

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**TERMOELEKTRİK MODÜL İLE ATIK ISIDAN ELEKTRİK
ÜRETEN BİR SİSTEM UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gülden BOLATLI

Enstitü Anabilim Dalı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Murat KARABEKTAŞ

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TERMOELEKTRİK MODÜL İLE ATIK ISIDAN ELEKTRİK
ÜRETEN BİR SİSTEM UYGULAMASI

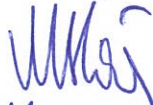
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gülden BOLATLI

Enstitü Anabilim Dalı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 29.5./2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı



Prof. Dr. Murat HOŞÖZ

Üye



Prof. Dr. Can Hacımoğlu

Üye



Doç. Dr. Murat

KARABEKTAŞ

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Gülden BOLATLI
02/05/2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Murat KARABEKTAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında katkı ve desteklerini esirgemeyen Teknisyen Hasan GÜREL ve Naci DURMUŞ'a teşekkür ederim.

Çalışmalarında teknik yardımlarını ve manevi desteğini hiç esirgemeyen değerli arkadaşım Semih ALIUSTAOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2017-50-01-068) teşekkür ederim.

Özellikle tüm eğitim-öğretim hayatımda beni hep destekleyen, yanımda olan, maddi manevi yardımlarını hiç esirgemeyen değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY	vii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
İÇTEN YANMALI MOTORLARIN ÇALIŞMASI VE VERİM.....	14
2.1. Gerçek Motor Çevrimleri	14
2.1.1. Dört zamanlı dizel motor çevrimi	14
2.2. İçten Yanmalı Motorlarda Enerji Dağılımı	17
BÖLÜM 3.	
MOTORLU ARAÇLARDA ENERJİ GERİ KAZANIM YÖNTEMLERİ	19
3.1. Egzoz Gazından Enerji Geri Kazanımı	19
3.1.1. Termal enerji geri kazanım sistemleri	20
3.1.2. Kinetik enerji geri kazanım sistemleri	20
3.2. Gövdenin Dikey Salınımından Enerji Geri Kazanımı	21
3.3. Araç Ataletinden Enerji Geri Kazanımı	21

BÖLÜM 4.

TERMOELEKTRİK	23
4.1. Termoelektrik Etkiler	23
4.1.1. Seebeck etkisi	24
4.1.2. Peltier etkisi	25
4.1.3. Thomson etkisi	25
4.2. Termoelement	26
4.3. Değer Rakamı	26
4.4. Termoelektrik Modülün Yapısı	27
4.5. Termoelektrik Jeneratör	28
4.5.1. Dönüşüm verimliliği ve akım	29

BÖLÜM 5.

MATERYAL VE YÖNTEM	31
5.1. Egzoz Gazı için Isı Eşanjörü Tasarımı	31
5.1.1. Egzoz gazı için ısı eşanjörü tasarımlarının ANSYS Fluent CFD’de termal akış analizleri.....	35
5.1.2. Egzoz gazı için ısı eşanjörü tasarımlarının ANSYS Fluent CFD analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	35
5.2. Deney Düzenegi Tanıtımı	37
5.2.1. Deney motoru	38
5.2.2. Egzoz gazı için eşanjör ünitesi	39
5.2.2.1. Isı eşanjörü	39
5.2.2.2. Termoelektrik jeneratör	40
5.2.3. Soğutma ünitesi	41
5.2.3.1. Soğutucu	42
5.2.3.2. Soğutma suyu haznesi	42
5.2.3.3. Su pompası	42
5.2.3.4. Radyatör ve salyangoz fan	43
5.2.4. Kontrol ünitesi	44
5.2.4.1. Dinamometre	44
5.2.4.2. Ölçüm elemanları ve göstergeler	44

5.3. TEJ Düzeneginin Deneysel Çalışması	45
5.4. Deneysel Yöntem	46
5.5. Deneysel Hesaplamalar	47
5.2.1. Maksimum güç teoremi	47
5.2.2. Kısa devre akımı	49
BÖLÜM 6.	
ARAŞTIRMA BULGULARI	51
BÖLÜM 7.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	72

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
AÖN	: Alt ölü nokta
Bi ₂ Te ₃	: Bizmut tellurid
Btu	: İngiliz ısı birimi
CFD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
CH ₄	: Metan
CNG	: Sıkıştırılmış doğalgaz motor jeneratörü
CO ₂	: Karbondioksit
EIA	: Amerika Enerji Bilgi Yönetim İdaresi
HC	: Yanmamış hidro karbonlar
HFCs	: Hidro florür karbonlar
H ₂ O	: Su buharı
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
KMA	: Krank mili açısı
Mt	: Milyon ton
Mtep	: Milyon ton eşdeğer petrol
N ₂	: Nitrojen
N ₂ O	: Nitröz oksit
NO _x	: Nitrojen oksit
O ₂	: Oksijen
OECD	: Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Örgütü
PFCs	: Perfloro karbonlar
QW	: Kuantum kaynaklı
SF ₆	: Sülfürhekza florid
SO ₂	: Sülfür oksit
SUV	: Spor araba

TEJ : Termoelektrik jeneratör
TEM : Termoelektrik modül
ÜÖN : Üst ölü nokta



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. OECD ve OECD dışındaki ülkelerde yıllara göre nüfus artışı ve birim dolar için Btu enerji yoğunluğu	1
Şekil 1.2. Dünyada 2007-2017 yıllarında toplam birincil enerji tüketimi	2
Şekil 1.3. Tüketilen birincil enerji kaynaklarının dağılımı	3
Şekil 1.4. Dünyada 2007-2017 yıllarında toplam petrol tüketimi	3
Şekil 1.5. Dünyada toplam petrol tüketiminin yıllara göre artış oranı	4
Şekil 1.6. Dünyada toplam CO ₂ emisyonu	5
Şekil 1.7. Dünyada toplam CO ₂ emisyonunun yıllara göre artış oranı	5
Şekil 1.8. Dünyada CO ₂ emisyonunun sektörel dağılımı	6
Şekil 2.1. İçten yanmalı dizel motorda çevrim	15
Şekil 2.2. İçten yanmalı motorlarda enerji dağılımı	18
Şekil 3.1. Otomotiv uygulamalarında enerji geri dönüşüm sistemlerinin sınıflandırılması	19
Şekil 4.1. Termoelement (ısı çift) yapısı	26
Şekil 4.2. TEM kesit görünümü	27
Şekil 4.3. TEJ elektrik devresi	29
Şekil 5.1. Isı eşanjörü genel görünümü	32
Şekil 5.2. 12 kanatçıklı ısı eşanjörü kesit görünümü	33
Şekil 5.3. 14 kanatçıklı ısı eşanjörü kesit görünümü	33
Şekil 5.4. 16 kanatçıklı ısı eşanjörü kesit görünümü	34
Şekil 5.5. 18 kanatçıklı ısı eşanjörü kesit görünümü	34
Şekil 5.6. a) 12 kanatçıklı, b) 14 kanatçıklı, c) 16 kanatçıklı ve d) 18 kanatçıklı yapıya sahip eşanjörlerin ANSYS Fluent'de akış analizine göre yüzeydeki ısı dağılım grafiği	36
Şekil 5.7. Deney düzeneği genel görünümü	38
Şekil 5.8. Deney motoru görünümü	38

Şekil 5.9. İmal edilen ısı eşanjörü	39
Şekil 5.10. Yük direncine göre üretilen maksimum güç grafiği	41
Şekil 5.11. a) Eşanjörün üst yüzeyinde TEM'lerin yerleştirilmesi b) Eşanjörün alt yüzeyinde TEM'lerin yerleştirilmesi	41
Şekil 5.12. Alüminyum soğutucu	42
Şekil 5.13. Radyatör ve salyangoz fan	43
Şekil 5.14. Dinamometre	44
Şekil 5.15. TEJ deney düzeneği şematik görünümü	46
Şekil 5.16. Gerilim kaynağı ve Thevenin eşdeğeri	47
Şekil 5.17. Bir gerilim kaynağının 1 (yüklü) ve 2 (kısa devre) durumları için devre şeması	49
Şekil 6.1. Yüksüz motor devir – egzoz gazı eşanjöre giriş-çıkış sıcaklıkları değişimi	51
Şekil 6.2. Yüksüz motor devir – eşanjör yüzey sıcaklığı değişimi	52
Şekil 6.3. Yüksüz motor devir – açık devre gerilimi değişimi	52
Şekil 6.4. Yüksüz motor devir – kısa devre akımı değişimi	53
Şekil 6.5. Yüksüz motor devir – üretilen güç	54
Şekil 6.6. 1800 d/d'den yüklü motor devir – egzoz gazı eşanjöre giriş-çıkış sıcaklıkları değişimi	54
Şekil 6.7. 1800 d/d'dan yüklü motor devir – eşanjör yüzey sıcaklığı değişimi	55
Şekil 6.8. 1800 d/d'den yüklü motor devri – açık devre gerilimi değişimi	56
Şekil 6.9. 1800 d/d'den yüklenen motor devri – kısa devre akımı değişimi	56
Şekil 6.10. 1800 d/d'den yüklenen motor devri – üretilen güç değişimi	57
Şekil 6.11. 1600 d/d'da kısmi yük – egzoz gazı eşanjöre giriş-çıkış sıcaklıkları değişimi	58
Şekil 6.12. 1600 d/d'da kısmi yük – eşanjör yüzey sıcaklığı değişimi	58
Şekil 6.13. 1600 d/d'da kısmi yük – açık devre gerilimi değişimi	59
Şekil 6.14. 1600 d/d'da kısmi yük – kısa devre akımı değişimi	60
Şekil 6.15. 1600 d/d'da kısmi yük – üretilen güç değişimi	60

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 5.1. Dizel motorun teknik özellikleri	39
Tablo 5.2. TEM teknik özellikleri	40
Tablo 5.3. Su pompası teknik bilgileri	43



TERMoeLEKTRİK MODÜL İLE ATIK ISIDAN ELEKTRİK ÜRETEEN BİR SİSTEM UYGULAMASI

ÖZET

Günümüzde enerji ihtiyacının artmasıyla birlikte bu ihtiyacın büyük bir bölümünü karşılayan fosil yakıtların tüketimi de artmaktadır. Yanması sonucunda CO₂ gibi zararlı gazlar açığa çıkaran fosil yakıtlar, küresel ısınma sorunu gibi çevreye ciddi zararlar vermektedir. Çevrenin korunması ve gelecekteki enerji kaynakları üzerindeki belirsizlik göz önünde bulundurulduğunda, sürdürülebilir enerji kaynakları ve enerji tasarrufu metodolojilerinin kullanımına yönelik çalışmalara yoğunlaşmıştır. Atık ısının geri kazanımı da bu çalışmalarda önemli bir yere sahiptir.

Bu çalışmada, içten yanmalı motorla çalışan otomobillerde yanma sonucunda açığa çıkan enerjinin egzozdan ısı olarak atmosfere verilen atık ısısından termoelektrik jeneratörle elektrik enerjisi elde etmek amaçlanmıştır. Böylelikle üretilen elektrik enerjisi otomobilin elektrikle çalışan elemanlarının bir kısmının ihtiyaçlarını karşılamasını sağlayabilecek, dolayısıyla aracın yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonu ile çevreye vereceği zararlar azaltılabilecektir. Bu amaçla ilk etapta egzoz atık ısı enerjisini kullanmak üzere termoelektrik modüllerin yerleştirileceği ısı eşanjörü tasarımı yapılmıştır. Daha sonra bu eşanjör birtakım parametreler göz önünde bulundurularak ANSYS Fluent modülünde analiz edilmiş ve analiz sonuçları kıyaslanarak optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon çalışmasına göre eşanjör içerisinde egzoz gazının da akışına engel olmayarak ısıyı en iyi tutabilen kanat yapısına sahip tasarım olan 14 kanatçıklı ısı eşanjörü imal edilmiştir. Deney sistemi ana hatlarıyla deney motoru, eşanjör ünitesi, soğutma ünitesi ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır.

Deneysel çalışmalarda, deney motoru ile yüksüz-değişken devir, tam yük-değişken devir ve sabit devir değişken yük olmak üzere üç farklı çalışma yapılmıştır. Buna göre tam yük-değişken devir deneylerinde egzoz çıkış sıcaklığı 285°C'de 23,1 V gerilim elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Enerjinin geri kazanımı, termoelektrik, termoelektrik jeneratör, egzoz atık ısı, içten yanmalı motor.

APPLICATION OF A SYSTEM GENERATING ELECTRICITY FROM WASTE HEAT WITH THERMOELECTRIC MODULE

SUMMARY

Nowadays, with the increase in energy demand, the consumption of fossil fuels that satisfy most of this need has been increasing. Fossil fuels that emit harmful gases such as CO₂ as a result of combustion cause serious damage to the environment such as global warming. Considering the environmental protection and the uncertainty over future energy sources, studies have been focused on the sustainable energy resources and use of energy saving methodologies. The waste heat recovery is also an important part of these studies.

In this study, it has been aimed to obtain electric energy with thermoelectric generator from waste heat which is given from exhaust to atmosphere as a result of combustion in internal combustion engines. The generated electrical energy can then be provided to the car to meet the needs of some electrically operated components, thus reducing the vehicle's fuel consumption and CO₂ emissions and damages to the environment.

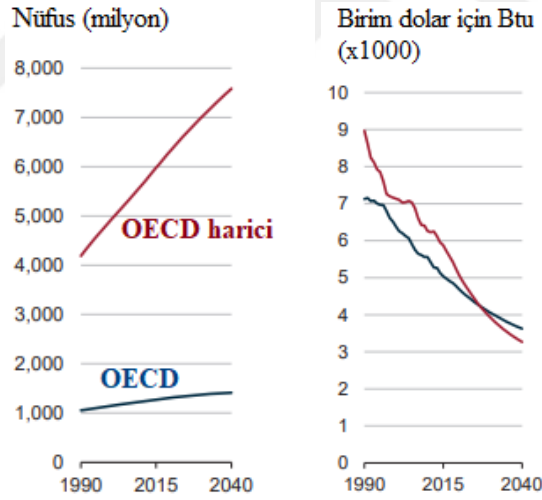
For this purpose, a heat exchanger design in which the thermoelectric modules will be installed has been made in order to use the exhaust waste heat energy. Then, this heat exchanger has been analyzed in ANSYS Fluent module by considering some parameters and optimization has been made by comparing the results. According to the optimization work, the 14 fin heat exchanger with a wing structure that can hold the best heat without hindering the flow of the exhaust gas in the heat exchanger has been manufactured. The test system consists of test engine, heat exchanger unit, cooling unit and control unit.

In the experimental studies, three different studies have been carried out with the test engine as unloaded-variable speed, full load-variable speed and constant speed variable load. Accordingly, in the full load-variable speed tests, the exhaust output temperature at 285 °C yielded 23,1 V voltage.

Keywords: Energy recovery, thermoelectric, thermoelectric generator, exhaust waste heat, internal combustion engine.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanlığın gelişmesindeki en önemli etkenlerden biri olan enerjinin kullanımı, dünyada nüfus artışı, ekonomik gelişmeler, sanayileşme ile birlikte kalkınma ve refahın artmasıyla önemli oranda artış göstermektedir (Pandiyarajan, Chinna Pandian, Malan, Velraj ve Seeniraj, 2011). Amerika Enerji Bilgi Yönetim İdaresi (EIA) (2017) raporunda; Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) üyesi olan ve OECD üyesi olmayan ülkelerdeki nüfus artışı ve buna bağlı olarak enerji yoğunluğunda yaşanacak olası senaryolar değerlendirilmiştir. Şekil 1.1’de OECD ve OECD dışındaki ülkelerde yıllara göre nüfus artışı ve birim dolar için Btu enerji yoğunluğuna ait grafikler verilmektedir.



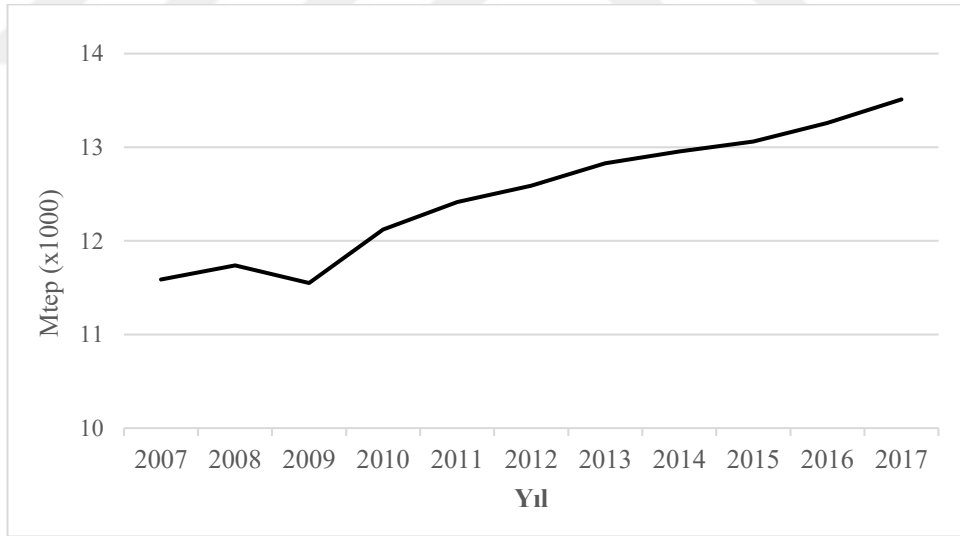
Şekil 1.1. OECD ve OECD dışındaki ülkelerde yıllara göre nüfus artışı ve birim dolar için Btu enerji yoğunluğu (Amerika Enerji Bilgi Yönetim İdaresi (EIA), 2017).

Bu rapora göre; 1990 yılında yaklaşık 4 milyar olan OECD üyesi olmayan ülkelerin nüfusu, 2040 yılına gelindiğinde yaklaşık %87'lik bir artış ile 7,5 milyar rakama ulaşacaktır. OECD üyesi ülkelerde ise 1990 yılında yaklaşık 1 milyar olan nüfus 2040 yılına gelindiğinde %50'lik bir artış ile 1,5 milyar olacaktır. Ayrıca, OECD üyesi olmayan ülkelerde 1990 yılında birim dolar başına 9000 İngiliz ısı birimi (Btu) olan enerji yoğunluğu 2040 yılında yaklaşık 3000 Btu olacaktır. OECD üyesi ülkelerde ise 1990

yılında birim dolar başına yaklaşık 7000 Btu olan enerji yoğunluğu 2040 yılına gelindiğinde ortalama 3500 Btu olacaktır.

Aynı raporda, OECD üyesi ve OECD üyesi olmayan olarak ayrılan dünyanın 16 bölgesi için dünya enerji tüketiminde yaşanacak olası seneryolar da değerlendirilmektedir. Buna göre; 2015 ve 2040 yılları arasında dünya enerji tüketimi %28 oranında artarken, artışın yarısından fazlasının güçlü ekonomik büyümenin enerji talebini arttırdığı OECD üyesi olmayan (Çin ve Hindistan dahil) ülkelere kaynaklanacağı belirtilmektedir (EIA, 2017).

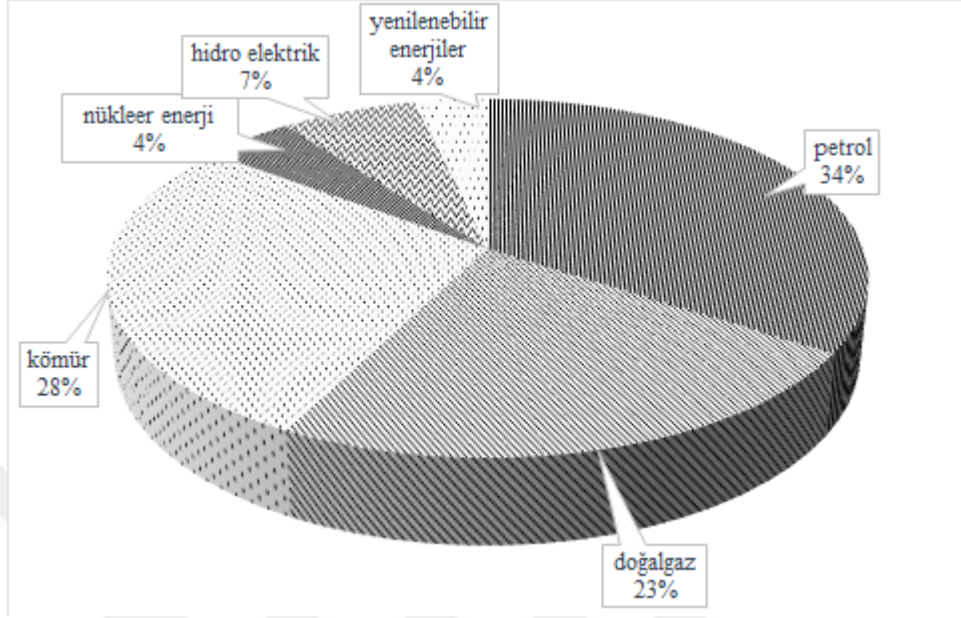
BP istatistik (2018) enerji raporuna göre, dünyada 2007 yılında tüketilen toplam birincil enerji 11588,4 milyon ton eşdeğer petrol (Mtep) iken, 2017 yılında toplamda 13511,2 Mtep enerji tüketilmiştir. Bu verilere göre dünyada tüketilen toplam enerji miktarı 10 yılda %14,23 artış göstermiştir. Şekil 1.2'de Dünyada 2007-2017 yıllarında toplam birincil enerji tüketim miktarı verilmektedir.



Şekil 1.2. Dünyada 2007-2017 yıllarında toplam birincil enerji tüketimi (BP istatistik, 2018).

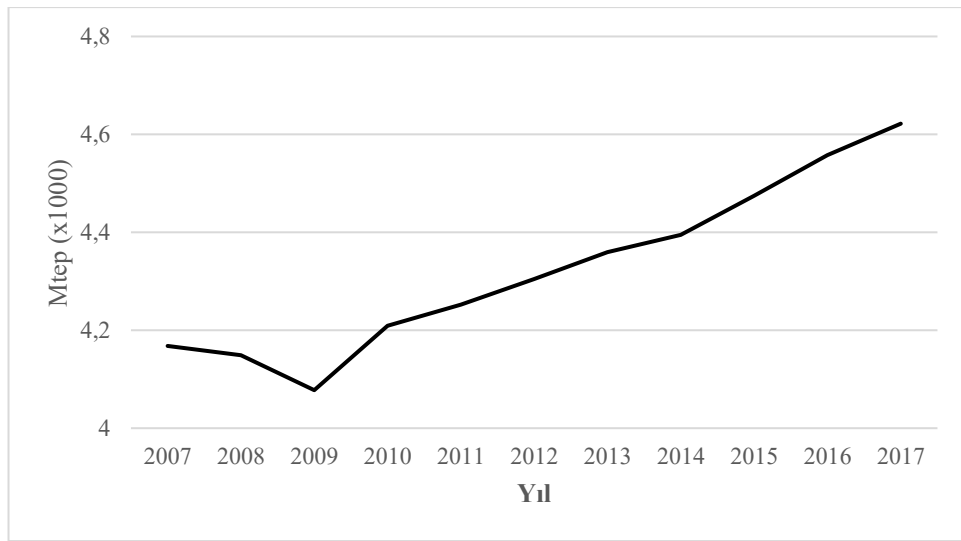
Tüketimi her geçen gün artan bu enerjinin 11509,4 Mtep ile %85' ini fosil yakıtlar oluştururken diğer %15'lik bölümünü nükleer enerji, hidroelektrik ve yenilenebilir enerjiler oluşturmaktadır. Tüketilen fosil yakıtların %40'ını oluşturan petrolün birincil

enerji tüketimindeki oranı %34'tür. Şekil 1.3'de tüketilen birincil enerji kaynaklarının dağılım grafiği verilmektedir (BP istatistik, 2018).



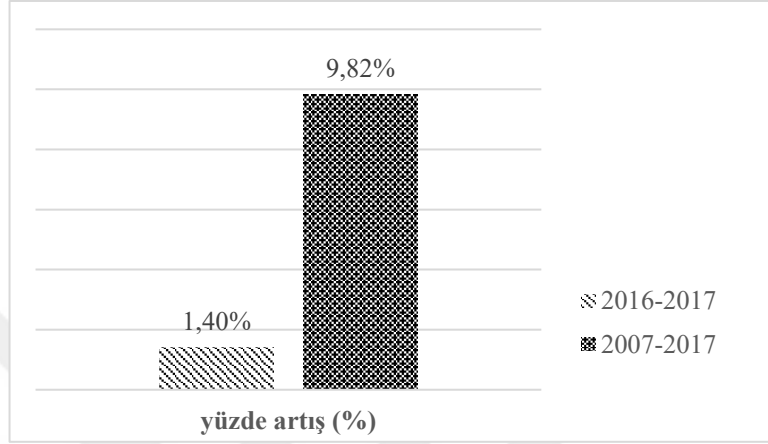
Şekil 1.3. Tüketilen birincil enerji kaynaklarının dağılımı (BP istatistik, 2018).

Şekil 1.4'te 2007 ve 2017 yılları arasında toplam petrol tüketim miktarı verilmektedir. Fosil yakıtlar arasında en fazla tüketilen enerji kaynağı olan petrolün tüketim miktarı da yıllara göre artan bir eğilim göstermektedir (BP istatistik, 2018).



Şekil 1.4. Dünyada 2007-2017 yıllarında toplam petrol tüketimi (BP istatistik, 2018).

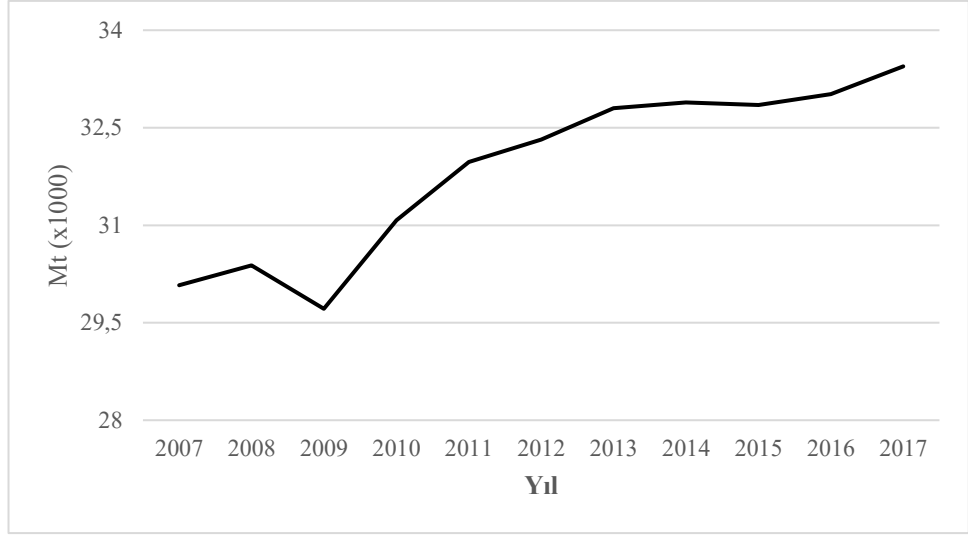
Şekil 1.5’ te dünyada toplam petrol tüketiminin yıllara göre artış oranı gösterilmektedir. 2007 yılında tüketilen toplam petrol miktarı 4167,8 Mtep iken 2017 yılında 4621,9 Mtep’e ulaşarak %9,82’lik artış göstermiştir. 2016 yılında tüketimi 4557,3 Mtep olan petrol tüketimi 2017 yılına kadar %1,4 artmıştır (BP istatistik, 2018).



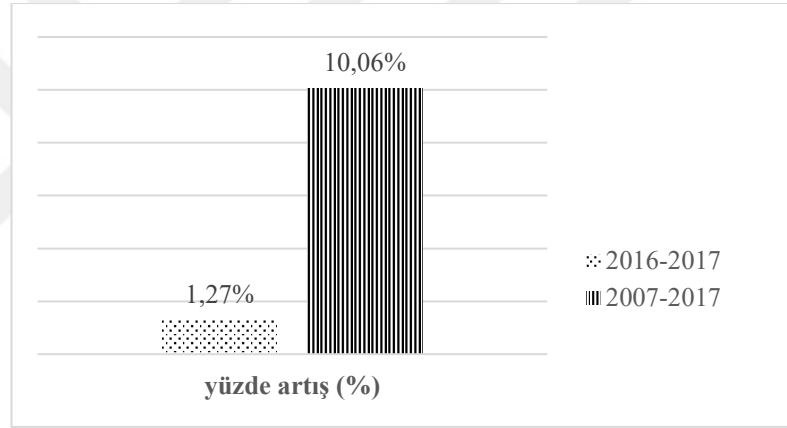
Şekil 1.5. Dünyada toplam petrol tüketiminin yıllara göre artış oranı (BP istatistik, 2018).

Dünya atmosferine insanların enerji kullanımı, sanayi ve tarım gibi çeşitli faaliyetleri sonucunda sera gazları olarak bilinen Karbondioksit (CO₂), Metan (CH₄), Nitröz oksit (N₂O), Hidroflorür karbonlar (HFCs), Perfloro karbonlar (PFCs), Sülfürhekza florid (SF₆) gibi florlanmış gazlar yayılmakta ve bu gazlar dünyaya gelen güneş ışınlarının bir kısmını tutarak yeryüzünün ısı kaybına engel olmaktadır. Bu gazlar arasında atmosfere en fazla gönderilen ve dolayısıyla en çok sera etkisine sebep olan gaz CO₂ gazıdır (Amerika Çevre Koruma Ajansı, 2017). Dünya da fosil yakıtların yanması sonucunda günde ortalama 91 milyon ton (Mt) CO₂ gazı atmosfere salınmaktadır. Bu rakam 2007 yılında günde ortalama 82 Mt iken her geçen yıl artarak 2017 yılında 91 Mt’a ulaşmıştır (BP istatistik, 2018).

Şekil 1.6’da 2007-2017 yılları için yıllık CO₂ emisyon miktarı ve Şekil 1.7’de CO₂ emisyon miktarındaki artış oranları verilmektedir. 2007 yılında toplam CO₂ emisyonu 30078,7 Mt iken, 2017 yılında 33444 Mt’a ulaşarak %10,06’lık artış göstermiştir. 2016 yılında 33017,6 Mt olan CO₂ emisyonu 2017 yılına kadar %1,27 artmıştır (BP istatistik, 2018).



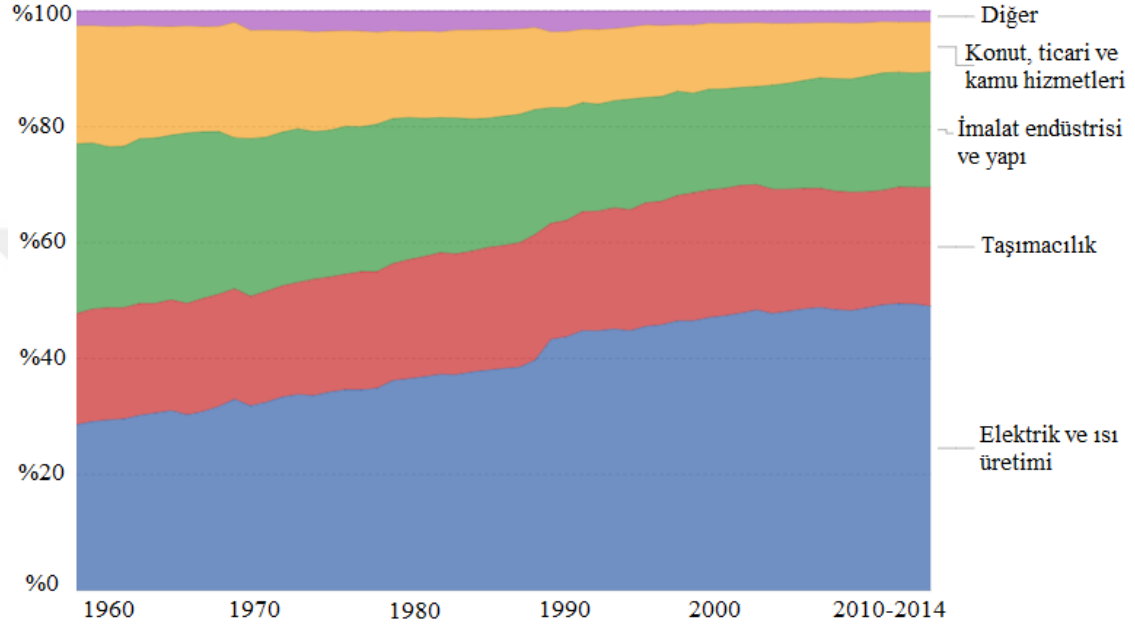
Şekil 1.6. Dünyada toplam CO₂ emisyonu (BP istatistik, 2018).



Şekil 1.7. Dünyada toplam CO₂ emisyonunun yıllara göre artış oranı (BP istatistik, 2018).

Şekil 1.8’de CO₂ emisyonunun sektörlere göre dağılımı verilmektedir. IEA verilerine göre, atmosfere salınan CO₂ emisyonu miktarı 1960 yılından 2014 yılına kadar taşımacılık sektöründeki payı artış göstermiştir. 1960 yılında CO₂ emisyonunun %19,17’si taşımacılıktan kaynaklanırken, 2014 yılında bu oran %20,45’e çıkmıştır. Ayrıca 2014 yılında CO₂ emisyonunun sektörel dağılımında %49,04 ile en yüksek orana sahip olan elektrik ve ısı üretimi yer almaktadır. İkinci en yüksek oran taşımacılığa ait olmakla birlikte bunu imalat endüstrisi ve inşaat sektörü takip etmektedir. Yerleşim yapıları ile ticari ve kamu hizmetleri %8,6’lık bir dağılıma sahipken, %1,96’lık dağılımı diğer sektörlerden kaynaklanmaktadır (Ritchie ve Roser, 2017).

CO₂ emisyonunun artması, küresel ısınma olarak bilinen atmosferdeki ısının artmasına sebep olmaktadır. Atmosferdeki bu sıcaklık artışı buzulların erimesine, tatlı suların buharlaşarak kuraklık oluşumuna dolayısıyla canlıların yaşaması için uygun iklim koşullarına engel olmaktadır (Cess, Goldenberg, 1981; Oelkers, Cole, 2008; Solomon, Plattner, Knutti ve Friandlingstein, 2009).



Şekil 1.8. Dünyada CO₂ emisyonunun sektörel dağılımı (Ritchie ve Roser, 2017).

Özellikle enerji ihtiyacının artmasına bağlı olarak çevreye olan zararlı etkileriyle fosil yakıt tüketiminin sürekli artması ve var olan kısıtlı kaynak rezervlerinin giderek azalması dünya enerji politikasını yeniden gözden geçirmeye, sürdürülebilirlik ve enerjiyi etkin kullanmaya yöneltmiştir. Bu bağlamda kalkınma ile enerji kullanımının devamlılığını sağlamak ve sürdürülemez duruma düşmemesi için önlemler alınmasını gerektiren sürdürülebilir kalkınma önem kazanmıştır. Sürdürülebilir kalkınmayı sağlamak, enerji kaynaklarının tükenmemesini ve bunların kullanımında meydana gelebilecek olumsuz çevre etkilerinin göz ardı edilmemesini kapsamaktadır. Buna göre sürdürülebilirlik için enerji kaynakları temiz ve tükenmez olmalıdır. Sürdürülebilirliği sağlayan temiz ve tükenmez olan enerji kaynakları günlük güneş enerjisi ve biokütle, rüzgâr, deniz dalgaları, okyanuslardaki sıcaklık farkları, yağış (su gücü) gibi güneş enerjisi türevleri, yer içi ısı ve gelgitlerden oluşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları olarak nitelendirilen bu

enerji kaynaklarından enerji elde etmek üzerine ülkemizde ve dünyada birçok çalışmalar yapılmaktadır (Ankara Milli Eğitim Bakanlığı (MEB), 2002). Bunun yanı sıra yapılan başka bir çalışma da enerjinin geri kazanımı ve verimli kullanımı üzerinedir. Buna en iyi örneklerden biri atık ısı enerjisinin tekrar kazanımıdır.

Atık ısı enerjisi geri kazanım uygulamaları özellikle başta çimento sektörü olmak üzere, demir-çelik ve cam sanayi gibi ısıtmanın önemli olduğu endüstriyel tesislerde yapılmakta ve yüksek oranlarda enerji tasarrufu sağlamaktadır. Endüstriyel tesislerde kullanılan kazan, fırın, kojenerasyon tesisleri gibi makinalarda atmosfere atılan bacadaki atık ısı enerjisi bir ekonomizer veya reküperatör sistemiyle geri kazanılarak sıcak su veya sıcak hava elde etmede kullanılarak enerji tasarrufu elde edilebilmektedir (Sarıbuğa, 2019).

Ülkemizde ve dünyada kullanımı giderek yaygınlaşan otomobillerin içten yanmalı motorlarında yanma sonucunda enerjinin %30-40'ı egzozdan ısı olarak atmosfere atılmaktadır (Singh ve Shrivastava, 2014). Egzozdan dışarıya salınan bu ısı enerjisini tekrar kazanmak günümüz teknolojisi ile mümkündür. Son yıllarda atık ısı enerjisinin geri kazanımı üzerine yapılan otomobil egzoz atık ısısından elektrik enerjisi elde etme çalışmaları önem kazanmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar aşağıda literatür özetlenerek verilmektedir:

Orr, Akbarzadeh ve Lappas (2016) araçların yakıt tüketimini ve CO₂ emisyonunu azaltmak amacıyla araç motorunun atık ısısından elektrik enerjisi elde etmişlerdir. Bu amaçla ısı tüpleri ve termoelektrik modüller (TEM) kullanarak ısı dönüştürme sistemi tasarlamışlardır. 8 adet seri bağlı TEM ve ısı tüpleri kullanmışlardır. Egzoz borusundan geçen gazın ısısı ısı tüpleri vasıtasıyla TEM'in sıcak yüzeyine iletilmektedir. Ortamdan alınan taze hava soğutma borusundan geçirilerek soğuk ısı tüplere iletilmekte ve bu ısı tüpleri vasıtasıyla TEM'in soğuk yüzeyini soğutma işlemi yapılmaktadır. Deneysel çalışmalarını farklı yük ve devirlerde ve TEM'lerin konumunu dik ve yatak olarak değiştirdikten sonra maksimum 37,85 W güç elde etmişlerdir. Bu durumda termoelektrik jeneratörün (TEJ) termal verimliliği maksimum %2,46'dır. Yakıt tüketimi, CO₂ emisyonu ve yakıt maliyetinde %1,57 azalma olmuştur.

Liu, Pan, Zheng, Yan ve Li (2016) araç egzozundan atık ısının enerji olarak kazanımı için 2 aşamalı TEJ prototipi geliştirmişlerdir. Sistemi matematiksel olarak modelledikten sonra deneysel çalışmalar yapmışlardır. TEJ prototipi altıgen yapıda tasarlanmış, her bir kenarında 2 katlı yerleştirilmiş aralarında alüminyum plaka bulunan 16 adet seri bağlı TEM ve tüm kenarlarda toplam 96 adet TEM bulunmaktadır. TEM'in sıcak yüzeyi ısısını egzozdan, soğuk yüzeyi ise kanatlı yapıya sahip soğutucudan almaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda modül sıcak yüzey sıcaklığı 473 K olduğu durumda üretilen maksimum güç çıkışını 250 W elde etmişlerdir. Sistem tek aşamalı olduğu durumda ulaşılan termal verimliliğin %4,04 olmasına nispeten çift aşamalı modül yerleştirildiği durumda termal verimliliğin %5,35 olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Caol, Luan ve Wang (2017) otomobil egzoz atık ısısının dönüşümü için ısı tüplü yeni bir tip TEJ prototipi geliştirmişlerdir. Buna göre TEJ, yan yüzeylerine en iyi ısıyı tutacak şekilde optimal değerleri 15° açılı ve 60 mm olacak şekilde yerleştirilen toplam 8 adet ısı tüp ve toplamda 36 adet TEM'den oluşmaktadır. Bu modüllerden elde edilen maksimum açık devre gerilimi 81,09 V, güç çıkışı 13,08 W, basınç düşümü 1657 Pa ve TEJ'in güç aktarım verimliliği %2,58 olarak belirlemişlerdir.

Su, Wang, Liu ve Deng (2014) TEJ verimliliğinin artmasında önemli olan termal kapasite ve ısı transferini arttırmaya yönelik otomobil egzoz atık ısısından elektrik enerjisi elde eden TEJ tasarımı yapmışlardır. Tasarımda önce hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) programında ısı eşanjörünün iç yapısı ve malzemesini değiştirerek simüle etmişlerdir. Daha sonra elde edilen en optimal değere göre tasarımı ve deneysel çalışmalarını yapmışlardır. Simülasyonda kılçık, akordeon ve dağınık şekilli olmak üzere 3 farklı iç yapıya sahip 598 x 250 mm, 660 x 305 mm ve 775 x 365 mm 3 farklı boyutta ısı eşanjörü için demir ve pirinç malzemelerine göre simülasyon denemeleri yapmışlardır. Bu sonuçlara göre akordeon yapılı model daha ideal olarak seçmişlerdir. Sonra akordeon yapılı modelin boyutlarını üç farklı şekilde değiştirmişlerdir. Yüzey alanı arttıkça terminal sıcaklığının azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu durum üretilen maksimum güç bakımından düşünüldüğünde, geniş yüzey alanına sahip modelde TEM sayısı artırılarak denge sağlanabilmektedir. Oluşturulan optimal modele malzeme cinsinin etkisi incelendiğinde pirincin ısıyı daha iyi ve homojen dağılımda iletmediği sonucuna

ulaşmışlardır. Daha sonra CFD simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar arasındaki uyuşmaya göre 660 x 305 mm boyutlarında yüzey alanlı ve akordeon şekilli pirinç malzemeden yapılmış model sıcak yüzey oluşturmak için seçmişlerdir. Bu modellerle eşanjör ve TEM'ler arasındaki termal direnci azaltabileceği ve yüksek yüzey sıcaklığı ve homojen ısı dağılımı elde edebileceği sonuçlarına ulaşmışlardır.

In, Kim, Son ve Lee (2015) dizel motorlu bir taşıtın egzoz gazından elektrik enerjisi elde etmek için üretilen TEJ'in verimliliğini artırmak ve çalışma koşullarını optimize etmeyi amaçlamışlardır. TEM'lerin ısı transfer özelliklerini teorik analizle tahmin etmişler ve daha sonra deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Çalışmada TEJ'deki ısı emicilerin sütunlarını ileri yönde üçgen, ters yönde üçgen ve dikdörtgen prizması olarak 3 farklı şekilde tasarlamışlardır. Önce HZ-20 tip TEM'leri egzoz hattındaki katalizörün arka ucuna monte etmişlerdir ve üçgenel yapıda ısı emicisi kullanmışlardır. Egzoz gazının akış hızını belirlemek için TEM'in ön ve arkasındaki basınç farkını ölçmüşlerdir. TEM'in ön ve arka uçları arasındaki artan basınç farkı, egzoz gazı akışlarının azalmasını göstermektedir; egzoz gazı TEM'in içinde daha uzun kaldığını ve bunun da ısı emici içindeki egzoz gazının ısı aktarım kapasitesini arttırdığını göstermektedir. Daha sonra jeneratörün arkasına daha yüksek ısıda çalışma kapasitesine sahip 10 adet HZ-20, ön tarafına da daha düşük performanslı 10 adet HZ-14 modüllerini yerleştirmişlerdir. Isıl emici olarak dikdörtgen prizması yapılı olanı kullanmışlardır. Buna göre en iyi ısıl iletkenliğine sahip ısı emici dikdörtgen prizma yapılı olanıdır. Deney aracını 1500 rpm'de ve 6-18 kg.m yük aralığında 2 kg.m artışla test etmişlerdir. Buna göre maksimum sıcaklık 430 °C, minimum sıcaklık 250 °C ve iki yüzey arası ortalama sıcaklık farkı 30 °C'dir. En çok basınç farkı dikdörtgen yapıda ısı emici kullanıldığında gözlemlenmiştir. Üretilen enerjinin minimum akımı 2,2 A, maksimum akımı 6,1 A; minimum gerilim 1,43 V, maksimum 2,4 V ve güç minimum 3,2 W, maksimum 14,5 W aralıklarında değişmektedir.

Wojciechowski, Merkisz, Fuc, Lijewski ve Schmidt (2007) sıkıştırma ile ateşlemeli dizel motora monte edilen TEJ prototipi tasarlamışlardır. Tasarladıkları ısı eşanjörü modeli motorun çalışma parametrelerine bağlı olarak 0,6 – 5,0 kW egzoz gazı enerjisinin kullanılmasına izin vermiştir. Fakat yine de sıcaklık dağılımı analizi, spesifik

değişikliklerin tasarıma girmesiyle birlikte 25 kW'lık ısı enerjisini bile geri kazanmanın mümkün olduğunu göstermiştir. TEM'lerin %5 verimlilikte çalıştığı varsayılırsa, sistem 750 W maksimum elektrik gücünü elde etmeye izin verebilmektedir. Bu güç, 1,3 dm³ motor kapasiteli araçlarda kullanılan tipik alternatörlerin gücü ile kıyaslanabilmektedir.

Karri, Thacher ve Helenbrook (2011), spor bir aracın (SUV) ve sıkıştırılmış doğalgaz motor jeneratör setinin (CNG) egzoz akışına yerleştirilen Bi₂Te₃ (bizmut tellurid) ve QW (kuantum kaynaklı) TEJ'ler tarafından üretilen güç ve yakıt tasarruf tahminlerini bildirmektedirler. Oluşturdukları TEJ sistemini kod ile desteklenmiş araç modelleme sistemi olan ADVISOR 2002 programında tanımlayarak simülasyonlarını yapmışlardır. Buna göre her iki uygulamada da QW tabanlı TEJ, Bi₂Te₃ tabanlı TEJ'e göre daha fazla güç üretmiştir. SUV için QW tabanlı TEJ yaklaşık 100 – 450 W güç üreterek %2 – 2,3 oranında yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Ancak yuvarlanma direnci parazit kaybına bağlı olarak yakıt tasarrufu %30 azalmıştır. CNG için optimize edilmiş QW tabanlı TEJ yaklaşık 5,3-5,8 kW'lık güç üreterek %3'lük bir yakıt tasarrufu sağlamaktadır.

Weng, Lin ve Huang (2016) soğuk atık enerjinin sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla TEJ kullanarak elektrik enerjisi elde etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada soğuk enerji kaynağı olarak kullandıkları doymuş ve sıvılaştırılmış kiryojenik nitrojeni bir tankın içerisinde depolamışlar ve vana kullanarak bu nitrojenin, 4 tarafına da kendinden ısıtılmalı TEJ seri bağlı yerleştirilerek oluşturulmuş TEJ soğuk atığı dönüştürme sisteminin içerisindeki delikten geçmesini sağlamışlardır. TEJ'in soğuk yüzeyi için sıcaklığı ortalama 80 K olan kiryojenik nitrojen ve sıcak olan yüzeyinin de hava ile ısınmasını sağlamak ve bu ısıyı daha iyi tutmak için fan ve ısı tutucu alüminyumdan oluşan sistemler her bir yüzey için kullanmışlardır. TEJ soğuk atığı dönüştürme sistemine gönderilen akışkanın akış hızı artırılarak TEJ'den elde edilecek olan güçle ilgili tahminlerde bulunmuşlar ve daha sonra bu verileri gerçekleştirmiş oldukları sistemden elde ettikleri değerlerle kıyaslamışlardır. Sonuç olarak yapılan tahminlerle deney sonuçları arasında büyük fark olduğunu ve bununda TEJ dönüştürme sisteminin etrafında soğuk ısıdan kaynaklı meydana gelebilecek buzlanmaları hesaba dahil etmedikleri için tahminlerinin yanlışlığı kanısına varmışlardır. Buna rağmen akışkan hızınının 3,7 g/s olduğu durumda 0,93 W gibi bir güç elde etmişlerdir.

Tian, Sun, Jia, Liang, Shu ve Wang (2015) dizel motor egzoz sıcaklığını kullanarak parçalı TEJ'in matematiksel modelini oluşturmuşlardır. Parçalı TEJ, geleneksel TEJ ile kıyaslamışlar ve performansını optimize etmişlerdir. Daha sonra modele egzoz sıcaklığı, soğuk kaynak sıcaklığı, termokupl uzunluğunun etkilerini simule etmişlerdir. Sonuçlara göre; parçalı TEJ yüksek sıcaklıklar ve sıcaklık farkı için daha elverişlidir. Üretilen güç termokupl uzunluğu ile ters, dönüştürme verimliliği ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Parçalı TEJ güvenilir ve elverişlidir. Daha yüksek güç ve dönüştürme verimliliğine sahip olduğundan dolayı bu durum sahip olduğu yüksek maliyeti telafi edebilmektedir.

Liang, Sun, Tian, Shu, Y. Wang ve X. Wang (2014) tek kademeli ve çift kademeli TEJ'leri kıyaslamışlardır. Çift kademeli TEJ'den elde edilen güç ve dönüştürme verimliliği 600 K ve 800 K aralığında tek kademeli olandan daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Çift kademeli TEJ'in maksimum güç çıkışı 18,6 W, dönüştürme verimliliği %23,2'dir.

He, Wang, Zhang, Li ve Lu (2015) motor atık ısı enerjisinin geri dönüşümü için akış yönündeki sıcaklık gradyanının etkisini içeren bir TEJ'in gelişmiş matematiksel modelini sunmuşlardır. Motorun çalışması sırasında meydana gelen egzoz gazı parametrelerindeki dalgalanmanın, ilgili TEJ'in maksimum güç çıkışındaki performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Maksimum güç çıkışı için uygun olan optimal modül alanının gazın sıcaklığından ziyade akış hızından etkilendiği sonucuna varmışlardır. Yüksek güç çıkışı veren optimal modül alanı tasarlamak için bir güç sapma analizi yöntemi geliştirmişlerdir. Buna göre; optimum tasarım alanları eş akış için 0,22 m² ve karşı akış için 0,3 m² olduğu sonucuna varmışlardır. Optimal alan eş akış için yaklaşık %6 ve maksimum enerji çıkışından karşı akış için %2'lik maksimum bir sapma üretmiştir. Bu yüzden karşılıklı akış düzenlemesini önermişlerdir, çünkü yeterli sistem alanı varsa, maksimum güç çıkışından, kendi optimal tasarım alanlarında bir eş akış düzenlemesinden daha küçük bir sapma sağlamaktadır.

Temizer (2014) egzoz gazı atık ısısından elektrik üretilmesini sağlamak amacıyla TEJ prototipi gerçekleştirmiştir. Sıcak yüzey için bir dizel motorun egzozundan motorun çalışması sonucu açığa çıkan gazlarının ısı enerjisinden faydalanmıştır. Soğutma

işleminde ise radyatörden yararlanmışır. Sistemin çalışması için gerekli elektrik gücü 20 W olarak belirlemiştir. Alüminyum 6061 malzemesinden yapılan sekizgen yapı üzerine 40 adet TEM'i seri halde bağlayarak yerleştirmiştir. TEM'lerden üretilen elektriksel güç Doğru akım (DA)/DA konvertöre aktararak akü şarjını gerçekleştirmiştir. Daha sonra sistemin ANSYS Workbench Fluent programı yardımıyla ısı-akış analizlerini gerçekleştirmiştir. ANSYS Thermal-Electric programı yardımıyla TEM'lerin ısı-elektrik analizlerini yapmıştır. TEJ sisteminin ürettiği maksimum elektriksel çıkış gücü motorun 3500 d/d ve 100 Nm yükte çalışma şartlarında 156,7 W olarak ölçülmüştür. Deneysel veriler simülasyon sonuçları ile kıyaslandığında simülasyon sonuçları daha fazla elektrik üretildiğini göstermektedir.

Ahıska, Mamur ve Uliş (2011) MATLAB/Simulink benzetim programıyla TEM'in TEJ olarak kullanılması için matematiksel modelinin benzetimini yapmışlar. Ayrıca simülasyon sonuçları ile karşılaştırmak üzere TEJ sistemi tasarlamışlar. Kullanılan TEM'nin sıcak yüzeyi ısıtıcı ile ısıtılmış ve soğuk yüzey için soğuk su dolaşım sisteminden faydalanmışlardır. TEJ'lerden alınan değerleri, yüzey ve su sıcaklıklarını sürekli izlemek için SCADA sistemi geliştirmişlerdir ve alınan bu veriler kaydedilmiştir. Benzetim sonuçlarıyla deney sonuçlarını karşılaştırmış ve akım, gerilim ve güç değerleri için ortalama hata yüzdeleri sırasıyla; %5,57, %5,12 ve %3,72 olarak elde etmişlerdir. TEJ atık ısı giriş miktarı $Q_H = 197$ W ve sıcaklık farkı 100°C iken, çıkış gerilimi $V_{\text{max}} = 2,2$ V, çıkış gücü $P_{\text{max}} = 6,71$ W ve verim %3,4 elde etmişlerdir.

Baş (2014) TEJ ile bir deney sistemi oluşturmuştur, jeneratörün sıcak yüzeyi soba borusunda üretilen atık gaz tarafından ısıtılarak ve soğuk olan yüzeyi üzerinden su geçirilip soğutulurken sıcaklık farkı ile elektrik üretimi sağlamıştır. Sonuç olarak minimum 5,11 V, maksimum 8,69 V gerilim değeri elde etmiştir. Debi 0,083 lt/s olduğunda 8,69 V ve 1,45 A'lık maksimum performans elde etmiştir.

Atik ve Kayabaşı (2009) jeotermal enerjinin ısı enerjisinden elektrik elde etmek üzere TEJ imal etmişlerdir. TEM'in sıcak yüzeyi için sıcak su diğer yüzeyi için şebeke suyundan faydalanarak sıcaklık farkı oluşturmuşlardır. 8 adet TEM kullanarak

oluşturdukları jeneratörden sıcak su girişi 70 °C için gerilim 6 V, üretilen elektriksel güç 2,5 W olarak elde etmişlerdir.

Bu tez çalışmasında içten yanmalı motorların egzoz gazındaki atık ısı enerjisinden faydalanılarak geri kazanım yoluyla elektrik enerjisi elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede aracın enerji ihtiyacının bir kısmının karşılanması, tüketilen yakıt miktarının azaltılması ve emisyon yoğunluğunun düşürülmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla yapılan otomobil egzoz atık ısısının yeniden kazanımı konusundaki çalışma TEJ ile atık ısıyı elektrik enerjisine dönüştürmek hususundadır.



BÖLÜM 2. İÇTEN YANMALI MOTORLARIN ÇALIŞMASI VE VERİM

2.1. Gerçek Motor Çevrimleri

Benzinli ve dizel motorların çoğu 2 zamanlı ya da 4 zamanlı olarak çalışmaktadırlar. Tasarımlardaki küçük farklılıklar haricinde temel çevrimler tüm motorlar için standarttır.

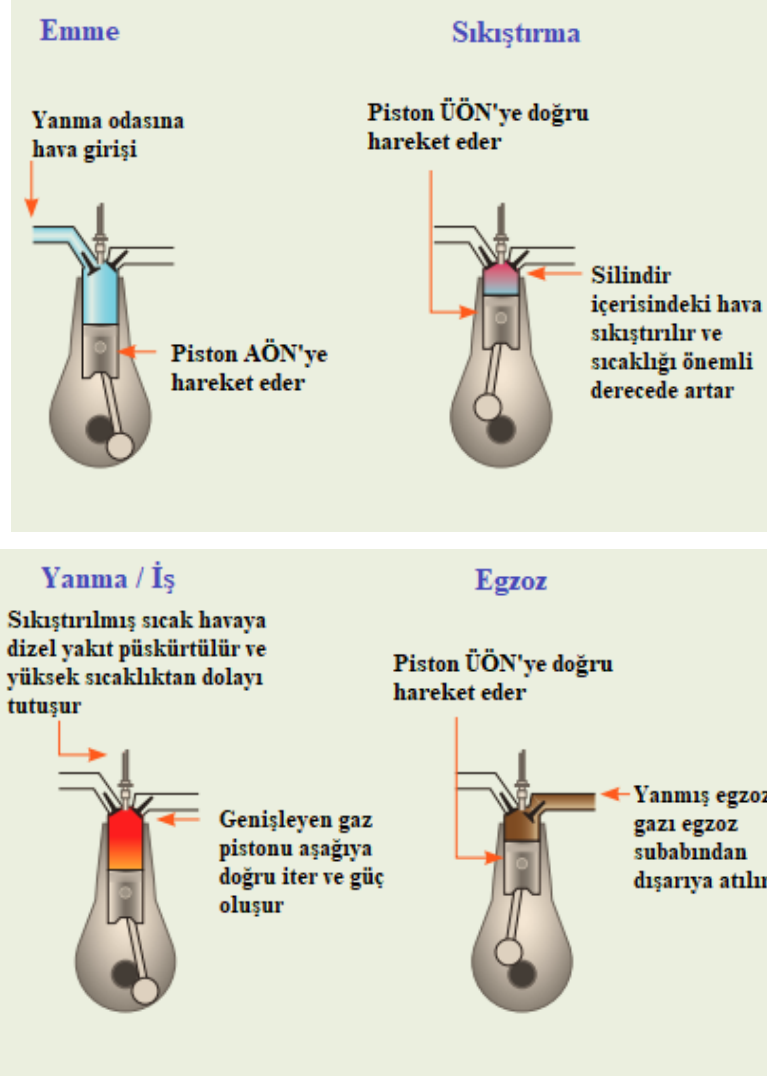
Bir motorun çalışması genel olarak;

- yakılabilir karışımın silindir içine doldurulması,
- karışımın küçük bir hacimle sıkıştırılması,
- gücün elde edilmesi için karışımın ateşlenmesi ya da püskürtülmesi ve genişlemenin sağlanması,
- yanan gazların silindirden atılması

şeklinde birbirini izleyen bu 4 olayın tekrarı ile sağlanmaktadır (Yaşar (Ed.), 2016).

2.1.1. Dört zamanlı dizel motor çevrimi

Günümüzde dizel motorlar mekanik püskürtmeli olup karma çevrime göre çalışmaktadırlar. Çevrim; emme, sıkıştırma, yanma – genişleme ve egzoz zamanı olarak adlandırılan dört ana zamanda (720° krank mili açısında (KMA)) ve krank milinin iki tam devrinde gerçekleşmektedir. Zaman kavramı termodinamik bir çevrimde farklı karakter arz eden süreçlerden her biri anlamına gelmektedir. Kurs ise pistonun alt ölü nokta (AÖN) ile üst ölü nokta (ÜÖN) arasındaki 180° 'lik KMA'ya karşılık gelen hareketidir. Termodinamik süreçler için her iki terim de kullanılabilir (Yaşar (Ed.), 2016). Şekil 2.1'de dört zamanlı dizel motor çevrimi verilmektedir.



Şekil 2.1. İçten yanmalı dizel motorda çevrim (Rissman ve Kennan ,2013).

Birinci kurs (emme kursu): emme zamanı, emme supabının açılmasıyla başlamakta ve kapanmasıyla tamamlanmaktadır. Piston ÜÖN'dan AÖN'ya doğru hareket etmektedir. Pistonun aşağı yöndeki hareketi piston tarafından boşaltılan hacim içerisinde bir vakum oluşturmaktadır. Silindir içerisindeki vakum ile dış ortam arasındaki atmosferik basıncın emme sisteminde meydana getirdiği basınç farkı sonucunda hava dış ortamdan alınarak silindir içerisine gönderilmektedir. Bu zamanda silindirlere yalnızca hava emilmektedir. Burada silindirlere daha fazla hava girebilmesi için emme supabı ÜÖN'dan önce açılmakta ve AÖN'dan da bir müddet sonra kapanmaktadır. Emme olayı toplam 220° – 260° KMA'nda meydana gelmektedir (Yaşar (Ed.), 2016).

İkinci kurs (sıkıştırma kursu): Piston AÖN'ya ulaştıktan sonra geriye dönerek ÜÖN'ya doğru hareket etmektedir. Pistonun hareketi sırasında tüm supaplar kapalıdır ve silindir içerisinde sıkıştırılan hava basıncı ve sıcaklığı yükselmektedir. Sıkıştırma kursunun sonlarında yakıt direct olarak yanma odasına püskürtülür ve sıcak hava ile karışmaktadır. Bu durum yakıtın buharlaşmasına ve kendi kendine tutuşmasına sebep olmaktadır. Böylece yanma olayı başlamaktadır (Yaşar (Ed.), 2016).

Yanma: yanma tamamen ÜÖN civarında meydana gelmektedir ve yakıt püskürtülmesi tamamlanana ve piston AÖN'ya hareket etmeye başlayana kadar yaklaşık sabit basınçta devam etmektedir. Dizel yakıt ÜÖN'dan önce silindir içerisine püskürtülmektedir. Buna püskürtme avansı denir ve motorun devir sayısına bağlı olarak $10^0 - 20^0$ KMA arasında değişmektedir. Yanma ve yanma sonucu açığa çıkan ürünler nedeniyle silindir içi gaz karışımının sıcaklığını değiştirerek silindir içi sıcaklığını oldukça yükseltmektedir. Burada maksimum sıcaklık $1700 - 2100$ K olmaktadır (Yaşar (Ed.), 2016).

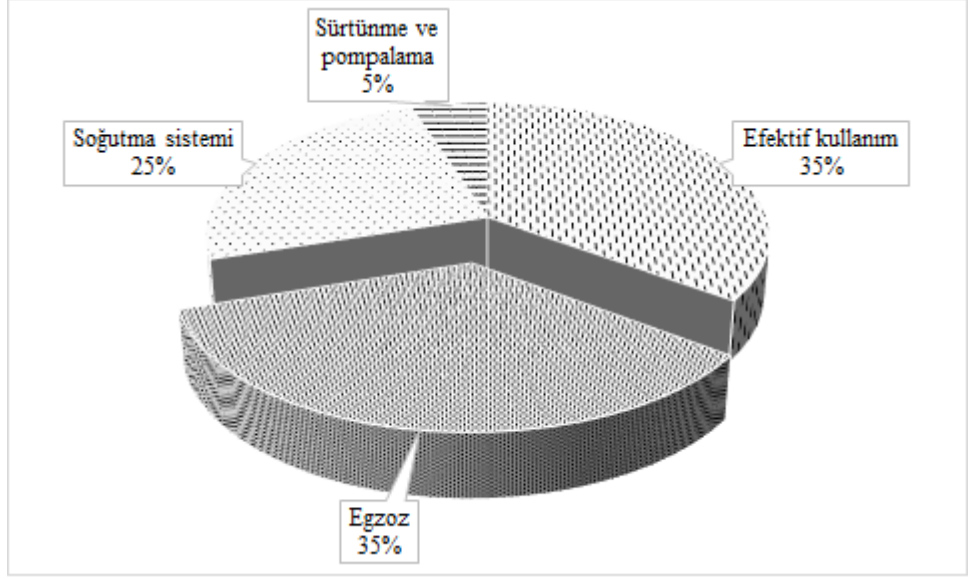
Üçüncü kurs (genişleme veya güç kursu): yanma sonucunda oluşan yüksek basınç pistonu AÖN'ya doğru itmektedir. Supaplar yine kapalı durumdadırlar. Bu çevrimin çıkış gücünün üretildiği kurstur. Pistonun ÜÖN'dan AÖN'ya hareketi sırasında artan silindir hacmi basınç ve sıcaklığın düşmesine neden olmaktadır (Yaşar (Ed.), 2016).

Dördüncü kurs (egzoz kursu): güç kursu tamamlandığında piston AÖN'ye hareket ederken silindir içi basınç ve sıcaklık ortam şartlarına göre hala yüksektir ve egzoz sistemi ile dış ortam arasında bir basınç farkı vardır. Bu basınç farkı piston AÖN'ye yaklaştığında egzoz subabının açılmasıyla sıcak egzoz gazlarının büyük bölümünün egzoz sistemi içerisinden silindirin dışına atılmasını sağlamaktadır. Egzoz gazları çevrimin ısı verimini düşüren yüksek değerde entalpiye sahiptir. Egzoz supabının AÖN'den önce açılması güç kursunda elde edilen işi azaltmaktadır. Fakat egzoz gazlarının basıncını atmosferik basınca düşürmeyi kolaylaştırmak ve egzoz kursu boyunca pistonu karşı koyan basıncı en az düzeye indirmek için gereklidir. Yüksek devir sayılı motorlarda egzoz supabının açılma açısı AÖN'den $20^0 - 70^0$ KMA öncedir (Yaşar (Ed.), 2016). Piston AÖN'ye ulaşana kadar egzoz gazının çoğu silindir dışına atılmaktadır. Fakat silindir atmosferik basınç değerine yakın egzoz gazlarıyla tamamen doludur. Açık kalan egzoz supabı ile

beraber piston AÖN'den ÜÖN'ye doğru hareket etmektedir. Piston ÜÖN'ye ulaştığında kompresyon hacmi içerisinde tutulan gazlar hariç tüm egzoz gazları silindirin dışına atılmış olur. Bir sonraki çevrimin yeni emme kursu başlayacağı için ÜÖN'de tamamen açık olmalıdır. ÜÖN'ye yakın egzoz supabı kapanmaya başlamakta ve ÜÖN'den bir süre sonra tamamen kapanmaktadır. Hem emme supabının hem de egzoz supabının birlikte açık kaldığı bu periyot supap bindirmesi olarak adlandırılır. Egzoz supabının ÜÖN'den sonra ($10^{\circ} - 15^{\circ}$ KMA) kapanmasının sebebi egzoz gazlarının tamamının silindirden dışarıya atılması içindir. Egzoz işleminin sonuna doğru piston ÜÖN'ye gelirken silindir içinde kalan artık gazların basıncı ve sıcaklıkları düşmektedir (Sürmen, Karamangil ve Arslan, 2004, s. 85).

2.2. İçten Yanmalı Motorlarda Enerji Dağılımı

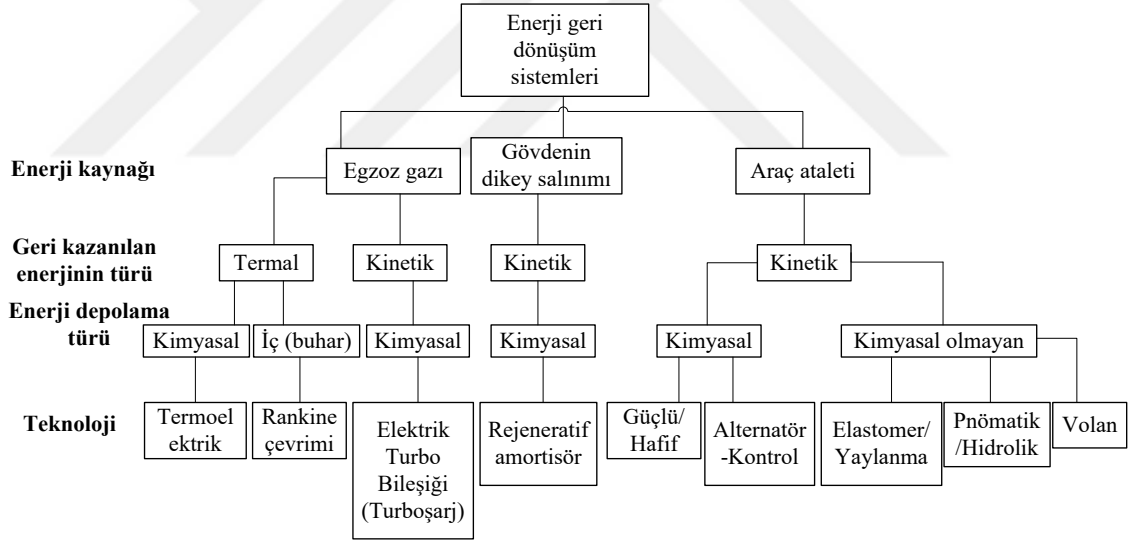
İçten yanmalı motorlarda yanma sonucunda enerjinin efektif kullanımı ortalama %35'tir. Geriye kalan enerjinin %25'i soğutma, %5'i sürtünme ve pompalama ile kaybolmakta ve %35'lük büyük bir bölümü egzozdan atık ısı olarak atılmaktadır. Şekil 2.2'de içten yanmalı motorlarda enerji dağılım grafiği verilmektedir (Rajoo, Romagnoli, Botas, Pesiridis, Copeland ve Mamat, 2014). Ortalama olarak enerjinin efektif kullanımı kadar önemli bir bölümünün egzozdan ısı olarak dışarıya atılması enerjinin kullanımı açısından büyük bir kayıp olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca bu oranın artması, içten yanmalı motorlarda fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan ve çevre için fazlası zararlı olan CO₂ gazının egzozdan atmosfere atılan miktarını da arttırmaktadır. Motorlarda yakıt tasarrufu sağlamak ve çevreyi korumak adına atık ısı enerjisinin geri dönüştürülmesine büyük ilgi gösterilmektedir. Atık ısının dönüşümünde kullanılan yöntemlerden olan TEJ ile enerji geri kazanımı uygulamaları önem kazanmıştır. Amerika'daki General Mobiles, Almanya'daki BMW gibi birçok otomobil üreticisi TEJ sistemini başarıyla kullanmışlardır (Tang ve diğerleri, 2015).



Şekil 2.2. İçten yanmalı motorlarda enerji dağılımı (Rajoo ve diğerleri, 2014).

BÖLÜM 3. İÇTEN YANMALI MOTORLU ARAÇLARDA ENERJİ GERİ KAZANIM TEKNİKLERİ

Enerjinin geri kazanımı yıllardır araştırma konusu olmuştur. Otomotiv endüstrisinde ise enerji geri kazanım sistemleri yakıt verimliliğini iyileştirmek üzerine odaklanmıştır. İçten yanmalı motorlu araçlarda kullanılan enerji geri dönüşüm sistemleri geri kazanılacak enerji kaynağı türüne göre 3 ana başlık altında sınıflandırılmaktadır: 1) egzoz gazından enerji 2) gövdenin dikey salınımından enerji 3) araç ataletinden enerji. Şekil 3.1’de otomotiv uygulamalarında kullanılan enerji geri dönüşüm sistemlerinin sınıflandırması verilmektedir (Buenaventura ve Azzopardi, 2014).



Şekil 3.1. Otomotiv uygulamalarında enerji geri dönüşüm sistemlerinin sınıflandırılması (Buenaventura ve Azzopardi, 2014).

3.1. Egzoz Gazından Enerji Geri Kazanımı

İçten yanmalı motorlarda egzoz gazı yüksek sıcaklık ve hızda dışarıya salınmaktadır. Bu durum motor çalışırken her zaman enerji geri kazanılabileceği anlamına gelmektedir. Egzoz gazından termal ve kinetik enerji olarak iki türlü enerji geri kazanımı yapılmaktadır (Buenaventura ve Azzopardi, 2014).

3.1.1. Termal enerji geri kazanım sistemleri

İçten yanmalı motorlu araçlarda yakıttaki enerjinin yaklaşık üçte ikisi ısı olarak atılmaktadır (Pandiyarajan, Pandian, Malan, Velraj ve Seeniraj, 2011). Termal enerji geri kazanım sistemleri ile bu enerjinin bir kısmı geri kazanılabilmektedir. Bu ısının geri kazanımında termoelektrik jeneratör ve rankine çevrimi olmak üzere iki farklı teknoloji kullanılmaktadır.

Termoelektrik geri kazanım sistemleri, TEM kullanarak egzoz atık ısısından elektrik üretmektedirler. Üretilen bu elektrik aracın elektrikli yardımcı parçaları veya batarya şarjında kullanılabilmektedir.

Rankine çevrim sistemleri, egzozdaki termal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürmek için bir Rankine çevrimi kullanmaktadır. Egzozun ısısı, bir sıvının sıcaklığını kaynayana kadar arttırmaktadır. Sonuç olarak, bir türbini beslemek için kullanılan bir buhar üretilmektedir. Türbinin sağladığı enerji mekanik formda olduğundan elektrik üretmek veya güç aktarma sistemine tork iletmek için kullanılabilmektedir. Rankine çevriminin en önemli faydası motor geri basıncı olmadan arttırılmış bir ısıl verim sunmasıdır. Güç üretmek için egzoz gazlarının genişlemesini gerektirmediği için motordaki akışı engellemez ve bu nedenle pompalama kaybını arttırmaz (Rajoo ve diğerleri, 2014).

3.1.2. Kinetik enerji geri kazanım sistemleri

İçten yanmalı motorların çalışması sırasında yüksek hızdaki gazlar egzozdan dışarıya salınmaktadır. Bu gazlarda bulunan kinetik enerjinin bir kısmı türbin jeneratörü tarafından geri kazanılabilmekte ve elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Bu sistemler elektrikli turbo bileşiği (turboşarj) olarak adlandırılmaktadır (Prasad ve Parameshwari, 2012).

3.2. Gövdenin Dikey Salınımından Enerji Geri Kazanımı

Çarpma gibi sürüş sırasında araç gövdesinin dikey salınımlarıyla ilişkili kinetik enerjinin bir kısmı, rejeneratif amortisörler ile geri kazanılabilmektedir. Rejeneratif amortisörler kinetik enerjiyi elektrikli yardımcı elemanlar için kullanılabilen veya bataryada saklanabilen elektrik enerjisine dönüştürmektedirler (Buenaventura ve Azzopardi, 2014).

3.3. Araç Ataletinden Enerji Geri Kazanımı

En yaygın enerji geri kazanım kaynağı, hızından ötürü aracın ataletidir. Yavaşlama gerektiğinde, aracın ataletinin üstesinden gelmek için bir kuvvet uygulanmalıdır. Bu kinetik enerjinin bir kısmını frenlerde atık ısıya dönüştürerek aracın hızını azaltan fren sistemi tarafından yapılmaktadır. Bununla birlikte, bu kinetik enerjinin bir kısmı geri kazanılabilmekte ve saklanabilmektedir. Bu depolanan enerji normal olarak hızlanma anında tekrar kullanılabilir. Araç ataletine dayanan enerji geri kazanım sistemleri kinetik enerji geri kazanım sistemleri olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemler frenleme olaylarında enerjiyi geri kazandıkça, enerji geri kazanım işlemine rejeneratif frenleme denilmektedir. Bu enerjinin geri kazanımını elastomer ve yaylanma, pnömatik ve hidrolik, volan, güçlü/hafif elektrik ve alternatör kontrol kinetik enerji geri kazanım sistemleri ile sağlanmaktadır (Buenaventura ve Azzopardi, 2014).

Yaylanma ve elastomer kinetik enerji geri kazanım sistemleri, rejeneratif frenleme esnasında meydana gelen enerjiyi potansiyel elastik enerjisi olarak depolamaktadırlar. Bu, elastomer veya metalik bir yayın elastik olarak deforme edilmesi ile yapılmaktadır. Enerji serbest bırakıldığında süreç başa dönmektedir. Bu kinetik enerji geri kazanım sisteminin çalışması tamamen mekaniktir. Bu nedenle enerji dönüşümü ile ilgili kayıp yoktur (Buenaventura ve Azzopardi, 2014).

Pnömatik ve hidrolik araç ataleti kinetik enerji geri kazanım sistemlerinde aracın kinetik enerjisi bir akışkanın basıncını arttırarak depolanmaktadır. Pnömatik türünde hava tanklarda depolanırken hidrolik sistemde sıkıştırılmayan bir sıvı akümülatörlerde depolanmaktadır. Enerji akışkanın basıncını düşürerek güç aktarımına geri verilmektedir.

Bu sistemler önemli derecede yakıt tasarrufu sağlasalar da aktarma organlarında büyük modifikasyonlar gerektirmektedir (Buenaventura ve Azzopardi, 2014).

Volan kinetik enerji geri kazanım sistemleri, bir volanın açılma hızını artırarak, aracın kinetik enerjisini dönme enerjisi olarak depolamaktadırlar. Fakat kazanılan enerji volandaki sürtünme nedeniyle kalıcı olarak depolanamamaktadır. Aracın yavaşlama anında enerji, tekerleklere bağlı tahrik milinden volan modülüne gelmektedir. Volan tarafından depolanan hız ve enerji kontrol edilmekte ve hızlanma anında bu enerji kullanılmaktadır (Buenaventura ve Azzopardi, 2014).

Elektrikli kinetik enerji geri kazanım sistemleri, bir motor jeneratörü aracılığıyla aracın kinetik enerjisinin bir kısmını elektriğe dönüştürerek ve akülerde saklamaktadır. Güçlü / hafif elektrikli ve alternatör kontrol tabanlı kinetik enerji geri kazanım sistemleri olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Buenaventura ve Azzopardi, 2014).

Güçlü / hafif elektrikli kinetik enerji geri kazanım sistemleri, yeni nesil hibrit elektrikli araçlarda kullanılmaktadır. Motor jeneratörü tarafından rejeneratif frenleme sırasında tahrik ünitesinden geri kazanılan enerji büyük bir aküde depolanmaktadır. Enerjinin tekerleklerden aküde depolanması sürecinde sırasıyla mekanik-elektrik-kimyasal enerji dönüşümleri vardır ve bu durum kayıplara yol açmaktadır (Buenaventura ve Azzopardi, 2014).

Alternatör kontrollü kinetik enerji geri kazanım sistemleri, aracın alternatörünü geleneksel sistemlerden daha verimli şekilde yönetmektedir. Alternatör çıkışı, frenleme olayları sırasında, aküdeki enerji depolamayı en üst seviyeye çıkarmak ve elektrikli elemanları beslemek için aracın kinetik enerjisi kullanılarak arttırılmaktadır. Aracın hızlanması esnasında, alternatör çıkışı azaltılmakta ve elektrik tüketen elemanlar aküde depolanan enerji ile beslenmektedir. Böylece motor gücüne olan talep azalmakta ve yakıt tasarrufu sağlanmaktadır (Buenaventura ve Azzopardi, 2014).

BÖLÜM 4. TERMOELEKTRİK

4.1. Termoelektrik Etkiler

Termoelektrik ısının doğrudan elektriğe dönüşmesi veya bunun tam tersi, elektriğin ısı enerjisine dönüşümüdür (Karri, 2005). Temel olarak termoelektrikler TEJ ve termoelektrik soğutucu olmak üzere 2 cihazdan oluşur. Bu cihazlar, basit yapıdadır, hareketsiz parçalara sahiptir, bakım gerektirmezler, sessiz çalışırlar, güvenilir ve kararlıdır (Lee, 2010, s. 100; Gou, Xiao ve Yang, 2010). TEJ'ler, elektrik santrallerinden ve otomobillerden atık ısısının geri kazanımı için büyük bir potansiyele sahiptir. Bu jeneratörler aynı zamanda uzayda ve dağlık telekomünikasyon sitelerindeki uzak alanlarda güvenilir güç sağlarlar. Termoelektrik soğutucular, soğutma ve elektronik paketlerinde ve tıp endüstrisinde sıcaklık kontrolü sağlar. Termoelektrik 19. yüzyılın başlarında keşfedildiği için performansında önemli derecede ilerleme olan nanoteknolojideki son gelişmelere kadar malzeme ve verimliliği hususunda çok fazla gelişme kaydedememiştir. Nanoteknolojideki gelişmeler termal tasarım için termoelektriğin temelini anlamada çok önemlidir (Lee, 2010, s. 100). Termoelektriğin tarihine kısaca bakıldığında;

1821'de Thomas Johann Seebeck, bağlantı noktalarından biri ısıtıldığında, iki farklı telden yapılan bir devre tarafından akımı harekete geçirici güç ya da potansiyel fark üretilbileceğini keşfetmiştir. Bu Seebeck etkisi olarak adlandırılmaktadır (Beretta ve diğerleri, 2018).

13 yıl sonra, 1834'de Jean Charles Athanasa Peltier, Peltier etkisi olarak adlandırılan bir termokupldan elektrik akımı geçirildiğinde, yöne bağlı olarak ısıtma veya soğutma yapan Seebeck'in tam tersi bir prosesi keşfetmiştir (Beretta ve diğerleri, 2018).

1841’de James P. Joule bir akım geçmesinin elektrik direncinden dolayı ısı açığa çıkardığını bulmuştur. Bu Joule etkisi olarak adlandırılmaktadır.

1854’de William Thomson, Thomson etkisi olarak adlandırılan, eğer akım taşıyan iletkenin herhangi iki noktası arasında sıcaklık farkı varsa ısı ya serbest bırakılır ya da akım ve malzemenin yönüne bağlı olarak absorbe edildiğini bulmuştur (Lee, 2010, s. 100).

4.1.1. Seebeck etkisi

Seebeck etkisi, sıcaklık farkının elektrik akımına dönüşümüdür. İki farklı iletkenliğe sahip A ve B malzemeleri düğümle birleştirildiğinde, düğüm tarafından oluşturulan iki bağlantı arasında bir sıcaklık farkı uygulanırsa potansiyel bir fark oluşur (Khan, Malarmanan ve Manikandaraja, 2018). Potansiyel fark sıcaklık farkıyla orantılıdır ve Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada V potansiyel fark, α_{AB} A ve B teller arasındaki göreceli Seebeck katsayısını ve ΔT iki bağlantı arasındaki sıcaklık farkını ifade etmektedir.

$$V = \alpha_{AB}\Delta T \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de kullanılan ΔT değeri Denklem 4.2’deki gibi hesaplanmaktadır. T_H ve T_L bağlantının iki tarafındaki sıcaklıkları ifade etmektedir.

$$\Delta T = T_H - T_L \quad (4.2)$$

Eğer elektromotor kuvveti (emf) sıcak birleşme noktasından soğuk birleşme noktasına geçirme eğilimindeyse α pozitifdir. Denklem 4.1’deki α_{AB} , Denklem 4.3’teki gibi A ve B tellerinin mutlak Seebeck katsayıları cinsinden ifade edilmektedir. Burada α_A , A telinin Seebeck katsayısını ve α_B , B telinin Seebeck katsayısını belirtmektedir.

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B \quad (4.3)$$

Pratikte, mutlak Seebeck katsayısı nadiren ölçülür, çünkü voltaj ölçer daima A ve B telleri arasındaki görelî Seebeck katsayısını okumaktadır (Lee, 2010, s. 103).

4.1.2. Peltier etkisi

Peltier etkisi, Seebeck etkisinin tam tersidir (Du, Xu, Paul ve Eklund, 2018). İki farklı A ve B telleri arasındaki bir bağlantı boyunca akım aktığında, sıcaklığını sabit tutmak için bağlantıdaki ısı kaynağının sürekli olarak eklenmesi veya çıkarılması gerektiği bulunmuştur. Isı, akım akışıyla orantılıdır ve akım tersine çevrildiğinde işareti değişmektedir. Böylece Peltier ısı emilmekte veya serbest bırakılmaktadır. Peltierde emilen veya serbest bırakılan ısı (\dot{Q}_{Peltier}) Denklem 4.4'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_{\text{Peltier}} = \pi_{\text{AB}} I \quad (4.4)$$

Burada I Peltier malzemeye verilen akım miktarını, π_{AB} Peltier katsayısını ifade etmektedir ve akımın A teline girdiği bağlantı noktası ısıtılır ve A telinden çıktığı bağlantı noktası soğutulursa π_{AB} 'nin işareti pozitifdir. Peltier ısıtma ve soğutma, ısı ve elektrik arasında tersinirdir. Bu ısıtma veya soğutmanın elektrik üreteceği ve elektriğin enerji kaybı olmadan ısıtma veya soğutma üreteceği anlamına gelmektedir (Lee, 2010, s. 104).

4.1.3. Thomson etkisi

Akım bir sıcaklık gradyanı ile bir tel içinde aktığında, ısı malzemenin ve akımın yönüne bağlı olarak tel boyunca emilir veya serbest bırakılır. Thomson ısı hem elektrik akımı hem de sıcaklık gradyanı ile orantılıdır. Bu nedenle, Thomson ısı bir tel üzerinden emilir veya serbest bırakılır. Thomson ısının hesabı (\dot{Q}_{Thomson}) Denklem 4.5'te ifade edilmektedir.

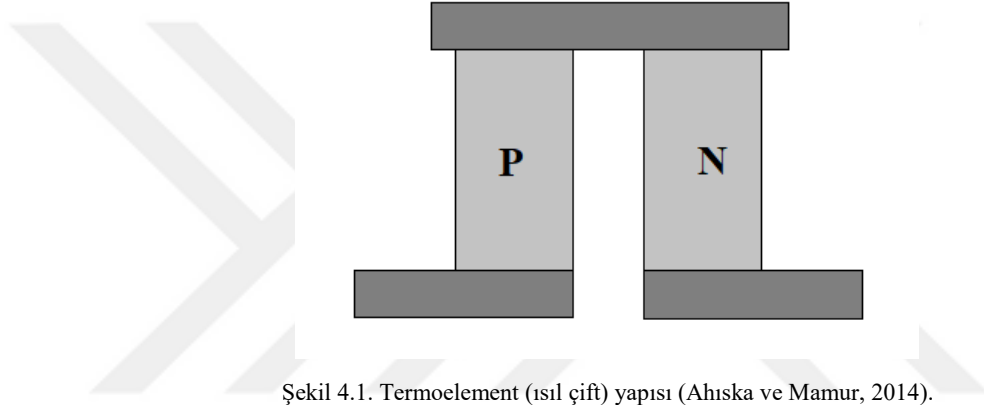
$$\dot{Q}_{\text{Thomson}} = \tau I \Delta T \quad (4.5)$$

Burada I malzemeye verilen akım miktarını, ΔT sıcaklık farkı, τ Thomson katsayısıdır ve ısı emilirse τ 'nin işareti pozitifdir. Isı serbest bırakılırsa τ 'nin işareti negatiftir. Thomson

katsayısı bu üç termoelektrik katsayılar arasında benzersizdir, çünkü bireysel malzemeler için doğrudan ölçülebilen tek termoelektrik katsayıdır. Thomson ısısı, ısı ve elektrik arasında tersinirdir (Lee, 2010, s. 104).

4.2. Termoelement (Isıl Çift)

Bir ısıl çift genellikle p-tipi ve n-tipi yarıiletken elementlerden oluşur. Isıl çiftlerin çoğu genellikle bir TEM oluşturmak için termal olarak paralel ve elektriksel olarak seri bağlanırlar (Şahin ve Yılbaş, 2013). Şekil 4.1’de ısıl çifte ait bir görünüm verilmektedir.



Şekil 4.1. Termoelement (ısıl çift) yapısı (Ahıska ve Mamur, 2014).

4.3. Değer Rakamı

Termoelektrik cihazların performansı Z ile ölçülmektedir. Z’nin malzemeler için birimi $1/^\circ\text{C}$ ’dir. Değer rakamı (Z) Denklem 4.6’daki gibi hesaplanmaktadır. Burada α Seebeck katsayısı, ρ elektriksel direnç, k, termal iletkenlik olarak ifade edilmektedir (Lee, 2010, s. 104).

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho k} \quad (4.6)$$

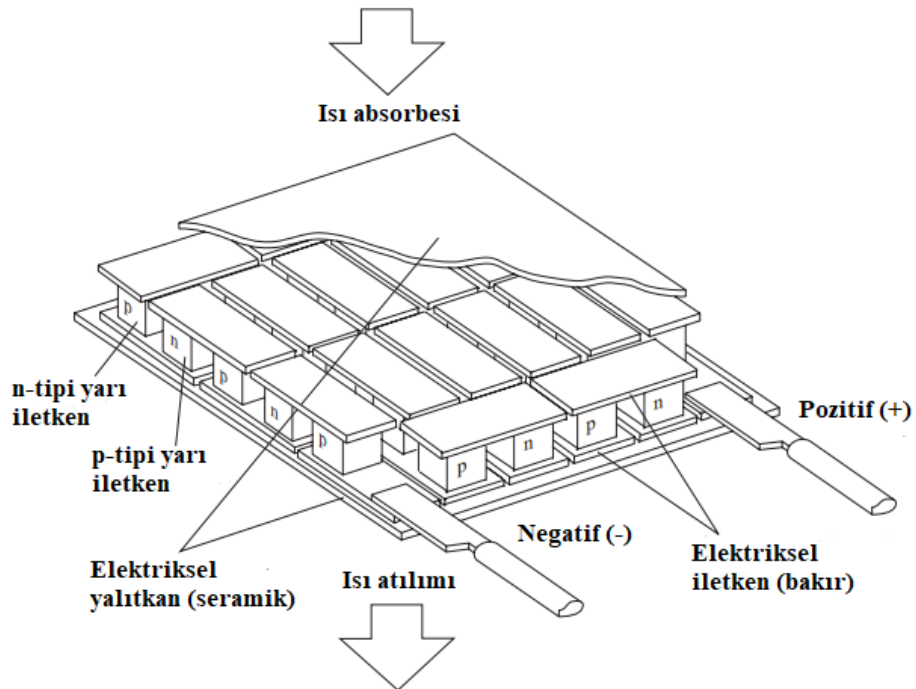
Yeterli Z değerine ulaşmak için yüksek Seebeck katsayısı, düşük elektriksel direnç ve düşük termal iletkenlik gereklidir. Performansı arttırmak için Seebeck katsayısını arttırmak veya öz direncin azaltılması termal iletkenliği azaltmaya göre daha tercih

edilebilir. Bu performans değerlendirmesine göre üretilen ve en yaygın kullanılan termoelektrik malzeme Bi_2Te_3 'dir (Karri, 2005).

Termoelektrik elemanlar bizmut tellürid, kurşun tellürid, antimon tellürid, silisyum germanyum yarı iletken alaşımları gibi malzemelerden oluşmaktadırlar. Malzeme seçimi, uygulama alanına ve çalışma sıcaklığı aralığına bağlıdır (Karri, 2005). Kompleks otomotiv ortamının zorlukları göz önüne alındığında ve ticari olarak üretilmekte olan Bi_2Te_3 tabanlı dökme termoelektrik malzeme, otomobil üreticilerinin çoğu tarafından tercih edilmektedir. Fakat termoelektrik malzemelerle sınırlandırılan TEJ sisteminin verimliliği sınırlıdır ve %5'ten daha azdır (Tang ve diğerleri, 2015).

4.4. Termoelektrik Modül

TEM p-tipi ve n-tipi yarı iletken malzemelerden oluşan çok sayıda ısıl çiftin elektriksel olarak seri ve termal olarak paralel bağlanmasıyla elde edilmektedir (Tang ve diğerleri, 2015). Şekil 4.2'de bir TEM'in kesit görünümü verilmektedir.



Şekil 4.2. TEM kesit görünümü (Lee, 2010, s. 102).

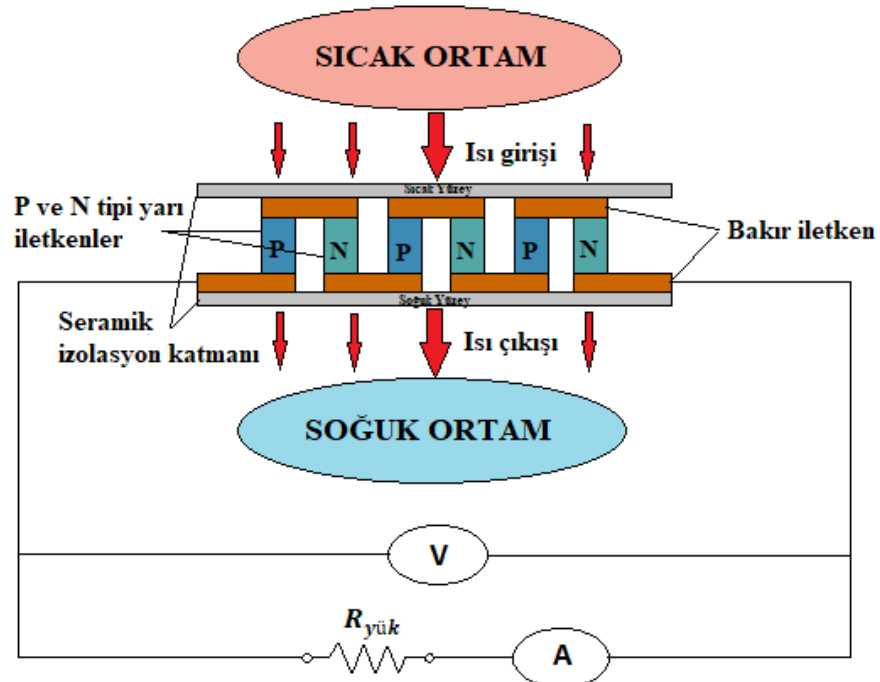
TEM'i oluşturan temel elemanlar, termoelementler; seramik alt tabakalar; elektrik iletkenleri ve elektrot kablolarıdır. Termoelektrik elemanlar ve bunların elektrik ara bağlantıları, iki seramik alt tabaka arasında sıkıştırılmıştır. Termoelektrik elemanlar, termoelektrik modüllerde elektrik üretmek için kullanılan çiftlerdir. Seramik alt tabakalar, termoelektrik modülü elektriksel olarak dış montaj yüzeylerinden izole etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca bunlar minimum termal dirençle ısı transferi sağlamak için iyi bir termal iletkenliğe sahip olmalıdır. En yaygın olarak kullanılan seramik, alüminyum oksittir (Al_2O_3). Elektrik iletkenleri, ısı çiftleri arasında elektriksel temas görevi görmektedir. Bağlantılar, tüm ısı çiftleri elektriksel olarak seri bağlanacak şekilde düzenlenmektedir. Elektrot kabloları, elektrik üretimi durumunda modülü bir elektrik yüküne bağlamak için veya modülün termoelektrik soğutma için kullanılması durumunda bir elektrik kaynağına bağlamak için kullanılmaktadır (Karri, 2005). TEM'ler genellikle TEJ ve termoelektrik soğutucular olmak üzere 2'ye ayrılırlar.

4.5. Termoelektrik Jeneratör

TEJ, Seebeck etkisine dayanarak termal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir güç jeneratörüdür (Tang ve diğerleri, 2015). TEJ elektrik devresi Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Bir yüzeyine sıcak ve diğer yüzeyine soğuk etki uygulandığında sıcaklık farkından dolayı TEJ sistemi elektrik üretmektedir. TEJ sistemi bu çalışmada içten yanmalı motorlu araçlarda ısı olarak atılan enerjinin bir kısmının geri dönüşümünü sağlamaktadır. Böylece yakıt tüketimi ve dolayısıyla çevre kirliliğini önlemeye katkıda bulunmaktadır. TEJ'de sıcak bağlantıdaki ısı akışı Seebeck etkisiyle ilgili ısı, Joule ısısı ve termal iletkenliği içermektedir. Isı akışı Denklem 4.7 ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_h = \alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R + K(T_h - T_c) \quad (4.7)$$

Burada α Seebeck katsayısı, R elemanların elektriksel iç direnci, K termal iletkenlik, I akım, T_h sıcak bağlantı noktasının sıcaklığı, T_c soğuk bağlantı noktasının sıcaklığını ifade etmektedir (Lee, 2010, s. 107).



Şekil 4.3. TEJ elektrik devresi (Ahıska ve Mamur, 2014).

4.5.1. Dönüşüm verimliliği ve akım

TEJ sistemine yük bağlandığında üretilen güç (\dot{W}) Denklem 4.8'deki gibi hesaplanmaktadır. Burada R_L yük direnci ve I üretilen akımı ifade etmektedir (Lee, 2010, s. 109).

$$\dot{W} = I^2 R_L \quad (4.8)$$

TEJ'in dönüştürme ya da termal verimliliği, Denklem 4.9'daki gibi hesaplanmaktadır (Lee, 2010, s. 109).

$$\eta_t = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_h} \quad (4.9)$$

Denklem 4.8 ve 4.9 kullanılarak termal verimlilik Denklem 4.10'daki şekilde tekrar yazılmaktadır. Buradaki R TEM'in iç direncini, T_h sıcak yüzeydeki sıcaklığı, T_c ise soğuk yüzeydeki sıcaklığı ifade etmektedir (Lee, 2010, s. 109).

$$\eta_t = \frac{I^2 R_L}{\alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R + K(T_h - T_c)} \quad (4.10)$$

Soğuk bağlantı noktasından atılan ısı (\dot{Q}_c) sisteme uygulanan termodinamiğin birinci kanunundan elde edilmektedir ve Denklem 4.11'deki gibi hesaplanmaktadır. \dot{Q}_h sıcak bağlantıdan emilen ısıyı ifade etmektedir (Lee, 2010, s. 109).

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_h - \dot{W} \quad (4.11)$$

TEJ'den üretilen açık devre gerilimi (V_{oc}) Denklem 4.12'deki hesaplamayla elde edilmektedir.

$$V_{oc} = I(R_L + R) \quad (4.12)$$

V_{oc} 'nin Seebeck denklemine göre ifadesi Denklem 4.13'teki gibidir (Lee, 2010, s. 109).

$$V_{oc} = \alpha \Delta T \quad (4.13)$$

Denklem 4.13'teki soğuk ve sıcak yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı Denklem 4.14'teki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (4.14)$$

TEJ'den üretilen akım (I) Denklem 4.15'teki gibi hesaplanmaktadır (Lee, 2010, s. 109).

$$I = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{(R_L + R)} \quad (4.15)$$

BÖLÜM 5. MATERYAL VE YÖNTEM

Diğer bölümlerde bahsedildiği üzere TEM'in jeneratör olarak kullanılabilmesi için iki yüzeyi arasında sıcaklık farkı oluşturulmalıdır. Bu sıcaklık farkının sağlanabilmesi için sıcak yüzeyinin ısıtılması ve soğuk yüzeyinin soğutulması gerekmektedir.

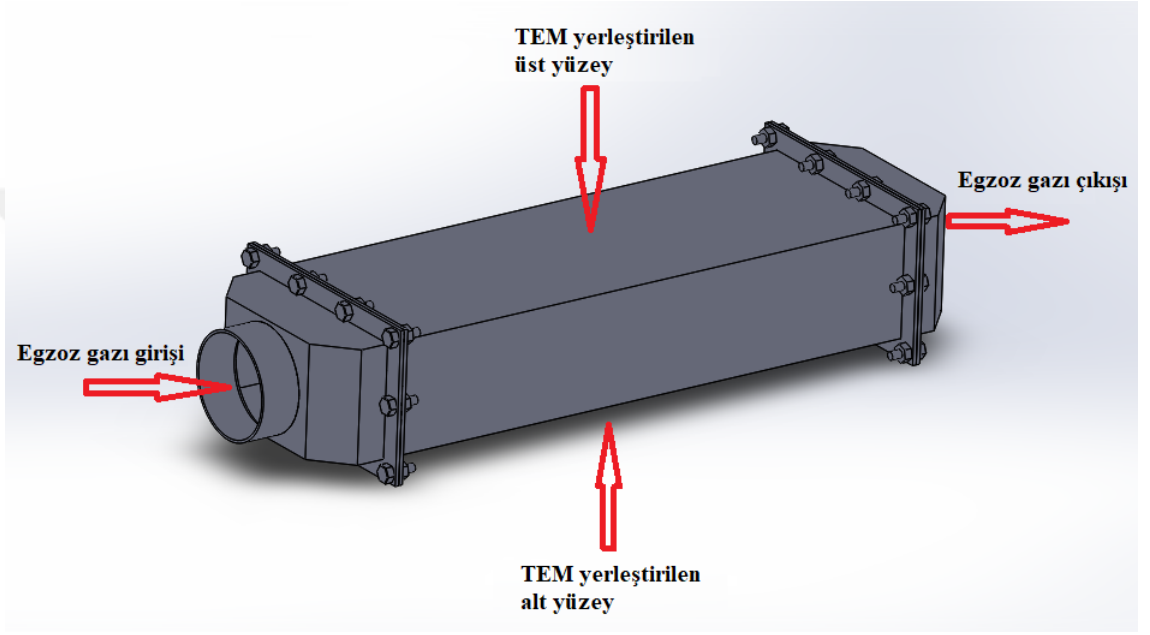
Bu tez çalışmasıyla TEM jeneratör olarak kullanılarak otomobillerin egzoz yoluyla atmosfere salınan atık ısısından enerjinin dönüşümü sağlanıp elektrik üretmek amaçlanmıştır. Bu doğrultuda ilk olarak egzozun atık ısı enerjisini TEM'in sıcak yüzeyine iletebilmek amacıyla ısı eşanjörü tasarlanmıştır. Daha sonra soğutma sistemi tasarımı, modüllerin eşanjöre yerleştirilmesi ve ölçüm elemanlarıyla sistem içten yanmalı bir motorun egzoz çıkışına montajlanarak deney düzeneği hazırlanmış ve testler yapılmıştır.

5.1. Egzoz Gazı İçin Isı Eşanjörü Tasarımı

Bir TEJ'den en iyi performansın alınması için TEM'in sıcak yüzeyine iletilen ısı enerjisinin TEM kapasitesi dahilinde maksimum ve soğuk yüzeyinin de minimum olması önemlidir. Bu noktada, TEM'in sıcak yüzeyine egzoz atık ısısını maksimum TEM sıcaklık kapasitesi dahilinde optimum sıcaklık dağılımının elde edileceği ısı eşanjörünün tasarımı bu bölümde ele alınmaktadır.

Isı eşanjörü tasarımından beklenen özellik; egzozdan aldığı ısı enerjisini en iyi şekilde yüzeyine iletmesinin yanı sıra motorun çalışmasını ve performansını etkilememesi için egzoz gazının dış ortama rahatlıkla atılmasını sağlamasıdır. Ayrıca TEM'lerin yerleştirileceği bölgelerde en iyi sıcaklık dağılımının olması da önemli bir diğer faktördür.

Tasarlanan ısı eşanjörünün genel görünümü Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Isı eşanjörü 86x156x436 mm boyutlarında ve 3 mm kalınlığında St52 sac malzemeden yapılmıştır. Motor egzozundan salınan egzoz gazı eşanjör girişinden geçerek atmosfere atılmaktadır. Eşanjörün içerisinde geçen egzoz gazının ısı enerjisinin bir kısmı eşanjör yüzeyine iletilerek TEM’lerden elektrik üretimi için gereken ısı sağlanmaktadır. Şekil 5.1’de gösterilen alt ve üst yüzeylere TEM’ler yerleştirilerek TEJ sistemi oluşturulmuştur.



Şekil 5.1. Isı eşanjörü genel görünümü.

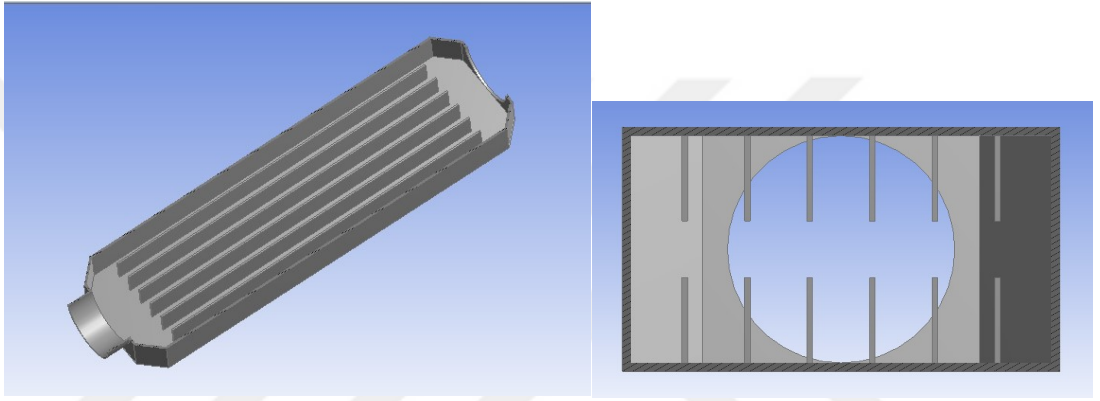
Denklem 5.1’de gösterildiği gibi ısı transfer denklemlerine göre bir malzemenin ısıyı iletmesi malzemenin ısı iletkenlik katsayısı ve yüzey alanı ile doğru orantılıdır. Burada θ birim zamanda ısı akımını, A ısı akımına dik yüzey alanını, ΔT levhanın iki ucu arasındaki sıcaklık farkı, λ malzemenin ortalama ısı iletim katsayısı, L levhanın kalınlığını ifade etmektedir (Kakaç, 1998).

$$Q = \frac{\lambda A \Delta T}{L} \quad (5.1)$$

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (5.2)$$

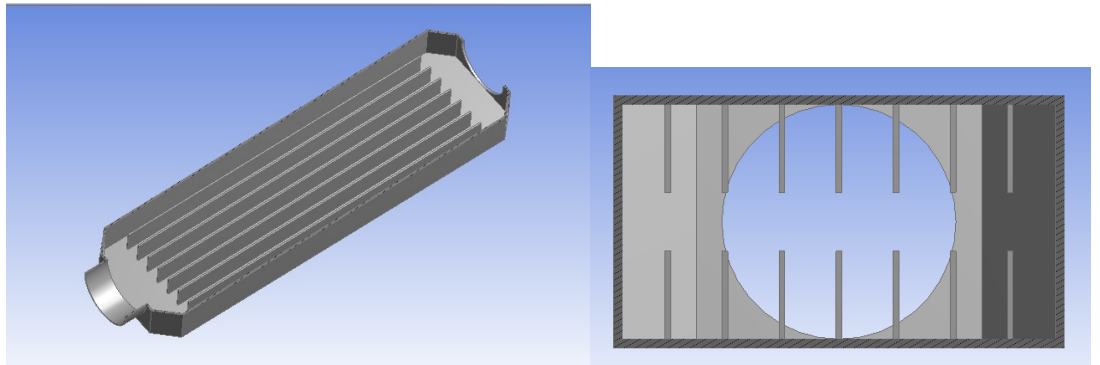
Bu amaçla eşanjör sisteminin ısı iletkenliğini arttırmak amacıyla eşanjör gövdesi kanatçıklı yapıda tasarlanmıştır. En iyi tasarımı elde etmek amacıyla oluşturulan tasarımda kanatçık sayıları değiştirilerek kıyaslamalar yapılmıştır.

Eşanjör tasarımına ilk olarak Şekil 5.2’de verilen kesit görünümlere sahip eşanjör sistemi ile başlanmıştır. Bu eşanjör yapısı 6 adet üst ve 6 adet altta olmak üzere 12 adet kanatçıktan oluşmaktadır. Kanatçıklar gövde yapısının iç bölümüne eşit aralık ve boyutlarda dizayn edilmişlerdir.



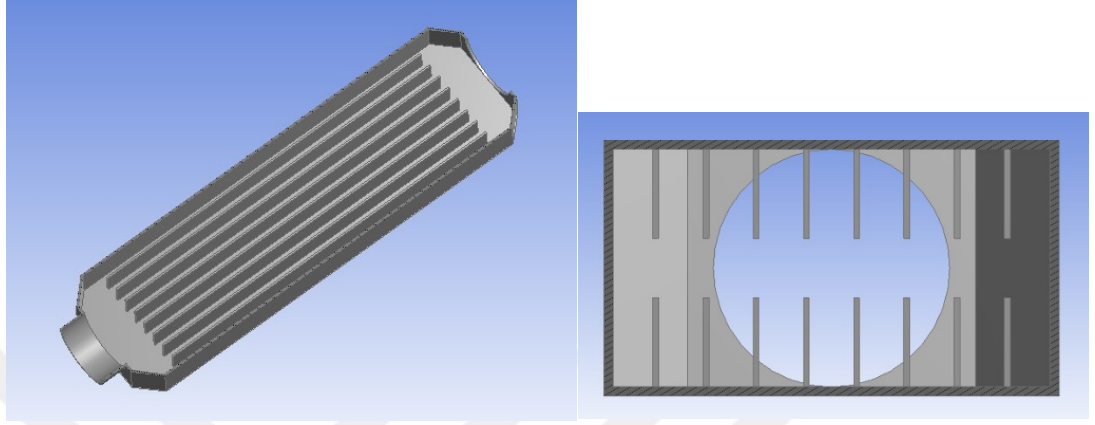
Şekil 5.2. 12 kanatçıklı ısı eşanjörü kesit görünümü.

Şekil 5.3’de kesit görünümünde verildiği gibi kanatçık sayıları alt ve üst yüzeyde birer tane artırılarak 7 adet alt ve 7 adet üstte olmak üzere 14 kanatçıklı eşanjör tasarlanmıştır. Yine bu kanatçıklar gövdenin iç bölümüne eşit aralık ve boyutlarda yerleştirilmişlerdir.



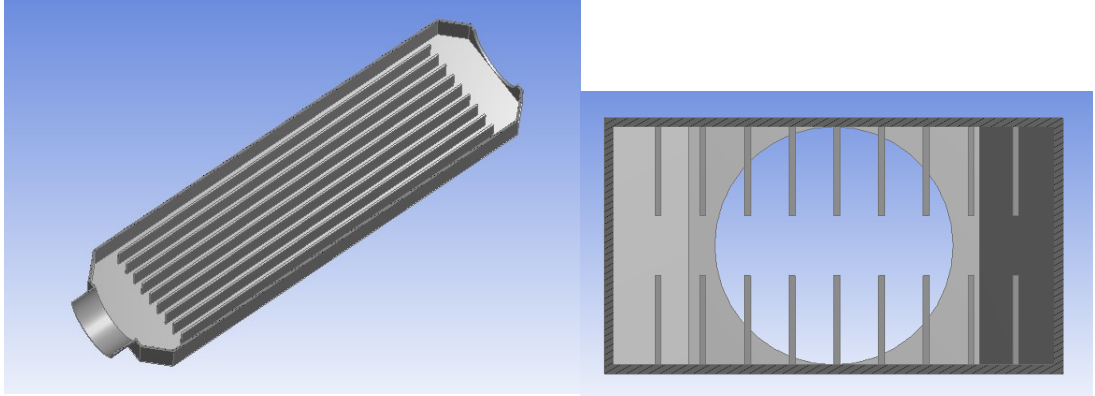
Şekil 5.3. 14 kanatçıklı ısı eşanjörü kesit görünümü.

Şekil 5.4'te 16 kanatçıklı ısı eşanjörünün kesit görünümünde görüldüğü üzere kanatçık sayısı birer tane daha arttırılmıştır. Eşit aralık ve boyutlarda 8 adet alt ve 8 adet üstte olmak üzere 16 kanatçıklı eşanjör tasarlanmıştır.



Şekil 5.4. 16 kanatçıklı ısı eşanjörü kesit görünümü.

Ayrıca ısı eşanjörü kanatçıkları birer tane daha arttırılarak 9 adet altta ve 9 adet üstte olmak üzere, boyutları ve aralarındaki mesafe eşit olacak şekilde 18 kanatçıklı tasarım yapılmıştır. Şekil 5.5'te 18 kanatçıklı ısı eşanjörüne ait kesit görünüm verilmektedir.



Şekil 5.5. 18 kanatçıklı ısı eşanjörü kesit görünümü.

Yapılan tüm tasarımlarda üzerine yerleştirilecek olan TEM'lerin mümkün olduğunca eşit sıcaklıklara temas edebilmesi için alt ve üst yüzeyde aynı dikey doğrultuda ve eşit sayıda kanatçığa sahip olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca motorun egzoz gaz çıkışının, dolayısıyla motorun çalışmasının ve performansının olumsuz yönde etkilenmemesi dikkat edilen diğer faktörler olmuştur.

5.1.1. Egzoz gazı için ısı eşanjörü tasarımlarının ANSYS Fluent CFD’de termal akış analizleri

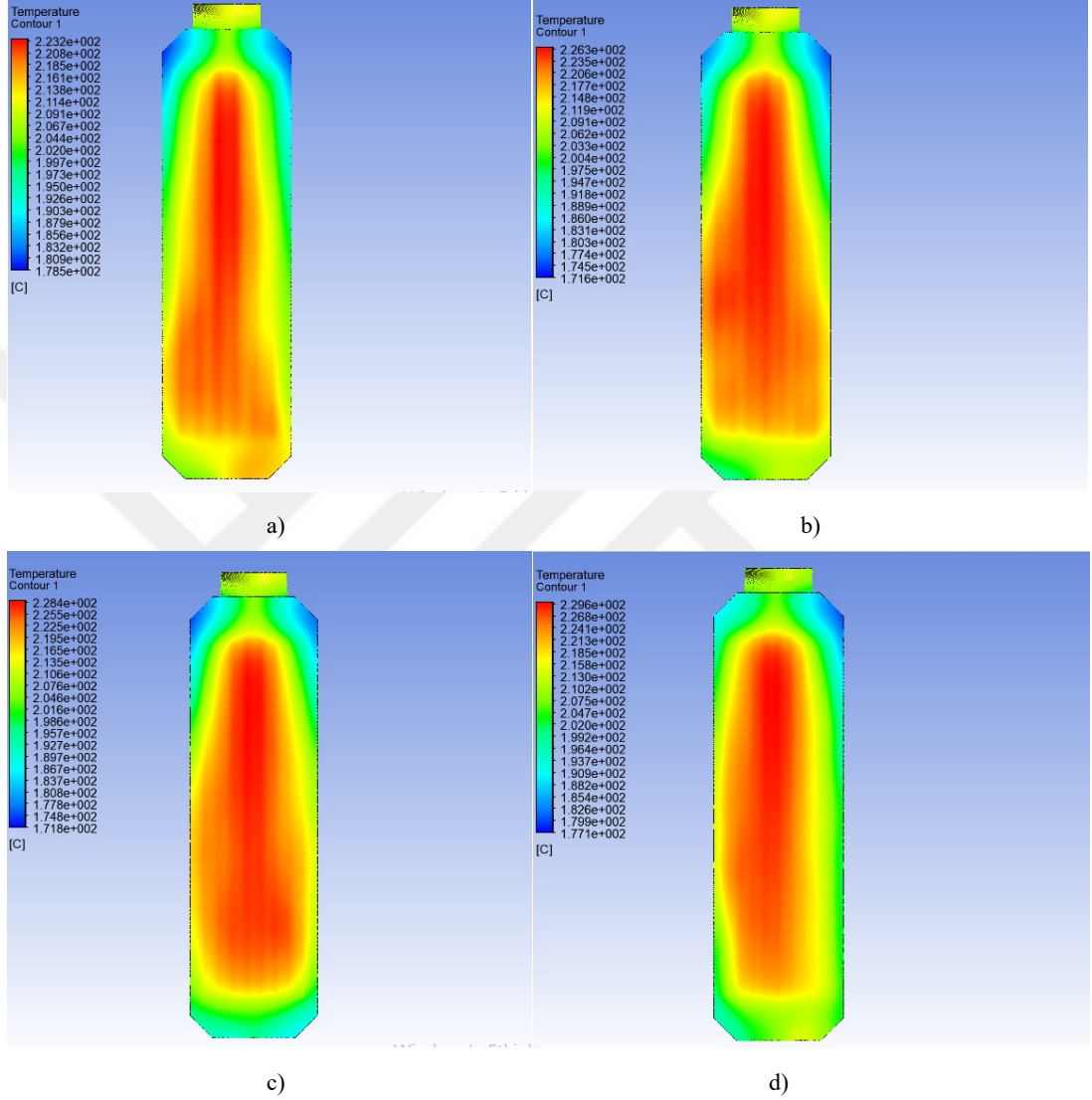
Katı modelleri oluşturulan farklı sayıda kanatçıklara sahip ısı eşanjörlerinden hangi modelin bu çalışma için daha optimum olacağı sonucuna varmak adına ANSYS Fluent CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) programında termal akış analizi yapılmıştır. Bu analizler yapılırken 2300 d/d’de 100 Nm yük altında, içten yanmalı bir motordan çıkan egzoz gazının sıcaklığı ve çıkış hızı sırasıyla ortalama 250 °C ve 25 m/s olarak kabul edilmiştir (Temizer, 2014).

İçten yanmalı bir motorda yakıtın yanması sonucu nitrojen (N₂), oksijen (O₂), CO₂, su buharı (H₂O), sülfür oksit (SO₂), nitrojen oksit (NO_x), yanmamış hidrokarbonlar (HC) gibi egzoz emisyonları açığa çıkmaktadır (Woodyard, 2004, s. 64). Bu gazlardan %71’lik bir oranla en fazla salınan gazın N₂ olduğu bilinmektedir (Ergeneman, Kutlar, Mutlu ve Arslan, 1998). Dolayısıyla egzoz gazında en fazla bulunan gaz bileşeni olan N₂ analizlerde akışkan olarak kabul edilmiştir. Analizler, eşanjör içerisinde egzoz gazı olarak geçirilen azot gazı ısısının eşanjör yüzeyine konveksiyon yoluyla taşınımına göre yapılmıştır.

5.1.2. Egzoz gazı için ısı eşanjörü tasarımlarının ANSYS Fluent CFD analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

4 farklı kanatçıklı yapıya sahip ısı eşanjörü tasarımlarının ANSYS Fluent CFD analizleri yapıldıktan sonra TEM’lerin yerleştirileceği yüzeyler olan ısı eşanjörü alt ve üst yüzeylerindeki sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Şekil 5.6’da tasarlanan eşanjörlerin üst yüzeyindeki sıcaklık dağılımları verilmektedir. Sonuçlara göre, 6 alt ve 6 üst 12 kanatçıklı gövdenin maksimum – minimum yüzey sıcaklığı 223 – 178 °C arasında ve en yüksek yüzey sıcaklığı dağılımının gövdenin orta bölümlerinde toplandığı gözlemlenmektedir. 7 alt ve 7 üst 14 kanatçıklı gövdenin maksimum – minimum yüzey sıcaklığı 226 – 171 °C arasında ve en yüksek yüzey sıcaklığı dağılımının gövdenin orta bölümlerinde olduğu anlaşılmaktadır. 8 alt ve 8 üst 16 kanatçıklı gövdenin maksimum – minimum yüzey sıcaklığı 228 – 171 °C arasında ve en yüksek yüzey sıcaklığı dağılımının gövdenin orta

bölümlerinde dağıldığı gözlemlenmektedir. 9 alt ve 9 üst 18 kanatçıklı gövdenin maksimum – minimum yüzey sıcaklığı 229 – 177 °C arasında ve en yüksek yüzey sıcaklığı dağılımının gövdenin orta bölümlerinde toplandığı bilgilerine ulaşılmaktadır.



Şekil 5.6. a) 12 kanatçıklı, b) 14 kanatçıklı, c) 16 kanatçıklı ve d) 18 kanatçıklı yapıya sahip eşanjörlerin ANSYS Fluent’de akış analizine göre yüzeydeki ısı dağılım grafiği.

Bu sıcaklık grafikleri kıyaslandığında; en yüksek sıcaklığa sahip yapı 18 kanatçıklı ve en düşük sıcaklığa sahip yapı 12 kanatçıklı gövdedir. Kanatçık sayısı arttıkça gövde yüzeyinde maksimum sıcaklığın da arttığı görülmektedir. Ancak optimize yapı seçilirken dikkat edilmesi gereken tek özellik maksimum yüzey sıcaklığı değildir. Bu çalışmada içten yanmalı motorun egzozundan atılan ısı eşanjörden geçecektir. Motorun çalışmasını ve performansını etkilememek de göz önünde bulundurulmalıdır. Motor yanma sonucu

atık ısıyı ne kadar rahat atmosfere atarsa motor o kadar etkin çalışmaktadır. Bu durumda kanatçık sayısını fazla arttırmak motor performansını olumsuz etkileyecektir. Ayrıca ürünün kolay imal edilir olması da önemlidir. Kanatçık sayısını fazla arttırmak imalatı zorlaştırmakta ve imal edilen ürünün tasarlanan yapıya göre doğruluğunu olumsuz etkilemektedir.

Eşanjör yüzeyindeki maksimum sıcaklık dağılımları çok büyük sıcaklık farklarına sahip olmadıkları için motor performansına engel olmamak ve imal edilebilirliğinin kolay olması göz önüne alındığında, ortalama değerde bir yüzey sıcaklık dağılımına sahip olan 14 kanatçıklı yapının en optimize imal edilebilir ürün olduğuna karar verilmiş ve bu gövde yapısının imalatı gerçekleştirilmiştir.

5.2. Deney Düzeneği Tanıtımı

Deneyle Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Otomotiv Anabilim dalı deney laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği; içten yanmalı motor, egzoz gazı için eşanjör ünitesi, soğutma ünitesi ve kontrol sisteminden oluşmaktadır. Egzoz gazı için eşanjör ünitesi ise; ısı eşanjörü ve TEM'lerden meydana gelmektedir. Soğutma ünitesi; soğutucu, soğutma suyu haznesi, su pompası, radyatör ve fanlardan oluşmaktadır. Kontrol sisteminde ise, dinamometre, ölçüm aletleri ve göstergeler yer almaktadır. Şekil 5.7'de deney düzeneğinin genel görünümü verilmektedir.



Şekil 5.7. Deney düzeneği genel görünümü.

5.2.1. Deney motoru

Deneylerde Super Star marka tek silindirli, direkt püskürtmeli, doğal emişli ve su soğutmalı bir dizel motor kullanılmıştır. Şekil 5.8’de deneyde kullanılan dizel motorun görünümü ve Tablo 5.1’de teknik özellikleri verilmektedir.



Şekil 5.8. Deney motoru görünümü.

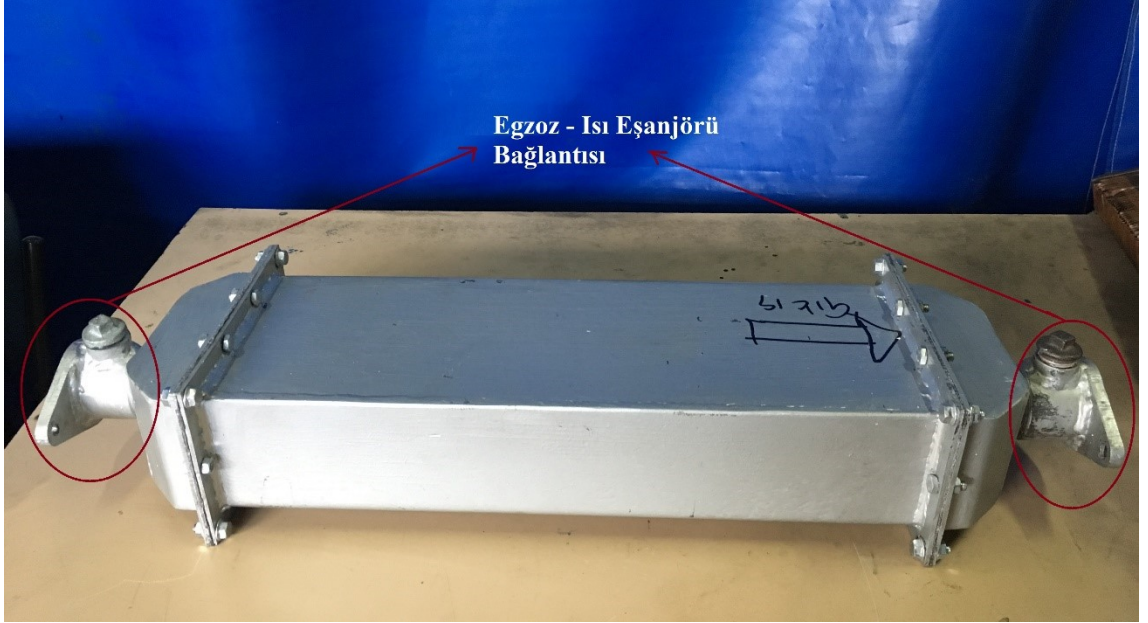
Tablo 5.1. Dizel motorun teknik özellikleri.

Marka ve model	Super Star
Çalışma prensibi	4 zamanlı, su soğutmalı, direkt enjeksiyonlu
Silindir sayısı	1
Silindir çapı (mm)	108
Silindir yüksekliği (mm)	100
Sıkıştırma oranı	17/1
Maksimum motor gücü (kW)	16 BG (11,7 kW)
Püskürtme avansı (KMA)	28°

5.2.2. Egzoz gazı için eşanjör ünitesi

Egzoz gazı için eşanjör ünitesi, ısı eşanjörü ve TEJ'den oluşmaktadır.

5.2.2.1. Isı eşanjörü



Şekil 5.9. İmal edilen ısı eşanjörü.

Isı eşanjörü için yapılan analizlerle 14 kanatçıklı ısı eşanjörünün bu çalışma için ideal olduğu sonucuna varılmıştır. Daha sonra bu tasarım St52 çelik malzemedен imal

edilmiştir. Şekil 5.9’da imalatı gerçekleştirilen ısı eşanjörüne ait görünüm verilmektedir. Eşanjör sistemini motor egzoz çıkışına montajlayabilmek amacıyla flanşlar kullanılmıştır. Ayrıca eşanjöre giren ve çıkan egzoz gazının sıcaklığını ölçmek için kullanılan termokuplların yerleştirilmesi amacıyla civata delikleri açılmıştır.

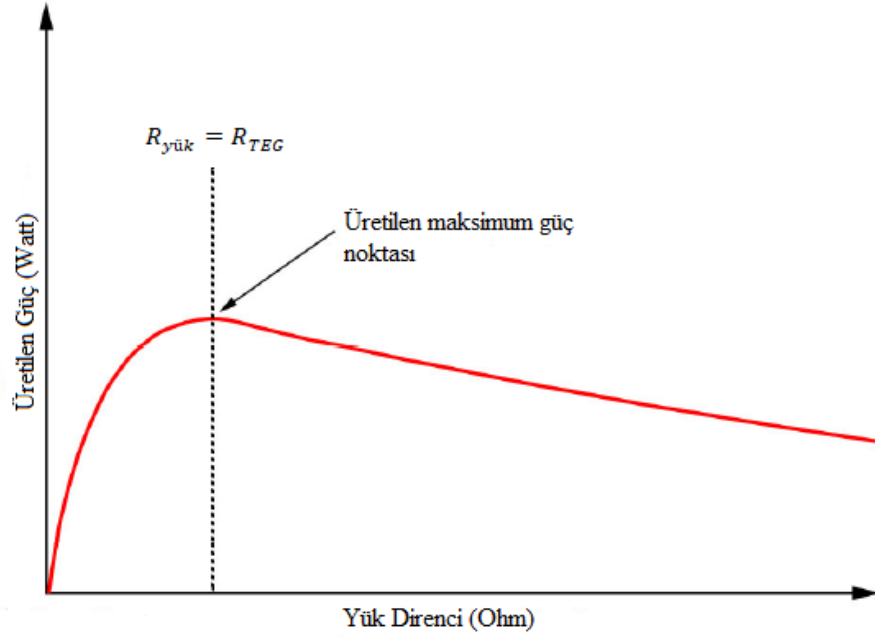
5.2.2.2. Termoelektrik jeneratör

TEJ sisteminde toplam 15 adet TEM kullanılmıştır. Kullanılan bu TEM’ler Custom Thermoelectric firmasına ait 1261G-7L31-10CX1 modelidir. Tablo 5.2’de bu TEM’lere ait teknik özellikler verilmektedir.

Tablo 5.2. TEM teknik özellikleri.

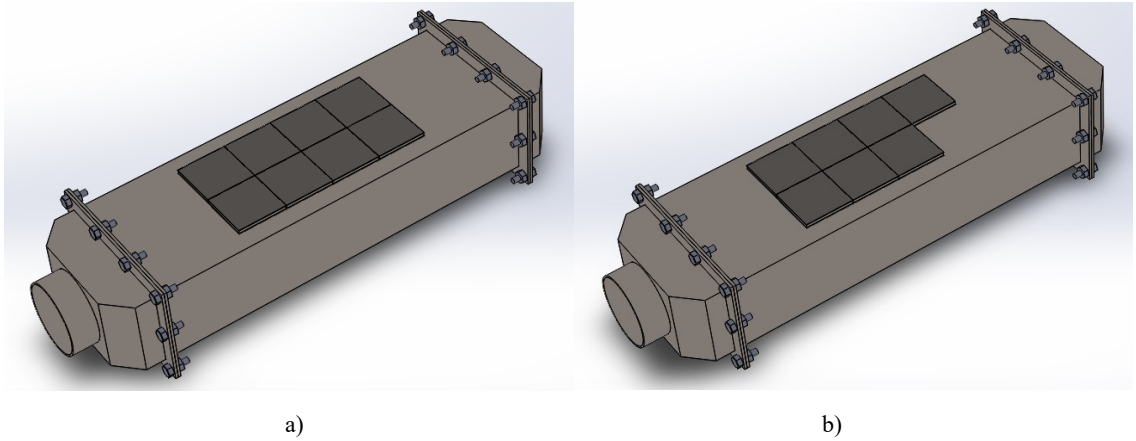
Marka	Custom Thermoelectric
Model	1261G-7L31-10CX1
Ebat(mm)	56x56x4,7
Ağırlık(gr)	60
Termoelektrik malzeme	Bi ₂ Te ₃ (Bizmut Tellürid)
Termal çift sayısı (p ve n tipi)	126
Termal iletkenlik (Watts/mK) (Th=300°C için)	1,75
Maksimum yüzey sıcaklığı (°C)(Th için)	320
Maksimum yüzey sıcaklığı (°C)(Tc için)	180
İç Direnç(ohm)(27°C için)	0,65

Sıcaklıkla birlikte artan bir eğilim gösteren gerilim, akım ve güç değerleriyle birlikte TEM’in iç direnci de artmaktadır. Şekil 5.10’da da gösterildiği üzere TEJ’den maksimum güç elde edebilmek için TEJ’e seri bağlanacak olan yük direnci TEJ iç direncine eşit olmalıdır.



Şekil 5.10. Yük direncine göre üretilen maksimum güç grafiği (Custom Thermoelectric, 2019).

8 adet üst ve 7 adet altta olmak üzere TEM'lerin ısı eşanjörü yüzeylerine dizilimi Şekil 5.11'de gösterilmektedir. 15 adet TEM birbirlerine elektriksel olarak seri bağlanmışlardır.



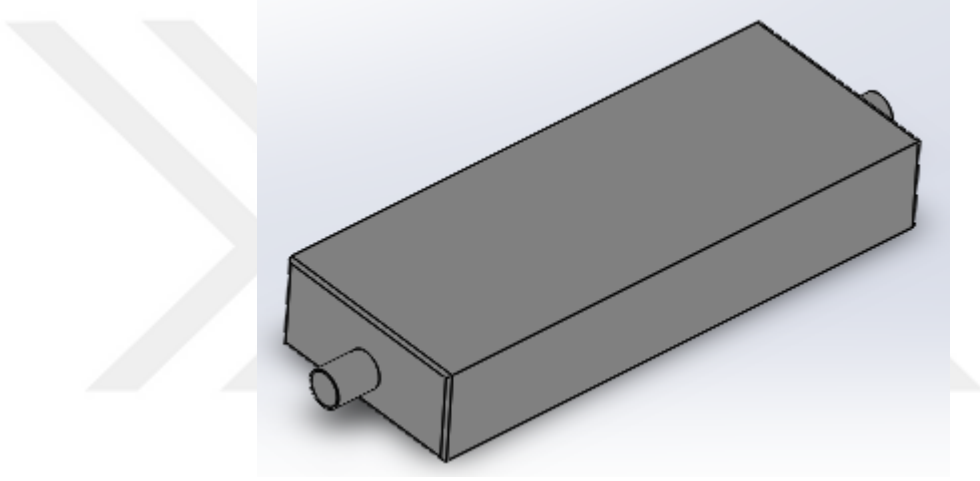
Şekil 5.11. a) Eşanjörün üst yüzeyinde TEM'lerin yerleştirilmesi b) Eşanjörün alt yüzeyinde TEM'lerin yerleştirilmesi.

5.2.3. Soğutma Ünitesi

Soğutma ünitesi; soğutucu, soğutma suyu haznesi, su pompası, radyatör ve fanlardan oluşmaktadır.

5.2.3.1. Soğutucu

Şekil 5.12’de soğutucuya ait görünüm verilmektedir. TEJ’lerin sıcak yüzeylerinden soğuk yüzeylerine ısı tranferiyle ısınan soğuk yüzeylerini soğutmak için tasarlanan modelde ısı iletkenliği yüksek olan alüminyum malzeme tercih edilmiştir. Sistemde eşanjörün alt ve üst yüzeylerine TEM’ler yerleştirildiğinden dolayı her bir yüzey için soğutucu imal edilmiştir. İçerisinden su geçirilerek soğutma yapan alüminyum soğutucunun TEM’lere temas eden yüzeylerinde iki adet ince kanatçık kullanılarak ısı transferinin artırılması amaçlanmıştır.



Şekil 5.12. Alüminyum soğutucu.

5.2.3.2. Soğutma suyu haznesi

TEM’lerden elektrik üretebilmek için ısınan soğuk yüzeylerinde soğutma sağlamak amacıyla soğutuculara gönderilen suyu sağlayan haznedir. Bu hazne 64 dm^3 hacimle soğutucular için akışı sağlayacak yeterli kapasiteye sahiptir.

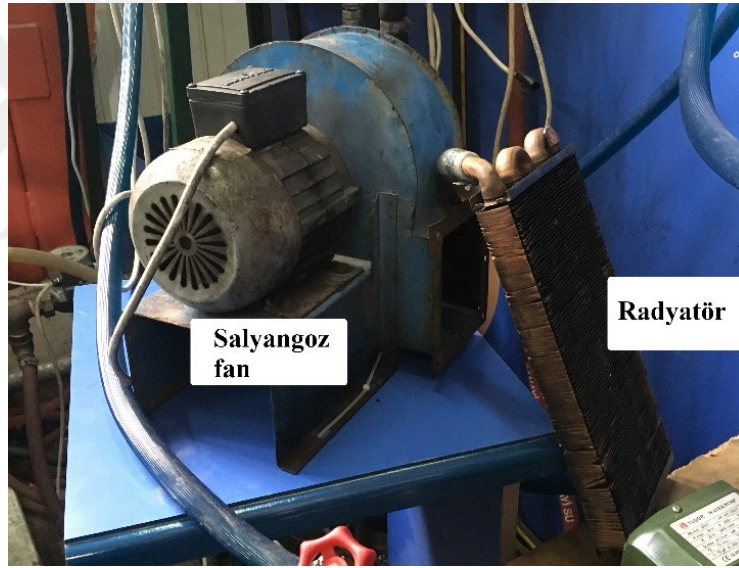
5.2.3.3. Su pompası

Deneysel çalışmalarda kullanılan su pompası soğutma suyu haznesinden aldığı suyu soğutuculara ileterek suyun devir daimini sağlamaktadır. Su pompasına ait teknik bilgiler Tablo 5.3’te verilmektedir.

Tablo 5.3. Su pompası teknik bilgileri.

Marka ve model	RAINPUMP QB60
Güç (kW-Hp)	0,37-0,50
Ölçüler (mm)	280x150x175
Ağırlık (kg)	6
Giriş çapı (mm)	25.4
Çıkış çapı (mm)	25.4
Maksimum debi (lt/d)	25
Maksimum basma yüksekliği (m)	33

5.2.3.4. Radyatör ve salyangoz fan



Şekil 5.13. Radyatör ve salyangoz fan.

TEM yüzeylerini soğutmak için gönderilen soğutma suyu soğutuculardan geçtikten sonra bir miktar ısınarak çıkmaktadırlar. TEJ'lere daha iyi bir soğutma sağlamak için soğutuculardan çıkan ısınmış su bir radyatörden geçirilerek soğutulmaktadır. Ayrıca radyatöre gelen ısınmış suyu daha iyi soğutmak için radyatöre güçlü bir şekilde hava üfleyen salyangoz tipi fan kullanılmıştır. Şekil 5.13'te deneylerde kullanılan radyatör ve salyangoz tipi fan gösterilmektedir.

5.2.4. Kontrol ünitesi

Kontrol sistemi, dinamometre, ölçüm aletleri ve göstergelerden oluşmaktadır.

5.2.4.1. Dinamometre

Deneyleerde elektrikli bir dinamometre kullanılmıştır. Kuvvet ölçümü dinamometreye bağlı yük hücresi ile ölçülmektedir. Şekil 5.14'te deneysel çalışmalarda kullanılan dinamometrenin görünümü verilmektedir.



Şekil 5.14. Dinamometre.

5.2.4.2. Ölçüm elemanları ve göstergeler

Deney düzeneğinde ısı eşanjörüne giren egzoz gazının giriş ve çıkıştaki sıcaklığını ölçmek üzere 2 adet J tipi Pt-100 termokupl kullanılmıştır. Maksimum 600 °C'ye kadar ölçüm yapabilen termokupl ısı eşanjörüne kolay monte edilmesi için rekorlu yapıda tercih edilmiştir. Isı eşanjörünün giriş ve çıkış sıcaklık değerlerini gözlemleyebilmek amacıyla Enda marka ET2011 model sıcaklık göstergesi kullanılmıştır. Isı eşanjörü yüzeyi Fluke marka 62 Max kızılötesi termometre ile ölçülmüştür. Soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklığını ölçmek amacıyla NTC tipi termokupllar kullanılmıştır. Motor soğutma suyu giriş – çıkış sıcaklığı ve ortam sıcaklığı ölçümü K tipi termokupllarla yapılmaktadır.

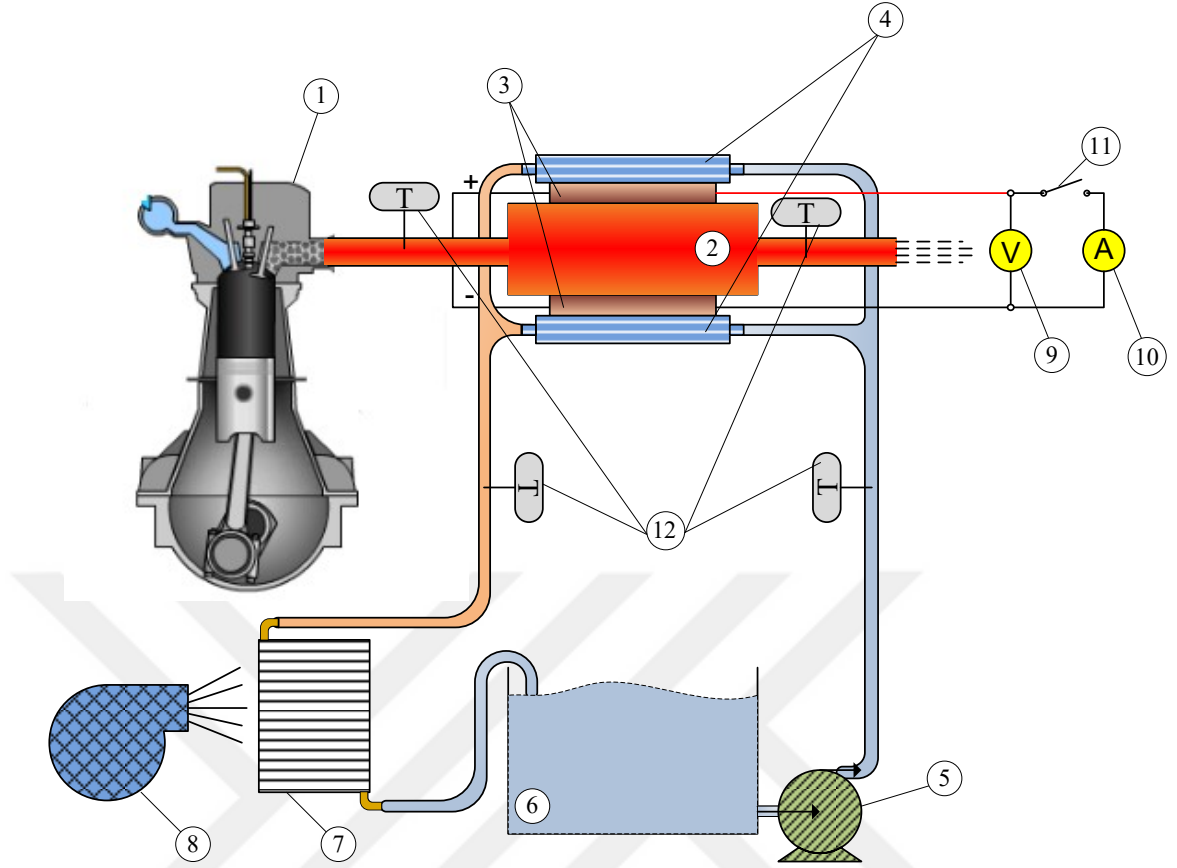
Ayrıca doğru akım gerilimi $\pm\%0.8$ ve akımı $\pm\%2$ doğruluğa sahip 2 adet multimetre ile TEJ'den üretilen akım ve gerilim değerleri ölçülmüştür.

5.3. TEJ Düzeneginin Deneysel Çalışması

Şekil 5.15'te şematik gösterimi verilen TEJ deney düzeneginde, motorun egzozu ısı eşanjörüne bağlanmıştır, atık gaz eşanjöre ısı enerjisinin bir kısmını transfer ederek eşanjörün diğer ucundan atılmaktadır. Üzerine ısı enerjisini alan ısı eşanjörü bu ısıyı yüzeyine monte edilmiş TEM'lerin sıcak yüzeyine iletmekte ve elektrik enerjisi üretilmesi için en önemli katkıyı sisteme sağlamaktadır. Bu sistemde TEM'ler ısı eşanjörünün en geniş iki yüzeyi olan alt ve üst yüzeylerine monte edilmişlerdir.

Isı eşanjöründen egzoz gazı geçirilirken TEM'in sıcak yüzeyine iletilen ısı bir süre sonra soğuk yüzeyin de ısınmasına sebep olmaktadır. TEM'in sıcak ve soğuk yüzeyi arasındaki sıcaklık farkını arttırmak amacıyla ısınan soğuk yüzeyi soğutmak için eşanjörün her iki yüzeyinde de soğutucular TEM'lerin soğuk yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. TEM'ler yerleştirilirken hem soğuk yüzeyine hem sıcak yüzeyine hava boşluğu kalmasını önleyerek ısı iletkenliğini arttırmak için termal macun kullanılmıştır. Soğutma suyu haznesinden su pompası yardımıyla bu soğutucuların içerisine soğuk su gönderilmektedir. Soğuk su pompalamayla hazne içerisinden soğuk su geçirilerek sürekli devirdaim yapmakta ve böylece TEM'in ısınan soğuk yüzeyi soğutulmaktadır. Soğutucu haznedeki ısınmış su radyatör ve radyatöre hava üfleyen fan yardımıyla soğutulmuş su soğutma suyu haznesine gönderilmektedir.

Yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkından dolayı elektrik üreten TEJ'in ürettiği gerilim ve akım değerleri multimetreler yardımıyla ölçülmüştür. Ayrıca ısı eşanjörüne giren ve çıkan egzoz gaz sıcaklığı ve soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıklarını kontrol etmek için termokupllar kullanılmıştır.



1. Dizel motor, 2. Isı eşanjörü, 3. Termoelektrik modüller, 4. Alüminyum soğutucular, 5. Santrifüj pompa, 6. Su haznesi, 7. Radyatör, 8. Santrifüj fan, 9. Voltmetre, 10. Ampermetre, 11. Anahtar, 12. Termokupllar

Şekil 5.15. TEJ deney düzeneği şematik görünümü.

5.4. Deneysel Yöntem

Deneylere başlamadan önce deney motoru bir süre çalıştırılarak rejim sıcaklığına ulaşması sağlanmıştır. Deney motoru ile yüksüz-değişken devir, tam yük-değişken devir ve sabit devir-değişken yük (kısmi yük) olmak üzere üç farklı çalışma yapılmıştır. İlk olarak motor yüksüz halde sırasıyla 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2100, 2200 ve 2300 d/d devirlerde çalıştırılmıştır. Bu şartlarda her bir motor devri için egzoz gazı eşanjör giriş ve çıkış sıcaklıkları, soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları, motor soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları, eşanjör yüzey sıcaklığı, üretilen gerilim ve akım değerleri ölçülmüştür.

Daha sonra tam yük-değişken devir deneylerine geçilmiştir. Deney düzeneği için ayrılan kısıtlı alandan ötürü, TEJ sistemi deney motorunun egzoz çıkışının hemen yakınında

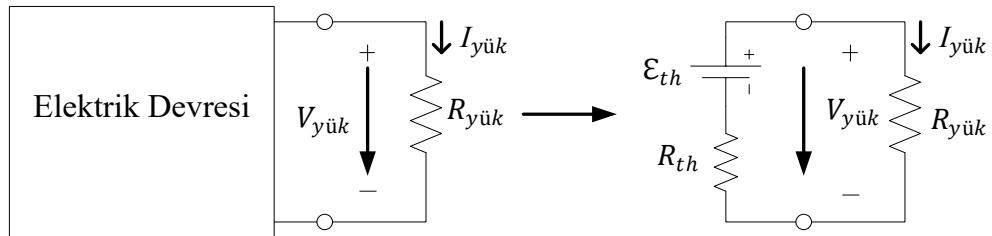
konumlandırılmıştır. Bu sebeple motordan çıkan egzoz gazı fazla ısı kaybına uğramamaktadır. Dolayısıyla TEJ sistemi motor devri 2300 d/d'dan itibaren yüklenmeye başladığında egzoz gaz sıcaklığı çok yükselmiştir. Yükleyerek devri daha da azaltmak sıcaklığı aşırı artıracığından bu durum maksimum 320°C dayanma sıcaklığına sahip olan TEM'ler için riskli görülmüş ve motor yüklü çalışması için daha düşük devrilerden yüklemeye başlamak uygun görülmüştür. 1800 d/d'dan itibaren yüklenmeye başlanan motor sırasıyla 1750, 1700, 1650, 1600 d/d devirlerine düşürülmüştür. Bu şartlarda yüklerle birlikte gerekli ölçüm değerleri alınmıştır.

Ayrıca yüklü halde maksimum elektrik gücü üretiminin gözlemlendiği devir olan 1600 d/d için kısmi yük şartlarında deneyler yapılmıştır. 1800'den itibaren yüklenerek 1600 d/d'ya düşürüldüğünde elde edilen yük değerinin %75, 50 ve 25'i hesaplanmış ve hesaplanan bu yüklerde 1600 d/d elde etmek için gaz kolu ve dinamometre ile ayarlamalar yapılmıştır.

5.5. Deneysel Hesaplamalar

5.5.1. Maksimum güç teoremi

Maksimum güç teoremi elektrik devresine bir yük bağlandığında, yükün devreden çektiği gücün hangi şartta maksimum olduğunu açıklamaktadır. Şekil 5.16'da yüklü bir gerilim kaynağı devresi ve Thevenin eşdeğer devresi verilmektedir (Arifoğlu, 2013).



Şekil 5.16. Gerilim kaynağı ve Thevenin eşdeğeri (Arifoğlu, 2013).

Yük direncinde harcanan güç $P_{yük}$, Denklem 5.3'teki gibi hesaplanmaktadır. $R_{yük}$ üreteçle bağlanan yükün direnci, $I_{yük}$ yük üzerinden akan akımdır (Arifoğlu, 2013).

$$P_{y\ddot{u}k} = R_{y\ddot{u}k} * I_{y\ddot{u}k}^2 \quad (5.3)$$

Yük akımı değeri $I_{y\ddot{u}k}$, Denklem 5.4'teki gibi hesaplanmaktadır. \mathcal{E}_{th} gerilim kaynağının Thevenin eşdeğeri, R_{th} gerilim kaynağının Thevenin eşdeğer direncini ifade etmektedir (Arifoğlu, 2013).

$$I_{y\ddot{u}k} = \frac{\mathcal{E}_{th}}{R_{th} + R_{y\ddot{u}k}} \quad (5.4)$$

Denklem 5.4, Denklem 5.3'te yerine konulursa $P_{y\ddot{u}k}$ Denklem 5.5'teki şekilde bulunur.

$$P_{y\ddot{u}k} = \left(\frac{\mathcal{E}_{th}}{R_{th} + R_{y\ddot{u}k}} \right)^2 * R_{y\ddot{u}k} \quad (5.5)$$

$P_{y\ddot{u}k}$ 'ü maksimum yapan $R_{y\ddot{u}k}$ değeri bulmak için Denklem 5.5'teki değişken olan $R_{y\ddot{u}k}$ direncine göre türev alınır ve sifira eşitlenirse Denklem 5.6 elde edilir (Arifoğlu, 2013).

$$\frac{dP_{y\ddot{u}k}}{dR_{y\ddot{u}k}} = \left(\frac{\mathcal{E}_{th}}{R_{th} + R_{y\ddot{u}k}} \right)^2 * R_{y\ddot{u}k} = \mathcal{E}_{th} \frac{d}{dR_{y\ddot{u}k}} \left(\frac{R_{y\ddot{u}k}}{(R_{th} + R_{y\ddot{u}k})^2} \right)$$

$$\mathcal{E}_{y\ddot{u}k} \left(\frac{R_{th} - R_{y\ddot{u}k}}{R_{th} + R_{y\ddot{u}k}} \right) = 0 \quad (5.6)$$

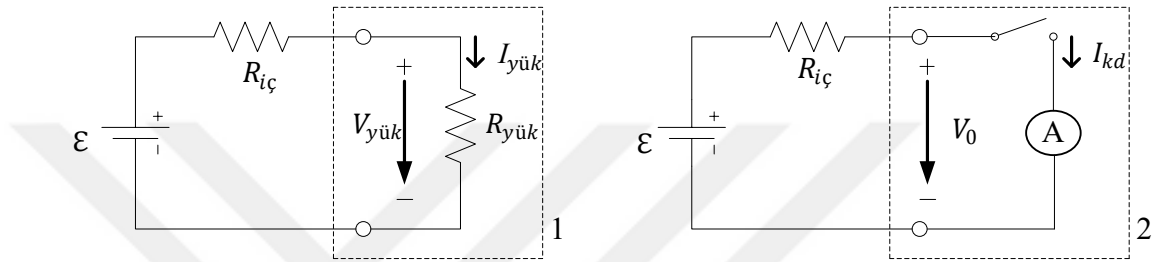
Denklem 5.6'nın sağlanabilmesi için payın sıfır olması yeterlidir. Diğer bir ifade ile Denklem 5.7 sağlanmalıdır.

$$R_{y\ddot{u}k} = R_{th} \quad (5.7)$$

Bu durumda bir elektrik devresinin çıkışına bağlanan yükün devreden maksimum güç çekebilmesi için yük direncinin değeri, yükün bağlandığı uçların arasından devreye doğru bakıldığında görülen Thevenin eşdeğer direncine eşit olmalıdır (Arifoğlu, 2013).

5.5.2. Kısa devre akımı

Şekil 5.17’de bir gerilim kaynağının 1 (yüklü) ve 2 (kısa devre) durumları için devre şeması verilmektedir. Maksimum güç elde etmek için kaynak iç direncinin yük direncine eşit olması gerekmektedir. Buna göre; devrenin kısa devreyken ölçülen sonuçlardan hareketle, iç direncine eşit yük bağlanması durumunda maksimum ne kadar güç elde edildiğini gösteren formülasyon aşağıda adım adım incelenmektedir.



Şekil 5.17. Bir gerilim kaynağının 1 (yüklü) ve 2 (kısa devre) durumları için devre şeması (Arifoğlu, 2013).

Devreye yük bağlanmadığında kısa devre akımı I_{kd} , Denklem 5.8’den elde edilmektedir. Burada V_0 açık devre gerilimini, R_i iç direnci ifade etmektedir (Arifoğlu, 2013).

$$I_{kd} = \frac{V_0}{R_i} \quad (5.8)$$

Devreye yük bağlı olması durumunda yükün güç ifadesi $P_{yük}$ Denklem 5.9’daki şekilde hesaplanmaktadır.

$$P_{yük} = \epsilon I - I^2 R_i \quad (5.9)$$

Denklem 5.9’un Denklem 5.10 ve Denklem 5.11’deki gibi I ’ya göre türevi alınıp sıfıra eşitlendiğinde Denklem 5.12’deki üretilen gücün maksimum olduğu akım değeri I elde edilmektedir (Arifoğlu, 2013).

$$\frac{dP_{yük}}{dI} = 0 \quad (5.10)$$

$$\varepsilon - 2IR_i = 0 \quad (5.11)$$

$$I = \frac{V_0}{2R_i} = \frac{I_{kd}}{2} \quad (5.12)$$

Yani devreye yük bağlandığında çekilebilecek maksimum akım, kısa devre durumunda devreden ölçülen akımın yarısı kadardır.

Ayrıca Denklem 5.13'te verilen $V_{yük}$ eşitliğinde $R_{yük} = R_{iç}$ ifadesi kullanıldığında $V_{yük}$ değeri Denklem 5.14'teki şekilde hesaplanmaktadır (Arifoğlu, 2013).

$$V_{yük} = \left(\frac{R_{yük}}{R_{yük} + R_{iç}} \right) \varepsilon \quad (5.13)$$

$$V_{yük} = \left(\frac{R_{iç}}{R_{iç} + R_{iç}} \right) \varepsilon = \frac{\varepsilon}{2} \quad (5.14)$$

Yani devreye yük bağlandığında gerilim bölücü görevi görür ve yük üzerinde elde edilen gerilim açık devre geriliminin yarısına eşittir. Bu durumda kısa devre akımıyla ölçüm yapılan devrede üretilebilecek maksimum güç $P_{yük_{mak}}$ Denklem 5.15'teki gibi hesaplanmaktadır (S. Kim, Park, S. Kim ve Rhi, 2011).

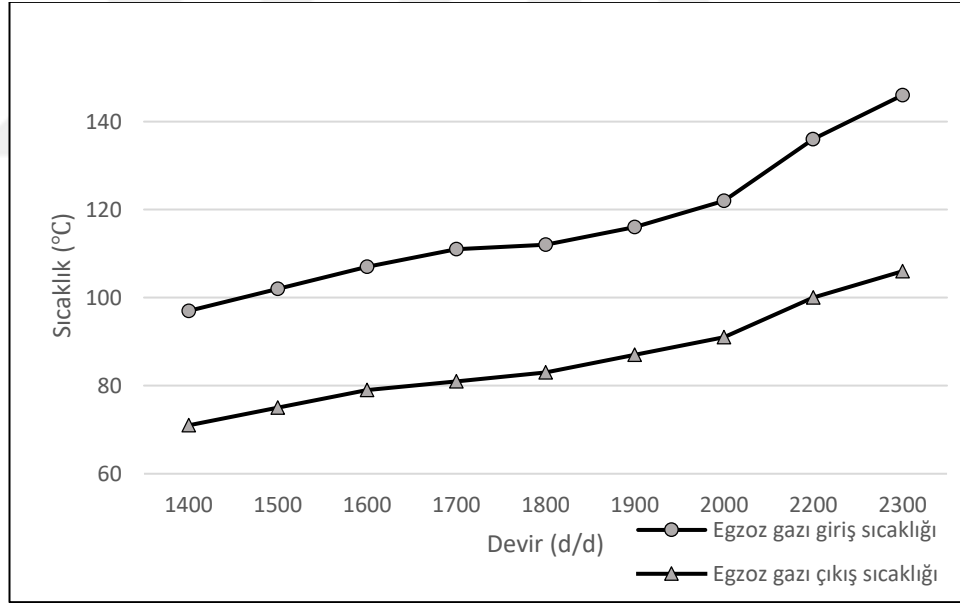
$$P_{yük_{mak}} = V_{yük} * I = \frac{\varepsilon}{2} * \frac{I_{kd}}{2}$$

$$P_{yük_{mak}} = \frac{\varepsilon * I_{kd}}{4} \quad (5.15)$$

Bu çalışmada TEJ'den üretilen maksimum gücü bulmak için bu denklemden yararlanılmıştır. TEJ'in iç direnci sıcaklıkla değişmektedir. Sabit bir dirence sahip olmadığı için maksimum gücü ederken bu iç dirence eşit yük direnci bulmak zordur. Bu sebeple çalışmada devreye yük bağlanmadan açık devre gerilimi ve kısa devre akımından faydalanılarak maksimum güç değeri elde edilmektedir.

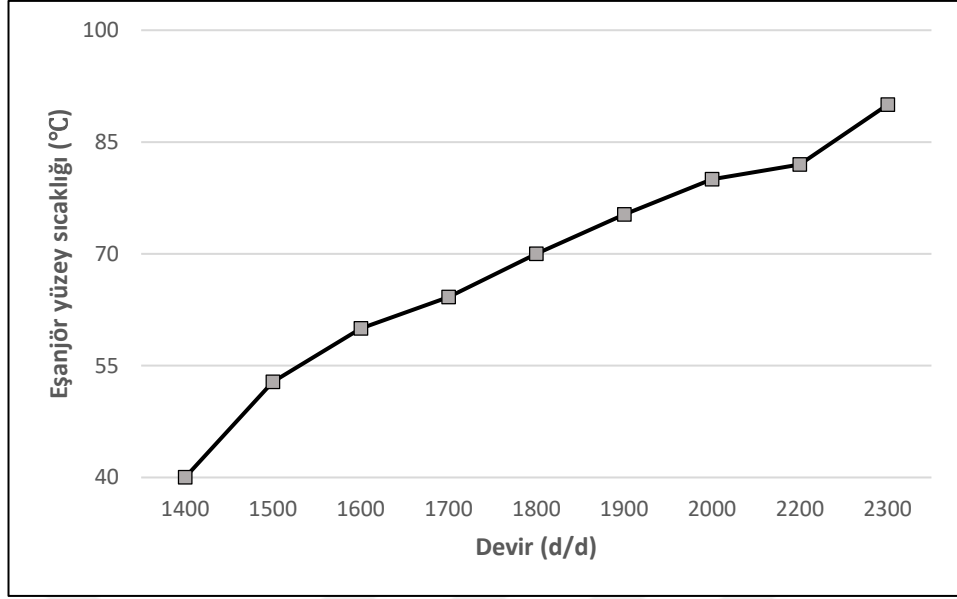
BÖLÜM 6. ARAŞTIRMA BULGULARI

Hazırlanan deney düzeneğinde motorun yüklenmeden farklı devirlerde çalıştırılmasıyla yapılan ölçümler incelenmiştir. Motor devrine göre egzoz gazının eşanjöre giriş ve çıkış sıcaklıkları değişimi Şekil 6.1’de verilmektedir. Motor devri arttıkça egzoz gaz sıcaklığının da arttığı görülmektedir. Egzozdan eşanjöre maksimum egzoz gazı giriş ve çıkış sıcaklıkları motor devri 2300 d/d iken sırasıyla 146°C ve 106°C elde edilmiştir. Ayrıca eşanjöre giren egzoz sıcaklığı eşanjörden çıkana kadar bir miktar ısı farkı oluşturduğu eğrilerden anlaşılmaktadır.



Şekil 6.1. Yüksüz motor devir – egzoz gazı eşanjöre giriş-çıkış sıcaklıkları değişimi.

Isı eşanjörünün yüzeyi bir kızılötesi termometre yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 6.2’de motorun yüksüz halde çalışırken farklı devirlerde ısı eşanjörü yüzeyinde ölçülen sıcaklık değişimleri verilmektedir. Eşanjör yüzey sıcaklığının maksimum değeri, motor devri 2300 d/d iken 90°C olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 6.2. Yüksüz motor devir – eşanjör yüzey sıcaklığı değişimi.

Şekil 6.3'te motorun yüklenmeden farklı devirler için TEJ'den üretilen açık devre gerilim değerleri verilmektedir.

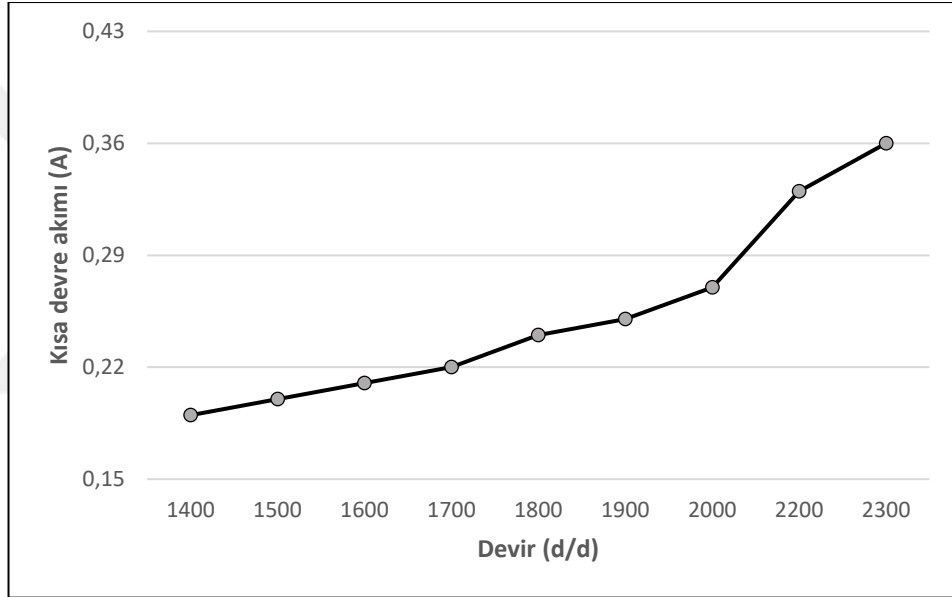


Şekil 6.3. Yüksüz motor devir – açık devre gerilimi değişimi.

Yüksüz durumda motor devri arttıkça açık devre geriliminin de arttığı görülmektedir. Bu durum devir arttıkça TEM'in sıcak yüzey sıcaklığının da artışından kaynaklanmaktadır. Egzoz gazı bu çalışma şartlarında, motor devri 2300 d/d iken maksimum sıcaklığa ulaştığı

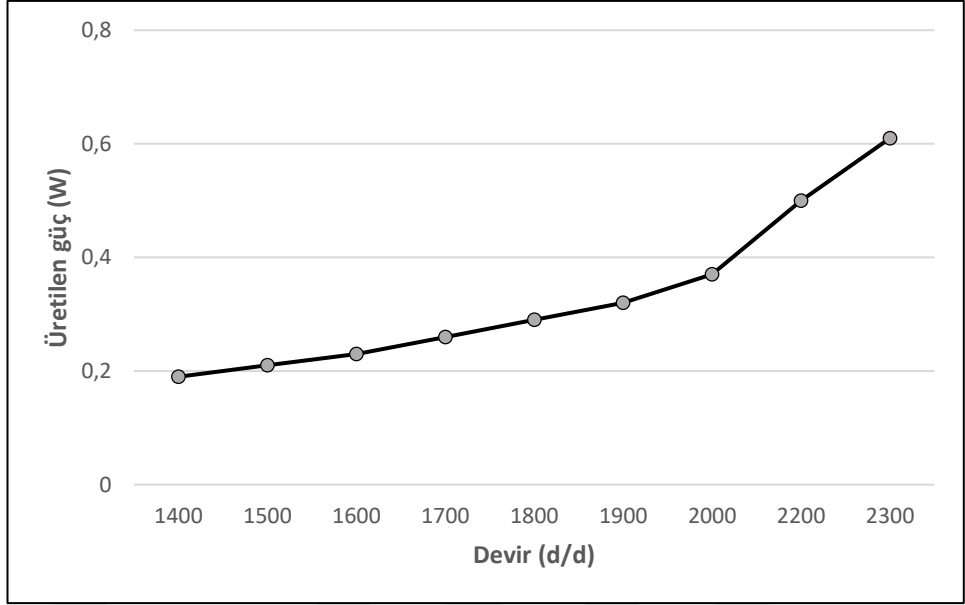
için 6,8 V maksimum açık devre gerilimi elde edilmiştir. En düşük gerilim değeri ise; 1400 d/d'da egzoz gazı sıcaklığı da düşük olduğu için 4 V olarak gözlemlenmiştir.

Şekil 6.4'te motorun yüksüz çalışma şartlarında farklı devirlerde çalışması durumunda TEJ'den üretilen kısa devre akımı değerleri verilmektedir. Grafiğe göre motor devri arttıkça kısa devre akımının da arttığı görülmektedir. Motor devri 2300 d/d'da iken 0,36 A maksimum akım ve 1400 d/d'da iken 0,19 A minimum akım değeri elde edilmiştir. Bu durum motor devri yükseldikçe TEM'in sıcak yüzey sıcaklığın da artışından kaynaklanmaktadır.



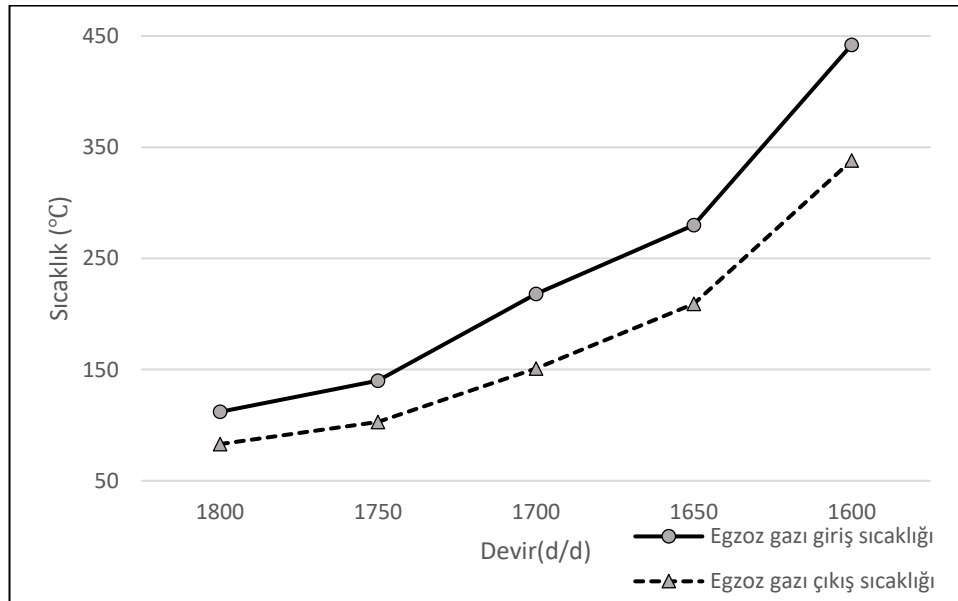
Şekil 6.4. Yüksüz motor devir – kısa devre akımı değişimi.

Motor yüklenmeden yapılan ölçümlerde elde edilen açık devre gerilimi ve kısa devre akımıyla TEJ'in ürettiği güç değerleri hesaplanmıştır. Şekil 6.5'te motor devrine göre üretilen güç değişimi verilmektedir. Artan motor devriyle birlikte üretilen güç de artmaktadır. Motor devri 2300 d/d iken açık devre gerilimi ve kısa devre akımı maksimum değerlere sahip olduğu için, bu motor devrinde maksimum güç değeri 0,61 W elde edilmiştir.



Şekil 6.5. Yüksüz motor devir – üretilen güç.

Yüksüz motor deneylerinden sonra tam yük-değişken devir deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda 2300 d/d yüksek bir motor devri olduğu ve motor yüklenmeye bu devirden başladığında sıcaklık aşırı derecede arttığından dolayı sınırlı dayanma sıcaklığına sahip olan TEJ için bu durum riskli görülmüştür. Uygun motor devri olarak 1800 d/d tam yük gibi kabul edilip bu devirden itibaren motor yüklenmeye başlanarak tam yük-değişken devir deneyleri yapılmıştır.



Şekil 6.6. 1800 d/d'den yüklü motor devir – egzoz gazı eşanjöre giriş-çıkış sıcaklıkları değişimi.

1800 d/d'dan itibaren yüklenen motorun devir ve buna bağılı olarak egzoz gazının eşanjöre giriş – çıkış sıcaklık değişimleri Şekil 6.6'da verilmektedir. Motor devri 1600 d/d iken maksimum egzoz gazı giriş sıcaklığı 442°C ve maksimum egzoz gazı çıkış sıcaklığı 338°C'dir. Motor yükü arttıkça devir düşmekte ve eşanjöre giriş – çıkış egzoz gaz sıcaklıkları da artmaktadır. Fakat motor devri 1600 d/d'dan daha fazla düşürülmemiştir. Çünkü yük arttırılarak düşürülen devirle beraber motor ısısı ve dolayısıyla egzoz gaz sıcaklıkları da hızla artmaktadır. Bu durumda, egzoz gazına bağılı eşanjör yüzeyindeki 300 °C'ye kadar ölçüm yapabilen ve maksimum dayanımı 320 °C olan TEM'lerin zarar görmesine sebep olması durumu ortaya çıkmaktadır.

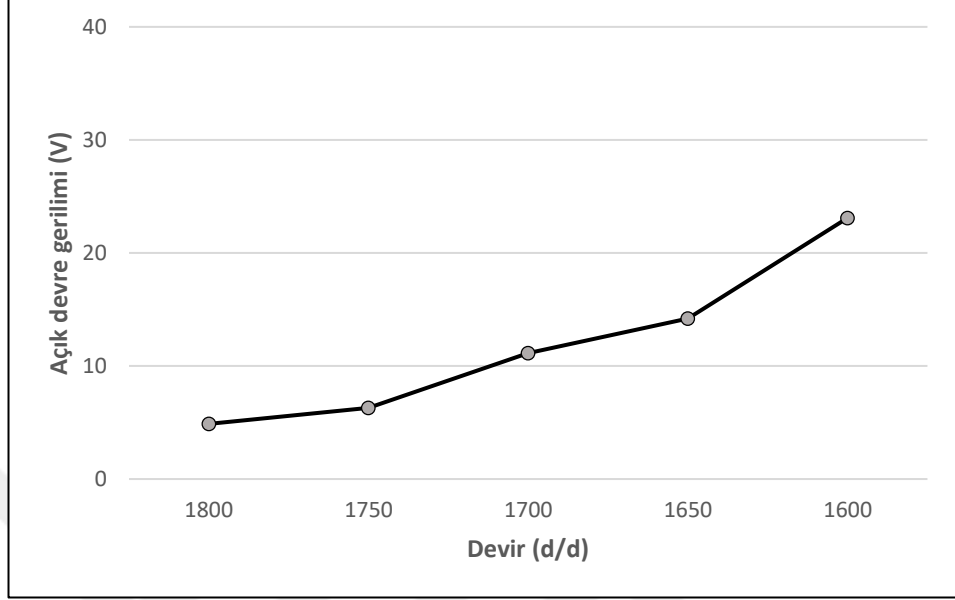
Şekil 6.7'de 1800 d/d'dan başlayarak yüklenen motorda değişen devirlere göre ısı eşanjörü yüzeyinde ölçülen sıcaklık değişimi verilmektedir. Eşanjör yüzey sıcaklığının maksimum değeri motor devri 1600 d/d iken 285°C ve minimum değeri 1800 d/d'da 70°C olarak gözlemlenmiştir.



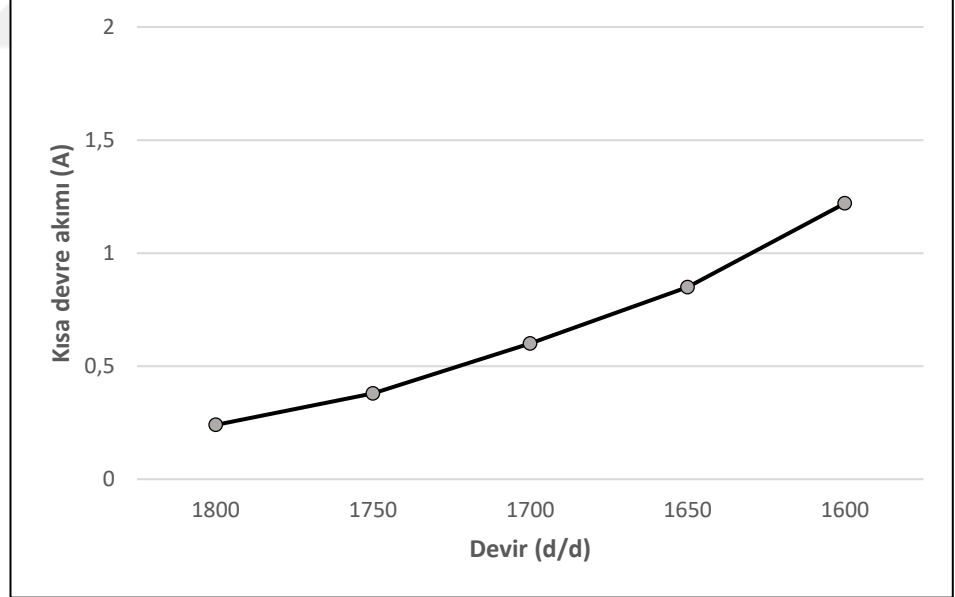
Şekil 6.7. 1800 d/d'dan yüklü motor devir – eşanjör yüzey sıcaklığı değişimi.

1800 d/d'den itibaren yüklenerek 1600 d/d'ya kadar düşürülen motor devrine göre TEJ'den elde edilen açık devre geriliminin değişimi Şekil 6.8'de gösterilmektedir. Yük arttırılarak düşürülen motor devri neticesinde artan sıcaklığa bağılı olarak üretilen açık devre geriliminin de yükseldiği görülmektedir. Motor devri 1600 d/d iken maksimum

gerilim değeri 23,1 V ve minimum gerilim değeri motor yükü arttırılmaya başlamadan önce 1800 d/d'da 4,88 V olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.8. 1800 d/d'den yüklü motor devri – açık devre gerilimi değışımi.

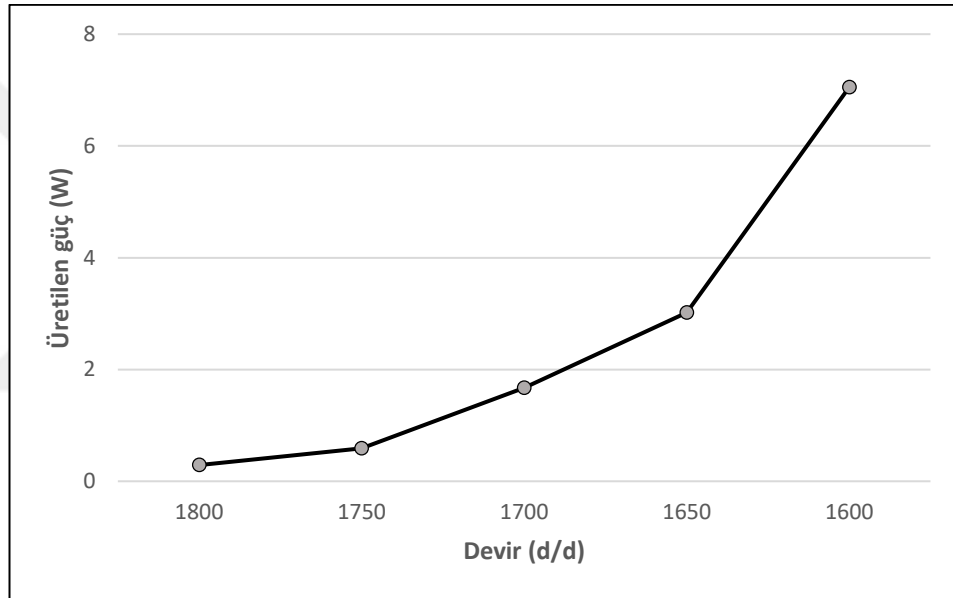


Şekil 6.9. 1800 d/d'den yüklenen motor devri – kısa devre akımı değışımi.

Şekil 6.9'da 1800 d/d'den itibaren yük arttırılarak 1600 d/d'ya düşürülen motor devri ve TEJ'den elde edilen kısa devre akımının değışımi verilmektedir. Motor devrinin azalmasıyla üretilen kısa devre akımının arttığı görülmektedir. Maksimum akım değeri

1,22 A değeri ile 1600 d/d motor devrinde ve minimum değeri motor yüklenmeye başlamadan 1800 d/d'da 0,24 A olarak elde edilmiştir.

1800 d/d'den itibaren motorun devri düşürülerek yapılan ölçümlerde elde edilen açık devre gerilimi ve kısa devre akımıyla TEJ'in ürettiği güç değerleri hesaplanmıştır. Şekil 6.10'da motor devrine göre üretilen güç değerlerinin değişimi verilmektedir. Azalan motor devriyle üretilen akım ve gerilim değerleri arttığı için üretilen güç de artmaktadır. Motor 1600 d/d iken maksimum güç 7,05 W ve 1800 d/d'da minimum güç 0,29 W olarak elde edilmiştir.

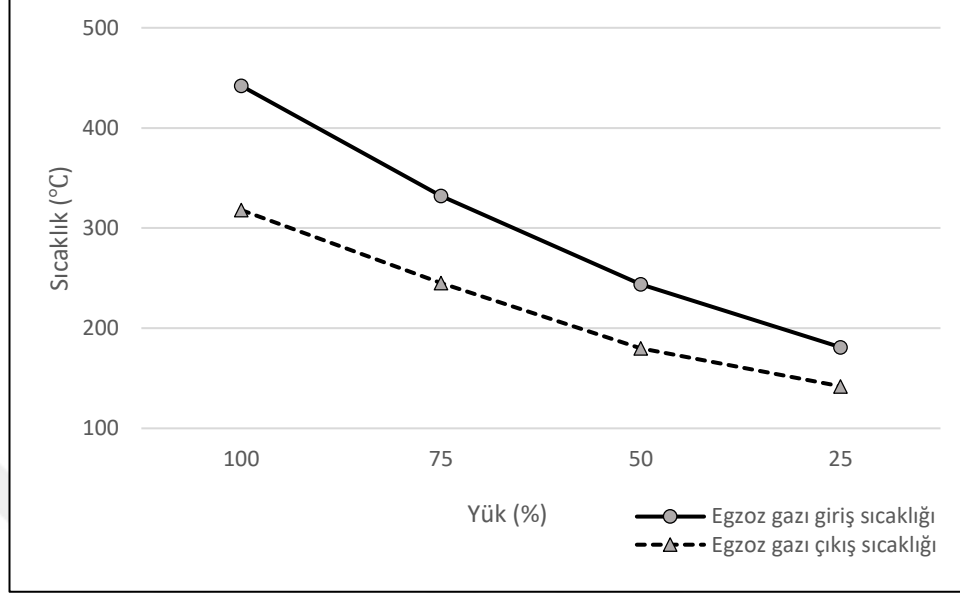


Şekil 6.10. 1800 d/d'den yüklenen motor devri – üretilen güç değişimi.

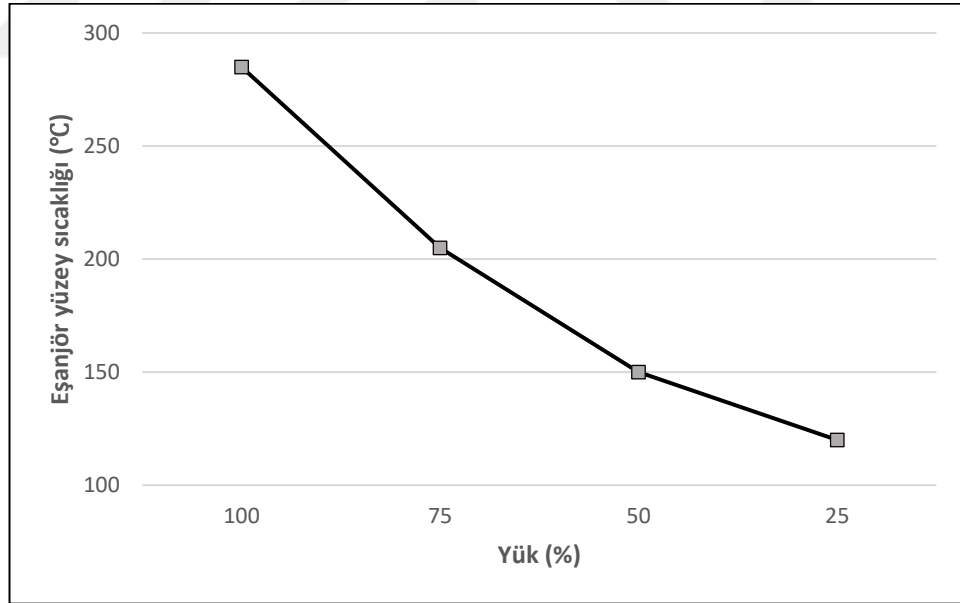
Yapılan deney verilerine göre üretilen gücün maksimum olduğu motor devrinin 1600 d/d olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra bu veriden hareketle 1600 d/d için kısmi yük deneyleri yapılmıştır. 1600 d/d'da elde edilen motor döndürme momenti ve bu değerlerin %25, 50 ve 75'i alınarak deneysel veriler oluşturulmuştur.

Şekil 6.11'te 1600 d/d'da kısmi yük ve eşanjöre giren egzoz gazı giriş – çıkış sıcaklık değişimi verilmektedir. %100 yük şartlarındaki motorun egzoz gazı sıcaklık değerleri maksimum ve sırasıyla 442, 318°C'dir. %25 yük şartlarında minimum olan egzoz gazı

giriş – çıkış değerleri sırasıyla 181, 142°C’dir. Yük azaldıkça motor döndürme momenti de düştüğü için egzoz gazı giriş-çıkış sıcaklık değerleri de azalmaktadır.



Şekil 6.11. 1600 d/d’da kısmi yük – egzoz gazı eşanjöre giriş-çıkış sıcaklıkları değişimi.

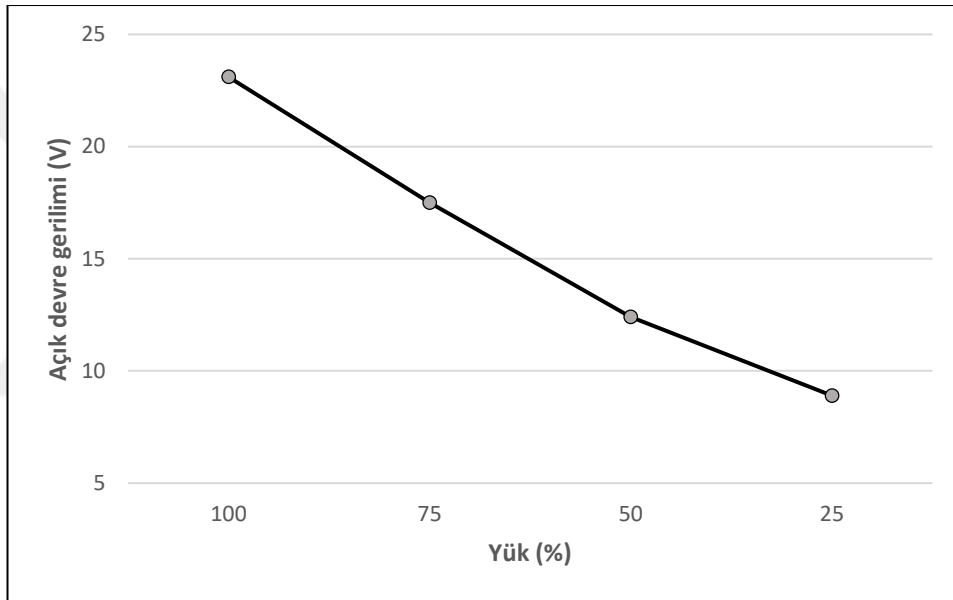


Şekil 6.12. 1600 d/d’da kısmi yük – eşanjör yüzey sıcaklığı değişimi.

Şekil 6.12’de motorun 1600 d/d’de kısmi yük koşullarında çalışması durumunda ısı eşanjörünün yüzey sıcaklığı değişimi verilmektedir. Eşanjör yüzey sıcaklığının maksimum değerinin 285°C ile %100 yük şartlarında ve minimum değerinin 120°C ile

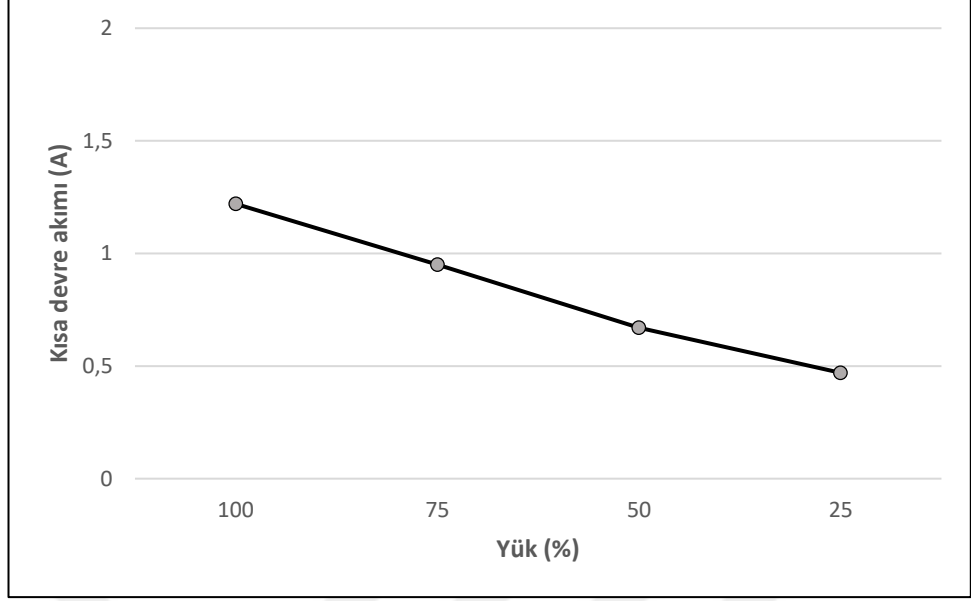
%25 yük şartlarında olduğu belirlenmiştir. Eşanjör yüzeyine iletilen ısının, düşük sıcaklık değerlerinde egzoz gazı giriş – çıkış sıcaklıklarıyla ısı farkının daha fazla olduğunu görülmektedir.

1600 d/d’da kısmi yük şartlarında çalışması sonucu üretilen açık devre gerilimi değişimi Şekil 6.13’te belirtilmektedir. Motor yükündeki düşmeye bağlı olarak egzoz gaz sıcaklıklarının da azalması, üretilen açık devre geriliminin de azalmasına neden olmuştur. Maksimum gerilim değeri motor %100 yük şartlarında çalışırken 23,1 V ve minimum gerilim değeri %25 yük şartlarında çalışırken 8,9 V olarak elde edilmiştir.



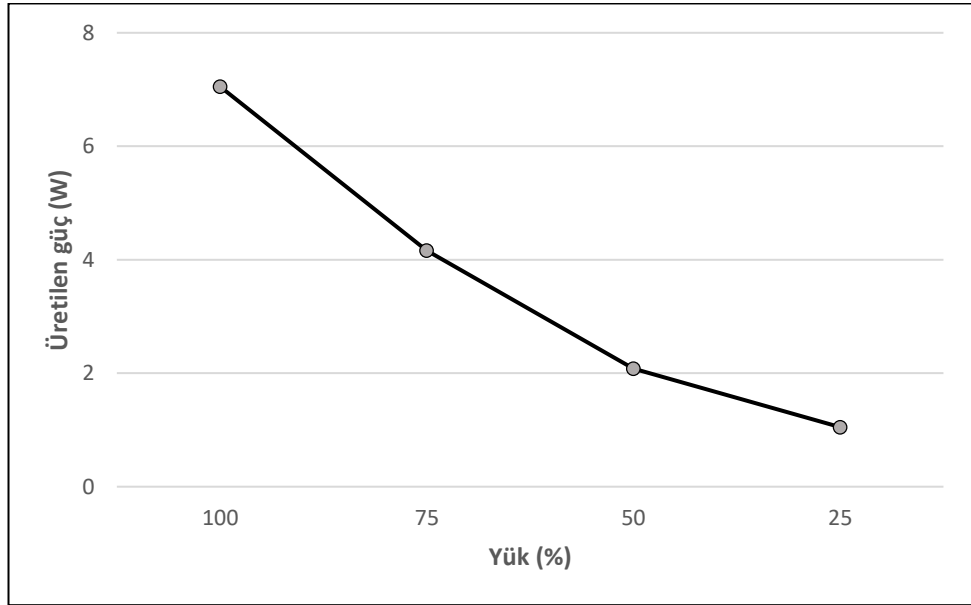
Şekil 6.13. 1600 d/d’da kısmi yük – açık devre gerilimi değişimi.

Şekil 6.14’te motor devri 1600 d/d iken kısmi yüke bağlı olarak üretilen kısa devre akımı verilmektedir. Buna göre azalan yükle birlikte TEJ’den üretilen kısa devre akımının da azaldığı görülmektedir. Maksimum akım değeri %100 yük şartlarında 1,22 A ve minimum gerilim değeri %25 yük şartlarında 0,47 A olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.14. 1600 d/d'da kısmi yük – kısa devre akımı değişimi.

1600 d/d'da maksimum döndürme momentine sahip olan motor %25, 50 ve 75 yük şartlarındayken yapılan ölçümlerde elde edilen açık devre gerilimi ve kısa devre akımıyla TEJ'in ürettiği güç değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 6.15. 1600 d/d'da kısmi yük – üretilen güç değişimi.

Şekil 6.15'te 1600 d/d'da yük değişimine buna bağlı olarak üretilen güç değerleri verilmektedir. Motor %100 yük şartlarındayken maksimum 7,05 W ve %25 yük

şartlarındayken minimum 1,05 W güç üretilmiştir. Yük azaldıkça egzoz sıcaklığı da azaldığı için TEJ'den üretilen gücün de düştüğü sonuçlarına ulaşılmaktadır.



BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

İçten yanmalı motorla çalışan otomobillerde yakıtın yanması sonucu enerjinin yaklaşık üçte biri egzozdan atık ısı olarak atmosfere salınmaktadır. Küresel ısınmaya sebep olarak çevre ve insan sağlığı açısından zararlı olan CO₂ gazının atmosferdeki miktarı fosil yakıtların yanmasıyla ciddi oranda artmaktadır. Dünya’da artan enerji ihtiyacına bağlı olarak, kısıtlı kaynak rezervine sahip olan fosil yakıtların kullanımı da artmaktadır. Bu durum ilerleyen yıllarda enerji talebini karşılamada ciddi sıkıntılara yol açacaktır. Isının geri kazanımını sağlayarak enerji verimliliği sağlamak amacıyla yapılan bu tez çalışmasında içten yanmalı motorlarda yanma sonucunda atık olarak atmosfere salınan ısı enerjisinden TEJ sistemi ile elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmiştir.

Sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkıyla ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan TEJ sisteminin dizel bir motor üzerinde uygulanmasına yönelik bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Bu amaçla egzoz gazının ısı enerjisinin TEM’lerin sıcak yüzeylerine iletilmesi amacıyla ısı eşanjörü tasarımları yapılmıştır. Bu eşanjör tasarımları 12, 14, 16 ve 18 olmak üzere farklı sayıda kanatçıklara sahiptir. Yapılan bu tasarımlardan optimum olanını imal etmek adına ANSYS Fluent CFD programında termal akış analizleri yapılmıştır. Bu analiz sonuçlarına göre aralarında çok fazla sıcaklık farkı olmaksızın uygun yüzey sıcaklık dağılımına ve tasarıma uygun imal edilebilirliğe sahip olan 14 kanatçıklı ısı eşanjörünün üretimi uygun görülmüş ve imal edilmiştir. Daha sonra ısı eşanjörünün alt ve üst yüzeylerine toplam 15 adet TEM yerleştirilmiş ve soğutucular da TEM’in soğuk yüzeylerine bağlanarak elde edilen TEJ sisteminin tek silindirli içten yanmalı dizel bir motorun egzoz çıkışına bağlantıları yapılmıştır. Deney motoru ile yüksüz-değişken devir, tam yük-değişken devir ve sabit devir değişken yük (kısmi yük) olmak üzere üç farklı çalışma yapılmıştır. Her bir çalışmada egzoz gazı eşanjör giriş ve çıkış sıcaklıkları, soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları, motor soğutma

suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları, eşanjör yüzey sıcaklığı, üretilen gerilim ve akım değerleri ölçülmüş ve güç değerleri hesaplanmıştır.

Yüksüz deneylerde motor 1400 – 2300 d/d arasında çalıştırılmıştır. Yapılan ölçümlere göre; eşanjöre giren ve çıkan egzoz gaz sıcaklığı ile eşanjör yüzeyindeki sıcaklık değerleri 2300 d/d'de maksimum ve sırasıyla 146, 106, 90°C olarak gözlemlenmiştir. Bu şartlarda üretilen açık devre gerilimi değeri egzoz gaz sıcaklığıyla orantılı olarak 2300 d/d'de maksimum 6,8 V, kısa devre akımı 2300 d/d'da maksimum 0,36 A olarak elde edilmiştir. Maksimum akım ve gerilim değerlerinin elde edildiği devir olan 2300 d/d'da bu değerlerle yapılan hesaplama sonucu üretilen maksimum güç 0,61 W olarak elde edilmiştir.

Tam yük-değişken devir deneylerinde 2300 d/d'dan yüklenmeye başlanan motorun egzoz gazı sıcaklığı çok fazla artış gösterdiği için ölçüm sıcaklığı maksimum 300°C'de olan ve maksimum dayanma sıcaklığı 320°C olan TEM'lerin sağlıklı çalışması adına 1800 d/d tam yük olarak kabul edilmiş ve motor dinamometre ile yüklemeye bu devirden başlanmıştır. Yapılan ölçümlere göre; eşanjöre giren ve çıkan egzoz gaz sıcaklığı ile eşanjör yüzeyindeki sıcaklık değerleri 1600 d/d'de maksimum ve sırasıyla 442, 338, 285°C olarak gözlemlenmiştir. TEM'lerin sınırlı dayanım sıcaklıklarından dolayı 1600 d/d'dan alt devirler için yükleme yapılmamıştır. Bu şartlarda üretilen açık devre gerilimi değeri egzoz gaz sıcaklığıyla orantılı olarak 1600 d/d'da maksimum 23,1 V, kısa devre akımı 1600 d/d'de maksimum 1,22 A olarak elde edilmiştir. Maksimum akım ve gerilim değerlerinin elde edildiği devir olan 1600 d/d'da bu değerlerle yapılan hesaplama sonucu üretilen maksimum güç 7,05 W olarak elde edilmiştir.

Tam yük-değişken devir deneylerine göre üretilen gücün maksimum olduğu devir olan 1600 d/d için %100, 75, 50 ve 25 yük altında kısmi yük deneyleri yapılmıştır. Yapılan ölçümlere göre; eşanjöre giren ve çıkan egzoz gaz sıcaklığı ile eşanjör yüzeyindeki sıcaklık değerleri %100 yükte maksimum ve sırasıyla 442, 318, 285°C olarak gözlemlenmiştir. Bu veriler %25 yükte minimum ve sırasıyla 181, 142, 120°C olarak gözlemlenmiştir. Bu şartlarda üretilen açık devre gerilimi değeri egzoz gaz sıcaklığıyla orantılı olarak %100 yükte 23,1 V ve kısa devre akımı 1,22 A olarak elde edilmiştir. %25

yükte üretilen minimum değerleriyle açık devre gerilimi 8,9 V ve kısa devre akımı 0,47 A olarak elde edilmiştir. Maksimum akım ve gerilim değerlerinin elde edildiği %100 yükte bu değerlerle yapılan hesaplama sonucu üretilen maksimum güç 7,05 W olarak elde edilmiştir.

Üretilen elektrik enerjisiyle otomobilin araç aydınlatması gibi elemanlarının ihtiyaçlarını karşılaması sağlanabilecek ve dolayısıyla aracın yakıt tüketimi ve bunun sonucu olarak CO₂ emisyonu ile çevreye vereceği zararlar azaltılabilecektir.

Gelecek çalışmalarda,

- TEM sayısı artırılarak daha iyi güç üretimi gerçekleştirilebilir.
- Günümüzde üretilen mevcut TEM'ler düşük verimle çalışmaktadır. Daha verimli TEM'ler üretildiğinde ya da kullanıldığında daha yüksek güç üretimi sağlanabilecektir.
- Yüksek maliyete sahip olan TEM'lerin maliyetini düşürmek üzerine çalışmalar yapılması TEM'lerin kullanım olanağını arttıracak ve enerjinin geri dönüşümü faaliyetlerine katkıda bulunacaktır.
- Egzoz gazı çıkış sıcaklığı yüksek olduğu bilinen buji ateşlemeli motorlarda da TEJ sistemi uygulamaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Ahıska, R., Mamur, H. ve Uliş, M. (2011). Termoelektrik modülün jeneratör olarak modellenmesi ve deneysel çalışması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 26(4), 889-896.
- Ahıska, R. ve Mamur, H. (2014). A review: Thermoelectric generators in renewable energy. *International Journal of Renewable Energy Research* 4(1), 128-136.
- Amerika Çevre Koruma Ajansı, (2017). U.S. Enviromental Protection Agency. Retrieved February 13, 2019, from <https://www.epa.gov/>.
- Arifoğlu, U. (2013). *Elektrik Elektronik Mühendisliğinin Temelleri Doğru Akım Devreleri* (Cilt-1). İstanbul: Alfa Basım Yayım Dağıtım.
- Atik, K. ve Kayabaşı, R. (2009). Jeotermal enerji kullanılarak termoelektrik jeneratör ile elektrik enerjisi üretimi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* 6(3), 59-64.
- Baş, Ş. (2014). *Atik baca gazı kullanımı ile termoelektrik jeneratörlerde elektrik üretiminin faydalı kullanımının deneysel incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Beretta, D. ve diğerleri, (2018), Thermoelectrics: From history, a window to the future. *Materials Science & Engineering R*.
- BP istatistik, (2018). *BP statıcal review of world energy 2018*. Retrieved April 05, 2019, from <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>.
- Cao, Q., Luan, W. ve Wang, T. (2017). Performance enhancement of heat pipes assisted thermoelectric generator for automobile exhaust heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 130, 1472-1479.
- Cess, R.D. ve Goldenberg, S.D. (1981). The effect of ocean heat capacity upon global warming due to increasing atmospheric carbon dioxide. *Journal of Geophysical Research* 86(1), 498-502.
- Custom Thermoelectric. Seebeck Thermoelectric Generator*. Retrieved January 7, 2019, from https://customthermoelectric.com/media/wysiwyg/TEG_spec_sheets/1261G-7L31-10CX1_20140512_spec_sht.pdf.
- Du, Y., Xu, J., Paul B. ve Eklund, P. (2018). Flexible thermoelectric materials and devices. *Applied Materials Today*. 366-388.

- Enerji Bilgi Yönetim İdaresi (EIA) (2017). *International Energy Outlook 2017*. Amerika: Enerji Bilgi Yönetim İdaresi.
- Ergeneman, M., Kutlar, A., Mutlu, M. ve Arslan, H. (1998). *Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Birsen yayınevi.
- Gabrial-Buenaventura, A. ve Azzopardi, B. (2014). Energy recovery systems for retro fitting in internal combustion engine vehicles: A review of techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 955–64.
- Gou, X., Xiao, H. ve Yang, S. (2010). Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system. *Applied Energy* 87, 3131-3136.
- He, Wang, Zhang, Li ve Lu (2015). Optimization design method of thermoelectric generator based on exhaust gas parameters for recovery of engine waste heat. *Energy* 91, 1-9.
- In, B.D., Kim, H.I., Son, J.W. ve Lee K.H. (2015). The study of a thermoelectric generator with various thermal conditions of exhaust gas from a diesel engine. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 86, 667-680.
- Kakaç, S. (1998). *Isı Transferine Giriş – I Isı İletimi*. Tıp&Teknik yayıncılık.
- Karri, M.A. (2005). *Modeling of an automotive exhaust thermoelectric generator* (Master's thesis), Clarkson University, New York.
- Karri, M. A., Thacher, E. F. ve Helenbrook B. T. (2011). Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: Two case studies. *Energy Conversion and Management* 52, 1596-1611.
- Khan, M.Q., Malarmannan, S. ve Manikandaraja, G. (2018). Power generation from waste heat of vehicle exhaust using thermo electric generator: A review. *2nd International conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME 2018)*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 402, 012174.
- Kim, S., Park, S. Kim, S. ve Rhi, S.H. (2011). A thermoelectric generator using engine coolant for light-duty internal combustion engine-powered vehicles. *Journal of Electronic Materials*, 40(5), 2011. doi: 10.1007/s11664-011-1580-6.
- Lee, H.S. (2010), *Thermal Design Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells*. John Wiley & Sons, Inc.
- Liang, X., Sun, X., Tian, H., Shu, G., Wang Y. ve Wang X. (2014). Comparison and parameter optimization of a two-stage thermoelectric generator using high temperature exhaust of internal combustion engine. *Applied Energy* 130, 190–199.
- Liu, C., Pan, X., Zheng, X., Yan, Y. ve Li, W. (2016). An experimental study of a novel prototype for two-stage thermoelectric generator from vehicle exhaust. *Journal of the Energy Institute* 89, 271-281.

- Oelkers, E.H. ve Cole, D.R. (2008). Carbon dioxide sequestration a solution to a global problem. *Elements* 4(5), 305-310.
- Orr, B., Akbarzadeh, A. ve Lappas P. (2017). An exhaust heat recovery system utilizing thermoelectric generators and heat pipes. *Applied Thermal Engineering* 126, 1185-1190.
- Pandiyarajan, V., Chinna Pandian, M., Malan, E., Velraj, R. ve Seeniraj, R.V. (2011). Experimental investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage system. *Applied Energy* 88, 77-87.
- Prasad, S.D. ve Parameshwari, N. (2012). A feasibility study on waste heat recovery in an IC engine using electro turbo generation. Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering, *YMCA University of Science & Technology*, Faridabad, Haryana. Retrieved January 17, 2019, from <http://ymcaust.ac.in/tame2012/cd/thermal/T-10.pdf>.
- Rajoo, S., Romagnoli, A., Martinez-Botas, R., Pesiridis, A., Copeland, C. ve Bin Mamat, A.M.I. (2014). Automotive exhaust power and waste heat recovery technologies. doi: 10.13140/2.1.4809.0565.
- Rissman, J. ve Kennan, H. (2013). Advanced diesel internal combustion engines. *American Energy Innovation Council*. Retrieved December 11, 2018, from <http://americanenergyinnovation.org/wp-content/uploads/2013/03/Case-Diesel-Engines.pdf>.
- Ritchie, H. ve Roser, M. (2017). CO₂ and other greenhouse gas emissions. *Our World in Data*. Retrieved: April 16, 2019, from <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- Saribuğa, Y.E. (2019). Atık ısı geri kazanımı, *Elektrik port teknik kütüphane*. Erişim adresi: 21 Ocak, 2019, <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/atik-isi-geri-kazanimi/8796#ad-image-3>.
- Singh, B.K. ve Shrivastava, N. (2014). Exhaust gas heat recovery for c.i engine-a review. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 2277-9655.
- Solomon, S., Kasper Plattner, G., Knutti, R. ve Friandlingstein, P. (2009). Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 106 (6), 1704-1709.
- Su, C.Q., Wang, W.S., Liu, X. ve Deng, Y.D. (2014). Simulation and experimental study on thermal optimization of the heat exchanger for automotive exhaust-based thermoelectric generators. *Case Studies in Thermal Engineering* 4, 85-91.
- Sürmen, A., Karamangil, M.İ. ve Arslan, R. (2004). *Motor Termodinamiği*. Alfa aktüel yayınları.

- Şahin, A.Z. ve Yılbaş, B.S. (2013). The thermoelement as thermoelectric power generator: Effect of leg geometry on the efficiency and power generation. *Energy Conversion and Management* 65, 26-32.
- Tang, Z.B., Deng, Y.D., Su, C.Q., Shuai, W.W. ve Xie, C.J. (2015). A research on thermoelectric generator's electrical performance under temperature mismatch conditions for automotive waste heat recovery system. *Case Studies in Thermal Engineering* 5, 143-150.
- Temiz Enerji Vakfı (2002). Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı (MEB) yayınları.
- Temizer, İ. (2014). *Termoelektrik jeneratörü kullanılan taşıtlarda egzoz gazlarından elektrik üretilmesi* (Doktora tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Tian, H., Sun, X., Jia, Q., Liang, X., Shu G. ve Wang, X. (2015). Comparison and parameter optimization of a segmented thermoelectric generator by using the high temperature exhaust of a diesel engine. *Energy* 84, 121-130.
- Weng, C. C., Lin, M. C. ve Huang, M. J. (2016). A waste cold recovery from the exhausted cryogenic nitrogen by using thermoelectric power generator. *Energy* 103, 385-396.
- Wojciechowski, K., Merkisz, J., Fuc, P., Lijewski, P. ve Schmidt, M. (2007), Study of recovery of waste heat from the exhaust of automotive engine. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/242420423_Study_of_Recovery_of_Waste_Heat_From_the_Exhaust_of_Automotive_Engine.
- Woodyard, D. (2004), Chapter Three - Exhaust Emissions and Control. *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines (Ninth Edition)*, 61-86.
- Yaşar, H. (Ed.), Büyükkaya, E., Soykan, H.S., Tamyaz, İ., (Ed. Yrd.) (2016). *İçten Yanmalı Motorlar Mühendislik Temelleri*. İzmir: Güven kitabevi.

ÖZGEÇMİŞ

Gülden BOLATLI, 08/11/1991'de Adana'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Adana'da tamamladı. 2009 yılında Yüreğir Lisesi'nden mezun oldu. 2010 yılında başladığı Karabük Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nü 2014 yılında tamamladı. 2014 yılında Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Profen İletişim Teknolojileri şirketinde AR-GE mühendisi olarak görev yapmaktadır.