

Termoelektrik Modül Kullanarak İçten Yanmalı Bir Otomobilin Egzozundan Atılan Isıdan Enerji Geri Kazanımının Termal Analizi

Sibel GÜNEŞ*1, Esra HANÇER²

*1Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, KAYSERİ

(Alınış / Received: 03.04.2017, Kabul / Accepted: 05.10.2017, Online Yayınlanma / Published Online: 29.12.2017)

Anahtar Kelimeler

Enerji geri kazanımı,
Isı borusu,
Termoelektrik jeneratör,
İçten yanmalı motor

Öz: Termoelektrik jeneratör kullanılarak egzoz gazındaki enerjinin geri kazanımı mümkündür. Termoelektrik jeneratörlerinin çıkış gücünün artırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır fakat çalışma sıcaklıklarının kısıtlı olmasından dolayı ani sıcaklık değişimlerine karşı çalışma sıcaklıklarının dengelenmesine ihtiyaç vardır. Isı borulu eşanjörler, düşük termal dirençle sahip olduklarından dolayı sıcak ve soğuk kaynaklar arasında yüksek ısı transferi için kullanılırlar. Isı borusunun özel bir çeşidi olan değişken iletkenlikli ısı borusu kullanılarak çalışma sıcaklığı kontrol altında tutulabilir ve termoelektrik jeneratörler için güvenli bir çalışma ortamı sağlanabilir.

Bu çalışma, yukarıda bahsi geçen yaklaşımın değerini teorik olarak araştırmaktadır. Değişken iletkenlikli ısı borusu kullanılarak tasarlanan termoelektrik jeneratörün termal ve elektrik modeline çözüm sunulmuştur. Yapılan teorik çalışmanın sonuçları ise doğruluğu kanıtlamak açısından literatürdeki başka bir deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, ısı borulu ısı eşanjörü termoelektrik jeneratörün minimum eşdeğer termal dirençle, pasif ve güvenli bir şekilde sabit, optimum bir sıcaklık değerinde çalışmasına olanak sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, değişken iletkenlikli ısı borusunun kullanımının kısmi yük altında aktif modüllerin sıcaklık seviyesini fazla etkilemeden aktif modül alanını etkin bir şekilde azalttığı tespit edilmiştir.

Thermal Analyse of Waste Heat Recovery of Exhaust Gas from Internal Combustion Engine Using Thermoelectric Modules

Keywords

Energy recovery,
Heat pipe,
Thermoelectric generator,
Internal combustion engine.

Abstract: Exhaust heat recovery is possible by using thermoelectric generator. At the same time, it is needed to increase the power output of thermoelectric generators. But the operating temperature is required to regulate the operating temperature since thermoelectric generators are temperature limited. Heat pipe based heat exchangers are used obtain high heat transfer between a hot and a cold source due to their very low resistance. The operating temperature may be controlled by using variable conductance heat pipe which is one of the special kind of heat exchangers. By this way, reliable conditions may be provided for thermoelectric generators.

The present study investigates theoretically the merit of the aforementioned approach. A thermal model of a thermoelectric generator with variable conductance heat pipe assist is proposed. Theoretical results obtained are presented together with experimental results exist in literatur to validate the model. It was found that indeed the heat pipe heat exchanger enables the thermoelectric generator to operate at a constant, optimal temperature in a passive and safe way and with a minimal overall thermal resistance. Furthermore, the use of variable conductance heat pipes was found to prevent thermal dilution under low loads by effectively reducing the active module area and not by deprecating the temperature level of the whole generator.

1. Giriş

Termoelektrik jeneratörler otomobillerdeki atık ısının geri kazanımında gelecek vadede tekniklerden biridir. Son yıllarda temiz enerji üretimine olan ilgi, mühendislerin ve bilim adamlarının dikkatini termoelektrik jeneratör teknolojisine çekmiştir. Mori ve diğerleri [1], piyasada mevcut termoelektrik malzemeleri ve endüstriyel teknikleri kullanarak araçların yakıt ekonomisiyle ilgili olarak termoelektrik teknolojinin potansiyelini araştırmıştır. Hussain ve diğerleri [2], hibrit araçlar için termoelektrik yolla enerji geri kazanımının etkileri üzerine çalışma yapmıştır. Daha sonrasında Stobart ve Milner [3] araçlarda termoelektrik yolla enerji üretilebileceğini keşfetmiştir ve bu çalışma sonucunda termoelektrik cihazdan 1.3 kW çıkış gücü sağlayarak bunun küçük yolcu taşıtlarının alternatörlerinin yerine kullanılabilirliği sonucuna varmıştır. Stobart ve diğerleri [4] tarafından yapılan çalışma da ise araçların termoelektrik cihaz kullanarak yakıt tüketiminde tasarruf potansiyelinin olduğunu ifade etmiştir. Yapılan bu çalışmanın sonucunda %4.7'ye kadar yakıt tasarrufu sağlandığı kaydedilmiştir. Zhang ve Chau [5], basit yapılarından ve motorun işleyişine etkisinin az olmasından dolayı termoelektrik jeneratörlerin kurulumunun çoğunlukla egzoz gazı sistemine uygulandığını bildirmişlerdir. BMW[6], Honda[2] ve Ford[7] gibi büyük otomobil markaları termoelektrik modül kullanılan sistemleri geliştirerek egzoz ısısından enerji geri kazanımına olan ilgilerini yaptıkları çalışmalarda ortaya koymuşlardır. Bu firmalar tarafından kullanılan bu metotlarda; egzoz borusu flanş yardımıyla bir genişleme odasına bağlanmıştır ve modüllerin bir yüzeyi genişleme odasının yüzeyine yerleştirilirken, diğer yüzeyi ise akışkan bir soğutucu tarafından soğutulmaktadır. Soğutucu sistem, arabanın kendi radyatörü olabileceği gibi bağımsız bir radyatör de olabilir. Bu teknoloji henüz günümüz araçlarında uygulanmamış olup halen fikir aşamasındadır. Genişleme odasının ve soğutma metodu gibi farklılıkları bulunan ve birbirine benzeyen birçok tasarım mevcuttur.

Geleneksel tip araba radyatörlerin yerini alabilecek termoelektrik teknolojinin kullanıldığı atık ısı geri kazanım sistemleri hakkında çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalarda amaç; ekstradan hareketli parçalara gerek kalmayan bir radyatör tasarlamaktır. Fazladan hareketli parçalara ihtiyaç duyulmadan ısı transferine ve güç üretimine olanak sağladığından dolayı yapılan bu çalışmalarda ısı borusu ve termoelektrik jeneratör kullanılmıştır [8, 9]. Bu çalışmalarda sistemin literatürdeki diğer çalışmalardan farkı egzoz gazından değil de soğutucunun atık ısısından faydalanmak için tasarlanmış olmasıdır. Yapılan bu çalışmada 40x40 mm²'lik 72 tane termoelektrik modül ve 128 adet küçük çapta ısı borusu kullanılmıştır. Araç rölantideyken termoelektrik jeneratörün sıcak yüzey ve soğuk yüzey sıcaklıkları sırasıyla yaklaşık olarak 90°C ve 70°C olup bu şartlar altında 28W üretilmiştir. Araç 80km/h hızla giderken ise sıcak yüzey ve soğuk yüzey sıcaklıkları sırasıyla yaklaşık olarak 90°C ve 45°C olup 75W üretilmiştir.

Literatürde termoelektrik modül ve ısı borusunun beraber kullanıldığı egzozdan enerji geri kazanımın sağlandığı iki tip yöntem mevcuttur. Birinci yöntemde [10]; egzoz gazı, dış kısmında ısı boruları olan egzoz borusundan dışarı atılır. Bu esnada ısı boruları ısının bir kısmını soğurarak bu ısıyı içinde bulunduğu alüminyum bloğa iletir. Termoelektrik modüllerin sıcak yüzeyi alüminyum bloğun dış yüzeyinde konumlandırılmıştır ve modüllerden çekilen ısı modüllerin diğer yüzeyinde bulunan soğutulan su vasıtasıyla transfer edilir. Bu sistem, 112 tane 40x40 mm²'lik termoelektrik modül kullanılarak maksimum 350W güç üretmiştir.

Literatürdeki ikinci yöntem ise Martins ve diğerleri[11-13] tarafından çalışmalarında kullanılan yöntemlerdir. Bu çalışmalarda kullanılan yöntem de birinci yöntemde [10] benzer bir yol izler. Egzoz gazındaki ısı, ısı borusu yardımıyla çekilir ve termoelektrik modülün sıcak yüzeyine aktarılır. Termoelektrik modülün diğer yüzeyini soğutmak için ise su kullanılır. Bu yöntemle yapılan çalışmalarda [11-13] diğer çalışmalardan farklı olarak standart ısı borusu yerine değişken iletkenlikli ısı borusu kullanılmıştır. Değişken iletkenlikli ısı borusu standart ısı boruları gibi çalışır fakat standart ısı borusundan farklı olarak çalışma sıcaklığının sabit tutulmasına olanak sağlar. Değişken iletkenlikli ısı borusunun içerisinde yoğunlaşmayan gaz bulunmaktadır ve bu gaz artan ısı yük durumunda ısı borusu içerisinde yükselerek genişleme tankına itilir. Bu durum yoğunlaşmanın gerçekleştiği bölümünün uzunluğunu artırır. Dolayısıyla artan ısı yükte kondenser uzunluğunun artmasından dolayı çalışma sıcaklığı değişmez. Değişen ısı yükler göz önüne alındığında ısı borusunun çalışma sıcaklığının sabit tutulabilmesi termoelektrik modüller için bir avantajdır. Çünkü çalışma esnasında modüllerin dayanabileceği maksimum sıcaklık aşıldığı takdirde bozulurlar.

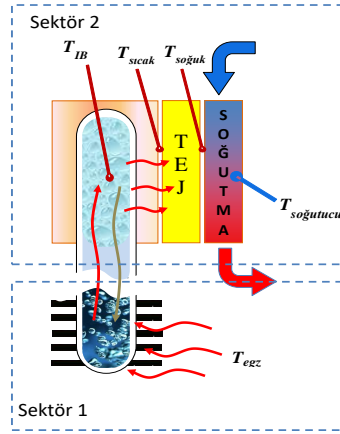
Brito ve diğerleri [14], yaptığı çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak termoelektrik etkileri de göz önünde bulundurarak termoelektrik modülün termal modellemesini sistemin modellemesine dahil etmiştir ve deneysel verilerle kıyaslayarak sonuçları doğrulamıştır. Bir başka çalışmada [15], Egzozdan ısı geri kazanım sisteminin prototipi iç ısıtmayı sağlamak amacıyla bir otobüse uygulanmıştır. Sistemde, egzoz gazından ısıyı çekmek ve bu ısıyı temiz ortam havasına transfer etmek için bir ısı borusu kullanılmıştır. Bu temiz hava araç kabinine doğru yönlendirilir. Normalde tipik otomobil ısıtıcıları motorun soğutucusundaki atık ısıyı kullanırlar fakat bu bahsedilen sistem geniş otobüs kabinleri için yeterli olmayacaktır. Bu sistem elektrik üretmek için tasarlanmamıştır, sadece yakıt tasarrufu sağlayarak ısıtıcılar için ekstra bir kazanım sağlamaktadır.

Tüm bu çalışmalardan, termoelektrik jeneratör teknolojisinin içten yanmalı motorlarda gelecek vadede bir enerji geri kazanım tekniği olduğu anlaşılmaktadır. Bu teknolojinin kullanımını kısıtlayan en önemli şey termoelektrik malzemelerin yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmamalarıdır. Termoelektrik malzemelerin sıcaklık dayanımını artıracak çalışmalar ise gün geçtikçe artmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, içten yanmalı bir motorun egzozundan atılan ısının geri dönüşümünü sağlayacak bir termoelektrik jeneratör tasarlayarak bu sistemin potansiyelini hafif hizmet araçları için araştırmaktır. Bu enerji geri kazanım sisteminde egzozdaki ısıyı çekmek için değişken iletkenlikli ısı borusu, termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için de termoelektrik modül kullanılmıştır. Çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan farkı termoelektrik etkiler (Seebeck, Peltier) göz önünde bulundurularak termoelektrik cihazın detaylı olarak modellenmeye dahil edilmesidir [16].

2. Materyal ve Metot

Tasarlanan modelde, bir otomobil egzozundan çıkan egzoz gazının bir kanal yardımıyla eşanjörün alt kısmında bulunan evaporatör bölümüne ulaşması sağlanır. Egzoz gazından evaporatöre geçen ısı, ısı borusu içerisindeki çalışma sıvısını buharlaştırır ve ısı borusu içerisindeki buhar kondenser duvarına kadar yükselir ve sahip olduğu ısıyı kondenser duvarına bırakarak yoğunlaşır. Kondenser duvarından ise iletim vasıtasıyla elektrik eldesinin yapılacağı termoelektrik modüllerin sıcak yüzeyine ulaşır. Modüllerin diğer yüzeyi ise soğutucuyla temastadır ve bu sayede termoelektrik modülün diğer yüzeyi soğuk kalır. Böylece termoelektrik modüllerin iki yüzeyi arasında sıcaklık farkı oluşur ve Seebeck etkisi sayesinde termoelektrik modüller termoelektrik jeneratör görevi görerek elektrik eldesi gerçekleşir. Sistemde ısının izlediği yolun şematik olarak Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Sistemde ısının izlediği yolun şematik gösterimi.

T_{IB} 'nin (ısı borusu çalışma sıcaklığı) sabit tutulabilmesinden dolayı iki ayrı sektöre ayırarak incelenebilir. Böylelikle evaporatör ve kondenserin termal güçleri ($\dot{Q}_{sektör1}$ ve $\dot{Q}_{sektör2}$) birbirinden bağımsız olarak hesaplanabilir. Bu hesaplama; ısı geçişinde sıklıkla kullandığımız bir olgu esas alınarak yapılmıştır:

$$\dot{Q}_{sektör1} = \frac{T_{egz,giriş} - T_{IB}}{R_{sektör1}} ; \quad \dot{Q}_{sektör2} = \frac{T_{IB} - T_{soğutucu}}{R_{sektör2}} \quad (1)$$

$T_{egz,giriş}$, egzoz gazının giriş sıcaklığı; $T_{soğutucu}$, soğutucu akışkanın ortalama sıcaklığı; $R_{sektör1}, R_{sektör2}$ ise sırasıyla evaporatör ve kondenser kısımlarının toplam termal direncinin ifade etmektedir.

Eğer evaporatörün kapasitesi ($\dot{Q}_{sektör1}$) kondenserin kapasitesinden ($\dot{Q}_{sektör2}$) fazla ise evaporatörde üretilen buhar kondenserde yeteri kadar absorbe olamayacaktır. Aynı şekilde evaporatörde yeteri kadar buhar üretilmemiş ise kondenser tam kapasite çalışmaz. Dolayısıyla cihazın etkin güç eğrisi evaporatör ve kondenser güç eğrilerinin düşük olanına göre olacaktır. Dolayısıyla Denklem 2’de ifade edildiği gibi jeneratörün gerçek termal gücü, evaporatör ve kondenserden küçük olanın değerine eşittir.

$$\dot{Q}_{sistem} = \min(\dot{Q}_{sektör1}; \dot{Q}_{sektör2}) \quad (2)$$

Elde edilen minimum değer sistemin termal gücünü belirlediğine göre termoelektrik jeneratörün aktif uzunluğunun oranını tanımlayan kondenser yükü aşağıda tanımlanmıştır.

$$Yük_{kond} = \frac{\dot{Q}_{sistem}}{\dot{Q}_{sektör2}} \quad (3)$$

Bu tanım sadece aktif olan toplam termoelektrik jeneratör sayısının oranını ifade etmektedir. Sisteme ait tüm çıktılar (termal güç, elektriksel güç, voltaj gibi) yukarıda tanımlanan orana göre sınırlanacağı için bu tanım önemlidir. Eğer belirlenen koşullardakondenser yükü %100 ise bu daha fazla enerji geri kazanımı yapabilmek için daha büyük kondenser ve daha fazla modül kullanılabilceği anlamına gelmektedir. Fakat eğer bu oran %100'ün altında bir değerse, o zaman kondenser uzunluğu ve kullanılan modül sayısı fazla veya eşanjör tarafından absorbe edilen atık ısı düşük düzeyde demektir [16].

2.1 .Sektör1 Modellemesi

Termodinamiğin ikinci kanununa göre; egzozdan ısı borusuna olan ısı geçişi yalnızca egzoz sıcaklığı ($T_{egz_{giriş}}$) T_{IB} 'den fazla olduğunda gerçekleşir. Hiçbir ısı kayıp olmadığını varsayarsak egzozdan ısı borusuna geçecek olan maksimum termal güç ($\dot{Q}_{maks_{evap}}$) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{maks_{evap}} = \dot{m}_{egz} \cdot c_p \cdot (T_{egz_{giriş}} - T_{IB}) \quad (4)$$

Burada \dot{m}_{egz} egzoz gazının kütledebisi; c_p ise egzoz gazının özgül ısısıdır.

Egzozdan elde edilebilecek maksimum güç hesaplandıktan sonra evaporatörün verimini aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz:

$$\eta_{evap} = \frac{\dot{Q}_{sektör1}}{\dot{Q}_{maks_{evap}}} \quad (5)$$

Evaporatörün modellemesi, evaporatör verimi %40 sabit oranına göre yapılmıştır ve Sektör1 için aşağıdaki gibi maksimum termal güç üzerinden hesaplanmıştır:

$$\dot{Q}_{sektör1} = \eta_{evap} \cdot \dot{Q}_{maks_{evap}} \quad (6)$$

2.2. Sektör 2 Modellemesi

Isı borusunun üst kısmına ulaşan buhar yoğunlaşarak ısıyı kondenser duvarına bırakır. Kondenserin aktif uzunluğunda (L_k) meydana gelen film yoğunlaşması için Nusselt teorisi [17] kullanılarak ortalama ısı transfer katsayısı $h_{yoğuşma}$ aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$h_{yoğuşma} = 0.943 \left[\frac{H_L \cdot \rho_s^2 \cdot g \cdot k_s^3}{L_k \cdot \mu_s \cdot (T_d - T_{yoğuşma_d})} \right]^{0.25} \quad (7)$$

H_L , akışkanın buharlaşma entalpisini; ρ_s , akışkanın yoğunluğunu; g , yerçekimi ivmesini; k_s , akışkanın ısı ilekenlik katsayısını; μ_s , akışkanın dinamik viskozitesini; T_d , akışkanın doyma sıcaklığı $T_{yoğuşma_d}$, kondenserin duvar sıcaklığını ifade etmektedir.

Kondenserden termoelektrik modüllere doğru olan iletimle ısı geçişine bağlı olarak hesaplanması gereken termal dirençler dikkate alındığında ısının izlediği yolun üç boyutlu olduğu görülmektedir. Bu noktada eşdeğer şekil faktörü termal dirence dahil edilerek termal direnç modellenilebilir. Eşdeğer şekil faktörü yaklaşımı üç boyutlu şeklin eşdeğeri olan bir boyutlu termal direnç olarak hesaplanmasını mümkün kılar.

$$R_{kondenser} = \frac{1}{S \cdot k} ; S = \left(\frac{A}{t} \right)_{eşdeğer} \quad (8)$$

Bu formülde S,A ve t; sırasıyla şekil faktörünü, kesit alanını ve kalınlığını ifade etmektedir.

Şekil faktörlerini bulmamızı sağlayan ifadeler sadece bazı temel geometriler için mevcuttur. Kondenser blokları, soğutma kanalları ve termoelektrik jeneratör içerisindeki bazı bölümler için şekil faktörlerini elde etmek için ANSYS programı kullanılmıştır. Programa yüzeylerin giriş çıkış sıcaklıkları girilerek ısı borularından kondenser duvarına geçen termal güç hesaplanmıştır. Daha sonra Denklem 9'da yerine yazılarak yoğunlaşma için şekil faktörü elde edilmiştir:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{kond}} = S \cdot k \cdot \Delta T \quad (9)$$

Burada S, şekil faktörünü ve k ise malzemenin ısı iletkenlik katsayısını ifade etmektedir. Yüzeyler arasındaki ısı temas dirençleri ise, temas ısı transfer katsayısı ve kesit alanı yardımıyla aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$R_{temas} = \frac{1}{h_{temas} \cdot A} \quad (10)$$

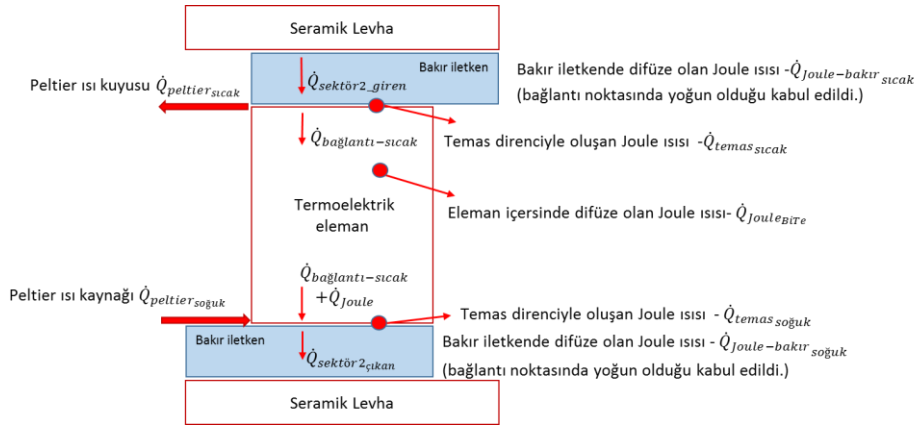
Literatürde bazı malzeme çiftlerine, çeşitli temas basınçlarına ve temas halinde olan yüzeyler arasındaki ortama (vakum, hava, termal gres vb.) bağlı olarak temas ısı transfer katsayılarının değerleri mevcuttur [18, 19]. Bu çalışmada, modül yüzeylerinin kondenser duvarı ve soğutucunun yüzeyi ile olan bağlantılarda termal gres kullanılmıştır ve hesaplamalarda bu değer $h_{temas} = 19 \text{ kWm}^{-2}\text{K}^{-1}$ [19] olarak dikkate alınacaktır. Bunun sebebi, literatürde yapılan araştırmalarda tipik bir termoelektrik modülün iç yüzeylerine (aluminyum oksit/bakır iletken/bizmut telür ara yüzeyleri gibi) ait değerler hakkında bilgiye ulaşılamamış olmasıdır. Bu değerler önemli ölçüde üreticiye, malzemesine ve kullanılan üretim metoduna bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bu çalışmada, termoelektrik modüle ait hesaplamalar yapılırken yarı-iletken eleman çifti için bizmut telürü ait özellikler, iletken kısımlar için bakır ve yalıtkan levhalar için ise seramiğe ait özellikler kullanılmıştır.

Bugüne kadar termoelektrik modüllerin modellenmesinde termal güç ve sıcaklığı hesaplamak için analitik, bir boyutlu ifadeler türetilmiştir. Klasik bir boyutlu ısı transferi ifadesinde çözülmesi gereken sorun, elektrik akımı geçerken Joule etkisine bağlı olarak ısı üretiminin varlığıdır. Bu ısı üretimi klasik elektrik devre analogisi kullanılarak modellenemez. Ancak, içerisinde düzgün dağılımlı ısı üretimi olan yüzeyler için analitik bir çözüm kullanılabilir [20]. Dolayısıyla, Denklem 11 ile Joule etkisinin meydana getirdiği ısı üretimi ifadeleri birleştirilerek çözüme gidilmiştir.

$$T(x) = -\frac{\dot{q}}{2k} \cdot x^2 + C_1 \cdot x + C_2 ; \quad \dot{q} = -\frac{\dot{Q}_{joule_{toplam}}}{A_{BiTe} \cdot l_{BiTe}} \quad (11)$$

$\dot{Q}_{joule_{top}}$, Joule etkisi ile üretilen tüm modüllerin toplam termal gücünü; A_{BiTe} tüm bacaların toplam kesit alanını; l_{BiTe} , termoelektrik modül içerisindeki tek bir bacağın kalınlığını, C_1 ve C_2 integral sabitlerini, \dot{q} , birim hacimde üretilen termal gücünü ifade etmektedir.

Bir termoelektrik elemanda meydana gelen bütün ısı olayları bazı kabuller dahilinde Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Termoelektrik modülün bir elemanındaki ısı akısının izlediği yol ve ısı kuyularının/kaynaklarının yerlerinin şematik gösterimi

Bu şekil dikkate alınarak sınır şartları aşağıdaki gibi yazılır:

1.Sınır Şartı:

$$T(0) = T_{TEJ_{sıcak}} \rightarrow C_2 = T_{TEJ_{sıcak}} \quad (12)$$

2.Sınır Şartı:

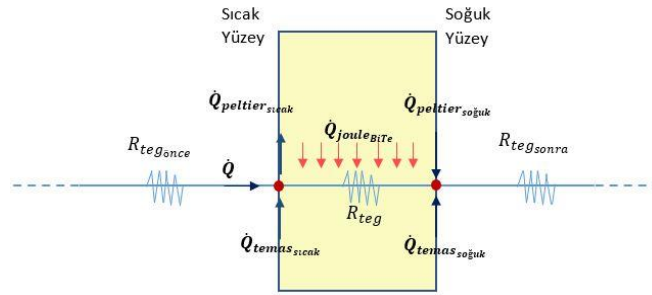
$$-k_{BiTe} \cdot A_{BiTe} \frac{dT(0)}{dx} = \dot{Q}_{baglanti_{sıcak}} \rightarrow C_1 = -\frac{\dot{Q}_{baglanti_{sıcak}}}{k_{BiTe} \cdot A_{BiTe}} \quad (13)$$

Çok ince olmasından dolayı bakır iletkende yayılan Joule ısısının iki termoelektrik malzemenin birbirine bağlandığı noktada yoğunlaştığı varsayılmıştır. Kondenserden gelen ısı termoelektrik elemanın sıcak yüzeyindeki bakır iletkeninden bizmut telürüre geçerken ortaya çıkan toplam termal güç $\dot{Q}_{bağlantı_{sıcak}}$ olarak tanımlanmıştır. $T_{TEJ_{sıcak}}$ ise termoelektrik elemanın sıcak yüzeyinin sıcaklığı olup; k_{BiTe} , p ve n tipi bacakların ortalama ısı iletim katsayısıdır. Termoelektrik eleman boyunca sıcaklık dağılımı, Denklem 14 kullanılarak termoelektrik eleman kalınlığına herhangi bir nokta için bulunabilir.

$$T_{TEJ_{sıcak}} - T_{TEJ_{soğuk}} = \left(\dot{Q}_{bağlantı_{sıcak}} + \frac{\dot{Q}_{joule_{toplam}}}{2} \right) \cdot \left(\frac{l_{BiTe}}{k_{BiTe} \cdot A_{BiTe}} \right) \quad (14)$$

$T_{TEJ_{soğuk}}$ ise termoelektrik elemanın soğuk yüzeyinin sıcaklığıdır. Bazı modül katmanları ciddi anlamda üç boyutlu ısı akısı göstermektedir. Bu durum bir boyutlu yaklaşımla modellenemez. Örneğin; modüle seramik yüzeyden giren ısı, metal iletken yüzeylere doğru kanallar oluşturularak yol alacaktır. Bu durumda giriş alanı çıkış alanından daha büyük olacaktır. Aynı şekilde seramik yüzeyden metal iletkenlere geçen ısı daha da küçük bir yüzey alanına doğru, termoelektrik elemanların bacaklarının arayüzeyine doğru ilerleyecektir. Denklem 8 ve 9 kullanılarak ısının izlediği bu üç boyutlu yolu şekil faktörü ile bir boyutlu yaklaşıma indirgenmiş ve ANSYS kullanılarak seramik ve metal iletkenler için şekil faktörleri hesaplanmıştır.

Devre bir direnç ile kapalı olduğundan, Seebeck voltajı bir akım meydana getirecektir. Joule etkisi ise yalnızca termoelektrik elemanlar ($\dot{Q}_{joule_{BiTe}}$) ve bakır iletkenler ($\dot{Q}_{joule_{bakır}}$) içerisinde oluşacaktır. Peltier etkisine ($\dot{Q}_{joule_{BiTe}}$ ve $\dot{Q}_{joule_{bakır}}$) bağlı olarak lokalize olanısı kuyuları ve kaynakları, sırasıyla, termoelektrik malzemelerin sıcak ve soğuk bağlantı noktalarında meydana gelir. Aynı zamanda elektrik temas direncinden (Joule etkisi) kaynaklı oluşan ısı kaynakları Şekil 3'te gösterildiği gibi yine bu noktalarda meydana gelir.



Şekil 3. Elektrik analogisine uygun olarak TEJ üzerindeki enerji giriş çıkışları.

$$\dot{Q}_{peltier_{sıcak}} = -\alpha_{BiTe} \cdot T_{TEJ_{sıcak}} \cdot I \cdot N \cdot n_{TEJ} \quad (15)$$

$$\dot{Q}_{peltier_{soğuk}} = \alpha_{BiTe} \cdot T_{TEJ_{soğuk}} \cdot I \cdot N \cdot n_{TEJ} \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{peltier_{top}} = \dot{Q}_{peltier_{soğuk}} - \dot{Q}_{peltier_{sıcak}} \quad (17)$$

$$\dot{Q}_{joule_{temas}} = \frac{\rho_t}{A_{BiTe}} \cdot I^2 \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{joule_{BiTe}} = \frac{\rho \cdot l}{A_{BiTe}} \cdot I^2 \quad (19)$$

α_{BiTe} , p ve n çiftlerinin ($\alpha_p - \alpha_n$) Seebeck katsayısı; I ise termoelektrik elemandan geçen akımı; $T_{TEJ_{sıcak}}$ ve $T_{TEJ_{soğuk}}$ sırasıyla termoelektrik eleman ile bakır arasındaki bağlantı noktasının sıcak ve soğuk yüzeylerdeki sıcaklıklarını; N , bir modüldeki termoelektrik eleman çifti sayısını; n_{TEJ} ise sistemdeki termoelektrik modül sayısını; ρ_t , elektriksel temas direncini; ρ , termoelektrik elemanın elektriksel direncini; l , termoelektrik elemanın bacak uzunluğunu; A_{BiTe} ise termoelektrik eleman ile iletken metal arasındaki toplam temas alanını ifade etmektedir. Isı kaynağı/kuyusu olmadığı durumlarda ise iki nokta arasındaki termal güç, bu noktalar arasındaki eşdeğer termal dirence ve sıcaklık farkına bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılır:

$$\dot{Q}_{12} = \frac{T_1 - T_2}{R_{12}} \quad (20)$$

Bu ifade, ısının izlediği yoldaki tüm noktalar için aşağıdaki gibi genelleştirilir:

$$T_{n-1} = T_n + R_{(n-1)n} \cdot \dot{Q}_{(n-1)n} \quad (21)$$

Belirlenmiş noktalardan geçen termal güç her seferinde ısı kaynakları/kuyularından dolayı sabit bir değer olmayacaktır. Akım, Seebeck etkisi hesaplamalarına göre bulunur fakat bu hesaplamalar MATLAB'da uygulanırken akım değeri ilk iterasyon için sıfır olarak alınır. Daha sonra her iterasyondan sonra bu değer bir önceki iterasyonun sonucuna göre düzeltilerek çözüme gidilir.

Bu denklemler geriye doğru bir önceki denklemde yerine koyarak Denklem 20'ye kadar yazılırsa, bilinmeyen sıcaklıkları elimine etmek ve bilinen parametrelere (ısı yolu üzerindeki belirli noktaların sıcaklıkları gibi) bağlı olarak termal güç ifadesini bulmak mümkün olacaktır. Isı yolu üzerindeki belirli noktaların sıcaklıkları şunlardır; ısı borusunun çalışma sıcaklığı (T_{IB}) ve ortalama soğutucu akışkan sıcaklığıdır ($T_{soğutucu}$). T_{IB} , değişken iletkenlikli ısı borusu kullanımına bağlı olarak sabitlenebilir. $T_{soğutucu}$ ise $T_{soğutucu_{giriş}}$ ve soğutucudan transfer edilen güç ($\dot{Q}_{soğutucu}$) ifadeleri kullanılarak aşağıdaki denklemden hesaplanır:

$$\dot{Q}_{soğutucu} = \dot{m}_{soğutucu} \cdot c_{soğutucu} \cdot (T_{soğutucu_{çıkış}} - T_{soğutucu_{giriş}}) \quad (22)$$

$\dot{m}_{soğutucu}$ ve $c_{soğutucu}$; soğutucunun kütleli debisi ve özgül ısıdır. $\dot{Q}_{soğutucu}$ başta bilinmediği için ilk olarak sıfır olarak kabul edilir ve sonrasında her iterasyonda yeniden hesaplanan termal güç değeri tekrarlanarak MATLAB programında yazılan döngü tarafından düzeltilir.

Yerine koyma metodu kullanılarak kondenserden termoelektrik modüle ulaşan toplam termal gücü hesaplayabilmek için Sektör 2 için termal gücü veren denklem, Denklem 10'dan türetilmiştir:

$$\dot{Q}_{sektör2giren} = \frac{\left(T_{IB} - T_{soğutucu} - \left(\left(\dot{Q}_1 + \left(\frac{\dot{Q}_{joule_{BiTe}}}{2} \right) * R_{BiTe} \right) - \dot{Q}_2 * (R_2 + R_{TEJ_{sonra}}) \right)}{R_1 + R_2 + R_{TEJ_{sonra}} + R_{BiTe}} \right)}{\quad} \quad (23)$$

R_{BiTe} , termoelektrik elemanların termal direnci; $R_{TEJ_{sonra}}$ ise modülden sonraki termal dirençlerin toplamıdır. \dot{Q}_1 , \dot{Q}_2 , R_1 ve R_2 aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\dot{Q}_1 = -\dot{Q}_{peltier_{sıcak}} + \dot{Q}_{temas_{sıcak}} + \dot{Q}_{joule_{bakır_{sıcak}}} \quad (24)$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_{joule_{bakır_{top}}} + \dot{Q}_{peltier_{top}} + \dot{Q}_{temas_{top}} + \dot{Q}_{joule_{BiTe}} \quad (25)$$

$$R_1 = R_{bakır_{sıcak}} + R_{seramik_{sıcak}} + R_{TEJ_{önce}} + R_{temas_{seramik-bakır_{sıcak}}} + R_{temas_{bakır-BiTe_{sıcak}}} \quad (26)$$

$$R_2 = R_{bakır_{soğuk}} + R_{seramik_{soğuk}} + R_{temas_{seramik-bakır_{soğuk}}} + R_{temas_{bakır-BiTe_{soğuk}}} \quad (27)$$

$$R_{TEJ_{önce}} = R_{yoğuşma} + R_{iletim} + R_{temas_{sıcak}} \quad (28)$$

$$R_{TEJ_{sonra}} = R_{temas_{soğuk}} + R_{iletim_{soğutucu}} + R_{taşınım_{soğutucu}} \quad (29)$$

Soğutucu akışkana olan taşınım direnci Sieder ve Tate ifadesi [20] ile aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Nu = 1.86 \left(\frac{Re \cdot Pr \cdot D_h}{L_k} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (30)$$

Her yüzeyin sıcaklığı, $\dot{Q}_{sektör2}$ hesaplandıktan sonra, Denklem 20 kullanılarak bilinen sıcaklıkların (T_{IB} veya $T_{soğutucu}$) birinden başlanarak iteratif olarak hesaplanır. Açık devre voltajı (V_o) ve maksimum güç (P_{maks}) değerleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$V_o = n_{TEJ} \cdot N \cdot \alpha_{BiTe} \cdot (T_{TEJ_{sıcak}} - T_{TEJ_{soğuk}}) \quad (31)$$

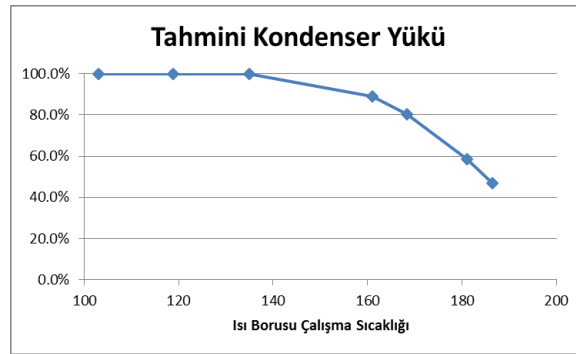
$$P_{maks} = \frac{V_o^2}{4 \cdot R_{i_{toplam}}} \quad (32)$$

α_{BiTe} , p ve n termoelektrik eleman çiftinin Seebeck katsayısını; $R_{i_{toplam}}$, toplam elektrik iç direncini (bakır, temas ve termoelektrik eleman); $T_{TEJ_{sıcak}}$ ve $T_{TEJ_{soğuk}}$ sırasıyla termoelektrik eleman ile bakır arasındaki bağlantı noktasının sıcak ve soğuk yüzeylerdeki sıcaklıklarını ifade etmektedir. N ise bir modüldeki termoelektrik eleman çifti sayısını ve n_{TEJ} ise sistemdeki termoelektrik modül sayısını göstermektedir.

3. Bulgular

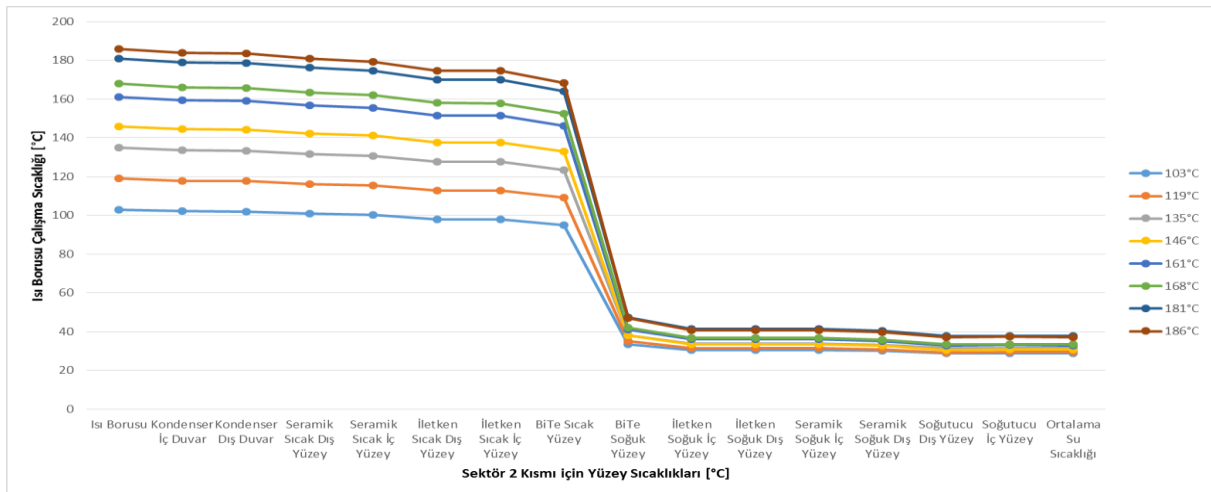
Bu bölümde; ısı borusunun 103-186°C aralığındaki çalışma sıcaklıkları için ısının izlediği yol üzerindeki termal dirençlere bağlı olarak ara yüzey sıcaklıkları analiz edilmiş termal güç, elektriksel güç ve voltaj değerlerinin değişimi incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, 12 adet termoelektrik modül (ETDYN GM-250-49-45-25), 6 adet 8 mm çapında borudan oluşan ısı borulu eşanjör, ve her blok yüzeyine birer tane olmak üzere toplam 6 adet soğutucu kullanılan deneysel çalışma sonuçları [14] ile mukayese edilmiştir.

Kondenser yükünün çalışma sıcaklığına göre değişimi Denklem 3 kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 4'te gösterilmiştir. Düşük çalışma sıcaklıklarında kondenser yükünün %100 olduğu görülmektedir. Bu durum düşük sıcaklıklarda kondenserin tam kapasite çalıştığı anlamına gelmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ise kondenser yükü evaporatörden gelen termal güç (Denklem 4 ve Denklem 6) azaldığı için kondenser tam kapasite çalışamaz.



Şekil 4. Isı borusunun farklı çalışma sıcaklıklarına göre kondenser yükünün değişimi.

Isı borusunun farklı çalışma sıcaklıklarına göre Sektör 2'deki ara yüzeylere ait sıcaklık değerlerinin değişimi Şekil 5'te görülmektedir. Yüzey sıcaklıklarındaki en önemli etken termal direnç değerleridir. Bu değer ne kadar düşük olursa iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı o kadar az olmaktadır.



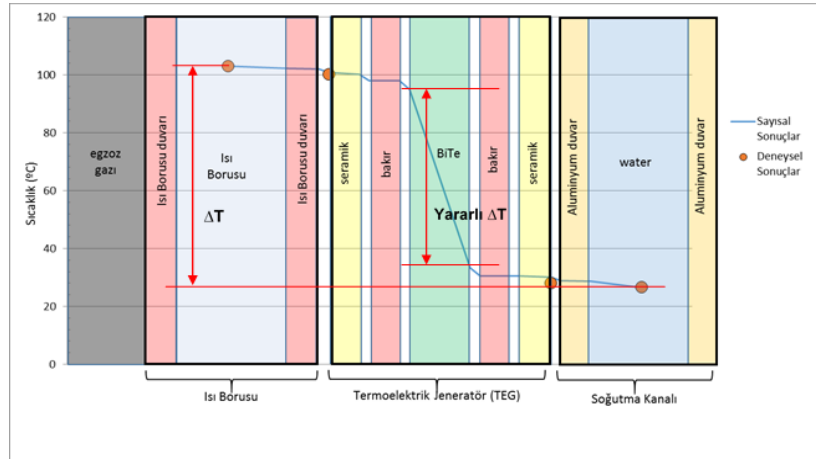
Şekil 5. Sistemin kondenser kısmının arayüzey sıcaklıklarının bazı T_{IB} değerlerine göre değişimi.

Buna bağlı olarak Tablo 1’de bölümlere ayrılmış olarak eşdeğer termal dirençlerinin değerleri mevcuttur. Burada $R_{TEJ_{önce}}$, Denklem 28 ile hesaplanan ve kondenserin iç duvarından termoelektrik jeneratörün sıcak yüzeyine kadar olan kısma ait eşdeğer termal direnç değerini; R_{TEJ} ise termoelektrik elemana ait eşdeğer termal direnç değerini; $R_{TEJ_{sonra}}$ ise Denklem 29 ile hesaplanan ve termoelektrik jeneratörün soğuk yüzeyinden soğutucu suya kadar olan kısma ait eşdeğer termal direnç değerini ifade etmektedir.

Tablo 1. Sektör 2’ye ait termal direnç değerlerinin ısı borusunun farklı çalışma sıcaklıklarına göre değişimi.

T_{IB} (°C)	$R_{TEJ_{önce}}$ (W/m ² K)	R_{TEJ} (W/m ² K)	$R_{TEJ_{sonra}}$ (W/m ² K)
103	0.002123888	0.070338514	0.0034469
119	0.002145367	0.069678353	0.00344496
135	0.002166891	0.068968607	0.003438918
146	0.002188017	0.068578048	0.00344068
161	0.002207627	0.067922435	0.00343409
168	0.002221955	0.06764144	0.003432183
181	0.002241609	0.066990336	0.003417742
186	0.00225538	0.066835913	0.003419937

1.1.bar/103°C değeri için Sektör 2’de bilinen belirli noktaların sıcaklığının deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması Şekil 6’da yapılmıştır. Bu kıyaslama sadece deneysel olarak ölçüm yapılan noktalar için yapılmıştır ve bu noktalardaki deneysel ve teorik veriler arasındaki fark oldukça küçüktür. Elde edilen sıcaklık değerlerinin deneysel çalışmadaki değerlerle çok yakın olması, sayısal modellemede kullanılan yöntemin gerçeğe çok yakın olduğunu ifade etmektedir.



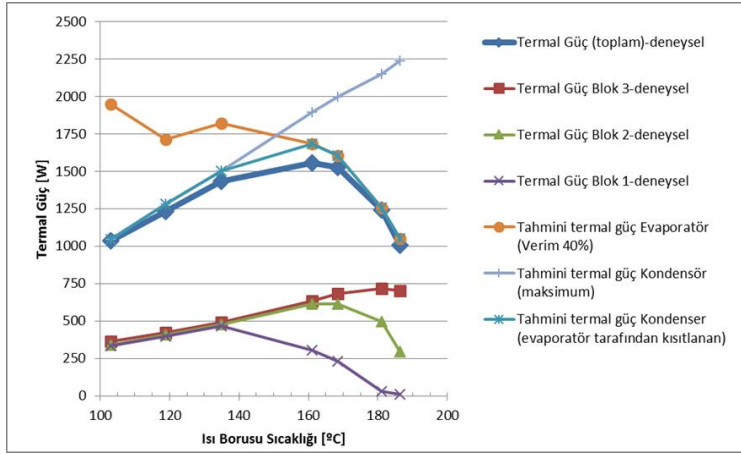
Şekil 6. 1.1 bar/103°C’de Sektör 2 boyunca farklı malzemelere ait katmanlardaki deneysel ve teorik olarak elde edilen sıcaklık değerlerinin kıyaslaması [14].

Şekil 6’da görülen beyaz boşluklar termal temas direncinden dolayı meydana gelen sıcaklık düşüşlerinin yaşandığı ara yüzeyleri simgelemektedir. Dikkat edilmesi gereken noktalardan bir tanesi de toplam ΔT ’nin termoelektrik malzemenin sıcak ve soğuk bağlantı noktaları arasında elde edilen yararlı ΔT ’ye dönüştüğüdür. Bu sıcaklık farkı toplam ΔT ’den ne kadarını termoelektrik jeneratör içerisinde elektrik enerjisine dönüştürdüğüne göstergesidir. Ayrıca ısı borusunun termal direncinin çok küçük olduğunu hatta ara yüzeylerdeki termal temas direncinden bile daha küçük olduğunu görülmektedir.

Soğutucuya ulaşan termal gücün, ısı borusunun farklı çalışma sıcaklıklarına göre değişimi Şekil 7’de gösterilmiştir. Her bloğa ait deneysel olarak ölçülen termal güç değerleri dikkate alındığında düşük çalışma sıcaklıklarında termal gücün de düşük olduğu ve tüm blokların birbirine yakın kapasitede çalıştığı gözlenmektedir. Çalışma sıcaklığı artışına bağlı olarak termal güç de 160°C’ye kadar artmaktadır. Isı borusunun çalışma sıcaklığı arttıkça güç önce kondenserin üst kısmında bulunan blokta sonrasında ise kondenserin orta kısmında bulunan blokta düşmeye başlar. Yani 160°C’den sonraki çalışma sıcaklıklarında toplam termal güç azalmaya başlar. Deneysel verilerde yaşanan bu durumu sayısal olarak elde edilen kondenserin ve evaporatörün termal güçlerine ait eğrilere bakılarak açıklamak gerekir. “Toplam termal güç” eğrisi Denklem 2’ye göre çizilmiş olup kondenser ve evaporatörün değerlerinden küçük olana göre sistemin termal gücünü belirleyen eğridir.

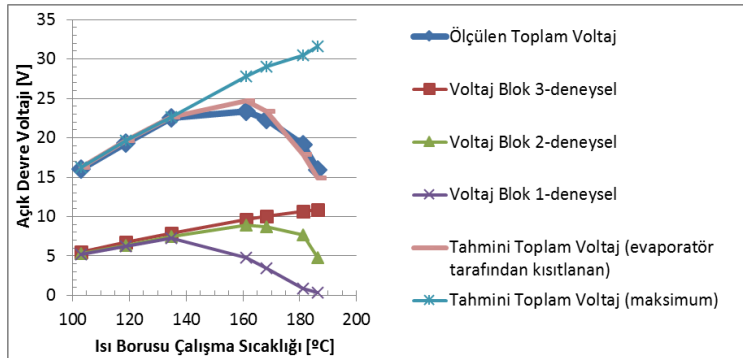
“Tahmini termal güç evaporatör” eğrisi; öncelikli olarak Denklem 4 kullanılarak egzozdan ısı borusuna geçebilecek maksimum güç değeri bulunarak, sonrasında ise Denklem 6’da bulunan maksimum güç değeri yerine

koyularak evaporatörün termal güç değeri bulunarak çizilmiştir. Isı borusunun düşük çalışma sıcaklıklarında; ısı borusu ile egzoz gazı arasındaki yüksek sıcaklık farkından dolayı evaporatöre ait termal güç değerleri yüksektir.

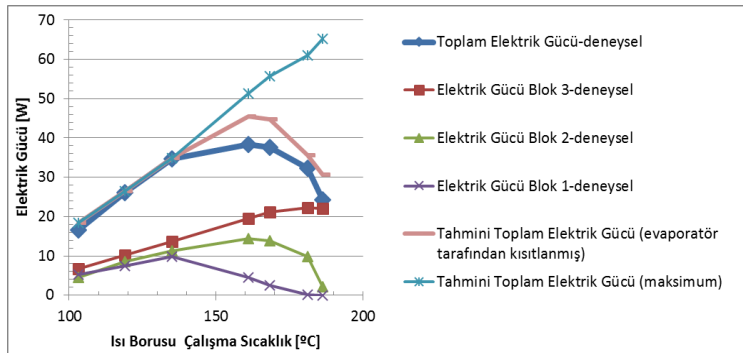


Şekil 7. Isı borusunun çalışma sıcaklığının 103°C-186°C aralığındaki değerlere göre kondenserin, evaporatörün ve sistemin termal gücünün değişimi.

Isı borusunun çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak açık devre voltajı ve elde edilen elektriksel güç değerlerinin sayısal ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. Sonuçlar arasındaki fark, termoelektrik modüllerin farklılıklarına bağlı olarak açık ve kapalı devre voltajının hesaplarında kullanılan termoelektrik modülün iç direnç değerindeki belirsizlikten dolayıdır. Optimum sıcaklık 150 °C civarındadır. 150°C'nin altında daha fazla modül aktif olmasına rağmen çıkış değerleri daha düşüktür. 150°C'nin üzerindeki değerlerde ise aktif modüllerin kapasitesi daha yüksek fakat sistem daha düşük termal enerji kapasitesine sahiptir. Eğer sistem daha yüksek termal güç kapasitesine sahip olursa veya evaporatör verimine sahip olunursa daha yüksek çıkış değerleri elde etmek ve buna bağlı olarak da daha yüksek optimum çalışma sıcaklığı elde etmek mümkündür.



Şekil 8. Isı borusu sıcaklıklarına göre açık devre voltajının değişimi.



Şekil 9. Isı borusu sıcaklıklarına göre elektriksel güç değerlerinin değişimi.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, içten yanmalı bir otomobilin egzozundaki atık ısının termoelektrik modül ve ısı borulu eşanjör kullanılarak enerji geri kazanımı için bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan bu sistemin literatürdeki mevcut çalışmalardan farklı olarak, termoelektrik etkiler dikkate alınarak, termoelektrik jeneratörün iç yapısı termal modellemeye dahil edilmiştir.

Yapılan bu çalışma sonucunda;

- Çalışma sıcaklığını sabit tutabilme ve aşırı ısınma durumuna karşı pasif koruma sağlaması açısından ısı borusunun kullanımı avantaj sağlamıştır.
- Değişken iletkenlikli ısı borusunun kullanımının kısmi yük altında aktif modüllerin sıcaklık seviyesini fazla etkilemeden aktif modül alanını etkin bir şekilde azalttığı tespit edilmiştir.
- Deneysel ve teorik veriler arasındaki fark oldukça küçük olduğu ve dolayısıyla sayısal modellemede kullanılan yöntemin gerçeğe çok yakın olduğu gözlenmiştir.
- Düşük çalışma sıcaklıklarında kondenser kapasitesinin sistemin çıkış değerlerini belirleyici bir faktör olduğu sonucuna varılmıştır.
- Isı borusunun optimum çalışma sıcaklığı 150°C civarında olduğu tespit edilmiştir.
- Optimum çalışma sıcaklığında elde edilen elektrik gücü 38 W civarında bulunmuştur.
- İçten yanmalı motorlarda üçte birinin mekanik işe dönüşebildiği göz önünde bulundurulduğunda küçük kazançlar bile önemli hale gelmektedir. Dolayısıyla bu çalışmanın, içten yanmalı motorlarda enerji verimliliği açısından ülke ve dünya ekonomisine katkı sağlayabileceği ortaya koyulmuştur.

Teşekkür

Bu çalışmada, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığımız Universidade do Minho Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi değerli hocamız Dr. Francisco P. BRITO'ya saygı ve teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynakça

- [1] Mori M., Yamagami T., Oda N., Hattori M., Sorazawa M., Haraguchi T. 2009. Current Possibilities of Thermoelectric Technology Relative to Fuel Economy, SAE World Congress & Exhibition, April 20-23, Detroit, USA, SAE Paper No. 2009-01-0170.
- [2] Hussain, Q., Brigham, D., and Maranville, C. 2009. Thermoelectric Exhaust Heat Recovery for Hybrid Vehicles, SAE International Journal of Engines, 2(2009), 1132-1142.
- [3] Stobart, R. and Weerasinghe, R. 2006. Heat Recovery and Bottoming Cycles for SI and CI Engines. SAE Technical Paper, 2006-01-0662.
- [4] Stobart, R., Wijewardane, A., and Allen, C. 2010. The Potential for Thermo-Electric Devices in Passenger Vehicle Applications. SAE Technical Paper, 2010-01-0833
- [5] Zhang X., Chau K.T. 2011. An Automotive Thermoelectric-Photovoltaic Hybrid Energy System using Maximum Power Point Tracking. Energy Conversion and Management, 52(2011), 641-7.
- [6] LaGrandeur J., Crane D., Hung S., Mazar B., Eder A. 2006. Automotive Waste Heat Conversion to Electric Power using Skutterudite. International Conference on Thermoelectrics. August 6-10, Vienna, Austria, 343-348.
- [7] Mori, M., Yamagami, T., Sorazawa, M., Miyabe, T., Takahashi, S., Haraguchi, T. 2011. Simulation of Fuel Economy Effectiveness of Exhaust Heat Recovery System using Thermoelectric Generator in a Series Hybrid. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 4(2011), 1268-1276.
- [8] Kim S., Park S., Kim S., Rhi S.H. 2011. A Thermoelectric Generator using Engine Coolant for Light-duty Internal Combustion Engine-Powered Vehicles. Journal of Electronic Materials, 40 (2011), 812-816.
- [9] Baatar N., Kim S., 2011. A Thermoelectric Generator Replacing Radiator for Internal Combustion Engine Vehicles. TELKOMNIKA, 9(2011) 523-530.
- [10] Kim, S.K., Won, B.C., Rhi, S.H., Kim, S.H. 2011. Thermoelectric Power Generation System for Future Hybrid Vehicles using Hot Exhaust Gas. Journal of Electronic Materials, 40(2011), 778-783.
- [11] Goncalves L.M., Martins J., Antunes J., Rocha R., Brito F.P. 2010. Heat-pipe Assisted Thermoelectric Generators for Exhaust Gas Applications, International Mechanical Engineering Congress & Exposition, November 12-18, USA, 1387-1396.

- [12] Brito F.P., Goncalves L.M., Martins J., Antunes N., Sousa D. 2013. Influence of Heat Pipe Operating Temperature on Exhaust Heat Thermoelectric Generation. SAE International Journal of Passengers Cars, 6(2013), 652-664.
- [13] Martins J., Goncalves L.M., Antunes J., Brito F.P. 2011. Thermoelectric Exhaust Energy Recovery with Temperature Control through Heat Pipes. SAE Technical Paper 2011-01-0315, 2011, doi:10.4271/2011-01-0315.
- [14] Brito F.P., Martins J., Hançer E., Antunes N., Gonçaves L. M. 2015. Thermoelectric Exhaust Heat Recovery with Heat Pipe-Based Thermal Control. Journal of Electronic Materials, 44(2015), 1984-1997.
- [15] Yang, F., Yuan, X., Lin, G. 2003. Waste Heat recovery using Heat Pipe Heat Exchanger for Heating Automobile using Exhaust Gas. Applied Thermal Engineering, 23(2003), 367-372.
- [16] Hançer, E. 2015. Termoelektrik modül kullanarak içten yanmalı bir otomobilin egzozundan atılan ısıdan enerji geri kazanımının termal analizi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 78s, Kayseri.
- [17] D. Reay and P. Kew, 2006. Heat Pipes: Theory, Design and Applications. 5th ed. Butterworth-Heinemann Elsevier, New York, 251 pages.
- [18] Snaith B., O'Callaghan P.W. and Probert S.D. 1984. Applied Energy, 16(1984), 175-191.
- [19] Peterson G.P. and Fletcher L.S. 1987. Thermal Contact Resistance of Silicon Chip Bonding Materials. Proceedings of the International Symposium on Cooling Technology for Electronic Equipment, March 18-21, Honolulu, Hawaii, 438-448.
- [20] Incropera F.P. and DeWitt D.P., 1990. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 3rd edition, Wiley, New York, 960 s.