

## TERMoeLEKTRİK MODÜLÜN JENERATÖR OLARAK MODELLENMESİ VE DENEYSEL ÇALIŞMASI

**Raşit AHISKA<sup>\*</sup>, Hayati MAMUR<sup>\*\*</sup> ve Metin ULİŞ<sup>\*\*\*</sup>**

<sup>\*</sup>Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik-Bilgisayar Eği. Böl., 06500 Teknikokullar, Ankara

<sup>\*\*</sup>Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 18200, Çankırı

<sup>\*\*\*</sup>Mümin Erkunt Mesleki Eğitim Merkezi, Sincan I. Organize Sanayi Bölgesi, Ankara

[ahiska@gazi.edu.tr](mailto:ahiska@gazi.edu.tr), [hmamur@karatekin.edu.tr](mailto:hmamur@karatekin.edu.tr), [metinulis@hotmail.com](mailto:metinulis@hotmail.com)

(Geliş/Received: 21.01.2011; Kabul/Accepted: 15.08.2011)

### ÖZET

Bu çalışmada, Matlab/Simulink benzetim programıyla Termoelektrik Modülün (TEM) Termoelektrik Jeneratör (TEJ) olarak kullanılması için, matematiksel modelinin benzetimi yapılmış ve farklı iki sıcaklık aralıkları için benzetim sonuçları deneylerle teyit edilmiştir. Modüle ait akım, gerilim, güç, sıcak yüzey ve soğuk yüzey sıcaklıkları ve bu yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı değerlerinin sürekli izlenmesi ve kayıt altına alınması için özel bir SCADA programı geliştirilmiştir. Matlab/Simulink benzetimiyle elde edilen teorik sonuçlarla SCADA sistemiyle ölçülen deneysel sonuçlar karşılaştırılmış, ortalama hata yüzdeleri; sırasıyla akım, gerilim ve güç için %5,57, %5,12 ve %3,72 olmuştur. 100°C sıcaklık farkında, TEJ'e giren atık ısı miktarı  $Q_H = 197W$  iken, TEJ ve yük dirençleri birbirine eşitlendiğinde; çıkış gerilimi  $V_{max} = 2,2V$ , çıkış gücü  $P_{max} = 6,71W$  ve verim %3,4 elde edilmiştir. Deney ve teorik analizin sonuçları, özellikle endüstriyel ve jeotermal alanlarda, düşük sıcaklıklar için atık ısı geri kazanımında, TEJ'in umut verici potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Termoelektrik Jeneratör, Matlab/Simulink benzetimi, SCADA programı, güç üretimi.

## MODELLING AND EXPERIMENTAL STUDY OF TERMoeLECTRIC MODULE AS GENERATOR

### ABSTRACT

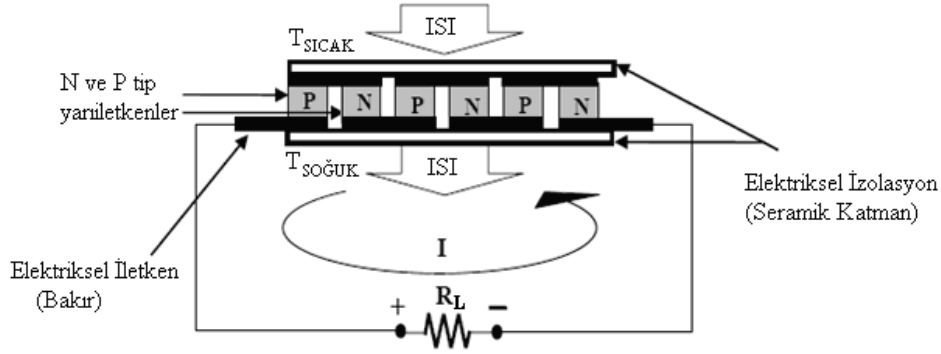
In this study, mathematical model simulation was done for using Thermoelectric Module (TEM) as Thermoelectric Generator (TEG) by Matlab/Simulink simulation program; and mathematical model and simulation results for different temperature ranges were confirmed by experiments. Current, voltage, power, hot side and cold side heats and temperature difference between the surfaces of module values for continuous monitoring and registration of a special SCADA program was developed. When Matlab/Simulink simulation results obtained from the theoretical were compared with the experimental results measured by the SCADA, the results were as follows; system average error percentages; for current, voltage and power: 5.57%, 5.12%, 3.72% respectively. TEG output voltage  $V_{max} = 2.2V$ , output power  $P_{max} = 6.71W$  and efficiency 3.4% were obtained, when amount of waste heat sink into TEG was  $Q_H = 197W$  and the matched load resistance was matched to the internal resistance at the 100°C temperature difference. The results of experimental and theoretical analysis show that TEG has a promising potential at the recovery of waste heat for low temperatures in especially industrial and geothermal areas.

**Keywords:** Thermoelectric generator, Matlab/Simulink simulation, SCADA program, power generation.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada, enerji güvenliğinin sağlanması ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır.

Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında karşımıza çıkan en büyük zorluk, yenilenebilir enerji kaynakları için gerekli olan kurulum maliyetlerinin yüksek oluşudur.



**Şekil 1.** TEM'in TEJ olarak kullanımı (The use of thermoelectric module as thermoelectric generator) [5]

Yenilenebilir enerji kaynakları kullanımında, termoelektrik jeneratörler (TEJ) önemli yere sahiptir [1]. TEJ'lerin kullanımıyla ilgili teknolojik yenilikler USA, Avrupa ve Japonya'da yeni araştırmaların konusu olmuştur. Termoelektrik (TE) teknolojiler USA uzay programlarında devrimsel gelişmelere yol açmıştır [2,3].

Termoelektrik Modüllerden (TEM) elektriksel güç elde edilmesinde, TEM'lerin avantajları şunlardır;

- Hareketli parçalarının olmayışı,
- Basit yapılı olmaları,
- Bakım gerektirmemeleri,
- Uzun ömürlü olmaları (100.000 saatten fazla),
- Sıcaklık kontrolüne olanak tanınmaları ( $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ),
- Elektrik enerjisinin doğrudan elde edilmesi,
- Sessiz çalışmaları,
- Güvenilir olmaları,
- Kararlı çalışmaları.

Bu avantajlarının yanında en büyük dezavantajı, verimlerinin (%5–10) düşük oluşudur [4].

TE cihazlar tipik olarak ikiye ayrılırlar; Termoelektrik Soğutucular (TES) ve TEJ'ler. TEJ'ler TEM'in yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını elektrik enerjisine çevirir, bu olay Seebeck etki olarak bilinir [5]. TES'ler ise TEM'e uygulanan elektrik enerjisini her iki tarafında soğuk yüzey ve sıcak yüzey olarak sıcaklık farkına çevirir, bu olay da Peltier etki olarak isimlendirilir [6].

TEJ'ler atık ısılarda bulunan sıcaklık farklarından elektrik gücü elde edilmesinde, sıcaklık algılayıcılarında, enerji kaynağı olarak batarya kullanan küçük enerji gereksinimi (saat, kablosuz ağlar...) olan cihazlarda yaygın olarak kullanılırlar [7,8]. TEJ'lerin maliyetlerinin yüksek oluşu ve verimlerinin düşük olması uygulama alanlarını kısıtlamaktadır. TEJ'lerin atık ısılardan elektrik enerjisi üretiminde, verim yaklaşık olarak %5-10'lar civarındadır. İlk bakışta, bu verim çok düşük olarak düşünülmektedir. Fakat atık ısının geri elektrik gücü olarak kullanıma kazandırılması düşünüldüğünde bu

verim miktarı küçümsenemez [9]. Son zamanlarda, TEJ'ler enerjinin verimli kullanımı, çevresel kaygılar ve küresel ısınma nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının içinde dikkati çekmektedir[10]. Örneğin, otomobillerin egzozunda, şofbende, kalorifer kazanlarında, atık ısı borularında ve jeotermal alanlarda atık ısının geri kazandırılmasıyla enerji verimliliğini arttırmaktadır [6,11,12].

TEJ'in çalışma prensibi 1821'de Thomas Seebeck tarafından bulunmuş olan Seebeck etkiye dayanır. Temelinde termoelementlerden oluşan TEM'ler yer almaktadır. Bir TEM, Şekil 1'deki gibi, p- ve n-tip yarı iletkenlerin, üretilen elektrik gerilimini arttırmak için elektriksel olarak seri, ısı genişlemeyi sağlamak için de seramik plakalar yardımıyla termal olarak paralel bağlanmasıyla oluşturulur. Bir TEJ'in uçlarına elektrik yükü bağlanıp, TEJ'in yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluşturulursa, TEJ elektrik gerilimi üretir ve yükten akım geçişi olur. TEJ'den alınan elektrik gücü yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkıyla doğru orantılıdır [9].

TEM üretim teknolojisinde ve güç elektroniğindeki değişimler nedeniyle TEM'lerin matematiksel modellenmeleri ve maksimum güç alınması çalışmaları hız kesmeden devam etmektedir [3–13]. TEJ modellemeleri ısı iletimi ve elektrotermal özelliklerin incelenmesi üzerinedir [12, 14, 15]. Bununla birlikte, TEJ'lerin elektronik devrelerin benzetim programlarında kullanabilmesi amacıyla da modellemeleri yapılmıştır [11]. Atık ısıdan TEJ yardımıyla elektrik enerjisi elde edilmesinde TEJ'den maksimum verim almak için TEJ iç direnciyle yükün direnci birbirine eşit olmalıdır [10–16]. TEJ'ler farklı sıcaklık aralıklarında kullanıldıkları için parametreleri sürekli olarak değişim göstermektedir [17]. Ayrıca ürettikleri gerimde sıcaklık farkı değişimi nedeniyle sürekli değişmektedir. TEJ'in çıkışına bağlanan yük değiştiğinde TEJ'den alınan güçte de değişim olmaktadır. TEJ çıkışını standart gerilim çıkışı haline getirebilmek için dc-dc çevirici kullanılır. Bu nedenle TEJ'den maksimum güç çekilebilmesi için ara devre olarak kullanılan dc-dc çeviricinin maksimum güç çekme özelliğinin olması gerekir [18,19].

Bu çalışmada; TEM'lerin farklı sıcaklık aralıklarında TEJ olarak kullanımı için performans testleri gerçekleştirilmiştir. Bir TEJ üreticisinin kullanım kitapçıklarında verilen temel parametrelere göre, seçilen matematiksel modelin benzetimi yapılmış ve benzetim sonuçları deneysel olarak doğrulanmıştır. Deneysel verilerle benzetim çalışmalarının karşılaştırılmasının nedeni, TEJ'den  $\Delta T$  sıcaklık farklarına bağlı olarak elde edilen elektrik enerjisinin, MPPT'li bir dc-dc konvertör ve invertöre uygulanacak olması ve sıcaklığa bağımlı dc-dc konvertör ile invertörün benzetim çalışmalarının yapılabilmesine olanak tanınmasıdır. Bu benzetim ve uygulama çalışması, tasarımı planlanan yaklaşık 1kW'lık bir TEJ'in temelini oluşturmaktadır. Ayrıca, ölçüm verilerinin izlenmesi ve kayıt altına alınması amacıyla bir SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) programı yazılmıştır [22]. Bu SCADA programı sayesinde ileride yapılması planlanan TEJ santralının tüm elektriksel ve fiziksel verileri de izlenebilecek ve kontrolleri yapılabilecektir.

## 2. METOTLAR (METHODS)

Bu bölümde, TEJ benzetimlerinin yapılması için kullanılan matematiksel modeller ve Matlab/Simulink benzetim programında yapılan benzetim çalışması ve sonuçları sunulacaktır.

### 2.1. TEJ Denklemleri (TEG Equations)

Ticari olarak üretimde bulunan firmalar üretilen TEJ'lerde soğuk yüzey sıcaklığı  $T_C$ , sıcak yüzey sıcaklığı  $T_H$ , maksimum güç  $P_{max}$  gibi parametrelerini belirtirler. Maksimum gücün elde edilmesinde TEJ iç direnci  $R$ , yük karşılaşmasındaki ( $R_L=R$ ) yük gerilimi  $V_{max}(=V_R)$  ve maksimum verimlilik  $\eta_{max}$  öne çıkar. Bu verilen değerlerle devrenin elektriksel parametreleri hesaplanabilir. Kullanılacak bir TEM için verimliliğin yüksek olmasında; büyük Seebeck sabiti  $\alpha$ , düşük elektriksel direnç  $R$  ve düşük termal iletkenlik  $\kappa_{th}$  değerleri etkindir. TEJ'lerde kalite faktörü (Figure of Merit - FOM) aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Z = \alpha^2 / R\kappa_{th} \quad (1)$$

TEJ'in elektrik direnci  $R$  ve Seebeck sabiti  $\alpha$  aşağıdaki gibidir.

$$R = R_L = V_{max}^2 / P_{max} \quad (2)$$

$$\alpha = 2V_{max} / \Delta T \quad (3)$$

TEJ'in verimliliği yüke bağlı olarak değişir. Yük direnci  $R_L=mR$  olarak tanımlandığı varsayılır, burada  $m$  yük direncinin iç dirence oranıdır. Akım denklemi aşağıdaki gibidir.

$$I = \alpha \Delta T / [(1+m)R] \quad (4)$$

TEJ'in verimliliği elektrik güç çıkışının sıcak yüzeye uygulanan termal güç girişine oranıdır, aşağıdaki eşitlikle bulunabilir.

$$\eta = I^2 R_L / Q_H \quad (5)$$

Ayrıca, TEJ'in verimliliği yeniden formüleleştirilebilir.

$$\eta = mZ\Delta T / \left\{ (1+m)^2 + Z[(m+0.5)T_H + 0.5T_C] \right\} \quad (6)$$

Burada  $m_{opt}$  değeri, TEJ maksimumlaştırılmış verimliliğinde  $m$  direnç oranının değeridir. Bu aşağıdaki gibi bulunur.

$$m_{opt} = (1 + ZT_{ave})^{0.5} \quad (7)$$

Burada  $T_{ave} = 0.5(T_H + T_C)$ . Ticari olarak verilen bir TEJ parametreleriyle, direnç oranı  $m$  aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$m_{opt} = (\Delta T + \eta_{max} T_C) / (\Delta T - \eta_{max} T_H) \quad (8)$$

Ayrıca FOM değeri aşağıdaki gibi bulunur.

$$Z = (m_{opt}^2 - 1) / T_{ave} \quad (9)$$

TEJ termal iletkenliği, aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\kappa_{th} = \alpha^2 / RZ \quad (10)$$

Maksimum güç üretimdeki verim  $\eta_{max}$  olduğu durumda, akım değeri aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$I_{max} = \alpha \Delta T / 2R \quad (11)$$

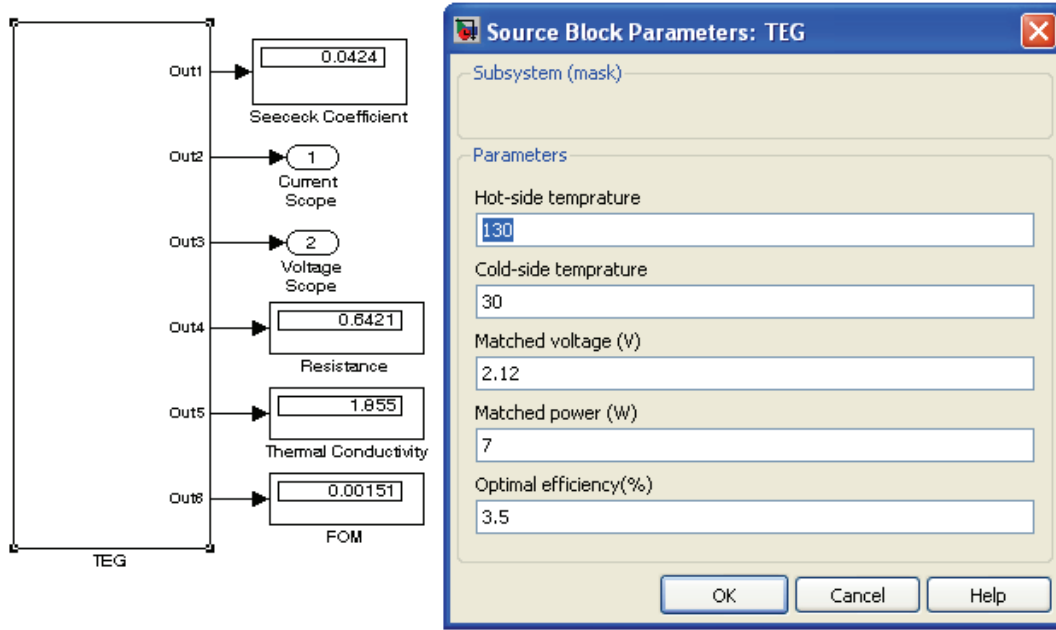
Verim aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\eta_{max} = Z\Delta T / [4 + Z(1.5T_H + 0.5T_C)] \quad (12)$$

Verim verilmişse FOM değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Z = 4\eta_{TEG}^{max} / [\Delta T - \eta_{TEG}^{max}(1.5T_H + 0.5T_C)] \quad (13)$$

Sonunda, eşitlik (10)'dan TEJ'nin termal iletkenliği belirlenir [3].



Şekil 2. TEJ Matlab/Simulink benzetimi (TEG Matlab/Simulink simulation) [3]

## 2.2. TEJ Benzetimi (TEG Simulation)

TEJ uygulamalarında, TEJ'den maksimum çıkış gücünün çekilmesi her zaman istenir. TEJ maksimum akımı  $I_{max}$ , yük geriliminin  $V_L = 0$  olduğu andır. Bu akıma kısa devre akımı  $I_{SC}$  denir.

$$I_{SC} = 2I_{max} = \frac{2P_{max}}{V_{max}} \quad (14)$$

Gerilim çıkış değeri de aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$V = -R(I - I_{SC}) \quad (15)$$

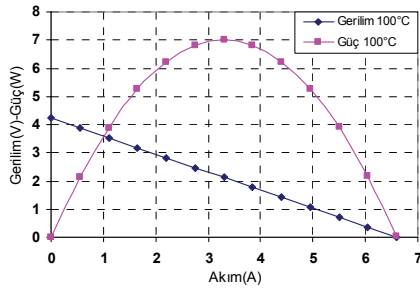
TEJ'in sıcak yüzeyi ve soğuk yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı  $\Delta T = T_H - T_C$  ifadesiyle elde edilir. TEJ'e ait akım, gerilim ve güç eğrilerinin çizilebilmesi için, sıcaklık farkı  $\Delta T$  sabit tutulmak şartıyla, akım ve gerilim değerleri bulunur. Çıkış gücü ve verimlilik elektrik akımının bir fonksiyonu olarak temsil edilir [3].

Bu çalışmada, ticari olarak bulunabilen ALTEC-GM-1 marka-kodlu TEM kullanılmıştır [23]. Üreticinin kullanım kitapçığında verilen parametreler şunlardır; ortam sıcaklığı  $T = 27^\circ C$  değerindeyken, iç direnci  $R = 0,495\Omega$ , sıcak taraf ısı  $T_H = +130^\circ C$ , soğuk taraf sıcaklığı  $T_C = +30^\circ C$ , maksimum gerilim  $V_{max} = 2,12V$ , maksimum akım  $I_{max} = 3,31A$ , maksimum güç  $P_{max} = 7,0W$  ve verim  $\eta_{max} = \%3,5$ . Bu parametreler her üretici firma tarafından verilmektedir. Bunlara göre kullanıcılar değişik yüklerde ve sıcaklık değerlerinde TEM'den

alabilecekleri güç hesaplamalarını yapabilmektedirler. Yapılan bu hesaplamalar değişik yük değerlerinde TEM'lerden elde edilebilecek güç için önem arz etmektedir.

Şekil 2'de görüldüğü gibi, Matlab/Simulink benzetiminde, verilen eşitlikler kullanılarak, TEM parametreleri hesaplanmıştır. TEJ blok yapılandırmasında sıcak taraf sıcaklığı, soğuk taraf sıcaklığı, maksimum yük karşılaşma gerilimi, maksimum güç ve verimlilik değerleri benzetim kullanıcısı tarafından girilmiştir. Girilen bu verilere bağlı olarak Eşitlik 3'ten Seebeck sabiti  $\alpha$ , Eşitlik 2'den maksimum gücün elde edilebildiği TEJ-yük iç direnç karşılaşma değerindeki TEJ'e bağlanan yük değeri  $R_L$ , Eşitlik 13'ten FOM değeri  $Z$  ve Eşitlik 10'dan termal iletkenlik değeri  $\kappa_{th}$  hesaplanmıştır. TEJ blok diyalog yapılandırmasından girilen örnek verilere göre Seebeck sabiti  $\alpha = 0,0424 V/K$ , yük karşılaşmasındaki ( $R_L=R$ ) direnç değeri  $R = 0,642\Omega$ , FOM değeri  $Z = 1,511 \times 10^{-3} K^{-1}$  ve termal iletkenlik  $\kappa_{th} = 1,855 W/K$  sonuçları elde edilmiştir. Sıcaklık farkı  $\Delta T$  sabit tutulmak şartıyla, yük değerinin değişimine  $R_L$  bağlı olarak, Eşitlik 8 ile  $m_{opt}$  değeri hesaplanmış, Eşitlik 4 yardımıyla akımdaki  $I$ , Eşitlik 15 yardımıyla da gerilimdeki  $V$  değişimler bulunmuştur. Akım ve gerilim değerlerinden de güç değerleri  $P$  elde edilmiştir. Elde edilen veriler Şekil 3'de TEJ V-I-P karakteristikleri olarak verilmiştir. TEM'den alınan maksimum güç değeri, benzetim eğrileri incelendiğinde TEJ'in iç direnç değerinin  $R = 0,642\Omega$  olduğu anda elde edilmiştir. Bu değer yükün direncine eşit olmuştur ( $R_L=R$ ).

Şekil 3’de benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçların görüldüğü grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde 100°C sıcaklık farkında TEM’den



Şekil 3. TEJ V-I karakteristikleri (TEG V-I characteristics)

alınan en yüksek güç değeri yaklaşık 7W olmuştur.  $R_L$  değerinin elde edilen maksimum güç değeri dışındaki diğer değişimlerinde güç değerinde azalma meydana gelmiştir.

### 3. DENEYSSEL KURULUM (EXPERIMENTAL SETUP)

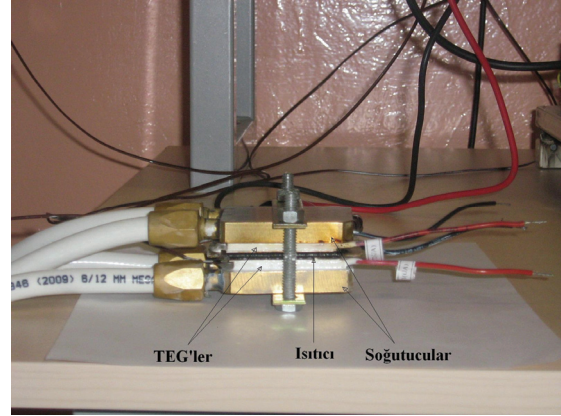
Bu bölümde yapılan TEJ uygulamalarının yapılması için bir TEJ deney seti kurulumu, TEJ’den alınan değerlerin kaydedilmesi için SCADA sistemi ve TEJ performans sonuçları verilmektedir.

#### 3.1. TEJ Kurulumu (Thermoelectric Generator Setup)

TEJ performans testlerinin yapılabilmesi için, Şekil 4’teki kurulum gerçekleştirilmiştir. Burada iki tane ticari olarak bulunabilen ALTEC-GM-1 marka-kodlu TEJ arasına, sıcak yüzey ısıyı sağlayabilmek amacıyla krom-nikel telden 500W’lık bir düz ısıtıcı tasarlanmış ve üretilmiştir. Isıtıcının sıcak yüzey ısısının istenilen değerde tutulmasını sağlamak için, giriş gerilimi 220V AC, çıkış gerilimi 0-250V AC, gücü 2kVA olan Artes Elektronik firmasına ait bir oto trafosu kullanılmıştır. Modüllerin yüzeylerinin soğutulması için, soğuk su dolaşım sisteminden faydalanılmıştır. Soğuk suyun sürekli olarak aynı ısı değerinde tutulabilmesi amacıyla, sıcaklık algılayıcı girişi PT100 olan referans sıcaklığı ayarlanabilen PID kontrollü su sebili kullanılmıştır. Soğuk suyun dolaşımı üç hız kademeli 1 fazlı dolaşım pompasıyla gerçekleştirilmiştir. TEM’lerin sıcak ( $T_H$ ) ve soğuk ( $T_C$ ) yüzeylerinin ısı değerlerini algılamak ve bu yüzeyler arasındaki sıcaklık farkını ( $\Delta T$ ) bulmak amacıyla iki tane T tipi termokupl kullanılmıştır. TEJ’lerin soğuk yüzey ve sıcak yüzeyleri arasındaki termal iletim direncini en aza indirebilmek amacıyla, silikon jel sürülmüştür.

#### 3.2. TE Sistemde Sıcaklık ve Güç Analizinin Yapılması İçin SCADA (The SCADA System For Thermoelectric Heat and Power Analysis)

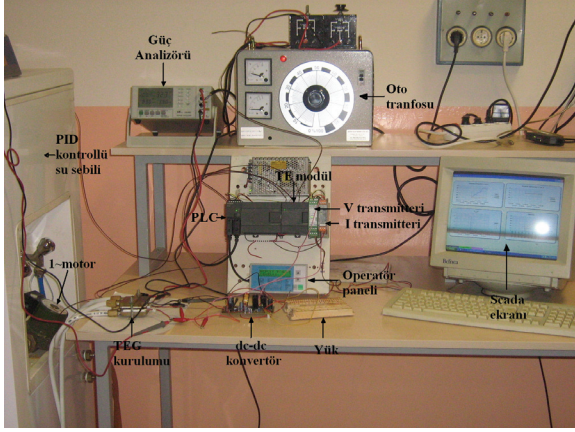
TEJ’lerden alınan akım, gerilim, güç, sıcak yüzey sıcaklığı, soğuk yüzey sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve



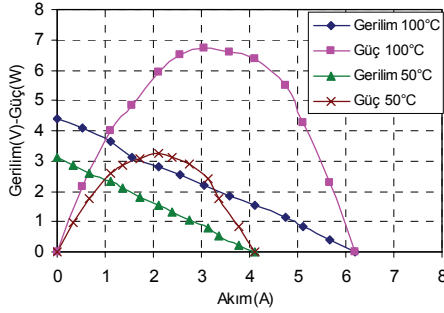
Şekil 4. TEJ kurulumu (TEG setup)

soğutucu su sebilinin ısısını sürekli olarak izlemek için bir SCADA sistemi kullanılmıştır. Bu SCADA sistemi, Şekil 5’te verilmiştir. Burada, TEJ sisteminden alınan tüm verilerin toplanıp dijital ortama taşınabilmesi için 14 dijital girişi (DI), 10 dijital çıkışı (DQ), 2 analog girişi (AI) ve 2 analog çıkışı (AQ) olan Siemens CPU224XP DC/DC/DC Programlanabilir Lojik Kontrolör (PLC) kullanılmıştır. Bilgisayarla veri iletişimi RS232 iletişimini RS485 iletişime çeviren PPI (Point to Point Interface) haberleşme protokolüyle gerçekleştirilmiş ve bilgisayarda SCADA yazılımıyla veriler izlenip kayıt altına alınmıştır. TEJ sistemindeki dört farklı sıcaklık verisinin (TEJ sıcak yüzey, TEJ soğuk yüzey, soğutucu su sebili ve ortamın sıcaklığının) alınması amacıyla, 4 tane termokupl girişi olan (4AI), S, T, R, E, N, K, J tipi termokuplların takılabildiği, 0,1°C’lik artışlarla sıcaklık ölçümü yapabilen, her bir kanalı 15 bit çözünürlüğünde olan, Siemens PLC’ye genişleme modülü olarak bağlanabilen EM231 Termokupl Modülü kullanılmıştır. TEJ sisteminde üretilen akım değerinin algılanması için, WeidMüller marka, hall effect prensibiyle çalışan, 1/5/10A AC/DC akım algılaması yapıp 0-10V veya 4-20mA akım çıkışı verebilen bir akım izleyici kullanılmıştır. Akım izleyicinin çıkışı, PLC’nin AI0’ına bağlanarak SCADA sistemine aktarılmıştır. TEJ sisteminden elde edilen akım değeri, maksimum 6,60A’ye çıkmış, bu nedenle akım izleyicide kademe olarak 10A kademesi seçilmiştir. PLC’nin analog girişinde akım değeri 15 bit çözünürlüklü olarak ölçülmüştür. TEJ sisteminde üretilen gerilim değerinin algılanması için ise, Phoenix Contact marka, hall effect prensibiyle çalışan,  $\pm 24/\pm 36/\pm 80/\pm 120/\pm 250/\pm 550$ V DC algılama kademeleri bulunan  $\pm 10V/\pm 20mA$  çıkış verebilen MCR-VDC-UI-B-DC bir gerilim izleyici kullanılmıştır. Gerilim izleyicinin çıkışı, PLC’nin AI1’ine bağlanarak SCADA sistemine aktarılmıştır. TEJ sisteminden elde edilen gerilim değeri maksimum 4,40V’a çıkmış, bu nedenle gerilim izleyicide kademe olarak 36V kademesi seçilmiştir. PLC’nin analog girişiyle gerilim değeri 15 bit çözünürlüklü olarak ölçülmüştür. Akım, gerilim ve sıcaklık ölçümlerinin kalibrasyonu Fluke 725, çok fonksiyonlu Süreç Kalibratör cihazı kullanılmıştır.





Şekil 5. TEJ sistemi ve SCADA (TEG system and SCADA)

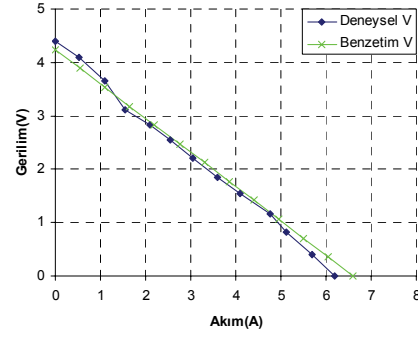


Şekil 6. Deneysel TEJ V-I karakteristikleri (Experimental TEG V-I characteristics)

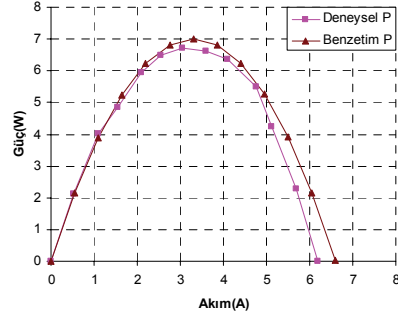
TEJ'lerin sıcak yüzeylerine gelen güç değerinin ölçülmesinde, Lutron DW-6090 model güç analizörü kullanılmıştır. Güç değeri  $P$  ve TEJ'lerin sıcak yüzey ve soğuk yüzey arasındaki sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) PLC'nin içerisindeki programla hesaplanarak SCADA sisteminden izlenmiştir. Bilgisayarın olmadığı ortamlarda bahsi geçen değerlerin sürekli olarak gözlemlenebilmesi için Siemens marka TD-200 Operatör Paneli kullanılmıştır.

### 3.3. Performans Testi (Performance Testing)

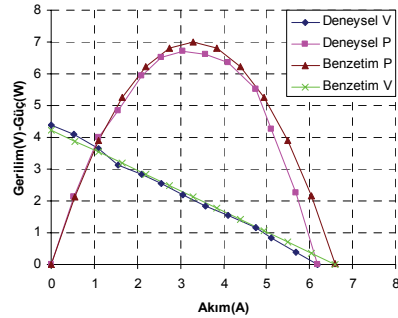
Kullanılan Altec marka TEM'lerin yalnızca birinin değişik sıcaklık farkları için, performans test sonuçlarının grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. Burada maksimum akım ( $I_{SC}$ ) yük direncinin  $R_L$  sıfır olduğu, maksimum gerilim ( $V_{max}$ ) değeri de yük direncinin  $R_L$  sonsuz olduğu andır. Altec kullanım kitapçıklarındaki  $\Delta T=100^\circ C$  sıcaklık farkında alınan maksimum gücün  $P_{max}=7W$  olduğu ifade edilmiştir. Deneysel olarak, belirtilen sıcaklık farkı değerinde, yük direncinin değeri  $R_L=0,72\Omega$  olduğunda en yüksek güç değeri alınmış ve yaklaşık olarak bu değer ( $6,71W$ ) elde edilmiştir. Bu durumda giriş gücü  $Q_H=197W$  ve verim  $\eta=3,4$  olarak bulunmuştur. TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı  $\Delta T=50^\circ C$  değerine getirildiğinde, maksimum gerilim  $V_{max}$ , kısa devre



Şekil 7. Benzetim ve deney V-I eğrilerinin karşılaştırılması (Simulation and experimental comparison of the VI curves)



Şekil 8. Benzetim ve deney P eğrilerinin karşılaştırılması (Simulation and experimental comparison of the P curves)



Şekil 9. Benzetim ve deney V-I-P eğrilerinin karşılaştırılması (Simulation and experimental comparison of the V-I-P curves)

akımı  $I_{SC}$  ve elde edilen güç değeri  $P_{max}$  azalmıştır. Benzetim ve deneysel çalışmadaki akım, gerilim ve güç değerleri karşılaştırıldığında, ortalama mutlak hata değerleri, sırasıyla; 0,2, 0,9, ve 0,19 bulunmuştur. Benzetim ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında akım, gerilim ve güç ortalama bağıl hata değerleri, sırasıyla; %5,57, %5,12 ve %3,72 bulunmuştur. Benzetimden ve deneyden alınan akım-gerilim, güç eğrilerinin karşılaştırılması sırasıyla; Şekil 7, Şekil 8

ve Şekil 9'da verilmiştir. Elde edilen eğrilerden matematiksel modelin doğruluğu görülmüştür.

Deneysel kurulumda bulunan iki TEJ  $\Delta T=100^{\circ}\text{C}$  sıcaklık farkında seri olarak bağlandığında ve yük değeri  $R_L=1.96\Omega$  olduğunda, maksimum güç alınmıştır ( $P_{max}=11,2\text{W}$ ). Kullanılan Altec marka ikinci modülün maksimum gücü  $\Delta T=100^{\circ}\text{C}$  sıcaklık farkında  $P_{max}=6.9\text{W}$  olmuştur. Yine, iki TEJ  $\Delta T=100^{\circ}\text{C}$  sıcaklık farkında paralel olarak bağlandığında ve yük değeri  $R_L=0,55\Omega$  değerine getirildiğinde, maksimum güç alınmıştır ( $P_{max}=8,5\text{W}$ ). Seri bağlamada paralel bağlamaya göre daha yüksek güç elde edilmiştir. Buradaki sorun TEJ'lerin dinamik parametrelerinin aynı olmamasından kaynaklanmıştır. Bu sorun bir başka çalışmada araştırılacaktır.

#### 4. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME (CONCLUSIONS and EVALUATION)

Bir TEM'in TEJ olarak kullanılması için matematiksel modelinin Matlab/Simulink'le benzetimi yapılmış ve bu modelin doğruluğu iki sıcaklık aralığı için deneylerle ispatlanmıştır. Yüksek güçlü bir TEJ (yaklaşık 1kW) yapımının temelini oluşturan bu benzetim modeli, giriş değerleri sıcaklık farkına bağlı olan bir dc-dc konvertör ve invertör çalışmasında rahatlıkla kullanılabilir.

TEJ sıcaklıklarının, soğutucu su sıcaklığı, ortam sıcaklığı, modülün sıcak ve soğuk yüzey sıcaklık farkı, akım, gerilim ve güç değerlerinin sürekli olarak izlenmesi ve kayıt altına alınması için geliştirilen ve daha sonra üretilecek olan jeneratörün kayıtlarını da alacak olan bir SCADA programı geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarıyla deney sonuçları karşılaştırılmış ve akım, gerilim ve güç değerleri için ortalama hata yüzdeleri, sırasıyla; %5.57, %5.12 ve %3.72 olmuştur. TEJ atık ısı giriş miktarı  $Q_H = 197\text{W}$  ve sıcaklık farkı  $100^{\circ}\text{C}$  iken, çıkış gerilimi  $V_{max} = 2.2\text{V}$ , çıkış gücü  $P_{max} = 6,71\text{W}$  ve verim %3,4 elde edilmiştir.

Deney ve teorik analizin sonuçları, özellikle endüstriyel ve jeotermal alanlarda, düşük sıcaklıklar için atık ısı geri kazanımında, TEJ'in umut verici potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

Çoklu TEM'lerin seri ve paralel bağlanmasıyla 1kW'lık bir TEJ yapım aşamasındadır. Bunun performans testleri atık ısı enerjisinin olduğu endüstrilerde ve jeotermal alanlarda yapılarak sonuçları daha sonra duyurulacaktır.

#### SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

$\eta$	Verim
$\eta_{max}$	Maksimum verim
$V$	TEM elektrik gerilimi (V)
$V_{max}$	$\Delta T_{max}$ 'daki gerilim (V)
$I$	TEJ elektrik akımı (A)

$I_{max}$	$\Delta T_{max}$ 'daki elektrik akımı(A)
$I_{sc}$	TEJ kısa devre akımı (A)
$P$	TEJ güç üretimi (W)
$P_{max}$	Yük karşılaşmasında TEJ'den elde edilen maksimum güç (W)
$Q_H$	TEJ'in sıcak tarafından transfer edilen ısı gücü (W)
$R$	TEJ'in toplam elektrik direnci ( $\Omega$ )
$R_L$	Yükün elektrik direnci ( $\Omega$ )
$T_C$	TEJ'in soğuk taraf sıcaklığı (K)
$T_H$	TEJ'in sıcak taraf ısı (K)
$\Delta T$	TEJ'in soğuk ve sıcak taraf arasındaki sıcaklık farkı (K)
$T_{ave}$	TEJ'in sıcak taraf ve soğuk taraf sıcaklık ortalaması (K)
$Z$	TEM kalite faktörü ( $\text{K}^{-1}$ )
$K$	TEM'ün toplam termal iletkenliği ( $\text{WK}^{-1}$ )
$m$	Yük ve iç direnç arasındaki oran ( $R_L = mR$ )
$m_{opt}$	Yük karşılaşmasında, yük ve iç direnç arasındaki oran

#### Yunan sembolleri (Greek Symbols)

$\kappa$	Yarıiletkenin termal iletkenliği ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$\alpha$	Yarıiletkenin Seebeck sabiti ( $\text{VK}^{-1}$ )

#### Alt simgeler (Subscripts)

$opt$	Optimum değer
$max$	Maximum değer
$min$	Minimum değer

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma 07/2011–16 nolu Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi tarafından desteklenmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Riffat, S.B. ve Ma, X., "Thermoelectrics: a Review of Present and Potential Applications", **Applied Thermal Engineering**, Cilt 23, No 8, 913–935, 2003.
2. Xi, H., Luo, L. ve Fraisse, G., "Development and Applications of Solar-based Thermoelectric Technologies", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cilt 11, No 5, 923–936, 2007.
3. Tsai, H.L. ve Lin, J.M., "Model Building and Simulation of Thermoelectric Module Using Matlab/Simulink", **Journal of Electronic Materials**, Cilt 39, No 9, 2105–2111, 2009.
4. Gou, X., Xiau, H. ve Yang, S., "Modeling, Experimental Study and Optimization on Low-temperature Wasteheat Thermoelectric Generator System", **Applied Energy**, Cilt 87, No 10, 3131–3136, 2010.
5. Ahıska, R. ve Dislitas, S., "Microcontroller Based Thermoelectric Generator Application", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 19, No 2,

- 135-141, 2006.
6. Ikoma, K., Munekiyo, M., Furuya, K., Kobayashi, M., Izumi, T. ve Shinohara, K., "Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles", **XVII. International Conference on Thermoelectrics**, Nagoya, 464-467, 24-28 Mayıs 1998.
  7. Dalola, S., Ferrari, M., Ferrari, V., Guizetti, M., Marioli, D. ve Taroni, A., "Characterization of Thermoelectric Modules Powering Autonomous Sensors", **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**, Cilt 58, No 1, 99-107, 2009.
  8. Khattab, N.M. ve El Shenawy E.T., "Optimal Operation of Thermoelectric Cooler Driven by Solar Thermoelectric Generator", **Energy Conversion and Management**, Cilt 47, No 4, 407-426, 2006.
  9. Lertsatitthanakorn, C., "Electrical Performance Analysis and Economic Evaluation of Combined Biomass Cook Stove Thermoelectric (BITE) Generator", **Bioresource Technology**, Cilt 98, No 8, 1670-1674, 2007.
  10. Chen, L., Cao, D., Huang, Y. ve Peng, F.Z., "Modeling and Power Conditioning for Thermoelectric Generation", **Power Electronics Specialists Conference**, Rhodes, 1098-1103, 15-19 Haziran 2008.
  11. Dziurdzia, P., Mirocha, A., "From Constant to Temperature Dependent parameters Based Electrothermal Models of TEG", **XIV. Mixed International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits Systems**, Lodz, 555-559, 25-27 Haziran 2009.
  12. Chen, M., Rosendahl, L.A., Condra, T.J. ve Pedersen, J.K., "Numerical Modeling of Thermoelectric Generators With Varying Material Properties in a Circuit Simulator", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Cilt 24, No 1, 112-124, 2009
  13. Ortiz-Rivera, E.I., Salazar-Llinas, A. ve Gonzalez-Llorente, J., "A Mathematical Model for Online Electrical Characterization of Thermoelectric Generators using the P-I Curves at Different Temperatures", **XXV. Annual IEEE on Applied Power Electronics Conference and Exposition**, 2226 - 2230, 21-25 Eylül 2010.
  14. Zhou, Y., Paul, S. ve Bhunia, S., "Harvesting Wasted Heat in a Microprocessor Using Thermoelectric Generators: Modeling, Analysis and Measurement", **Date'08 Design, Automation and Test in Europe**, 98-103, 10-14 Mart 2008.
  15. Xiao, H., Xiaolong, G. ve Chen, Y., "Simulation Analysis on Thermoelectric Generator System Performance", **VII. International Conference on System Simulation and Scientific Computing**, Beijing, 1183-1187, 10-12 Ekim 2008.
  16. Gaowei, L., Jiemin, Z. ve Xuezhong H., "Output Characteristics Analysis of Thermoelectric Generator Based on Accurate Numerical Model", **2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference**, 1-4, 28-31 Mart 2010.
  17. Ahıska, R. ve Dişlitaş, S., "Computer Controlled Test System for Measuring the Parameters of The Real Thermoelectric Module", **Energy Conversion and Management**, Cilt 52, No 1, 27-36, 2011.
  18. Ferrari, M., Ferrari, V., Guizetti, M., Marioli, D. ve Taroni, A., "Characterization of Thermoelectric Modules for Powering Autonomous Sensors", **IMTC 2007 Instrumentation and Measurement Technology Conference, Warsaw**, 1-6, 1-3 Mayıs 2007.
  19. Shen, B., Hendry, R., Cancheevaram, J., Watkins, C., Mantini, M. ve Venkatasubramanian, R., "DC-DC Converter Suitable for Thermoelectric Generator", **XXIV International Conference on Thermoelectrics**, 529-531, 19-23 Haziran 2005.
  20. Hsiao, Y.Y., Chang, W.C. ve Chen, S.L., "A Mathematic Model of Thermoelectric Module with Applications on Waste Heat Recovery from Automobile Engine", **Energy**, Cilt 35, No 3, 1447-1454, 2010.
  21. Yu, J. ve Zhao, H., "A Numerical Model for Thermoelectric Generator with the Parallel-plate Heat Exchanger", **Journal of Power Sources**, Cilt 172, No 1, 428-434, 2007.
  22. İnternet: National Communications System [http://www.ncs.gov/library/tech\\_bulletins/2004/tib\\_04-1.pdf](http://www.ncs.gov/library/tech_bulletins/2004/tib_04-1.pdf)
  23. İnternet: Institute of Thermoelectricity <http://ite.cv.ukrtel.net/altec/eng/main0.htm>