



BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORDA EGZUZ ATIK ISI GERİ KAZANIMI İÇİN TERMoeLEKTRİK JENERATÖR MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Ümit TOPALCI¹, Habib GÜRBÜZ^{1*}, Hüsameddin AKÇAY¹, Selim DEMİRTÜRK²

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Uşak Üniversitesi, Otomotiv Teknolojisi Programı, Teknik Bilimler Yüksek Okulu, Uşak, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Buji Ateşlemeli Motor, Egzoz Atık Isı Geri Kazanımı, Termoelektrik Jeneratör, Matlab/Simulink Modeli.</i>	Bu çalışmada, buji ateşlemeli bir motorda atık ısı geri kazanımı için kullanılan termoelektrik jeneratörünün (TEJ) Matlab/Simulink programı ile teorik modeli geliştirilmiştir. TEJ modelinin geliştirilmesinde, 1500-4000 rpm aralığında çalışan iki silindirli buji ateşlemeli bir motorun deneysel çalışmalarından elde edilen egzoz gaz sıcaklıkları ve kütle akış hızları kullanılmıştır. TEJ modeli, egzoz ısı eşanjörü ve egzoz eşanjörünün her iki yüzeyine yerleştirilmiş iki motor soğutma suyu eşanjöründen oluşan üç katmanlı bir yapıya sahiptir. Eşanjör malzemesi olarak 3 mm kalınlığında 6063-T6 tipi alüminyum malzeme kullanılmıştır. Termoelektrik modüllerde (TEM) hem n hem de p tipi yarı iletkenler için Bi ₂ Te ₃ malzemesi seçilmiştir. Her iki TEJ katmanında 5x4 düzenlemeye sahip toplam 40 adet TEM kullanılmıştır. Matlab/Simulink modelinin sonuçları, önceki çalışmalarda elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Gürbüz ve Akçay, 2015). Sonuç olarak, TEJ'ün Matlab/Simulink modeli ile DC elektrik enerjisi üretimi, 1500-4000 rpm motor devri aralığı için 6,36-50,96 W aralığında değişmiştir. Ayrıca, deneysel ve Matlab/Simulink model sonuçları arasında iyi bir korelasyon ($R^2= 0,991$) olduğu tespit edilmiştir.

IMPROVEMENT OF THERMOELECTRIC GENERATOR MODEL FOR EXHAUST WASTE HEAT RECOVERY IN A SPARK IGNITION ENGINE

Keywords	Abstract
<i>Spark Ignition Engine, Exhaust Waste Heat Recovery, Thermoelectric Generator, Matlab/Simulink Model.</i>	In this study, a theoretical model with Matlab/Simulink of thermoelectric generator (TEG) using for waste heat recovery in a spark ignition (SI) engine developed. In the improvement of the TEG model, the exhaust gas temperatures and mass flow rates used which is obtained from the experimental studies of the two-cylinder SI engine operating in the range of 1500-4000 rpm. The TEG model has a three-layer structure, consisting of an exhaust heat exchanger and two engine cooling water exchangers placing on both surfaces of the exhaust exchanger. 3 mm thick 6063-T6 type aluminum material used as heat exchanger material. Bi ₂ Te ₃ material selected for both n and p-type semiconductors in thermoelectric modules (TEM). A total of 40 pieces TEM used having 5x4 arrangements on both layers of TEG. The results of the Matlab/Simulink model compared with the experimental results which are obtained at the previous studies (Gürbüz and Akçay, 2015). As a result, the DC electrical power production with the Matlab/Simulink model of the TEG changed in the range of 6.36-50.96 W for the engine speed range of 1500-4000 rpm. Also, a good correlation ($R^2= 0.991$) found between experimental and Matlab/ Simulink model results.

Alıntı / Cite

Topalci, Ü., Gürbüz, H., Akçay, H., Demirtürk, S., (2020). Buji Ateşlemeli Bir Motorda Egzoz Atık Isı Geri Kazanımı İçin Termoelektrik Jeneratör Modelinin Geliştirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 582-596.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
Ü. Topalci, 0000-0001-7069-8633	Başvuru Tarihi / Submission Date 15.03.2020
H. Gürbüz, 0000-0001-5157-6227	Revizyon Tarihi / Revision Date 29.05.2020
H. Akçay, 0000-0002-5704-670X	Kabul Tarihi / Accepted Date 13.06.2020
S. Demirtürk, 0000-0001-7861-2427	Yayın Tarihi / Published Date 25.06.2020

* İlgili yazar / Corresponding author: habibgurbuz@sdu.edu.tr, +90-246-211-1867

1. Giriş (Introduction)

İçten yanmalı motorlar (İYM)'da silindir içine alınan yakıtın ısı enerjisinin $\approx 25-35$ 'i çıkış milinde mekanik enerjiye dönüştürülürken ≈ 30 'u soğutma kayıpları ve ≈ 40 'ı egzoz gazları ile birlikte atık ısı enerjisi olarak atmosfere atılmaktadır. İYM'larda çevreye atılan atık ısı enerjisinin çeşitli yöntemler ile elektrik enerjisine dönüştürülerek yakıt ekonomisinin iyileştirilmesi ve genel sistem verimliliğinin artırılması mümkündür (Karri, 2011). Son zamanlarda, atık ısı enerjisinden elektrik enerjisinin üretildiği TEJ sistemleri, çevresel kaygılar ve küresel ısınma nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları içinde dikkat çeken bir sistem haline gelmiştir (Chen vd., 2008; Taymaz vd., 2003). TEJ sistemleri, atık ısı geri kazanımı için İYM'lar, şofbenler, kalorifer kazanları ve jeotermal sistemler gibi birçok alanda kullanılarak enerji verimliliğini artırmaktadır (Ikoma vd., 1998; Dziurdzia ve Mirocha, 2009; Chen vd., 2009). İYM'ların egzoz atık ısı enerjisinin, elektrik enerjisine dönüştürüldüğü TEJ sistemlerinde yarı iletken malzemelerden oluşan termoelektrik modüllerin (TEM) kullanımı yaygınlaşmaktadır. TEJ'ler kullanılarak İYM'un egzoz gazı ve soğutucu akışkan sıcaklığı arasındaki ΔT sıcaklık farkını kullanan TEM yardımıyla elektrik enerjisi üretilebilmektedir (Dalola vd., 2009; Khattab ve El, 2006). Ancak, TEJ'lerin yüksek maliyetleri ve dönüşüm verimlerinin düşük olması, uygulamada yaygın kullanımlarını sınırlamaktadır. TEJ'lerde egzoz atık ısı enerjisi kullanılarak elektrik enerjisinin üretiminde dönüşüm verimi $\approx 5-10$ aralığındadır (Kunt and Güneş, 2017). Diğer dönüşüm sistemlerine göre TEJ'lerin dönüşüm verimi çok düşük olarak görülse de elektrik üretiminde atık ısı enerjisinin kullanılması nedeniyle TEJ'ler avantajlı bir yapıya sahiptir (Lertsatitthanakorn, 2007). TEJ sistemleri kullanılarak İYM'ların egzoz atık ısı enerjiden üretilen elektrik enerjisi, araç üzerindeki donanımların elektrik ihtiyacını karşılamak ve/veya aracın şarj sistemine ilave olarak kullanılabilir. Bu durum, dolaylı olarak yakıt tüketiminin ve egzoz emisyonlarının azalmasına yardımcı olmaktadır (Kunt, 2016). Günümüzde, geliştirilen TEJ sistemlerinde yer alan termo-elementler için uygun malzeme seçimi ve uygun geometride eşanjör tasarımı TEJ sistemlerinin elektriksel çıkış gücünü önemli ölçüde iyileştirerek sistemin dönüşüm verimine olumlu yönde katkı sağlamaktadır. Bu amaçla, araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen termo-elementleri oluşturan malzeme türleri ve eşanjör tasarımı üzerine yoğunlaşmaktadır (Derun, 2005). Bir termoelektrik ünite, birbirinden farklı iki yarı iletken malzemenin (n-tipi ve p-tipi), birbirine seri olarak birleştirilmesi ile oluşturulan devrede, bileşenlerin farklı sıcaklıklara maruz bırakılması ile DC elektrik gerilimi oluşturmaktadır. Bu gerilime "seebeck voltajı" denir. TEM'in çıkış terminalinden ölçülen gerilim değeri, malzemelerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılıdır. Elde edilen ΔT sıcaklık farkı ile p-tipi yarı iletken pozitif, n-tipi yarı iletken negatif polarite oluşmaktadır (Rowe ve Bhandari, 1983; Yavuz, vd., 2010; Doğdu, 2013; Güneş ve Hançer, 2017). Termoelektrik malzemelerin performansını değerlendirmek amacı ile kullanılan ZT (Figure of Merit) değeri, metrik sisteme göre önemli bir termoelektrik özellik olup termoelektrik malzemenin elektriksel ve termal malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı etkinliğini karakterize eder (Freedman, 2011). 1950'lerden bu yana ZT değerlerini iyileştirmek için sürekli çaba gösterilmektedir. Ancak, Bi_2Te_3 esaslı ticari termoelektrik malzemelerinin maksimum ZT değeri ortam sıcaklığında 0,6'dan 1'e yükseltilebilmiştir (Dresselhaus et.al, 2007).

Temizer vd. (2016), bir dizel motor için geliştirdikleri sekizgen geometriye sahip alüminyum TEJ ile deneysel ve teorik çalışmalar yürütmüşlerdir. TEJ modelini ANSYS/Fluent modülünde modelleyerek akış hareketlerini, daralma ve genişleme katsayılarının değişimini ve yüzey alanlarının etkisini sayısal analiz etmişlerdir. Çalışmada, TEJ'de daralma ve genişleme katsayılarının önemli bir etkiye sahip olduğunu, egzoz gazlarının geçtiği eşanjörde geniş akış alanının motora geri basınç oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Sekizgen prizma yapısına sahip eşanjör yüzeylerine yerleştirilen toplam 40 adet termoelektrik modül ile, motorun 3500 d/d ve 100 Nm çıkış mili yükü altında maksimum 0,1567 kW DC elektrik gücü üretmişlerdir. Hsu vd. (2011), tasarladıkları 3 katmanlı TEJ yapısında 24 adet TEM kullanarak deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Aracın egzoz hattının ortasına yerleştirdikleri TEJ ile motorun 3500 d/d devri ve $\Delta T=30$ K sıcaklık farkında 12,41 W maksimum çıkış gücü elde etmişler. Fakat elde edilen maksimum TEJ çıkış gücü ile sistem veriminin %0,3 gibi düşük bir değerde olduğunu tespit etmişlerdir. Yu vd. (2015), TEJ sistemine sahip bir aracın ivmelenme, yokuş tırmanma gibi sabit ve dinamik sürüş koşulları için deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Çalışmalarında, araç hızının atık ısı geri kazanımı için TEJ performansını etkileyen önemli bir faktör olduğunu, yüksek araç hızlarında TEJ performansının arttığını, 20 km/h araç hızında TEJ güç çıkışı 18 W iken 120 km/h araç hızında 220 W'a ulaştığını tespit etmişlerdir. Gürbüz ve Akçay (2015), LPG ile çalışan buji ateşlemeli motorda atık ısı geri kazanımı için bir TEJ modeli geliştirmişlerdir. TEJ modelinde, orta egzoz eşanjörünün her iki yüzeyi için kullanılan 2 adet motor soğutma suyu (MSS) eşanjörleri ve MSS eşanjörlerinin üzerine yerleştirilen 2 adet LPG eşanjörleri ile 5 katmanlı bir TEJ yapısı oluşturmuşlardır. Geliştirdikleri 5 katmanlı TEJ yapısı ile 3 katmanlı TEJ yapısına göre %17,9 daha yüksek çıkış gücü elde etmişlerdir. 5 katmanlı TEJ yapısını kullanarak motorun 4000 d/d devri $\Delta T= 148,3$ °C sıcaklık farkı altında 63,18 W TEJ çıkış gücü üretmişlerdir.

Bu çalışmada, 250 W DC elektrik gücü elde etmek amacıyla TEJ'ün orta egzoz eşanjörü ile MSS eşanjörleri arasında toplam $2 \times 20 = 40$ adet TEM kullanılarak Matlab/Simulink programında teorik bir model oluşturulmuştur. Geliştirilen teorik TEJ modeli, biri orta egzoz eşanjörü ve egzoz eşanjörünün her iki yüzeyine yerleştirilen MSS

eşanjörleri ile 3 katmanlı ve ters akışlı olarak tasarlanmıştır. Teorik modelde, Gürbüz ve Akçay (2015) tarafından iki silindirik, buji ateşlemeli bir motorun $\frac{1}{2}$ gaz keleşi açıklık oranı ve 1500-4000 d/d devir aralığında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda tespit edilen TEJ girişindeki egzoz gazı sıcaklığı ve debisinin yanında MSS sıcaklık ve debi değeri kullanılmıştır. Teorik model sonuçları Gürbüz ve Akçay (2015) tarafından gerçekleştirilen deneysel sonuçlar ve TEG1-1263-4.3 marka ticari ürünün katalog değeri ile karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Çalışmada, ticari olarak kullanılan ve piyasadan temin edilen TEG1-1263-4.3 marka TEM'ün ana boyut ölçüleri, sıcak ve soğuk yüzey çalışma aralığı (sıcaklık) ve elektriksel çıkış değeri (akım, voltaj, güç) dikkate alınarak hedef seçilen 250 W DC elektrik üretimi gerçekleştirilecek şekilde boyutlandırılan TEJ için Matlab/Simulink programında teorik bir modeli geliştirilmiştir. Teorik modelde kullanılan TEM modülünün teknik özellikleri Tablo 1'de, 2 silindirik motordan Gürbüz ve Akçay (2015) tarafından elde edilen deneysel sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. TEG1-1263-4.3'ün teknik özellikleri (Technical specification of TEG1-1263-4.3) (Tecteg, 2017)

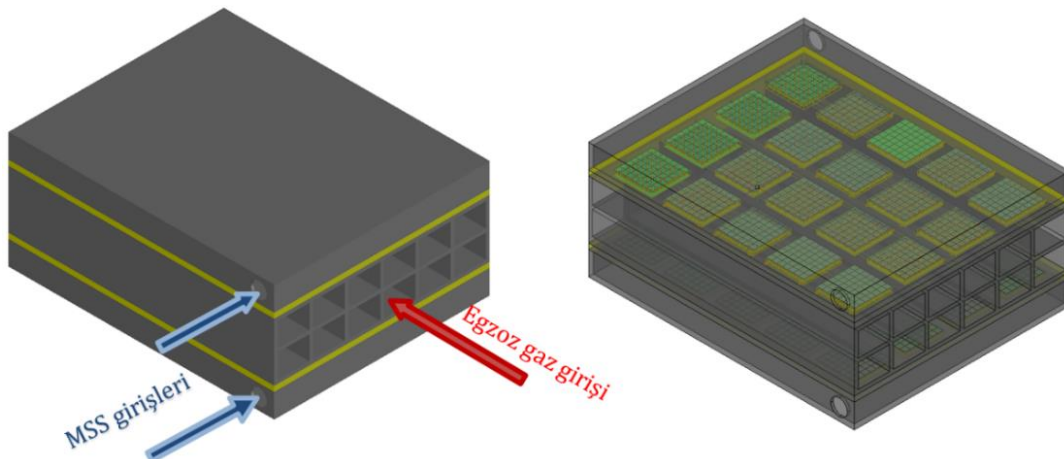
Boyutlar (mm)	30x30x4,1
Maksimum sıcak taraf sıcaklığı (°C)	300
Minimum soğuk taraf sıcaklığı (°C)	30
Açık devre voltajı (V)	10,7
Yük direnci (ohm)	5,4
Yük gerilimi (V)	5,3
Yük akımı (A)	1,0
Yük altındaki güç (W)	5,2

Tablo 2. Teorik TEJ modelinde kullanılan deneysel sonuçlar (Experimental results used in the theoretical TEG model) (Akçay, 2015)

Motor devri (d/d)	Egzoz gazı TEJ giriş sıcaklığı (°C)	Egzoz gazı TEJ giriş debisi (kg/s)	Soğutma suyu TEJ giriş sıcaklığı (°C)	Soğutma suyu TEJ giriş debisi (kg/s)
1500	180	0,00427	68,3	0,012
2000	202	0,00531	69,5	0,019
2500	225	0,00624	70,5	0,024
3000	263	0,00713	71,3	0,028
3500	301	0,00811	72,4	0,032
4000	326	0,00891	73,9	0,035

2.1. Eşanjör Ana Boyutlarının Belirlenmesi (Determination of Heat Exchanger Main Dimensions)

3 katmanlı ve ters akışlı olarak tasarlanan TEJ modelinin katı model resmi Şekil 1'de verilmiştir. Orta egzoz eşanjörü iç hacmi, her bir termoelektrik katmana homojen bir şekilde sıcaklık dağılımının gerçekleştirilebilmesi için iki eşit parçaya bölünmüştür. Egzoz eşanjörünün her bir iç hacmi ise, eşanjör akış düzlemi boyunca kanatçıklar yardımıyla 6 eşit parçaya bölünerek egzoz eşanjörü toplam 12 eşit hacimden oluşacak şekilde bölümlendirilmiştir.

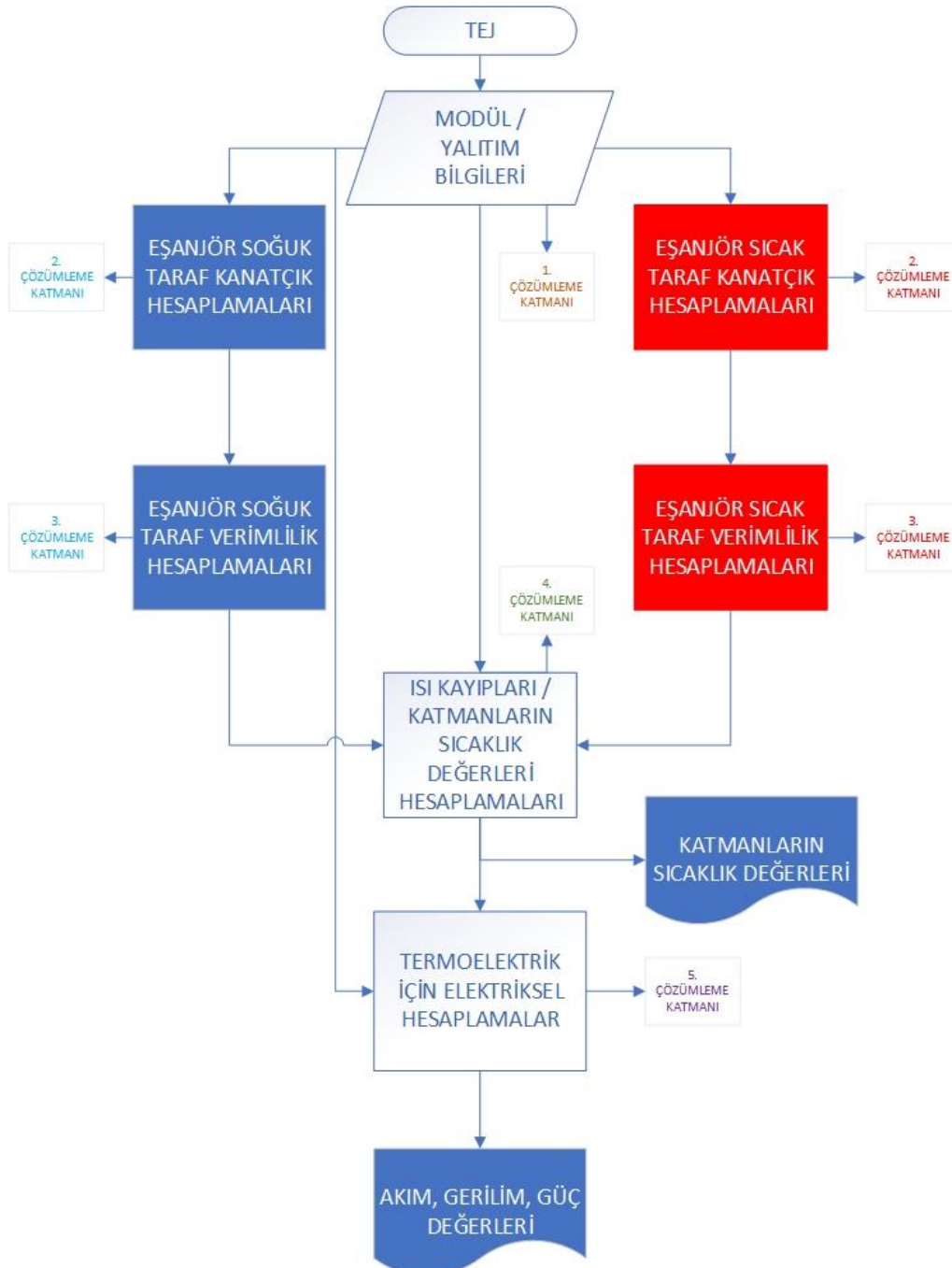


Şekil 1. Teorik TEJ modeline ait katı model resimler (Solid model pictures of the theoretical TEG model)

TEJ'de orta egzoz eşanjörü ile her bir MSS eşanjörü arasında yerleştirilecek $4 \times 5 = 20$ adet TEM'den oluşan 2 adet termoelektrik katman oluşturulmuş ve toplam 40 adet TEM'in kullanılacağı tasarım gerçekleştirilmiştir. Katmanlarda her iki TEM'ün kenar yüzeyleri arasında 10 mm boşluk bırakılarak egzoz ve MSS eşanjörleri için toplam yüzey alanı belirlenmiştir. Belirlenen TEM sayısı ve geometrik olarak yapılan düzenleme doğrultusunda 190×160 mm ana boyutları ile 30400 mm^2 eşanjör iç yüzey alanı belirlenmiştir. Egzoz ve MSS eşanjörleri için deneysel çalışmalarda kullanılan buji ateşlemeli motorun maksimum egzoz gazı çıkış debisi ve MSS debisi dikkate alınarak sırasıyla 40 mm ve 20 mm eşanjör yüksekliği belirlenmiştir. Egzoz eşanjörünün 3 mm, MSS eşanjörünün ise 2 mm kalınlığında 6063-T6 tipi alüminyum sac malzemeden üretilmesi planlanarak toplam TEJ yüksekliği belirlenmiştir.

2.2. TEJ'ün Matlab/Simulink Modelinin Geliştirilmesi (Development of Matlab/Simulink Model of TEG)

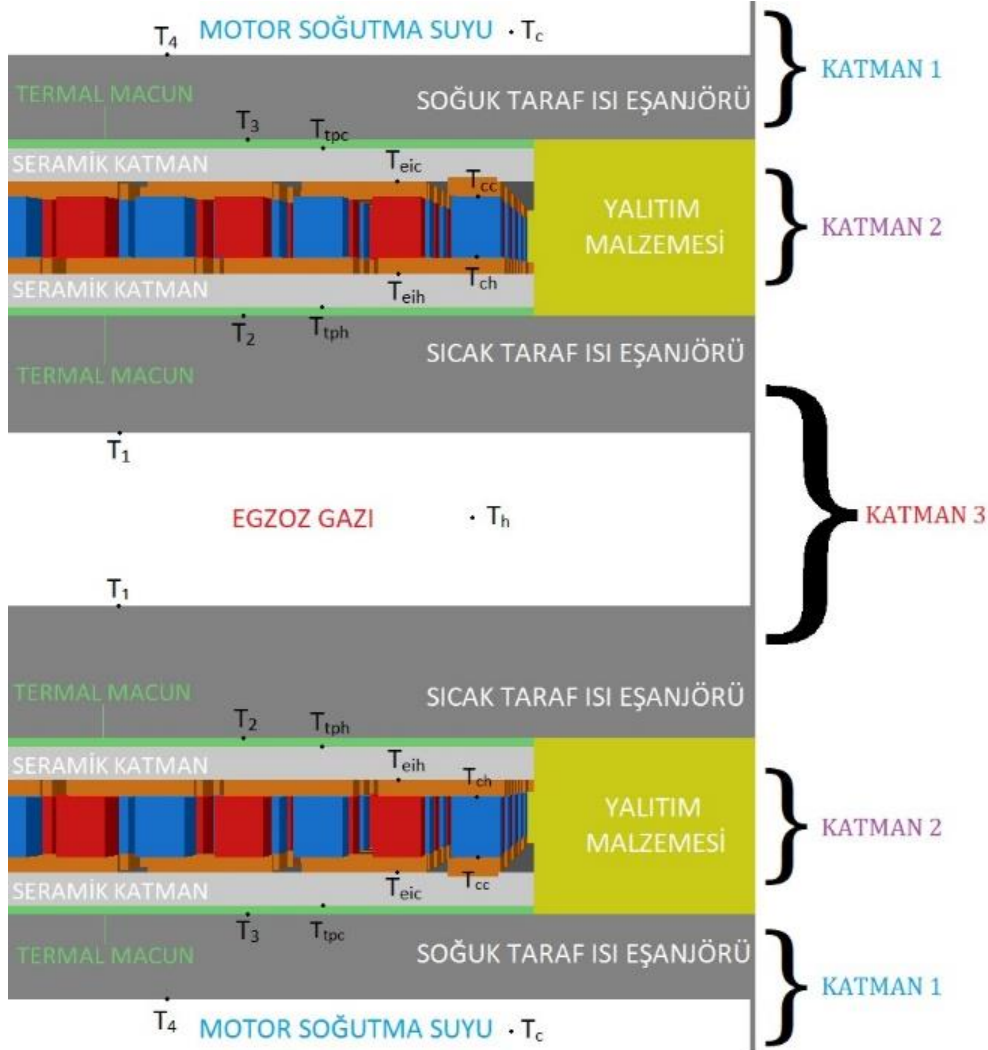
TEJ'ün Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik modeli; Modül ve yalıtım hesaplamaları, kanatçık hesaplamaları, eşanjör verimlilik hesaplamaları, ısı kayıpları ve katmanların sıcaklık değerlerinin hesaplanması ve termoelektrik modüllerde elektriksel hesaplamalar olmak üzere 5 çözümleme katmandan oluşmaktadır. Bu çözümleme katmanlarından oluşan teorik TEJ modelin akış diyagramı Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. TEJ'ün Matlab/Simulink modeline ait akış diyagramı (Flow chart by Matlab/Simulink model of TEG)

2.2.1. Modül ve Yalıtım Hesaplamaları (Calculations of Module and Insulation)

Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik TEJ modelinde orta egzoz eşanjörü ile MSS eşanjörleri arasındaki toplam ısı transferi miktarı, kullanılan her bir elemanın ısı iletim katsayıları dikkate alınarak kademelendirilmiştir. Her bir ısı transferi kademesi için denklemlerde kullanılan sıcaklık noktaları ve tanımlamaları Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Matlab/Simulink modelinde kullanılan TEJ'nin katmanları ve sıcaklık tanımlamaları (Layers and temperature definitions of TEG used in Matlab/Simulink model)

Topalci (2017) tarafından geliştirilen teorik model referans alınarak TEJ'nin modellenmesi için kullanılan formüller yardımıyla sayısal hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Kullanılan eşitlikler literatürde benzer çalışmalarda konu edilmiştir (Kunt and Güneş, 2017). Modül ve yalıtım hesaplamaları katmanında, modüllerin toplam genişliği (w_{mod}), sistemde paralel olarak yerleştirilen TEM adeti ($N_{mod,p}$), sistemde seri olarak yerleştirilen TEM adeti ($N_{mod,s}$) ve yalıtımda kullanılacak malzemenin genişlik (w_{ins}) verileri girdi olarak kullanılmaktadır. TEM'lerin toplam genişliği ($W_{mod,z}$) ve uzunluğu ($L_{mod,z}$);

$$W_{mod,z} = w_{mod} * N_{mod,p} \text{ ve } L_{mod,z} = w_{mod} * N_{mod,s} \quad (1)$$

Modüllerin yerleştirileceği toplam yüzey alanı ($A_{mod,z}$);

$$A_{mod,z} = L_{mod,z} * W_{mod,z} \quad (2)$$

Yalıtım bölgesinin alanı (A_{ins}) ve eşanjör sistemi yüzey alanı (A_z);

$$A_{ins} = [w_{ins} * W_{mod,z} * (N_{mod,s} + 1)] + [w_{ins} * (N_{mod,p} + 1)] * [w_{ins} * (N_{mod,s} + 1) + L_{mod,z}] \text{ ve } A_z = A_{ins} + A_{mod,z} \quad (3)$$

Modüllerin toplam uzunluğunun toplam genişliğine oranı (β_{lw});

$$\beta_{lw} = \frac{L_{mod,z}}{w_{mod,z}} \quad (4)$$

Toplam termoelektrik eşanjör uzunluğu (L_z) ve genişliği (W_z);

$$L_z = \sqrt{A_z * \beta_{lw}} \text{ ve } W_z = \sqrt{\frac{A_z}{\beta_{lw}}} \quad (5)$$

Nihai eşanjör boyutu (A_{he});

$$A_{he} = L_z * W_z \quad (6)$$

2.2.2. Kanatçık Hesaplamaları (Calculations of Fins)

Kanatçık hesaplamaları katmanında, eşanjör içerisindeki kanal adeti (N_f) ve kanatçık kalınlığı (T_f) değerleri girdi olarak kullanılarak eşanjörün içerisindeki kanatçık sayısı (N_{ch});

$$N_{ch} = N_f - 1 \quad (7)$$

Kanatçık aralığı (P_f);

$$P_f = \frac{W_z - T_f}{N_{ch}} \quad (8)$$

Kanatçıklar arası boşluk (S_f);

$$S_f = P_f - T_f \quad (9)$$

Kanatçıklar tarafından oluşturulan bir kanalın çevresi (P_{wet});

$$P_{wet} = 2L_f + 2S_f \quad (10)$$

Akış hareketi olan kanalın yapay çapı (D_h);

$$D_h = \frac{4 * L_f * S_f}{P_{wet}} \quad (11)$$

Kanalların oluşturduğu toplam giriş alanı (A_{ent});

$$A_{ent} = S_f * L_f * N_{ch} \quad (12)$$

Herhangi bir kanatçığın karakteristik uzunluk değeri ($L_{f,ch}$);

$$L_{f,ch} = L_f + \frac{T_f}{2} \quad (13)$$

Herhangi bir kanatçığın çevresi (P_{face});

$$P_{face} = 2T_f + 2L_z \quad (14)$$

Kanatçığın kesit alanı (A_c);

$$A_c = T_f * L_z \quad (15)$$

Tüm kanatçıkların toplam yüzey alanı ($A_{f,surf}$);

$$A_{f,surf} = 2 * N_{ch} * L_{f,ch} * L_z \quad (16)$$

Tabanın toplam alanı ($A_{b,surf}$);

$$A_{b,surf} = A_{zone} - (A_c * N_f) \quad (17)$$

Toplam etkin yüzey alanı ($A_{tot,surf}$);

$$A_{tot,surf} = A_{f,surf} + A_{b,surf} \quad (18)$$

2.2.3. Eşanjörlerin Verimlilik Hesaplamaları (Efficiency Calculations of Heat Exchangers)

Eşanjör verimlilik hesaplamaları katmanında, egzoz gazı ve MSS'nun debisi \dot{m} , egzoz gazı ve MSS'nun dinamik viskozitesi μ , eşanjör malzeme geometrisine bağlı sürtünme katsayısı (C), Prandtl sayısı (Pr), sıcak (egzoz eşanjörü) ve soğuk taraf (MSS eşanjörü) ısı iletim katsayısı (K) ve kanatçıkta kullanılan malzemenin ısı iletim (K_{fin}) katsayı değerleri girdi olarak kullanılır ve kanatçık sisteminin Reynold sayısı (Re);

$$Re = \frac{4 * \dot{m}}{\mu * P_{wet} * N_{ch}} \quad (19)$$

Nusselt sayısı (Nu);

$$Nu = C * Re^{1/2} * Pr^{1/3} \quad (20)$$

Sıcak ve soğuk taraf ısı taşınım katsayısı (h);

$$h = (Nu * K) / D_h \quad (21)$$

$$m = \sqrt{(h * P_{face}) / (K_{fin} * A_c)} \quad (22)$$

Tek bir kanatçığın verimliliği (η_f);

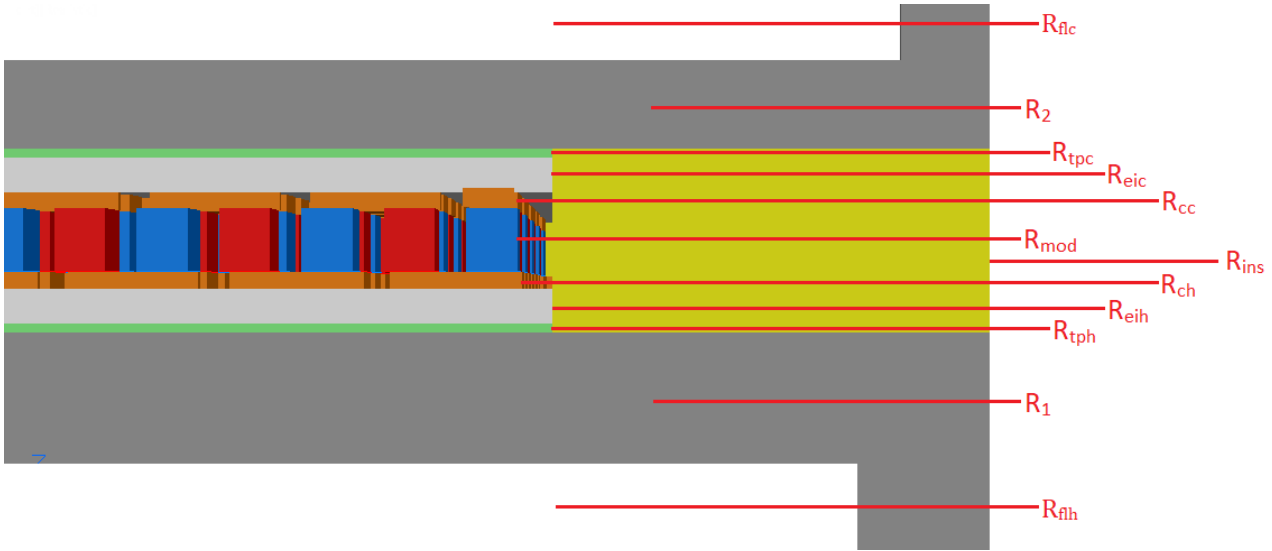
$$\eta_f = \frac{\tanh(m \cdot L_{f,ch})}{m \cdot L_{f,ch}} \quad (23)$$

Toplam kanatçık verimliliği (η_o);

$$\eta_o = 1 - \left[\frac{A_{f,surf}}{A_{tot,surf}} (1 - \eta_f) \right] \quad (24)$$

2.2.4. Isı Kayıpları ve Eşanjör Katmanlarının Sıcaklık Değerlerinin Hesaplanması (Calculation of Heat Losses and Heat Values of Heat Exchanger Layers)

Isı kayıpları ve “eşanjör katmanlarının sıcaklık değerlerinin hesaplanması katmanında”, sıcak ve soğuk taraf için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Matlab/Simulink modelinde kullanılan TEJ’ün katmanlarına ait direnç tanımlamaları Şekil 4’de verilmektedir.



Şekil 4. Matlab/Simulink modelinde kullanılan TEJ’ün katmanlarına ait direnç tanımlamaları (Resistance definitions for the layers of TEJ used in Matlab / Simulink model)

Egzoz gazı ve MSS akışkanlarının ısı direnci (R_{flx});

$$R_{flx} = \frac{1}{\eta_o \cdot h \cdot A_{tot,surf}} \quad (25)$$

Diğer ısı dirençler (R_{xx}), malzeme kalınlıkları (L_{xx}), malzeme ısı iletkenlikleri (K_{xx}) ve malzeme kesit alanları (A_{xx}) değerleri; eşanjör malzemesi ısı direnci (R_{mh}), kalınlığı (L_{mh}), kesit alanı (A_z), termal macun direnci (R_{tp}), kalınlığı (L_{tp}) ve kesit alanı (A_{mod}), seramik direnci (R_{ei}), seramik kalınlığı (L_{ei}) ve kesit alanı (A_{mod}), yalıtım malzemesi direnci (R_{ins}), kalınlığı (L_{ins}) ve kesit alanı (A_{ins}), için kademe kademe Eşitlik 26-27’deki denklemler ile hesaplanmıştır.

$$R_{xx} = \frac{L_{xx}}{K_{xx} \cdot A_{xx}} \quad (26)$$

Bakır iletkenin ısı direnci (R_{cp});

$$R_{cp} = \frac{L_{cp}}{K_{cp} \cdot A_{cp} \cdot n_{pn}} \quad (27)$$

Bakır iletken kalınlığı (L_{cp}), bakır iletken ısıl iletkenliği (K_{cp}), bakır iletken kesit alanı (A_{cp}), tek bir modüldeki p-n çifti sayısı (n_{pn}), p-n modüllerinin ısıl direnci (R_{mod}) kalınlıkları (L_{pn}), ısıl iletkenlikleri (K_{mod}) ve kesit alanları (A_{pn}) değerleri;

$$R_{mod} = \frac{L_{pn}}{K_{mod} * A_{pn} * n_{pn}} \quad (28)$$

TEM'ün toplam ısıl direnci (R_{mix});

$$R_{mix} = 2 * (R_{tp} + R_{ei} + R_{cp}) + R_{mod} \quad (29)$$

TEM ve yalıtım alanının toplam ısıl direnci (R_{tot});

$$R_{tot} = \{[(N_{mod,s} * N_{mod,p})/R_{mix}] + [((N_{mod,s} + 1)(N_{mod,p} + 1))/R_{ins}]\}^{-1} \quad (30)$$

TEJ'ün toplam ısıl direnci (R_{tej});

$$R_{tej} = R_{flh} + R_{flc} + 2 * R_{ex/mss} + R_{tot} \quad (31)$$

Kanatçık yapısı ve malzeme tipine bağlı verimlilik sonucu oluşan sıcaklık farkı (ΔT_{η});

$$\Delta T_{\eta} = T_{ex} * \eta_o - T_{mss} * \eta_o \quad (32)$$

Burada, T_{ex} egzoz gaz sıcaklığı, T_{mss} MSS sıcaklığıdır. TEJ sisteminin ısı transfer hızı (Q);

$$Q = \frac{\Delta T_{\eta}}{R_{tej}} \quad (33)$$

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

$$T_{fl} = T_{ex/mss} * \eta_o \quad (34)$$

Sıcak ve soğuk taraf eşanjör sıcaklık değerleri T_{xx} , T_{yy} ve ısıl direnç değerleri R_{zz} ; iç yüzeyi sıcaklığı (T_{he}), termal macun temas noktası (T_{hes}), seramik katman temas noktası (T_{tp}), bakır katman temas noktası (T_{ei}) ve p-n bacakları temas noktası (T_{cpex}/T_{cpmss}) için kademe kademe aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$T_{xx} = T_{yy} - Q * R_{zz} \quad (35)$$

p-n bacaklarına düşen sıcaklık farkı ise;

$$\Delta T_{te} = T_{cpex} - T_{cpmss} \quad (36)$$

2.2.5. Termoelektrik Modüllerde Elektriksel Hesaplamalar (Electrical Calculations in Thermoelectric Modules)

Termoelektrik modüllerde elektriksel hesaplamalar katmanında, TEJ elektrik sistemine ait TEJ'ün Seebeck katsayısı (α_{tej}), TEJ'ün iç direnci (r_{tej}), TEJ'ün açık devre gerilimi ($V_{oc,tej}$);

$$V_{oc,tej} = \alpha_{tej} * \Delta T_{te} \quad (37)$$

TEJ'ün yük altındaki akımı (I_L);

$$I_L = \frac{V_{oc,tej}}{r_{tej} + R_L} \quad (38)$$

Burada R_L kullanıcı tanımlı yük direncidir. TEJ'ün yük altındaki çıkış gerilimi (V_L);

$$V_L = I_L * R_L \quad (39)$$

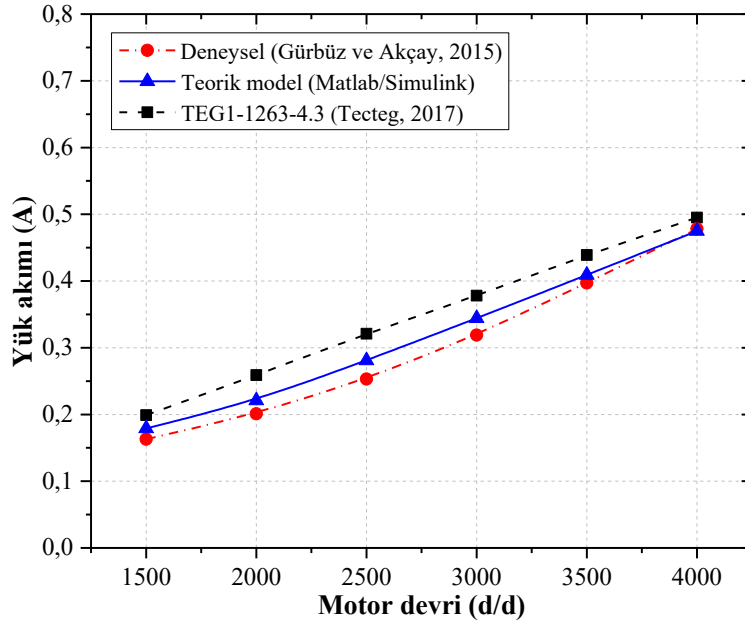
TEJ'ün yük altındaki çıkış gücü (P_L);

$$P_L = I_L^2 * R_L \quad (40)$$

Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik modelin akış diyagramı Şekil 2'de verilmiş ve her bir katman, akış diyagramı üzerinde tanımlanmıştır.

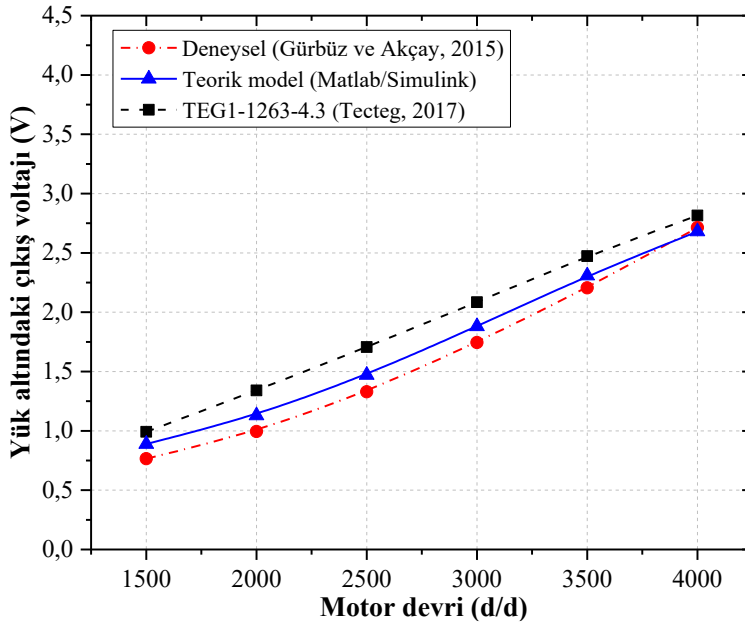
3. Araştırma Bulguları (Findings of Research)

Motorun 1500-4000 d/d aralığı için bir adet TEG1-1263-4.3 tipi TEM kullanılarak Matlab/Simulink programı ile elde edilen yük akımının deneysel sonuçlar ve ürün katalog değerleri ile karşılaştırılması Şekil 5'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, motor devrinin artışıyla birlikte TEJ içinden geçen egzoz gazlarının sıcaklık ve debi artışına bağlı olarak TEJ'in çıkışındaki yük akımı artmaktadır. Motorun 1500-4000 d/d aralığında, Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik model kullanılarak hesaplanan yük akımı değerleri ile deneysel yük akımı sonuçları arasındaki farkın %9,9-0,6 aralığında değiştiği görülmektedir. Bununla birlikte, teorik model ve ürün katalog değerleri arasındaki fark ise motorun 1500-400 d/d aralığı için %17,2-4,2 aralığında değişmiştir. Bu sonuçlar, teorik modelin yük akımı sonuçları ile deneysel yük akımı sonuçları arasındaki farkın motor devrinin artışı ile azaldığını göstermektedir.



Şekil 5. Farklı motor devirleri için yük akımının değişimi (Variation of load current for different engine speeds)

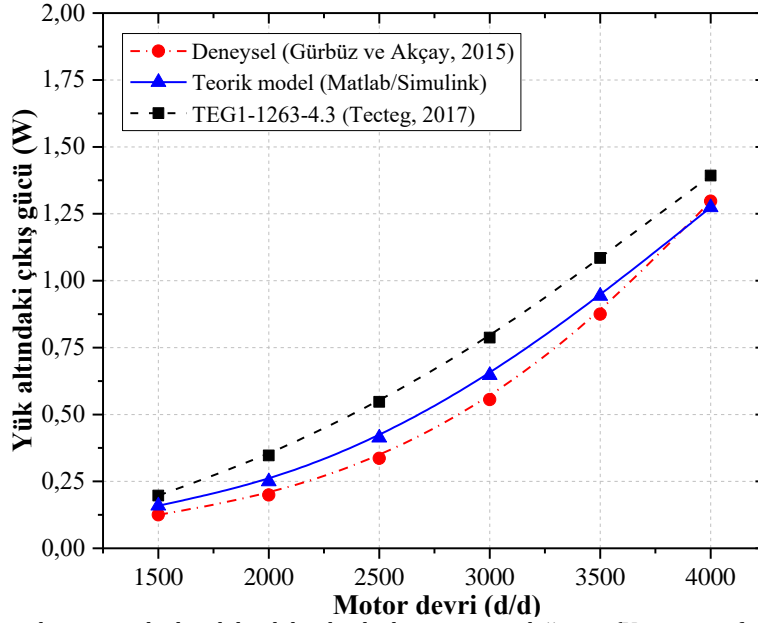
Şekil 6'da motorun 1500-4000 d/d aralığı için bir adet TEG1-1263-4.3 tipi TEM kullanılarak Matlab/Simulink programı ile elde edilen yük altındaki çıkış voltajının, deneysel çalışmanın sonuçları ve ürün katalog değerleri ile karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, motor devrinin artışıyla birlikte TEJ içerisine alınan egzoz gazlarının sıcaklık ve debi değerlerinin artışıyla birlikte TEJ'in yük altındaki çıkış akımı artmaktadır. 1500 d/d motor devrinde deneysel ve teorik çıkış voltajı sonuçları arasındaki fark %16,2 iken, motor devrinin 4000 d/d'ya artırılması ile deneysel ve teorik çıkış voltajı değerleri arasındaki farkın %1,2'ye azaldığı görülmektedir. Buna karşın, teorik model ile ürün katalog değerleri arasındaki fark, motorun 1500-400 d/d aralığı için %18,7-4,9 aralığında değişmektedir. Bu sonuçlar, teorik modelin yük altındaki çıkış voltajı ile deneysel çalışmaya ait yük altındaki çıkış voltajı sonuçları arasındaki farkın, motor devrinin artışı ile dikkate değer oranda azaldığını göstermektedir.



Şekil 6. Farklı motor devirleri için yük altındaki çıkış voltajının değişimi (Variation of matched output voltage for different engine speeds)

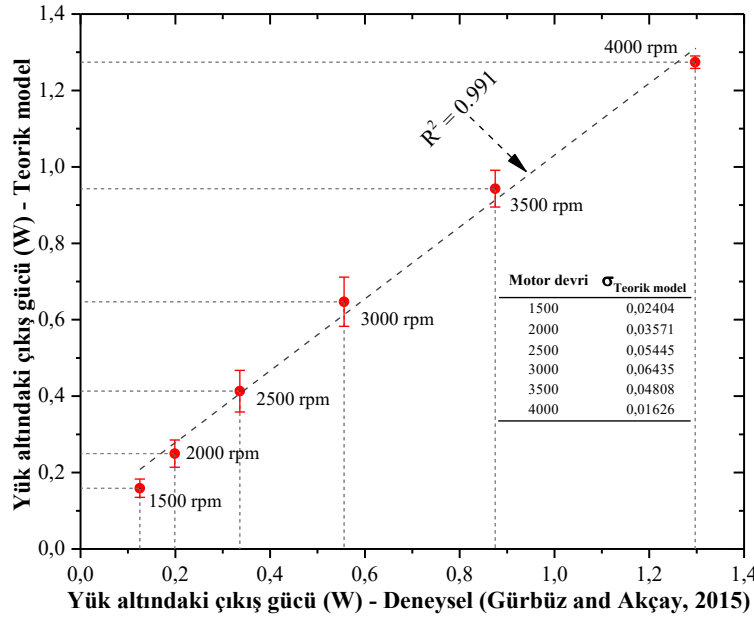
Motorun 1500-4000 d/d aralığı için bir adet TEG1-1263-4.3 tipi TEM kullanılarak Matlab/Simulink programı ile elde edilen yük altındaki elektriksel çıkış gücünün, deneysel çalışmanın sonuçları ve ürün katalog değerleri ile karşılaştırılması Şekil 7'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, genel olarak motor devrinin artışıyla birlikte TEJ içerisine alınan egzoz gazlarının sıcaklığı ve debisindeki artışa bağlı olarak TEJ'in çıkış gücü artmaktadır. Motorun 1500-4000 d/d aralığında Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik model ile deneysel çalışmada elde edilen TEJ'ün elektriksel çıkış gücü sonuçları arasındaki farkın %21,4-1,8 aralığında değiştiği görülmektedir.

Bununla birlikte, teorik model ve ürün katalog değerleri arasındaki fark ise motorun 1500-4000 d/d aralığı için %32,4-9,3 aralığında değişmiştir. Bu sonuçlar, teorik modelin çıkış gücü ile deneysel çıkış gücü sonuçları arasındaki farkın motor devrinin artışı ile azaldığını göstermektedir.



Şekil 7. Farklı motor devirleri için yük altındaki elektriksel çıkış gücünün değişimi (Variation of matched output power for different engine speeds)

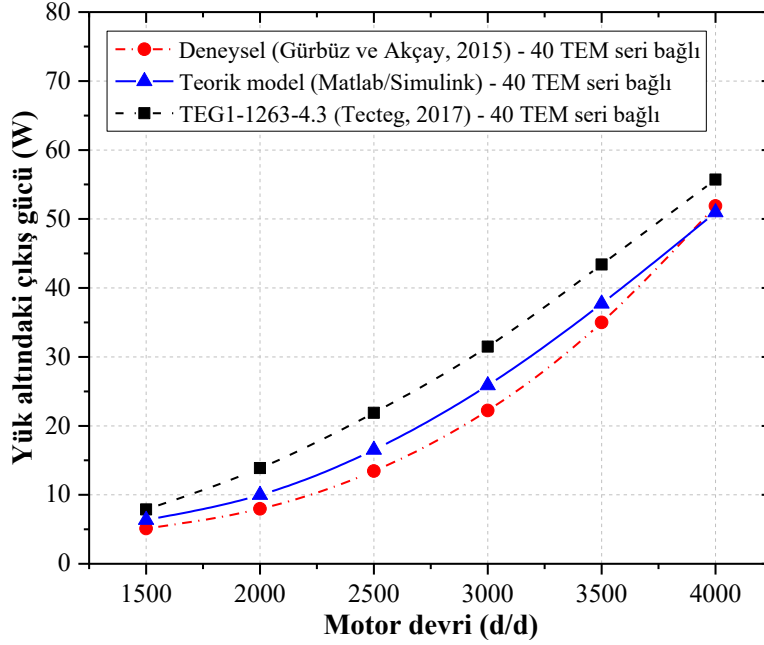
Şekil 8'de motorun farklı devirleri için deneysel ve teorik model ile elde edilen TEJ çıkış gücünün korelasyonu verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi motorun 1500-4000 d/d aralığında deneysel ve teorik modelin çıkış gücü değerleri arasındaki korelasyonun $R^2 = 0,991$ gibi yüksek bir değerde olduğu görülmektedir. Bu sonuç, motorun 1500-4000 d/d aralığında teorik model ile deneysel TEJ çıkış gücü sonuçları arasında iyi bir uyumun olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, düşük (1500-2000 d/d) ve yüksek motor devirlerinde (4000 d/d) teorik model ile elde edilen TEJ çıkış gücü değerleri, deneysel sonuçlar referans alındığında oldukça düşük standart sapma değerine (4000 d/d'da $\sigma_{\text{Teorik model}} = 0,016$) sahip iken, orta motor devirlerinde (2500-3500 d/d) teorik modelin standart sapma değerlerinin arttığı ve en yüksek sapma değerinin ($\sigma_{\text{Teorik model}} = 0,064$) 3000 d/d'da olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Farklı motor devirleri için deneysel ve teorik model ile elde edilen TEJ çıkış gücünün korelasyonu (Correlation of TEG output power obtained by experimental and theoretical model for different engine speeds)

Şekil 9'da teorik model, deneysel ve ürün katalog sonuçlarına göre 40 adet TEM'ün seri bağlanması sonucu elde edilen yük altındaki TEJ çıkış gücünün karşılaştırması verilmektedir. Motor devrinin 1500 d/d'dan 4000 d/d'ya

artırılması ile teorik model ile deneysel sonuçlar arasındaki fark %19,5'den %1,8'e kadar azalmaktadır. Bununla birlikte, 40 adet TEG1-1263-4.3 tipi TEM seri olarak bağlanarak Matlab/Simulink programı ile elde edilen TEJ çıkış gücünün 1500 d/d'da 6,36 W'dan parabolik bir eğri ile artarak 4000 d/d'da 50,96 W'a ulaşmaktadır. Buna karşın 1500 d/d'da deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre minimum TEJ çıkış gücü 5,12 W iken 4000 d/d'da maksimum TEJ çıkış gücü 51,88 W değerindedir. Bu sonuç, maksimum TEJ çıkış gücü değerleri açısından deneysel ve teorik model (Matlab/Simulink) sonuçları arasındaki farkın oldukça düşük düzeyde (0,92 W) olduğunu göstermektedir. Ayrıca, motorun 1500-4000 d/d aralığında TEJ'ün elektriksel çıkış gücü açısından teorik model sonuçlarının deneysel çalışma sonuçları ile ürünün katalog değeri dikkate alınarak hesaplanan sonuçlar arasında yer almıştır. Bu bulgular, Matlab/Simulink programı kullanılarak geliştirilen teorik modelin, İYM'un egzoz atık ısı enerjisinden elektrik üretiminin gerçekleştirildiği TEJ'lerde kabul edilebilir bir hata oranı ile kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 9. 40 adet seri bağlı TEM için TEJ'ün yük altındaki çıkış gücü (Variation of matched output power of TEG for 40 TEM of connected in series versus engine speed)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Gürbüz ve Akçay (2015) tarafından iki silindirli, buji ateşlemeli bir motorun $\frac{1}{2}$ gaz keleşliği açıklık oranı ve 1500-4000 d/d devir aralığında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda tespit edilen TEJ girişindeki egzoz gazı sıcaklığı ve debisinin yanında MSS sıcaklık ve debi değerleri kullanılarak Matlab/Simulink programında 3 katmanlı teorik TEJ modeli geliştirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Matlab/Simulink programında geliştirilen teorik TEJ modeli ile elde edilen yük altındaki akım, gerilim ve çıkış gücü değerleri, motorun 1500-4000 d/d aralığı için deneysel sonuçlar ve ürün katalog değerleri arasında değerler almış olup, deneysel sonuçlara daha yakındır. Motor devrinin 1500 d/d'dan 4000 d/d'ya artırılması ile deneysel ve teorik model sonuçları arasındaki fark azalmaktadır.
- Yük altındaki güç çıkışı açısından, teorik model sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında $R^2=0,991$ gibi yüksek bir korelasyon bulunmaktadır. Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki fark 3000 d/d motor devrinde en yüksek değerde ($\sigma_{\text{Teorik model}}=0,064$) iken 4000 d/d'da minimum değerdedir ($\sigma_{\text{Teorik model}}=0,016$).
- Teorik TEJ modelinde, 40 adet TEM'ün seri bağlanması ile elde edilen TEJ çıkış gücü 1500 d/d motor devrinde 6,36 W iken motor devrinin 4000 d/d'ya artırılması ile TEJ çıkış gücü 50,96 W'a ulaşmaktadır. Motorun 4000 d/d devrindeki deneysel sonuçlarda ise TEJ çıkış gücü 51,88 W değerindedir. 4000 d/d motor devri için deneysel ve teorik model ile elde edilen TEJ çıkış gücü arasındaki fark %1,8 (0,92 W) gibi oldukça düşük bir değerdedir.
- Çalışmada elde edilen teorik model ile deneysel çalışma sonuçları arasında ortaya çıkan farklılıkların; deneysel çalışma şartları ve teorik modelde yapılan kabuller arasındaki farklılıkların yanında eşanjör yüzeyleri ve TEM yüzeyleri arasındaki yüzey kontak direncinden ve ayrıca p-n tipi yarı iletken malzemelerin sıcaklıkla birlikte seebeck katsayısında meydana gelen değişimlere bağlı olarak ortaya çıktığı öngörülmektedir.

- Çalışma kapsamında elde edilen bulgular, Matlab/Simulink programı kullanılarak geliştirilen teorik modelinin İYM'un egzoz atık ısı enerjisinden elektrik üretiminin gerçekleştirildiği TEJ'lerde kabul edilebilir bir hata oranı ile kullanılabilceğini göstermektedir.
- Ancak, TEJ'lerin düşük dönüşüm veriminin artırılması açısından daha yüksek TEJ çıkış gücünün üretileceği eşanjör düzenlemeleri ve termoelektrik malzemelerin kullanımına yönelik daha fazla teorik ve deneysel çalışmaların yürütülmesi gerekmektedir. Yazarlar TEJ'ler hakkında yürütecekleri gelecek teorik ve deneysel çalışmalarda, bu konular üzerine odaklanmayı planlamaktadır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmada, Doç. Dr. Habib Gürbüz'ün danışmanlığında Topalcı (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.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Referanslar (References)

- Akçay H., 2015. LPG ile Çalışan Buji Ateşlemeli Bir Motorda, Egzoz ve Soğutma Sisteminde Kaybedilen Isının TEJ Modülü ile Kullanılabilir Enerjiye Dönüştürülmesi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD.
- Chen L., Cao D., Huang Y., Peng F.Z., 2008. Modeling and Power Conditioning for Thermoelectric Generation, Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, 1098-1103, 15-19.
- Chen M., Rosendahl L.A., Condra T.J., Pedersen J.K., 2009. Numerical Modeling of Thermoelectric Generators with Varying Material Properties in a Circuit Simulator, IEEE Transactions on Energy Conversion, 24(1), 112-124.
- Dalola S., Ferrari M., Ferrari V., Guizzetti M., Marioli D., Taroni A., 2009. Characterization of Thermoelectric Modules Powering Autonomous, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 58(1), 99-107.
- Derun E. M., 2005. Sb₂Te₃ ve Bi₂Te₃ içerikli bileşiklerin termoelektrik, yapısal ve mikro yapısal özelliklerinin incelenmesi Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 18-32.
- Doğdu, M.F., 2013. Termoelektrik Soğutucuların Performansına Doğrudan Temaslı Isı Değiştiricilerin Etkilerinin Deneysel İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 115s, İstanbul.
- Dresselhaus M.S., Chen G., Tang M.Y., Yang R., Lee H., Wand D., Ren Z., Fleurial J. P. & P. Gong, 2007. New Directions for Low-Dimensional Thermoelectric Materials, Advanced Materials, 19(8), 1043- 1057.
- Dziurdzia P., Mirocha A., 2009. From Constant to Temperature Dependent parameters Based Electrothermal Models of TEG, XIV. Mixedes International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits Systems, Lodz, 555-559, 25-27.
- Freedman A.P., (2011), A thermoelectric generation subsystem model for heat recovery simulations. Rochester Institute of Technology
- Güneş, S., Hançer, E., 2017. Termoelektrik Modül Kullanarak İçten Yanmalı bir Otomobilin Egzozundan Atılan Isıdan Enerji Geri Kazanımının Termal Analizi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 33(3), 1-12.
- Gürbüz H., Akçay H., 2015. Experimental Investigation of an Improved Exhaust Recovery System for Liquid Petroleum Gas Fueled Spark ignition Engine, Thermal Science, 19(6), 2015.
- Hsu, C., Huang, G., Chu, H., Yu, B., Yao, D., 2011. Experiments and Simulations on Low-Temperature Waste Heat Harvesting System by Thermoelectric Power Generators. Applied Energy, 88, 1291-1297.
- <http://tecteg.com/thermoelectric-power-modules-sizes-selection/>, Date of access and time: 10.21.2017/ 18:30.
- Ikoma K., Munekiyo M., Furuya K., Kobayashi M., Izumi T., Shinohara K., 1998. Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles, XVII. International Conference on Thermoelectrics, Nagoya, 464- 467, 24-28.
- Karri M.A., 2011. Thermoelectric power generation system optimization studies. Clarkson University.
- Khattab N.M., El Shenawy E.T., 2006. Optimal Operation of Thermoelectric Cooler Driven by Solar Thermoelectric Generator", Energy Conversion and Management, 47(4), 407-426.
- Kunt M.A., 2016. İçten Yanmalı Motor Atık Isılarının Geri Kazanımında Termoelektrik Jeneratörlerin Kullanımı. El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 3(2), 192-203.
- Kunt M.A., Gunes H., 2017, Experimental Investigation of the Performance of Different Heat Exchanger Profiles in the Waste Heat Recovery System with Thermoelectric Generator for Automobile Exhaust Systems, SSRG journal, 4(8), 1-5.
- Lertsatitthanakorn C., 2007. Electrical Performance Analysis and Economic Evaluation of Combined Biomass Cook Stove Thermoelectric (BITE) Generator, Bioresource Technology, 98(8), 1670-1674.
- LPG ile Çalışan Buji Ateşlemeli Bir Motorda, Egzoz ve Soğutma Sisteminde Kaybedilen Isının TEJ Modülü ile Kullanılabilir Enerjiye Dönüştürülmesi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD.
- Rowe D.M., Bhandari C.M., 1983. Modern Thermoelectrics. Holt-Technology, 168s, London.
- 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, (169-170), 168-170.
- Tecteg, (2017, December 18). Specifications TEG Module TEG1-1263-4.3, Retrieved from <https://tecteg.com/store-thermoelectric-power-module-selection-purchase/30x30-35x35/>
- Temizer İ., İlkılıç C., Öner C. 2016. Dizel Motor Egzoz Sistemi için Termoelektrik Jeneratör Uygulaması ve Akış Analizi. Afyon

- Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 16 (025901), 431-445.
- Topalci Ü., 2017, Taşıt Egzoz Gazı Atık Isı Enerjisinden Elektrik Enerjisinin Üretilmesi için Termoelektrik Jeneratörün Modellenmesi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği ABD.
- Yavuz, C., Özkaymak, M., & Kaya, M. 2010. Termoelektrik Modüllü Su Soğutucusunda Farklı Hava Debilerinin Sistem Performansına Etkileri. e-Journal of New World Sciences Academy, 5, 131-143.
- Yu S., Du Q., Diao H., Shu G., Jiao K. 2015. Effect of Vehicle Driving Conditions on the Performance of Thermoelectric Generator. Energy Conversion and Management, 96, 363-376.