



# İçten yanmalı motorların egzoz sistemleri için sıvı soğutmalı bir termoelektrik jeneratör sistemi tasarımı ve soğutucu akışkan miktarının geri kazanım performansına etkisinin deneysel incelemesi

## A design of a liquid cooling thermoelectric generator system for the exhaust systems of internal combustion engines and experimental study on the effect of refrigerant fluid quantity on recovery performance

Mehmet Akif KUNT<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye.  
mehmetakif.kunt@dpu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 23.08.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 05.06.2018

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.89137

Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Termoelektrik jeneratörler (TEJ) içten yanmalı motorların egzoz sistemlerinde atık enerjinin geri kazanımı için önemli bir alternatiftir. Bu çalışmada içten yanmalı motorların egzoz sistemlerinde atık ısının geri kazanımı için kullanılacak sıvı soğutmalı bir termoelektrik jeneratör sistemi tasarlanmış ve soğutucu akışkan miktarının geri kazanım sistemine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Soğutucu akışkan miktarının artması modül yüzeyleri arası sıcaklık farkını arttırmıştır. 4 adet TEJ modül kullanan geri kazanım sisteminde  $T_H=350\text{ }^\circ\text{C}$ ' de 0.75, 1, 1.25 l/dk. akış miktarlarında sırasıyla 9.38, 10.05, 10.63 V yüksüz gerilim ve 1.7, 1.97, 2.16 W güç elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Atık enerji, Termoelektrik jeneratör, İçten yanmalı motor, Egzoz sistem

### Abstract

Thermoelectric generators (TEG) are an important alternative to the recovery of waste heat in the exhaust system of an internal combustion engine. In this study, a liquid-cooled thermoelectric generator system for waste heat recovery in exhaust systems of internal combustion engines was designed and the effect of the amount of refrigerant on the recovery system was experimentally investigated. The increase in the amount of refrigerant increases the temperature difference between the module surfaces. In the recovery system using four TEG modules, at  $T_H=350\text{ }^\circ\text{C}$  and flow rates of 0.75, 1, 1.25 l/min flow rate 9.38, 10.05, 10.63 V unloaded voltage and 1.7, 1.97, 2.16 W power were obtained respectively.

**Keywords:** Waste energy, Thermoelectric generator, Internal combustion engine, Exhaust system

## 1 Giriş

Günümüzde üretilen yeni nesil taşıtlara bakıldığında yakıt tüketiminin, taşıt ağırlığının sürekli azaltıldığı ve daha tasarruflu araçların üretildiği görülmektedir. Araç motoru üzerindeki atık ısı kaynaklarından elektrik üretilmesi ve üretilen elektrik enerjisinin alternatör yükü ve ağırlığını azaltması, alıcıları beslemesi de daha verimli taşıt üretimi amacıyla uygun bir teknolojidir. Araç elektrik tüketimi sürüş performansı ve konfor seviyesinin artmasıyla daha da artmaktadır. Taşıtların gündün güne artan elektrik tüketimlerini karşılamak için daha büyük ve ağır alternatörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılan alternatörlerin verimi %55-65 arasında değişmekte olup motor çıkış milinden %5 güç tüketmektedir [1]. Taşıtlarda atık ısı geri kazanım sistemlerinin geliştirilmesiyle alternatör ihtiyacı azalacak dolayısıyla yakıt tüketimi de beraberinde düşecektir. İçten yanmalı motorlarda piston üzerinde elde edilen ısı gücün yaklaşık %70'i egzoz ve soğutma yoluyla kaybedilmektedir [2]. Motor sürtünme kayıpları sonrasında motor çıkış milinde %25 oranında bir faydalı enerji oluşmaktadır [3]. Araç egzoz gazından atılan ısının miktarının yüksek olması, geri kazanım durumunda araçlardaki bataryayı şarj etme potansiyelinin olduğunu ve bazı alıcıları besleyebileceğini göstermektedir. Araçın düşük motor devirlerinde çalışması alternatörlerin verimi bakımdan olumsuz bir durumdur. Termoelektrik jeneratör (TEJ) modüller ise egzoz sıcaklığının kısa sürede düşmemesi

sebebiyle daha uzun bir süre ve devirden bağımsız elektrik üretebilmektedirler.

Maksimum çalışma sıcaklıkları dikkate alınarak TEJ modüller son susturucu ile manifold arasında monte edilmelidir [4]. Kış aylarında hava sıcaklığının düşük olması egzoz ile çevre arasında sıcaklık farkını arttırmaktadır. Bu nedenle TEJ'lerin araç enerji tüketiminin arttığı kış dönemlerinde verimleri artmaktadır.

Trottmann ve diğ. VW Touran marka aracın egzoz susturucusu üzerine TEJ monte ederek deneyler yapmıştır. Sistem bimetalik çubukların TEJ modülleri ısı kaynağı ile birleştirmesi sıcaklığın aşırı artması durumunda ayırması prensibine göre çalışmakta ve %5 oranında yakıt tasarrufu sağlamaktadır [5]. Atık ısılardan geri kazanımı konusunda yapılan bazı çalışmalarda egzoz ısısından faydalanılarak taşıtın yakıt ekonomisinin %20 artırılabilirdiği, bu enerjinin %10'luk bir kısmının ise elektrik enerjisine dönüştürülebildiği görülmüştür [6]-[10].

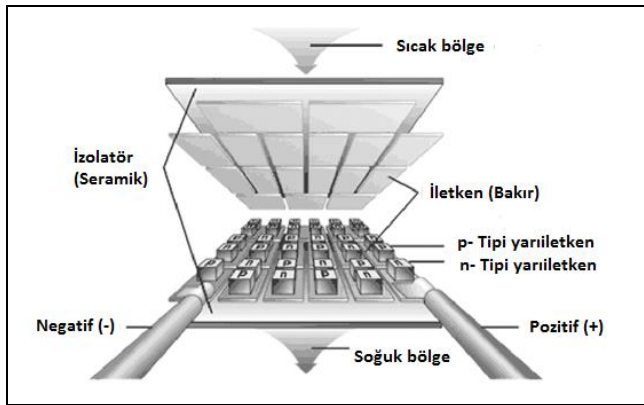
Vieira ve Mota, tez çalışmasında gazlı su ısıtma sistemindeki atık ısıdan geri kazanımla pil şarjı üzerine çalışmıştır. SEPIC (Single-Ended Primary-Inductor Converted) dönüştürücü kullanılmış batarya şarjına uygun giriş voltajı elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 2.3 W elektriksel güç üretilerek litre12V-20Ah'lik bir batarya şarj edilmiştir. Şarj verimini arttırmak için maksimum güç noktası izleme yöntemi kullanılmış ve %34 şarj verimi elde edilmiştir [11]. Thacher ve diğ. 1999 model GMC Sierra 5.3 l V8 bir motorlu araca göre prototip bir termoelektrik egzoz ısı geri kazanım

sistemi tasarlamış, deneyler sonucunda %4-%5.3 arasında yakıt ekonomisi sağlamıştır [12]. Eakburanawat ve Boonyaroonate, maksimum güç noktası izleme yöntemini kullanarak termoelektrik geri kazanımlı batarya şarjı konusunda araştırmalar yapmıştır. Çalışmada TEP1-1264-1-5 TEJ modül, Atmel 89C52 mikro denetleyici kullanılmış 7.99 W elektriksel güç elde edilmiştir. Ayrıca nominal şarja nazaran şarj verimi %15 arttırılmıştır [13]. Kaya, farklı termoelektrik özelliklere sahip 3 farklı TEJ modülü araç egzoz sistemine monte ederek değişken ve sabit sıcaklık farklarına göre yüklü gerilim, akım ve güç değişimlerini incelemiştir. Ayrıca farklı yük dirençlerinin yüklü gerilim, akım ve güce etkisini de araştırmıştır. Modül özellikleri ve deney sonuçlarına göre 12V-60 Ah'lik bir bataryanın şarj edebilmesi için gereken modül sayıları ve maliyet hesaplamaları yapılmıştır [14]. Temizer ve diğ. alüminyum alaşımlı sekizgen bir gövde üzerine termoelektrik jeneratörlü bir atık ısı geri kazanım prototipi geliştirilerek içten yanmalı dizel bir motorun egzoz sistemine uygulanmıştır. Tasarımı yapılan prototipte 40 adet TEJ modül kullanılmış olup, soğuk bölgenin soğutulması motor soğutma suyu ile gerçekleştirilmiştir. Değişen devir ve yük durumuna göre termoelektrik jeneratör sisteminin performansı incelenmiştir. Sistemden 100 Nm motor yükü altında 3500 d/d motor devrinde 156.7 W elektriksel güç ölçülmüştür [15].

Bu çalışmada içten yanmalı motor egzoz sistemleri için sıvı soğutmalı bir egzoz atık ısı geri kazanım sistemi tasarlanmıştır. Soğutucu akışkan debisi değişiminin sabit egzoz sıcaklığında atık ısı geri kazanım performansına etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

### 1.1 TEJ modüllerin yapısı

TEJ'ler elektrik gerilimini arttırmak için p- ve n-tip yarı iletkenler kullanarak elektriksel olarak seri, ısıl genişlemeyi sağlamak için de seramik plakalar yardımıyla termal olarak paralel imal edilmektedir (Şekil 1). TEJ modüller yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluşturularak uçlarına elektrik yükü bağlanması durumunda potansiyel fark üretir ve yükten akım geçişi olur. Elde edilen elektriksel güç TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının artmasıyla birlikte doğru orantılı olarak artmaktadır [16].

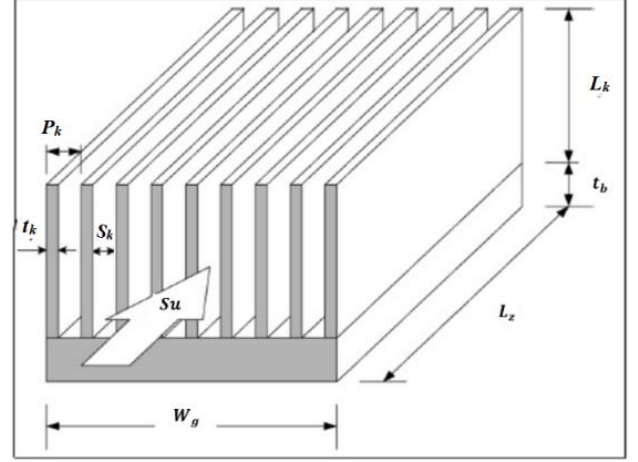


Şekil 1: TEJ'lerin genel yapısı [17].

### 1.2 Soğutma kanatçıklarının tasarımı

Dikdörtgen geometrili kanatçıklar tasarım ve imalat kolaylıkları sebebiyle yaygın kullanımları bulunmaktadır. Geri kazanım sistemi ana gövdesi, modül boyutları ve taşıt üzerindeki konumlandırma hususları dikkate alınarak soğutma kanatçıkları aşağıdaki bağıntılar kullanılarak

boyutlandırılmıştır. Tasarımı yapılan Alüminyum soğutucunun resmi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Tasarımı yapılan Al soğutucu.

Kanatçık sayısı ( $N_f$ )

Kanal sayısı ( $N_k$ )

$$N_k = N_f - 1 \quad (1)$$

Kanatçık genişliği ( $t_k$ )

Soğutucu genişliği ( $W_g$ )

Kanatçık yan yüzeyler arası mesafe ( $P_k$ )

$$P_k = \frac{(W_g - t_k)}{N_k} \quad (2)$$

Kanatçıklar arası mesafe ( $S_k$ )

$$S_k = P_k - t_k \quad (3)$$

Kanatçık yüksekliği ( $L_k$ )

Akışkanın temas ettiği 1 kanalın çevresi ( $P_c$ )

$$P_c = 2L_k + 2S_k \quad (4)$$

Hidrolik çap ( $D_h$ )

$$D_h = \frac{4L_k S_k}{P_c} \quad (5)$$

Akış giriş alanı ( $A_g$ )

$$A_g = S_k L_k N_{knl} \quad (6)$$

Özgün kanatçık yüksekliği ( $L_{k,\text{öz}}$ )

$$L_{k,\text{öz}} = L_k + \frac{t_k}{2} \quad (7)$$

1 Kanatçık çevresi ( $P_k$ )

$$P_k = 2t_k + 2L_k \quad (8)$$

Soğutucu boyu ( $L_z$ )

1 Kanatçık kesit alanı ( $A_k$ )

$$A_k = t_k L_z \quad (9)$$

Toplam kanatçık yüzey alanı ( $A_t$ )

$$A_t = 2N_{knl}L_{k,\text{öz}}L_z \quad (10)$$

Modüllerin toplam yüzey alanı ( $A_{mod,t}$ )

Net yüzey alanı ( $A_{net}$ )

$$A_{net} = A_{mod,t} - (A_k N_f) \quad (11)$$

Toplam efektif yüzey alanı ( $A_{t,e}$ )

$$A_{t,e} = A_t + A_{net} \quad (12)$$

Reynolds sayısı ( $Re$ )

$$Re = \frac{(4 m_w)}{(\mu P_c N_{ch})} \quad (13)$$

( $m_s=0.02$  kg/s,  $\mu_s=0.315 \cdot 10^{-3}$  N s/m<sup>2</sup>)

Nusselt sayısı ( $Nu$ )

$$Nu = (0,664 Re^{1/2})(Pr)^{1/3} \quad (14)$$

(Doymuş suyun Pr sayısı=6.14)

Konvektif taşınım katsayısı ( $h$ )

$$h = \frac{Nu \kappa}{D_h} \quad (15)$$

$$m = \left[ \frac{h P_{face}}{K_{Al} A_k} \right]^{1/2} \quad (16)$$

(Alüminyum kanatçıklar için  $K_{Al}=200$  W/mK) [18]

Kanatçık verimi ( $\eta_k$ )

$$\eta_k = \frac{[\tanh(m L_{k,\text{öz}})]}{(m L_{k,\text{öz}})} \quad (17)$$

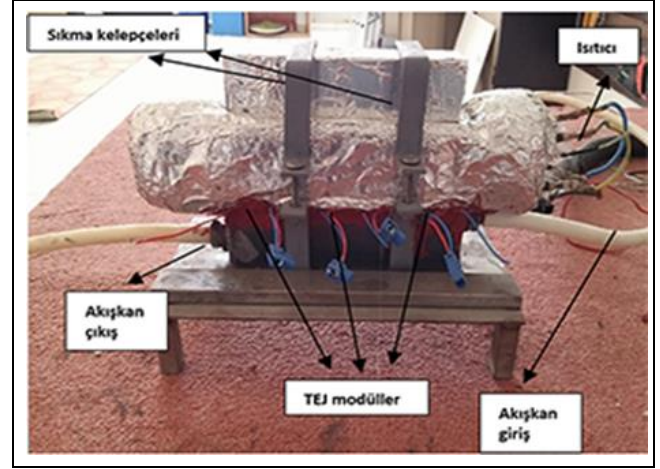
Toplam kanatçık verimi ( $\eta_o$ )

$$\eta_t = 1 - \left[ \frac{A_t}{A_{t,e}} (1 - \eta_k) \right] \quad (18)$$

### 1.3 Termoelektrik jeneratörlü egzoz ısı geri kazanım sistemi

Termoelektrik jeneratörlerin otomobiller üzerinde atık ısıdan elektrik üretebilmeleri için tasarlanmış egzoz ısı geri kazanım sisteminin görünüşü Şekil 3'te gösterilmiştir. Jeneratör modüllerin sıcak kısımları 40x40x1.5 mm boyutlarında alüminyum gövde üzerine, soğuk kısımları ise alüminyum soğutucuların alt kısmına yerleştirilmiştir. Gövde içerisinden geçen egzoz akışkanının ısı termoelektrik jeneratörlerin üzerine transfer edilirken diğer kısım soğutucu akışkan deposundan gönderilen su ile soğutulmaktadır. Birbirlerine seri olarak bağlanan modüllerin uçlarından sıcaklık farkı ölçüsünde potansiyel fark elde edilmektedir. Sisteme giren soğutucu akışkanın sıcaklığı otomobil soğutma sistemlerine benzetilerek 90 °C olarak belirlenmiştir. TEJ modüllerin bağlanmadığı yüzeyler ve egzoz bağlantı uçları ısı kayıplarını azaltmak amacıyla izole edilmiştir. Tabloda gösterilen değerler maksimum verimin elde edildiği  $T_h$  ve  $T_c$  sıcaklıklara göre verilmiştir. Modüllerin içten yanmalı motorların egzoz atık ısısının geri kazanımında kullanılması ve motor soğutma suyu

tarafından soğutulacak olması sebebiyle çalışma sıcaklıkları farklılık göstermektedir.



Şekil 3: Termoelektrik jeneratörlü egzoz ısı geri kazanım sistemi.

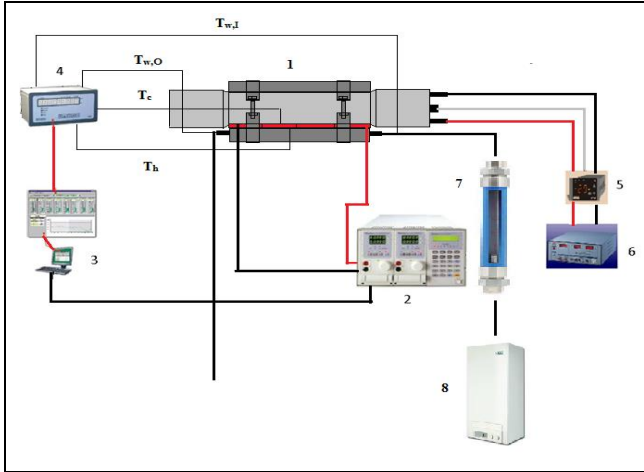
Deneylerde kullanılan TG12-8 TEJ modüllerin teknik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Termoelektrik jeneratörün teknik özellikleri [19].

TEJ	
TEJ modül	TG-12-8-01L
Genişlik x boy x yükseklik (mm)	40 x 40 x 3.6
Sıcak kısım sıcaklığı (°C)	230
Soğuk kısım sıcaklığı (°C)	50
Termal direnç (°C/W)	1.13
Optimum şartlarda yük direnci ( $\eta$ )	3.46
Optimum verim (%)	4.97

## 2 Deney ekipmanlarının tanıtımı

Egzoz ısı geri kazanım sisteminin ana gövdesi 40x40x1.5 mm boyutlarında alüminyum profilden oluşturulmuştur. Sistemde boyutları 40x40x3.6 mm olan 4 adet TG12-8 termoelektrik modül kullanılmıştır. TEJ'in sıcak tarafının sıcaklığının ayarlanabilmesi için "U" tipi ısıtıcı, sıcaklığının sabitlenmesi için ET2011 tip seçilebilir çıkışlı PID sıcaklık kontrol cihazı seçilmiştir. Soğuk tarafın sıcaklığının ayarlanabilmesi için sıcaklığı ayarlanabilir soğutucu akışkan deposu kullanılmıştır. Isı kayıplarını azaltmak için sistemin ön ve arka kısımları yalıtılmıştır. Sıcak ve soğuk tarafların sıcaklıklarını ölçmek için ELİMKO E-TC15-1K1PT tip termokupl sıcaklık ölçerler soğuk tarafta modüller ile alüminyum soğutucu arasındaki kanallara, sıcak tarafta ise ısıtıcı ile birlikte sistemin merkezine yerleştirilmiştir. Ölçülen sıcaklık değerleri ELİMKO E680 tarayıcı cihazdan geçirilerek ölçüm bilgisayarına aktarılmıştır. Tüm ölçüm noktalarında sabit sıcaklık koşulları elde edildikten sonra ölçümler yapılmıştır. Soğuk ve sıcak tarafın sıcaklıkları TEJ'ler ile alüminyum soğutma kanatçıkları sistemin gövdesi üzerine sıkma kelepçeleri ile bağlanmıştır. Kullanılan TEJ'lerin yüzeylerindeki ısı transferini arttırmak amacıyla her iki yüzeye iletken macun sürülmüştür. Açık devre voltajı, yüklü gerilim, akım, güç değerlerinin ölçülerek kaydedilmesi ve dış yük direncinin modül iç direncine eşitlenebilmesi için CHROMA 6310A marka elektronik yük tercih edilmiştir. Şekil 4'te deney düzeneğinin görünüşü görülmektedir.

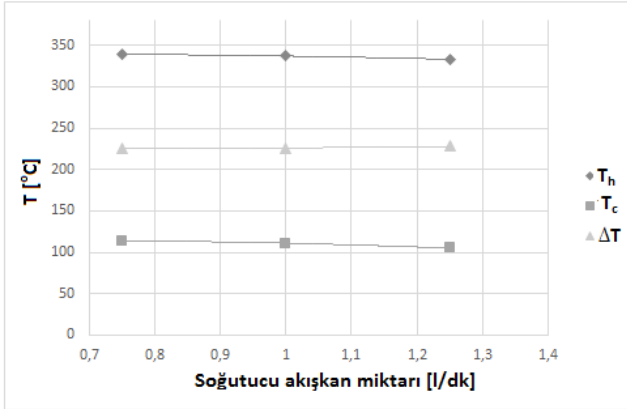


1: TEJ ünitesi, 2: DC Elektronik yük, 3: Bilgisayar, 4: Tarayıcı, 5: PID Sıcaklık kontrol cihazı, 6: Güç kaynağı, 7: Akış ölçer, 8: Sıcaklığı ayarlanabilir soğutucu akışkan deposu.

Şekil 4: Deney düzeneğinin görünüşü.

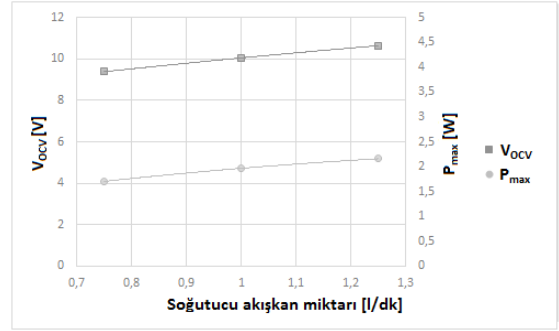
### 3 Test sonuçlarının değerlendirilmesi

Akış miktarı değişimine göre sıcaklık değişim grafiği Şekil 5'te verilmiştir.  $T_H$  egzoz iç sıcaklığı sabit olup  $350\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Akış miktarının artmasıyla birlikte  $T_h$  ve  $T_c$  modül yüzey sıcaklıkları azalmış,  $\Delta T$  sıcaklık farkı ise artmıştır. Akış miktarı arttıkça soğuk yüzey kısmındaki sıcaklık azalması sıcak yüzeye göre daha fazla meydana gelmiştir. Bu durum modülde kullanılan p ve n tipi yarı iletkenlerin farklı termal iletkenlik değerlerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır.  $1.25\text{ l/dk}$ . akış miktarında maksimum  $228\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık farkı elde edilmiştir.  $0.75, 1, 1.25\text{ l/dk}$ . akış miktarlarında sırasıyla  $225, 226, 228\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık farkı elde edilmiştir. Akış miktarının artması sıcaklık farkını arttırmıştır. Deney sonuçlarına benzeyen teorik sonuçlar Esarte'nin çalışmasında da ifade edilmiştir [20].



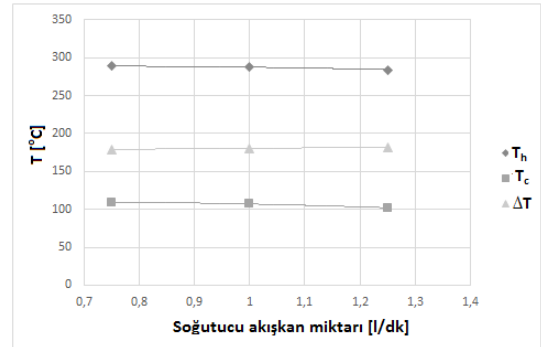
Şekil 5: Akış miktarı değişimine göre sıcaklık değişim grafiği ( $T_H=350\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Akış miktarı değişimine göre  $V_{ocv}$  ve  $P_{max}$  değişim grafiği Şekil 6' da verilmiştir. Akış miktarının artması özellikle soğuk yüzeyden atılan ısı miktarını arttırmış, buna bağlı olarak sıcaklık farkı da artmıştır. Sıcaklık farkının artması  $V_{ocv}$  ve  $P_{max}$  değerini arttırmıştır. Yapılan deneylerde maksimum  $1.25\text{ l/dk}$ . akış miktarında  $V_{ocv}=10.63\text{ V}$ ,  $P_{max}=2.16\text{ W}$  güç elde edilmiştir.  $0.75, 1, 1.25\text{ l/dk}$ . akış miktarlarında sırasıyla  $9.38, 10.05, 10.63\text{ V}$  yüksüz gerilim ve  $1.7, 1.97, 2.16\text{ W}$  güç elde edilmiştir. Akış miktarının artması elde edilen güç değerini %26, yüksüz gerilim değerini ise %13 arttırmıştır.



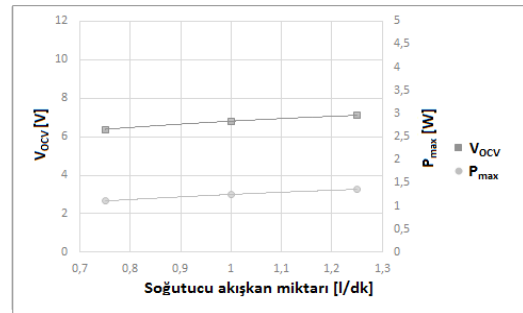
Şekil 6: Akış miktarı değişimine göre  $V_{ocv}$  ve  $P_{max}$  değişim grafiği ( $T_H=350\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Akış miktarı değişimine göre sıcaklık değişim grafiği Şekil 7'de verilmiştir.  $T_H$  sıcaklığı  $300\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Akış miktarının artmasıyla birlikte  $T_c$  sıcaklığı daha fazla azalmış,  $\Delta T$  sıcaklık farkı ise artmıştır.  $1.25\text{ l/dk}$ . akış miktarında maksimum  $182\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık farkı elde edilmiştir.  $0.75, 1, 1.25\text{ l/dk}$ . akış miktarlarında sırasıyla  $179.1, 180.3, 182\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık farkı elde edilmiştir. Deney yapılan  $T_H$  sıcaklıklarında akış debisinin artırılması mümkündür. Ancak, sistemin araç üzerinde uygulaması durumunda akışkanı pompalayan pompadan çekilen güç artacağı için sistem verimi azalacaktır.



Şekil 7: Akış miktarı değişimine göre sıcaklık değişim grafiği ( $T_H=300\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Akış miktarı değişimine göre  $V_{ocv}$  ve  $P_{max}$  değişim grafiği Şekil 8' de verilmiştir. Akış miktarının artması  $V_{ocv}$  ve  $P_{max}$  değerini arttırmıştır. Yapılan deneylerde maksimum  $1.25\text{ l/dk}$ . akış miktarında  $V_{ocv}=7.1\text{ V}$ ,  $P_{max}=1.36\text{ W}$  güç elde edilmiştir.  $T_H$  deney sıcaklığının azalması ile birlikte aynı akış miktarı için daha düşük sıcaklık farkının oluşması sebebiyle daha düşük gerilim ve güç değerleri elde edilmiştir.  $0.75, 1, 1.25\text{ l/dk}$ . akış miktarlarında sırasıyla  $6.38, 6.8, 7.1\text{ V}$  yüksüz gerilim ve  $1.11, 1.25, 1.36\text{ W}$  güç elde edilmiştir. Akış miktarının artması elde edilen güç değerini %23, gerilim değerini ise %11 arttırmıştır.



Şekil 8: Akış miktarı değişimine göre  $V_{ocv}$  ve  $P_{max}$  değişim grafiği ( $T_H=300\text{ }^\circ\text{C}$ ).



Araç üzerinde yapılan şarj işlemi; alternatör ve regülâtörden oluşan ve motor çalışırken yapılan bir işlemdir. Bataryanın şarj edilebilmesi için sabit voltaj altında 13.8-14.2 V arasında bir gerilime ihtiyaç vardır. Bataryayı şarj etmek için gerekli olan şarj akımı akü kapasitesinin 1/10-1/20'si arasındadır. Deney sonuçlarına göre ( $T_H = 350$  °C) 9 adet seri bağlı 6 adet paralel kol bağlantısı yapılarak toplam 54 adet TEJ modülün kullanılmasıyla 12 V 40 Ah kapasiteli araç aküsünün şarj edilmesi mümkündür.

#### 4 Sonuçlar ve değerlendirme

Yapılan çalışmada içten yanmalı motorların egzozlarında kullanılacak sıvı soğutmalı bir atık ısı geri kazanım sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin araç üzerindeki uygulamasında soğuk kısmının otomobil radyatör soğutma suyu tarafından beslenmesi planlanmıştır. Akış miktarının artmasıyla birlikte  $T_h$  ve  $T_c$  sıcaklığı azalmış,  $\Delta T$  sıcaklık farkı ise artmıştır. Akış miktarı arttıkça soğuk yüzey kısmındaki sıcaklık azalması sıcak yüzeye göre daha fazla meydana gelmiştir. Bu durum literatürdeki teorik sonuçlarla uyumludur.

Soğutucu akış miktarının artması  $V_{ocv}$  ve  $P_{max}$  değerini arttırmıştır. Sabit  $T_H$  sıcaklığında soğutucu akışkan miktarının artması sistemden elde edilen  $V_{ocv}$  ve  $P_{max}$  değerini arttırmıştır.  $T_H = 350$  °C'de soğutucu akışkan miktarının artması elde edilen güç değerini %26, gerilim değerini ise %13 arttırmıştır.  $T_H = 300$  °C'de soğutucu akışkan miktarının artması elde edilen güç değerini %23, gerilim değerini ise %11 arttırmıştır. Deney yapılan  $T_H$  sıcaklıklarında akış debisinin artırılması mümkündür. Ancak bu durumda akışkanı pompalayan çekilen güç artacağı için sistem verimi azalacaktır. Araç üzerindeki uygulamalarda motor hızının yükseltilmesi ile soğutucu akışkan debisinin ve egzoz sıcaklığının artırılması mümkündür. Bu durumda egzoz atık ısı geri kazanım verimi artacaktır. Sabit devir sayısında motor yükünün artırılması ise soğutucu akışkan debisini değiştirmeyecek ancak egzoz sıcaklığının artmasına neden olacaktır. Egzoz sıcaklığının artması da egzoz atık ısı geri kazanım verimini arttıracaktır.

Elde edilen performans değerleri 4 adet TEJ kullanılarak elde edilmiştir. Literatürde kullanılan modül sayılarına göre deney sonuçları değerlendirildiğinde 54 adet TEJ modül kullanılması durumunda otomobil bataryalarını şarj edebilen, aydınlatma sistemlerinde kullanılabilen bir geri kazanım sistemi tasarlanmıştır. Kullanılacak modül sayısı verimi daha yüksek, ekonomik TEJ'lerin kullanılmasıyla azalacaktır.

#### 5 Teşekkür

Bu makale Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeler Birimi (Proje No: 2015-110) tarafından desteklenmiştir. Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi Birimine teşekkürlerimizi sunarız

##### 5.1 Kısaltmaların listesi

$P_{max}$	: Maksimum güç	(W)
$T$	: Sıcaklık	(°C)
$T_H$	: Egzoz iç sıcaklığı	(°C)
$T_h$	: Modül sıcak yüzey sıcaklığı	(°C)
$T_c$	: Modül soğuk yüzey sıcaklığı	(°C)
$V_{ocv}$	: Açık devre voltajı	(V)
$\Delta T$	: Sıcaklık farkı	(°C)

#### 6 Kaynaklar

- [1] Ramesh KC, Sonthalia A, Goel R. "Experimental study on waste heat recovery from an internal combustion engine using thermoelectric technology". *Center of Excellence for Automotive Research, VIT University*, 15(4), 1011-1022, 2011.
- [2] Haidar JG, Ghojel JI, "Waste heat recovery from the exhaust of low-power Diesel engine using fabrication and evaluation of SiGe/electrode". *16<sup>rd</sup> International Conference on Thermoelectrics*, Dersden, Germany, 14-28 May 1998.
- [3] Kunt MA, "İçten yanmalı motor atık ısılarının geri kazanımında termoelektrik jeneratörlerin kullanımı". *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(2), 192-203, 2016.
- [4] Vazquez J, Miguel A. Palacios R, Arenas A, "State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles". *7<sup>rd</sup> European Workshop on Thermoelectrics*, Pamplona, Spain, 3-4 October 2008.
- [5] Green Car Congress. "Thermoelectric System for Waste Heat Recovery in Cars". <http://www.greencarcongress.com/2010/04/teg-20100406.html> (04.04.2018).
- [6] Stabler F. "Automotive applications of high efficiency thermoelectrics". *Proceedings of DARPA / ONR / DOE High Efficiency Thermoelectric Workshop*, San Diego, CA, USA, 24-27 March 2002.
- [7] Fairbanks J. "DOE's Launch of High-Efficiency Thermoelectrics Projects". *10<sup>rd</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference*, San Diego, California, 29 August-2 September 2004.
- [8] Kadota M, Yamamoto K. "Advanced transient simulation on hybrid vehicle using Rankine cycle system". *SAE International Journal of Engines*, 1(1), 240-247, 2009.
- [9] Bell L. "Recovering waste heat with thermoelectric systems". *Cooling-Heating-Generating Power Science*, 321(5895), 1457-1461, 2008.
- [10] Bass JC, Elsner NB, Leavitt FA. "Performance of the 1 kW thermoelectric generator for diesel engines". *13<sup>rd</sup> International Conference on Thermoelectrics*, Kansas City, Kansas, USA, 30 August-1 September 1994.
- [11] Vieira JAB, Mota AM. "Thermoelectric generator using water gas heater energy for battery charging". *IEEE International Conference on Control Applications*, Saint Petersburg, Russia, 8-10 July 2009.
- [12] Thacher EF, Helenbrook BT, Kari MA, Richter CJ. "Testing of an automobile exhaust thermoelectric generator in a light truck". *Proc. IMechE Part D*, 221(1), 95-107, 2006.
- [13] Eakburanawat J, Boonyaroonate I. "Development of a thermoelectric battery-charger with microcontroller-based maximum power point tracking technique". *Applied Energy*, 83(7), 687-704, 2006.
- [14] Kaya AY. Egzoz Gazındaki Isı İle Çalıştırılan Termoelektrik Sistemin Deneysel İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2010.
- [15] Temizer İ, İlkılıç C. "İçten yanmalı dizel motorunun atık egzoz gazı enerjisi kullanılarak elektrik enerjisi üretimi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 330-336, 2017.
- [16] Chen M, Rosendahl LA, Condra TJ, Pedersen JK. "Numerical modelling of thermoelectric generators with varying material properties in a circuit simulator". *IEEE Transactions on Energy Conversion*; 24(1), 112-124, 2009.

- [17] Ahıska R, Dislitas S, Ömer G. "A new method and computer-controlled system for measuring the time constant of real thermoelectric modules". *Energy Conversion Management*, 53(1), 314-321,2012.
- [18] Rajput RK. *Heat and Mass Transfer*. 3<sup>rd</sup>. Pub. Tata McGraw-Hill, 2009.
- [19] Marlow Industry. "Technical Data Sheet for TG12-8". [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/547732/Data\\_Sheets/TG12-8.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/547732/Data_Sheets/TG12-8.pdf) (04.04.2018).
- [20] Esarte J, Min G, Rowe DM. "Modelling heat exchangers for thermoelectric generators". *Journal Power Sources*, 93, 72-76, 2001.