

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TERMOELEKTRİK ÜRETEÇ SİSTEMİ İLE ATIK EGZOZ
GAZINDAN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ**

MESUT KAYA

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

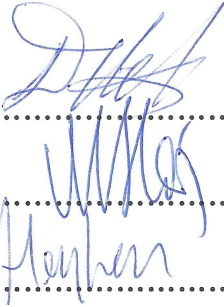
TERMOELEKTRİK ÜRETEÇ SİSTEMİ İLE ATIK EGZOZ
GAZINDAN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ

MESUT KAYA

Yrd. Doç. Dr. Dilek Özlem ESEN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Murat HOŞÖZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi


.....
.....
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 02.03.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İçten yanmalı motorla çalışan araçların yaygın kullanımı ile birlikte, çevreye atılan egzoz gazının miktarında da artış gözlenmektedir. Egzoz gazındaki bu artışa paralel olarak çevreye atılan zararlı gaz ve partiküllerin oranı artmaktadır. Tüm bu etmenler, çevreye daha duyarlı ve daha az emisyon salınımı yapan sistemlerin geliştirilmesini zaruri hale getirmiştir. Sıfır emisyon ile çalışan elektrikli araçların üretimi gerçekleştirilmiş; şarj edilme sürelerinin fazla oluşu ve içten yanmalı motorlara oranla daha az menzile sahip olmaları gibi sebeplerle içten yanmalı motorlu araçlara alternatif olamamıştır. Bu durum, içten yanmalı motorla çalışan araçların nasıl daha verimli hale getirilmesi konusundaki çalışmalarını hızlandırmıştır.

Son yıllarda, yakıtın sahip olduğu enerjinin daha az kayıpla ve daha verimli bir şekilde güç enerjisine dönüştürülmesi yönünde önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Özellikle atık ısının atıldığı yer olan egzoz borusu üzerine monte edilecek termoelektrik üreteçler ile çevreye atılan atık ısıdan yararlanılabileceği düşünülmüştür. Bu sayede tüketilen yakıt miktarı azaltılacak ve içten yanmalı motor sistemi daha verimli hale getirilecektir.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca benden desteklerini esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Dilek Özlem Esen'e, malzeme ve bilgi desteğinde bulunan Otokar Otomotiv ve Savunma A.Ş. ARGE bölümü çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen sevgili anneme, babama, eşime ve tüm dostlarıma sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ocak - 2016

Mesut KAYA

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-----|
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR | i |
| İÇİNDEKİLER..... | ii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | iii |
| TABLolar DİZİNİ..... | iv |
| SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR..... | v |
| ÖZET | vi |
| ABSTRACT | vii |
| GİRİŞ | 1 |
| 1. GENEL BİLGİLER..... | 3 |
| 1.1. Termoelektrik Enerji | 7 |
| 1.1.1. Seeback etkisi | 7 |
| 1.1.2. Peltier etkisi..... | 9 |
| 1.1.3. Thomson etkisi | 10 |
| 1.2. Termoelektrik Yapılar | 10 |
| 1.3. Termoelektrik Enerjinin Otomotiv Sektöründe Kullanılması..... | 13 |
| 1.4. Termoelektrik Üreteçlerin Kullanımındaki Engeller | 16 |
| 2. MALZEME VE YÖNTEM | 18 |
| 3. BULGULAR VE TARTIŞMA | 23 |
| 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 32 |
| KAYNAKLAR..... | 36 |
| EKLER..... | 39 |
| KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER..... | 43 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 44 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 1.1. | Euro emisyon standartları | 3 |
| Şekil 1.2. | SCR sistemi..... | 4 |
| Şekil 1.3. | EGR sistemi | 5 |
| Şekil 1.4. | Motorda yakıttan elde edilen enerjinin dağılımı | 6 |
| Şekil 1.5. | Seeback voltajının ölçümü..... | 8 |
| Şekil 1.6. | Peltier etkisi devresi | 9 |
| Şekil 1.7. | P-N çifti ile ısı pompalanması..... | 11 |
| Şekil 1.8. | TEG yapısı | 12 |
| Şekil 1.9. | İçten yanmalı motorlarda yakıt enerji dağılımı..... | 14 |
| Şekil 1.10. | Önemli termoelektrik malzemelerin performans katsayısının sıcaklığa göre değişimi | 17 |
| Şekil 2.1. | Deney düzeneğinin genel görünüşü | 18 |
| Şekil 2.2. | TEG'lerin egzoz borusuna dizilişleri | 19 |
| Şekil 2.3. | Deney düzeneğinin genel yapısı | 20 |
| Şekil 2.4. | TEC1-12706 genel görünüşü | 21 |
| Şekil 3.1. | Soğutucu akışkan, T_h , T_c ve ΔT_J sıcaklık-zaman grafiği..... | 24 |
| Şekil 3.2. | TEG sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile sistemde elde edilen güç arasındaki ilişki | 25 |
| Şekil 3.3. | Birinci data logger tarafından elde edilen sıcaklık verilerin minimum, maksimum ve ortalama değerleri | 26 |
| Şekil 3.4. | Akım-voltaj değişim grafiği..... | 28 |
| Şekil 3.5. | Güç-voltaj değişim grafiği (akım sabit) | 28 |
| Şekil 3.6. | Güç-akım değişim grafiği (voltaj sabit) | 29 |
| Şekil 3.7. | Radyatörde suyun soğutulması için gerekli olan enerji miktarı ve suyun giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın değişimi | 30 |
| Şekil 4.1. | Sistemden üretilen güç & verim grafiği | 34 |
| Şekil 4.2. | Sisteme gerekli olan soğutma yükü & verim grafiği..... | 34 |

TABLULAR DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Tablo 1.1. TEG sistemleri kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların özet tablosu | 16 |
| Tablo 2.1. Deney düzeneğinde kullanılan malzemeler | 20 |
| Tablo 2.2. TEC1-12706 özellikler tablosu | 21 |
| Tablo 3.1. Birinci data logger tarafından alınan sıcaklık değerleri | 24 |
| Tablo 3.2. Sistemde üretilen elektriksel değerler | 27 |
| Tablo 3.3. Soğutma suyunun soğutulması için gerekli olan ısı transferi miktarı | 30 |
| Tablo 3.4. Sistemden elde edilen verim (η) | 31 |



SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

| | |
|-----------------|--|
| c | : Özgül ısı, (kJ/kg°C) |
| I | : Akım, (A) |
| I_{ort} | : Ortalama akım, (A) |
| I_{sys} | : Sistemde oluşan amper değeri, (A) |
| K | : Isıl iletkenlik, (W/m °C) |
| \dot{m} | : Kütle, (kg) |
| P_{TEG} | : Termoelektrik üreteçler tarafından üretilen elektriksel güç, (W) |
| Q_P | : Peltier devresinde birim zamanda transfer edilen ısı miktarı, (W) |
| Q_T | : Thomson ısısı, (W) |
| \dot{Q}_{rad} | : Radyatörden ısının atılması için gerekli olan enerji miktarı, (kJ) |
| T | : Mutlak sıcaklık, (°C) |
| t | : Zaman, (sn) |
| V | : Voltaj, (V) |
| V_{ort} | : Ortalama voltaj, (V) |
| V_{TEG} | : Termoelektrik üreteçler tarafından üretilen voltaj değeri, (V) |
| ZT | : Performans katsayısı, birimsiz |
| α | : Seebeck katsayısı veya termo emk, (V/°C) |
| ΔT | : Sıcaklık farkı, (°C) |
| η | : Termoelektrik verim, birimsiz |
| τ | : Thomson katsayısı, (V/°C) |
| π | : Peltier sabiti, (V) |
| σ | : Elektriksel iletkenlik, ($\Omega^{-1} m^{-1}$) |

Kısaltmalar

| | |
|-----|--|
| AC | : Alternating Current (Alternatif Akım) |
| DC | : Direct Current (Doğru Akım) |
| EGR | : Exhaust Gas Resirculation (Egzoz Gazı Resirkülasyonu) |
| ICE | : Internal Combustion Engine (İçten Yanmalı Motor) |
| SCR | : Selective Catalytic Reduction (Seçici Katalitik İndirgeme) |
| TEG | : Thermoelectric Generator (Termoelektrik Üreteç) |

TERMoeLEKTRİK ÜRETEÇ SİSTEMİ İLE ATIK EGZOZ GAZINDAN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN DENEYSSEL İNCELENMESİ

ÖZET

İçten yanmalı motorlarda yakıt, daha verimli bir şekilde faydalı güce çevrilememektedir. Bu sebeple gerekenden daha fazla yakıt tüketimi olmaktadır. Bu durum artan araç sayısına paralel olarak konvansiyonel enerji kaynaklarının beklenenden daha kısa sürede biteceğini göstermektedir. Egzoz sistemi ile çevreye atılan atık ısının geri dönüşümü sayesinde, belirli miktarda yakıt tasarrufu elde edilmesi söz konusudur. Bu kapsamda egzoz borusuna monte edilen termoelektrik üreteçler yardımıyla atık ısıdan elektrik enerjisi elde edilmesine yönelik çalışmalara son zamanlarda yoğunlaşmıştır.

Bu tezde, egzoz borusunu simüle eden ve içerisinde 600 W'lık üç adet ısıtıcının bulunduğu sistemin yan ve üst yüzeylerine 9'ar sıra halinde, birbirine seri bağlı termoelektrik üreteçler yerleştirilmiştir. Birbirine seri bağlı 9'ar sıra halindeki bu üreteçlerin oluşturduğu sistemlerin de birbirine paralel bağlanması neticesinde oluşturulan kojenerasyon sisteminin üzerinde analiz ve gözlemler yapılmıştır. Bütün bu termoelektrik üreteçlerin sıcak yüzeyleri egzoz borusuna, soğuk yüzeyleri de soğutucu akışkanın geçtiği soğutma bloklarına temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, sistemde bulunan 9 Ah'lik akünün termoelektrik üreteçler tarafından ne kadar sürede şarj edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca sistemde termoelektrik üreteçler tarafından üretilen voltaj, akım ve enerji değerleri ile ilgili veriler toplanmış ve atık egzoz gazından elektrik üretiminin taşıtlarda ne derece uygulanabileceği konusunda tespitler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Egzoz Sistemi, Kojenerasyon, Peltier Etkisi, Termoelektrik, Termoelektrik Üreteç (TEG).

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PRODUCING ELECTRICAL ENERGY FROM THE WASTE HEAT OF EXHAUST GAS USING THERMOELECTRIC GENERATOR

ABSTRACT

Consumed fuel in internal combustion engines (ICE) is not converted efficiently during the operation process. Therefore, more fuel consumption is appeared while the burning process inside the ICE. This state indicates that conventional energy resources will finish in parallel with the increasing number of vehicles in a short time than expected. There is potential fuel saving with the recycling waste heat which is discharged to environment. Concordantly, studies on production of energy in exhaust pipe using the thermoelectric generator (TEG) is focused by automotive manufacturers recently.

In this thesis, a system to recover waste heat comprised 27 TEGs to convert heat from exhaust pipe of a vehicle to electrical energy has been constructed. An array with nine pieces of TEGs are stacked on each side of exhaust pipe simulation which has three 600 W heaters inside. An array of each side is connected in series and these serial TEG units are connected in parallel between each other. All hot junctions of TEGs are placed on heat source which is surface of exhaust pipe and cold junctions are placed on heat sink. During the experiment, voltage, current and electrical energy which are produced by peltier system is observed. On the other hand, required timing to charge the 9 Ah battery with the help of TEG system is recorded. In the result of this experiment is demonstrated that if the thermoelectric system operated by the heat of the exhaust gas could be feasible or not in the vehicles.

Keywords: Exhaust System, Cogeneration, Peltier Effect, Thermoelectric, Thermoelectric Generator (TEG).

GİRİŞ

Günümüzde içten yanmalı motorlu taşıtların yaygın kullanımı ile birlikte fosil yakıtlı enerji kaynaklarına olan talep artmıştır. Bu durum, beraberinde hava kirliliğine sebep olmakta, fosil yakıtların yıllar sonra talebe karşılık verememesi durumunu ortaya çıkarmaktadır. Enerji kaynaklarının artan dünya nüfusuna uzun yıllar yetebilmesi, ancak verimli olarak tüketilmesi ile mümkün olabilir. Bu sebeple bilim insanları gelişen teknolojiye paralel olarak çalışmalarını tükenbilir enerji kaynaklarının daha etkin ve daha verimli kullanımına imkan verecek araştırma ve geliştirme faaliyetlerine yöneltmiştir.

Özellikle, 2000'li yılların başlarında, çevre kirliliğinin artması ve küresel ısınmanın ortaya çıkmasıyla birlikte dikkatler yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarına çevrilmiştir. Buna bağlı olarak tükenbilir enerji kaynakların tekelden kurtulmak, doğaya atılan egzoz gazını azaltmak ve nihayetinde ortadan kaldırmak için, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttıracak projelerin geliştirilmesine öncelik verilmiştir. Elektrik ve güneş enerjisi ile çalışan konsept araçların üretimi gerçekleştirilmiş, ancak enerjinin depolanması sorunu, şarj sürelerinin uzunluğu ve tam dolu akü ile gidilebilecek mesafenin fosil yakıtla çalışan araçlara göre daha az olması gibi sebeplerle istenilen ticari başarı sağlanamamıştır.

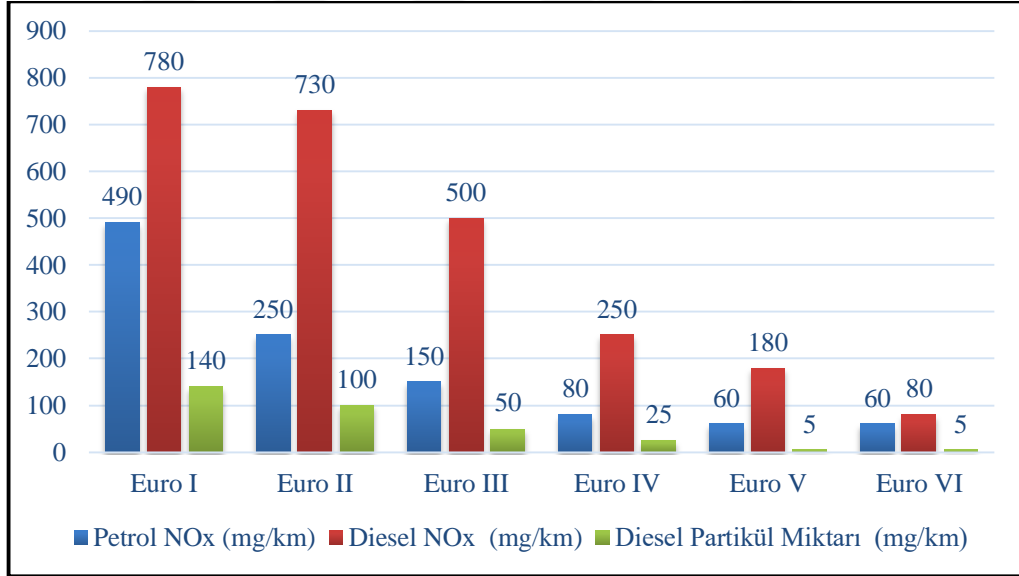
Alternatif yakıtla çalışan araçlarda istenilen ticari başarının elde edilememesi; bilim adamlarını içten yanmalı motorlu taşıtlarda kullanılan fosil yakıtların yanması sonucu elde edilen itici gücün nasıl daha verimli hale getirileceği konusundaki çalışmalara yöneltmiştir. Özellikle kayıpların nasıl daha az seviyeye indirilebileceği konusunda çalışmışlardır. Dünyanın önde gelen otomotiv üreticileri ise, bu çalışmaları ürettikleri araçlarda uygulamış, hem kullanıcının daha az maliyetle daha uzun mesafeli yol gitmesini, hem de fosil yakıt tüketimini mümkün olduğunca en asgari düzeyde tutarak tasarruf sağlanmasını gerçekleştirmişlerdir. Böylece, egzoz emisyon değerleri asgari seviyede tutularak zararlı gaz, toz ve parçacıkların çevreye salınımı kontrol altında tutulacak, çevreye daha az zarar verilecek ve enerji verimliliği sağlanmış olacaktır.

Ne yazık ki güç çevrimlerinde, ideal çevrimlerde olduğu gibi içten tersinir durum söz konusu değildir. Güç çevriminde sürtünme vardır, sıkıştırmanın ve genişlemenin olduğu hal değişimleri sanki dengeli olmayan hal değişimleridir. Sistemin elemanlarından ısı kayıpları olmaktadır. Bu sebeple itici gücün olduğu güç çevrimleri, ideal çevrime yakındır. Teknolojinin gelişmesiyle meydana gelen yenilikler her ne kadar kayıpların bir miktar azaltılmasını sağladıysa da, bu kayıpları sıfıra indirgenmesini sağlamak imkansızdır. Sistemin verimli halde çalışabilmesi, ancak itici gücün oluşması sırasında meydana gelen kayıpların tekrar sisteme kazandırılması ile mümkün olabilir. Bu doğrultuda, egzoz gazından çıkan atık ısının bir bölümü, egzoz bölgesine yerleştirilecek TEG'ler vasıtasıyla sisteme yararlı enerji olarak verilebilirliğinin incelenmesi, bu tezin yazılış amacını oluşturmaktadır.

Bu kapsamda oluşturulan deney düzeneğinde, atık ısının çevreye atıldığı egzoz sistemini simüle eden bir yapı üzerine yerleştirilen 9 adet seri bağlı TEG sistemi ve bu sistemlerin paralel bağlanmasıyla oluşan 3 adet paralel devrenin ürettiği elektrik enerjisi üzerinde analiz ve gözlemler yapılmıştır. Sistem içinde bulunan 9 Ah'lık akünün atık egzoz gazının ısısından yararlanılarak, TEG'ler vasıtasıyla ne kadar süre içinde şarj olacağı, bu sistemin çalıştırılması için ne kadarlık enerji ihtiyacının gerekli olacağı ve sistemin verimliliğinin hangi seviyelerde olacağı gibi sorulara cevap aranmaktadır. Daha basit bir ifadeyle, TEG sisteminin taşıtlarda uygulanabilirliğinin analizi, tezin konusunu oluşturmaktadır.

1. GENEL BİLGİLER

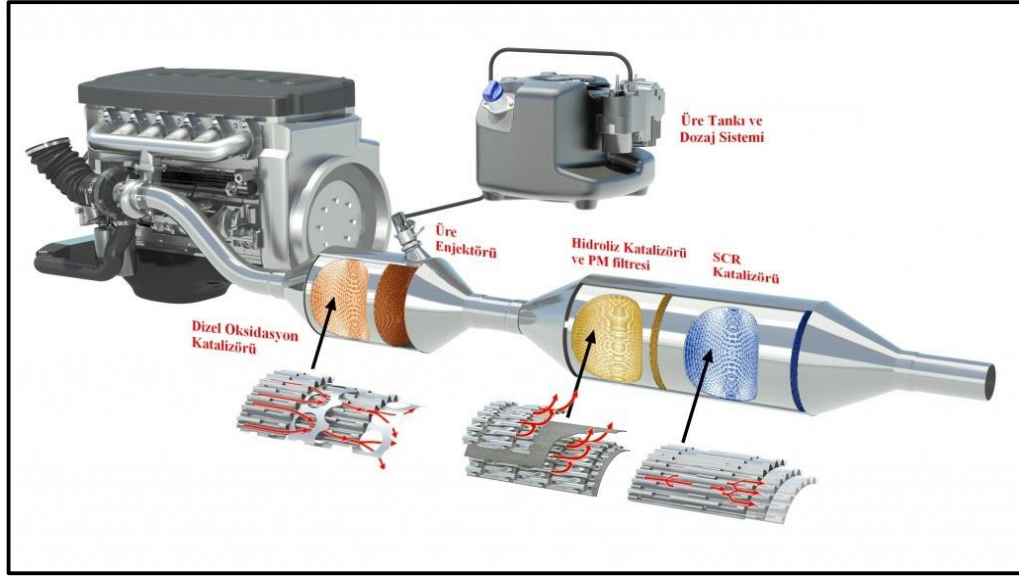
Atık egzoz gazlarından çıkan zararlı gazların ve partiküllerin, artan taşıt sayısına bağlı olarak kontrol edilmesi gerekliliği son yıllarda küresel anlamda önem kazanmıştır. Bu kapsamda, atık egzoz gazlarını belirli seviyede tutmaya yarayan, Avrupa Birliği üyesi ülkelerin ve Türkiye'nin de dahil olduğu "Euro Bölgesi Emisyon Standartları" uygulamaya geçirilmiş, egzozdan çıkan zararlı gaz, toz ve parçacıkların kademeli olarak belirli bir takvim dahilinde azaltılması sağlanmıştır. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi, Euro I'den şu anki seviye olan Euro VI'ya kadar geçen süreçte, zararlı egzoz gazlarının doğaya salınımı önemli ölçüde azaltılmıştır. Taşıtlarda kullanılan içten yanmalı motorlar ve egzoz sistemleri de, bu standartlara uygun hale getirilerek üretilmiştir.



Şekil 1.1. Euro emisyon standartları

İçten yanmalı motorlarda, Euro standartlarına göre egzoz gazının çevreye salınımını kontrol edebilmek için iki sistem kullanılmaktadır. İlki, SCR (Selective Catalytic Reduction-Seçici Katalitik İndirgeme) denilen ve katalitik konvertör kullanılarak egzoz gazının emisyon seviyesini düşüren sistem, diğeri ise EGR (Exhaust Gas Recirculation-Egzoz Gazı Resirkülasyonu) adı verilen ve yanma esnasında oluşan egzoz gazının tekrar kullanılması ile nitrojen oksit (NO_x) oluşumunu azaltan sistemdir.

SCR sistemi, egzoz gazı içerisinde bulunan nitrojen oksiti, doğada bulunan nitrojene (azot) ve suya dönüştürür. Bu dönüştürme işlemi, adblue (üre) olarak bilinen sıvının egzoz gazı üzerine püskürtülmesi suretiyle gerçekleşir. Sıcak egzoz gazı içinde adblue ayrılarak tepkime için gerekli olan amonyak gazını oluşturur. Amonyak gazı ile tepkimeye giren nitrojen oksit ayrılarak nitrojen ve suya dönüşür. Böylece zararlı gazlar, zararsız hale getirilerek egzoz sisteminden dışarı atılır. SCR teknolojisinin kullanımı ile birlikte, daha az zararlı gaz ve partiküller çevreye salınırken, yakıt sarfiyatı gerçekleşmektedir. SCR sistemi nadir bakım gerektirir, araç ömrü boyunca kullanılabilir, monte edildiği aracın bakım ve yağ değişirme aralıklarını etkilemez. Yüksek motor gücünde elverişli bir çözümdür. Alternatif sistemlerin aksine, motorun yağlama veya soğutma sisteminin takviye edilmesine gerek yoktur.



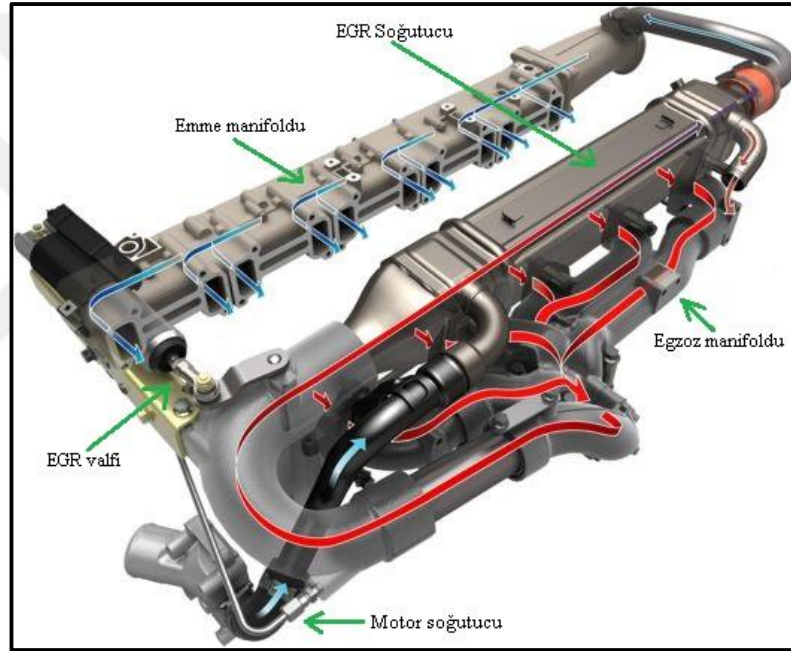
Şekil 1.2. SCR sistemi

SCR sistemi, Şekil 1.2’de görüldüğü gibi, adblue tankı, adblue dozaj pompası, püskürtme ünitesi ve SCR katalitik dönüştürücüdür. SCR ünitesi motor sistemine dahil olmayıp, sadece yanmış gazların çevreye daha az zarar verecek şekilde salınımında görevlidir.

Bir diğer emisyon azaltıcı çözüm olan EGR sistemi, motora giren taze havanın içerisine az yanmış egzoz gazının karışmasını sağlayarak, yanma odasında yanma sıcaklığını ve fazla oksijen miktarını azaltır. Bu sayede nitrojen oksitlerin meydana geldiği yüksek yanma ısılarını düşürerek NO_x emisyonunun azaltılması görevini yerine getirir.

EGR sistemi, farklı firmaların uygulamalarının değişiklik göstermesine karşın, Şekil 1.3'te gösterildiği gibi iki valf ve bir EGR soğutucusundan oluşur. Valfler, egzoz gazının EGR sistemine akışını kontrol eder. EGR soğutucusu da geri dönen egzoz gazının manifolda girmeden önce gerekli olan yanma sıcaklığına erişmesini sağlar. Böylece temiz hava içerisine karışan egzoz gazı yanma odası için yeterli sıcaklığa ulaşır ve yanma odasında daha az yanma ısısı ihtiyacı ortaya çıkar.

Sistemde yakıt ekonomisini etkilemeden egzoz gazının yalnızca %15'i dolaştırılabilmektedir. Daha fazla egzoz gazı verildiğinde oksijen azlığı nedeniyle yanma bozulmaktadır.

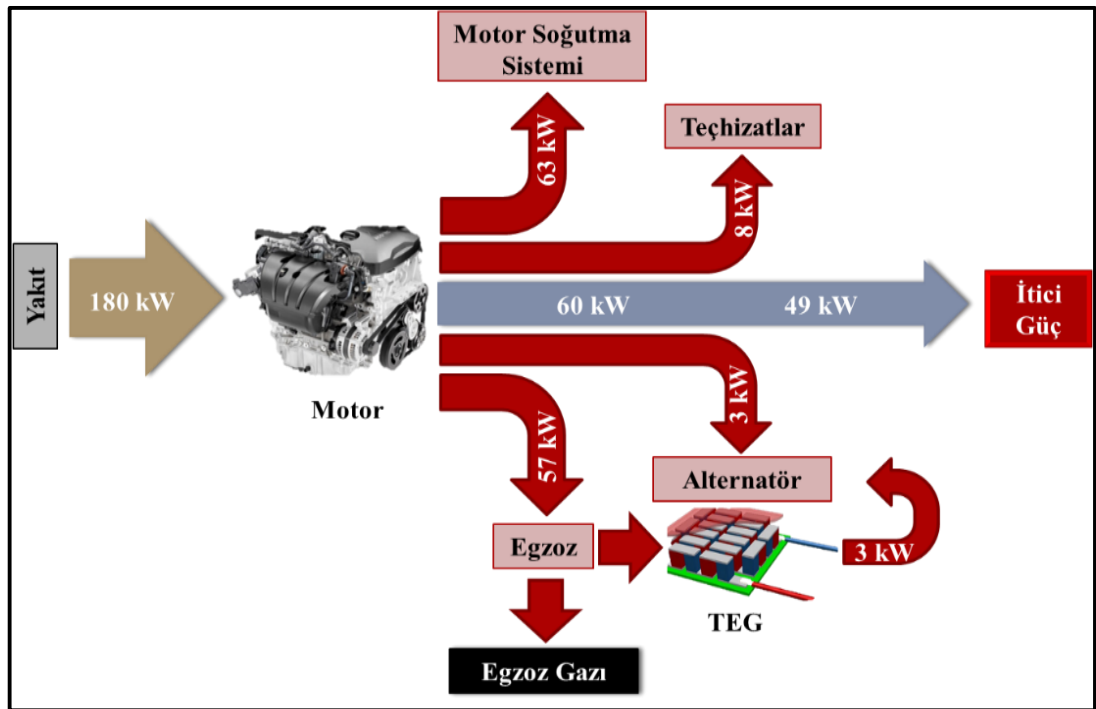


Bu sistemlerin dışında; fosil yakıtla çalışan taşıtlara elektrik motorunu adapte etmek suretiyle hibrit araç üretimi yapılmış, bu sayede fosil yakıtların tüketiminde bir miktar azalma sağlanmıştır. Yapılan tüm bu çalışmaların amacı, yakıt tüketimini azaltmak, doğaya salınan zararlı gazların salınımını asgari seviyeye indirmek ve yakıtın maksimum verimle kullanılabilir güce dönüşümünü sağlamaktır.

Yakıt tüketiminin azaltılması, çevreye atılan zararlı gaz ve partiküllerin asgari seviyeye indirilmesi için yapılan bu çalışmaların temelinde, termodinamik çevrimleri ideal çevrime yakın bir seviyeye getirmektir. Bu sayede verimliliğin arttığı, kayıpların da en az seviyeye indiği sistemleri geliştirmek amaçlanmaktadır. Bu

yaklaşımına göre ideal bir çevrime yakın olan sistemlerde, yakıttan alınan enerji ile çevrim sonucunda elde edilen itici güç arasındaki farkın çok az olması istenir. Bu farklılığı en az seviyeye indirmek için de, sistem içerisindeki kayıpların mümkün oldukça en az seviyeye indirilmesi gerekir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, yakıt tüketimi ile sistemden elde edilen itici güç arasındaki farkın en az olduğu durum tespit edilerek, sistemin verimliliğinin arttığı yeni çözümlerin ortaya çıkarılması yönündeki çalışmalara devam edilmektedir.

Termodinamik yasaları gereği, içten yanmalı bir motor hiçbir zaman mutlak verimliliğe ulaşamaz. Gerçek çevrimleri ele aldığımız zaman, yakıtın yanması sonucu oluşan enerji ve faydalı güç arasında oldukça büyük farklılıklar olduğunu görebiliriz. Yakıtın yanma sürecinin tamamlanabilmesi için belirli miktarda ısının atmosfere salınımı gerekmektedir. Otto çevrimiyle çalışan bir motorda; Şekil 1.4'te görüldüğü gibi, yaklaşık olarak %30'luk enerjiden itici güç olarak yararlandırıldığı, geriye kalan %70'lik enerjinin egzoz gazıyla dışarı atıldığı ya da aracın soğutma sistemlerinde harcandığı bilinmektedir [1,2]. Ne var ki, kullanılan enerji tamamen harekete dönüştürülmeden bir miktarı otomobilin çeşitli donanımlarını ve elektrikli sistemlerini çalıştırmak amacıyla alternatör için ayrılmaktadır. Tüm bunlar dikkate alındığında, kaybedilen enerjinin geri kazanılmasının büyük önem taşıdığı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 1.4. Motorda yakıttan elde edilen enerjinin dağılımı

Çevreye atılan zararlı egzoz gazını tekrar sisteme kazandırmaya yarayan ve teze konu olan sistemin çalışmasında önemli rol oynayan TEG'lerin yapısını daha iyi anlamak için, termoelektrik kavramını ve termoelektrik etkileri bilmek gerekmektedir.

1.1. Termoelektrik Enerji

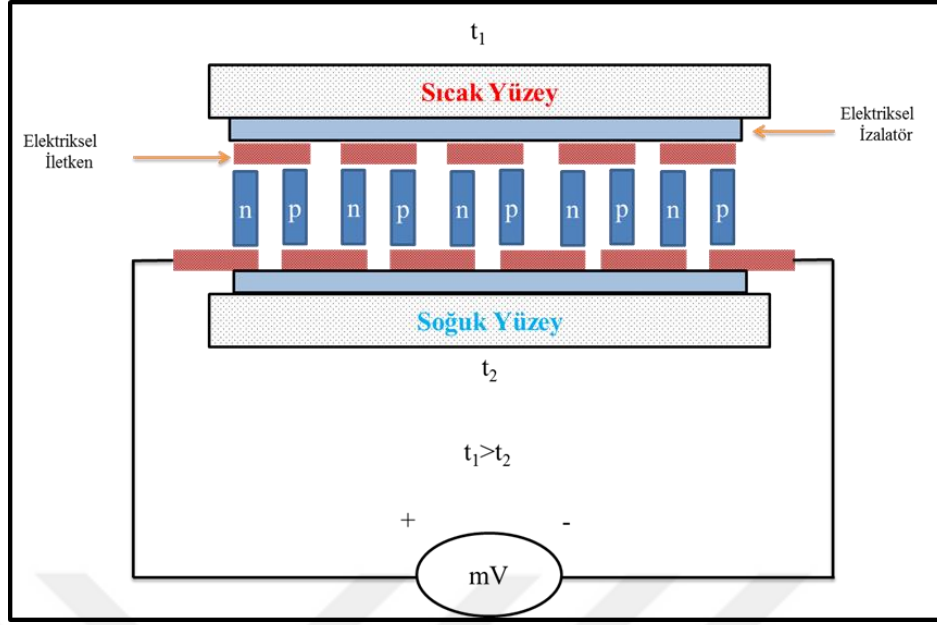
Termoelektrik, maddelerin sıcaklıklarına bağlı olarak malzemeler üzerinde oluşan elektriksel potansiyelini inceleyen bilim dalıdır. Bu bilim dalı, 19. yüzyıl ortalarından beri biliniyor olmasına rağmen yeterince işlevsel bir kullanım alanı bulamamıştır.

1821 yılında Thomas Johann Seeback, farklı sıcaklıktaki iki yarı iletken malzemenin birbirine seri bağlanması durumunda, ısı sıcaklığının farkından dolayı elektrik enerjisi ürettiğini gözlemlemiştir. Bundan on üç sene sonra da, 1834 yılında Jean Charles Athanase Peltier, iki farklı yarı iletken malzeme üzerinden DC akım geçirilmesiyle, akımın hareket ettiği yönde ısı hareketinin oluştuğunu gözlemlemiştir. 1856 yılında da William Thomson, Peltier ve Seeback tarafından birbirinden habersiz yapılan bu iki çalışmayı, kendi deneysel bilgilerini de dahil ederek tekrar yorumlamıştır. Her üç bilim adamının da termoelektrik üzerine yaptığı çalışmalar, kendi isimleri ile anılan termoelektrik etkiler ile anılmaktadır.

Enerjinin büyük çoğunlukla fosil yakıtlardan karşılandığı günümüzde, doğaya ve çevreye az zarar veren ve yenilebilir olan enerjilerin bulunması konusunda yapılan çalışmalara paralel olarak termoelektrik enerjide de önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Bugün, termoelektrik enerji uçak sanayisinden uzay teknolojilerine, bilgisayar ve bilişim sektöründen otomotiv sektörüne, silah ve savunma sanayisinden sağlık sektörüne kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır.

1.1.1. Seeback etkisi

İletken bir çubuğun iki ucuna sıcaklık farkı uygulandığı zaman soğuk ve sıcak tarafları arasında elektrik akımı meydana gelmesi olayıdır. İki farklı yarı iletken malzemenin (P-N çifti) birbirine seri olarak birleştirilmesiyle oluşturulan devrede (peltier modül), yüzeylere farklı sıcaklıklar uygulanmak suretiyle bir elektrik gerilimi elde edilir. Bu gerilim "Seebeck voltajı" olarak da isimlendirilir. Devreden ölçülen gerilim, malzemelerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılıdır.



Şekil 1.5. Seeback voltajının ölçümü

Şekil 1.5’de iki farklı yarı iletken malzemeden oluşturulan devrede ölçülen voltaj;

$$V = \alpha \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (1.2)$$

eşitlikleri yardımıyla bulunur. Bu eşitlikte;

V : Devreden ölçülen voltaj (V),

ΔT : Yarı iletken malzemelerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ($^{\circ}\text{C}$),

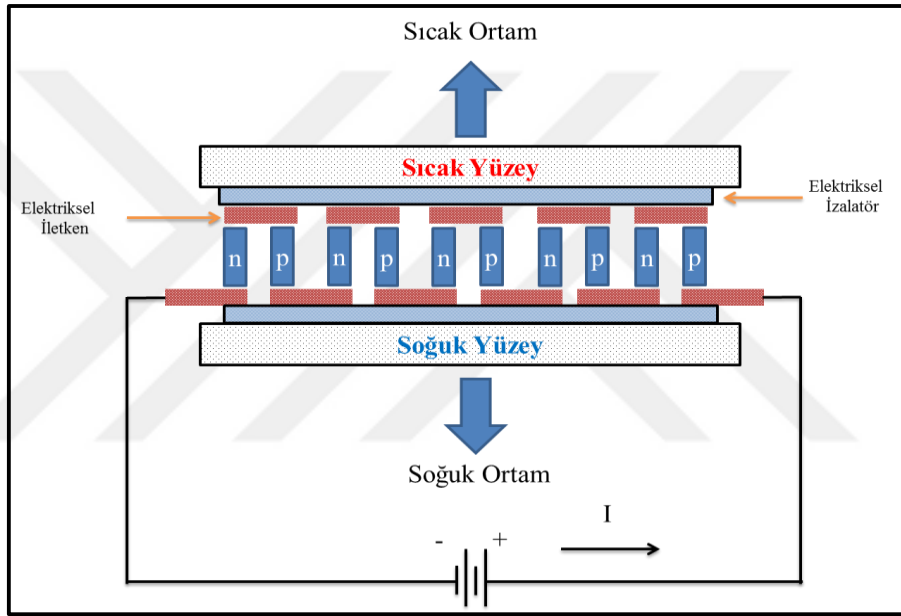
α : Seebeck katsayısı veya termo emk ($\text{V}/^{\circ}\text{C}$)’dir.

Bu eşitlikteki α değeri, termoelektrik gerilime maruz kalan malzemenin, oluşan sıcaklık farkına verdiği tepkinin büyüklüğüdür. Seebeck katsayısı, her malzeme için özel bir değere sahiptir. Malzeme özelliğidir ve her malzemenin farklı bir seebeck katsayısı vardır. Verimli bir termoelektrik etki yaratmak için seebeck katsayısı mümkün olduğunca büyük olmalıdır.

N tipi yarı iletken için α değeri negatif, P tipi yarı iletken için α değeri ise pozitiftir. Meydana gelen seebeck etkisi yarı iletkenlerde jeneratör gibi, metallerde ise termokupl veya ısı sensörü gibi kullanılır [3].

1.1.2. Peltier etkisi

Bir iletkenen elektrik enerjisi geçirildiğinde iki uç arasında sıcaklık farkı meydana gelmesi prensibine dayanır. Peltier etkisinden meydana gelen ısınma ya da soğuma olayını gözlemleyebilmek için iki farklı metalden meydana gelen bir modül kullanılması gerekmektedir. Bu devre üzerinden doğru akım geçtiğinde, joule ısısı ile birlikte birleşme noktasından ısı emilirken, diğer birleşme noktasından Şekil 1.6’da görüldüğü gibi ısı açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan ısı miktarı, devreden geçirilen akımla doğru orantılıdır.



Şekil 1.6. Peltier etkisi devresi

Peltier etkisi Formül (1.3), Formül (1.4) ve Formül (1.5) deki gibi;

$$Q_p = \pi \cdot I \quad (1.3)$$

$$\pi = \alpha \cdot T \quad (1.4)$$

$$Q_p = \alpha \cdot T \cdot I \quad (1.5)$$

bulunmaktadır. Bu eşitlikte;

Q_p : Birim zamanda transfer edilen ısı miktarı (W),

I : Devre üzerinden geçen doğru akım (A),

π : Peltier sabiti (V),

α : Seebeck katsayısı veya termo emk (V/°C)'dir.

Dışarıdan verilen elektriksel güç arttırılırsa, elektronların sistem içerisinde hareket etmeleri de artacak, bu sayede soğuk yüzey ile sıcak yüzey arasındaki ısı transferi miktarı da artacaktır.

1.1.3. Thomson etkisi

Bir iletkenin iki ucunun farklı sıcaklıklarda tutuluyor olduğu durumda uygulanan akımın yönüne bağlı olarak enerjinin iletken üzerinde soğrulması ya da birikmesi olayıdır. Diğer bir ifadeyle, Thomson etkisi, ısıtmada ya da soğutmada homojen bir iletken üzerinden akım geçtiği sürece sıcaklık gradyeninin meydana geldiğini ifade eder. Thomson ısısı akım şiddeti, sıcaklık farkı ve zamanla doğru orantılıdır ve kullanılan metallerin cinsine bağlıdır. Ortaya çıkan Thomson ısısı Formül (1.6) daki gibi;

$$Q_T = \tau \cdot \Delta T \cdot I \quad (1.6)$$

bulunmaktadır. Bu eşitlikte;

Q_T : Thomson ısısı (W),

I : İletken üzerinden geçen akım şiddeti (A),

ΔT : İletkenin uçları arasındaki sıcaklık farkı (°C),

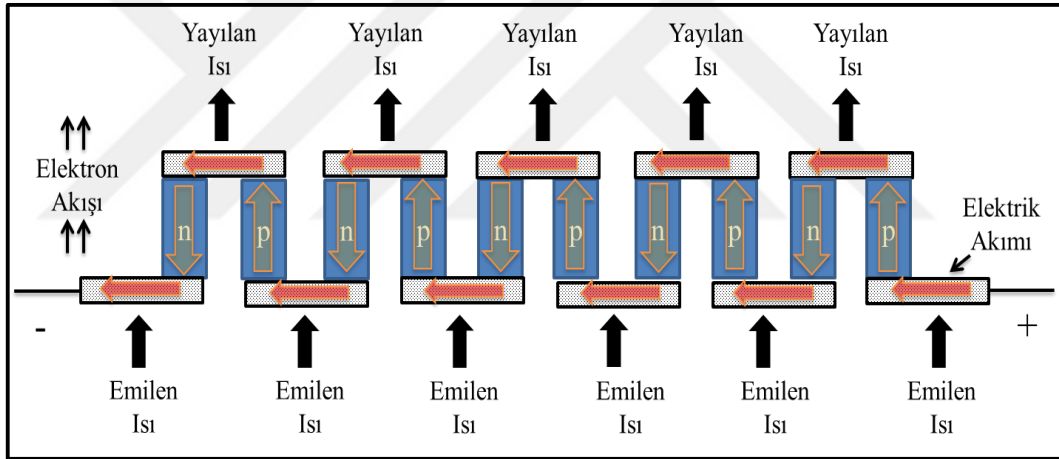
τ : Thomson katsayısı (V/°C)'dir.

1.2. Termoelektrik Yapılar

Termoelektrik yapılar, TEG'ler ve termoelektrik soğutucular olmak üzere iki başlık altında toplanabilir. TEG'ler ve termoelektrik soğutucular, termodinamik kanunlara bağlı olarak doğrudan enerji dönüşümlerini gerçekleştiren yapılardır. TEG'ler ısı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Termoelektrik soğutucular, ısının soğuk bölgeden sıcak bölgeye elektrik enerjisini kullanarak taşınmasını sağlayan ısı pompalarıdır. Buna ek olarak termoelektrik soğutucularda soğuk bölgeden sıcak

bölgeye ısı transferinin gerçekleşebilmesi için dışarıdan bir iş uygulanması gerekmektedir. TEG’lerde ise elektrik üretiminin sağlanabilmesi için yüzeyler arasında sıcaklık farkının olması yeterlidir. TEG’lerde ve termoelektrik soğutucularda yarı iletken malzemeler kullanılmakta ve kullanılan N ve P tipi yarı iletkenlerin ısı transferinde gösterdiği tepkiler değişiklik göstermektedir.

Termoelektrik modül, elektriksel izolatör yüzeyler üzerine oturtulmuş N ve P tipi yarı iletken malzemelerin seri bağlanması ile oluşturulmuştur. N tipi yarı iletken malzeme bir elektron fazlalığına sahip malzemelerdir. Isı, serbest olan elektronlar sayesinde taşınır. P tipi malzeme ise elektron eksikliği olan malzemedir. Isı, boşluklar yardımıyla taşınır. N ve P tipi bu iki yarı iletkenin birbirine iletken bir malzeme ile bağlanmasıyla tek bir hücre oluşturulmuş olur. Şekil 1.7’de görüldüğü gibi, elektrik akımı yukarı aşağı bağlantı yönünü izlerken, ısı akım yönü sürekli yukarı yöndedir [4].



Şekil 1.7. P-N çifti ile ısı pompalanması

Bir termoelektrik modülün soğutma performansı, performans katsayısı ile değerlendirilir. Performans katsayısının değeri boyutsuz bir değer olup, termoelektrik malzemenin sıcaklık farkı vasıtasıyla elektrik enerjisini dönüştürmedeki verimini ifade eder. Bu değer, TEG’lerin performansında önemli bir etkidir. Malzeme faktörü olarak da ifade edilen bu parametrenin zamana göre değişen boyutsuz soğutma performans değeri, Formül (1.7) deki gibi;

$$ZT = a^2 \sigma T / K \quad (1.7)$$

bulunmaktadır. Bu eşitlikteki semboller ve açıklamaları şunlardır:

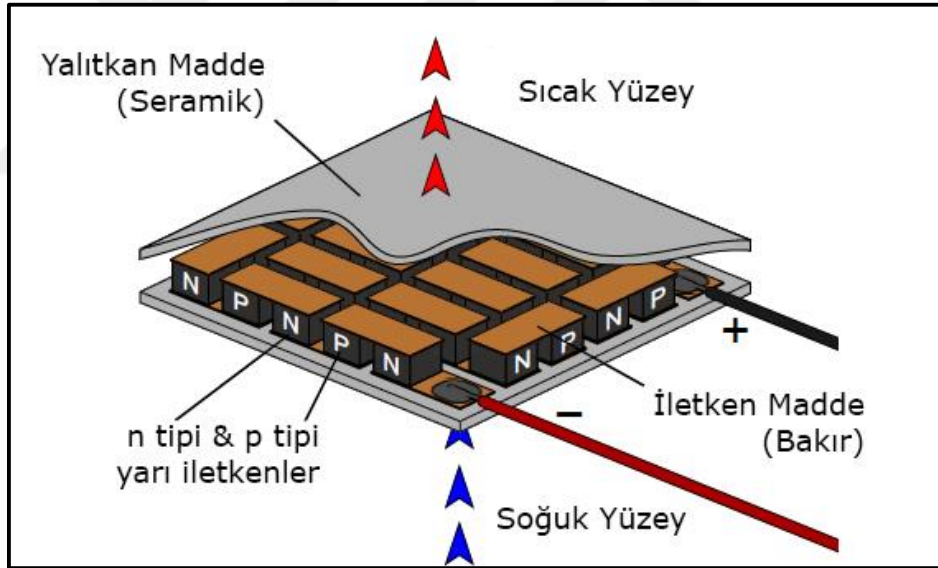
α : Seebeck katsayısı veya termo emk (V/°C),

σ : Elektriksel iletkenlik ($\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$),

T : Mutlak sıcaklık (°C),

K: Isıl iletkenlik (W/m °C).

Bir termoelektrik soğutucudan en yüksek seviyede verim elde edebilmek için, performans katsayısının değerini olabildiğince yüksek tutmak gerekmektedir [5]. Bu da elektriksel direnci yüksek, diğer bir ifadeyle elektriksel iletkenliği düşük; Seebeck katsayısı yüksek, termal iletkenliği düşük malzemeler kullanılmasını gerekli kılar. Karri ve arkadaşları, gelecekte termoelektrik malzemelerin performans katsayılarının yüksek düzeylerde olmasının beklendiğini çalışmalarında belirtmişlerdir. Bu sayede yüksek verimlilik ve güç yoğunluğu elde edilebilecektir [6].



Şekil 1.8. TEG yapısı

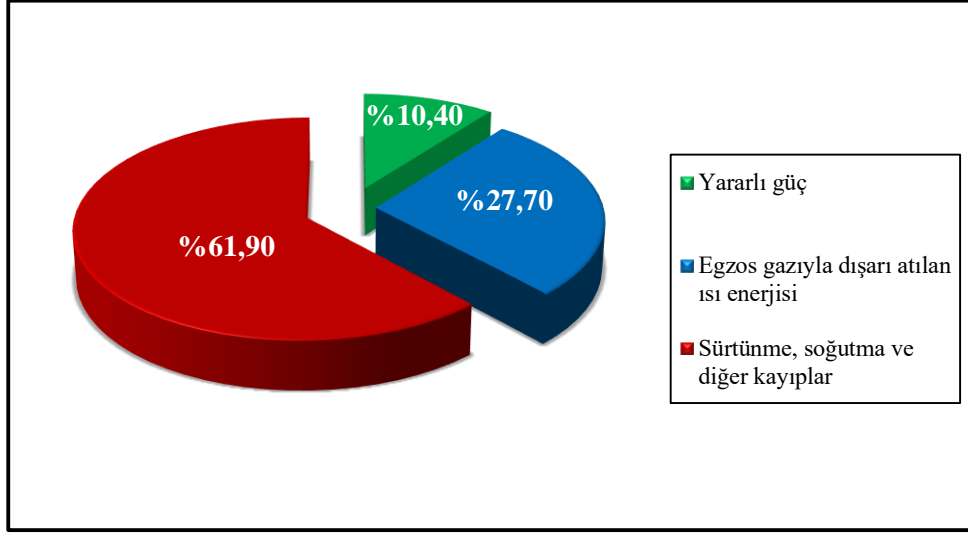
Termoelektrik modüller, çift taraflı çalışabilen aygıtlardır. Diğer bir ifadeyle, eğer modül doğru akım kaynağı ile beslenirse modülün sıcak yüzeyinden soğuk yüzeyine doğru bir ısı transferi olacaktır. Bunun tersine eğer modülün bir yüzeyi ısıya maruz kalırken diğer yüzeyi soğuk tutulabilirse, yani her iki yüzey arası sıcaklık farkı oluşturulursa, Seebeck etkisi olarak açıkladığımız etkiyi meydana getirerek devrede voltaj üretecektir. Yani modül, iki farklı modda çalışabilmektedir [7]. Şekil 1.7'de TEG yapısı gösterilmektedir.

1.3. Termoelektrik Enerjinin Otomotiv Sektöründe Kullanılması

Isı enerjisi ile elektrik enerjisinin birbirine doğrudan dönüşümünü tanımlayan termoelektriğin gelişimi, özellikle otomotivde kullanılan teknolojinin gelişimine paralel olarak son yıllarda hızlanmıştır. Bu teknolojik gelişime bağlı olarak, otomotiv üreticileri mevcut içten yanmalı motorla çalışan konvansiyonel araçların daha verimli hale getirilmesi için termoelektrik sistemlerinin kullanıldığı bileşenlerin geliştirilmesine ağırlık vermişlerdir. Son yıllarda, özellikle yakıtın sahip olduğu enerjinin az kayıpla ve daha verimli bir şekilde güç enerjisine dönüştürülmesi yönündeki çalışmalara devam edilmektedir. Bu sayede yakıttan elde edilecek yararlı güç arttırılacak, daha az karbon emisyonu ile çevreye verilen zarar en az seviyeye indirilecek, araçlardan elde edilen verim arttırılacaktır.

Taşıtlarda, TEG sistemlerinin kullanılmasına elverişli olan iki ana atık ısı kaynağı bulunmaktadır. Bunlardan biri radyatör sistemi, diğeri de egzoz sistemidir. Radyatör sistemi; motorun aşırı ısınmasını engelleyerek motoru maksimum verimin sağlandığı sıcaklıkta tutmayı sağlar. Egzoz sistemi ise; motorda yanma sonucu oluşan atık gazların dışarı atılmasında görevlidir. Hem egzoz sistemi, hem de radyatör sistemi için, dışarı atılan ısıdan yararlanıldığı durumda, tüketilen yakıt miktarı azalacak, içten yanmalı motorun ürettiği güç artacak ve böylece sistem daha verimli hale gelecektir. Bu bölgelere ilave edilecek TEG'ler vasıtasıyla atık ısıdan elde edilecek enerji kazanımı sayesinde yakıt tasarrufu sağlanacak ve çevreye bırakılan karbon salınım miktarı daha az seviyeye indirgenecektir.

Otomotivde termoelektrik enerjinin en önemli kaynağı olan atık ısının küçümsenmeyecek miktarda olması, atık ısıdan tekrar yararlanılması konusunda çalışmaların ne kadar gerekli olduğunu göstermektedir. Şekil 1.9'da gösterildiği gibi, yakıt enerjisinin %10,4'ünün yararlı güç olarak, %27,7'lik enerjinin egzoz gazı vasıtasıyla çevreye bırakıldığı Conklin ve Szybist'in yaptıkları deneysel çalışmalarında tespit edilmiştir [8]. Bu değerlendirmeler ışığında, yakıtın yanması sonucu açığa çıkan enerjinin itici güce dönüşmesi sırasında çevreye atılan atık ısı enerjisinin tekrar sisteme yararlı güç olarak kazandırılması yönündeki çalışmalara hız verilmiştir.



Şekil 1.9. İçten yanmalı motorlarda yakıt enerji dağılımı

Otomotiv sektöründe atık ısının yeniden değerlendirilmesi konusunda TEG'ler, geleceğin en önemli ve en göze çarpan buluşu olmuştur. Mori ve arkadaşları otomobillerde yakıt tüketimini ekonomik hale getirmek için benzinle çalışan bir otomobile TEG sistemini uygulayarak ileride potansiyel TEG kullanımının önünü açmıştır [9]. 1988 yılında, Birkholz ve diğerleri [10] TEG uygulamasını otomobilde denemişlerdir. Bu araştırmada, tek bir TEG ünite ile 1 W elektrik üretimini başarmışlardır. Hussain ve diğerleri [11] hibrit araçlarda termoelektrik uygulamanın etkilerini araştırmışlardır. Stobart ve Milner [12] termoelektrik kaynak kullanarak 1,3 kW elektrik enerjisi üretmeyi başarmışlar, bu uygulamanın binek araçta alternatörler yerine kullanılabileceğini deneysel olarak kanıtlanmışlardır. Matsubara [13,14] kullandığı iki farklı materyal ile yeni bir TEG geliştirmiş ve bunu 2 litrelik motora sahip binek aracın egzoz borusuna yerleştirerek, sıcak ve soğuk yüzeyler arasında 475°C sıcaklık farkı altında 266 W güç üretmeyi başarmıştır. Trottmann ve diğerleri [15] çalışmalarında, atık ısıyı değerlendirmek için egzoz borusu üzerine monte edilmiş TEG sistemini bir araçta test etmiş ve %5 oranında yakıt tasarrufu sağladığını belirtmiştir. Bass ve diğerleri [16-20] 72 TEG'den oluşan sistemi dizel motorla çalışan kamyonu uygulayarak %4,5 enerji verimliliğine ulaşmışlardır. Wojciechowski ve diğerleri [21] çalışmalarında; otomatik ateşlemeli 1300 cc dizel motor egzozu üzerinde yaptığı ölçümlerde, TEG'den 750 W güç elde ettiğini ve alternatörle karşılaştırılabilir düzeyde olduğunu belirtmiştir. Yine başka bir deneyde, Thacher ve diğerleri [22] bir araca yerleştirdikleri TEG yardımıyla aracın %4 ile %5,3 arasında yakıt ekonomisi sağladığını tespit etmişlerdir.

Crane ve diğeri [23] yolcu taşımacılığı yapılan bir araçta TEG sistemini kullanarak yaptıkları deneyde 700 W güç elde etmişlerdir. Yang [24] ise TEG sistemini monte ettiği yük tırından 1 kW'lık elektrik enerjisi üreterek, alternatör sistemi yerine bu sistemi kullanmayı başarmıştır.

TEG sistemlerinin egzoz borusu üzerinde yapılmasının avantajları, radyatör sistemi üzerinde yapılmasından daha fazladır. Çünkü motordan çıkan atık gazların sahip olduğu iç enerji, radyatör sisteminde dolaşan akışkanın sahip olduğu iç enerjiden daha fazladır. Zhang ve Chau [25] çalışmalarında TEG sistemlerinin egzoz borusuna (egzoz manifolduna) kurulmasının daha basit olduğunu ve motorun çalışmasını en az seviyede etkilediğini belirtmişlerdir. Uygulamalarda TEG sistemlerinin adapte edildiği ısı değiştiricilerinin yüksek sıcaklık rejimi nedeniyle egzoz manifoldu bölgesine kurulduğu bilinmektedir [24].

Atık egzoz gazından TEG'ler vasıtasıyla yüksek düzeyde verim elde edebilmenin bir diğer önemli noktası da ısı değiştiricisinin geometrisidir. M. Hatami, D. D. Ganji ve M. Gorji-Bandpy [26] çalışmalarında ısı değiştiricilerdeki ısı transferlerini analiz etmişlerdir. Aynı çalışmada katmanlı yapı kullanımının ısı transferini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Diğer taraftan, bu çalışmayla ısı değiştiricinin tek girişli ve iki çıkışlı olarak dizayn edilmesiyle yüksek verimlilikte bir TEG sistemi kurulabileceği saptanmıştır. X. Liu ve diğeri [27] de çalışmalarını yine aynı konu üzerinde yapmıştır. TEG'lere temas eden yüzeyin alanını arttırarak üretilen ısının daha etkin şekilde transferini sağlamayı başarmışlardır. Shengqiang Bai ve diğeri [28] çalışmalarında altı farklı geometrideki ısı değiştiricisini hem bilgisayar ortamında, hem de deneysel ortamda test ederek en etkin ısı transferi yönteminin gerçekleştirilebildiği ve en yüksek verimin sağlanabildiği TEG sistemini tespit etmişlerdir. Buna göre yedi katmanlı ısı değiştiricisi dizaynı ile 1737 W ısı transferi gerçekleştirmişlerdir. X. Liu ve diğeri [29] bir diğer çalışmalarında ise daha önceden geliştirdikleri TEG sistemini prototip bir araca monte ederek 944 W güç elde etmişlerdir.

Ticari olarak TEG sistemi ile desteklenen araçların üretilmesine 2000'li yılların başında başlanmıştır. Otomotiv üreticileri, genellikle TEG sistemini araçların manifold bölgesine adapte etmek suretiyle TEG sistemlerini uygulamaya

koymuşlardır. 1998 yılında, Nissan ilk termoelektrik uygulamasını araçlarında kullanmıştır [30]. Bell Solid State (BSST) firması da BMW ve Ford gibi dünyanın önde gelen otomotiv üreticileri için atık egzoz gazının yeniden kullanımı ile ilgili olarak 2004-2011 yılları arasında projeler geliştirmiştir [31].

Yukarıdaki araştırmalarda anlatıldığı gibi birçok araştırmacı, TEG sistemi kullanarak yaptıkları çalışmalarında daha az yakıt tüketerek daha verimli sistemler üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalar dışında, Tablo 1.1’de özet halinde ve karşılaştırmalı olarak sunulan tabloda da yapılan diğer çalışmalar karşılaştırmalı olarak yer almaktadır.

Tablo 1.1. TEG sistemleri kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların özet tablosu

| Referans | Yıl | Deneyin yapıldığı motor | Test Şartları | TEG Güç Çıkaşı (W) | Sistem Verimi (%) | TEG Verimi (%) |
|-----------------------------|------|---|-------------------------------|--------------------|-------------------|----------------|
| Takanose and Takamoshi [32] | 1993 | Dizel 2 L motor | 50-65 km/h hızla eğimli yolda | 193 W | 2,3 | - |
| Ikoma et al. [33] | 1999 | Dizel 2-3 L motor | 60 km/h hızla 3-5% eğimde | 130 W | 1,1 | 2,9 |
| Thacher et al. [22] | 2007 | 1999 GMC Sierra pick-up kamyon 5,8 L V8 dizel motor | 112,6 km/h hızla düz yolda | 177 W | - | 1,7 |
| Schlichting et al. [34] | 2008 | 1995 Kawasaki Ninja motorsiklet 250R 2-cyl 248 cc | 96,6 km/h hızla düz yolda | 0,47 W | - | - |

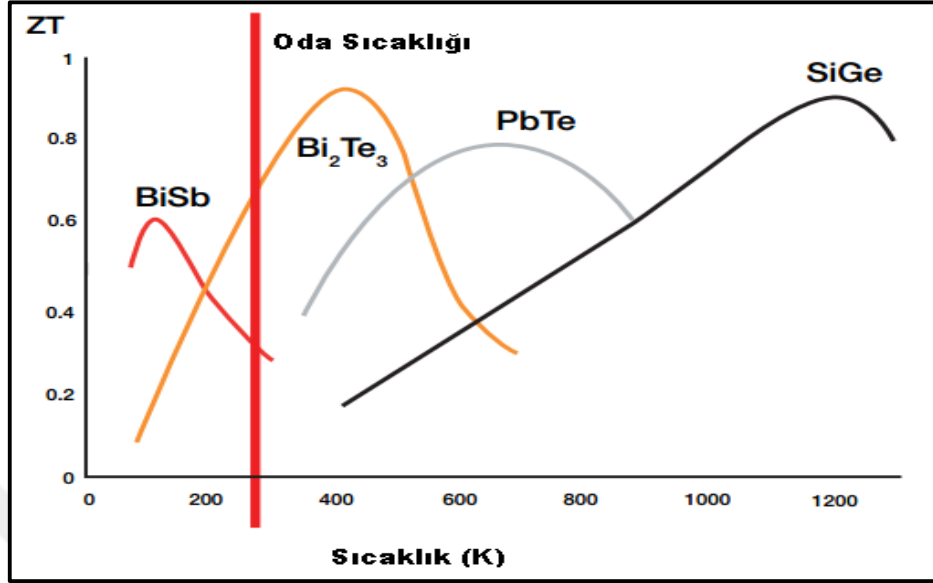
Tablo 1.1’deki değerler göz önüne alındığında, gerek sistemsel verimlilik bazında ($<3,5$), gerekse de TEG verimi ($<3,0$) bazında oldukça düşük sonuçlar ortaya çıkmıştır [6].

1.4. Termoelektrik Üreteçlerin Kullanımındaki Engeller

TEG’lerin kullanımındaki ilk ve en önemli engel, termoelektrik malzemelerin düşük termal verim oranlarıdır ($\eta_{th}<4$) [6]. Termoelektrik malzemelerin verimi de, performans katsayısına bağlı olarak değişim göstermektedir.

İlerleyen yıllarda, özellikle nanoteknolojinin gelişimine paralel olarak, termoelektrik malzemelerin performans katsayılarının artacağı ve buna bağlı olarak da daha yüksek termal verime ulaşacakları düşünülmektedir. Şekil 1.10’da günümüzde kullanılan

termoelektrik malzemelerin sahip olduğu performans katsayıları ve ortam sıcaklığına göre değişimleri gösterilmektedir.

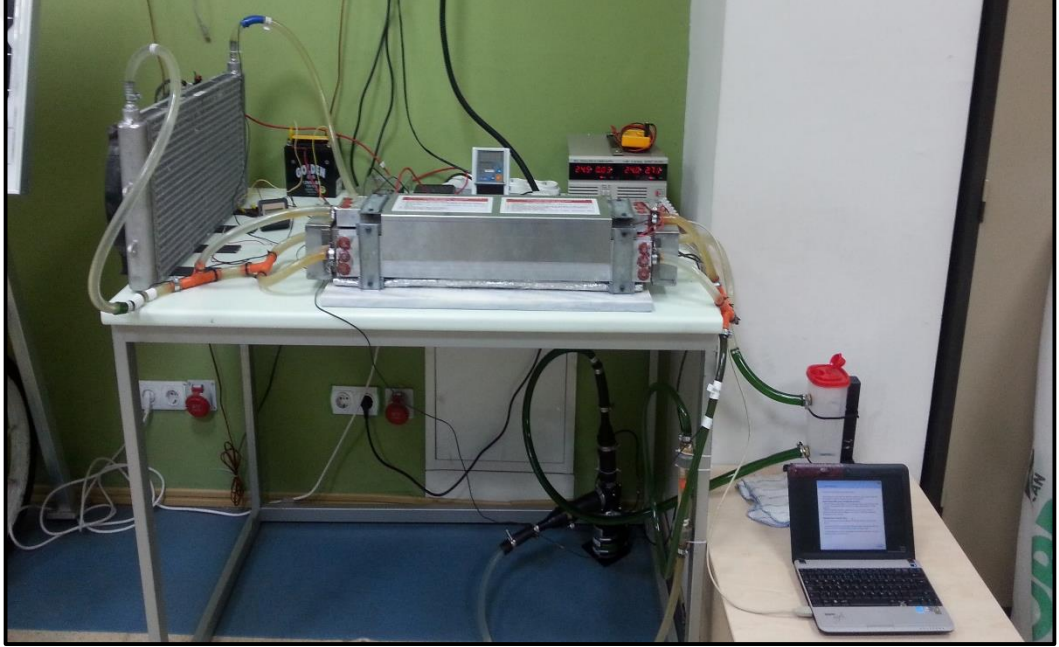


Şekil 1.10. Önemli termoelektrik malzemelerin performans katsayısının sıcaklığa göre değişimi

Bu engellerin dışında, günümüzde TEG'lerin taşıtlarda kullanılmamasının ve yaygınlaşmamasının sebepleri arasında göze çarpan başka sebepler de bulunmaktadır. Bunların başında, taşıtlarda TEG kullanıldığı takdirde soğutucu akışkanın da sıcaklık farkını arttırmak için TEG'lerin olduğu bölgeden geçirilmesi gelmektedir. Bu durum, taşıtta kullanılan su pompasının motora daha fazla yük getirmesi anlamına gelmektedir. Bunun yanında TEG'lerin maliyetinin yüksek olması, belirli saate kadar çalışıyor olması (ömürlü olması), servis edilebilirliğinin olmaması (bozulduğu takdirde tamir edilememesi) ve TEG'lerin yüksek sıcaklıklarda çalışmaması gibi sebepler TEG'lerin taşıtlarda kullanımını ve yaygınlaşmasını engellemektedir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

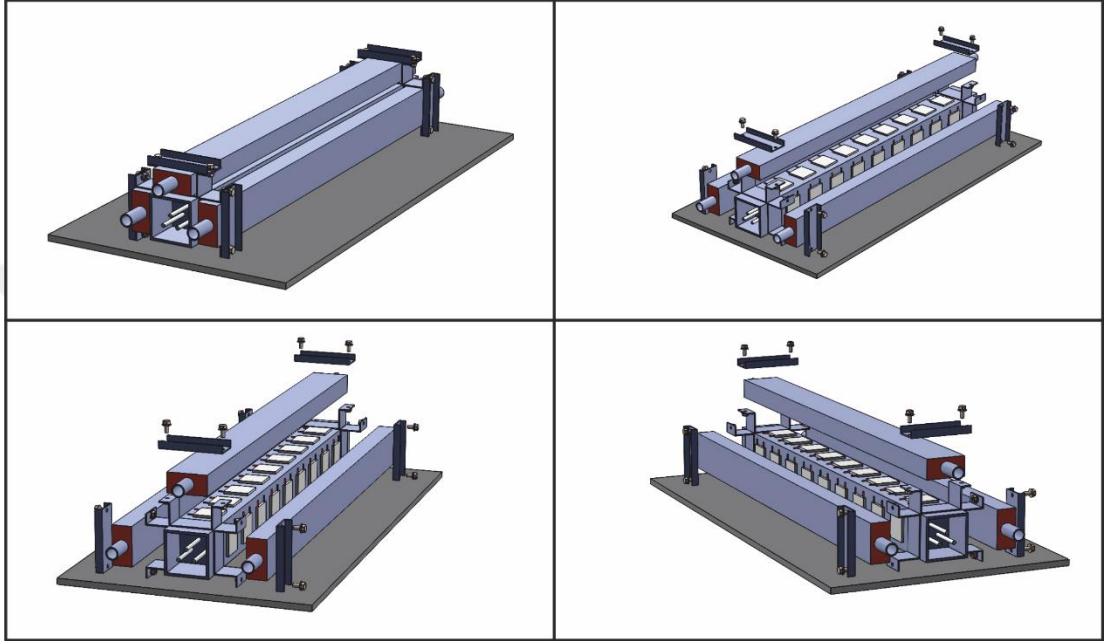
TEG sisteminin kullanımıyla atık egzoz gazından elektrik üretimi, Şekil 2.1’de görülen deney düzeneğinde yapılan testler sonucunda elde edilmiştir. İçten yanmalı motorlu aracın egzoz sisteminin simülasyonunun yapıldığı bu düzenekte elektrik üretimi, egzoz borusu üzerine sıralanmış TEG sistemi yardımıyla elde edilmiştir. Üretilen bu elektrik, daha sonra sistem içerisinde bulunan akünün doldurulmasında kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Deney düzeneğinin genel görünüşü

Elektrik üretiminin sağlandığı alüminyum boru ve etrafındaki alüminyum soğutma blokları, deney setinin temelini oluşturmaktadır. Alüminyum boru, içerisinde 600 W’lık üç ısıtıcı geçirilerek ısıtılmaktadır. Bu bölüm, aracın egzoz borusunu simüle etmektedir ve bu ısıtıcılar sayesinde egzoz gazının ürettiği ısı elde edilmektedir. 600 W’lık ısıtıcılar, termoregülatör ve kontaktör yardımıyla belirli bir sıcaklık değerini aşmayacak şekilde ayarlanabilmektedir. Sistemde TEG’lerin zarar görmemesi için bu sıcaklık değeri 600 °C olarak ayarlanmıştır. Bu sayede TEG’lerin olduğu sistem koruma altına alınmıştır.

Isıtıcıların olduğu alüminyum bloğun sağ, sol ve üst taraflarına, her bir yüzeye dokuz adet gelecek şekilde, birbirlerine seri olarak bağlanmış TEC1-12706 tipi TEG'ler, sıcak ve soğuk yüzeylerine termal macun sürülerek, Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, ısıtıcıların olduğu alüminyum blok üzerine yerleştirilmiştir. Alüminyum su bloklarıyla ısıtıcıların olduğu bölüm, metal kelepçeler yardımıyla birbirine sabitlenmiştir.

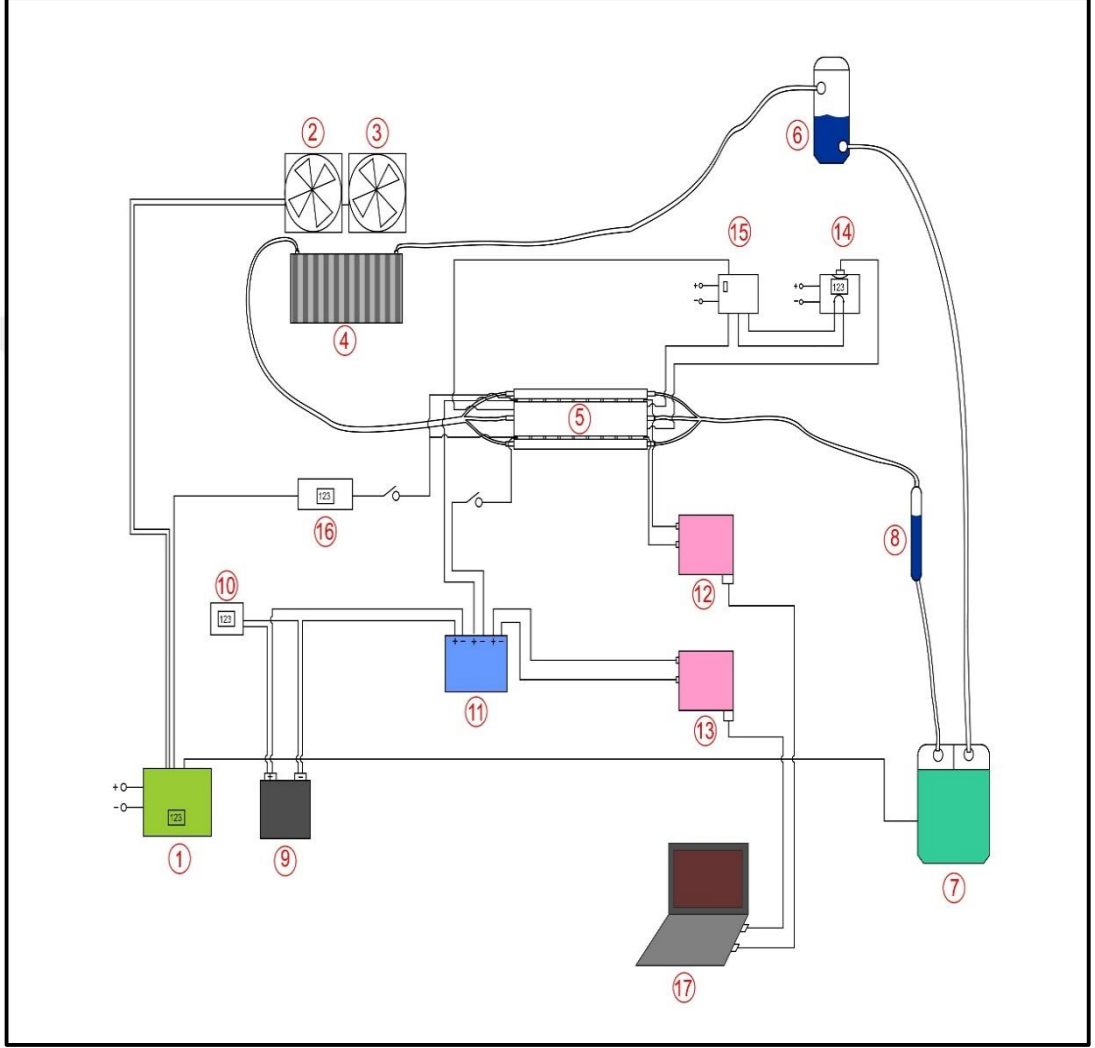


Şekil 2.2. TEG'lerin egzoz borusuna dizilişleri

TEG'lerin sıcak yüzeyleri, ısıtıcıların içinde bulunduğu alüminyum borunun yüzeyiyle temas halindedir. TEG'lerin soğuk yüzeyleri ise, soğutmanın sağlanabilmesi için su blokları ile temas halindedir. Bu blokların her birinden su geçirilerek TEG'lerin aşırı ısınması engellenmekte, üreteçlerin sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının maksimum seviyede tutulması sağlanmaktadır. Böylece üretilen elektrik enerjisinin maksimum seviyede olması hedeflenmektedir.

Blokların içerisinden geçen soğutma suyu, 24 V'luk devirdaim pompası kullanılarak sistemde dolaştırılmaktadır. Pompadan çıkan ve su bloklarına giden ana hortum, bloklara girişlerde üçe ayrılmakta ve her bir bloktan çıktıktan sonra tekrar birleşerek radyatöre bağlanmaktadır. Radyatöre ek olarak 12 V'luk iki adet fan yardımıyla soğutma suyu soğutulmaktadır. Deney düzeneğinde bunların dışında, radyatör ve su blokları içinde oluşan havanın dışarı atılmasını sağlayan bir adet 750 ml'lik genleşme tankı bulunmaktadır.

Sistemde 8,5 litre şebeke suyu soğutucu akışkan olarak kullanılmıştır. Radyatörün su kapasitesi 1,6 litredir. Sistemde dolaşan soğutucu akışkanın debisini ölçmek için bir adet mekanik debimetre pompa çıkışına eklenmiştir. Bu debimetre yardımıyla sistem içerisinde dolaşan suyun debisi 500 L/h olduğu gözlemlenmiştir.



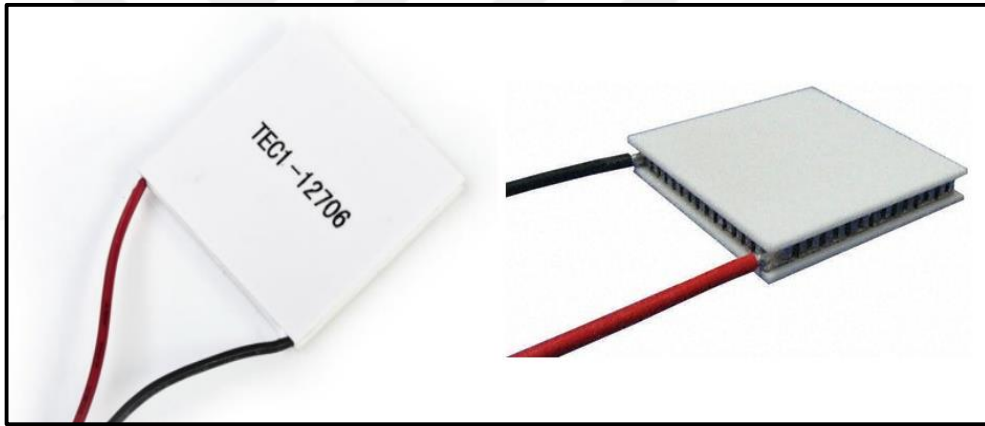
Şekil 2.3. Deney düzeneğinin genel yapısı

Tablo 2.1. Deney düzeneğinde kullanılan malzemeler

| Şekil No | Parça İsmi | Şekil No | Parça İsmi |
|----------|----------------------------------|----------|-------------------------------|
| 1 | Güç kaynağı (12 V-24 V) | 10 | Batarya şarj dolum göstergesi |
| 2 | Fan-1 (12 V) | 11 | Regülatör |
| 3 | Fan-2 (12 V) | 12 | Data logger-1 (sıcaklık) |
| 4 | Radyatör | 13 | Data logger-2 (voltaj) |
| 5 | Egzoz borusu ve soğutma blokları | 14 | Termoregülatör |
| 6 | Genleşme tankı | 15 | Kontaktör |
| 7 | Su pompası (24 V.) | 16 | Ampmetre |
| 8 | Debimetre (L/h) | 17 | Bilgisayar |
| 9 | Akü (9 Ah) | | |

Deney düzeneğinin genel yapısı Şekil 2.3'te ve kullanılan malzemelerin listesi de Tablo 2.1'de verilmiştir.

Deney düzeneğinde bulunan elektriksel ekipmanlar incelenecek olursa; ana yapıyı oluşturan ve Şekil 2.4'te gösterilen, Tablo 2.2'de de özellikleri verilen 27 adet TEC1-12706 Bismuth Telluride (Bi_2Te_3) tipi TEG, dokuzar gruplar halinde seri, bu grupların da kendi aralarında paralel bağlanmasıyla elektrik enerjisi üretmektedir. Bu TEG'lerin hem seri, hem de paralel bağlanmasındaki amaç, seri bağlı üreteçler ile gerekli voltaj değerini üretmek ve bunların paralel bağlanması ile de yeterli akım değerine ulaşmaktır. Aksi takdirde sadece seri bağlı bir devreden istenen düzeyde akım değeri, sadece paralel bağlı bir devreden de istenen düzeyde voltaj değeri elde edilemezdi. TEG'lerin ürettiği bu elektrik enerjisi de sistemde bulunan 9 Ah'lık aküyü beslemektedir.



Şekil 2.4. TEC1-12706 genel görünüşü

Tablo 2.2. TEC1-12706 özellikler tablosu [35]

| Tip | Hücre sayısı | Akım (I_{\max}) | Voltaj (U_{\max}) | Maksimum soğutma kapasitesi Q_{\max} (W) | Soğuk yüzey ile sıcak yüzey arasındaki maksimum sıcaklık farkı ΔT_{\max} (K) | Referans sıcaklık değeri T_h (K) |
|------------|--------------|---------------------|-----------------------|--|--|------------------------------------|
| TEC1-12706 | 127 | 6 | 15,2 | 56,5 | 68 | 300 |

Deneyde; TEG sisteminin ürettiği elektrik enerjisi üzerinde analiz ve gözlemler yapılmıştır. Isıtıcıların bulunduğu alüminyum boru içerisine, sıcaklığı istenilen düzeyde tutmak ve TEG'lerin çalışma sıcaklığını geçmesini engellemek için bir adet termokupl yerleştirilmiştir. Bu termokupl da termoregülatör ve kontaktörün olduğu sisteme bağlanmıştır. Bu sayede ısıtıcıların ısısı istenen seviyede ayarlanabilmekte,

belirli bir sıcaklığın üzerine çıkıp TEG'lere zarar vermesi ve aşırı ısınma durumunda sistemin kullanılamaz hale gelmesi engellenmektedir.

Deney süresince orta soğutma bloğunun en ortasında bulunan 5 numaralı TEG'in sıcak ve soğuk yüzeyinde birer adet, soğutma bloğu su girişinde ve çıkışında birer adet ve radyatör bloğu çıkışında bir adet olmak üzere toplam beş yerden sıcaklık bilgisi termokupllar yardımıyla alınmakta ve birinci data logger vasıtasıyla bilgisayara anlık olarak aktarılmaktadır. Bunun yanında peltierler tarafından üretilen anlık voltaj değeri ile akünün anlık voltaj değeri de ikinci bir data logger yardımıyla bilgisayara aktarılmakta ve anlık olarak kayıt altına alınmaktadır. Üretilen akım değeri, TEG'lerin ürettiği elektrik enerjisinin geçtiği ana kabloya seri bağlanan ampermetre sayesinde gözlenmiş ve elle kayıt altına alınmıştır. Isıtıcıların bulunduğu alüminyum bloğunun içerisindeki sıcaklık değeri ve akünün doluluk oranları ise ekranlardan takip edilerek listeye eklenmiştir.

Ayrıca sistemde; fanların, ampermetrenin ve su pompasının çalışması için gerekli olan enerjiyi sağlayan bir adet 12 V'luk, bir adet 24 V'luk olmak üzere toplam iki adet güç kaynağı bulunmaktadır.

Sistem çalıştırıldığında, ısıtıcıların sıcaklığının artması ve soğutucu suyun blokların üzerinden geçmesiyle TEG'lerin soğuk yüzeyi ile sıcak yüzeyi arasında sıcaklık farkı oluşmaktadır. TEG'lerin birbirine seri ve paralel bağlanması ile oluşturulan sistemden belirli bir voltaj ve akım değeri elde edilmektedir. Bu üretilen voltaj ve akım değeri, tamamen TEG'lerin sıcak ve soğuk yüzeylerinde meydana gelen ısı farkından dolayı oluşmaktadır. Atık egzoz gazının sıcaklığından üretilen elektriksel enerji, ana kabloyla sistemde bulunan 9 Ah'lik aküye aktarılmaktadır. Bu sayede akünün şarjı yapılmaktadır. Aküye bağlı olan batarya dolun göstergesi yardımıyla da şarj seviyesi anlık olarak görülmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Atık egzoz gazından TEG'ler ile elektrik üretiminin yapıldığı deney düzeneğinin çalıştırılması neticesinde, deney öncesinde tamamen boşaltılan 9 Ah'lık akü, TEG'lerin oluşturduğu elektrik enerjisi ile şarj edilmiştir. Yedi saatlik test süresi sonunda, aküdeki şarj %100 seviyesine gelmiştir. Bu değer, tamamen TEG'ler tarafından üretilen elektrik enerjisi ile elde edilmiştir.

Deney düzeneğinin çalıştırılması sırasında, her biri 600 W'lık üç adet ısıtıcının sıcaklığı, 600°C'yi geçmeyecek şekilde ayarlanmıştır. Bu sıcaklık değeri, 12 metre şehir içi otobüslerinde gerçek koşullarda yapılan motor performans testinde elde edilen veriler göz önüne alınarak seçilmiştir.¹ Bu değerlendirmeler ışığında, motor performans testi sonucunda egzoz bölgesinde elde edilen en yüksek sıcaklık değeri 526°C olmuştur.

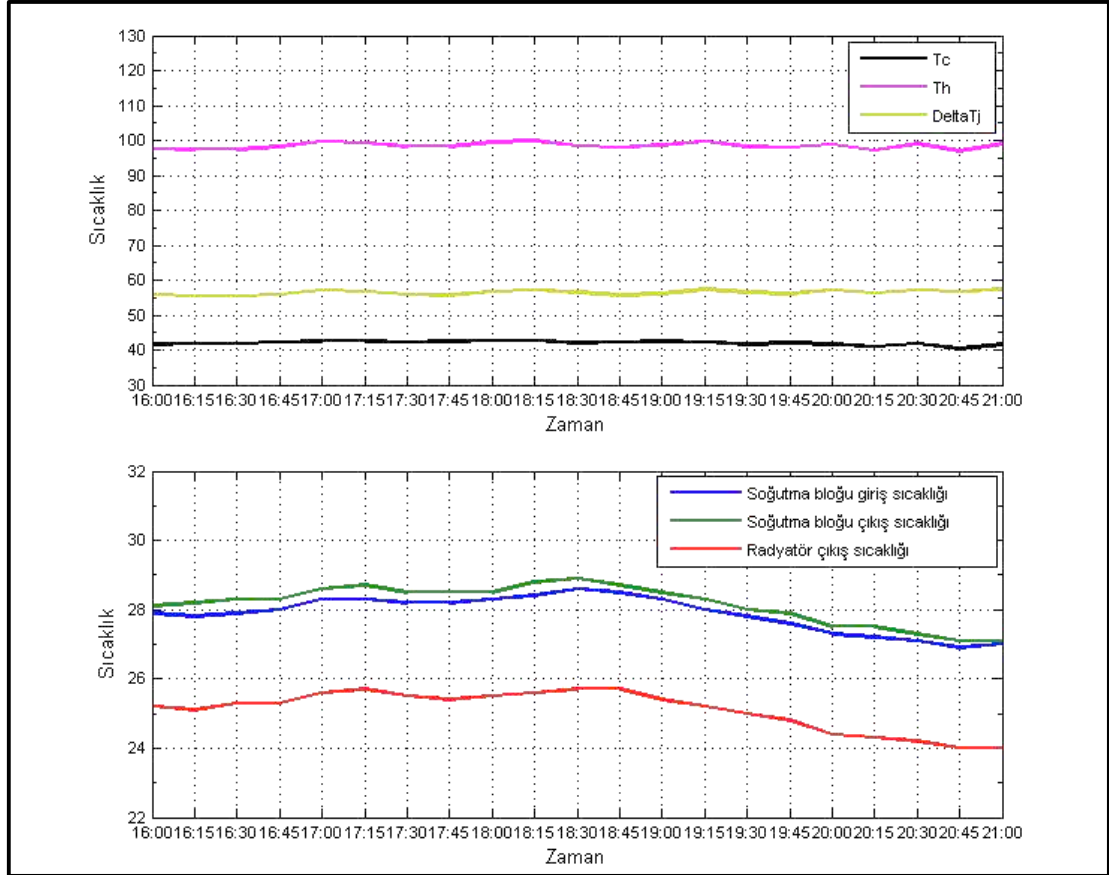
TEG'ler vasıtasıyla atık egzoz gazından elektrik üretiminin sağlandığı bu deney setinde, soğutma bloklarında daha iyi soğutma sağlanabilmesi için, her bir bloğa giden su hortumları ayrı bağlanmıştır. Yani pompa çıkışındaki su hortumu üçe bölünerek, su bloklarına ayrı ayrı girmektedir. Soğutma bloklarından geçip ısınan su, daha sonra soğumak için radyatöre geçmektedir. Bu süreçte suyun debisi 500 L/h olup, su pompası çıkışına yerleştirilen mekanik debimetreden okunmaktadır. Bu değer; suyu soğutmak için gerekecek olan soğutma kapasitesinin bulunmasında yardımcı olacaktır.

Deney süresinde birinci data logger tarafından alınan sıcaklık değerleri, Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Bu tabloda, sistemin çalıştırıldığı tarih ve saat değerleri ile 5 numaralı TEG'in sıcak yüzeyi, soğuk yüzeyi, bu iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı, suyun soğutma bloğuna girmeden önceki sıcaklığı, suyun soğutma bloğundan çıktıktan sonraki sıcaklığı ve suyun radyatör çıkışındaki sıcaklığı gösterilmektedir.

¹ Bakınız: Ek A. Motor Performans Testi Sonuç Raporu

Tablo 3.1. Birinci data logger tarafından alınan sıcaklık değerleri

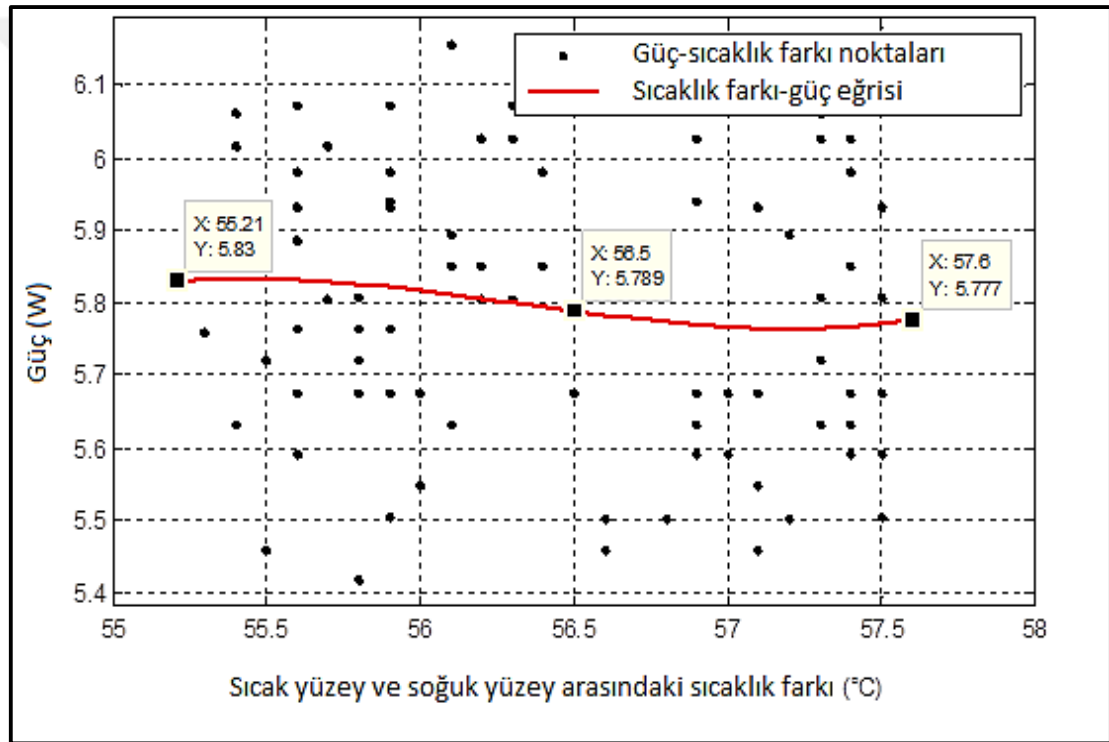
| Tarih | Zaman | T _c (°C) | T _h (°C) | ΔT _J (°C) | Soğutma bloğu giriş sıcaklığı (°C) | Soğutma bloğu çıkış sıcaklığı (°C) | Radyatör çıkış sıcaklığı (°C) |
|------------|----------|---------------------|---------------------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 17.05.2014 | 16:00:00 | 41,6 | 97,5 | 55,9 | 27,9 | 28,1 | 25,2 |
| 17.05.2014 | 16:15:00 | 41,9 | 97,3 | 55,4 | 27,8 | 28,2 | 25,1 |
| 17.05.2014 | 16:30:00 | 41,9 | 97,3 | 55,4 | 27,9 | 28,3 | 25,3 |
| 17.05.2014 | 16:45:00 | 42,2 | 98,1 | 55,9 | 28,0 | 28,3 | 25,3 |
| 17.05.2014 | 17:00:00 | 42,5 | 99,6 | 57,1 | 28,3 | 28,6 | 25,6 |
| 17.05.2014 | 17:15:00 | 42,5 | 99,2 | 56,7 | 28,3 | 28,7 | 25,7 |
| 17.05.2014 | 17:30:00 | 42,2 | 98,1 | 55,9 | 28,2 | 28,5 | 25,5 |
| 17.05.2014 | 17:45:00 | 42,5 | 98,1 | 55,6 | 28,2 | 28,5 | 25,4 |
| 17.05.2014 | 18:00:00 | 42,7 | 99,5 | 56,8 | 28,3 | 28,5 | 25,5 |
| 17.05.2014 | 18:15:00 | 42,7 | 99,9 | 57,2 | 28,4 | 28,8 | 25,6 |
| 17.05.2014 | 18:30:00 | 42,1 | 98,5 | 56,4 | 28,6 | 28,9 | 25,7 |
| 17.05.2014 | 18:45:00 | 42,2 | 97,9 | 55,7 | 28,5 | 28,7 | 25,7 |
| 17.05.2014 | 19:00:00 | 42,5 | 98,6 | 56,1 | 28,3 | 28,5 | 25,4 |
| 17.05.2014 | 19:15:00 | 42,2 | 99,6 | 57,4 | 28,0 | 28,3 | 25,2 |
| 17.05.2014 | 19:30:00 | 41,6 | 98,1 | 56,5 | 27,8 | 28,0 | 25,0 |
| 17.05.2014 | 19:45:00 | 42,0 | 98,0 | 56,0 | 27,6 | 27,9 | 24,8 |
| 17.05.2014 | 20:00:00 | 41,6 | 98,8 | 57,2 | 27,3 | 27,5 | 24,4 |
| 17.05.2014 | 20:15:00 | 40,9 | 97,1 | 56,2 | 27,2 | 27,5 | 24,3 |
| 17.05.2014 | 20:30:00 | 41,9 | 99,1 | 57,2 | 27,1 | 27,3 | 24,2 |
| 17.05.2014 | 20:45:00 | 40,3 | 96,9 | 56,6 | 26,9 | 27,1 | 24,0 |
| 17.05.2014 | 21:00:00 | 41,6 | 99,0 | 57,4 | 27,0 | 27,1 | 24,0 |



Şekil 3.1. Soğutucu akışkan, T_h, T_c ve ΔT_J sıcaklık-zaman grafiği

Şekil 3.1'e göre soğutma bloğuna girişte ve çıkışta ortalama 0,3°C sıcaklık farkı bulunmaktadır. Bu sıcaklık farkı, TEG'lerin soğuk yüzeyleri soğutarak, sıcak ve soğuk yüzeyler arasında ısı farkını arttırmakta ve daha fazla elektrik enerjisi üretilmesini sağlamaktadır. Radyatör çıkışında fanlar yardımıyla soğutulan su, tekrar sisteme pompa yardımıyla basılarak devirdaim sağlanmaktadır.

TEG'lerin sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının değişimine bağlı olarak, sistemde üretilen elektriksel güç de değişim göstermektedir. Bu değişim lineer olmayıp dağılım göstermekte ve Şekil 3.2'de gösterilen sıcaklık farkı-güç eğrisi etrafında yoğunlaşmaktadır.



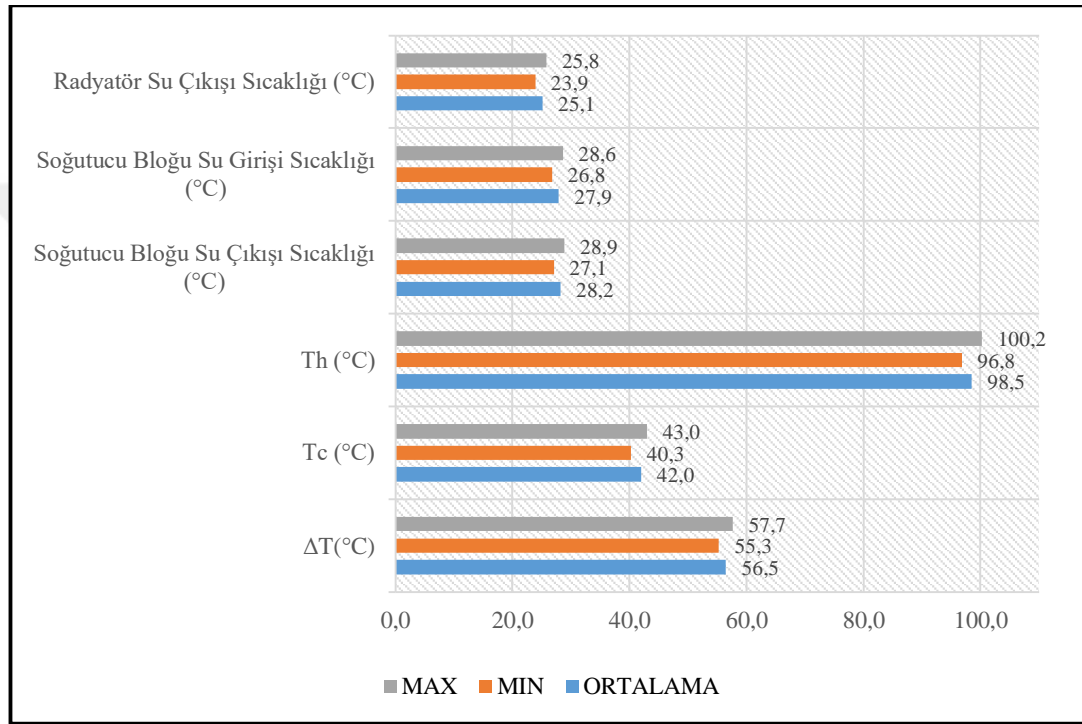
Şekil 3.2. TEG sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile sistemde elde edilen güç arasındaki ilişki

Yukarıda şekilde görüldüğü gibi, TEG'lerin sıcak yüzeyi ve soğuk yüzeyi arasında ortalama 56,5°C'lik bir fark bulunmaktadır. TEG'ler tarafından üretilen elektriksel güç ise ortalama 5,83 W ile 5,77 W arasında değişmektedir.

Istıticıların 600°C'yi aşmayacak şekilde ayarlanması durumunda, TEG'lerin sıcak yüzeylerinde Şekil 3.3'te gösterildiği gibi minimum 96,8°C, maksimum 100,2°C ve ortalama 98,5°C sıcaklık elde edilmiştir. Bu sıcaklıklar, TEG'lerin maksimum çalışma

sıcaklığı olan 138°C'nin altındadır. Sıcak yüzey ile soğuk yüzey arasında sıcaklık farkı ise ortalama 56,5°C civarındadır.

Birinci data logger'dan alınan radyatör su çıkışı sıcaklığı, soğutucu bloğu su girişi sıcaklığı, soğutucu bloğu su çıkışı sıcaklığı, soğuk yüzey sıcaklığı, sıcak yüzey sıcaklığı ve her iki yüzey arası sıcaklık farkı bilgilerinin maksimum, minimum ve ortalama değerleri, Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Birinci data logger tarafından elde edilen sıcaklık verilerin minimum, maksimum ve ortalama değerleri

Test süresince, ikinci data logger'dan alınan elektriksel veriler ise TEG'ler tarafından üretilen voltaj değeri ile akünün voltaj değerleridir. Akım değeri ise ampermetrenin ekranında görülen değerin elle yazılması suretiyle kayıt altına alınmıştır.

Deney boyunca TEG'ler tarafından ortalama 5,8 W elektrik enerjisi üretilmiştir. Üretilen bu elektrik enerjisi, tamamen atık egzoz gazının ısı enerjisinden ve TEG'lerin sıcak yüzeyleri ile soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı yardımıyla elde edilmiştir. TEG'ler yardımıyla elde edilen bu elektrik enerjisi, sistemde bulunan 9 Ah'lik aküyü yedi saatte %0 doluluk oranından %100 doluluk oranına getirmeyi başarmıştır. Üretilen bu değerlere ait veriler Tablo 3.2'de gösterilmektedir.

Tablo 3.2. Sistemde üretilen elektriksel değerler

| Tarih | Zaman | Üretilen amper değeri (A) | Üretilen voltaj değeri (V) | Akü voltaj değeri (V) | Üretilen güç (W) |
|------------|----------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|
| 17.05.2014 | 16:00:00 | 0,43 | 12,8 | 12,7 | 5,504 |
| 17.05.2014 | 16:15:00 | 0,46 | 12,8 | 12,7 | 5,888 |
| 17.05.2014 | 16:30:00 | 0,45 | 12,9 | 12,8 | 5,805 |
| 17.05.2014 | 16:45:00 | 0,43 | 12,9 | 12,8 | 5,547 |
| 17.05.2014 | 17:00:00 | 0,46 | 12,9 | 12,9 | 5,934 |
| 17.05.2014 | 17:15:00 | 0,45 | 12,9 | 12,8 | 5,805 |
| 17.05.2014 | 17:30:00 | 0,44 | 12,9 | 12,8 | 5,676 |
| 17.05.2014 | 17:45:00 | 0,46 | 13,0 | 12,9 | 5,98 |
| 17.05.2014 | 18:00:00 | 0,43 | 13,0 | 12,9 | 5,59 |
| 17.05.2014 | 18:15:00 | 0,45 | 13,0 | 12,9 | 5,85 |
| 17.05.2014 | 18:30:00 | 0,46 | 13,0 | 12,9 | 5,98 |
| 17.05.2014 | 18:45:00 | 0,42 | 13,0 | 12,9 | 5,46 |
| 17.05.2014 | 19:00:00 | 0,46 | 13,2 | 13,1 | 6,072 |
| 17.05.2014 | 19:15:00 | 0,46 | 13,2 | 13,1 | 6,072 |
| 17.05.2014 | 19:30:00 | 0,46 | 13,2 | 13,1 | 6,072 |
| 17.05.2014 | 19:45:00 | 0,46 | 13,2 | 13,1 | 6,072 |
| 17.05.2014 | 20:00:00 | 0,45 | 13,1 | 13,0 | 5,895 |
| 17.05.2014 | 20:15:00 | 0,42 | 13,1 | 13,0 | 5,502 |
| 17.05.2014 | 20:30:00 | 0,46 | 13,1 | 13,1 | 6,026 |
| 17.05.2014 | 20:45:00 | 0,43 | 13,1 | 13,0 | 5,633 |
| 17.05.2014 | 21:00:00 | 0,46 | 13,2 | 13,2 | 6,072 |

Alınan bu değerlere göre, ortalama 13,02 V elektrik üretimi ve 0,45 A akım üretimi deney süresince gerçekleşmiştir. Bu değerlerin ışığında, TEG'ler tarafından üretilen elektriksel güç, Formül (3.1) deki gibi;

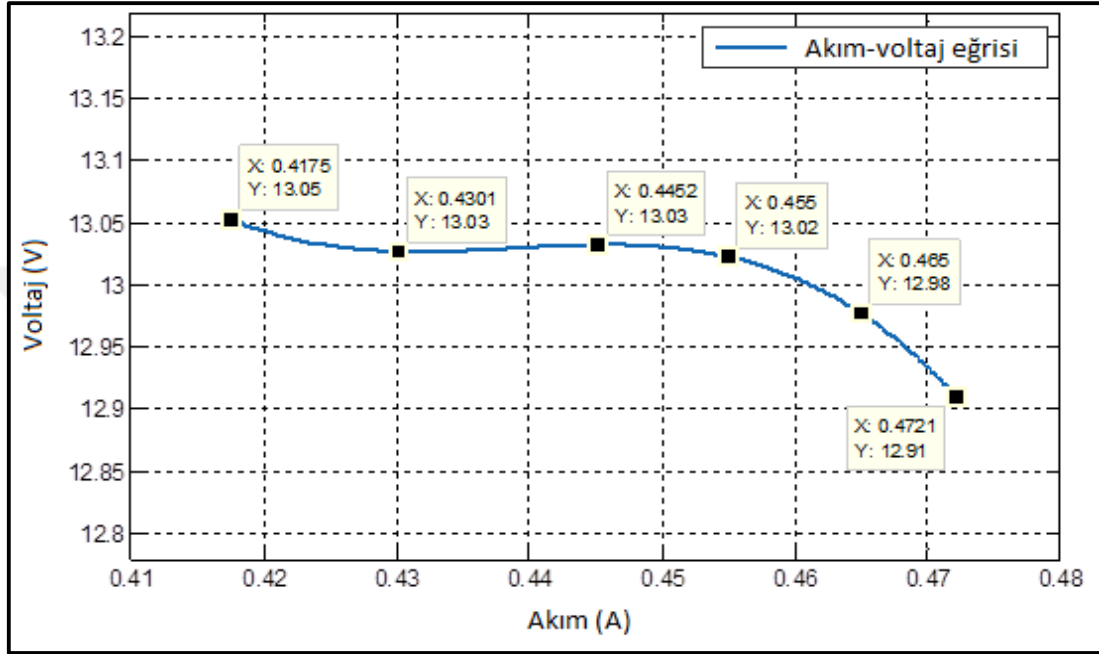
$$P_{TEG} = V_{TEG} \cdot I_{sys} \quad (3.1)$$

bulunmaktadır. Bu eşitlikte V_{TEG} değeri, TEG'ler tarafından üretilen voltaj değeri, I_{sys} ise sistemde oluşan amper değerini ifade etmektedir. Bu eşitlik sonucunda da TEG'ler vasıtasıyla üretilen elektriksel güç bulunmaktadır.

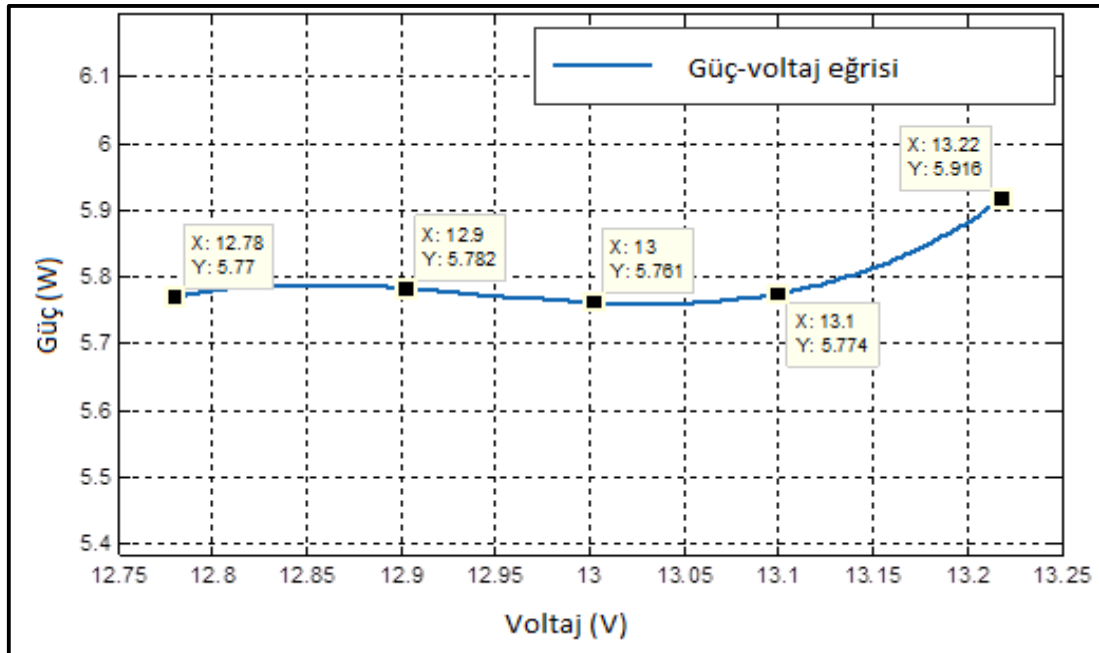
Şekil 3.4'te, sistemde üretilen akım ve voltaj değerlerinin üretilen güce göre değişimleri gösterilmektedir. Bu grafiğe göre, TEG'ler tarafından üretilen voltaj değeri 12,8 V ile 13,2 V arasında farklılık göstermektedir. Grafiğe göre akım en düşük düzeyde iken (grafiğe göre bu değer 0,4175 A), voltaj değeri en yüksek değerdedir (grafiğe göre bu değer 13,05 V). Bu da akım ile voltaj arasında Formül (3.1) de görüldüğü gibi, ters bir orantının olduğunu doğrulamaktadır.

Bu veriler ışığında, elektriksel güç üretilmesi sırasında TEG'lerde bir sınıram olduğu sonucuna ulaşabiliriz. TEG'lerin sıcak yüzeylerinin belirli bir sıcaklık değeri üstüne çıkamaması neticesinde üretilen elektrik enerjisinin değeri belirli bir seviyede kalmaktadır. Bu sebeple TEG'lerin kullanım alanı kısıtlanmakta, yüksek değerli Z

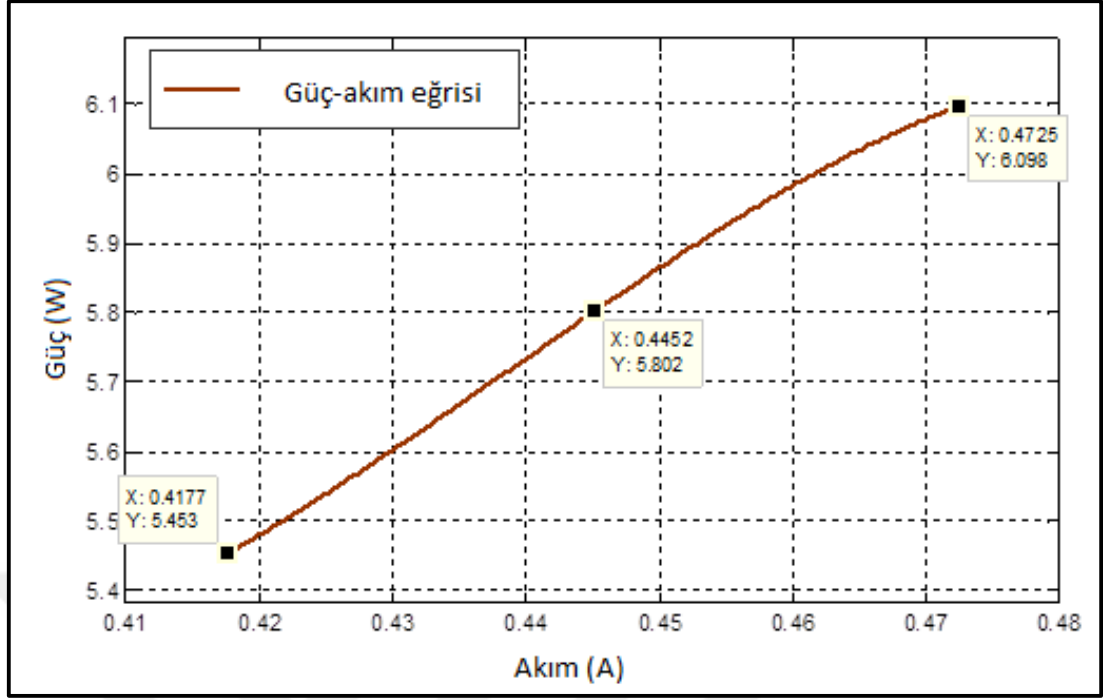
performans katsayısına sahip TEG'ler kullanılmadan bu sıkıntının giderilmesi pek mümkün görülmemektedir. İlerleyen yıllarda teknolojinin gelişmesine paralel olarak malzeme biliminin ve nanoteknolojinin de gelişmesiyle, yüksek değerdeki Z performans katsayısına sahip malzemelerin kullanımının artması ve böylece bu sıkıntının da aşılması düşünülmektedir.



Şekil 3.4. Akım-voltaj değişim grafiği



Şekil 3.5. Güç-voltaj değişim grafiği (akım sabit)



Şekil 3.6. Güç-akım değişim grafiği (voltaj sabit)

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da üretilen güç ile voltaj ve akım değişimi arasındaki ilişki gösterilmektedir.

Elde edilen bu verilerin ışığında, TEG yardımıyla elektrik üretilen bu sistemin verimini Formül (3.2) deki gibi;

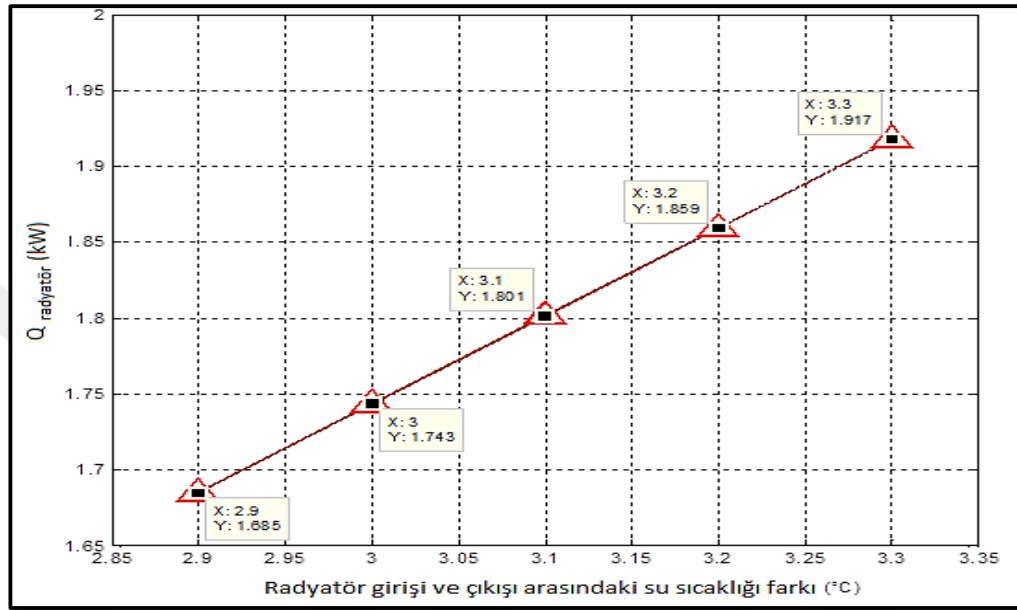
$$\eta = \frac{P_{TEG}}{\dot{Q}_{rad}} \quad (3.2)$$

bulunması mümkündür. Bu eşitlikteki η değeri, oluşturduğumuz sistemin verimini, P_{TEG} değeri, TEG'ler tarafından üretilen ve Formül (3.1) de bulunan elektriksel gücü (W), \dot{Q}_{rad} ise TEG'leri soğutan soğutucu akışkan suyun bünyesine aldığı ısıyı radyatörde atmak için gerekli olan ve Formül (3.3) yardımıyla bulunan enerji miktarını (W) ifade etmektedir.

Formül (3.2) de verimi bulabilmek için önce radyatörde suyun soğutulması için gerekli olan enerji miktarının bulunması gerekmektedir. Bu da Formül (3.3) de gösterildiği gibi;

$$\dot{Q}_{rad} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \quad (3.3)$$

yardımıyla olacaktır. Bu eşitlikteki m değeri, sistemde dolaşan soğutucu akışkan olan suyun kg/sn cinsinden debisi; c değeri, suyun özgül ısısı ki bu değer $4,18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ 'dir; ΔT ise suyun radyatöre giriş ve çıkıştaki sıcaklık farkı değerlerini belirtmektedir. Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, radyatöre giren suyun giriş ve çıkışındaki sıcaklık farkı arttığında, suyun soğutulması için gerekli olan ısı yük de artmaktadır.



Şekil 3.7. Radyatörde suyun soğutulması için gerekli olan enerji miktarı ve suyun giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın değişimi

Tablo 3.3. Soğutma suyunun soğutulması için gerekli olan ısı transferi miktarı

| Tarih | Zaman | Radyatör girişi sıcaklığı (°C) | Radyatör çıkış sıcaklığı (°C) | Fark (°C) | Radyatörde gerçekleşen ısı transferi miktarı (W) |
|------------|----------|--------------------------------|-------------------------------|-----------|--|
| 17.05.2014 | 16:00:00 | 28,1 | 25,2 | 2,9 | 1684,958 |
| 17.05.2014 | 16:15:00 | 28,2 | 25,1 | 3,1 | 1801,162 |
| 17.05.2014 | 16:30:00 | 28,3 | 25,3 | 3 | 1743,06 |
| 17.05.2014 | 16:45:00 | 28,3 | 25,3 | 3 | 1743,06 |
| 17.05.2014 | 17:00:00 | 28,6 | 25,6 | 3 | 1743,06 |
| 17.05.2014 | 17:15:00 | 28,7 | 25,7 | 3 | 1743,06 |
| 17.05.2014 | 17:30:00 | 28,5 | 25,5 | 3 | 1743,06 |
| 17.05.2014 | 17:45:00 | 28,5 | 25,4 | 3,1 | 1801,162 |
| 17.05.2014 | 18:00:00 | 28,5 | 25,5 | 3 | 1743,06 |
| 17.05.2014 | 18:15:00 | 28,8 | 25,6 | 3,2 | 1859,264 |
| 17.05.2014 | 18:30:00 | 28,9 | 25,7 | 3,2 | 1859,264 |
| 17.05.2014 | 18:45:00 | 28,7 | 25,7 | 3 | 1743,06 |
| 17.05.2014 | 19:00:00 | 28,5 | 25,4 | 3,1 | 1801,162 |
| 17.05.2014 | 19:15:00 | 28,3 | 25,2 | 3,1 | 1801,162 |
| 17.05.2014 | 19:30:00 | 28,0 | 25,0 | 3 | 1743,06 |
| 17.05.2014 | 19:45:00 | 27,9 | 24,8 | 3,1 | 1801,162 |
| 17.05.2014 | 20:00:00 | 27,5 | 24,4 | 3,1 | 1801,162 |
| 17.05.2014 | 20:15:00 | 27,5 | 24,3 | 3,2 | 1859,264 |
| 17.05.2014 | 20:30:00 | 27,3 | 24,2 | 3,1 | 1801,162 |
| 17.05.2014 | 20:45:00 | 27,1 | 24,0 | 3,1 | 1801,162 |
| 17.05.2014 | 21:00:00 | 27,1 | 24,0 | 3,1 | 1801,162 |

Tablo 3.3’de soğutucu akışkanın radyatör girişindeki sıcaklığı, radyatör çıkışındaki sıcaklığı, bu iki değer arasındaki sıcaklık farkı ve suyun radyatörde soğutulması için gerekli olan ısı transfer miktarının zamana göre değişimi verilmiştir.

Tamamen atık egzoz gazının kullanımını sayesinde TEG’ler tarafından üretilen elektriksel gücün, üreteçlerin daha fazla elektrik üretimini sağlaması ve aşırı ısınmaya maruz kalmasını engelleyen soğutucu akışkanın soğutulması için gerekli olan enerji miktarına oranı, bize sistemin verimini vermektedir.

Tablo 3.4. Sistemden elde edilen verim (η)

| Tarih | Zaman | Üretilen elektriksel güç P_{TEG} (W) | Soğutucu akışkanın radyatörde soğutulması için gerekli olan enerji miktarı Q_{rad} (W) | Verim η (%) |
|------------|----------|---|---|---------------------|
| 17.05.2014 | 16:00:00 | 5,504 | 1684,958 | 0,327 |
| 17.05.2014 | 16:15:00 | 5,888 | 1801,162 | 0,327 |
| 17.05.2014 | 16:30:00 | 5,805 | 1743,06 | 0,333 |
| 17.05.2014 | 16:45:00 | 5,547 | 1743,06 | 0,318 |
| 17.05.2014 | 17:00:00 | 5,934 | 1743,06 | 0,340 |
| 17.05.2014 | 17:15:00 | 5,805 | 1743,06 | 0,333 |
| 17.05.2014 | 17:30:00 | 5,676 | 1743,06 | 0,326 |
| 17.05.2014 | 17:45:00 | 5,98 | 1801,162 | 0,332 |
| 17.05.2014 | 18:00:00 | 5,59 | 1743,06 | 0,321 |
| 17.05.2014 | 18:15:00 | 5,85 | 1859,264 | 0,315 |
| 17.05.2014 | 18:30:00 | 5,98 | 1859,264 | 0,322 |
| 17.05.2014 | 18:45:00 | 5,46 | 1743,06 | 0,313 |
| 17.05.2014 | 19:00:00 | 6,072 | 1801,162 | 0,337 |
| 17.05.2014 | 19:15:00 | 6,072 | 1801,162 | 0,337 |
| 17.05.2014 | 19:30:00 | 6,072 | 1743,06 | 0,348 |
| 17.05.2014 | 19:45:00 | 6,072 | 1801,162 | 0,337 |
| 17.05.2014 | 20:00:00 | 5,895 | 1801,162 | 0,327 |
| 17.05.2014 | 20:15:00 | 5,502 | 1859,264 | 0,296 |
| 17.05.2014 | 20:30:00 | 6,026 | 1801,162 | 0,335 |
| 17.05.2014 | 20:45:00 | 5,633 | 1801,162 | 0,313 |
| 17.05.2014 | 21:00:00 | 6,072 | 1801,162 | 0,337 |

TEG kullanılan bu sistemden elde edilen verim, Tablo 3.4’te belirtildiği gibi %0,3 civarlarında olup, bu değer oldukça az olduğu görülmektedir. Bu değer bu kadar az olması, TEG’den elde edilen elektriksel gücün azlığından kaynaklanmaktadır. Başka bir ifadeyle, TEG’lerin kullanıldığı bu sistemde elektrik üretiminin sağlanması için gerekli olan soğutma yükü, elde edilen ve yararlı güç olan elektriksel güçten oldukça fazladır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Taşıtlarda kullanılan akünün şarjı alternatör yardımıyla yapılmaktadır. Alternatör, motordan tahrik edilmekte ve kinetik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektedir. TEG'ler vasıtasıyla atık egzoz gazının kullanıldığı ve taşıt şarj sistemine destek görevi görebilecek bir kojenerasyon sisteminin fizibilitesinin yapılması bu tezin ana fikrini oluşturmaktadır.

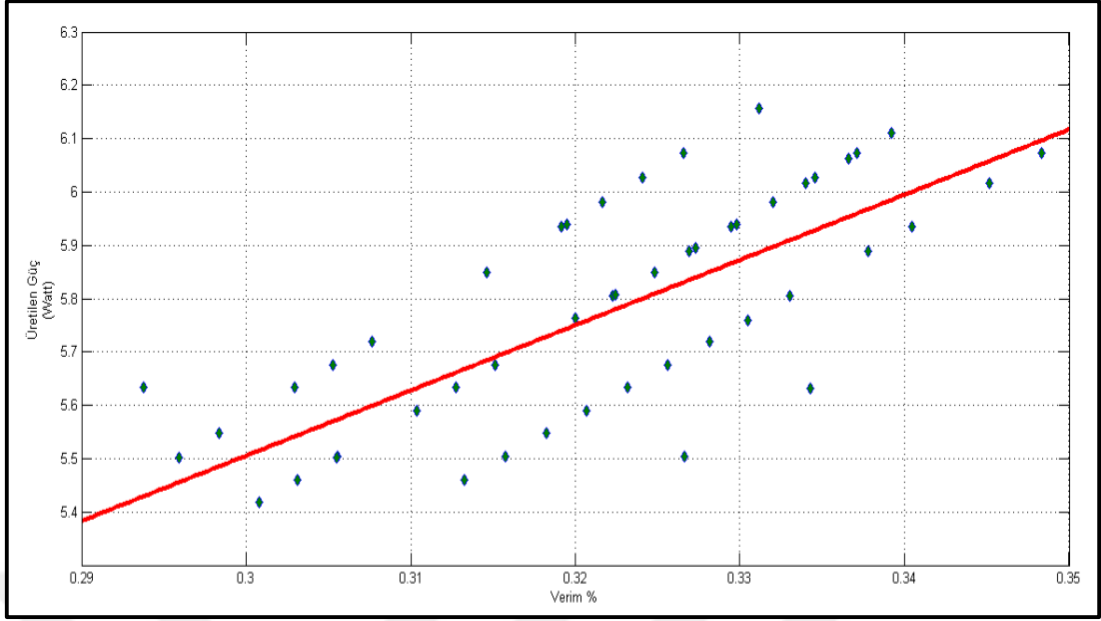
Termoelektrik üreteç olan peltierlerin sistem içerisinde dolaşan soğutma suyu yardımıyla soğuk yüzeylerinin soğutulması ve alüminyum boru içerisinde bulunan ısıtıcılar yardımıyla sıcak yüzeylerinin ısıtılması sayesinde elektrik üretimi gerçekleşmektedir. Sistemdeki TEG'lerin birbirlerine hem seri, hem de paralel bağlanmasındaki amaç, seri bağlı üreteçler ile gerekli voltaj değerini üretmek ve bunların birbirlerine paralel bağlanması ile de yeterli akım değerini üretmektir. Aksi takdirde sadece seri bağlı bir devreden istenen düzeyde akım değeri, sadece paralel bağlı bir devreden de istenen düzeyde voltaj değeri elde etmek mümkün olmazdı.

Yapılan deneyin sonunda elde edilen veriler içerisinde üzerinde durulan iki temel nokta bulunmaktadır. Bunlardan ilki; TEG'ler tarafından üretilen elektrik enerjisinin miktarı, diğeri ise TEG'lerden daha fazla elektrik enerjisi elde edilmesini sağlayan ve yine TEG'lerin sağlıklı bir şekilde fazla ısıdan dolayı işlevini göremez hale gelmesini engelleyen soğutucu akışkanın radyatörde soğutulması için gerekli olan soğutma yükünün miktarı. Bu iki değer birbirlerine oranları da sistemin verimini vermektedir. Bu sayede kurulan sistemin verimli olup olmadığı, ilerde taşıtlarda uygulanıp uygulanamayacağı, verimsiz ise nasıl daha verimli hale getirilebileceği gibi soruların cevabına dair fikir yürütülebilmektedir. Atık egzoz gazının zaten gerçek koşullarda çevrim sonucu üretilen ve kullanılmayan bir kaynak olduğu göz önüne alınırsa, egzoz gazının oluşturduğu ısıyı üreten ısıtıcıların elektrik enerjisi ihmal edilmektedir. Yalnızca TEG'lerin soğutulması ve uygun sıcaklıkta tutularak zarar görmesini engellemek için sistemde dolaşan soğutma suyunun soğutulmasında gerekli olan enerji miktarı kayıp olarak görülmektedir.

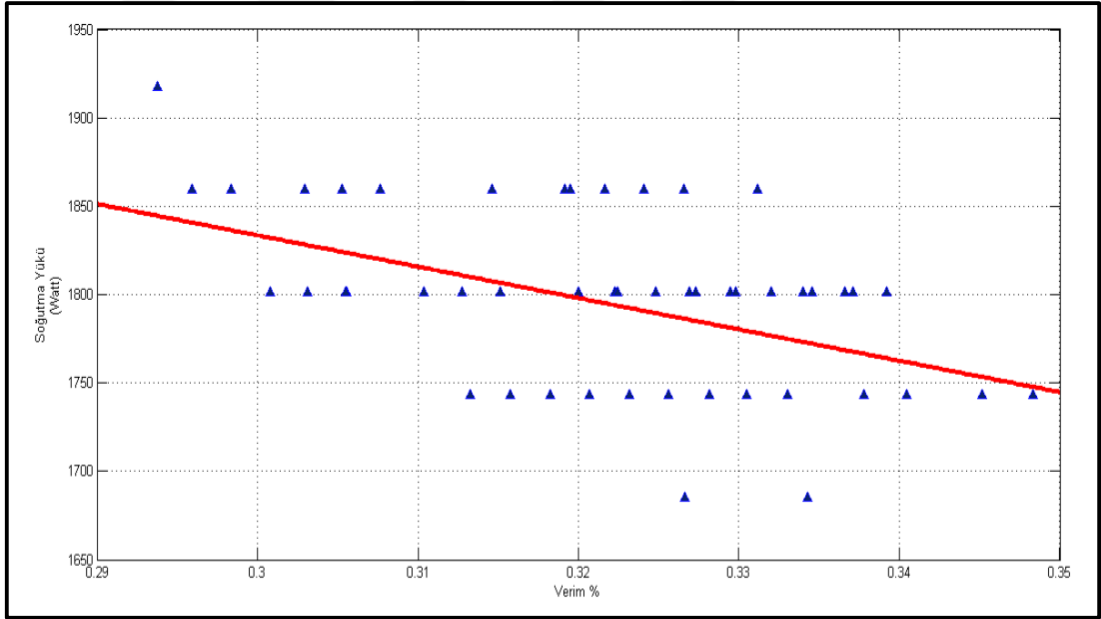
TEG tarafından üretilen voltaj, akım ve enerji miktarlarının incelendiği yedi saatlik zaman dilimindeki veriler göz önüne alındığında, ortalama 0,45 A akım değeri, 13,02 V voltaj değeri ve 5,8 W elektrik enerjisi üretildiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık olarak, sistem içerisinde dolaşan soğutucu akışkan suyun radyatörlerde soğutulması için gerekli olan enerji miktarı da ortalama olarak 1792 W olarak bulunmuştur. Bu durum, sistemin kullanıldığı bir araçta TEG'ler vasıtasıyla akü beslenmek istenirse, ortalama olarak 1792 W'lık bir soğutma yükünü karşılaması ve motorun daha fazla yüklenmesi anlamına gelmektedir.

Deney sonucunda, üretilen elektriksel güce karşılık harcanan soğutma yükünün oranını (verimi) ortalama %0,32 olarak elde edilmiştir. Bu sonuca göre, sistemimiz oldukça verimsiz olarak çalışmaktadır. Başka bir deyişle; bu sistemde 5,8 W'lık enerji elde edebilmek için 1792 W'lık enerji harcanmaktadır. Bu verimsiz durumu, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'den anlaşılacağı üzere, ya üretilen elektriksel gücü arttırmakla, ya da soğutma yükünü hafifletmekle giderebiliriz. Bu iki seçenektan ilki olan elektriksel gücün artırılması konusunda, TEG'lerin sayısını olabildiğince arttırmak, bunun için de egzoz borusunun tasarımını altıgen ya da sekizgen yapmak suretiyle daha fazla termoelektrik üretici kullanmak yoluna gidilebilir. Verimi arttırmanın bir diğer yolu da, kullanılan TEG'lerin sıcak yüzeyleri ile soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını olabildiğince arttırmaktır. Tipik bir TEG'in sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını 500°C'ye kadar çıkarabilirsek, o zaman ancak %10'luk bir verime ulaşabiliriz [36,37]. Günümüz teknolojisiyle bu sıcaklık farkına, dolayısıyla bu verime ulaşılması mümkün olmadığından, ancak ileriki yıllarda gelişen malzeme teknolojisi ile bunun mümkün olabileceğine inanılmaktadır.

Verimi arttırabilmenin ikinci yolu olan soğutma yükünün azaltılması konusunda ise yapılabilecekler çok sınırlıdır. Sistemde dolaşan soğutma sıvısı olan su yerine, daha düşük özgül ısısı olan alkol, yağ gibi sıvılar kullanılabilir. Bunun yanında, ısının atıldığı radyatör de büyütülerek soğutma suyunun sönümlendiği ısının doğal yollardan atılması sağlanabilir. Ayrıca egzoz çevresindeki soğutucu blokların geometrisiyle oynayarak da verimi arttırabiliriz. Soğutma suyunu, bloklarının içerisinde kanallardan geçirerek ve kanalların etrafını da havayla temas edecek şekilde tasarlayarak, soğutma suyunu radyatöre gitmeden olabildiğince soğutarak soğutma yükü azaltılabilir.



Şekil 4.1. Sistemden üretilen güç & verim grafiği



Şekil 4.2. Sisteme gerekli olan soğutma yükü & verim grafiği

Sonuç olarak, kurulan bu kojenerasyon sistemi içerisinde ana işlevi gören ve aynı zamanda bir çeşit TEG olan peltierlerin ürettiği elektrik enerjisi tek başına taşıt için yetebilecek bir seviyede değildir. Elde ettiğimiz bir başka sonuç da, laboratuvar ortamında yaptığımız deney neticesinde aküyü ancak yedi saat gibi bir sürede %100 doluluk oranına getirebiliyoruz ki bu süre oldukça fazla bir şarj süresidir. Güncel TEG verimleri çok yüksek olmadığı için bu cihazların otomobile güç verecek ölçüde enerji sağlayabileceğini düşünmek doğru değildir. Ancak otomobillerin sahip olduğu

elektronik donanım gün geçtikçe ağırlaşmakta, daha fazla enerji ihtiyacı duyulmaktadır. Bundan dolayı, aracın elektronik donanımlarını termoelektrik enerji ile çalışacak hale getirmek büyük fayda sağlayabilir.

Bu da gösteriyor ki, taşıtlara TEG sistemini atık ısıyı kullanacak şekilde entegre etmek günümüz şartlarında uygun görülmemektedir. Özellikle malzeme teknolojisinin ve nanoteknolojinin gelişimine paralel olarak yüksek değerli Z performans katsayısına sahip TEG'lerin kullanımıyla bu sorunun ortadan kalkacağı düşünülmektedir. Elde edilen bir diğer sonuç da sadece TEG'leri soğutmak için bir sistem kurulması yerine, araçta mevcut olan soğutma sistemini genişletilip TEG'leri içine alacak şekilde bir soğutma sisteminin kurulması düşünülebilir. Bu sayede atık ısıyı kullanarak az da olsa aküyü besleyecek ve alternatörün yükünü hafifletecek bir sistem elde edilebilir.

Gelecekte ise TEG'lerin, araçta akünün yerini alacak kadar elektrik enerjisini egzozdaki kayıp ısıdan geri kazanabileceği öngörülmektedir. Alternatörün yerine TEG'lerin kullanılması ile motorlu taşıtlarda verimliliğin %10 oranında artacağı öngörülmektedir [36,37]. Bilim insanları, gelecekte yeni termoelektrik maddelerin geliştirilmesi ile bu tür projelerde verimliliğin daha da yükseleceğini yaptıkları çalışmalarda ortaya koymaktadırlar.

TEG'lerin üreteceği elektrik enerjisi ile ilerde otomobilin bazı elektronik aksamaları tümüyle bu yolla çalışacak hale getirilebilir veya motora fazladan bir güç vermek için de kullanılabilir. Öyleyse, otomotiv için termoelektrik teknolojisinin parlak bir geleceğe sahip olduğu ve bu konuda araştırmalara devam edilmesi gerektiği söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Hsiao Y. Y., Chang W. C., Chen S. L., A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine, *Energy International Journal*, 2010, **35**, 1447-1454.
- [2] Martins J., Goncalves L., Antunes J., Brito F., Thermoelectric Exhaust Energy Recovery with Temperature Control through Heat Pipes, *SAE Technical Paper*, DOI:10.4271/2011-01-0315.
- [3] Li M., Thermoelectric Generator Based DC-DC Conversion Network For Automotive Applications, Master of Science Thesis, KTH Information and Communication Technology, Stocholm, Sweden, 2011.
- [4] Kaya A. Y., Egzoz Gazındaki Isı ile Çalıştırılan Termoelektrik Sistemin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Elektronik Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, Isparta, 2010, 268716.
- [5] Shen L., Xiao F., Chen H., Wang S., Investigation of a novel thermoelectric radiant air conditioning system. *Energy and Buildings*, 2013, **59**, 123-132.
- [6] Crane D. T., Jackson G. S., Optimization of cross flow heat exchangers for thermoelectric waste heat recovery, *Energy Conversion and Management*, 2004, **45**, 1565–1582.
- [7] Berber F. S., Küçükkömürler A., Kendinden Termal Kaynaklı Mikroişlemci Soğutma Ünitesi, *Ulusal Teknik Eğitim, Mühendislik ve Eğitim Bilimleri Genç Araştırmacılar Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 20-22 Haziran 2007.
- [8] Saidur R., Rezaei M., Muzammil W. K., Hassan M. H., Paria S., Hasanuzzaman M., Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, **16**, 5649–5659.
- [9] Mori M., Yamagami T., Oda N., Hattori M., Current Possibilities of Thermoelectric Technology Relative to Fuel Economy, *SAE Technical Paper*, DOI:10.4271/2009-01-0170.
- [10] Birkholz U., Grob E., Stohrer U., Voss K., Conversion of waste exhaust heat in automobiles using FeSi₂ thermoelements, *7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion*, Arlington, USA, 16-18 March 1988.
- [11] Hussain Q. E., Brigham D. R., Maranville C. W., Thermoelectric exhaust heat recovery for hybrid vehicles, *Advanced Hybrid Vehicle Powertrains-Hybrid Engine&Emissions, Thermo-Electric Conversion*, Detroit, MI, USA, April 2009.
- [12] Stobart R., Weerasinghe R., Heat Recovery and Bottoming Cycles for SI and CI Engines - A Perspective, *SAE Technical Paper*, DOI:10.4271/2006-01-0662.

- [13]Matsubara K., The performance of a segmented thermoelectric converter using Yb-based filled skutterudites and Bi₂Te₃-based materials, *Material Research Society (MRS) Symposium*, Boston, Massachusetts, USA, 26-29 November 2001.
- [14]Matsubara K., Development of a high efficient thermoelectric stack for a waste exhaust heat recovery, *Proceedings ICT'02. 21st International Conference on thermoelectrics*, Long Beach, CA, USA, 25-29 August 2002.
- [15]Trottmann M., Weidenkaff A., Thermoelectric Waste Heat Recovery, Bern University of Applied Sciences, http://www.ti.bfh.ch/uploads/media/2009_140_thermoelectric.pdf (Ziyaret tarihi: 12 Temmuz 2015).
- [16]Bass J. C., Campana R. J., Elsner N. B., Thermoelectric generator for diesel engines, *Proceedings of the 1990 Coatings for Advanced Heat Engines Workshop*, Castine, Maine, USA, 6-9 August 1990.
- [17]Bass J. C., Campana R. J., Elsner N. B., Thermoelectric generator for diesel trucks, *Proceedings of the 10th International Conference on Thermoelectrics*, Cardiff, Wales, UK., 10-12 September 1991.
- [18]Bass J. C., Elsner N. B., Leavitt A., Performance of the 1 KW thermoelectric generator for diesel engines, *Proceedings of the 13th International Conference on Thermoelectrics*, New York, USA, 1995.
- [19]Bass J. C., Thermoelectric generator for motor vehicle, 1997, U.S. Patent No.US5625245, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [20]Bass J. C., Elsner N. B., Leavitt F. A., Method for fabricating a thermoelectric module with gapless eggcrate, 1999, U.S. Patent No. US5856210, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [21]Wojciechowski K., Merkisz J., Fuć P., Lijewski P., Schmidt M., Study of Recovery of Waste Heat From the Exhaust of Automotive Engine, AGH University of Science and Technology, Kraków, Poland, 2007.
- [22]Thacher E. F., Helenbrook B. T., Kari M. A., Richter C. J., Testing Of An Automobile Exhaust Thermoelectric Generator in A Light Truck, *Journal of Automobile Engineering*, DOI: 10.1243/09544070JAUTO51.
- [23]Crane D., LaGrandeur J., Jovovic V., TEG on-vehicle performance and model validation and what it means for further TEG development, *Journal of Electronic Materials*, 2012, **42**, 1582–1591.
- [24]Yang J., Potential applications of thermoelectric waste heat recovery in the automotive industry. *ICT 2005. 24th International Conference on Thermoelectrics*, Clemson, South Carolina, USA, 19-23 June 2005.
- [25]Zhang X., Chau K. T., An automotive thermoelectric-photovoltaic hybrid energy system using maximum power point tracking, *Energy Conversion and Management*, 2011, **52**, 641–647.

- [26]Hatami M., Ganji D. D., Gorji-Bandpy M., A review of different heat exchangers designs for increasing the diesel exhaust waste heat recovery, *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2014, **37**, 168–181.
- [27]Liu X., Deng Y. D., Zhang K., Xu M., Xu Y., Su C. Q., Experiments and simulations on heat exchangers in thermoelectric generator for automotive application, *Applied Thermal Engineering*, 2014, **71**, 364-370.
- [28]Shengqiang B., Hongliang L., Ting W., Xianglin Y., Xun S., Numerical and experimental analysis for exhaust heat exchangers in automobile thermoelectric generators, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2014, **4**, 99–112.
- [29]Liu X., Deng Y. D., Li Z., Su C. Q., Performance analysis of a waste heat recovery thermoelectric generation system for automotive application, *Energy Conversion and Management*, 2015, **90**, 121-127.
- [30]Ikoma K., Munekiyo M., Furuya K., Kobayashi M., Izumi T., Shinohara K., Thermoelectric module and generator for gasoline engine vehicles, *Proceedings of The International Conference on Thermoelectrics*, Nagoya, Japan, 24-28 May 1998.
- [31]LaGrandeur J., Crane D., Mazar S., Eder A., Automotive waste heat conversion to electric power using skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe, *Proceedings of the international conference on thermoelectrics*, Beijing, China, 6-10 August 2006.
- [32]Takanose E., Tamakoshi H., The development of thermoelectric generator for passenger car, *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Thermoelectrics*, Yokohama, Japan, 9–11 November 1993.
- [33]Ikoma K., Munekiyo M., Furuya K., Kobayashi M., Izumi T., Shinohara K., Thermoelectric generator for gasoline engine vehicles using Bi₂Te₃ modules, *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*, 1999, **63**, 1475–1478.
- [34]Schlichting A., Anton S., Inman D. J., Motorcycle waste heat energy harvesting, *Proceedings of the SPIE Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, DOI:10.1117/12.775783.
- [35]Shen L., Xiao F., Chen H., Wang S., Investigation of a novel thermoelectric radiant air-conditioning system, *Energy and Buildings*, 2013, **59**, 123–132.
- [36]Rowe D. M., Thermoelectric Waste Heat Recovery as a Renewable Energy Source, *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*, 2006, **1**, 13-23.
- [37]Snyder G. J., Small Thermoelectric Generators, *The Electrochemical Society Interface*, https://www.electrochem.org/dl/interface/fal/fal08/fal08_p54-56.pdf (Ziyaret tarihi: 18 Temmuz 2015).



EKLER

EK-A. MOTOR PERFORMANS TEST SONUÇ RAPORU

1. Motor Özellikleri

Tablo A.1. Motor özellikleri tablosu

| | MAN D0836 LOH 72 Euro VI | Deutz TCD 2013 L06 4V Euro V |
|----------------------|-------------------------------------|---|
| Motor Tipi | 6 Silindir | 6 Silindir |
| Hacim | 6871 cc | 7150 cc |
| Maksimum Güç | 213kW (290 HP) @2300 devir/dakika | 213 kW (290 HP) @ 2100 devir/dakika |
| Maksimum Tork | 1100Nm @1200-1750 devir/dakika | 1200 Nm @ 1050- 1650 devir/dakika |

2. Sonuçlar

Tablo A.2. MAN motorunda elde edilen egzoz sıcaklığı

| MAN D0836 LOH 72 Euro VI | | |
|---------------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| | Dış Sıcaklık (°C) | Egzoz Sıcaklık (°C) |
| Maksimum Güç (2300 rpm, 2. Vites) | 26,1 | 379 |
| Maksimum Tork (1700 rpm, 2. Vites) | 27,5 | 442 |

Tablo A.3. DEUTZ motorunda elde edilen egzoz sıcaklığı

| DEUTZ TCD 2013 L06 4V Euro V | | |
|---|--------------------------|----------------------------|
| | Dış Sıcaklık (°C) | Egzoz Sıcaklık (°C) |
| @1282 rpm, 2. Vites | 12,6 | 476,0 |
| @1670 rpm, 2. Vites | 12,6 | 526,0 |
| @2115 rpm, 2. Vites | 13,0 | 520,0 |

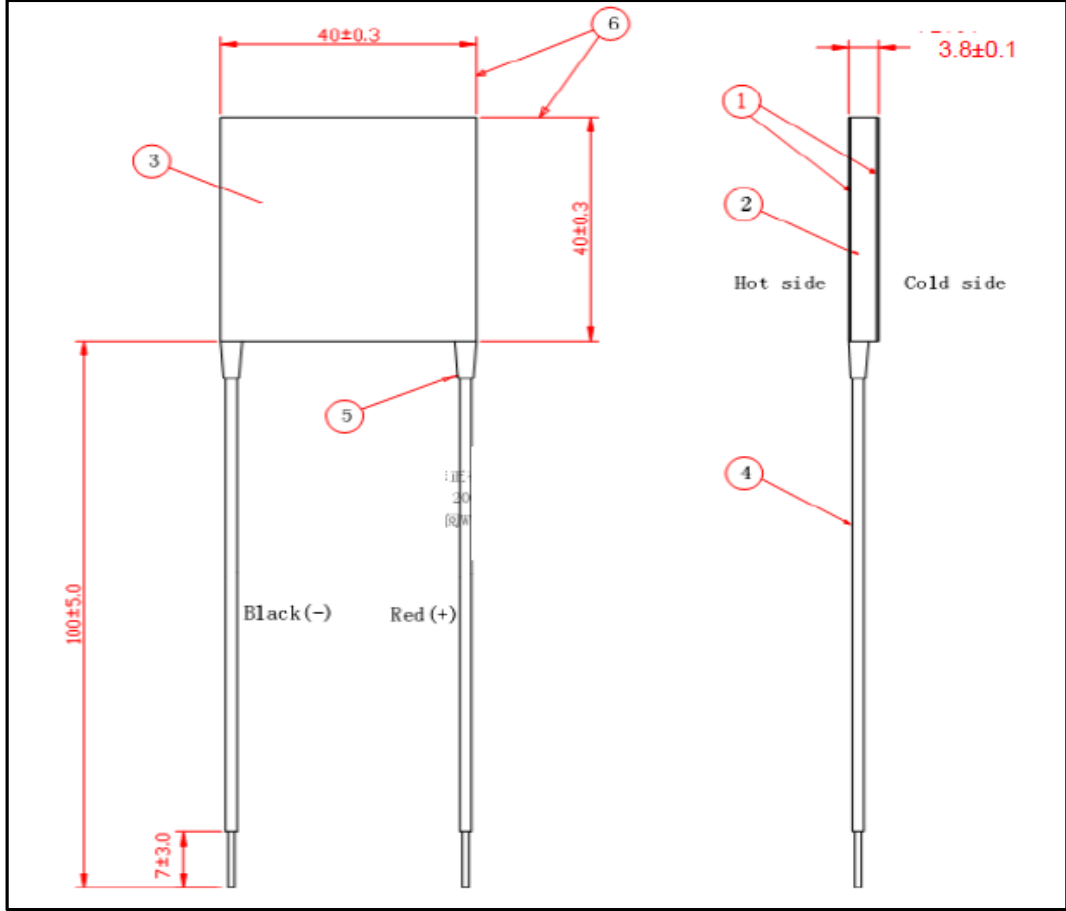
EK-B. TEC1-12706 TEKNİK ÖZELLİKLER

1. Performans Özellikleri

Tablo B.1. TEC1-12706 özellikleri

| ÖZELLİKLER | | AÇIKLAMALAR |
|---------------------|------------------------|------------------------------------|
| İç direnç | 2,05 $\Omega \pm 10\%$ | |
| I_{maks} | 6,0 A | 68 °C'deki (T_{maks}) maksimum |
| V_{maks} | 15,4 V | 68 °C'deki (T_{maks}) maksimum |
| T_h | 27 °C | |
| Q_{maks} | 53,0 W | |
| ΔT_{maks} | 68 °C | |
| Lehim erime noktası | 138 °C | |
| Maksimum basınç | 1 MPa | |

2. Teknik Resim

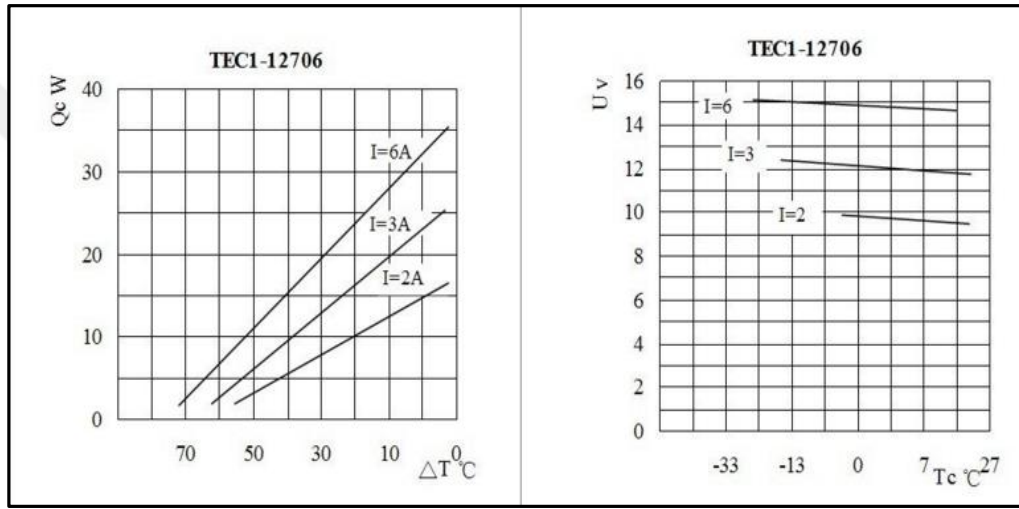


Şekil B.1. TEC1-12706 teknik resmi

Tablo B.2. TEC1-12706 bileşenleri

| No | Parça | Özellik |
|----|---------------------|--|
| 1 | Seramik Levha | 96% Al ₂ O ₃ , beyaz |
| 2 | Mühür | Silikon kauçuk malzeme |
| 3 | Marka | Soğuk yüzeye vurulan marka numarası |
| 4 | Giriş-çıkış kablosu | AWG#20 standartında |
| 5 | Bağlantı kapağı | Silikon kauçuk malzeme |
| 6 | Boyutlar | |

3. Performans Eğrileri



Şekil B.2. TEC1-12706 performans değerleri

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Esen D., **Kaya M.**, Zeybekođlu B., Experimental Analysis of The Thermoelectric System Operated by The Heat of The Exhaust Gas, *4th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress & Exhibition*, Mugla, Turkey, 24-27 April 2014.
- [2] Esen D., **Kaya M.**, Experimental Analysis of Electrical Energy Producing Using the Waste Heat of Exhaust Gas by the Help of Thermoelectric Generator, *17th International Conference on Renewable Energy Researches and Applications*, Paris, France, 20-21 July 2015.



ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Afyonkarahisar'ın Dinar ilçesinde doğdu. İlköğrenimini Dinar'da ve orta öğrenimini Kastamonu'da tamamladı. Askeri lise sınavlarını kazanarak İzmir Maltepe Askeri Lisesi'nde 2000-2004 yılları arasında eğitim ve öğretim gördü. 2004-2008 yılları arasında Ankara Kara Harp Okulu'nda eğitimini tamamlayıp sistem mühendisliği unvanıyla mezun oldu.

Daha sonra sırasıyla 2008-2009 Eğitim-Öğretim yılında yatay geçiş yaptığı Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde, 2009-2010 Eğitim-Öğretim yılında Instituto Superior de Engenharia de Coimbra'da (Portekiz) makine mühendisliği okudu. 2010 yılında makine mühendisi unvanıyla mezun oldu.

2011-2013 yılları arasında Assan Hanil Otomotiv Sanayi AŞ'de proje mühendisi olarak çalıştı. Halen Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi AŞ'de proje mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.