

## TERMOELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİ: GÜÇ ÜRETİMİ VE SOĞUTMA

Yaşar İSLAMOĞLU

Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü,

Termoelektrik Enerji Sistemlerinde Isı Geçişi Laboratuvarı, 54187 Sakarya

e-mektup: yasari@sakarya.edu.tr

**Özet:** Termoelektrik etki, 1800'lü yıllardan beri Seebeck etki olarak bilinmektedir. Seebeck etki, yarı iletken malzemede sıcaklık basamağından dolayı meydana gelen elektriksel gerilimdir. Sıcaklık ölçmek için kullanılan termoeleman çiftlerinin temelini oluşturan bu etki ile, ısı enerjisi doğrudan elektrik enerjisine (DC) dönüşmektedir. Aynı yarı iletken malzemeye gerilim uygulandığında ise Peltier etki sonucu elektrik enerjisiyle (DC) doğrudan soğutma yapmak mümkün olmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Termoelektrik, Seebeck etki, Peltier etki.

### THE THERMOELECTRIC ENERGY SYSTEMS: POWER GENERATION AND COOLING

**Abstract:** The thermoelectric effect is known as the Seebeck effect since 1800's. The Seebeck effect is the electrical voltage that occurs in the semiconductor material due to the temperature gradient. This effect, which forms the basis of thermocouple pairs used to measure temperature, transforms thermal energy into direct electrical energy (DC). When voltage is applied to the same semiconductor material, by electric energy (DC) direct cooling occurs because of Peltier effect.

**Keywords:** Thermoelectric, Seebeck effect, Peltier effect.

### GİRİŞ

Termodinamik dersinde incelenen güç üretimi ve soğutma sistemlerinin tümü hareketli parçalardan oluşan ağır ve karmaşık sistemlerdir. Çevrim akışkanı ve hareketli parçalara gerek duyulmadan hem ısı enerjisi doğrudan elektrik üretmek amacıyla (DC) hem de elektrik enerjisini (DC) doğrudan soğutma yapmak amacıyla kullanmak mümkündür.

Termoelektrik etkiler Seebeck, Peltier ve Thomson etki şeklinde başlıca üç etkiden oluşmaktadır. Bu etkiler ile hem güç üretimi hem de soğutma yapmak mümkün olmaktadır. Termoelektrik modül ve ısı geçişi sağlayan cihazlardan oluşmuş düzeneklere termoelektrik sistem veya termoelektrik enerji sistemleri denilmektedir [1-7].

Termoelektrik modüllerde, p ve n tipi yarı iletken malzemelerden yapılan ayak çiftleri veya eklem elektriksel olarak seri, ısı olarak da paralel bağlanmaktadır. Aşağıda Şekil 1'de güç üretmek ve soğutma yapmak amacıyla kullanılan termoelektrik modülleri tanıtan şekiller verilmektedir. Ticarileşmiş termoelektrik modüller hakkında bilgi kaynak [8]'den sağlanabilir.

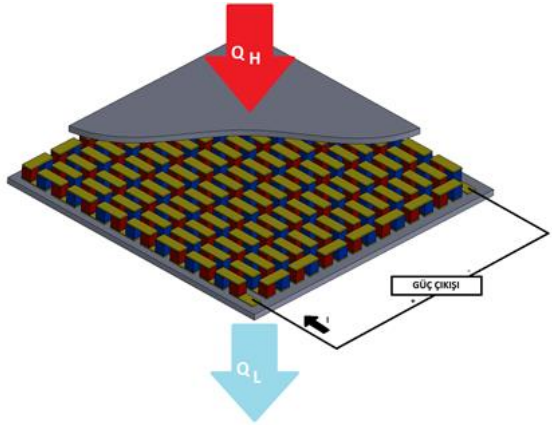
Şekilde gösterildiği gibi p ve n tipi yarı iletken malzemeler yani p ve n tipi termoelektrik malzemeler, elektrik iletkenliği yüksek iletken bir malzeme ile birbirine bağlanmaktadır. Bu şekilde termoelektrik ayak çiftleri oluşmaktadır. Bir adet termoelektrik ayak çiftinde (N=1), bir adet p tipi bir adet n tipi yarı iletken malzeme vardır. Termoelektrik ayak çiftleri, elektrik yalıtımını sağlamak amacıyla yalıtkan levhalar arasına alınmaktadır.

Termoelektrik malzemenin performansı yani FoM (Figure of Merit), aşağıda gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

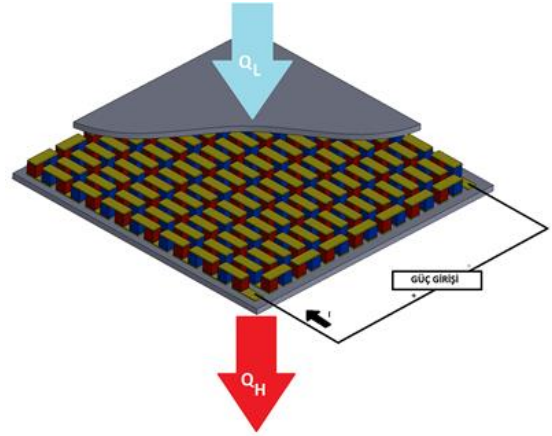
$$Z = \frac{S^2 \sigma}{k} \quad (1)$$

Birimi (1/K) olan malzeme performansı Z, genellikle ortalama mutlak sıcaklık ile çarpılarak aşağıda gösterildiği gibi boyutsuz bir formül ile belirlenmektedir.

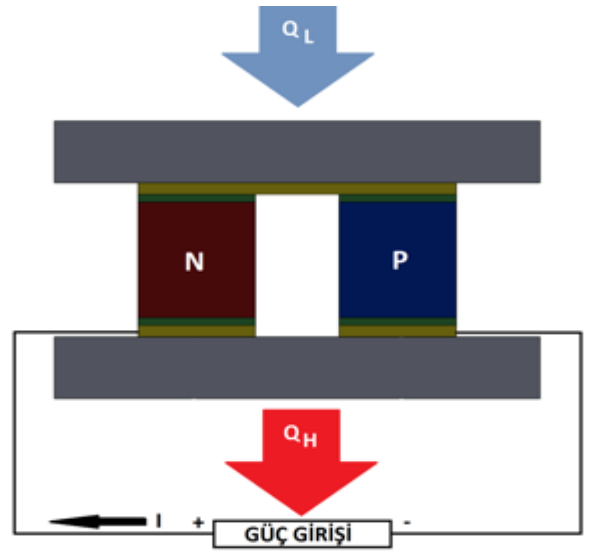
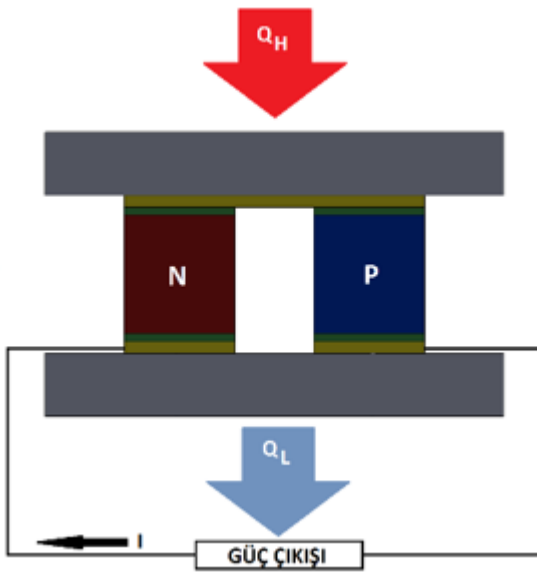
$$Z \cdot T = \frac{S^2 \sigma T}{k} \quad (2)$$



Termoelektrik güç üretici veya termoelektrik jeneratör modülü (TEG) ( $N>1$ )



Termoelektrik soğutucu veya termoelektrik soğutma modülü (TEC) ( $N>1$ )



■ P AYAK ■ N AYAK ■ İLETKEN ■ YALITKAN ■ LEHİM

Bir çift termoelektrik jeneratör ayak veya eklem ( $N=1$ )

Bir çift termoelektrik soğutucu ayak veya eklem ( $N=1$ )

Şekil 1. Termoelektrik modül ve ayak çiftlerinin şekilleri.

Termoelektrik malzemelerin “Figure of Merit”, FoM yani elektrik enerjisini ısı enerjisiye dönüştürme verimi Z, aşağıdaki gibi de ifade edilebilir.

$$Z = \frac{S^2}{KR} \quad [1/K] \quad (3)$$

Günümüzde termoelektrik malzemelerin Z.T değeri 1’ yakın hatta daha düşüktür. Endüstride yaygın kullanılan Bizmut Tellür (BiTe) termoelektrik malzemesinin Z.T değeri ise 0.5 ile 0.8 arasında değişmektedir [9-11].

### **TEORİK ESASLAR**

Soğutma amaçlı kullanılan termoelektrik modüllere, Peltier modül veya sadece termoelektrik modül adı verilmektedir. Termoelektrik modüller, soğutma makinası olarak da tanımlanabilir. Soğutma makinaları ve ısı pompaları aynı çevrime göre çalıştıklarından, termoelektrik modüller aynı zamanda ısı pompası olarak da kullanılabilir.

Güç üretmek amacıyla kullanılan termoelektrik jeneratör modüllerinde (TEG) ve soğutma amacıyla kullanılan termoelektrik soğutma modüllerinde (TEC) Seebeck, Peltier ve Thomson etkiler meydana gelmektedir. Bilimde ve endüstride yaygın kullanılan ideal termoelektrik denklemler ise Seebeck etki, iletimle geçen ısı ve Joule ısıya bağlı olarak çıkarılmaktadır. İdeal denklemlerin çıkarılmasında aşağıdaki kabuller yapılmaktadır:

-Isıl ve elektriksel temas dirençleri ihmal edilmektedir.

-Malzeme özellikleri sıcaklıkla değişmediği kabul edildiğinden Thomson etki ihmal edilmektedir.

-Termoelektrik ayaklardan veya ayaklara taşınım ve ışımla ısı geçişi ihmal edilmektedir.

İletimle geçen ısı,

$$Q = K\Delta T = K(T_H - T_L) \quad [W] \quad (4)$$

formülüyle hesaplanmaktadır. Bu formülde  $T_H$  ve  $T_L$  ise termoelektrik ayak veya eklem sırasıyla sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları, K ise p ve n tipi ayaklardan oluşan bir ayak çiftinin ( $N=1$ ) toplam ısı iletim katsayısıdır.

$$K = k_p \frac{A_p}{L_p} + k_n \frac{A_n}{L_n} \quad [W/K] \quad (5)$$

Termoelektrik ayaklardan akım geçtiğinde meydana gelen Joule ısı, R [ $\Omega$ ] modülün iç direnci olmak üzere aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$Q_J = I^2 R \quad [W] \quad (6)$$

Joule ısı miktarı, termoelektrik ayakların her iki yüzeyine eşit miktarda geldiği kabul edilmektedir. Bu durumda her bir yüzeye gelen ısı miktarı,  $\frac{1}{2} Q_J$  olacaktır.

Modülün iç direnci aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$R = \rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n} \quad (\Omega) \quad (7)$$

burada  $\rho_p$  ( $\Omega.m$ ) ve  $\rho_n$  ( $\Omega.m$ ) sırasıyla p ve n tipi ayakların elektrik öz direncidir.

Yukarıdaki formüller, hem ısı makinası hem de soğutma makinası amacıyla kullanılan termoelektrik modüller için geçerlidir. Termoelektrik güç üretmek ve soğutma yapmak amacıyla tasarlanan sistemler için geçerli olan farklı formüller de aşağıda ayrı ayrı verilmektedir. Aşağıdaki formüller, kontrol yüzeyleri ve kontrol kütlesi şeklinde seçilen termodinamik sistemlere enerjinin korunumu ilkesi yani Termodinamiğin I. Yasası uygulanarak kapsamlı olarak [12] numaralı kaynaktan çıkarılmaktadır.

**A. Termoelektrik Güç Üretimi (TEG)**

N ayak çifti sayısı olmak üzere, modülün  $T_H$  sıcaklığındaki sıcak yüzeyine veya eklemine gelen ısı:

$$Q_H = N[(S_p - S_n) \cdot I \cdot T_H + K \cdot (T_H - T_L) - I^2 R / 2] \quad [W] \quad (8)$$

$T_L$  sıcaklığındaki soğuk eklemden çıkan ısı:

$$Q_L = N[(S_p - S_n) \cdot I \cdot T_L + K \cdot (T_H - T_L) + I^2 R / 2] \quad [W] \quad (9)$$

Güç üretimi veya güç çıkışı:

$$P = Q_H - Q_L = N[S \cdot I(T_H - T_L) - I^2 R] = V \cdot I \quad [W] \quad (10)$$

Denklem (8) ve (9), denklem (10) da yerine yazılırsa, çıkış gerilimi veren formül elde edilir.

$$V = N(S_p - S_n)(T_H - T_L) - IR \quad [Volt] \quad (11)$$

Termoelektrik güç üreticisinin yani termoelektrik ısı makinasının verimi de aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$\eta = \frac{(Q_H - Q_L)}{Q_H} = \frac{P}{Q_H} = \frac{P}{(Q_L + P)} \quad (12)$$

**B. Termoelektrik Soğutma (TEC)**

Giriş gerilim denklemi:

$$V = N[(S_p - S_n)(T_H - T_L) + IR] \quad [Volt] \quad (13)$$

Gerekli güç veya güç girişi:

$$P = N[(S_p - S_n)(T_H - T_L)I + I^2 R] \quad [W] \quad (14)$$

Soğutma kapasitesi, soğutma yükü, soğutulan ortamdan çekilen ısı veya  $T_L$  sıcaklığında soğuk eklemde çektiği ısı:

$$Q_L = N[(S_p - S_n)IT_L - K(T_H - T_L) - I^2 R / 2] \quad [W] \quad (15)$$

Çevreye verilen veya  $T_H$  sıcaklığındaki sıcak eklemde çıkan ısı:

$P = Q_H - Q_L$  ise çıkan ısı  $Q_H = P + Q_L$  olacaktır. Bu durumda  $Q_H$  aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$Q_H = N[(S_p - S_n)IT_H - K(T_H - T_L) + I^2 R / 2] \quad [W] \quad (16)$$

Termoelektrik soğutucunun veya termoelektrik soğutma makinasının etkinlik katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$COP_{SM} = \frac{Q_L}{P} \quad (17)$$

**SONUÇ VE ÖNERİLER**

Günümüzde, ticarileşmiş termoelektrik modüllerle geliştirilen termoelektrik enerji sistemlerinin ısıl verimi ve etkinlik katsayısı küçük olmaktadır. Bu nedenle termoelektrik enerji sistemlerinin henüz mevcut güç santralleri ve buhar sıkıştırımlı soğutma sistemleriyle rekabet etmeleri mümkün değildir. Ancak termoelektrik enerji sistemlerinin içerisinde hareketli parçalar olmadığından dolayı sessiz ve titreşimsiz çalışmaları ve küçük boyutlu olmalarından dolayı günümüzde askeri, uzay ve medikal sanayinde güç üretmek ve soğutma yapmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır [12].

Günümüzde yaygın kullanılan ticarileşmiş Bizmut-Tellür ( $Bi_2Te_3$ ) malzeme için Z.T değeri yaklaşık 1'dir. Eğer Z.T değeri 2 veya 3 olursa, termoelektrik soğutucular, buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimleriyle rekabet edebileceği, eğer Z.T değeri 6'ya yaklaşırsa, termoelektrik modüllerle kriyojeni olarak bilinen çok düşük sıcaklıkta soğutma yani derin soğutmanın (77 K) mümkün olabileceği belirtilmektedir.

Z.T sonsuza giderken, verim veya etkinlik Carnot çevrimine yaklaşmaktadır. Z.T değeri yaklaşık 1 olan  $Bi_2Te_3$  esaslı termoelektrik soğutucunun etkinliği Carnot soğutma makinası etkinliğinin % 10'u kadar olduğu belirtilmektedir.

Z değeri; Seebeck katsayısı, elektrik öz direnci veya elektrik iletkenliği ve ısı iletim katsayısına bağlıdır. Termoelektrik enerji sistemlerinin ısıl-elektrik performansını artırmak için termoelektrik malzemenin Z değeri yüksek olmalıdır. Z'nin yüksek olması için Seebeck katsayısı yüksek, öz direnci ve ısı iletim katsayısı düşük termoelektrik malzemeler geliştirilmelidir.

Termoelektrik sistemin ısıl-elektrik performansı, hem termoelektrik modülün hem de modüle veya modülden ısı geçişi sağlayan cihazların ısıl performansına bağlıdır. Isı geçişi sağlayan cihazların ısıl direncinin küçük veya toplam ısı geçiş katsayısının büyük olması gerekir. Bu bağlamda özellikle taşınım ile ısı geçişi iyileştirme çalışmaları önemli görülmelidir. Termoelektrik enerji sistemleri için ısı geçişi iyileştirilmiş, verimli ve az yer işgal eden ısı geçişi sağlayan cihazların geliştirilmesi, verimli termoelektrik enerji sistemlerinin tasarlanıp geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Yapılacak Ar-Ge çalışmaları ile hem Z değeri daha yüksek termoelektrik malzemeler hem de ısı geçişi iyileştirilmiş ısı geçişi sağlayan cihazlar geliştirilecektir. Bu şekilde verimi daha yüksek, çevre dostu temiz enerji sistemleri olan termoelektrik enerji sistemleri yakın zamanda çok geniş kullanım alanına sahip olacaktır. Bu sistemlerin yaygınlaşması fosil yakıtların tüketimini azaltmaya ve küresel ısınmayı önlemeye katkı sağlayacaktır.

Son zamanlarda termoelektrik güç üretimi ve soğutma sistemleri konusunda yoğun çalışmalar yapıldığı anlaşılmaktadır. Örneğin Web of Science veri tabanına göre termoelektrik enerji teknolojileri (TET) konusuna uygun aylık yayın sayısı 500'den 2000'e ulaşmıştır. Hatta verimi yüksek termoelektrik modüllerin geliştirilmesi için TÜBİTAK-ARDEB tarafından, Sanayide Enerji Verimliliği Çağrı Programı kapsamında, termoelektrik modüllerin geliştirilmesi için bütçesi çok büyük olan proje çağrısına başvurular yapılmıştır.

### **SEMBOLLER**

A	Termoelektrik malzemenin yapılan ayak kesit alanı [ $m^2$ ]
H	Termoelektrik malzemenin yapılan ayak yüksekliği [m]
I	Elektrik akımı [A]
k	Termoelektrik malzemenin ısı iletim katsayısı [ $W/mK$ ]
N	Termoelektrik ayak çifti sayısı (Bir çift termoelektrik ayakta yani $N=1$ için, 1 tane p ve 1 tane n tipi termoelektrik ayak veya malzeme bulunmaktadır).
P	Güç [W]
$Q_H$	Kaynaktan alınan ısı veya jeneratörün aldığı ısı [W]
$Q_L$	Kuyuya verilen ısı veya jeneratörün verdiği ısı [W]
R	Elektrik direnci [ $\Omega$ ], [ $1/S$ ]
S,	Termoelektrik malzemenin Seebeck katsayısı [ $V/K$ ]
T	Termoelektrik ayakların veya eklem ortalaması mutlak sıcaklığı ( $T = \frac{T_H+T_L}{2}$ ) [K]
$T_H$	Kaynak tarafında termoelektrik ayakların uç veya eklem sıcaklığı [K]
$T_L$	Kuyu tarafında termoelektrik ayakların uç veya eklem sıcaklığı [K]
V	Elektriksel gerilim (Voltaj) [V]
Z	Termoelektrik malzemenin performansı [ $1/K$ ]
Z.T	Termoelektrik malzemenin performansı
$\rho$	Termoelektrik malzemenin elektrik öz direnci [ $\Omega.m$ ], [ $m/S$ ]
$\sigma$	Termoelektrik malzemenin elektrik iletkenliği [ $1/\Omega.m$ ], [ $S/m$ ]
$\eta$	Termoelektrik verim (ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşüm oranı)
Alt indisler	
n	Tipi n olan termoelektrik malzeme veya ayak
p	Tipi p olan termoelektrik malzeme veya ayak

**KAYNAKLAR**

- [1] Çengel, Y.A. ve Boles, M.A., *Termodinamik*, Güven Kitabevi, İzmir, 2011.
- [2] Bergman, T.L, Lavine, A.S., Incropera, F.P. ve Dewitt, D.P., *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri*, Palme Yayıncılık, Ankara, 2015.
- [3] İslamoğlu, Y. ve Aybek, Ş.A., Termoelektrik Jeneratörün Sayısal İncelenmesi, *21. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Çorum, 2017.
- [4] İslamoğlu, Y. ve Aybek, Ş.A., Performance Prediction of Thermoelectric Generator Using Finite Element Method, *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Baku-Azerbaijan, 2017.
- [5] İslamoğlu, Y., Termoelektrik Modülün Soğutma Performansının Deneysel İncelenmesi, *IV. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu*, Trakya Üniversitesi, Edirne, 2018.
- [6] İslamoğlu, Y., Termoelektrik Jeneratör Modülün Seebeck Katsayısının Deneysel İncelenmesi, *IV. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu*, Trakya Üniversitesi, Edirne, 2018.
- [7] İslamoğlu, Y. ve Aybek, Ş.A., Termoelektrik Ayak Geometrisinin Termoelektrik Güç Üretimine Etkisi-Sayısal İnceleme, *IV. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu*, Trakya Üniversitesi, Edirne, 2018.
- [8] <http://kryothermtec.com>.
- [9] Elsheikh, M.A., Shnawah, D.A., Sabri, M.F.M, Said, B.M., Hassan, M.H., Bashir, M.B.A. ve Mohamad M., A Review on Thermoelectric Renewable Energy: Principle Parameters that Affect Their Performance, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 337–355, 2014.
- [10] Manikandan, S. ve Kaushik, S.C., Thermodynamics Studies and Maximum Power Point Tracking in Thermoelectric Jenerator-Thermoelectric Cooler Combined System, *Cryogenics*, 67, 52-62, 2015.
- [11] Tian Z., Lee S. ve Chen G., Heat Transfer in Thermoelectric Materials and Devices, *Journal of Heat Transfer*, 135, 1-14, 2013.
- [12] İslamoğlu, Y., *Termoelektrik Sistemler*, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Dersi, Ders Notları, 2017.