

Termoelektrik Malzemelerin Ayak Geometrisinin Isı Geçişi Üzerine Etkileri

*¹Fatih Uysal, ¹Enes Kilinc, ¹Huseyin Kurt, ^{2,3,4}Erdal Celik, ⁵Yusuf Çay and ¹Selami Sagiroglu

¹Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Karabuk University, Turkey

² Center for Production and Application of Electronic Materials (EMUM), Dokuz Eylul University, Izmir, Turkey

³ Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Dokuz Eylul University, Izmir, Turkey

⁴ The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Nanoscience & Nanoengineering, Dokuz Eylul University, Izmir, Turkey

⁵Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Sakarya University, Turkey

Özet

Termoelektrik jeneratör (TEG) üretiminde kullanılan termoelektrik malzemeler genellikle kare ya da dikdörtgen prizma şeklinde üretilmektedir. Bunun temel sebebi bu malzemelerin TEG haline getirilirken ısı iletkenliği yönünden yüksek ancak elektrik iletkenliği yönünden yalıtkan olan plakalar arasına monte edilmesidir. Bu durumda en güzel alternatif dikdörtgen prizma şeklindedir. TEG'ler %10'un altında kalan düşük verimlerinden dolayı atık ısının enerjiye çevrilmesinde kullanılmak üzere tasarlanmaktadır. Genellikle atık ısı kaynakları soğutma suları veya yanmış atık gazlardır. Bu tür ısı kaynaklarının taşınmasında dikdörtgen veya kare kesitli akış kanalları yerine daha mukavemetli olması bakımından dairesel kesitli akış kanalları tercih edilmektedir. Ancak termoelektrik malzemelerin dairesel kesitli olarak jeneratör haline getirilmesi zor olmasına rağmen böyle bir uygulama termoelektrik malzemelerin farklı şekil ve kesitlerde üretilebilme alternatifini karşımıza çıkarmaktadır. Bu çalışmada dairesel kesitli TEG üretiminde kullanılacak dikdörtgen prizma, iki farklı dikdörtgen konik prizma ve dikdörtgen boru kesit olmak üzere dört farklı termoelektrik ayak şeklinin ısı iletkenlikleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak boru şeklindeki termoelektrik ayakların diğer şekillerdeki termoelektrik ayaklara göre aynı şartlar altında daha iyi ısı iletimi sağladığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Termoelektrik, Termoelektrik jeneratör, Termoelektrik ayak geometrisi,

Effects of Thermoelectric Leg Geometry on Heat Transfer

Abstract

Thermoelectric materials used in the fabrication thermoelectric (TE) generators have been produced in the shape of square or rectangular prism. The reason for these TE generators' leg shape is that the legs are placed between alumina plates which are thermally conductive and electrically nonconductive. The best alternative for this situation is the shape of rectangular prism. On the other hand, TE generators have been designed to be used in the conversion of waste heat to electricity because of their low efficiencies below 10%. Waste heat resources are generally cooling waters and flue or exhaust gases. Flow channels with circular cross-section area have been preferred instead of flow channels with square or rectangular cross-section area for the release of these heat resources because of their strength. Although fabrication of TE generators with circular cross-section area is difficult, such an application appears to be an alternative of TE generators with different shape and cross-section area. In this study, heat rates of generator legs with the shapes of rectangular prism, narrow rectangular conical prism, wide rectangular conical prism and rectangular pipe cross-section which can be used for the fabrication of TE generators with circular cross-section area have been compared. As a result, heat rate of TE legs with rectangular pipe cross-section area has been better than other leg shapes at the same conditions.

Key words: Thermoelectric, Thermoelectric generator, Thermoelectric leg geometry

*Corresponding author: Address: Karabuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabuk, Turkey. **E-mail address:** fatihuysal@karabuk.edu.tr.

1. Giriş

Termoelektrik malzemelerden üretilen TEG'ler düşük verimlerinden [1] dolayı atık ısının elektrik enerjisine dönüştürülmesinde ve küçük miktarlardaki enerji üretiminin (uzay araçları gibi) özel uygulamalarında kullanılır. Atık ısının üretildikleri bölgeden uzaklaştırılması genellikle yüksek sıcaklıkta ve basınçta gerçekleşmesinden dolayı dairesel kesit daha mukavemetli [2] ve imalatı daha kolay olduğu için tercih edilir.

Termoelektrik malzemeler üzerlerinden geçen ısının bir miktarını elektrik enerjisine çevirirken [3] bir termoelektrik ayağın gerilimi çok düşük olur. Enerji dönüşümünün kullanıma uygun olması ve veriminin yüksek olması için gerilimin yükseltilmesi ve malzeme üzerinden geçen ısı miktarının artırılması gerekir. Bunun için de termoelektrik ayakların elektriksel iletkenlik açısından seri (bu şekilde voltaj yükseltilir), ısı iletimi açısından da paralel (bu şekilde de malzeme içinden geçen ısı miktarı artırılır) bağlanması gerekir [3].

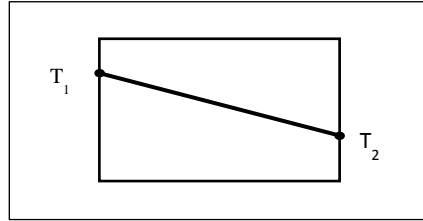
TEG uygulamalarında yaygın olarak termoelektrik ayaklar iki adet alümina plaka arasına yerleştirilir. Bu uygulamalarda termoelektrik ayakların dikdörtgen prizma şeklinde kullanılması doğal olarak gerekli bir şekillendirilmedir. Termoelektrik ayakların geometrisini bu tür bir uygulamada değiştirmek çok zordur. Bu yüzden genellikle termoelektrik ayak geometrisi üzerine yapılan çalışmalardan daha çok ısı değiştiricilerinin performansını artırıcı çalışmalar literatürde göze çarpmaktadır. Tek tabakalı panel ısı değiştiricisi (single-layered panel heat exchanger), çok tabakalı panel ısı değiştiricisi (multi-layered panel heat exchanger) ve silindirik şekilli-doğrusal kanatlı ısı değiştiricisi (cylindrical shell and straight fins) ısı değiştiricisi modelleri çalışılmıştır [4]. Bazı araştırmaların sonucunda termoelektrik ayak geometrisinin de geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir; daha etkin ısı transferi sağlayan elemanların yenilikçi geometrileri, daha az çıkış alanı, etkin montaj elemanları ve yeterli egzoz akış kanalları araştırılabilir [5]. Termoelektrik ayak geometrisi ile ilgili olarak da termoelektrik güç çevrimi ve ayak geometrisi arasında fonksiyonel ilişki olan şekil parametresi geliştirilmiştir [6]. Sonuç olarak TEG'lerin ayak geometrileri tasarım esnasında göz önünde bulundurulması gereken bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak bu tasarım TEG'in kullanım yerine, ihtiyaçlara ve kullanım şartlarına göre farklılık gösterebilir.

Bir dizel araçta kimyasal yakıt enerjisinin %38'i soğutma sisteminden, %30'u egzozdan atık ısı olarak atılmakta, %2'si alternatör tarafından kullanılmaktadır. Toplamda %70 olan bu enerji benzinli araçlar için %75'e ulaşmaktadır [7]. Bu kadar büyük miktarda atılan ısının bir kısmının geri kazanımı araçların veriminde büyük artışlar sağlayacağı gibi yakıt tüketimindeki azalma da otomobil firmalarının piyasadaki rekabet gücünü arttıracaktır. Ayrıca egzoz emisyonlarındaki kanuni kısıtlamalarda bu atık ısılar üzerinde araştırma yapılmasını zorunlu hale getirmektedir [7].

Araçlardaki egzoz gazı sıcaklıkları aracın cinsine ve çalışma şartlarına göre değişiklik göstermekle birlikte bu sıcaklık 300-800 °C arasında değişmektedir [7-8- 9]. Yüksek sıcaklık farkının elde edilebileceği bir sistemde Carnot veriminin [10] daha yüksek olması araç egzoz gazının enerji geri dönüşümünün araştırılmasını daha cazip hale getirmektedir. Bu geri dönüşüm esnasında soğutucu tarafta araç soğutma suyunun kullanılması havaya gitmesi gereken bir kısım ısının aracın soğutma suyuna gitmesine sebep olacağı için aracın kimyasal yakıt enerjisinin araç soğutma suyu tarafından atılacak kısmını arttıracaktır. Bu miktarın artması da araç soğutma suyunun atık enerjisinin geri kazanımını daha cazip hale getirebilir.

Bu çalışmada araçların egzoz borularının kesitlerine uygun, dairesel kesitte üretilebilecek bir TEG'in imalatında kullanılabilecek değişik şekillerdeki termoelektrik ayakların aynı şartlar altındaki ısı iletim performansları incelenmiştir.

2. Yöntem

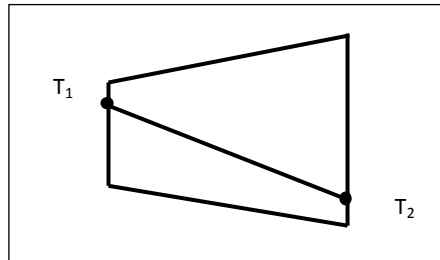


Şekil 1: Dikdörtgen prizması şeklindeki termoelektrik ayak

Kesiti A ve genişliği L olan dikdörtgen prizma şeklindeki bir termoelektrik ayağın (Şekil 1) iki yüzeyi arasında belli bir sıcaklık farkı uygulandığında (T_1-T_2) bu malzemeden geçen ısı miktarı şu şekilde hesaplanabilir:

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

Böyle bir sistemin ısı geçişinin hesaplanması ve karşılaştırılması basit bir şekilde yapılabilir. Toplam kesitten akan ısı enerjisinin ne kadarlık kısmının enerjiye dönüştürüldüğü termoelektrik malzemenin verimi ile ilgilidir.



Şekil 2: Konik dikdörtgen prizması şeklindeki termoelektrik ayak

Konik şekillerde durum konikliğe göre değişir (Şekil 2). Ancak malzemeleri egzoz borusuna göre dairesel bir şekilde dizmemiz gerektiğinde iç çap, dış çap ve malzeme genişliği bazı değerleri ortaya çıkarır. Malzeme kalınlığı sabit s değerinde olan kesik dikdörtgen konik şekli ele aldığımızda ısının akış yönüne göre malzeme yükseklik değeri; h, ısı akış uzunluğu değeri (malzeme genişliği) L'ye bağlı olarak değişecektir. Burada L değerinin değişimini x, h değerinin değişimini a, başlangıç h değerini h_1 , bitiş h değerini h_2 olarak isimlendirdiğimizde diferansiyel çözüm gerektiren şu denkleme göre işlem yapılması gerekir:

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Bu denklemde A kesitinin x değişkenine bağlı yazılarak çözülmesi ve integral limitlerinin belirlenmesi gerekir [11]:

$$a = L - \frac{h_2 - h_1}{L} x \quad (3)$$

$$A = as \quad (4)$$

Bu değerleri yukarıdaki denklemde (Denklem 2) yerine yazdığımızda:

$$Q = -k\left(L - \frac{h_2 - h_1}{L}x\right)s \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

Bu denklemi diferansiyel hale getirmek için;

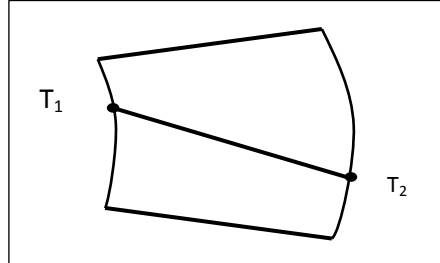
$$\frac{Q dx}{s\left(L - \frac{h_2 - h_1}{L}x\right)} = -k dT \quad (6)$$

şeklinde yazabiliriz. Bu denklemin sınırları belirlenerek diferansiyel çözümü yapıldığında dikdörtgen konik bir termoelektrik ayak üzerinden akan ısı miktarı hesaplanır.

Isı akışı farklılığı bakımından bir diğer alternatif şekil de termoelektrik ayakların boru et kalınlığı oluşturacak şekilde aralarında boşluk bırakılarak dizilmesidir (Şekil 3). Bu şekilde bir diziliş gerçekleştirildiğinde silindirik yüzeylerdeki ısı geçiş denkleminde yararlanmak gerekir. Bu denklemde de s termoelektrik ayak kalınlığı, r_2 termoelektrik ayak dış çapı, r_1 termoelektrik ayak içi çapı şeklinde tanımladığımızda bu sistemin ısı geçiş miktarı;

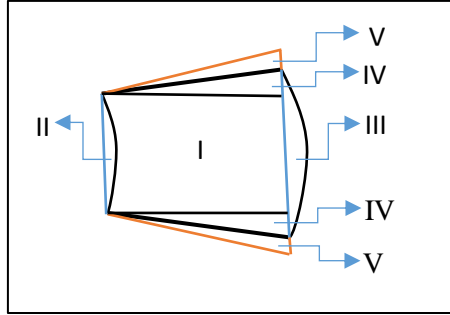
$$Q = \frac{2\pi s k (T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (7)$$

şeklinde hesaplanır. Burada r_1 çapı atık ısı kaynağının çapına (örneğin araç egzoz borusu çapı) r_2 çapı da optimum termoelektrik malzeme genişliğine göre belirlenebilir.



Şekil 3: Boru parçası şeklindeki termoelektrik ayak.

Konik şeklindeki termoelektrik malzemelerde ısı akış yönüne göre kesit değiştigi için sadece akış kesiti dikkate alınarak termoelektrik malzemenin verimi konusunda yorum yapmak biraz daha zorlaşır. Ortalama kesit bize fikir verse bile tam olarak sonuca götürmeyebilir. Bu durumda kesit alan üzerinden hareket etmek yerine birim hacim üzerinden hareket ederek yorum yapmak daha kolay olabilir. Böylece birim malzeme miktarına göre verim analizi yapmak ve bunu diğer şekildeki termoelektrik ayaklarla karşılaştırmak daha kolay hale gelir. Ancak TEG'in veriminin daha önemli olduğu durumlarda malzeme miktarındaki küçük artışlar göz ardı edilebilir.



Şekil 4: Farklı şekillerdeki termoelektrik ayakların üst üste çakıştırılması.

Şekil 4’de bütün termoelektrik ayaklar üst üste çakıştırılmış olarak görülmektedir. Bu şekilde I ve II numaralı alanların toplamı dikdörtgen prizma termoelektrik ayağı, I, III ve IV numaralı alanların toplamı boru kesit termoelektrik ayağı, I, II ve IV numaralı alanların toplamı dar dikdörtgen konik termoelektrik ayağı ve I, II, IV ve V numaralı alanların toplamı ise geniş dikdörtgen konik termoelektrik ayağı temsil etmektedir. Bu şekilde dört sistemi karşılaştırmak ve bunları karşılaştırma kriterlerini ortaya koymak zor bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Çünkü bu şekillerden sadece dikdörtgen prizması olan şeklin ısı akış yönüne göre kesiti sabit olup diğer şekillerin kesitleri ısı akış yönüne göre artış göstermektedir.

3. Değerlendirme

Farklı kesitlerdeki termoelektrik ayakları değerlendirmek için bazı sınır şartlarını belirlemek gerekir. Bunun için de bir sistemin şartlarını kabul etmek uygun olur. Araçların egzoz gazlarının ortalama değerleri bu sistem için tanımlanabilir. Örneğin normal bir binek araç için egzoz gazı borusu 50 mm olarak alınabilir, 1 mm de alümina boru kalınlığı kabul edilirse termoelektrik ayakların dizileceği iç çap 52 mm olarak kabul edilebilir. Termoelektrik ayakların kalınlığı 5 mm, yüksekliği 4 mm ve uzunluğu da 6,52 mm olarak referans alınmıştır. Bu ölçülere daha önce yapılan çalışmalar incelenerek mümkün olduğunca uzun boyda en fazla elemanı dizerek gerilimi arttırmak ve sıcaklık farkını en ideal şekilde korumak için karar verilmiştir.

Isı kaynağı olarak bir aracın egzoz gazı seçildiğinde iç sıcaklık 500 °C, soğutucu tarafta da aracın soğutma suyu seçildiğinde de soğuk taraf sıcaklığı 100 °C alınabilir. Ancak soğutucu tarafta aracın soğutma suyu dolaştırıldığında normalde egzozdan dışarıya atılacak ısı aracın soğutma sistemine girerek buranın soğutma yükünü arttıracaktır.

Sistemde kullanılacak olan bir termoelektrik malzemenin buradaki şartlarda ısı iletim katsayısı (k) 5 W/mK belirlenmiştir [12].

Yukarıdaki şartlar altında; sıcaklık farkı (ΔT) 400 °C, ısı iletim katsayısı (k) 5 W/mK, termoelektrik ayak boyu (L) 6,52 mm, termoelektrik ayak kesiti (A) 20 mm² olmak üzere dikdörtgen prizması şeklindeki bir termoelektrik ayağın üzerinden geçen ısı miktarı denklem 1’e göre 6,38 W olarak hesaplanır.

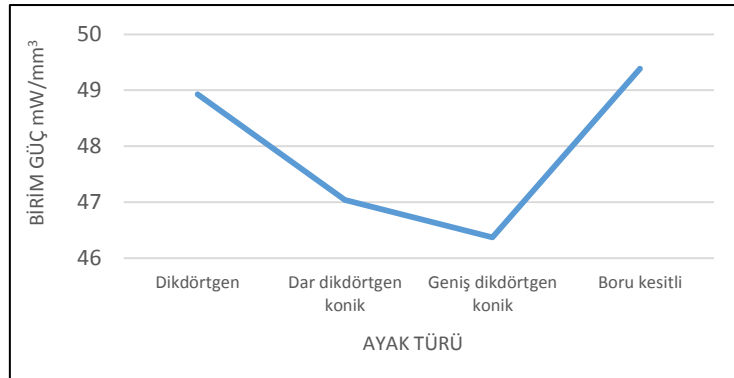
Aynı şartlar geçerli olmak üzere konik bir termoelektrik ayağın ısı geçiş hesabının yapılabilmesi için denklem 2’nin diferansiyel denkleminin çözülmesi ve sınır şartlarının belirlenmesi gerekir. Bu denklemde dar konik ve geniş konik olmak üzere iki sistemin olduğu yukarıda açıklanmıştır. Dar konik sistemin dairesel konik ile h_2 değerinin aynı olduğu, geniş konik sisteminde ise termoelektrik ayaklar arasındaki boşlukların aynı bırakıldığı belirtilmiştir.

Bu durumda dar koniklerin h_2 değeri 5,00 ve geniş koniklerin h_2 değeri 5,43 mm olmuştur. Bundan sonra değerler yerine yazılarak diferansiyel denklem çözüldüğünde dar konikten geçen ısı miktarı 6,88 W geniş konikten geçen ısı miktarı 7,09 W olarak hesaplanmaktadır.

Tablo 1. Farklı şekillerdeki termoelektrik ayakların ısı iletim miktarları.

No	TE ayak Şekli	Isı İletim Miktarı (W)
1	Dikdörtgen prizma termoelektrik ayak	6,38
2	Dar dikdörtgen konik termoelektrik ayak	6,88
3	Geniş dikdörtgen konik termoelektrik ayak	7,09
4	Boru kesitli termoelektrik ayak	7,25

Aynı şartlar geçerli olmak üzere boru kesit için de iç yüzey sıcaklığı 500 °C, dış yüzey sıcaklığı 100 °C k ısı iletim katsayısı (k) 5 w/mK, termoelektrik ayak kalınlığı (s) 5 mm, diğer ayaklardaki gibi L boyu 6,52 mm, iç çap 52 mm, dış çap 65,04 mm olarak alındığında denklem 7'ye göre tam daire şeklindeki bir yapıdan geçen ısı miktarı 1126,3 w olarak hesaplanmaktadır. Ancak bu ısı miktarı tam dairesel yapıdan geçen ısı miktarıdır. Bir termoelektrik ayaktan geçen ısı miktarını bulabilmek için kaç tane termoelektrik ayağın bir tam daire oluşturduğunu hesaplamak gerekir. Tanımlanan şekildeki termoelektrik ayakların bir tanesi 9,27 derece yer kaplamaktadır. Bu durumda bir termoelektrik ayak bir tam dairenin 9,27/360'ını oluşturduğuna göre bir termoelektrik ayak üzerinden geçen ısı miktarı 7,25 w olur.



Şekil 5: Ayak türüne göre birim hacim başına düşen ısı güç

Ayakların birim hacim başına taşıdıkları güçler hesaplandığında dikdörtgen kesitli ayağın 48,93 mW/mm³, dar dikdörtgen konik ayağın 47,04 mW/mm³, geniş dikdörtgen konik ayağın 46,37 mW/mm³ ve boru kesitli ayağın 49,39 mW/mm³ olduğu görülmüştür (). Bu hesaplamalara göre ayak şeklinde koniklik arttıkça birim hacimde taşınan ısı gücün azaldığı görülmektedir. Bu da koniklik arttırıldıkça taşınan ısı gücün artmasına rağmen malzeme maliyetinin de artacağını göstermektedir. Boru kesitli ayağın dikdörtgen kesitli ayağa göre %0,94, dar dikdörtgen konik ayağa göre %4,98 ve geniş dikdörtgen konik ayağa göre %6,5 birim hacim başına daha fazla ısı güç taşıdığı görülmüştür.

4. Sonuç

Aynı iç çap ve dış çap değerlerine sahip bir boru oluşturmak için termoelektrik ayaklardan aynı sayıda ayak bir sisteme yerleştirildiğinde boru kesitli sisteme sahip olan termoelektrik ayaklar üzerinden akan ısı miktarının diğer termoelektrik ayaklara göre daha yüksek olduğu

hesaplanmıştır. Termoelektrik ayakların verimlerinin sabit olduğu ve içlerinden geçen ısının bir miktarını elektriğe çevirdikleri kabulüne göre boru kesiti şeklindeki termoelektrik ayakların diğer termoelektrik ayaklara göre daha iyi sonuç vereceği görülmektedir. Ayrıca bu sistemde dış çaptaki yüzey alanı daha fazla olduğu için dış yüzeyin daha iyi soğutulması dolayısıyla iki yüzey arasındaki sıcaklık farkının daha yüksek olması sağlanabilir.

Boru kesitli ayağın diğer ayak türlerine göre birim hacim başına daha fazla ısı güç taşıdığı ve dikdörtgen kesitli ayağın konikliği arttıkça birim hacim başına taşınan ısı gücün azaldığı tespit edilmiştir. Ancak ısı güç taşıma kapasitesinin artırılmasının veya azaltılmasının termoelektrik malzemenin verimini nasıl etkilediğinin araştırılması gerekmektedir.

5. Kaynaklar

- [1] Riffat SB, Ma X. Thermoelectrics: A review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering* 2003;23:913-35.
- [2] Çengel Y. A., Cimbala J. M. *Akışkanlar Mekaniği. 1. Baskıdan Çeviri* İzmir:Güven Yayınevi; 2007. Bölüm 8 sayfa 322.
- [3] Rowe D. M. *General Principles and Basic Considerations*. Rowe D. M, editor. *Thermoelectrics Handbook*, New York: Taylor and Francis 2006, p. 3-4.
- [4] Zhou M., He Y., Chen Yanmin. A heat transfer numerical model for thermoelectric generator with cylindrical shell and straight fins under steady-state conditions. *Applied Thermal Engineering* 2012;68: 80-91.
- [5] Saqr K. M., Mansour M. K., Musa M. N. Thermal design of automobile exhaust based thermoelectric generators: objectives and challenges. *International Journal of Automotive Technology* 2008;9(2):155-60.
- [6] Sahin A. Z., Yilbas B. S., The thermoelement as thermoelectric power generator: Effect of leg geometry on the efficiency and power generation. *Energy Conversion and Management* 2013;65;26-32.
- [7] Brignone M., Ziggotti A. Impact of novel thermoelectric materials on automotive applications. *9th European Conference on Thermoelectrics* 2012:493-96.
- [8] Andreas P. Thermoelectric generators for efficiency improvement of power generation by motor generators-environmental and economic perspectives. *Applied Energy* 2012;102:1448-57.
- [9] Liang X., Sun X., Tian H., Shu G., Wang Y., Wang X. Comparison and parameter optimization of a two-stage thermoelectric generator using high temperature exhaust of internal combustion engine. *Applied Energy* 2014;130: 190-99.
- [10] Rowe D. M. *A Thermoelectric Application to Vehicles*. Ghamaty S., Bass J.C., Elsner N.B., editor. *Thermoelectrics Handbook*, New York: Taylor and Francis 2006, p. 57-3.
- [11] Halıcı F., Gündüz M. Örneklerle ısı geçişi ısı transferi. Güncelleştirilmiş baskı. Sakarya:Birsen Yayınevi; 2010. Bölüm 2 Sayfa 33.
- [12] Ohtaki M, Araki K, Yamamoto K. High Thermoelectric Performance of Dually Doped ZnO Ceramics. *Journal of Electronic Materials* 2009; 38 (7): 1234-38.