




Theoretical Optimization Of The P-N Type Semiconductor Material Pair In Thermoelectric Generator That Achievement Exhaust Waste Heat Recovery

 Ümit TOPALCI^{1,*}  Habib GÜRBÜZ¹  Hüsameddin AKÇAY¹  Selim DEMİRTÜRK² 
¹Suleyman Demirel University Faculty of Engineering Department of Automotive Engineering, 32200, Merkez/ISPARTA

²Uşak University Vocational School of Technical Sciences Automotive Technology Program, 64000, Merkez, Uşak

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 23/04/2020

Revision: 20/06/2020

Accepted: 03/07/2020

Highlights

- Waste Heat Energy
- Thermoelectric Generator
- Matlab-Simulink

Keywords

 Internal Combustion
 Engine
 Exhaust waste heat
 recovery
 Semiconductor material
 Thermoelectric Module
 and Thermoelectric
 Generator

In the study, 4 different p-n pairs were formed for p-n pairs which forming thermoelectric modules, consisting of a combination of 4 different semiconductor materials of type Bi_2Te_3 , $\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{1.7}\text{Te}_3$, $\text{PbSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ and Zn_4Sb_3 used for Thermoelectric Generator that simulated on Matlab/Simulink.

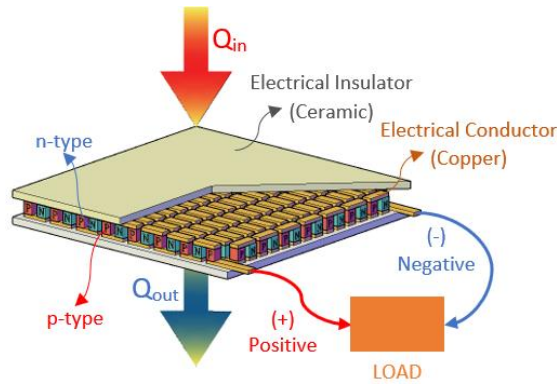


Figure A. Structure of a Thermoelectric Module with Load

Purpose: In this study, a thermoelectric module design using 4 different p-n type semiconductor material properties is simulated. The electrical output parameters of the thermoelectric generator were investigated with the data sets taken under certain engine conditions.





Theory and Methods: Flow diagram of the whole system is presented for the modeled system. The structural properties of the p-n type semiconductor pairs used and the calculations of the thermoelectric generator are given step by step.

Results: The results showed that the TEM structure formed by using p: $\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{1.7}\text{Te}_3$ and n: Bi_2Te_3 type semiconductors among the p-n semiconductor pairs analyzed under the specified motor operating conditions was determined to be the most appropriate p-n pair combination in terms of the output performance of the TEJ.

Conclusion: As a result, the higher electrical output of TEMs created with pn pairs formed from combinations of $\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{1.7}\text{Te}_3$, $\text{PbSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ and Zn_4Sb_3 semiconductor pairs, which are commercially available and used as an alternative to TEMs consisting of only Bi_2Te_3 based pn pairs offers performance. However, Pb-based semiconductor materials used in TEMs show a performance close to Bi-based semiconductor materials available as commercial products in the market. However, Pb-based semiconductor materials performed lower than Sb-based semiconductor materials. In particular, higher electrical output was achieved with combinations of Bi and Sb based semiconductor material alloys instead of Bi_2Te_3 based materials.



Egzoz Atık Isı Geri Kazanımının Gerçekleştirildiği Termoelektrik Jeneratörde P-N Tipi Yarı İletken Malzeme Çiftinin Teorik Optimizasyonu

Ümit TOPALCI^{1,*}  Habib GÜRBÜZ¹  Hüsameddin AKÇAY¹  Selim DEMİRTÜRK² 

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 32200, Merkez/ISPARTA

² Uşak Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Otomotiv Teknolojisi Programı, 64000, Merkez, Uşak

Öz

Bu çalışmada, içten yanmalı motorların egzoz atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için tasarlanmış termoelektrik jeneratörde farklı p-n tipi yarı iletken malzeme kullanımının termoelektrik jeneratörün çıkış parametreleri (yük akımı, yük altındaki çıkış gerilim ve gücü) üzerine etkisi teorik olarak araştırılmıştır. Çalışmada, termoelektrik modülleri oluşturulan p-n çiftleri için Bi₂Te₃, Bi_{0,3}Sb_{1,7}Te₃, PbSe_{0,5}Te_{0,5} ve Zn₄Sb₃ tipi 4 farklı yarı iletken malzemenin kombinasyonundan oluşan 5 farklı p-n çifti oluşturulmuştur. Belirlenen p-n çiftlerinden oluşturulan termoelektrik modüllerinin kullanıldığı termoelektrik jeneratör, daha önceki çalışmada Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik termoelektrik jeneratör modeli kullanılarak analiz edilmiştir. Teorik modelde, iki silindirli buji ateşlemeli bir motorunun 1500-4000 d/d aralığında gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen egzoz gazının sıcaklık ve debisinin yanında motor soğutma suyu sıcaklık ve debi değerleri kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, p-n çiftlerinde sırasıyla Bi_{0,3}Sb_{1,7}Te₃ ve Bi₂Te₃ tipi yarı iletkenler kullanılarak oluşturulan termoelektrik modüller ile termoelektrik jeneratörün elektriksel yük altındaki çıkış gücünün en yüksek seviyede olduğunu göstermiştir. Ayrıca, 20 adet termoelektrik modül seri bağlanarak oluşturulan termoelektrik jeneratör ile 4000 d/d motor devrinde $\Delta T = 162,4$ K sıcaklık farkı ile 86,53 W (çıkış akımı = 1,073 A ve çıkış voltajı = 80,64 V) DC elektrik gücü elde edilmiştir.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/04/2020
Düzeltilme: 20/06/2020
Kabul: 03/07/2020

Anahtar Kelimeler

İçten Yanmalı Motor
Egzoz atık ısı geri kazanımı
Yarı iletken malzeme
Termoelektrik Modül ve
Termoelektrik Jeneratör

Keywords

Internal Combustion
Engine
Exhaust waste heat
recovery
Semiconductor material
Thermoelectric Module
and Thermoelectric
Generator

Theoretical Optimization Of The P-N Type Semiconductor Material Pair In Thermoelectric Generator That Achievement Exhaust Waste Heat

Abstract

In this study, the effect of the use of different p-n type semiconductor materials in the thermoelectric generator designed to convert the exhaust waste heat energy of the internal combustion engines to electrical energy on the output parameters of the thermoelectric generator (load current, output voltage and power under load) is theoretically investigated. In the study, 4 different p-n pairs were formed for p-n pairs, forming thermoelectric modules, consisting of a combination of 4 different semiconductor materials of type Bi₂Te₃, Bi_{0,3}Sb_{1,7}Te₃, PbSe_{0,5}Te_{0,5} and Zn₄Sb₃. The thermoelectric generator using thermoelectric modules created from the determined p-n pairs was analyzed using the theoretical thermoelectric generator model developed in the Matlab/Simulink program in the previous study. In the theoretical model, the engine coolant temperature and flow values were used besides the temperature and flow rate of the exhaust gas obtained from experimental studies carried out in the 1500-4000 rpm range of a two-cylinder spark-ignition engine. The findings show that the thermoelectric generator produced the highest power output of the under the electrical load with the thermoelectric modules which is created using the Bi_{0,3}Sb_{1,7}Te₃ and Bi₂Te₃ type semiconductors for the p-n pairs, respectively. Also, using the thermoelectric generator created by connecting twenty thermoelectric modules in series, 86.53 W (output current = 1.073 A and output voltage = 80.64 V) DC electrical power was obtained by the temperature difference of $\Delta T = 162.4$ K at 4000 rpm engine speed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Konvansiyonel bir içten yanmalı motora (İYM) alınan yakıtın ısı enerjisinin $\approx\%25-35$ 'i çıkış milinde mekanik enerjiye dönüştürülürken $\approx\%30$ 'u soğutma, $\approx\%40$ 'ı egzoz kayıplarına ve geri kalan kısmı ise radyasyon, sürtünme ve yardımcı sistemlere harcanmaktadır [1,2]. Son yıllarda İYM'den soğutma ve egzoz yoluyla kaybettiği $\%70$ 'lik ısı enerjisinin geri kazanılması araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Günümüzde, mikro türbin, organik Rankine çevrimi, kojenerasyon sistemleri, reküperatörler, yoğunlaşma ekonomizerler ve rejeneratif sistemler gibi birçok atık ısı dönüşüm sistemi ile atık ısı enerjisini faydalı enerjiye dönüştürülebilmektedir [3,4,5,6]. Bunların dışında, geçtiğimiz on yılda kullanımı yaygınlaşan termoelektrik jeneratörler (TEJ) ile atık ısı enerjisinin elektrik enerjine dönüştürülmesi mümkün olabilmektedir. TEJ'ler yarı iletken malzemelerden oluşturulan birden fazla termoelektrik modülün (TEM) seri ve/veya paralel olarak bağlanması ile istenilen akım ve voltaj değeri ile birlikte çıkış gücünün elde edildiği hemen hemen hiç bakım gerektirmeyen ve hareketli parçalara sahip olmayan DC elektrik üreteçleridir [7]. TEM'lerin kullanıldığı TEJ sistemleri aracın yakıt ekonomisi üzerinde önemli bir katkıya sahiptir. Ayrıca, uygun TEJ tasarımı ve optimizasyonu çıkış gücünün artırılması açısından oldukça önemli kriterlerdir [8]. TEJ'lerin içten yanmalı motorlu araçlarda kullanılmasına yönelik literatürde birçok teorik ve deneysel çalışma bulunmaktadır.

Sifi ve ark. BiCuSeO tabanlı malzemelerin sonlu elemanlar analizini kapsayan matematiksel modelini inceleyerek TEJ üzerindeki sıcaklık değişimlerini analiz etmişlerdir [9]. Britoa ve ark. taşıtlarda kullanılan TEJ sistemlerinin bir dezavantajı olan sürüş koşullarına bağlı TEM'ler üzerine düşen termal yük değişiminin etkisini inceledikleri çalışmada; TEM'ler arasına değişken iletkenliğe sahip termosifon tabanlı faz dönüşüm tamponu kullanmışlardır. Geliştirdikleri TEJ tasarımı ile TEM'ler üzerine düşen sıcaklık dağılımını homojene yakın düzeye getirmişlerdir. Çalışmada ayrıca, termosifon sistemi içindeki buharlaşma ve yoğunlaşma oranları ile ön şarj basıncının elektrik üretimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu TEJ yapısı ile yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonunda $\%6$ 'ya yakın iyileşme sağlamışlardır [10]. Pacheco ve ark. aşırı ısının yayıcı olarak görev yaptığı iletken alüminyum oluklu borular ile sıcaklık kontrolünün sağlandığı TEJ tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Geliştirdikleri TEJ yapısı ile egzoz yolu üzerinde By-Pass hattı kullanılarak egzoz atık ısı enerjisinin bir kısmını harcamak yerine TEJ'in sıcak ve soğuk taraf eşanjörleri içerisinde mevcut ısıyı yayarak herhangi bir TEM üzerine düşen aşırı termal yükü azaltmışlardır. TEJ tasarımı ile maksimum 1538 W ve ortalama 572 W elektrik gücü üretiminin yanında yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonunda $\%5,4$ 'e yakın iyileşme sağlamışlardır [11]. Massaguer vd. içten yanmalı motorların soğukta ilk hareket, düşük yük ve düşük ortam sıcaklığında çalışması durumunda düşük katalitik konvertör veriminden dolayı yaklaşık $\%20$ oranında artan NO_x, HC ve CO emisyonlarının azaltılması için geliştirdikleri atık ısı geri kazanım sistemi ile motor ve katalitik konvektörün hızlı bir şekilde ısınmasını sağlamışlardır. Geliştirdikleri sistem ile katalizör verimliliğini $\%94$ 'e çıkartarak NO_x emisyonunda $\%94$, HC emisyonunda $\%91$ ve CO emisyonunda $\%97$ azalma sağlanabileceğini tespit etmişlerdir [12]. Wang vd. 3 boyutlu sayısal modelleme yöntemi ile iki farklı eşanjör tasarımı ve farklı TEJ konumlandırmasının kombinasyonu şeklinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında; 3 farklı motor devrinde girdap çubuklu ve girdap çubuksuz eşanjör yapılarının TEJ performansına etkisini analiz etmişlerdir. Çalışma sonucunda, girdap çubuklu eşanjör yapısı ile daha homojen ısı dağılımı ve daha yüksek eşanjör yüzey sıcaklığı elde etmişlerdir [13]. Subramaniam ve ark. tipik bir otomobilde kullanılan TEJ yapısında 5 W kapasiteli 40 adet TEM kullanarak 255 kg/h egzoz gazı kütle akışı ve maksimum 358 °C sıcak taraf sıcaklığı ile 157 V açık devre gerilimi ile 27 W çıkış gücü elde ve $\%0,4$ toplam sistem verimi elde etmişlerdir [14]. Kunt ve Gunes, tipik bir dizel motorun egzoz hattına yerleştirilen iki farklı TEJ sistemini, farklı motor hızlarında test ederek yüksüz elektriksel çıkış gücünü araştırmışlardır. Çalışmalarında, 0,0016 m² yüzey alanına sahip TEM ile 3500 d/d motor devrinde 0,92 W TEJ çıkış gücü elde etmişlerdir. Ayrıca, motor devrinin artışı ile TEM'lerin iç dirençlerinin arttığını ve maksimum 3500 d/d'de iç direncin 11,69 Ω olduğunu tespit etmişlerdir [15]. Quan vd. ADVISOR programını kullanarak TEJ, katalitik konvertör gibi tüm egzoz hattı bileşenlerini modelledikleri çalışmalarında, TEJ çıkışına bağlanan MPPT sisteminde, gözle algoritması, kuadratik interpolasyon ve sabit gerilim takibi yöntemlerini kullanarak TEJ'in çıkış gücündeki değişimleri araştırmışlardır. Sistemin enerji yönetiminde, pillerin şarj durumu ve değişen yüke göre kontrolün sağlandığı bulanık mantık yöntemini kullanmışlardır. Sonuç olarak, şehir içi sürüş şartlarında, TEJ sistemi ile harici yüklerin karşılanması için gerekli elektriksel güç tüketiminin karşılanabildiği ve sistemin toplam veriminin $\%1,3$ civarında olduğunu belirtmişlerdir [16]. Shiriaev ve ark. optimum sıcaklık dağılımının elde

edilmesi için çok bölmeli olarak tasarladıkları TEJ yapısında, DC/DC konvertör kullanılarak motor devri ve elektrik yükü gibi parametrelerden bağımsız olarak TEJ'in çıkış gücünü MPPT yöntemi kullanarak elde etmeye çalışmışlardır. Sonuç olarak, TEJ çıkışında MPPT kullanımının bazı dezavantajlara sahip olduğunu belirtmişlerdir [17]. Quan ve ark. TEJ yapısının kullanıldığı entegre marş/jeneratör sistemli hibrit güç aktarma sistemine sahip bir SUV araçta, TEJ'in verimini ve yakıt tüketimine etkisini incelemişlerdir. Taşıtın farklı sürüş şartları için tespit ettikleri test kriterini kullandıkları ADVISOR programında, TEJ sistemi ve marş/jeneratör sisteminin dinamik özellikleri ve yakıt tüketimini analiz etmişlerdir. Şehir içi ve şehir dışı sürüş test standartlarını simule ettikleri çalışmada; TEJ sisteminin kullanılması ile batarya şarjı %51-75 arasında tutulurken yakıt tüketiminde %25 azalma elde etmişlerdir. Sistemin gerçek yol testlerinde ise, 125 km/h hızda 610 W TEJ çıkış gücü elde etmişlerdir [18]. Thacher ve ark. TEJ sistemine sahip 1999 model GMC-Sierra marke/model kamyonet kullanarak şasi dinamometresine sahip bir rüzgâr tüneline gerçekleştirdikleri testlerde; tasarladıkları TEJ prototipini optimize ederek yalnız TEJ sistemi, izoleli egzoz hattına sahip TEJ sistemi, izoleli egzoz hattı ve motor soğutma sıvısı (MSS) eşanjörüne sahip olmak üzere 3 farklı TEJ sistemi oluşturmuşlardır. Sonuç olarak, TEJ sistemine sahip araçta egzoz izolasyonu ve MSS eşanjörünün TEJ çıkış gücüne önemli etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir [19].

Konu ile ilgili mevcut çalışmaların genelinde, Bi_2Te_3 tabanlı p-n tipi yarı iletken malzemelerin tekli veya sınırlı sayıda örneğini içeren kombinasyonlardan oluşan TEM'lerin TEJ sisteminin elektriksel çıkış performansı üzerine etkileri araştırılmıştır. Ancak, Bi_2Te_3 dışındaki p-n tipi yarı iletken malzemelerin kullanıldığı p-n çifti kombinasyonları ile oluşturulan ve TEM'i oluşturan her bir katmanın boyut ve malzeme özelliklerinin dikkate alındığı TEJ tasarımının elektriksel çıkış performansının incelendiği teorik ve/veya deneysel çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Bu çalışmada, literatürde mevcut bulunan çalışmalardan farklı olarak, Bi_2Te_3 , $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$, $\text{PbSe}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$ ve Zn_4Sb_3 tipi 4 farklı yarı iletken malzemenin kombinasyonundan oluşturulan 5 farklı p-n çiftinin TEM'in çıkış performansı üzerine etkisi teorik bir model ile incelenmiştir. Çalışmada kullanılan teorik modelde, TEM'i oluşturan her bir katmanın boyut ve malzeme özelliğinin dikkate alındığı detaylı bir analiz yapısı kullanılmaktadır. Teorik model ile gerçekleştirilen analizlerde, buji ateşlemeli bir motorunun 1500-4000 d/d aralığında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, TEJ'in sıcak-soğuk taraf akışkanlarının sıcaklık ve debi değerleri kullanılmıştır [20]. Deneysel çalışma sonuçlarına dayalı olarak Matlab/Simulink programında gerçekleştirilen teorik analizler sonucunda, kullanılan p-n tipi yarı iletkenler arasından en yüksek TEJ çıkış performansının elde edildiği p-n çifti tespit edilmiştir..

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Çalışmada, literatürde kapalı formülü Bi_2Te_3 , $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$, $\text{PbSe}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$ ve Zn_4Sb_3 olarak verilen 5 farklı yarı iletken malzeme seçilmiştir. Yarı iletken malzemelerin teknik özellikleri Tablo 1'de ve 4 farklı yarı iletken malzemenin kombinasyonundan oluşturulan 5 farklı p-n çifti yapıları Tablo 2'de verilmiştir.

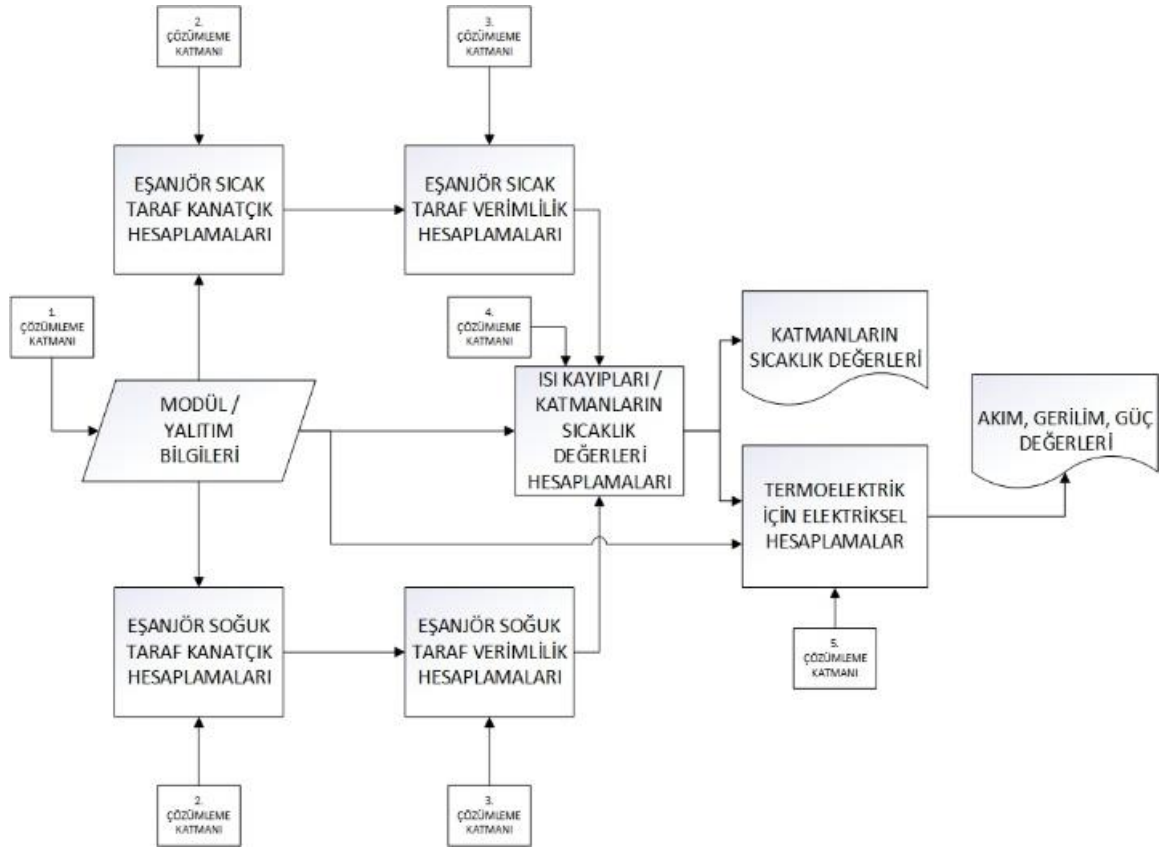
Tablo 1. Teorik modelde kullanılan yarı iletken malzeme özellikleri

p-n tipi yarı iletken		ρ ($\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$)	α ($\mu\text{V/K}$)	κ (W/m-K)
Bi_2Te_3	[22]	$9,2593 \times 10^{-6}$	$-13,5 \times 10^{-5}$	0,92
Bi_2Te_3	[21]	$7,8 \times 10^{-6}$	19×10^{-5}	2,59
$\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$	[22]	$17,543 \times 10^{-6}$	$20,6 \times 10^{-5}$	0,83
$\text{PbSe}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$	[22]	125×10^{-6}	$-29,5 \times 10^{-5}$	0,87
Zn_4Sb_3	[22]	$14,925 \times 10^{-6}$	$14,2 \times 10^{-5}$	0,92

Tablo 2. Teorik modelde kullanılan yarı iletken (p-n) malzeme çiftleri

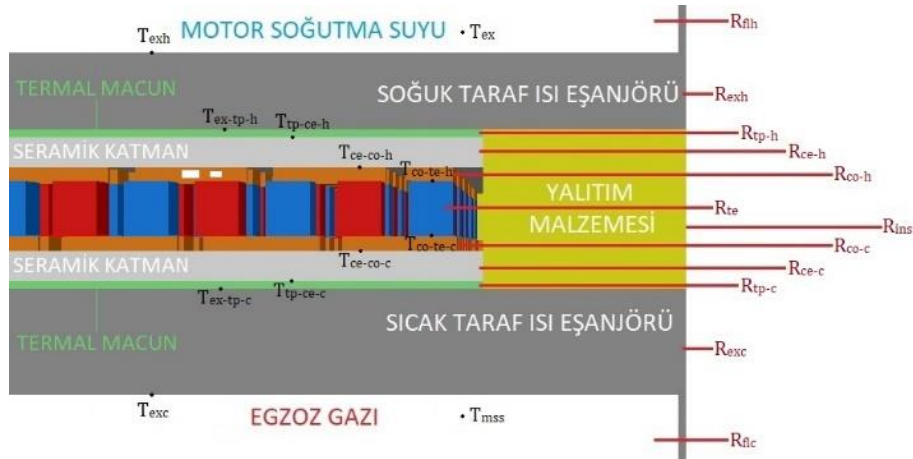
MNo:1		MNo:2		MNo:3		MNo:4		MNo:5	
p-tipi	n-tipi	p-tipi	n-tipi	p-tipi	n-tipi	p-tipi	n-tipi	p-tipi	n-tipi
Bi_2Te	Bi_2Te	$\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{T}$	$\text{PbSe}_{0,5}\text{Te}_0$	$\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{T}$	Bi_2Te	Zn_4Sb	$\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{T}$	Zn_4Sb	Bi_2Te

TEM'in Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik modeli;1-Modül ve yalıtım hesaplamaları, 2-Kanatçık hesaplamaları, 3-Eşanjör verimlilik hesaplamaları, 4-Isı kayıpları ve katmanların sıcaklık değerlerinin hesaplanması ve 5-TEM'lerde elektriksel hesaplamalar olmak üzere 5 çözümlene katmandan oluşmaktadır. Bu çözümlene katmanlarından oluşan teorik TEM modelinin akış diyagramı Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Matlab/Simulink programında geliştirilen TEM modelinin akış diyagramı

Belirlenen yarı iletken malzeme tiplerinin kombinasyonundan oluşturulan 5 farklı p-n çifti ile oluşturulacak TEM'ler sıcak ve soğuk taraf eşanjör yüzeylerinden yarı iletken malzeme yapısına ulaşana kadarki katmanlar üzerine düşen sıcaklık ve direnç değerlerinin hesaplanabileceği bir düzenleme içerisinde TEM yapısı oluşturulmuştur. TEM modelinde kullanılan katmanlara ait sıcaklık ve direnç tanımlamaları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. TEJ modelinde kullanılan katmanların sıcaklık ve direnç tanımlamaları

Eşanjörde kullanılacak kanatçık hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve eşanjör tasarımının termal verimliliği; MSS ve egzoz kütle akışı, Re sayısı, Nu sayısı, kanatçık geometrisi vb. parametrelere bağlı olarak analiz edilerek [21] katmanların sıcaklık noktaları değerleri Eşitlik 1-14 ile verilen ana formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Teorik modelde, ısı kayıpları ve eşanjör katmanların sıcaklık değerlerinin hesaplanması, sıcak ve soğuk taraf yüzeyleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Egzoz gazı (h indeksli) ve MSS (c indeksli) akışkanlarının ısı direnci;

$$R_{flx} = \frac{1}{\eta_o * h * A_{tot,surf}} \quad 1$$

Diğer ısı dirençler (R_{aa}), malzeme kalınlıkları (L_{aa}), malzeme ısı iletkenlikleri (K_{aa}) ve malzeme kesit alanları (A_{aa}) değerleri ile her katman için kademe kademe Eşitlik 2-13'de verilen denklemler ile hesaplanmıştır.

$$R_{aa} = \frac{L_{aa}}{K_{aa} * A_{aa}} \quad 2$$

Bakır iletkenin ve modül için ısı direnç hesabı;

$$R_{bb} = \frac{L_{bb}}{K_{bb} * A_{bb} * n_{pn}} \quad 3$$

TEM'in toplam ısı direnci (R_{tej});

$$R_{tej} = R_{flh} + R_{flc} + R_{alh} + R_{alc} + (R_{mod} // R_{ins}) \quad 4$$

Kanatçık yapısı ve malzeme tipine bağlı verimlilik sonucu oluşan sıcaklık farkı (ΔT_η);

$$\Delta T_\eta = T_{ex} * \eta_o - T_{mss} * \eta_o \quad 5$$

EGS T_{ex} , MSS sıcaklığı T_{mss} , TEM sisteminin ısı transfer hızı (Q);

$$Q = \frac{\Delta T_\eta}{R_{tej}} \quad 6$$

Kanatçık yapısı ve malzeme tipine bağlı verimlilik sonucu oluşan akışkanların sıcaklık değeri (T_{flx});

$$T_{flx} = T_{ex/mss} * \eta_o \quad 7$$

Artık her katman için T_{xx} sıcaklık değerleri bir önceki katman T_{yy} sıcaklık değerleri ve ısı direnç değerleri R_{xx} formülleri yardımı ile kademe kademe aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$T_{xx} = T_{yy} - Q * R_{yy} \quad 8$$

Bakır katmanı sonrası p-n bacaklarına düşen sıcaklık farkı;

$$\Delta T_{te} = T_{cpex} - T_{cpmss} \quad 9$$

TEM'lerde elektriksel hesaplamalar, TEM'in Seebeck katsayısı (α_{tem}), TEM'in iç direnci (r_{tem}), TEM'in açık devre gerilimi ($V_{oc,tem}$);

$$V_{oc,tem} = \alpha_{tem} * \Delta T_{te} \quad 10$$

$$r_{tem} = \left(\frac{\rho * l}{A} \right) * n_{pn} \quad 11$$

TEM'in yük altındaki akımı (I_L);

$$I_L = \frac{V_{oc,TEM}}{r_{TEM} + R_L} \quad 12$$

Kullanıcı tanımlı yük direnci (R_L), TEM'in yük altındaki çıkış gerilimi (V_L);

$$V_L = I_L * R_L \quad 13$$

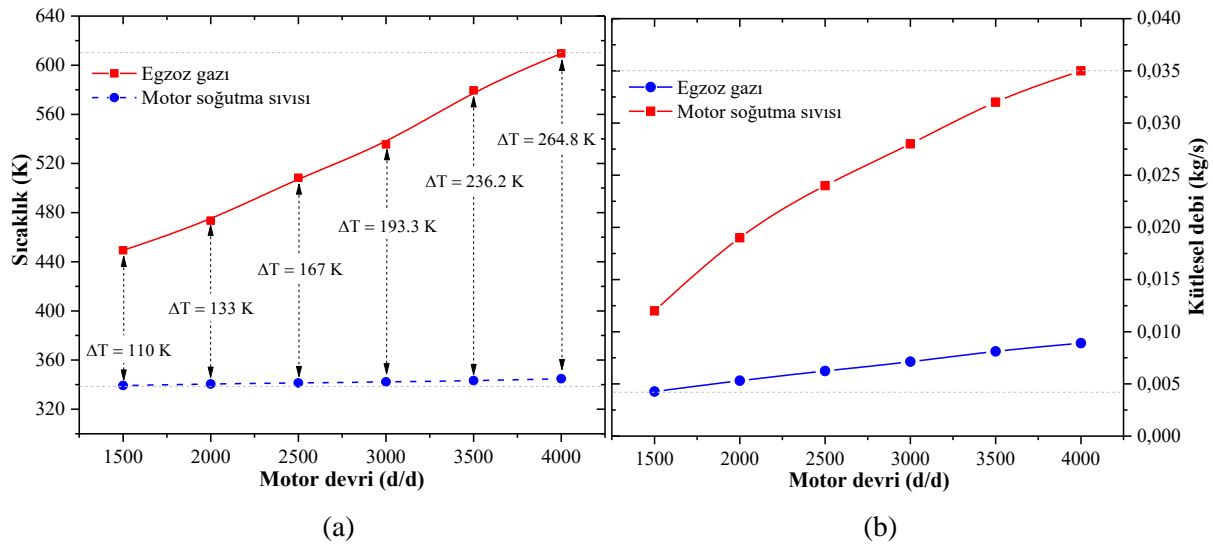
TEM'in yük altındaki çıkış gücü (P_L);

$$P_L = I_L^2 * R_L \quad 14$$

3. BULGULAR ve TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Çalışmada, yazarların daha önceki deneysel çalışmalarda, 505 cc toplam silindir hacmine sahip 2 silindirli, buji ateşlemeli, su soğutmalı motordan elde ettikleri egzoz gazı ve soğutma suyuna ait sayısal değerler (sıcaklık ve debi) [20] ve 1-14 numaralı eşitlikler kullanılarak Matlab/Simulink programında oluşturulan teorik model [21] kullanılmıştır. LPG ile çalışan deney motorun 1500-4000 d/d aralığındaki egzoz gazı ve MSS ait deneysel sonuçlar Şekil 3'te verilmektedir. Teorik TEJ modelinde, Şekil 3'te verilen egzoz gazı ve MSS'na ait deneysel sonuçlar kullanılmıştır.

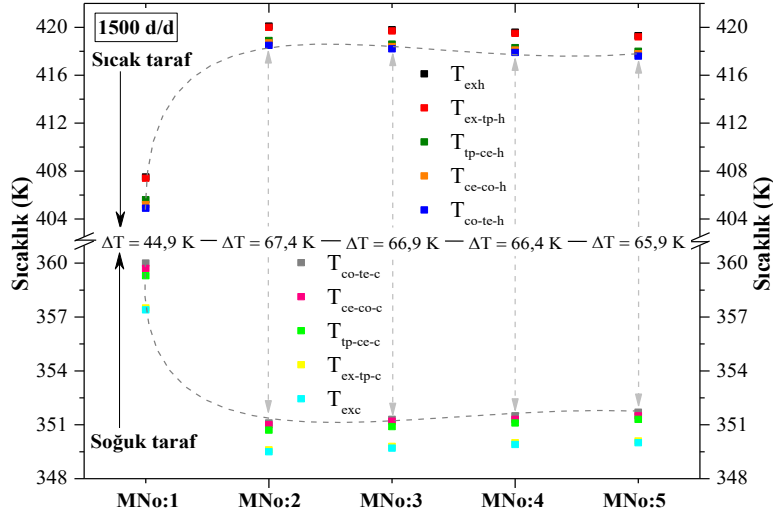
Şekil 3(a)'da görüldüğü gibi motor devrinin 1500 d/d'dan 4000 d/d'ya çıkartılması ile egzoz gazlarının sıcaklığı lineer olarak artış gösterirken MSS sıcaklığı çok düşük oranda artmakta ve buna bağlı olarak ΔT sıcaklık farkı da artmaktadır. Şekil 3(b)'de görüldüğü gibi motor devrinin artışı ile birlikte egzoz gazı ve MSS'nun debileri motorun tasarım yapısına bağlı olarak artış göstermektedir.



Şekil 3. Farklı motor devirleri için teorik modelde kullanılan TEJ'e ait (a) egzoz gazı ve MSS giriş sıcaklıkları (b) egzoz gazı ve MSS giriş debileri (Gürbüz ve Akçay, 2015)

Şekil 4'te farklı yarı iletken malzemelerden oluşturulan p-n çiftleri için motorun 1500 d/d devrindeki egzoz gazı ve MSS değerleri kullanılarak hesaplanan TEM'in katmanları üzerine düşen sıcaklık değerlerin değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi TEM'de kullanılan yarı iletken p-n çiftlerindeki malzeme özelliklerine bağlı olarak katmanlar üzerine düşen sıcaklıklar değerleri değişmektedir. Aynı sıcak ve soğuk taraf sıcaklıklarına için en yüksek sıcaklık farkının $\Delta T = 67,4$ ile MNo:2'de oluşturulan p-n kombinasyonu (p: $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$ ve n: $\text{PbSe}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$) ile elde edildiği görülmektedir.

Motorun 2000-4000 d/d aralığı için TEM'in katmanları üzerine düşen sıcaklık değerlerin değişimi Tablo 3'de verilmektedir. Tablo 3'te motorun 2000-4000 d/d aralığındaki egzoz ve MSS değerleri kullanılarak hesaplanan sonuçlar incelendiğinde, en yüksek ΔT sıcaklık farkının MNo:2'de oluşturulan p-n çifti ile elde edilirken en düşük ΔT sıcaklık farkı MNo:1'de oluşturulan p-n çifti ile elde edildiği görülmektedir.

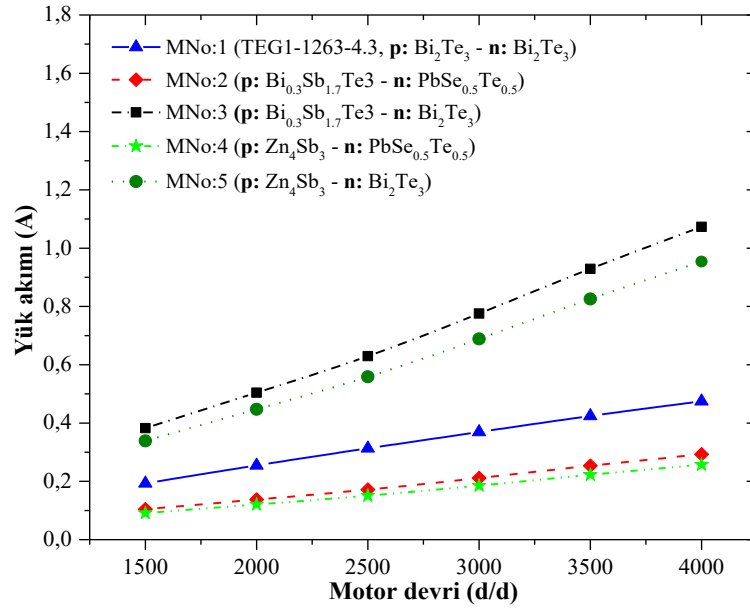


Şekil 4. 1500 d/d’da farklı malzeme özellikleri için hesaplanan sıcaklık değerlerinin değişimi

Tablo 3. Farklı motor devri ve farklı p-n çiftleri için hesaplanan sıcaklık değerleri

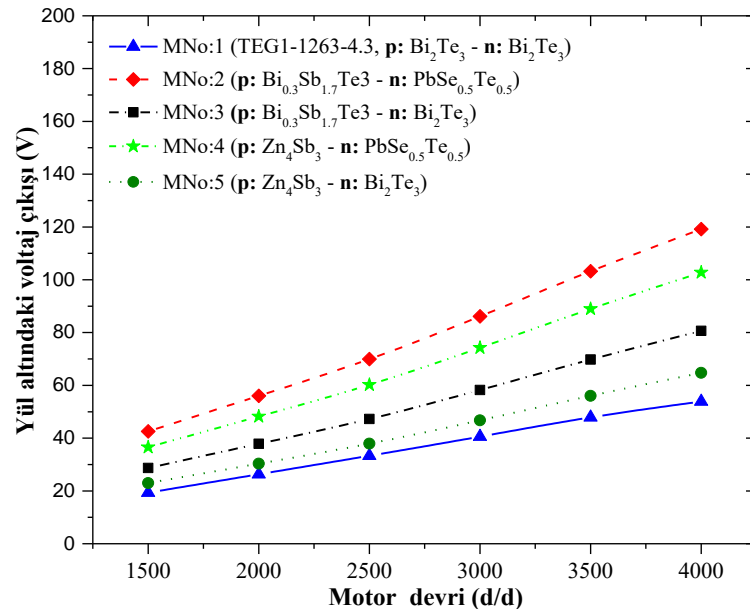
		1500 d/d					2000 d/d				
		MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:
Sıcak taraf	T _{ex}	407.4	420	419.7	419.5	419.2	427	443.1	442.8	442.4	442.1
	T _{ex-}	407.4	420	419.7	419.5	419.2	427	443.1	442.7	442.4	442
	T _{in-}	405.6	418.9	418.6	418.3	418	424.5	441.6	441.2	440.9	440.5
	T _{ce-}	405.2	418.7	418.4	418.1	417.8	424	441.3	440.9	440.6	440.2
	T _{co-}	404.9	418.5	418.2	417.9	417.6	423.6	441.1	440.7	440.3	440
ΔT(K)		44.9	67.4	66.9	66.4	65.9	61	88.8	88.1	87.5	87
Soğuk taraf	T _{co-}	360	351.1	351.3	351.5	351.7	362.6	352.3	352.6	352.8	353
	T _{ce-}	359.7	351	351.2	351.3	351.5	362.3	352.1	352.3	352.5	352.8
	T _{in-}	359.3	350.7	350.9	351.1	351.3	361.7	351.8	352	352.2	352.4
	T _{ex-}	357.5	349.6	349.8	350	350.1	359.3	350.3	350.5	350.7	350.9
	T _{ex}	357.5	349.6	349.8	349.9	350.1	359.2	350.3	350.5	350.7	350.9
		2500 d/d					3000 d/d				
		MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:
Sıcak taraf	T _{ex}	448.6	468	467.6	467.2	466.8	474.7	497.7	497.2	496.8	496.3
	T _{ex-}	448.5	467.9	467.5	467.1	466.7	474.6	497.7	497.1	496.7	496.2
	T _{in-}	445.4	466.1	465.7	465.3	464.8	470.6	495.4	494.9	494.4	493.9
	T _{ce-}	444.7	465.7	465.3	464.9	464.4	469.8	494.9	494.4	493.9	493.4
	T _{co-}	444.2	465.5	465	464.6	464.1	469.2	494.6	494	493.5	493
ΔT(K)		77.5	110.9	110.1	109.4	108.7	96.7	136.5	135.6	134.8	134
Soğuk taraf	T _{co-}	366.7	354.6	354.9	355.2	355.4	372.5	358.1	358.4	358.7	359
	T _{ce-}	366.3	354.4	354.6	354.9	355.1	371.9	357.8	358.1	358.3	358.7
	T _{in-}	365.6	354	354.2	354.5	357.7	371.1	357.3	357.6	357.8	358.2
	T _{ex-}	362.4	352.2	352.4	352.6	352.8	367.1	355	355.3	355.5	355.8
	T _{ex}	362.4	352.1	352.4	352.6	352.8	367.1	355	355.3	355.5	355.8
		3500 d/d					4000 d/d				
		MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:	MNo:
Sıcak taraf	T _{ex}	502.6	529.2	528.6	528.1	527.5	528.6	558.5	557.9	557.3	556.6
	T _{ex-}	502.4	529.1	528.5	528	527.4	528.4	558.4	557.8	557.2	556.6
	T _{in-}	497.7	526.4	525.8	525.2	524.6	522.9	555.3	554.6	554	553.3
	T _{ce-}	496.6	525.8	525.2	524.6	524	521.7	554.7	553.9	553.3	552.6
	T _{co-}	495.9	525.4	524.7	524.2	523.5	520.9	554.2	553.4	552.8	552.1
ΔT(K)		117.1	163.5	162.4	161.6	160.5	136.5	188.9	187.6	186.7	185.6
Soğuk taraf	T _{co-}	378.8	361.9	362.3	362.6	363	384.4	365.3	365.8	366.1	366.5
	T _{ce-}	378.1	361.5	361.9	362.2	362.6	393.6	364.9	365.3	365.6	366
	T _{in-}	377	360.9	361.3	361.6	362	382.4	364.2	364.6	364.9	365.3
	T _{ex-}	372.3	358.3	358.6	358.8	359.1	376.8	361.1	361.4	361.7	362.1
	T _{ex}	372.2	358.2	358.5	358.8	359.1	376.7	361	361.4	361.7	362

Şekil 5'te motorun farklı devirlerinden alınan egzoz gazı ve MSS değerleri kullanılarak farklı p-n tipi yarı iletken çiftleri için hesaplanan yük akımının motor devrine bağlı değişimi verilmiştir. Tüm motor devirleri için, MNo:3 ile tanımlanan p-n çiftinden oluşturulan TEM modülü ile TEJ yük akımı en yüksek değerleri alırken, MNo:4 ile tanımlanan p-n çiftinden oluşturulan TEM modülü ile TEJ yük akımı en düşük değerleri almıştır. Burada dikkati çeken bir diğer önemli sonuç, Tablo 3'te verilen farklı p-n çiftleri için hesaplanan ΔT sıcaklık farkı sıralamasının yük akımı sıralamasından farklı olmasıdır. Tüm motor devirleri için en yüksek ΔT sıcaklık farkı MNo:2 ile tanımlanan p-n çifti ile elde edilirken en yüksek yük akımı çıkışı MNo:3 ile tanımlanan p-n çifti ile elde edilmiştir. Bu sonuç, TEM'lerde yük akımı çıkışının yalnızca yarı iletken malzemeler üzerine düşen sıcaklık farkına bağlı olmadığını, aynı zamanda yarı iletken malzemelerin elektriksel özelliklerinin de çıkış akımı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Farklı motor devri ve malzeme özellikleri ile TEJ'in yük akımının değişimi

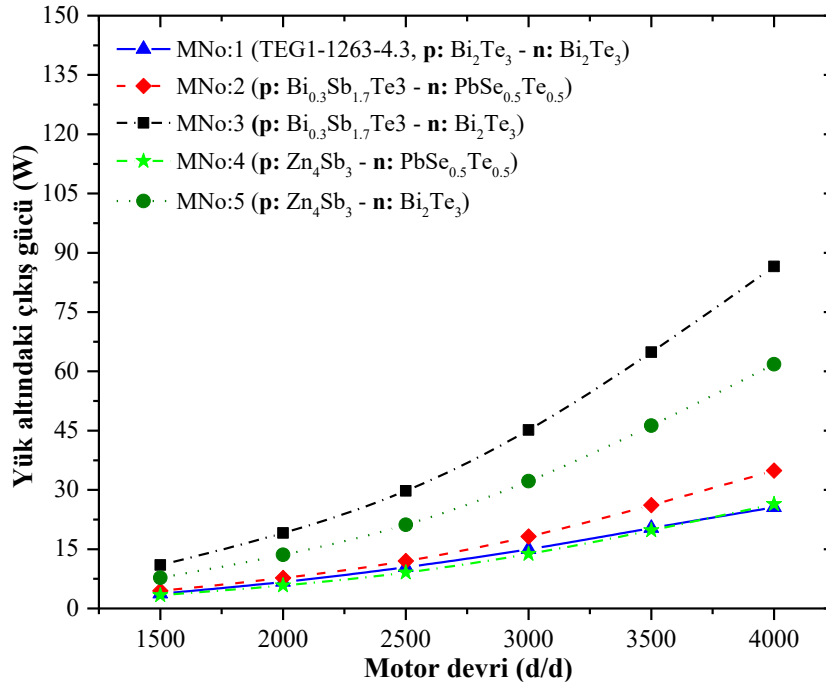
Motorun farklı devirlerinden alınan egzoz gazı ve MSS değerleri kullanılarak farklı p-n tipi yarı iletken çiftleri için hesaplanan yük altındaki çıkış voltajının motor devrine bağlı değişimi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Farklı motor devri ve malzeme özellikleri ile TEJ'in yük altındaki çıkış voltajının değişimi

Tüm motor devirleri için MNo:2 ile tanımlanan p-n çiftinden oluşturulan TEM modülü ile TEJ yük altındaki voltaj değeri en yüksek değerleri alırken, MNo:1 ile tanımlanan p-n çiftinden oluşturulan TEM modülü ile TEJ'in yük altındaki voltaj değeri en düşük değerleri almıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi, farklı yarı iletken malzemeden oluşturulan p-n çiftleri için yük altındaki çıkış voltaj sıralaması Tablo 3'te verilen ΔT sıcaklık farkına bağlı olarak değişmektedir. ΔT sıcaklık farkının artışı ile yük altındaki çıkış voltajı da artmaktadır.

Şekil 7'de motorun farklı devirlerindeki egzoz gazı ve MSS değerleri kullanılarak farklı p-n tipi yarı iletken çiftleri için hesaplanan yük altındaki çıkış gücünün değişimi verilmektedir. Şekil 7'de görüldüğü gibi elektriksel formülasyon olarak yük akımı ile yük altındaki çıkış voltajının çarpımından hesaplanan yük altındaki çıkış gücü sıralaması; ΔT sıcaklık farkı, yük akımı ve yük altındaki çıkış voltajında ortaya çıkan sıralamadan farklı bir karaktere sahip olmuştur. Tüm motor devirlerinde, $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$ tip yarı iletken malzemenin p tipi, Bi_2Te_3 tipi yarıiletken malzemenin n tipi olarak seçildiği p-n çifti (MNo:3) ile oluşturulan TEM modülleri (20 adet) ile en yüksek yük altındaki çıkış gücü (4000 d/d'da 86,56 W) elde edilirken, MNo:1 (p ve n: Bi_2Te_3) ve MNo:4 (p: Zn_4Sb_3 , n: $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$) ile belirtilen p-n çiftlerine sahip TEM modülleri ile en düşük yük altındaki çıkış gücü (4000 d/d'da ≈ 26 W) elde edilmiştir. Kullanılan p-n tipi yarı iletken malzeme türleri arasında bir karşılaştırma yapıldığında, MNo:1, MNo: 3 ve MNo: 5'deki 3 p-n çiftinde de n: Bi_2Te_3 tipi yarı iletken malzeme kullanılmış, ancak MNo: 3 ile en yüksek yük altında çıkış gücü elde edilirken (4000 d/d'da 86,56 W) MNo:1 ile en düşük yük altında çıkış gücü (4000 d/d'da 25,58 W) elde edilmiştir. Ayrıca MNo:5 (p: Zn_4Sb_3 , n: Bi_2Te_3) ile MNo:3'den sonraki en yüksek TEM çıkış gücü (4000 d/d'da 61,8 W) elde edilmiştir. Bu durum, Bi_2Te_3 'in TEM'in çıkış performansı açısından iyi bir n tipi yarı iletken malzeme olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, Bi_2Te_3 'ün p-tipi yarı iletken olarak kullanılmasının (MNo:1) TEM'in çıkış performansını azalttığı görülmektedir. Buna karşın, kullanılan yarı iletken malzemeler arasında TEM çıkış performansı açısından en uygun p-tipi yarı iletken malzemenin $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$ olduğu, Zn_4Sb_3 'ün ise p tipi yarı iletken olarak tatmin edici sonuçlar ortaya koyduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, p: $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$ ve n: $\text{PbSe}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$ yarı iletken malzemelerden oluşan p-n çiftine (MNo:2) sahip TEM'in düşük yük altındaki çıkış gücü (4000 d/d'da 34,9 W) performansı, $\text{PbSe}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$ 'ün n-tipi yarı iletken malzeme olarak tatmin edici performans sunmadığını göstermektedir. Çalışmanın genel bir sonucu olarak, kullanılan yarı iletken p-n çiftleri arasında, p: $\text{Bi}_{0,3}\text{Sb}_{1,7}\text{Te}_3$ ve n: Bi_2Te_3 tipi yarıiletken malzemeler ile oluşturulan p-n çifti yapısının TEM'in ve dolayısıyla TEJ'in çıkış performansı açısından en uygun p-n çifti yarı iletken malzeme kombinasyonu olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Farklı motor devri ve malzeme özellikleri ile TEJ'in yük altındaki çıkış gücünün değişimi

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, yakıt olarak LPG kullanan 2 silindri, buji ateşlemeli ve su soğutmalı motorun 1500-4000 d/d aralığında gerçekleştirilen deneysel sonuçları [20] kullanılarak gerçekleştirilen teorik analizde, egzoz atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için tasarlanmış TEJ'de farklı p-n tipi yarı iletken malzeme kullanımının TEJ'in elektriksel çıkış parametreleri üzerine etkisi, geliştirilen teorik TEJ modeli [21] kullanılarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Genel olarak, kullanılan p-n tipi yarı iletken malzeme çiftleri ile oluşturulan TEM'lerde, motorun devir artışı ile birlikte egzoz gazlarının sıcaklık ve debi değerlerinin artmasına bağlı olarak yarı iletken malzeme üzerine düşen sıcaklık değeri artarak ΔT değerinin artmasına ve dolayısıyla TEM'in elektriksel çıkış parametrelerinin artmasına sebep olmuştur.
- Tüm motor devirleri için, kullanılan p-n çifti yarı iletken malzemelerin ısıl iletkenlik değerlerine bağlı olarak, MNo:2 ile en yüksek, MNo:1 ile en düşük malzeme üzerine düşen sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Yarı ilerken malzeme üzerin düşen sıcaklık değeri sıralaması MNo:2>MNo:3>MNo:4>MNo:5>MNo:1 şeklinde gerçekleşmiştir.
- Tüm motor devirleri için, MNo:3 ile en yüksek ve MNo:4 ile en düşük yük akımı değeri elde edilmiştir. Kullanılan p-n tipi yarı iletken malzeme çiftlerinin kombinasyonlarından oluşturulan TEM'den 20 adet seri bağlanarak oluşturulan TEJ'in yük akımı sıralaması, MNo:3>MNo:5>MNo:1>MNo:2>MNo:4 şeklinde gerçekleşmiştir.
- Tüm motor devirleri için, MNo:2 ile en yüksek ve MNo:1 ile en düşük yük voltajı değeri elde edilmiştir. Kullanılan p-n tipi yarı iletken malzeme çiftlerinin kombinasyonlarından oluşturulan TEM'den 20 adet seri bağlanarak oluşturulan TEJ'in yük voltajı sıralaması, MNo:2>MNo:4>MNo:3>MNo:5>MNo:1 şeklinde gerçekleşmiştir.
- Elektriksel olarak Güç = Akımı x Voltaj formülasyonu ile hesaplanan TEM'in yük altındaki çıkış gücü sıralaması; ΔT sıcaklık farkı, yük akımı ve yük altındaki çıkış voltajında sıralamalarından farklı bir karaktere sahip olmuştur. Tüm motor devirleri için, farklı p-n çiftlerinin kombinasyonundan oluşturulan TEM'den 20 adet seri bağlanarak oluşturulan TEJ'in yük altındaki güç çıkışı sıralaması, MNo:3>MNo:5>MNo:2>MNo:2≈MNo:1 şeklinde gerçekleşmiştir.
- Çalışma kapsamında kullanılan p-n tipi yarı iletken malzemelerden p: Bi_{0,3}Sb_{1,7}Te₃ ve n: Bi₂Te₃ tipi yarı iletkenler kullanılarak oluşturulan p-n çifti yapısının TEM'in ve dolayısıyla 20 adet TEM'in seri olarak bağlanması ile oluşturulan TEJ'in çıkış performansı açısından en uygun p-n çifti kombinasyonu olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, ticari olarak piyasadan temin edilebilen ve yalnızca Bi₂Te₃ tabanlı p-n çiftlerinden oluşan TEM'lere alternatif olarak kullanılan Bi_{0,3}Sb_{1,7}Te₃, PbSe_{0,5}Te_{0,5} ve Zn₄Sb₃ yarı iletken çiftlerinin kombinasyonlarından oluşturulan p-n çiftleri ile oluşturulan TEM'lerin daha yüksek elektriksel çıkış performansı sunmaktadır. Bununla birlikte, TEM'lerde kullanılan Pb tabanlı yarı iletken malzemelerin, piyasada ticari ürün olarak bulunan Bi tabanlı yarı iletken malzemelere yakın bir performans göstermektedir. Fakat Pb tabanlı yarıiletken malzemeler, Sb tabanlı yarıiletken malzemelere kıyasla daha düşük bir performans sergilemiştir. Özellikle, Bi₂Te₃ tabanlı malzemeler yerine Bi ve Sb tabanlı yarı iletken malzeme alaşımlarının kombinasyonları ile daha yüksek elektriksel çıkış elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmada, Doç. Dr. Habib Gürbüz'ün danışmanlığında Topalci (2017) tarafından gerçekleştirilen Yüksek Lisans tezi kapsamında Matlab/Simulink programında oluşturulan teorik TEJ modelinin geliştirilmiş versiyonu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan Matlab/Simulink programı 2017 yılı için Ümit TOPALCI adına lisanslıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Mruk, A., Jordan, W., Taler, J., Lopata, S. and Weglowski, B. (1994). Heat Transfer Through Ceramic Barrier Coatings Used in Internal Combustion Engines. SAE Technical Paper, No: 941779, USA.
- [2] Taymaz, İ., Çakır, K., Gür, M. and Mimaroglu A. (2003). Experimental Investigation of Heat Losses in a Ceramic Coated Diesel Engine. *Surface and Coatings Technology*, 168-170.
- [3] Gökçek, M. (2017). Waste to Energy: Exploitation of Landfill Gas in Micro-Turbines. *Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 6(2), 710-716.
- [4] Rowshanzadeh, R. (2008). Performance and Cost Evaluation of Organic Rankine Cycle at Different Technologies. KTH Vetenskap Och Konst., Department of Energy Technology, M.Sc. Thesis, 101pages, Sweden.
- [5] Yıldırım, İ., Öner, D. and Çetin, B. (2015). GPU-Computation of 2-Dimensional Laplace Equation Using Boundary Element Method. 20th National Conference on Thermal Sciences, 2-5 September, Balıkesir, Turkey.
- [6] Okada, Y., Koseki, T. and Sone, S. (2003). Energy Management for Regenerative Brakes on a DC Feeding system. International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems, 19-22 August, Tokyo, Japan, 84-88.
- [7] Yang, Z., Stobart, R., Lan, S., Mason, B. and Winward E. (2018). Towards optimal performance of a thermoelectric generator for exhaust waste heat recovery from an automotive engine. SAE Technical Paper, No. 2018-01-0050.
- [8] Fagehi, H., Attar, A. and Lee, H. (2018). Optimal design of an automotive exhaust thermoelectric generator. *Journal of Electronic Materials*, 47(7), 3983-3995.
- [9] Sifi, I., Ghellai, N., Hima, A., Menni, Y., Chamkha, A.J. and Lorenzini, G. (2019). Study of Temperature Variation Effect on the Thermoelectric Properties of a Thermoelectric Generator with BiCuSeO Molecules. *Journal: <http://iieta.org/journals/ijht>*, 37(3), 727-732.
- [10] Britoa, F.P., Pacheco, N., Vieiraa, R., Martinsa, J., Martinsa, L., Teixeiraa, J., Goncalvesd, L.M., Oliveirab, J. and Hallc, M.J. (2020). Efficiency improvement of vehicles using temperature-controlled exhaust thermoelectric generators. *Energy Conversion and Management*, Vol. 203.
- [11] Pacheco, N., Brito, F.P., Vieira, R., Martins, J., Barbosa, H. and Goncalves, L.M. (2020). Compact automotive thermoelectric generator with embedded heat pipes for thermal control. *Energy*, Vol. 197.
- [12] Massaguer, A., Pujol, T., Comamala, M. and Massaguer, E. (2019). Feasibility study on a vehicular thermoelectric generator coupled to an exhaust gas heater to improve aftertreatment's efficiency in cold-starts. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 167.
- [13] Wang, J., Song, X., Li, Y., Zhang, C., Zhao, C. and Zhu, L. (2020). Modeling and Analysis of Thermoelectric Generators for Diesel Engine Exhaust Heat Recovery System. *Journal of Energy Engineering*, Vol. 146 Issue 2.
- [14] Subramaniam, H., Duraisamy, S., Raghavan, G. and Govindan, S. (2019). Design and development of a test rig for the performance evaluation of automotive exhaust thermoelectric generator. *AIP Advances*, 9.
- [15] Kunt, M.A. and Gunes, H. (2019). Comparing the recovery performance of different thermoelectric generator modules in an exhaust system of a diesel engine both experimentally and theoretically. *Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*.
- [16] Quan, R., Liu, G., Zhou, W. and Huang, L. (2018). Energy Management of Automobile Exhaust Thermoelectric Hybrid Power Based on Maximum Power Point Tracking and Fuzzy Logic Control. 2nd International Forum on Management, Education and Information Technology Application.

- [17] Shiriaev, P., Shishov, K. and Osipkov, A. (2019). Electrical network of the automotive multi-sectional thermoelectric generator with MPPT based device usage. *Materials Today: Proceedings*, 8, 642-651.
- [18] Quan, R., Wang, C., Wu, F., Chang, Y. and Deng, Y. (2019). Parameter Matching and Optimization of an ISG Mild Hybrid Powertrain Based on an Automobile Exhaust Thermoelectric Generator. *Journal of Electronic Materials*.
- [19] Thacher, E.F., Helenbrook, B.T., Karri, M.A. and Richter, C.J. (2007). Testing of an automobile exhaust thermoelectric generator in a light truck. *Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*.
- [20] Gürbüz, H. and Akçay, H. (2015). Experimental investigation of an improved exhaust recovery system for liquid petroleum gas fueled spark ignition engine. *Thermal Science*, 19(6), 2049-2064.
- [21] Topalçı, Ü. (2017). Taşıt Egzoz Gazı Atık Isı Enerjisinden Elektrik Enerjisinin Üretilmesi için Termoelektrik Jeneratörün Modellenmesi. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- [22] Su, Q. (2017). Modeling and simulation of a segmented thermoelectric generator. Doctoral dissertation, University of Missouri--Columbia.