üretilirler. Günümüzde yeni nesil dizel motorlarda elektronik kontrollü EGR valfleri kullanılmaktadır. Bu valfler, genellikle doğru akım (DC) motorları tarafından çalıştırılır ve valf konumunu ayarlamak için belirli bir voltaj uygulanır. EGR valfleri, egzoz geri basıncı ve şarj havası basıncı gibi durumlarda güvenli çalışmayı sağlamak için sızdırmazlık özelliklerine sahiptirler.

EGR valfleri ayrıca, ani yük artışlarında hızlı bir şekilde kapanarak duman ve partikül madde artışını önlemeye yardımcı olurlar. Bu nedenle, elektrikli EGR valfleri, ani değişikliklere hızla tepki verebildikleri için avantajlıdır. Emisyon yönetmeliklerini karşılamak için EGR valfleri hassas bir şekilde çalıştırılmalıdır. Şekil 1.4'te görülen elektronik kontrollü EGR valfi, motor elektronik kontrol ünitesinden aldığı bilgiler doğrultusunda valfin açıklığını ve EGR akışını ayarlayan elektromekanik bir yapıya sahiptir.



Şekil 1.4. Elektronik kontrollü EGR valfi

EGR vakum solenoidi, egzoz gazı geri dönüşüm (EGR) sistemlerinde kullanılan bir bileşendir. Bu solenoid, motor kontrol ünitesi (ECU) tarafından kontrol edilir ve egzoz gazının geri dönüşümünü yönetir. EGR vakum valfi, bir elektromanyetik solenoid valf olarak çalışır. Motor kontrol ünitesi, motorun işletim koşullarını ve egzoz emisyonlarını izleyen sensörlerden gelen bilgilere dayanarak, EGR valfinin ne zaman açılması veya kapanması gerektiğini belirler.

Valf, vakum hattı ve egzoz gazı arasındaki bağlantıyı kontrol eder. Motor kontrol ünitesi, uygun zamanda EGR valfinin vakumunu açar veya kapatır. Eğer valf açık durumdaysa, motor vakumunu kullanarak egzoz gazını emme manifolduna yönlendirir. Bu sayede egzoz gazı, silindirlerdeki yanma işlemine karışır ve yanma sıcaklığını düşürür.

EGR vakum valfinin çalışma prensibi şu şekildedir:

- Motor kontrol ünitesi, motorun işletim koşullarını analiz eder ve egzoz gazı geri dönüşümünün gerekliliğini belirler.
- EGR vakum valfinin kontrol sinyali, motor kontrol ünitesi tarafından gönderilir. Bu sinyal, valfin elektromanyetik bobinini etkiler.
- Elektromanyetik bobin, motor kontrol ünitesinden gelen sinyal doğrultusunda manyetik alan üretir.
- Manyetik alan, bobin içindeki bir plunger (itmeli çubuk) üzerinde etki eder. Plunger, vakum valfinin açılması veya kapanması için bir geçit açar veya kapatır.
- Valf açıldığında, motor vakum hattından gelen vakum, EGR valfinin arka tarafındaki vakum odasına yönlendirilir. Bu, valf mekanizmasını hareket ettirir ve egzoz gazının emme manifolduna yönlendirilmesini sağlar.

1. GİRİŞ

- Valf kapandığında, vakum hattı EGR valfiyle bağlantısı kesilir ve egzoz gazı geri dönüşümü durur.

EGR vakum solenoidi, motorun çalışma koşullarına ve emisyon gereksinimlerine göre değişebilir. Bazı araçlarda birden fazla EGR solenoidi kullanılabilir. Bu, daha hassas bir kontrol sağlamak ve motor performansını optimize etmek için yapılan bir tasarımıdır.

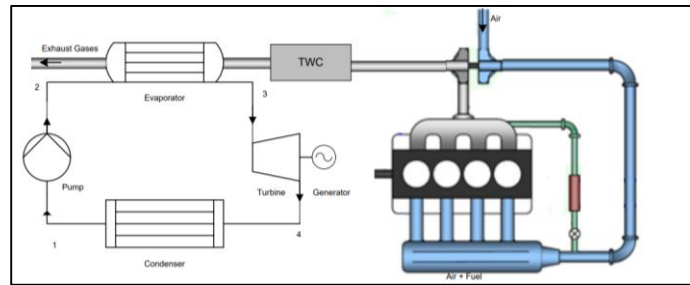
1.3. Egzoz Gaz Sistemleri

İçten yanmalı motorlarda egzoz hattında iki temel işlev yerine getirilir;

- 1- Egzoz gazlarının ses emisyonlarının azaltılması
- 2- Egzoz gazlarının çevreye verdiği zararın azaltılması

Birinci görevi yerine getirmek için susturucular kullanılırken ikinci görev için egzoz hattında üç yollu katalitik konvertörler kullanılmaktadır. Turbo şarj sisteminden çıkan yüksek sıcaklıklı gazlar katalitik konvertörlerden geçtikten sonra susturuculara aktarılmakta ve sistemi terk etmektedirler.

Ancak yüksek sıcaklıklı egzoz gazları çevre havasına atılırken önemli miktarda ısıl enerji kaybına neden olmaktadır. Şekil 1.5’de gösterildiği gibi Organik Rankine Çevrimi buharlaştırıcısı da katalitik konvertörden hemen sonra yerleştirilerek enerji geri dönüşümü sağlanabilmektedir.

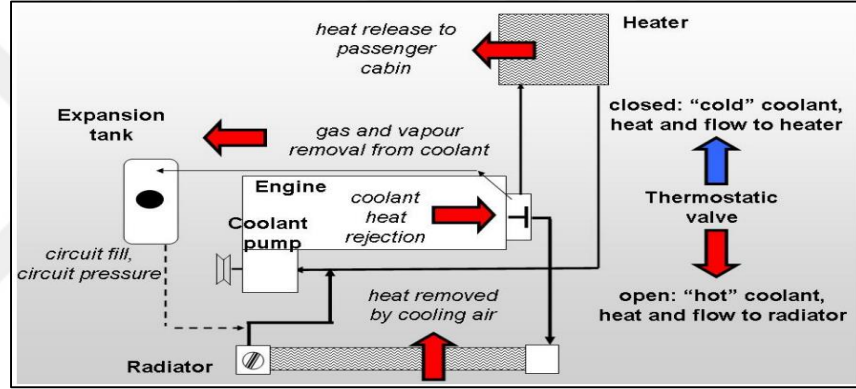


Şekil 1.5. Motor egzoz gaz hattı (Domingues et al. 2013)

1.4. Motor Soğutma Sistemi

Motor soğutma sistemi, sistem sıcaklığını kontrol ederek güvenli çalışma sıcaklığını düzenler. Motor bloğundan suya transfer edilen ısı enerjisi, bir çapraz akışlı ısı değiştiricisi olan radyatör ile çevre havasına transfer edilir. Bu sayede blok sıcaklığı kontrol altında tutulmuş olur ancak transfer edilen enerji yakıt enerjisinin kaybına neden olmaktadır.

Şekil 1.6'da görülen motor soğutma sisteminin temel elemanı olan radyatör yerine Rankine çevriminin buharlaştırıcısı yerleştirilerek atık ısı geri kazanım uygulaması yapılmaktadır.

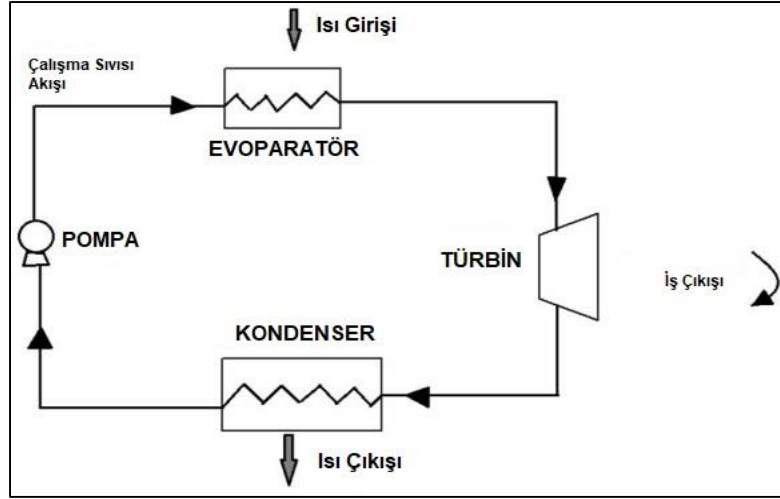


Şekil 1.6. Motor soğutma sistemi elemanları (Cauda et al. 2010)

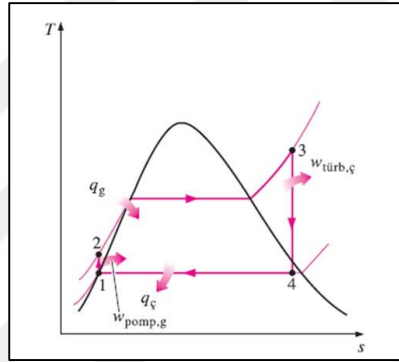
1.5. İdeal Rankine Çevrimi

Rankine çevrimi, ısıyı işe dönüştüren bir çevrimdir. Basit bir Rankine çevrimi, dört ana ekipmandan oluşur: kondenser, pompa, buharlaştırıcı ve türbin. Basit buharlı güç santrallerinde genellikle akışkan olarak su kullanılır. İş akışkanı, pompalama ile buharlaştırıcıya taşınır ve burada atık ısı kullanılarak kızgın buhar elde edilir. Daha sonra buhar türbine gönderilir, burada genişler ve iş yapar, ardından kondensere geçer, ısı kaybeder ve sıvı hale döner. İş akışkanı buharlaştırıcıya tekrar pompalanır ve bu şekilde çevrim devam eder. Bu çevrim, dünya genelindeki elektrik ihtiyacının yaklaşık %90'ını karşılamaktadır. Şekil 1.7'de çevrimin şematik diyagramı, Şekil 1.8'de ise T-s diyagramı yer almaktadır.

1. GİRİŞ



Şekil 1.7. Tipik bir rankine çevrimi elemanları



Şekil 1.8. Tipik bir rankine çevrimi T-S diyagramı (Çengel 2015)

İdeal Rankine çevrimi temel olarak dört aşamadan oluşmaktadır.

1-2: Pompada izantropik sıkıştırma

2-3: Kazanda sabit basınçta ısı girişi

3-4: Türbinde izantropik genişleme

4-1: Yoğusturucuda sabit basınçta ısı atılması

Rankine çevrimini oluşturan dört elemanın (pompa, kazan, türbin ve yoğusturucu) tümü sürekli akışlı makinelerdir. Bu nedenle Rankine çevrimini de dört, sürekli akışlı açık sistemden oluşan bir çevrim olarak incelenebilir. Buharın kinetik ve potansiyel enerjisindeki değişim genellikle iş ve ısı geçişine oranla küçüktür ve bu yüzden göz ardı edilebilir (Çengel 2015). Sürekli akışlı açık sisteme ilişkin enerji denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$(q_g - q_ç) + (w_g - w_ç) = h_{çıkış} - h_{giriş} \quad (1.1)$$

Kazan ve yoğuşturucuda iş etkileşimi ihmal edilir. Ayrıca pompa ve türbindeki hal değişimleri izantropik olarak kabul edilir. Bu varsayımlar altında, her bir sistemin enerji korunumu denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\text{Pompa (q = 0): } w_{pompa,g} = h_2 - h_1 \quad (1.2)$$

$$\text{Veya, } w_{pompa,g} = v(P_2 - P_1) \quad (1.3)$$

$$\text{Kazan (w = 0): } q_g = h_3 - h_2 \quad (1.4)$$

$$\text{Türbin (q = 0): } w_{türb,ç} = h_3 - h_4 \quad (1.5)$$

$$\text{Yoğuşturucu (w = 0): } q_ç = h_4 - h_1 \quad (1.6)$$

$$\text{Rankine çevriminin ısı verimi: } \eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_g} = 1 - \frac{q_ç}{q_g} \quad (1.7)$$

ifade edilir.

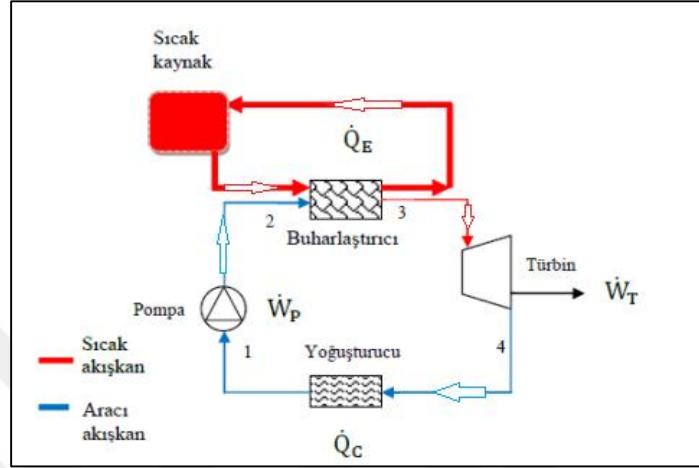
1.6. Organik Rankine Çevrimi

Buhardan elektrik üretimi sağlayan termal çevrim, düşük sıcaklıklarda da etkin bir şekilde elektrik üretimi sağlayabilmek için, su buharının yerine daha yüksek buhar basıncı sağlayabilen ve genellikle gazlarla birlikte kullanılan soğutucu sistemleri kullanılmaktadır.

Günümüzde, düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarının enerjisinin kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Güneş enerjisi, egzoz enerjisi ve jeotermal kaynaklar, bu kaynaklar arasında yer almaktadır. Basit bir Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), pompa, buharlaştırıcı (evaporatör), türbin ve yoğuşturucudan (kondenser) oluşur. Şekil 1.9'da görüldüğü gibi, bu sistemin çalışma prensibi, evaporatör içindeki organik çalışma akışkanını sıcak

1. GİRİŞ

kaynaktaki ısıyla buharlaştırmaktır. Evaporatör, bir ısı değiştiricisi olarak kullanılır. Bu işlemden sonra, akışkan yüksek sıcaklık ve basınçta olur. Yüksek basınçtaki buhar türbine gönderilir ve jeneratörle birleşerek elektrik üretir. Bu sistemlerde, kaynaktan elde edilen ısının verimini artırmak için buharlaştırıcıdan sonra ön ısıtıcı kullanılır. ORÇ sistemlerinde kullanılacak akışkanın seçimi, verim ve çevresel etki açısından son derece önemlidir (Yılmaz 2013).



Şekil 1.9. Basit ORÇ sistemi

Enerji analizleri için;

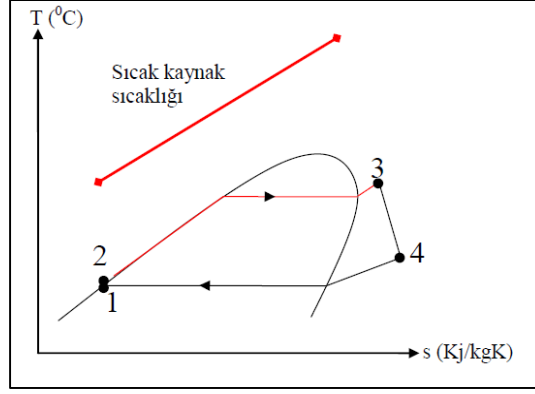
$$\text{Pompa: } \dot{W}_p = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m} \frac{(h_{2s} - h_1)}{\eta_p} \quad (1.8)$$

$$\text{Evaporatör: } \dot{Q}_{evap} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (1.9)$$

$$\text{Türbin: } \dot{W}_t = \dot{m}(h_3 - h_4) = \dot{m} \frac{(h_3 - h_{4s})}{\eta_T} \quad (1.10)$$

$$\text{Kondenser: } \dot{Q}_{kond} = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad (1.11)$$

Şekil 1.10'da ORÇ sisteminin (T-S) diyagramı verilmiştir.



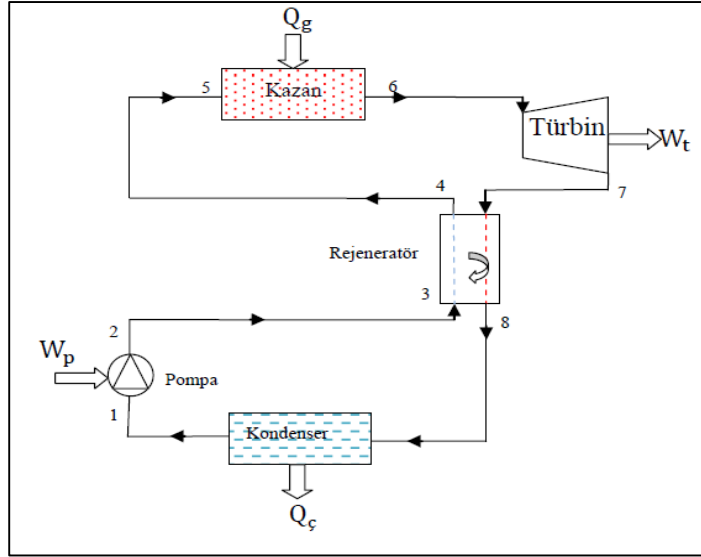
Şekil 1.10. ORÇ sıcaklık entropi (T-S) diyagramı

ORC sistemlerde kullanılan organik akışkan aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekmektedir (Bombarda et al. 2010).

- Düşük kaynama ve donma noktası.
- Yüksek kritik sıcaklığı.
- Yüksek buharlaşma sıcaklığı.
- Yüksek yoğunluk.
- Düşük çevre kirliliği.
- Emniyet

1.6.1. Rejeneratif organik rankine çevrimi

Rejeneratör, ısı eşanjörleri arasında yer alarak, öncelikle dolgu maddesi tarafından depolanan ısıyı daha sonra dolgu maddesi içerisinde geçen akışkana aktaran bir ısı transfer cihazıdır. Bu tür eşanjörlerde akışkanlar birbirleriyle temas etmezler. Rejeneratörler, termik santraller gibi sektörlerde sıkça kullanılır. Basit ORÇ sistemlerinden farklı olarak, bir rejeneratör kullanılarak akışkana ön ısıtma sağlanması amaçlanmıştır. Bu sistem, türbinden çıkan sıcak akışkan ile pompadan çıkan soğuk akışkanın kendi içinde bir ısı değiştiricisi kullanarak ön ısıtma sağlanması yoluyla sistemin verimliliğini artırır. Şekil 1.11’de rejeneratif ORÇ sisteminin hat akışı gösterilmektedir (Yağlı 2018).

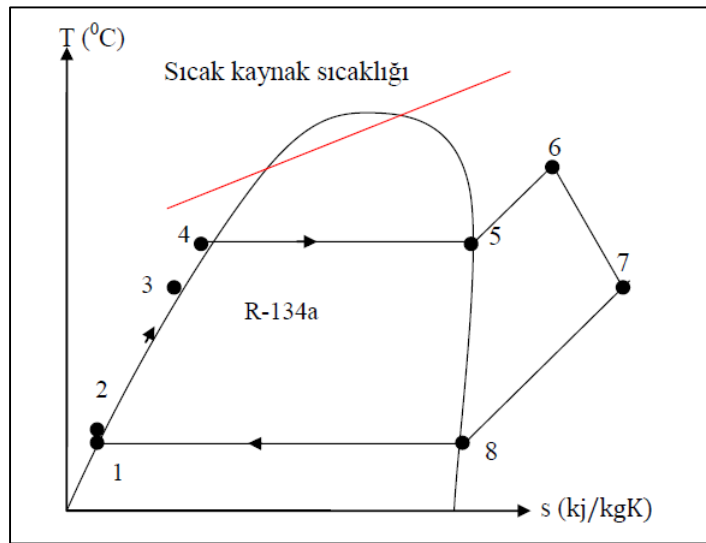


Şekil 1.11. Rejeneratif organik rankine çevrimi (ORÇ) hat şeması

Şekil 1.12’de, R-134a soğutucu akışkanı kullanılarak çalışan rejeneratif Organik Rankine çevriminin T-s diyagramı verilmiştir. Bu diyagramda, kazan çıkışında akışkan aşırı kızdırılmış bölgededir.

Rejeneratif Organik Rankine Çevrimi için enerji denklemi rejeneratörde 1.12 eşitliği ile ifade edilebilir.

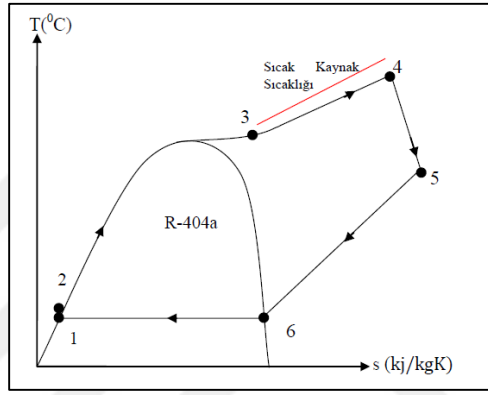
$$(h_3 - h_2) = (h_7 - h_8) \quad (1.12)$$



Şekil 1.12. Rejeneratif organik rankine çevriminin T-S diyagramı

1.6.2. Süperkritik organik rankine çevrimi

ORÇ sistemlerinin diğer tasarımı olan süperkritik ORÇ'de, akışkan kritik nokta üzerinde çalışır. Şekil 1.13'te, R-404a akışkanı kullanılarak oluşturulan süperkritik ORÇ sisteminin T-s diyagramı verilmiştir. Çevrim boyunca, akışkan türbinde genişler, soğur ve alt basınç bölgesine ulaşana kadar yoğunlaşır, tekrar basınçlandırılmadan önce alt kritik noktaya ulaşır ve buradan basıncı artır, süperkritik noktaya ulaşır. Süperkritik ORÇ sistemlerinde, çalışma akışkanının ısıtılması sırasında sabit bir basınç olmadığı için sabit bir sıcaklık yoktur. (Zamfirescu and Dincer 2008).



Şekil 1.13. Süperkritik organik rankine çevriminin T-S diyagramı

1.7. Organik Rankine Çevrimi Sistemlerin Avantajları

ORÇ sistemleri, buhar türbinlerine göre bazı avantajlara sahiptir. Buhar türbinleri daha yüksek sıcaklık ve basınçlarda çalıştıkları için genellikle daha verimli olsa da, ORÇ sistemleri de kendilerine özgü özelliklerinden dolayı belirli kullanım yerlerinde tercih edilebilirler (Özden ve Paul 2011).

- ORÇ, bileşenlerin daha düşük mekanik ve termal gerilimlere maruz kaldığı daha düşük sıcaklık ve basınçlarda çalışır. Bu nedenle bileşen ömrü daha uzundur.
- ORÇ, daha düşük sıcaklık ve basınçlarda çalıştığından personel gerektirmez ve uzaktan kontrol edilebilir.
- ORÇ, çalışma sıvısı olarak su/buhar yerine farklı sıvılar kullanabilir, bu nedenle su kullanımı gereksizdir.
- ORÇ türbini, buhar türbinlerine göre daha düşük hızda döner ve bu da mekanik zorlamayı azaltır.

1.8. Organik İş Akışkanları

Organik soğutucu akışkanlar, soğutma sistemlerinde kullanılan ve çevresel etkileri daha az olan akışkanlardır. Geleneksel soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan hidroflorokarbonlar (HFC'ler) gibi sentetik gazlar, sera etkisine ve ozon tabakasının incelmeye katkısında bulunabilir. Bu nedenle, çevresel olarak daha sürdürülebilir alternatifler arayışı organik soğutucu akışkanları ön plana çıkarmıştır (Kajurek et al. 2019).

Organik soğutucu akışkanlar, genellikle doğal kaynaklardan elde edilen ve daha düşük çevresel etkilere sahip olan bileşiklerdir. Bu akışkanlar, genellikle hidrokarbonlar, karbondioksit (CO₂) veya hidroflorokarbonlar (HFC'ler) gibi doğal veya sentetik bileşikler olabilir.

Hidroflorokarbonlar, kloroflorokarbonlara (CFC'ler) ve hidrokloroflorokarbonlara (HCFC'ler) göre ozon tabakasına daha az zarar verme potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, çevresel etkileri daha az olması ve daha düşük sera gazı potansiyeli nedeniyle HFC'ler, CFC ve HCFC'lerin yerini almıştır. Ancak, HFC'lerin küresel ısınmaya katkıda bulunan etkileri vardır ve bu nedenle çevresel etkileri azaltmak için alternatif çözümler araştırılmaktadır.

ORÇ'lerde yaygın olarak kullanılan soğutucu akışkanlar (yani, kloro-floro-karbonlar (CFC), hidro kloro-floro-karbonlar (HCFC) ve hidro-floro-karbonlar (HFC) arasında, CFC'lerin çevre dostu olmadığı daha sonra keşfedilmiştir ve kullanımlarını durdurmak veya bileşimlerini değiştirmek için adımlar atılmıştır. Çevresel hususlar arasında küresel ısınma potansiyeli (GWP), ozon tabakasını inceltme potansiyeli (ODP), toksisite, yanıcılık vb. yer alır. (Wang et al. 2010) tarafından yapılan bir çalışmada GWP'leri ile birlikte Tablo 1.1'de ODP'siz bu iş akışkanlarının bazılarının genel özellikleri sunulmuştur. Burada geçen iş akışkanları olan R134a ve R245fa HFC gurubundadırlar.

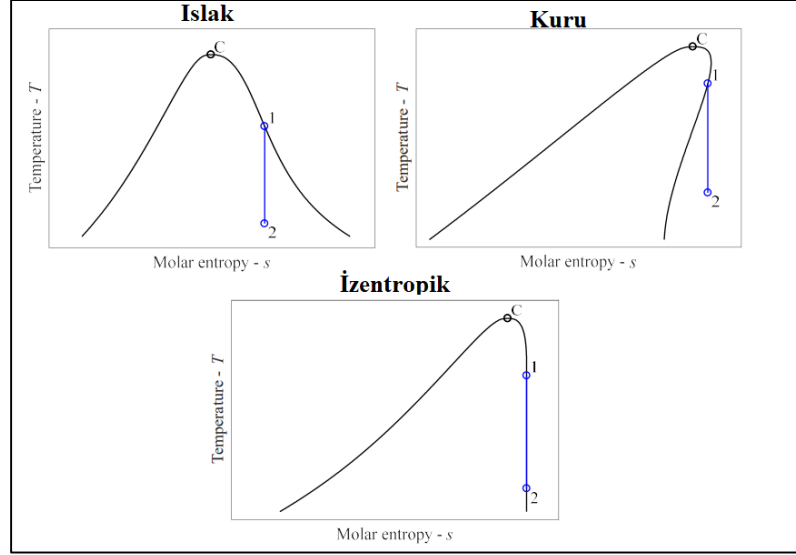
1. GİRİŞ

Tablo 1.1. Çalışmada kullanılan soğutucu akışkan özellikleri (Wang et al. 2010)

Soğutucu Akışkan	Molar Kütle (g/mol)	Kritik Sıcaklık (°C)	Kritik Basınç (MPa)	GWP (100 yıl)	Formül
R134a	102,03	101,1	4,06	1.300	C ₂ F ₄ H ₂
R245fa	134,05	154,1	3,64	950	C ₃ F ₅ H ₃

Şekil 1.14'den de görüleceği gibi iş akışkanları ıslak, kuru ve izentropik olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma doymuş buhar eğrisinin eğimine bağlı olarak değişmektedir. Klasik ıslak iş akışkanına örnek olarak su gösterilebilir. Suyun kullanıldığı çeşitli çalışmalarda atık ısı geri kazanımı uygulamaları gerçekleştirilmiş olsa bile çeşitli sorunlara sebep olduğu açıktır. Bu sorunlardan birisi aşırı kızdırma gerektirmesidir. Aksi takdirde türbin genişleme prosesinin sonlarına doğru yoğunlaşma bölgesine yaklaşmakta ve sıvı damlacıklarının oluşma riski artarak türbine zarar verebilmektedir. Bundan dolayı çoğunlukla kuru veya izentropik iş akışkanları tercih edilir. Birçok araştırmacı ideal iş akışkanı tanımlamak için çalışmalar yürütmüştür (Hountalas et al. 2007; Hung et al. 1997; Mago et al. 2008; Maizza and Maizza 1996; Niggemann 1979; Vijayaraghavan and Goswami 2005). İş akışkanının kuru veya izentropik olması sayesinde aşırı kızdırma zorunluluğu ortadan kalkmakta ve bu sayede çevrim verimi artırılabilir.

Bu çalışmalar incelendiğinde ideal iş akışkanının, üzerinde durulan özel uygulama için verimi en yüksek seviyeye çıkararak akışkan olduğu anlaşılmaktadır dolayısıyla her durum için aynı iş akışkanı kullanımı uygun olmayacaktır. Ayrıca herhangi bir sızma durumunda istenmeyen olayların gerçekleşme riskini azaltmak için iş akışkanlarının parlama riski açısından güvenli olması ve çevre üzerindeki etkisi minimum olması beklenir.



Şekil 1.14. Islak, kuru ve izentropik iş akışkanlarının T-S diyagramları (Györke et al. 2019).

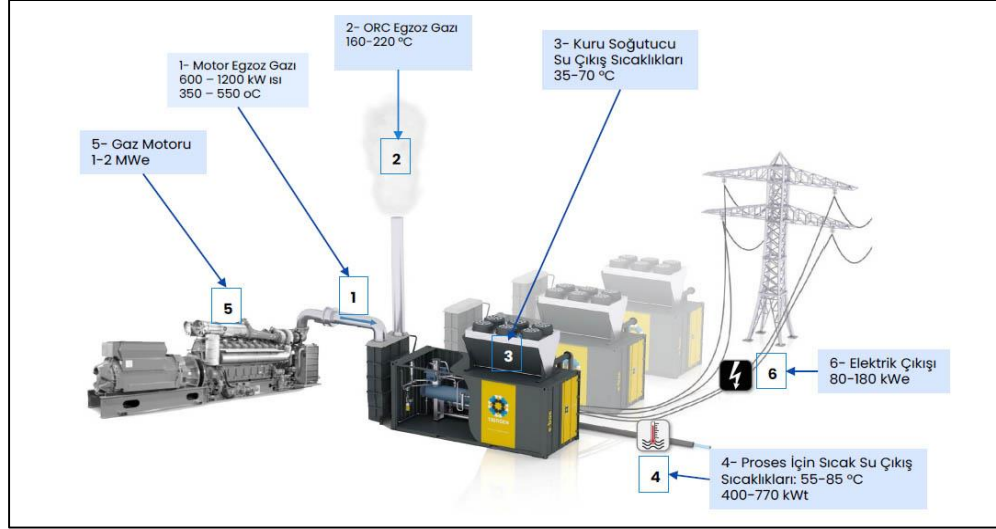
1.9. Atık Isı Geri Kazanım Sistemleri

Atık ısı geri kazanımı, enerji verimliliğini artırmak için son derece önemlidir. Günümüzdeki teknolojiler, mevcut proseslerden kaynaklanan fazla ısıyı yakalayıp ısıtma veya elektrik üretme gibi başka amaçlar için tekrar kullanma imkânı sunmaktadır. Hafif endüstriden ağır endüstriye kadar birçok sektörde büyük miktarda atık ısı oluşur ve bu ısı, kullanılmayan bir kaynak olarak enerji tasarrufu ve emisyon azaltma açısından büyük potansiyele sahiptir.

İyi tasarlanmış ısı eşanjörü teknolojisi kullanarak ısıyı geri kazanmak, verimliliği artırmanın kolay ve etkili bir yoludur. Bu alanda geniş deneyime sahip olan Alfa Laval (Anonim 2023b) gibi şirketler, atık ısıyı çeşitli endüstrilerdeki müşterilerle birlikte yeni, üretken ve karlı şekillerde kullanmayı amaçlayan çözümler geliştirmektedir. Teknolojileri, yüksek sıcaklıklardaki atık ısıyı yakalamakla kalmayıp, aynı zamanda ısı pompalarını kullanarak daha düşük sıcaklıklardaki ısıyı da geri kazanma ve kullanma yeteneğine sahiptir. Örneğin, veri merkezlerinden veya atık su ve deniz suyundan elde edilen ısı, bölgesel ısıtma için kullanılabilir ve bu da enerji tasarrufu sağlar.

Atık ısı geri kazanımı, sürdürülebilir enerji yönetimi stratejilerinin önemli bir parçasıdır ve endüstrilerin enerji verimliliğini artırmalarına ve çevresel etkilerini azaltmalarına yardımcı olur (Anonim 2023b).

1. GİRİŞ



Şekil 1.15. ORÇ (Organik Rankine Çevrimi) teknolojisi

Şekil 1.15’de ORÇ (Organik Rankine Çevrimi) teknolojisi, sıcak bir kaynaktan alınan ısıyı kullanarak buharlaştırıcı içindeki organik çalışma sıvısını buharlaştırarak elektrik üretir. Seçilen iş akışkanı, silikon bazlı sıvılar veya düşük sıcaklıklar için hidrokarbon veya soğutucu bazlı sıvılar gibi olabilir. Basınçlı buhar daha sonra türbinlere yönlendirilir ve jeneratörle birleştiğinde elektrik enerjisi üretilir. Buhar, yoğunlaştırıcıda tekrar sıvı hale dönüştürülür. Bu aşamada soğutma kulesi, yeraltı suyu veya akarsu gibi bir soğutucu kullanılır. Ayrıca hava soğutma sistemi de alternatif olarak tercih edilebilir. Sonrasında, soğutucu pompa çalışma sıvısını tekrar buharlaştırıcıya pompalar ve bu kapalı döngü süreci tekrarlanır. Sıcak sıvı ısı kaynağı olarak kullanıldığından, yakıt maliyeti sıfırdır. Ayrıca, ORÇ enerji sistemi atmosfere herhangi bir salınım oluşturmadığı için yanma gerçekleşmez.

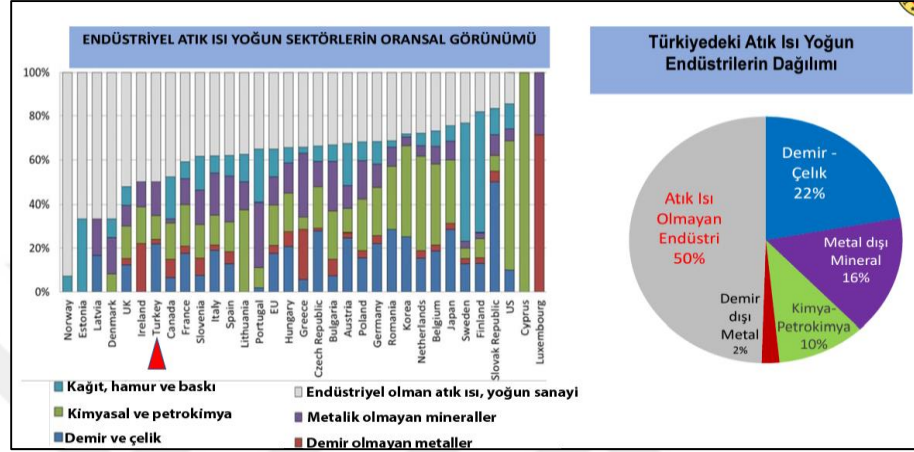
Sıcak kaynaklar genellikle sıcak sıvı veya gaz şeklinde bulunur. Bu tür kaynaklardan gelen ısı, atık ısı kaynağı veya diğer kısıtlamalara bağlı olarak, ORÇ çalışma sıvısına doğrudan veya dolaylı olarak iletilir. Sıvı haldeki atık ısı kaynakları genellikle doğrudan ORÇ ünitesiyle birleştirilir. Gaz halindeki ısı kaynakları ise dolaylı yollarla birleştirilir (Anonim 2023a).

1.9.1. Atık ısı geri kazanım sistemlerinin kullanım alanları

Atık ısı geri kazanım sistemlerini egzoz-geri dönüş yoluyla kullanım alanlarını Şekil 1.16’da verildiği gibi sıralayacak olursak;

1. GİRİŞ

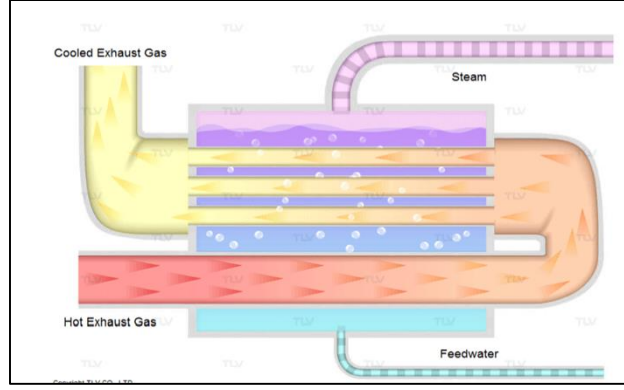
- Biyogaz Santralleri
- Maden Gazı
- Çöp Gazı
- Kojen-Trijen
- Şebeke Dışı Üretim
- Gemi Endüstrisi



Şekil 1.16. Atık ısı geri kazanım sistemlerinin kullanım alanları (Aydın 2022)

Şekil 1.17'de egzoz gazlarıyla atık ısı geri kazanım sistemi şematik olarak gösterilmiştir. Atık ısı geri kazanım sistemlerinin atık ısı (proses ısısı) yoluyla kullanım alanlarını sıralayacak olursak;

- Baca
- Kimya Endüstrisi
- Cam Endüstrisi
- Katı Atık Yakma
- Demir Endüstrisi
- Biyokütle
- Solar Termal
- Jeotermal alanlardır (Anonim 2023a).



Şekil 1.17. Egzoz gazlarıyla atık ısı geri kazanımı (Aydın 2022)

1.9.2. Atık ısı geri kazanım sistemlerinin avantajları

ORÇ sistemi, atık ısı kaynaklarından elektrik enerjisi üretirken birkaç avantaja sahiptir:

- **Sürdürülebilirlik:** ORÇ teknolojisi, atık ısı kaynaklarını geri kazanarak yenilenebilir enerji üretimine katkıda bulunur. Bu, enerji kaynaklarının daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar ve çevresel etkileri azaltır.
- **Yakıt Tasarrufu:** ORÇ sistemi, atık ısıyı kullanarak elektrik enerjisi ürettiği için yakıt tüketimini azaltır. Özellikle endüstriyel tesislerde ve enerji üretimi tesislerinde ortaya çıkan atık ısı kaynaklarından yararlanarak, ek enerji üretimi sağlanırken yakıt maliyetleri düşürülebilir.
- **Verimlilik:** ORÇ sistemi, atık ısı kaynaklarını değerlendirerek enerji verimliliğini artırır. Bu sayede, kullanılan kaynakların enerji potansiyeli daha etkin bir şekilde kullanılır ve enerji israfı minimize edilir.
- **Çevresel Etkilerin Azaltılması:** ORÇ sistemi, atık ısı kaynaklarından enerji ürettiği için doğal kaynakların tüketimini azaltır ve çevresel etkileri en aza indirir. Bu sistem, daha az sera gazı emisyonu ve hava kirliliği oluşturur, böylece çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunur.
- **Esneklik:** ORÇ sistemi, farklı sıcaklık ve basınç koşullarında çalışabilme esnekliğine sahiptir. Bu nedenle, çeşitli endüstriyel uygulamalarda ve enerji üretim tesislerinde kullanılabilir. Farklı atık ısı kaynaklarının yanı sıra jeotermal kaynaklar, güneş enerjisi ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları da ORÇ sistemiyle entegre edilebilir.

- **Ekonomik Geri Dönüşüm:** ORÇ sistemi, atık ısı kaynaklarını değerlendirmek suretiyle ekonomik fayda sağlar. Atık ısı kaynaklarının kullanımıyla elektrik enerjisi üretilerek enerji maliyetleri düşürülür ve enerji verimliliği artırılır. Bu da uzun vadede ekonomik geri dönüşüm sağlayabilir (Anonim 2023a).

Atık ısı geri kazanım sistemlerinin dezavantajları ise şöyledir;

- Genellikle yaygın olmadığından, atık ısı geri kazanım sistemleri oldukça maliyetli olabilir.
- Öte yandan, proses sonucu oluşan ısının kalitesi, sistemi zorlayan büyük bir dezavantajdır (Sarıbuğa 2013).

1.9.3. Atık ısı geri kazanım sistemlerinin önemi

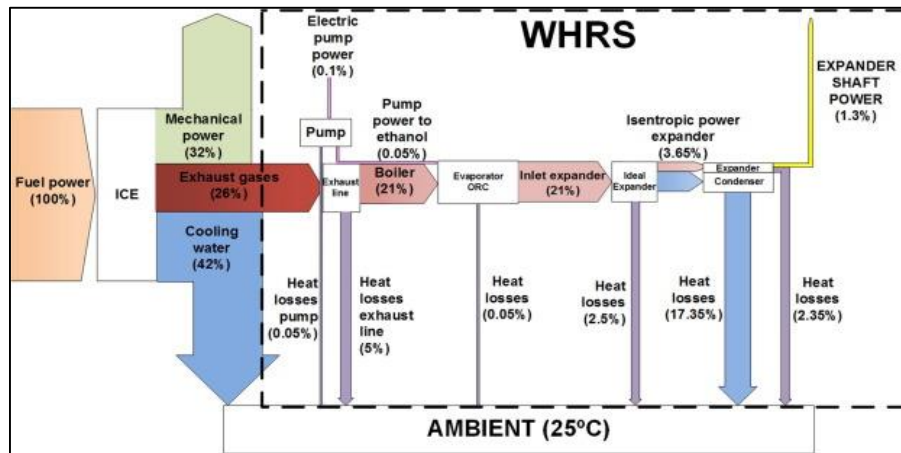
Atık ısı geri kazanımı, enerji verimliliğini artırmak açısından son derece önemlidir. Günümüzde, teknolojinin gelişimiyle birlikte, mevcut proseslerden kaynaklanan fazla ısıyı yakalama ve başka amaçlar için kullanma imkânı sağlanmıştır. Bu, ısıtma veya elektrik üretimi gibi farklı amaçlar için kullanılacak potansiyel bir kaynağın değerlendirilmesini sağlar. Farklı endüstrilerde, hafif sanayiden ağır sanayiye kadar pek çok alanda, büyük miktarda atık ısı üretilir ve bu ısı, enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı için kullanılmayan bir kaynaktır (Anonim 2023b).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Lu et al. yaptıkları çalışmada 1 kW kapasiteli Organik Rankine Çevrimini, 6.5 kW fren gücüne sahip bir motorun soğutma suyu ve egzoz enerjisini geri kazanım amacıyla uygulamışlardır. Bu çalışmada altı farklı iş akışkanının sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre R134a ve R125a akışkanları, genleşme sıcaklığının 150°C den büyük olması durumunda daha iyi sonuçlar sergilemiştir. En yüksek güç ve termal verim 1.2 kW ve %13 olarak kaydedilmiştir (Lu et al. 2017).

Fiat Research Center'de yapılan bir çalışma sonuçlarına göre her 400-500 W ısı 1 enerjinin geri kazanılması sayesinde 6-7 g/km CO₂ emisyonunda azalma sağlanabilir. (Brignone and Ziggiotti 2012; Stobart et al. 2010) tarafından yapılan çalışmada ise atık ısı geri kazanımı sayesinde otomobillerde %3,9-4,7 ve otobüslerde %7,4 kadar yakıt tüketiminde azalma sağlanabileceği ifade edilmiştir.

Şekil 2.1.'de Galindo et al. (2015) tarafından yapılan çalışma sonuçlarına göre türetilen ve motorun enerji balansını ortaya koyan Sankey diyagramı görülmektedir. İki bölüme ayrılabilir bu diyagramın birinci bölümünde motorun mekanik veriminin %32, egzoz gaz enerjisinin %26 ve soğutma suyu enerjisinin ise %42 olduğu görülmektedir. İkinci bölüm olan egzoz gazlarından atık ısı geri kazanımının detaylandırıldığı bölümde ise kurulan ORÇ sistemi sayesinde yakıt enerjisinin %1,3'ünün geri kazanıldığı anlaşılmaktadır.

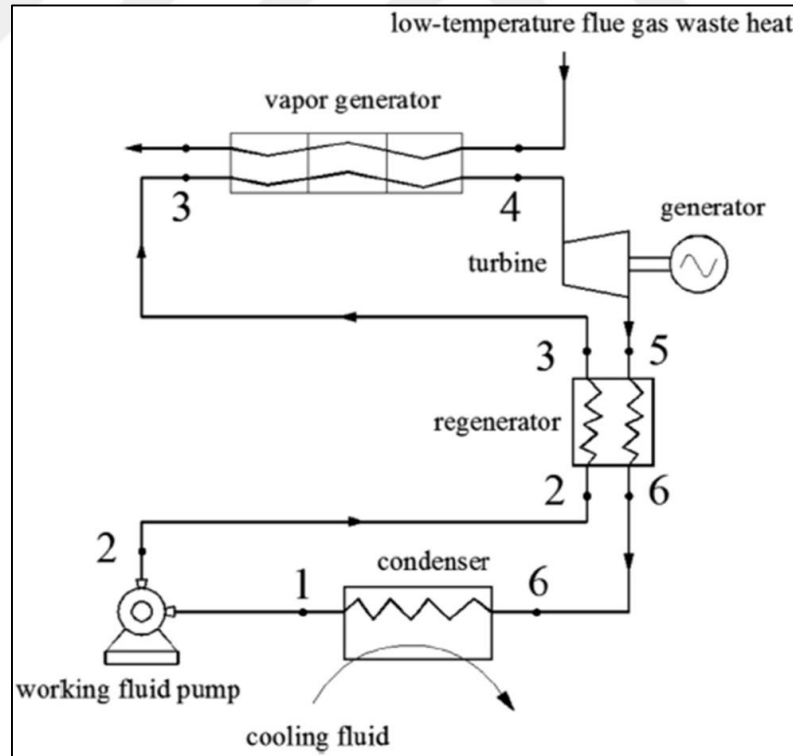


Şekil 2.1. 30 kW bir motorun sankey diyagramı

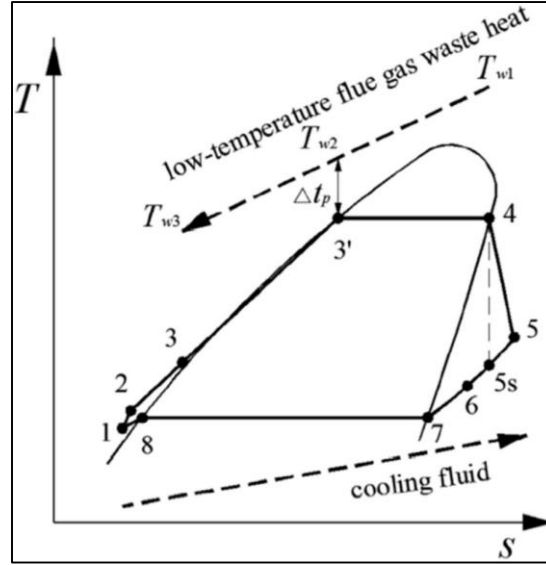
2. KAYNAK ÖZETLERİ

Srinivasan et al. (2010) Organik Rankine çevrimi kullanarak bir içten yanmalı motorunun egzoz atık ısısını incelediler. Bazı emisyonlar (NO_x ve CO_2) ölçüldü ve ORÇ turboşarj ve egzoz gazı geri kazanımı ile yakıt dönüşüm verimliliğinde geniş bir motor yükü ve enjeksiyon zamanı aralığında iyileşmeleri incelendiler. Çalışmaları, yüksek PPTD'nin (Pinch Point Temperature Difference) buharlaştırıcıda çeşitli motor çalışma koşullarına bakılmaksızın daha fazla ekserji yok olmasına neden olduğunu ortaya koymuştur.

Ge et al. (2015) Bir Organik Rankine Çevriminde akış ve ısı transferi analizini yapmışlardır. Çalışmada kullanılan farklı cihazların şematik düzenlemesi Şekil 2.2'de verilmiş olup, termodinamik haller T-s diyagramında Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Çalışmaları, iki karakteristik sıcaklık ortaya koymuştur. Yazarlar, bu sıcaklıkları T_{w1} ve T_{w2} olarak adlandırmışlardır ve egzoz gazı giriş sıcaklığının (T_{w1}) bu karakteristik sıcaklıklar arasında veya bunlara eşit olduğu durumda regeneratörün kullanılması gerektiğini belirlemişlerdir.



Şekil 2.2. Yapılan çalışmada kullanılan ekipmanlar (Ge et al. 2015)

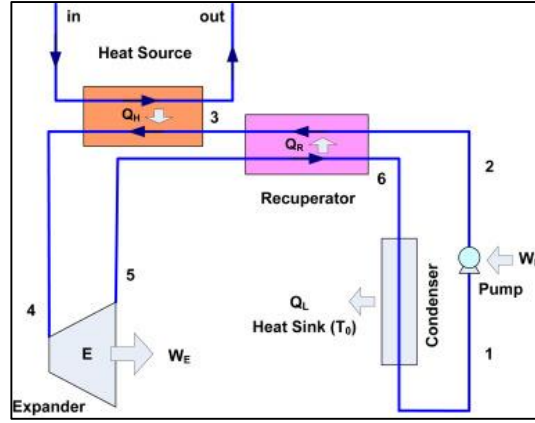


Şekil 2.3. Yapılan çalışmada ortaya konan sıcaklıklar (Ge et al. 2015)

Wang et al. (2017) regeneratif süperkritik-subkritik çift çevrimli bir organik Rankine sistemi önerdiler ve regeneratif ısı değıştiricisinin etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, türbin giriş sıcaklığı için bir eşik değeri vererek, regenerasyonun yararlı olduğu noktayı belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda, türbin giriş sıcaklığındaki herhangi bir artışın termal verimde bir iyileşme sağladığı belirtilmiştir. (Mago et al. 2008), Regeneratif Organik Rankine çevrimi Temel Organik Rankine çevrimi ile karşılaştırmışlar ve birinci ve ikinci yasa verimlilikleri açısından Regeneratif Organik Rankine çevriminin üstün olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, aynı güç üretimi için regeneratif Organik Rankine Çevriminin daha az atık ısı kullandığını göstermişlerdir.

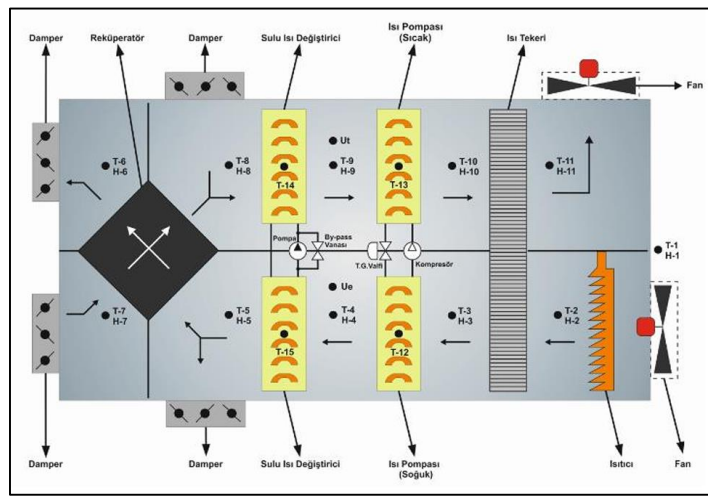
Kim et al. (2016) Tek döngülü bir Organik Rankine sistemini önermişlerdir ve bu düzenleme Şekil 2.4'te verilmiştir. Önerilen sistem hem düşük sıcaklık kaynaklarından hem de yüksek sıcaklık kaynaklarından faydalanarak atık ısı kullanmaktadır. Egzoz gazı yüksek sıcaklık kaynağı iken düşük sıcaklık kaynağı motor soğutucusu olacak şekilde çalışmalar yapmışlardır. Önerilen yapılandırmada, çalışma akışkanını önceden ısıtmak için düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık rejenatörleri kullanılmıştır.

Birçok çalışmacı organik Rankine çevriminin atık ısı geri kazanım sistemlerinin önemi konusunda literatür taraması çalışması yaparak çeşitli değerlendirmelerde bulunmuşlardır (Lecompte et al. 2015; Mahmoudi et al. 2018; Nadaf and Gangavati 2014; Sprouse III and Depcik 2013; T. Wang et al. 2011).



Şekil 2.4. Önerilen tek döngülü bir organik rankine sistemi (Kim et al. 2016)

Karanfil et al. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, atık ısı geri kazanım sistemleri üzerinde durulmuş ve sanayide sıkça kullanılan iki tip atık ısı geri kazanım sistemi (ısı tekeri ve reküperatör) deneysel olarak incelenmiştir. Verimlilik artırılması amacıyla Taguchi metodu kullanılarak optimum şartlar belirlenmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, ısı tekeri için %100 ısı tekeri devir hızı, %60 Fan 1 hızı ve %80 Fan 2 hızının optimum koşullar olduğu tespit edilmiştir. Reküperatör için ise 50 °C hava giriş sıcaklığı, %60 Fan 1 hızı ve %80 Fan 2 hızı optimum koşullar olarak belirlenmiştir. Doğrulama deneyleri sonucunda, ısı tekeri ve reküperatör sistemleri için sırasıyla %97 ve %73 en yüksek verim değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, yapılan analizlerin doğruluğunu göstermiş ve Taguchi metodunun uygulanabilirliğini kanıtlamıştır.



Şekil 2.5. Kullanılan atık ısı geri kazanım ünitesi şeması (Karanfil et al. 2020)

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Alchehabı (2023) tarafından yapılan çalışmada, içten yanmalı motorlarda termal verimin artırılması için termal bariyer (TB) kaplama uygulamalarının önemi vurgulanmaktadır. TB kaplaması, motorlardaki soğutma kayıplarını azaltarak ve emisyonları kontrol ederek termik verimi artırmakta, motor performansını ve egzoz sıcaklıklarını yükseltmektedir. Ayrıca, yanma odası elemanlarını termal korozyondan koruyarak uzun ömürlü olmalarını sağlamaktadır. TB kaplamasının egzoz sıcaklıklarını artırması, termoelektrik jeneratörlü (TEJ) atık ısı geri kazanım sistemlerinin egzoz gazından daha fazla enerji geri kazanabilme potansiyelini artırmaktadır. Bu çalışmada, tek silindirli, buji ateşlemeli, 2 zamanlı bir benzinli motor üzerinde Yitriya Stabilize Zirkonya (YSZ) malzemesi ile yanma odası TB kaplaması yapılarak, motorun performansı ve egzoz atık ısı geri kazanımı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler sonucunda, TB kaplanmış motorun maksimum motor momenti TB kaplamasız motora göre % 6,024 oranında artmıştır. Ayrıca, TB kaplamalı motorun 6.000 d/d'da ortalama egzoz gazı sıcaklık farkı TB kaplamasız motora göre 34,875 °C ve % 29,334 oranında artmıştır. Bununla birlikte, motorun efektif verimi maksimum % 5,89 artmış ve özgül yakıt tüketimi (ÖYT) maksimum % 5,82 azalmıştır. Bu bulgular, TB kaplamasının içten yanmalı motorlarda termal verim artışı ve egzoz atık ısı geri kazanımı potansiyelini artırma konusunda olumlu etkilere sahip olduğunu göstermektedir. TB kaplamaları, motorların performansını iyileştirirken enerji verimliliğini artırarak daha sürdürülebilir bir motor çalışması sağlayabilir.

Boz (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, enerjinin verimli bir şekilde üretilmesi ve kullanılması ile ilgili dünya genelindeki sorunlara ve çevresel sorunlara odaklanılmıştır. Atık ısı geri kazanım sistemleri, bu sorunlara etkili bir çözüm sunabilen bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Çalışma, Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) kullanarak sabit içten yanmalı motorlarda atık ısı geri kazanımı potansiyelini araştırmaktadır. Çalışma kapsamında, üç farklı dizel motorun egzoz gazları ısı kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu amaçla, üç farklı ORÇ kurulumu tasarlanmıştır: Basit Organik Rankine Çevrimi (BORÇ) egzoz gazını termal ısı kaynağı olarak kullanırken, Rejeneratif Organik Rankine Çevrimi (RORÇ) ve Ön Isıtımlı ve Rejeneratif Organik Rankine Çevrimi (OIRORÇ) ise egzoz gazını ve motor soğutma suyunu termal ısı kaynağı olarak kullanmaktadır. Ayrıca, ozon tabakası delinmesi ve küresel ısınma potansiyeli gibi çevresel faktörleri dikkate alarak, sekiz farklı çalışma sıvısı seçilmiş ve bunların farklı kimyasal sınıflar arasındaki farklar değerlendirilmiştir. En uygun çalışma akışkanının

seçimi için bir prosedür geliştirilmiştir. Termodinamiğin birinci kanunu çerçevesinde, en yüksek ısıl verimi elde etmek için çalışma akışkanları ve çevrim tipleri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, RORÇ ve R-1233zd(E) çalışma sıvısı kombinasyonu ile %18'lik bir termal verim elde edilmiştir.

Gürgen (2021) tarafından yapılan bir tez çalışmasında, yapay zeka yöntemleri kullanılarak gemi ana makinesi seçimi ve optimum ORÇ tabanlı atık ısı geri kazanım sistemi kurulumu konusu incelenmiştir. İlk olarak, konteyner, tanker ve dökme yük gemileri için ana makine gücünü tahmin etmek amacıyla yapay sinir ağı (YSA) modelleri geliştirilmiştir. Ardından, gemi ana makinesi seçiminde etkili kriterler bulanık AHP yöntemiyle değerlendirilmiştir. Son olarak, bir konteyner gemisi için optimum ORÇ tabanlı atık ısı geri kazanım sistemi araştırılmıştır. Bu amaçla, çok amaçlı gri kurt algoritması kullanılarak optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, YSA modellerinin gemilerde ana makine gücünü tahmin etmek için oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Bulanık AHP ile yapılan ana makine seçiminde en önemli üç kriter yakıt tüketimi, ana makinenin kolay işletilebilmesi ve bakım maliyeti olarak belirlenmiştir. Konteyner gemisi için yapılan ORÇ uygulamasında farklı iş akışkanları ve ORÇ yapıları kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda pareto çözümleri elde edilmiştir. Pareto çözümleri kullanarak termodinamik, ekonomik, çevresel etki ve tehlike seviyesi gibi kriterleri dikkate alan kapsamlı bir değerlendirme stratejisi ile nihai iş akışkanı belirlenmiştir. Analizler sonucunda, hem temel ORÇ hem de reküperatörlü ORC (RORC) için en uygun iş akışkanının R245fa olduğu tespit edilmiştir. R245fa iş akışkanı kullanılarak tasarım ve tasarım dışı çalışma koşulları için analizler gerçekleştirilmiştir. Son olarak, temel ORÇ ve RORÇ sistemleri karşılaştırılmış ve RORÇ sisteminin daha üstün olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, gemi ana makinesi seçiminde yapay zeka ve bulanık analiz yöntemlerinin kullanımının atık ısı geri kazanım sistemlerinin optimizasyonunda etkili olduğunu göstermektedir.

Ökmen (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, içten yanmalı bir motorun egzoz atık ısı enerjisinden faydalanarak elektrik enerjisi üretimi için kullanılan termoelektrik jeneratörde, optimum eşanjör yüzeyi sıcaklık dağılımının elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, deneysel çalışmalardan elde edilen egzoz gazı debisi ve sıcaklık değerleri kullanılarak egzoz gazı eşanjörünün iç yapısının farklı kanatçık sayısı, geometrisi ve düzenlemeleri sayısal olarak analiz edilmiştir. Çalışmada, üç farklı eşanjör

2. KAYNAK ÖZETLERİ

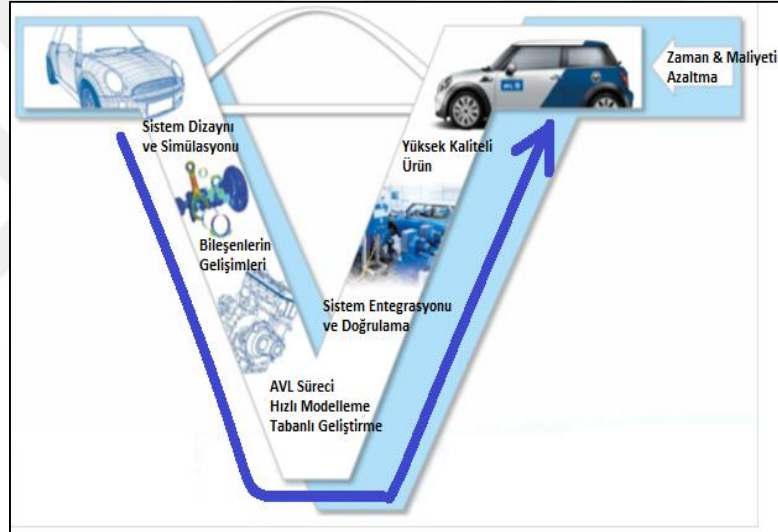
düzenlemesi kullanılmıştır: akordeon şekli, balık kılıcı şekli ve seri plaka düzenlemesi. Bu düzenlemelerin kanatçık geometrisi, kare, dikdörtgen, üçgen ve yamuk prizmalar yerine yuvarlak hatlara sahip yağmur damlası geometrisine benzeyen modellerle değiştirilmiştir. Ayrıca, egzoz eşanjörü akış boyunca iki eşit parçaya bölünerek her iki yüzeyi kullanılarak termoelektrik modüller yardımıyla elektrik üretimi gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Her bir model için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programında sıcaklık dağılımı, sıcaklık ve hız vektörleri, giriş-çıkış sıcaklıkları gibi parametrelerin analizi yapılmıştır. Bu analizler sayesinde farklı eşanjör düzenlemelerinin performansı karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma termoelektrik jeneratörlerde egzoz gazı eşanjörlerinin iç yapısının optimize edilmesi için farklı kanatçık düzenlemelerinin sayısal analizini sunmaktadır. Bu analizler, termoelektrik jeneratörlerin verimliliğini artırmak ve elektrik üretimini optimize etmek için tasarım sürecinde kullanılabilir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. AVL'ye genel bakış

AVL programı kaliteli ve sürekli modellerin oluşumu içerisindedir. Sürecin başında sistemin dizaynı, tüm bileşenlerin aktarma ve iletme organların gelişimi, hızlı modelleme ve kurulumu, sistemin araca uyumu, istenilen düzeyde kaliteli modellerin oluşumu açısından gelişim içindedir. Tüm süreç zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlamaktadır (AVL 2009).



Şekil 3.1. Entegre simülasyon yaklaşımı ile model tabanlı AVL geliştirme süreci (AVL 2009).

3.1.2. CRUISE™ M'ye genel bakış

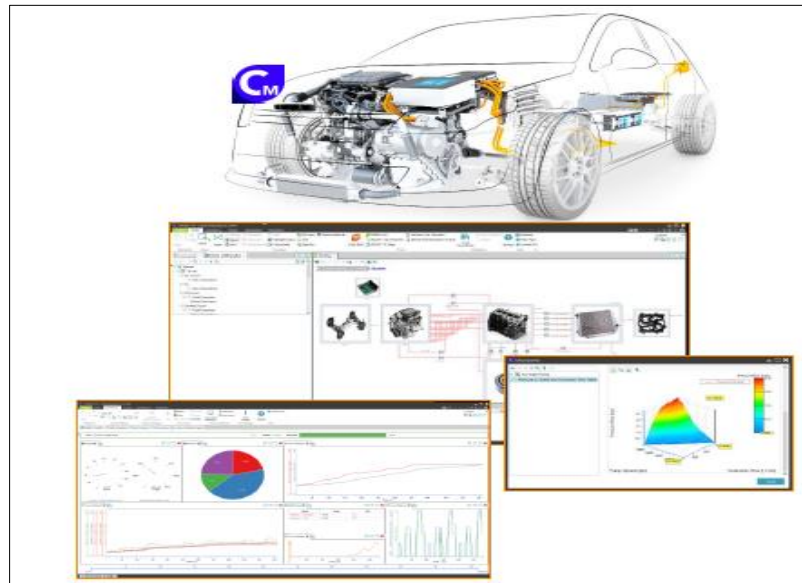
AVL CRUISE™ M, otomotiv mühendisleri ve araç geliştiricileri için bir simülasyon yazılımıdır. Bu yazılım, araç performansı, yakıt tüketimi, emisyonlar ve ses seviyeleri gibi birçok faktörü analiz ederek araç tasarımının optimize edilmesine yardımcı olur. Bunun yanında otomotiv endüstrisindeki geliştiricilerin araçların tasarımı, performansı ve emisyonlarını optimize etmelerine yardımcı olan kapsamlı bir araç simülasyon yazılımıdır (AVL 2009).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

AVL CRUISE™ M, motor, şanzıman, elektrikli motor ve araç sistemlerini simüle ederek, gerçek dünya sürüş koşullarına benzer senaryolarda araç performansını değerlendirebilirler. Böylece, araç geliştiricileri, farklı tasarım değişkenleri (motor boyutu, şanzıman dişlileri, aerodinamik vb.) için olası senaryoları test edebilir ve en iyi kombinasyonu bulabilirler

AVL CRUISE™ M, multidisipliner bir sistem platformudur. CRUISE™ M, motor, aktarma organları, elektrik kontrol sistemi, işlem mekanizması alanlarında kalitesi yüksek, gerçek zamanlı sistem elemanlarının sorunsuz bir şekilde entegre eden model tabanlı tasarlanmış programdır.

Programın amacı tamamlayıcı, açık ve tutarlı simülasyon yaklaşımıyla yüksek kaliteli modellerin yeni kullanılmasını ve entegrasyonunu sağlar. Sayısal çözümlerin verimli ve kullanım kolaylığı için ileri fizik yöntemleri ile araç simülasyonu için uyarlanmış bir programdır. 3. grup araçlara ve arayüz standartlarına (FMI) açık, yüksek esneklikte, ayrıntılı seviye modelleme yaklaşımı içeren model programıdır. CRUISE™ M sisteminin ve araç modellerinin, güç aktarma sistemi geliştirme sürecinin tamamında kullanılır. Şekil 3.2’de gözüken geliştirme süreçleri, sistemin yakıt verimliliği, emisyonlar, performans analizi, Termal Enerji Yönetim Sistemi, kalibrasyon, doğrulama ve gerçek zamanlı (HİL) test sistemlerinde kullanılmaktadır.

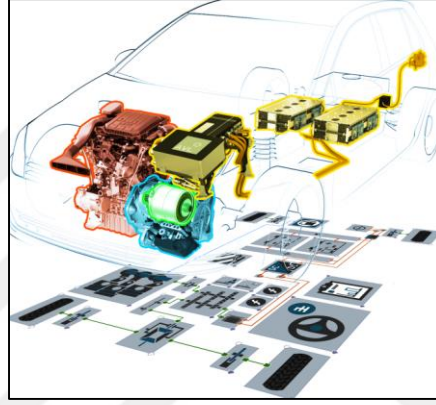


Şekil 3.2. AVL CRUISE™ M genel bakış (AVL 2009)

3.1.3. AVL CRUISE™ M modüler yapısı

AVL CRUISE™ M sistem simülasyonu çözümüne tek ortam sağlayan ve bu ortama ayrıntılı bir modelleme yaklaşımıyla Şekil 3.3’de olan tüm arayüzler bir ortamdan kullanılabilir. Araç modüler yapıları;

- ✓ Motor
- ✓ Soğutma-Yağlama
- ✓ Aktarma organları ve Elektrik
- ✓ Bakımdan Sonra



Şekil 3.3. AVL CRUISE™ M modüler yapısı (AVL 2023)

3.1.4. AVL CRUISE™ uygulama alanları ve fonksiyonları

Araç sistemi simülasyon platformu AVL CRUISE™ M, model tabanlı bir sistem geliştirme için tasarlanmıştır. Motor, aktarma organları, 1D sıvı akışı, bakımdan sonra, elektrik ve kontrol sistemi etki alanlarının yüksek kalitede, gerçek zamanlı yetenekli alt sistem modellerini sorunsuz bir şekilde entegre eder.

AVL CRUISE™ M programı içerdiği teknolojilerden bazıları aşağıdaki gibidir.

- ✓ İlk ve son işleme,
- ✓ Simülasyon ve süreç kontrolü,
- ✓ Parametreleştirme ve senaryo yönetimi,
- ✓ Deney Tasarımı ve optimizasyon,
- ✓ Tesis modellerinin hızlı ve kolay bir şekilde oluşturulması için ortak model yönetimi

AVL CRUISE™ M, multidisipliner bir sistem simülasyon çözümü olarak motor uygulama alanlarından bir kaç; soğutma ve yağlama, aktarma organları, iklimlendirme ve ısı pompaları gibi belirli uygulama alanlarının yanı sıra Isıtma, Havalandırma ve Klima (HVAC), Araç Termal Yönetim Sistemi (VTMS) ve Araç Enerji Yönetim Sistemi (VEMS) geliştirme, kontrol fonksiyonu geliştirme, gerçek zamanlı Donanım Döngüsü (HiL) üzerinde simülasyon modelinin yeniden kullanımı, test sistemleri gibi uygulama alanları bulunmaktadır.

AVL CRUISE™ M programı, soğutucu kütüphanesi ile HVAC simülasyon yetenekleri de sunar. İki fazlı akış problemlerini çözebilme özelliği sayesinde Mobil Hava Koşullandırma ve Atık Isı Geri Kazanımı için Organik Rankine Çevrimi simülasyonlarını elde etmek için kullanılabilir. AVL CRUISE™ M v2018.1'den itibaren, AVL ve TLK-Thermo GmbH arasındaki iş birliği kapsamında bu fonksiyonlar CRUISE™ M'e entegre edilmiştir (AVL 2009).

Yukarıda bahsedildiği gibi AVL CRUISE™ M, Rankine çevrimi analizini gerçekleştirmek için uygun bir yazılımdır. Bu yazılım, termodinamik çevrim analizinde yardımcı olan bir dizi araç sağlar. Rankine çevrimi analizini gerçekleştirmek için aşağıdaki adımları izlenebilir:

- Yazılımı açılır ve proje oluşturma sihirbazını kullanarak yeni bir proje oluşturulur.
- Sistem bileşenlerini modellemek için bileşen kütüphanesinden uygun bileşenleri seçilir ve sistem modeli oluşturulur.
- Termodinamik parametreleri belirlenir, örneğin, sıcaklık, basınç, entalpi, entropi gibi.
- Regeneratif ısıtıcı veya kondenser gibi sistemdeki özelliklerin ayarlarını belirlenir.
- Analizi başlatılır ve sonuçları incelenir.

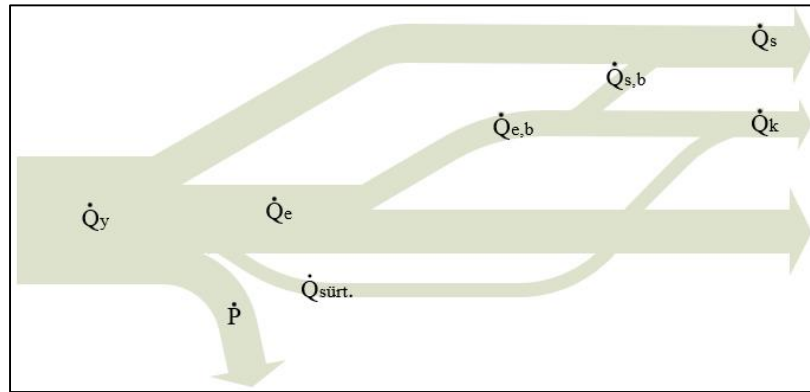
Bu adımları takip ederek, Rankine çevrimi analizi yapılabilir. AVL CRUISE™ M'nin kullanıcı dostu arayüzü ve etkileşimli grafiksel araçları sayesinde, sistem modelleri kolayca oluşturulabilir, termodinamik parametreleri tanımlanabilir ve sonuçlar hızlı ve kolay bir şekilde analiz edilebilir.

3.2. Yöntem

Rankine çevrimi, elektrik üretiminde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bu çevrimde, ısıtılan su buharlaştırılarak türbinde çalıştırılır ve bu sayede elektrik üretilir. ORÇ ise, normal Rankine çevrimlerine göre daha düşük sıcaklık ve basınç seviyelerinde çalışır. Bu sistemlerde organik akışkanlar kullanıldığı için, bu çevrimlere Organik Rankine Çevrimi adı verilir. Bu akışkanlar, çevre dostu ve sürdürülebilir bir seçenek olarak kabul edilir.

3.2.1. Motorlarda Enerji Dengesi Hesaplamaları

Motorlarda enerji dengesi hesaplamaları oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Şekil 3.5’de bu enerji etkileşimlerini gösteren diyagram verilmiştir ve bu diyagramlar Sankey diyagramları olarak bilinmektedir. Şekil 3.5’te daimî hal çalışma durumunda giren yakıt enerjisinin bir bölümünün efektif güç (\dot{P}_e) olarak geri alındığını, diğer kısımlarının karmaşık etkileşimler sonucunda kaybedildiğini göstermektedir. Yakıt enerjisinden kaybedilen diğer enerji başlıkları ise şunlardır: Sürtünmelere harcanan enerji ($\dot{Q}_{\text{sürt.}}$), egzoz gazlarıyla dışarı atılan enerji (\dot{Q}_e), egzoz gazlarından motor bloğuna olan ısı transferi ($\dot{Q}_{e,b}$), soğutma sıvısına transfer edilen enerji (\dot{Q}_s), soğutma sıvısından motor bloğuna olan ısı transferi ($\dot{Q}_{s,b}$) ve diğer kayıplardır (\dot{Q}_k).



Şekil 3.4. Motorlarda enerji dengesi (sankey) diyagramı

Aşağıda sırasıyla ilgili başlıklardaki enerji dengesi hesaplamaları hakkında bilgi verilecektir (Caresana 2011; Plint and Martyr 2007);

$$\dot{Q}_y = \dot{P}_e + \dot{Q}_s + \dot{Q}_e + \dot{Q}_d \quad (3.1)$$

Bu denklemde ;

\dot{Q}_y : Yakıt enerjisi (kW)

\dot{P}_e : Efektif güç (kW)

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

\dot{Q}_e : Egzoz kayıp enerjisi (kW)

\dot{Q}_d : Hesaplanamayan diğer kayıp enerji (kW)

Bu denklemde yer alan tüm ifadeler ise aşağıda açıklanmıştır.

Yakıt enerjisi Eş. (3.2) ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_y = \dot{m}_y \cdot H_u \quad (3.2)$$

Burada, \dot{m}_y yakıt kütle debisi (kg/s) ve H_u yakıt alt ısıl değeri. Efektif güç \dot{P}_e , Eş. (3.3) yardımıyla hesaplanır. Burada n devir sayısı (d/dk) ve M_d döndürme momentidir (Nm). Motorun nasıl çalıştığına yanı sıra motor boyutu ve geometrisine de bağlı olmak kaydıyla kranktan elde edilen efektif güç yakıt enerjisinin yaklaşık %20-45 kadarını kapsamaktadır (Pulkrabek 2004).

$$P_e = \frac{2\pi n M_d}{60 \cdot 1000} \text{ (kW)} \quad (3.3)$$

Soğutma sıvısına giden enerji ve egzoz kayıp enerjisi Eş. (3.4) ve Eş. (3.5) ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_s c_{p,s} \cdot \Delta T_s \text{ (kW)} \quad (3.4)$$

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_e \cdot c_{p,e} \cdot \Delta T_e \text{ (kW)} \quad (3.5)$$

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 ısıl kayıp enerjisidir. Egzoz gazlarındaki toplam güç kaybı ise toplam yakıt enerjisinin yaklaşık %25-45 aralığına denk gelmektedir

(Pulkrabek 2004). 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 ısıdır (kJ/kg.K).

Hesaplanamayan kayıp enerji, yukarıda ana başlıklar halinde verilen enerji ifadelerinin termodinamiğin birinci yasası uyarınca Eş. (3.1)'de yerine yazılmasıyla bulunur ve toplam kayıp enerji Eş. (3.6) ile hesaplanır.

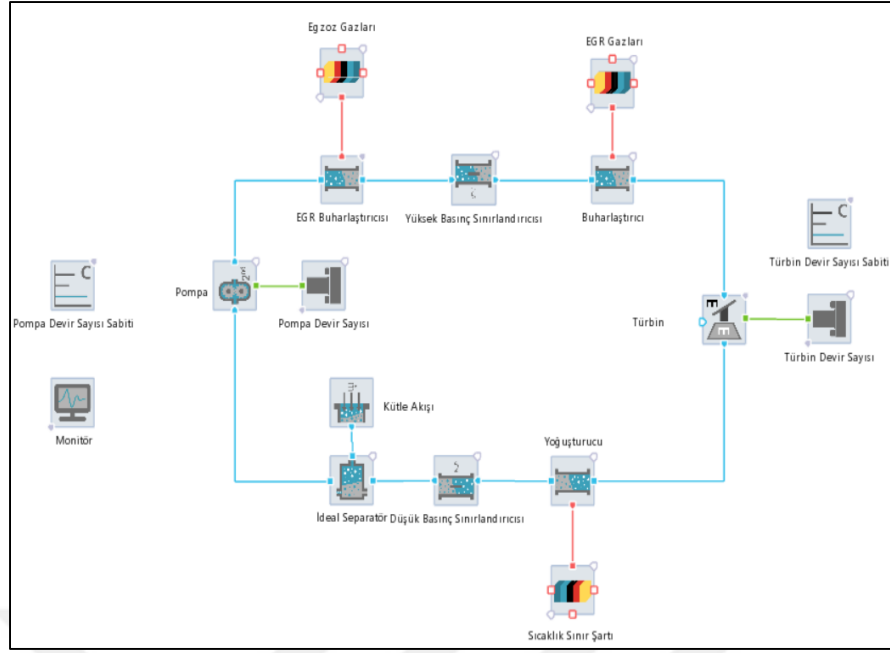
$$\dot{Q}_d = \dot{Q}_y - (\dot{P}_e + \dot{Q}_s + \dot{Q}_e) \quad (3.6)$$

Hesaplanamayan kayıp enerji ifadesinin içinde farklı kayıp enerjiler söz konudur. Bunlar; motor bloğundan taşınım ve ışınlam 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.

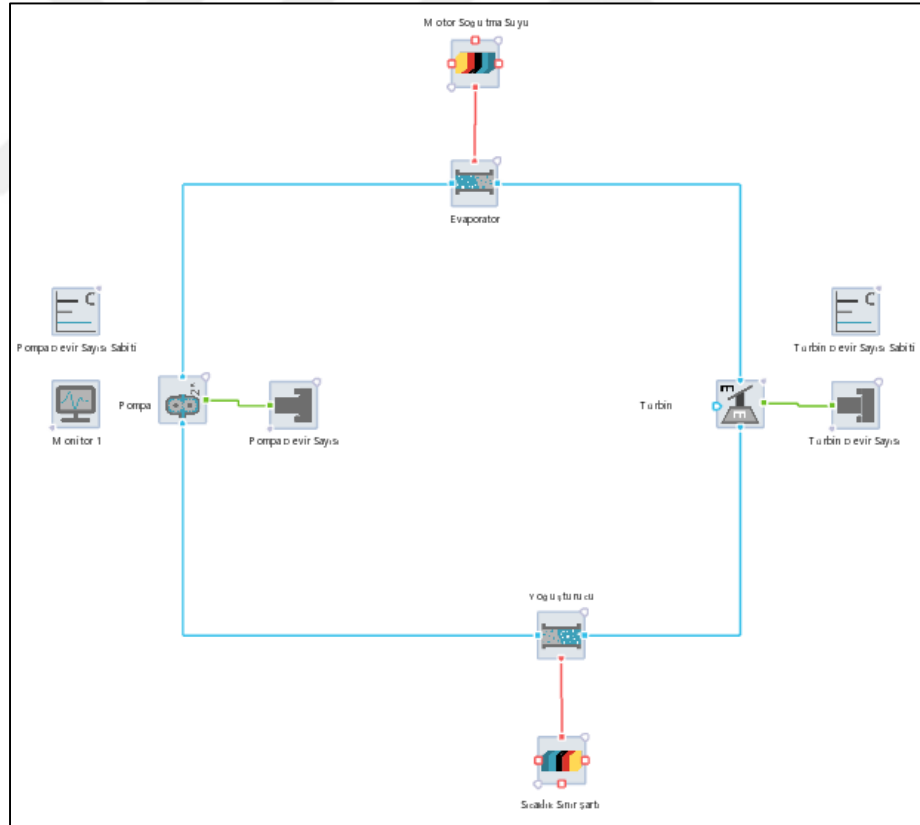
3.2.2. Oluşturulan Rankine Çevrim Modeli

AVL CRUISE™ M programı kullanılarak oluşturulan Organik Rankine Çevrimi topolojisi Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de görülmektedir. Şekil 3.6 yüksek sıcaklıklı çevrim olan egzoz gazlarından atık ısı geri kazanım çevrimi modeliyken Şekil 3.7 ise düşük sıcaklıklı motor soğutma sisteminden atık ısı geri kazanım çevrimi modelidir. Yüksek sıcaklık çevriminde iş akışkanı olarak R245fa ve düşük sıcaklık çevrimi için R134a iş akışkanı kullanılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM



Şekil 3.5. Yüksek sıcaklıklı organik rankine çevrimi modeli



Şekil 3.6. Düşük sıcaklıklı organik rankine çevrimi modeli

Her iki çevrim için oluşturulan bu modellerin amacı, atık ısı geri kazanımı için Rankine Çevrimi kullanan bir model oluşturmaktır. Model, bir pompa, iki buharlaştırıcı,

3. MATERYAL ve YÖNTEM

türbin ve yoğuşturucudan oluşur. Buharlaştırıcılar ve yoğuşturucu, katı duvarlar ile ısı alışverişi yapan iş akışkanını ve boru bileşenleri ile modellenmiştir. Yüksek ve düşük basınç sınırlandırıcılar basınç kaybı referans değerlerine göre borularda basınç kaybı değeri tanımlanmasını sağlamaktadır. İdeal ayrıştırıcı, iki fazlı akışı sıvı ve gaz fazına ayırarak sadece sıvının pompa girişine akmasını sağlar. Pompa, sabit olarak tanımlanan devir sayısında çalıştırılır. Türbin için de bir devir sayısı tanımlama bileşeni bulunmaktadır.

Yüksek sıcaklıklı egzoz gazlarından atık ısı geri kazanım çevrimi şu aşamalar ile çalışmaktadır;

- Yoğuşturucudan çıkan sıvı iş akışkanını yüksek basınçlı pompa ile pompalanır.
- Egzoz gazı buharlaştırıcılarda iş akışkanını aşırı kızgın hale getirir. Bunun için EGR ve egzoz hattında iş akışkanına ısı transferi gerçekleşir,
- Aşırı kızgın buhar türbin milini sürer, elektrik gücü üretilir
- Düşük basınçlı buhar yoğuşturucu tarafından soğutulur ve işlem tekrarlanır.
- İş akışkanını olarak R245fa kullanılmıştır.

Sistemde bulunan iki adet buharlaştırıcıdan birincisi EGR gazları ile ikincisi ana egzoz hattındaki egzoz gazları ile etkileşim halindedir.

Düşük sıcaklıklı motor soğutma sisteminden atık ısı geri kazanım çevrimi şu aşamalar ile çalışmaktadır;

- Yoğuşturucudan çıkan sıvı iş akışkanını yüksek basınçlı pompa ile pompalanır.
- Motor soğutma suyu buharlaştırıcılarda iş akışkanını aşırı kızgın hale getirir.
- Aşırı kızgın buhar türbin milini sürer, elektrik gücü üretilir.
- Düşük basınçlı buhar yoğuşturucu tarafından soğutulur ve işlem tekrarlanır.
- İş akışkanını olarak R134a kullanılmıştır

Klasik motor soğutma sisteminde yer alan radyatör yerine bu çevrimin buharlaştırıcısı kullanılmaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, AVL CRUISE™ M'de hazırlanan çevrim programının, iki farklı iş akışkanı (R134a ve R245fa) kullanımı durumunda dokuz farklı durumu için çalışmalar yapılmıştır. Kaynak sıcaklığı ve iş akışkanı debilerinin farklı seviyeleri ile oluşturulmuş durumlardan elde edilen sonuçlar basınç-entalpi ve sıcaklık-entropi diyagramlarına aktararak sunulmuştur. Her durum ayrı ayrı analiz edildikten sonra ilgili çalışma şartlarında gerçekleşen ısı verim değerlerindeki değişim analiz edilmiştir.

4.1. R245fa İş Akışkanı İçin Çalışma Sonuçları

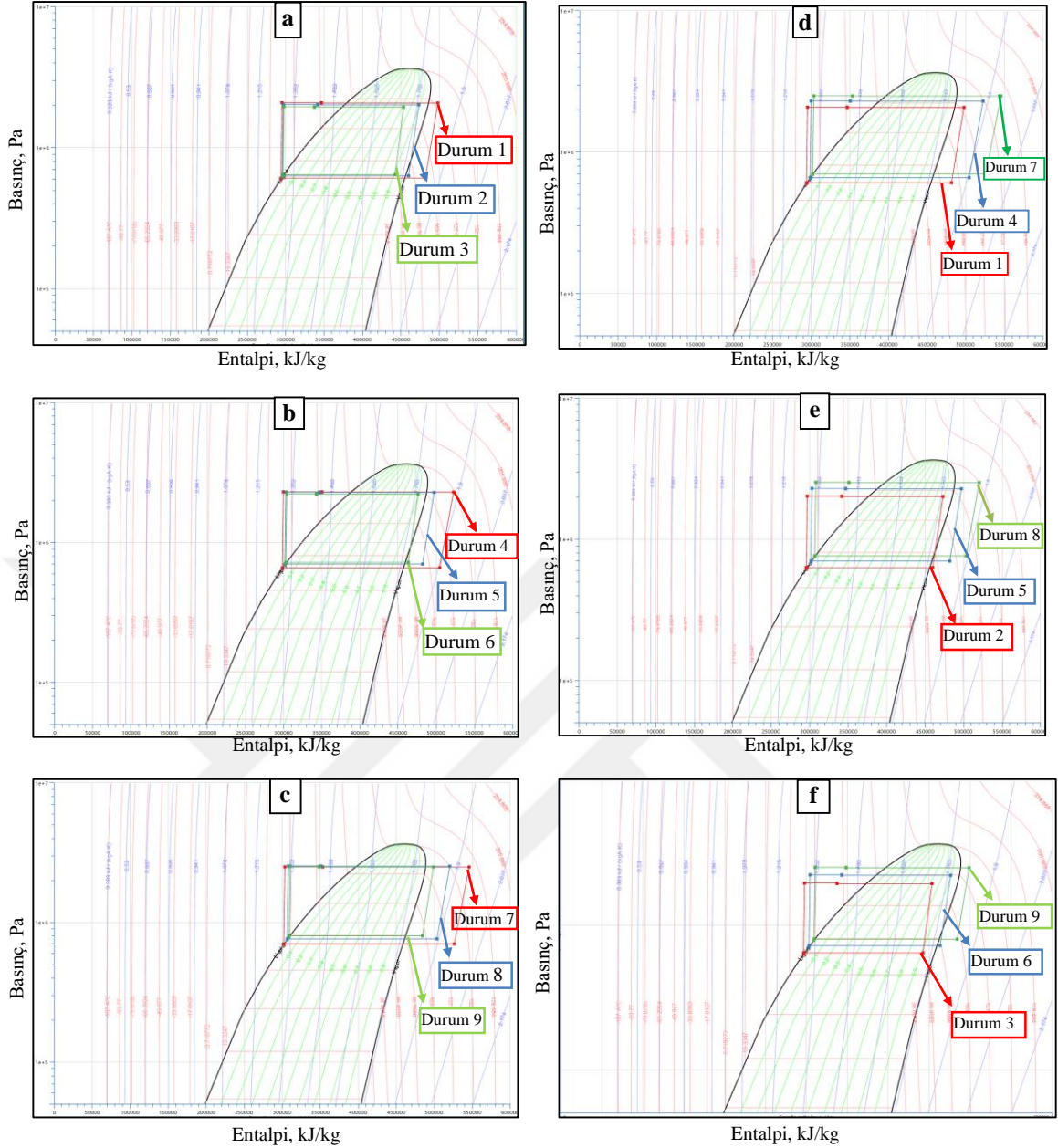
R245fa iş akışkanı diğer iş akışkanları ile karşılaştırıldığında nispeten yüksek sıcaklık bölgeleri için uygundur. Dolayısıyla egzoz hattından olan ısı kaybını geri kazanımında kullanılması anlamlıdır. Bu bağlamda çalışma durumları oluşturulurken 450 °C, 500 °C ve 550 °C olmak üzere üç farklı egzoz gaz sıcaklık seviyesi için 12 l/dk, 14 l/dk ve 16 l/dk olmak üzere üç farklı iş akışkanı hacimsel debisinde çalışmalar yürütülmüştür. Her duruma ait egzoz gaz sıcaklığı ve hacimsel debi seviyesi Tablo 4.1'de verilmiştir.

Bilindiği üzere içten yanmalı motorlarda egzoz gaz sıcaklığı, motor devir sayısı ve yük durumuna bağlı olarak değişmektedir (Heywood 1988; Pulkrabek 2004). Ayrıca dizel motorları daha yüksek sıkıştırma oranlarında çalıştırdıkları ve dolayısıyla yanma sonu sıcaklıkları arttığı için egzoz gaz sıcaklıkları da artmaktadır. Bu çalışmada üç farklı egzoz gaz sıcaklığı seviyesinde hesaplamalar yapılarak egzoz gaz sıcaklığı ile Organik Rankine Çevrimi performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tablo 4.1. R245fa çalışma durumları

	Egzoz gaz sıcaklığı, °C	Hacimsel debi, l/dk
Durum 1	450	12
Durum 2	450	14
Durum 3	450	16
Durum 4	500	12
Durum 5	500	14
Durum 6	500	16
Durum 7	550	12
Durum 8	550	14
Durum 9	550	16

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.1. R245fa için farklı durumlarda basınç-entalpi değişimi

Şekil 4.1’de üçer seviyede olmak üzere toplam altı grafikte dokuz duruma ait çalışmalardan ortaya çıkan basınç-entalpi değişimleri sunulmuştur. Bilindiği üzere basınç-entalpi değişimleri hem soğutma makinesi çevrimleri hem de güç makinesi çevrimleri için tüm prosesin incelenmesinde kolaylık sağlayan çevrimlerdir. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucuda basınç düşüşleri ihmal edildiğinde veya düşük seviyede kabul edildiğinde iki proses yatay olarak grafiğe taşınmaktadır. Pompa sıkıştırılmış sıvı haldeki akışkanı yaklaşık sabit entalpide basınçlandırmakta ve türbinde genişleyen gaz mekanik iş üretmektedir. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu proseslerindeki eğri uzunlukları

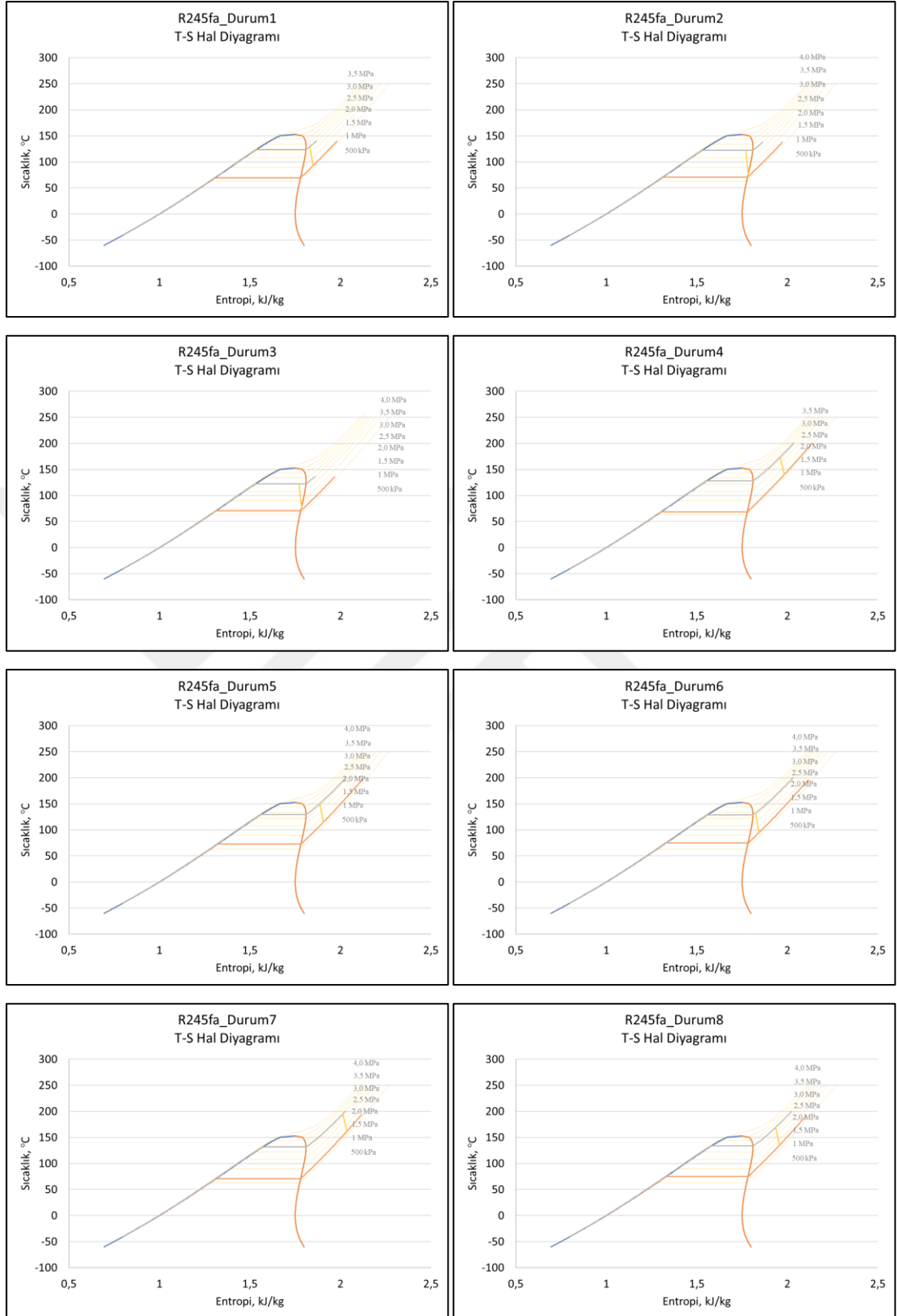
aynı zamanda yatay eksenin yani entalpinin farkını içerecek şekilde ısı etkileşimlerin yoğunluğunu göstermektedir.

Atık ısı geri kazanımı uygulamalarında giderek artan bir ilgi gören Organik Rankine Çevrimleri ile özellikle egzoz hattından gerçekleşen atık ısının bir bölümü mekanik işe dönüştürülürken bir jeneratör ile bu enerji elektrik enerjisi olarak geri kazanılmaktadır. Şekil 4.1 a,b,c'den de görüleceği üzere atık ısı kaynağı olan egzoz gazlarının sıcaklığı sistem performansı üzerinde etkindir. Bilindiği üzere atık ısı kaynağının sıcaklığı arttıkça sistemin performansında artış gözlenmesi doğaldır. Ancak sistem üzerinde etkin bir diğer çalışma parametresi ise pompa tarafından sirküle edilen iş akışkanının debisidir. Yine Şekil 4.1 d,e,f'den görüleceği üzere farklı ısı kaynağı sıcaklıklarında iş akışkanının debisindeki değişim çevrim üzerinde önemli etkilere neden olmuştur.

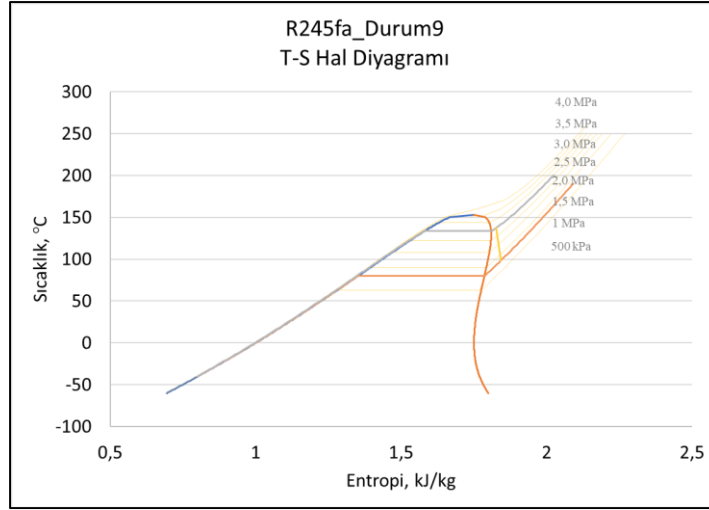
Şekil 4.1'de verilen basınç-entalpi diyagramları Rankine çevrim analizinde kullanılan ve enerji analizinde faydalı bir diyagramdır. Ancak ısı makinelerinin analizinde ayrıca sıcaklık-entropi diyagramları da kullanılmakta ve hal değişimleri sırasında sistemin izlediği yolu takip etme imkânı tanımaktadır. Şekil 4.2'de sırasıyla dokuz durum için egzoz gazlarından ısı geri kazanımı uygulamasında ve R245fa kullanımı ile oluşturulan analizlerde ortaya çıkan sıcaklık-entropi değişimleri görülmektedir. R245fa kuru iş akışkanıdır ve dolayısıyla doymuş buhar eğrisinin eğimi pozitifdir. Bu sayede örneğin Durum 3'teki gibi buharlaştırıcıda ısı girişi sonucunda iş akışkanı kızgın bölgede olmasa bile türbin çıkışına doğru kızgın bölgede kalarak sistemin emniyetli bölgede çalışmasını sağlayabilmektedir. Ayrıca sistemin aşırı kızdırma zorunluluğu da ortadan kalkmaktadır.

Şekil 4.2 incelendiğinde kaynak sıcaklığı arttıkça yoğuşturucuda ısı giriş prosesinin sonunda iş akışkanı kızgın bölgeye doğru kaymakta ve türbin giriş sıcaklığı artmaktadır. Ancak iş akışkanı debisi artırıldığında ise çevrimin maksimum sıcaklığı düşmektedir. Bu durum iş makinesinin etkinliğinin bir göstergesi olan çevrimin taradığı kapalı alanın azalmasına neden olmaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.2. R245fa için farklı durumlarda sıcaklık-entropi değişimi



Şekil 4.2. (devam)

Diğer taraftan Şekil 4.1 d,e,f incelendiğinde her bir iş akışkanı debisi değerinin aynı olduğu durumlar karşılaştırıldığında ise aynı iş akışkanı debisi için kaynak sıcaklıkları artarken hem buharlaştırıcı tarafında hem de yoğuşturucu tarafında basınçlar artmaktadır. Dolayısıyla bu değişimler dikkate alındığında iki parametrenin sistem performansı üzerindeki etkilerini, tüm sistemi göz önüne alarak değerlendirebilecek bir parametre olan ısı verim ifadesi Şekil 4.3’de sunulmuştur.

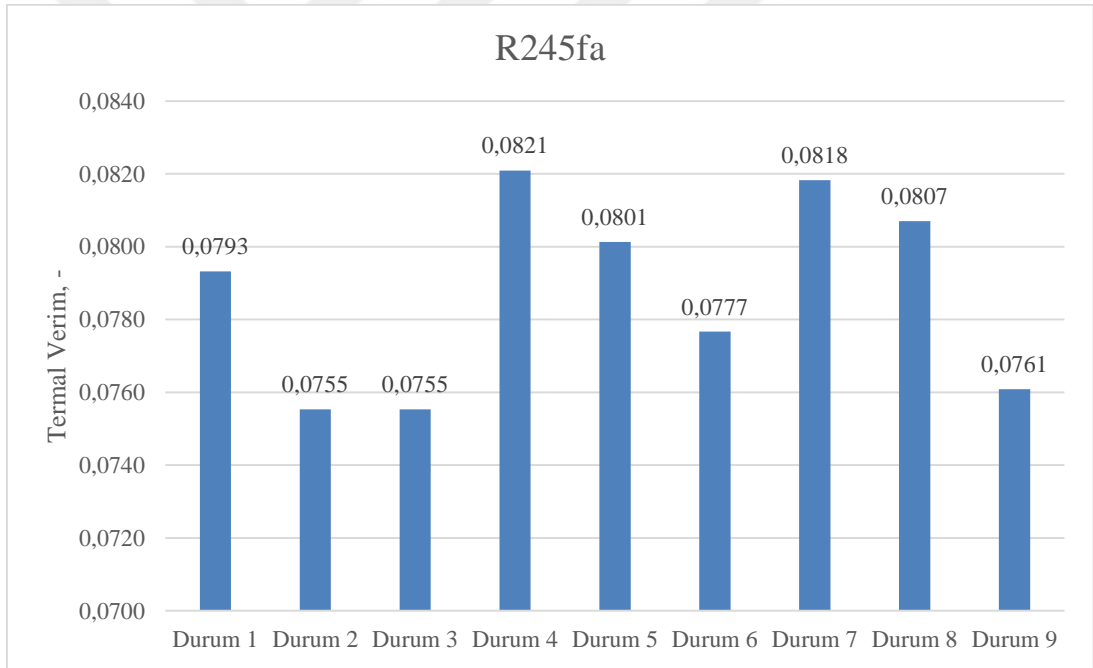
Şekil 4.3’de sırasıyla tüm durumlar için yapılan çalışmalara ait ısı verim değişimleri görülmektedir. Şekil 4.3 incelendiğinde kaynak sıcaklığı artarken ısı verimin artış meylinde olduğu ancak belirli bir sıcaklığın üstünde azalmaya başladığı görülmektedir. Diğer taraftan Şekil 4.3, R245fa iş akışkanının debisindeki artış ile tüm sıcaklık seviyelerinde ısı verimin azaldığını göstermektedir. İlk üç durum için kaynak sıcaklığı 450 °C seviyesinde iken tüm iş akışkanı debileri için ısı verim en düşük değerlerdir. Durum 4, 5 ve 6 için yapılan çalışmalarda ise ısı verim sırasıyla 0,0821, 0,0801 ve 0,0777 olarak gözlenmiştir. Kaynak sıcaklığı artarken ısı verimindeki artış ortadan kalkmış ve durum 7, 8 ve 9 için ısı verim sırasıyla 0,0818, 0,0807 ve 0,0761 olarak hesaplanmıştır.

Ancak akışkan debisinin 14 l/dk olması durumunda kaynak sıcaklığı artarken ısı verim sürekli olarak artmıştır. Durum 2, 5 ve 8 bir arada düşünüldüğünde ısı verim sırasıyla 0,0755, 0,0801 ve 0,0807 olarak gözlenmiştir ki bu durum akışkan debisi artarken ısı verimin arttığı anlamına gelmektedir. Ayrıca Tablo 4.3’te literatürde R134a

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

ve R245fa iş akışkanlarının kullanıldığı bazı çalışma sonuçları verilmiştir. Bu çalışmalarda motor üstünden alınan veriler ışığında tüm sistemin verimindeki artış üzerinde durulmuştur.

Bu tez çalışmasında elde edilen ısı verimindeki değişimler Organik Rankine Çevriminin ısı verimindeki değişimlerdir. R245fa iş akışkanı için ortalama olarak %8 dolaylarındaki verim seviyesi egzoz gazlarından atılan ısının geri dönüşüm oranını göstermektedir. Bu durumda egzoz hattından kayıp olan enerjinin yaklaşık %40 olarak gerçekleştiği bir motorun %8'lik bir ısı enerji geri dönüşümü ile genel verimde %3,2'lik bir artışa tekabül edeceği açıktır. Ayrıca literatür incelendiğinde genel olarak Organik Rankine Çevrimlerinin verimlerinin %10-25 seviyesinde olduğu belirtilmelidir (Chintala et al. 2018).



Şekil 4.3. R245fa iş akışkanı kullanımında farklı durumlar için termal verim

4.2. R134a İş Akışkanı İçin Çalışma Sonuçları

R134a iş akışkanı diğer iş akışkanları ile karşılaştırıldığında nispeten düşük sıcaklık bölgeleri için uygundur dolayısıyla motor soğutma suyu yoluyla gerçekleşen ısı kaybının geri kazanımında kullanılması anlamlıdır. Bu bağlamda çalışma durumları oluşturulurken 80 °C, 90 °C ve 100 °C olmak üzere üç farklı soğutma suyu sıcaklık

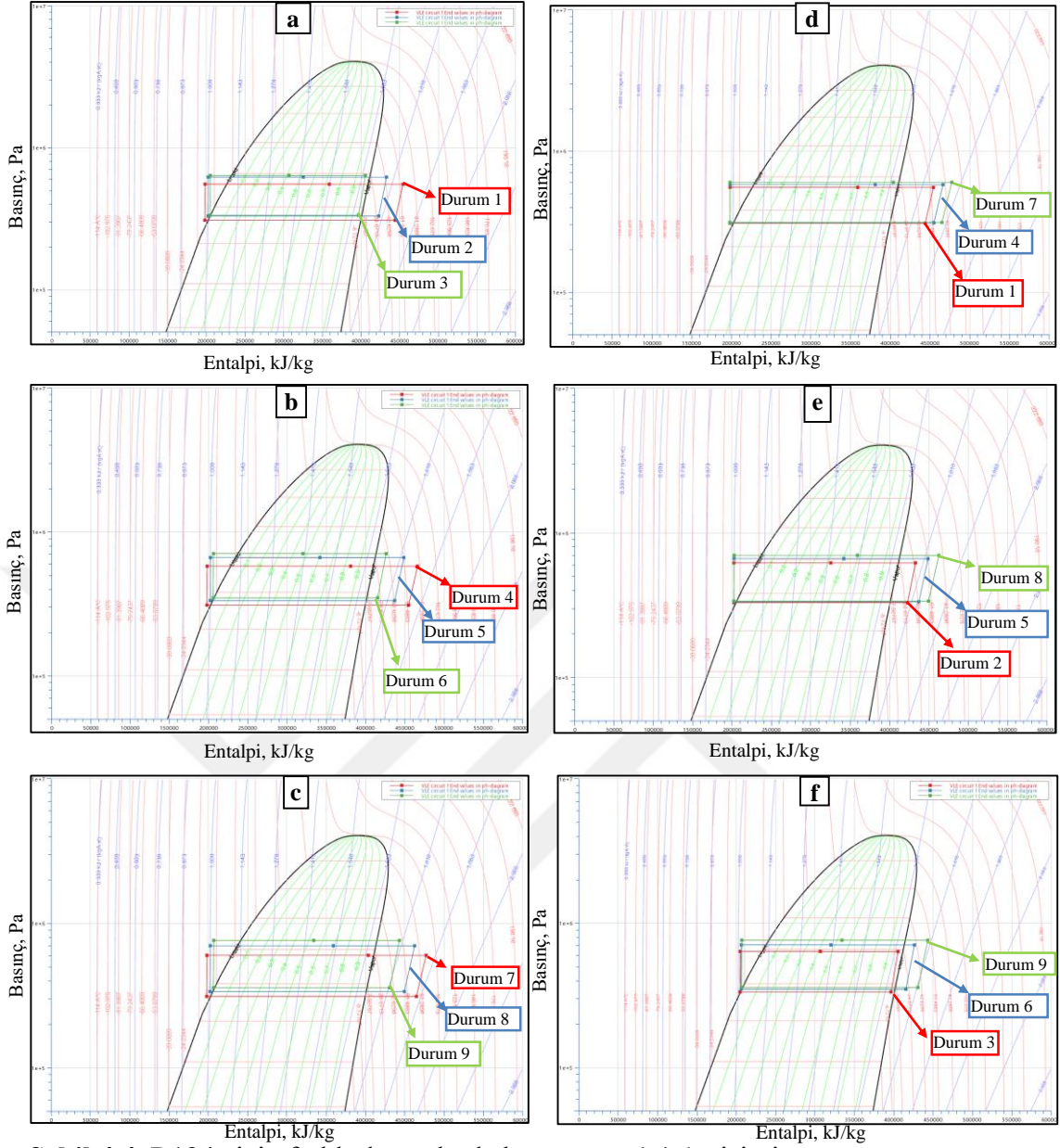
seviyesi için, 2 l/dk, 2,5 l/dk ve 3 l/dk olmak üzere üç farklı iş akışkan hacimsel debisinde çalışmalar yürütülmüştür. Her duruma ait soğutma suyu sıcaklığı ve hacimsel debi seviyesi Tablo 4.2’de verilmiştir.

Soğutma suyu sıcaklıklarının ilgili seviyelerde seçilmesi sayesinde soğutma sistemi tasarlanırken hangi sıcaklık seviyesine yönelik olarak ortaya konması gerektiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bilindiği üzere motor soğutma sistemlerinde soğutma suyu sıcaklığı, sistem basıncı ve dolayısıyla kaynama sıcaklığı değiştirilerek düzenlenebilir. Sistem basıncı arttıkça soğutma sıvısı olan su-antifriz karışımlarının kaynama noktası da artarak sistemin güvenli çalışma aralığı yukarılara taşınabilmektedir. Bu çalışmada da farklı sıcaklık seviyelerinde hesaplama yapılarak soğutma suyu sıcaklığının Organik Rankine Çevrimi ile geri kazanım potansiyelinin değişimi incelenmiştir.

Tablo 4.2. R134a çalışma durumları

	Egzoz gaz sıcaklığı, °C	Hacimsel debi, l/dk
Durum 1	80	2
Durum 2	80	2,5
Durum 3	80	3
Durum 4	90	2
Durum 5	90	2,5
Durum 6	90	3
Durum 7	100	2
Durum 8	100	2,5
Durum 9	100	3

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.4. R134a için farklı durumlarda basınç-entalpi değişimi

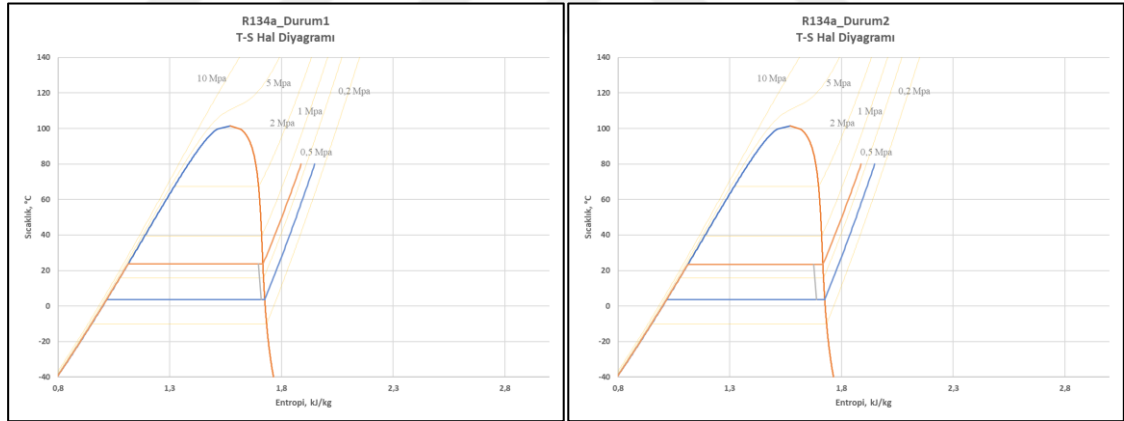
Şekil 4.4 a,b,c incelendiğinde aynı kaynak sıcaklıklarında soğutma suyunun hacimsel debisindeki artışının buharlaştırıcı basıncını az miktarda artırdığı belirtilebilir. Ayrıca Şekil 4.4 d,e,f incelendiğinde de iş akışkanı debisi arttıkça türbinde gerçekleşen hal değişimi daha yüksek sıcaklık bölgesine doğru kaymaktadır. Diğer taraftan aynı hacimsel debilerde kaynak sıcaklığının etiklerinin de gözlenebildiği bu grafiklerden hacimsel debinin artması ile hem buharlaştırıcı hem de yoğusturucu basınç seviyelerinin önemli ölçüde arttığı anlaşılmaktadır.

Diğer taraftan Şekil 4.5’de ise motor soğutma suyundan geri kazanım uygulaması için R134a iş akışkanı kullanıldığında toplam dokuz farklı durum için sıcaklık-entropi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

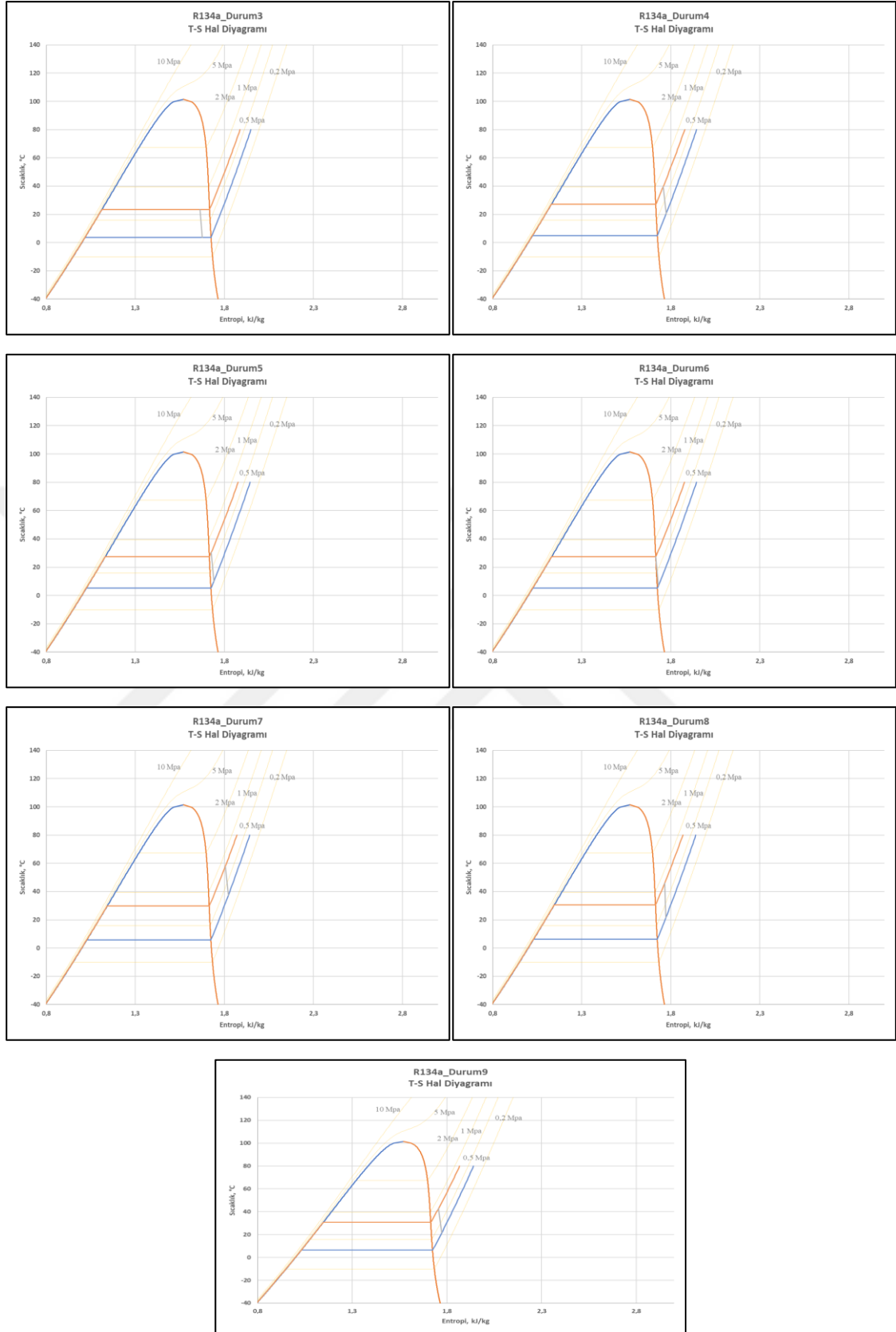
diyagramları sunulmuştur. Şekil 4.5 incelendiğinde R134a gazının ıslak iş akışkanı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla Durum 1 ve Durum 6 gibi çalışma şartlarında türbin girişinde ve çıkışında kuruluk derecesinde neredeyse değişim olmamaktadır. Oysa aynı şartlarda kuru bir iş akışkan ile türbin çıkışında kuruluk decesi artırılarak sistemin emniyetli bölgede çalışma potansiyeli artırılabilir.

Şekil 4.5 incelendiğinde kaynak sıcaklığı arttıkça buharlaştırıcı çıkışında iş akışkanının kızgın bölgeye kaydığı diğer taraftan iş akışkanının debisi arttıkça çevrimin maksimum sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Bir taraftan olumlu yönde etki eden kaynak sıcaklığındaki artış diğer taraftan debideki artışla olumsuz yöne doğru değişim göstermektedir. Ancak tüm bu değişimlerin toplamda sistem performansı üzerindeki etkilerini incelemek üzere Şekil 4.6 ile verilen çevrimin ısıl verimindeki değişim gözlenmelidir. Şekil 4.6 sayesinde üzerinde çalışmaların yürütüldüğü kaynak sıcaklığı ve iş akışkanı debisinin, çevrimin tüm bileşenleri üzerindeki etkileri birlikte gözlenme imkânı yakalanacaktır.



Şekil 4.5. R134a için farklı durumlarda sıcaklık-entropi değişimi

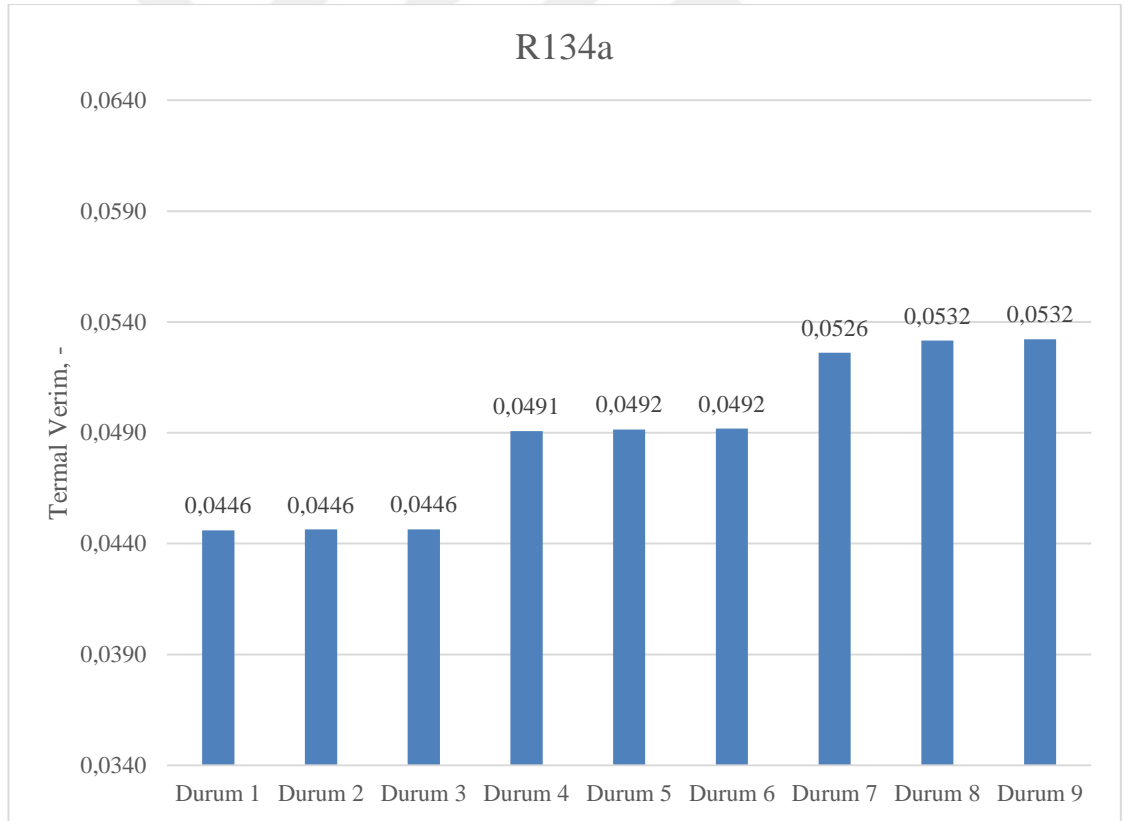
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.5. (devam)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6 beraber değerlendirildiğinde iki çalışma parametresinin (kaynak sıcaklığı ve iş akışkanı debisi) farklı seviyelerinin hem çevrim hem de ısıl verim üzerindeki etkileri bir arada incelenerek daha anlamlı sonuçlar üretilebilir. Şekil 4.4 d,e,f'den görüleceği üzere farklı kaynak sıcaklıklarında iş akışkanı debisi değişimi ile çevrim olayları etkilenirken, Şekil 4.4 a,b,c incelendiğinde farklı iş akışkanı debilerinde kaynak sıcaklığının değişiminin basınç ve entalpi değişimini etkilediği görülmektedir. Oysa Şekil 4.6 hem kaynak sıcaklığındaki hem de iş akışkanı debisindeki değişimlerin tüm sistem performansı üzerindeki ortak etkilerini bir arada göstermektedir. Şekil 4.6'da Durum 1, 2 ve 3'te kaynak sıcaklığı 80 °C seviyesindedir. Durum 4, 5 ve 6'da bu sıcaklık 90 °C ve Durum 7, 8 ve 9'da 100 °C seviyesinde ulaşmıştır. Şekil 4.6 incelendiğinde sıcaklığın sabit olduğu üçerli bu deney şartlarının her birinde iş akışkanı debisi artarken ısıl verimde anlamlı bir değişiklik olmamıştır. Diğer taraftan kaynak sıcaklığının artması ısıl verimi baskın bir şekilde artırmıştır.



Şekil 4.6. R134a iş akışkanı kullanımında farklı durumlar için termal verim

Oysa R245fa çalışmalarında hem kaynak sıcaklığı hem de iş akışkanı debisi ısıl verim üzerinde önemli değişikliklere neden olmuştur. R134a'nın kullanıldığı soğutma

suyu kaynaklı çalışmalarda iş akışkanının debisinin aynı anda etkin olmamasının nedeninin kaynak sıcaklığının ortalama 90 °C gibi düşük sıcaklıklı olmasıdır.

Tablo 4.3. R134a ve R245fa iş akışkanlarının kullanıldığı çeşitli çalışmalar

(Uusitalo et al. 2015)	R245fa ve isopentane	4 silindirli bir dizel motorunda emme havası ısı kaynaklı sistemin, motor çıkış gücünü %2 artırdığını rapor etmişlerdir.
(Song and Gu 2015; Song et al. 2015)	R245fa, Siklohegzan, Toluen ve Benzen ile egzoz gazlarında atık ısı geri kazanımı R236ea, R236fa, R600, R600a, R123, R134a ve R245fa ile soğutma suyundan atık ısı geri kazanımı	Motor veriminde %10.2'lik bir artış elde etmişlerdir.
(Mastrullo et al. 2015)	R245fa	Tüm siste verimi %9'a kadar artmıştır.
(Mastrullo et al. 2015)	R245fa	Kombine motor ORC sisteminin verimi klasik dizel motoruna göre %13 artmıştır.
(Yu et al. 2013)	R245fa	Egzoz gazlarından ve soğutma suyundan alınan enerjinin motor çalışma şartlarına bağlı olarak sırasıyla %75 ve %9.5'e kadar artırılacağı raporlanmıştır.
(Wang et al. 2014)	Yüksek sıcaklık hattında R245fa ve düşük sıcaklık hattında R134a	Motorun net gücünün %19 – 22 aralığına kadar artırılacağı ifade edilmiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında içten yanmalı motorlarda gerçekleşen atık ısı enerjisinin bir kısmını geri kazanmak için üzerinde durulan Rankine Çevrimleri teorik olarak incelenmiştir. Hem düşük sıcaklıklı motor soğutma suyu atık ısı hem de yüksek sıcaklıklı egzoz gaz atık ısısının geri kazanımı için sırasıyla R134a ve R245fa gazlarının kullanımı ile oluşan iki farklı çevrimin analizleri ile elde edilen ana sonuçlar ve çalışmanın devamında gerçekleştirilecek analizler için öneriler aşağıda liste halinde verilmiştir.

- 1- Farklı sıcaklık ve ısı kapasitedeki atık ısılar için kullanılacak sistemler tasarlanırken verimin en yüksek olduğu seviyenin yakalanması gerekir. Ancak bu seviye birçok çalışma parametresinden etkilenmektedir. Dolayısıyla çevrim verimini en iyi seviyelerde tutacak şekilde çalışma parametrelerinin kontrol altında tutulması gerekir.
- 2- Bu parametrelerden en önemlilerinden iki tanesi kaynak sıcaklığı ve iş akışkanının debisidir.
- 3- Hem R245fa hem de R134a gazlarının kullanımı durumunda kaynak sıcaklığı arttıkça çevrim verimi artmıştır. R245fa kullanımı durumunda çevrim verimi %8.21 ve R134a kullanımı durumunda çevrim verimi %5.32 seviyelerine çıkmıştır.
- 4- Ancak R245fa kullanımı durumunda kaynak sıcaklığı 550 °C seviyesinde çıktığında yoğuşturucu tarafında gerçekleşen ısı çıkışı prosesinin sistem üzerindeki olumsuz etkisi arttığı için çevrim veriminde azalma başlamıştır. Bu durum kaynak sıcaklığı artsa bile çalışma parametrelerinin doğru düzenlenmemesi sonucunda sistem performansının azalabileceği gibi çok önemli bir sonucu doğurmaktadır.
- 5- Bu çalışmada egzoz gazlarından hem egzoz hattında hem de seri olarak EGR sistemindeki atık ısıdan faydalanılmıştır. Aynı ısı değiştiricilerin kullanılması durumunda kaynak olarak motor soğutma suyunun atık ısısından faydalanmak üzere sistemde R134a iş akışkanı kullanılması durumunda sistem basınç seviyelerinin düştüğü gözlenmiştir. Bu durum genel olarak çevrim verimini ve performansını düşürmüştür. Dolayısıyla egzoz gazlarının kaynak olarak kullanılması durumunda çevrim verimi yaklaşık olarak %8 seviyesinde iken

- soğutma suyu kaynak olarak kullanıldığında %5 seviyesine düşmüştür. Bu durumda kaynak sıcaklığındaki azalma da etkili olmuştur.
- 6- R134a gazı ile yapılan analizlerde iş akışkanının debisinin çevrim verimi üzerinde etkin bir parametre olmadığı ancak yoğunlaştırma ve buharlaştırma basınçları ile bu durumun değişeceği gözlenmiştir.
 - 7- Bu durumda kaynak sıcaklığı ve kaynakların ısı akısı dikkate alınarak tasarlanan sistemlerde doğru akışkanın tespiti için geniş çalışma aralıklarında analizler yapılmalıdır.
 - 8- AVL CRUISE™ M ortamında yapılan bu analizlerden çevrimin her bir bölümünün kaynak sıcaklığına göre doğru şekilde tasarlanması gerektiği aksi takdirde sistemin en yüksek çevrim verimi bölgesinden kolayca uzaklaşacağı ortaya çıkmıştır.
 - 9- Bu çalışma farklı iş akışkanları için genişletilebilir. Özellikle simülasyon programının olanak tanıdığı ve endüstriyel uygulamalarda tercih edilen CO₂, Su, R407CPPF, R404APPF, R410APPF, R507APP, etanol, R1234YF, R1234ZEZ, R134ZE, R1233ZDE, Siklopentan ve Propan akışkanları ile çalışma genişletilebilir.
 - 10- Çevrim elemanları olan yoğunlaştırucu, buharlaştırıcı ve türbinin tasarım parametrelerini de deney tasarımı parametreleri olarak alıp daha geniş bir aralıkta tarama yapılarak sistem tasarımı için öneriler geliştirilebilir.
 - 11- Endüstriyel uygulamalarda kaynak sıcaklıkları 300 °C sıcaklık seviyesinin üzerine genel olarak çıkmazken bu çalışmada egzoz gaz sıcaklıkları 500 °C seviyelerinde çalışılmıştır çünkü motor atık ısıları bu sıcaklık seviyelerine çıkabilmektedir. Ancak bu çalışmada yapılan analizler çimento sanayi gibi daha düşük sıcaklıklı atık ısı geri kazanım uygulamaları için genişletilebilir.

KAYNAKLAR

- Alhamado Alchehabı, F. 2023. Motosiklet motorlarında termal bariyer kaplamanın motor performansı ve egzoz atık ısı geri kazanımına etkilerinin deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karaman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı, 82, Karaman.
- Anonim, 2023a. Web Sitesi: <https://aktermgroup.com/faaliyetlerimiz/atik-isi-geri-kazanim>, Erişim Tarihi: 10.06.2023.
- Anonim, 2023b. Web Sitesi: <https://www.alfalaval.com.tr/endustriler/enerji-ve-yardimci-isletmeler/surdurulebilir-cozumler/surdurulebilir-cozumler/enerji-verimliliği/atikisigeri-kazanım/> Erişim Tarihi: 05.06.2023.
- Asadi, M., Deymi-Dashtebayaz, M., Amiri-Rad, E. 2022. Comparing the profitability of waste heat electricity generation of internal combustion engines: An exergoeconomic analysis through optimization of two different organic Rankine cycle scenarios. *Applied Thermal Engineering*, 211(February), 118443.
- AVL. 2009. Cruise vehicle system analysis, AVL Cruise - Vehicle System and Driveline Analysis, AVL Product description.
- Aydın, Y. 2022. Türkiye’de atık ısı potansiyelinin değerlendirilmesi projesi kapanış etkinliği Türkiye Kojenerasyon Derneği Sunumu. Web Sitesi: https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Duyurular//5%20YA_S_202206301707.pdf. Erişim Tarihi: 31.05.2023
- Bombarda, P., Invernizzi, C. M., Pietra, C. 2010. Heat recovery from Diesel engines: A thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles. *Applied Thermal Engineering*, 30(2–3), 212–219.
- Boz, B. 2017. A numerical study of waste heat recovery potential of the exhaust gases from a power generation diesel engine. Master Thesis, İzmir Institute of Technology, Graduate School of Engineering and Science, 136, İzmir.
- Brignone, M., Zigiotti, A. 2012. Impact of novel thermoelectric materials on automotive applications, 9th European Conference On Thermoelectrics: ECT2011, 28–30 September 2011, AIP Conference Proceedings, vol 1449, issue 1, 493–496, America.
- Burnete, N. V., Mariasiu, F., Depcik, C., Barabas, I., Moldovanu, D. 2022. Review of thermoelectric generation for internal combustion engine waste heat recovery. *Progress in Energy and Combustion Science*, 91(April), 101009.
- Caresana, F. 2011. Impact of biodiesel bulk modulus on injection pressure and injection timing. The effect of residual pressure, *Fuel*, 90(2), 477–485.

- Cauda, N., Colantoni, M., Gotta, G. 2010. Hydraulic matching of an engine cooling system for automotive applications in advanced engineering, EnginSoft International Conference 2010, 21–22 October, 3, Turin, Italy.
- Çengel, Y. A. 2015. Termodinamik: mühendislik yaklaşımıyla. Palme Yayıncılık, 978, Ankara.
- Chintala, V., Kumar, S., Pandey, J. K. 2018. A technical review on waste heat recovery from compression ignition engines using organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(June 2017), 493–509.
- Domingues, A., Santos, H., Costa, M. 2013. Analysis of vehicle exhaust waste heat recovery potential using a Rankine cycle. *Energy*, 49(1), 71–85.
- Galindo, J., Ruiz, S., Dolz, V., Royo-Pascual, L., Haller, R., Nicolas, B., Glavatskaya, Y. 2015. Experimental and thermodynamic analysis of a bottoming Organic Rankine Cycle (ORC) of gasoline engine using swash-plate expander. *Energy Conversion and Management*, 103, 519–532.
- Galloni, E. 2022. Analysis on the waste heat recovery in a light duty vehicle. *Energy*, 238, 121696.
- Ge, Z., Wang, H., Wang, H.-T., Wang, J.-J., Li, M., Wu, F.-Z., Zhang, S.-Y. 2015. Main parameters optimization of regenerative organic Rankine cycle driven by low-temperature flue gas waste heat. *Energy*, 93, 1886–1895.
- Gürgen, S. 2021. Yapay zeka yaklaşımları ile gemi ana makinesinin belirlenmesi ve optimum organik rankine çevrimli atık ısı geri kazanım sisteminin kurulması. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Ana bilim Dalı, 240, Trabzon.
- Györke, G., Groniewsky, A., Imre, A. R. 2019. A simple method of finding new dry and isentropic working fluids for organic Rankine cycle. *Energies*, 12(3), 1–11.
- Heywood, J. B. 1988. *Combustion engine fundamentals*. 1a Edição. Estados Unidos, 25, 1117–1128.
- Hoard, J., Abarham, M., Styles, D., Giuliano, J. M., Sluder, C. S., Storey, J. M. E. 2009. Diesel EGR cooler fouling. *SAE International Journal of Engines*, 1(1), 1234–1250.
- Hountalas, D. T., Katsanos, C. O., Kouremenos, D. A., Rogdakis, E. D. 2007. Study of available exhaust gas heat recovery technologies for HD diesel engine applications. *International Journal of Alternative Propulsion*, 1(2–3), 228–249.
- Hung, T. C., Shai, T. Y., Wang, S. K. 1997. A review of organic rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. *Energy*, 22(7), 661–667.
- Kajurek, J., Rusowicz, A., Grzebielec, A., Bujalski, W., Futyma, K., Rudowicz, Z. 2019. Selection of refrigerants for a modified organic Rankine cycle. *Energy*, 168, 1–8.

- Karanfil, G., Ruşen, S. E., Poyraz, Ş. N., Can, M. 2020. Atık ısı geri kazanım sistemleri ve ısı verim parametrelerinin deneysel incelenmesi. *European Journal of Science and Technology*, (19), 127–137.
- Kim, Y. M., Shin, D. G., Kim, C. G., Cho, G. B. 2016. Single-loop organic Rankine cycles for engine waste heat recovery using both low-and high-temperature heat sources. *Energy*, 96, 482–494.
- Kumar, A., Rakshit, D. 2021. A critical review on waste heat recovery utilization with special focus on Organic Rankine Cycle applications. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100292.
- Lecompte, S., Huisseune, H., Van Den Broek, M., Vanslambrouck, B., De Paepe, M. 2015. Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 448–461.
- Lu, Y., Roskilly, A. P., Jiang, L., Yu, X. 2017. Working fluid selection for a small-scale organic Rankine cycle recovering engine waste heat. *Energy Procedia*, 123, 346–352.
- Mago, P. J., Chamra, L. M., Srinivasan, K., Somayaji, C. 2008. An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids. *Applied Thermal Engineering*, 28(8–9), 998–1007.
- Mahmoudi, A., Fazli, M., Morad, M. R. 2018. A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*, 143, 660–675.
- Maizza, V., Maizza, A. 1996. Working fluids in non-steady flows for waste energy recovery systems. *Applied Thermal Engineering*, 16(7), 579–590.
- Mastrullo, R., Mauro, A. W., Revellin, R., Viscito, L. 2015. Modeling and optimization of a shell and louvered fin mini-tubes heat exchanger in an ORC powered by an internal combustion engine. *Energy Conversion and Management*, 101, 697–712.
- Nadaf, S., Gangavati, P. 2014. A review on waste heat recovery and utilization from diesel engines. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 31, 39–45.
- Niggemann, R. E. 1979. Fluid selection and optimization of organic Rankine cycle waste heat power conversion system. *Mechanical Engineering*, 101(6), 93.
- Ökmen, A. B. 2020. İçten yanmalı motorun egzoz atık ısı geri kazanımı için termoelektrik jeneratörün had analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı, 155, Isparta.
- Özden, H., Paul, D. 2011. Organik Rankine çevrim teknolojisiyle düşük sıcaklıktaki kaynaktan faydalanılarak elektrik üretimi. Örnek çalışma: Sarayköy jeotermal santrali. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 13-16 Nisan, İzmir, 13(16), 101–108.

- Plint, M. J., Martyr, A. J. 1995. Engine Testing Theory and Practice. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 299, UK.
- Pulkrabek, W. W. 2004. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, 2nd Edition. The American Society of Mechanical Engineers, 924, America.
- Saribuğa, Y. E. 2013. Atık ısı geri kazanımı. Web Sitesi: <https://www.elektrikport.com/universite/atik-isi-geri-kazanimi/8796#ad-image-0>, Erişim Tarihi: 03.07.2023
- Song, J., Gu, C. 2015. Performance analysis of a dual-loop organic Rankine cycle (ORC) system with wet steam expansion for engine waste heat recovery. Applied Energy, 156, 280–289.
- Song, J., Song, Y., Gu, C. 2015. Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines. Energy, 82, 976–985.
- Sprouse III, C., Depcik, C. 2013. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery. Applied Thermal Engineering, 51(1–2), 711–722.
- Srinivasan, K. K., Mago, P. J., Krishnan, S. R. 2010. Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperature combustion engine using an Organic Rankine Cycle. Energy, 35(6), 2387–2399.
- Stobart, R. K., Wijewardane, A., Allen, C. 2010. The potential for thermo-electric devices in passenger vehicle applications. SAE Technical Paper, 2010-01-0833.
- Uusitalo, A., Honkatukia, J., Backman, J., Nyysönen, S. 2015. Experimental study on charge air heat utilization of large-scale reciprocating engines by means of Organic Rankine Cycle. Applied Thermal Engineering, 89, 209–219.
- Vélez, F., Segovia, J. J., Martín, M. C., Antolín, G., Chejne, F., Quijano, A. 2012. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(6), 4175–4189.
- Vijayaraghavan, S., Goswami, D. Y. 2005. Organic working fluids for a combined power and cooling cycle. Journal of Energy Resources Technology, 127(2), 125–130.
- Wang, E. H., et al. 2014. Parametric analysis of a dual-loop ORC system for waste heat recovery of a diesel engine. Applied Thermal Engineering, 67(1–2), 168–178.
- Wang, E., Yu, Z., Zhang, H., Yang, F. 2017. A regenerative supercritical-subcritical dual-loop organic Rankine cycle system for energy recovery from the waste heat of internal combustion engines. Applied Energy, 190, 574–590.

- Wang, T., Zhang, Y., Peng, Z., Shu, G. 2011. A review of researches on thermal exhaust heat recovery with Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2862–2871.
- Wang, X. D., Zhao, L., Wang, J. L., Zhang, W. Z., Zhao, X. Z., Wu, W. 2010. Performance evaluation of a low-temperature solar Rankine cycle system utilizing R245fa. *Solar Energy*, 84(3), 353–364.
- Yağlı, H. 2018. Basit ve rejeneratif organik rankine çevrimi (ORC) tasarımları kullanarak biyogaz yakıtlı ısı-güç kombine (CHP) motorunun atık ısısının geri dönüştürülebilirliği, enerji ve ekserji analizi. Doktora Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı, 132, Hatay.
- Yılmaz, F. 2013. Güneş çanaklı organik rankine çevriminin ısparta şartlarında incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 111, Isparta.
- Yu, G., Shu, G., Tian, H., Wei, H., Liu, L. 2013. Simulation and thermodynamic analysis of a bottoming Organic Rankine Cycle (ORC) of diesel engine (DE). *Energy*, 51, 281–290.
- Zamfirescu, C., Dincer, I. 2008. Thermodynamic analysis of a novel ammonia–water trilateral Rankine cycle. *Thermochimica Acta*, 477(1–2), 7–15.

