

**TERMOELEKTRİK JENERATÖRÜN ELEKTRİKSEL,  
TERMOELEKTRİKSEL VE ISIL PARAMETRELERİNİN  
İNCELENMESİ İÇİN BİLGİSAYARLI BİR VERİ EDİNİM VE TEST  
SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**Hayati MAMUR**

**DOKTORA TEZİ**

**ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**

**BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2013**

**ANKARA**

Hayati MAMUR tarafından hazırlanan TERMOELEKTRİK JENERATÖRÜN ELEKTRİKSEL, TERMOELEKTRİKSEL VE ISIL PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ İÇİN BİLGİSAYARLI BİR VERİ EDİNİM VE TEST SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ adlı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Raşit AHISKA

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Ömer Faruk BAY

Üye : Prof. Dr. Raşit AHISKA

Üye : Doç. Dr. Ramazan BAYINDIR

Üye : Yrd. Doç. Dr. İsmail ATACAK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Uğur FİDAN

Tarih : 15 / 04 / 2013

Bu tez, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

  
Hayati MAMUR

**TERMÖELEKTRİK JENERATÖRÜN ELEKTRİKSEL,  
TERMÖELEKTRİKSEL VE ISIL PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ  
İÇİN BİLGİSAYARLI BİR VERİ EDİNİM VE TEST SİSTEMİNİN  
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ  
(Doktora Tezi)**

**Hayati MAMUR**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ**

**Nisan 2013**

**ÖZET**

Bu tez çalışmasında, termoelektrik jeneratörün (TEJ) elektriksel, termoelektriksel ve ısı parametrelerinin incelenmesi için programlanabilir mantık denetleyiciyle (PLC) haberleşebilen yeni bir bilgisayarlı veri edinim ve test sistemi (TEG-PAS) gerçekleştirilmiştir. Matlab/Simulink benzetim programıyla termoelektrik modülün (TEM) TEJ olarak kullanılması için, matematiksel modelinin benzetimi yapılmış ve değişik sıcaklık farkları için benzetim sonuçları prototip TEJ modelinde TEG-PAS'dan alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Benzetim ve prototip uygulama sonuçlarının ışığı altında, TEG-PAS'ın üzerinde deneneceği ticari yeni bir portatif TEJ sistemi kurulmuştur. Bu TEJ'in tüm parametreleri TEG-PAS yardımıyla analiz edilmiştir. Ticari olarak üretilen bu TEJ ve bir ticari güneş paneli (PV) ile elde edilen enerji miktarına göre, kapladıkları alanlar açısından karşılaştırılmış, TEJ aynı güç üretimine karşılık PV'den dokuz kat daha az yer kaplamıştır.

**Bilim Kodu** : 702.3.020  
**Anahtar Kelimeler** : yenilenebilir enerji, termoelektrik modül, termoelektrik jeneratör, bilgisayarlı kontrol, veri edinimi  
**Sayfa Adedi** : 126  
**Tez Yöneticisi** : Prof. Dr. Raşit AHISKA

**A DATA ACQUISITION AND TEST SYSTEM FOR INVESTIGATION OF  
ELECTRICAL, THERMOELECTRIC AND HEAT PARAMETERS OF  
THERMOELECTRIC GENERATOR**

**(Ph. D. Thesis)**

**Hayati MAMUR**

**GAZİ UNIVERSITY  
INSTITUTE OF INFORMATICS**

**April 2013**

**ABSTRACT**

**In this thesis, a new computerized data acquisition and test system (TEG–PAS) communicating with programmable logic controller (PLC) for investigation of electrical, thermoelectric and heat parameters of thermoelectric generator (TEG) has been carried out. To employ the thermoelectric module (TEM) as TEG by Matlab/Simulink simulation program, the simulation of TEG mathematical model has been performed. These results have been compared to the prototype TEG results obtained from the TEG–PAS for different temperatures ranges. According to the results of simulation and prototyping, a new commercial portative TEG trying on the TEG–PAS has been established. All parameters of the TEG have been analysed by the TEG–PAS. Also, the new commercial TEG has been compared to a commercial solar panel (PV) in terms of the energy production and the occupied area and the TEG has occupied nine times less space than PV.**

**Science Code : 702.3.020**  
**Key Words : renewable energy, thermoelectric module,  
thermoelectric generator, computerized control, data  
acquisition**  
**Pages : 126**  
**Thesis Manager : Prof. Dr. Rasit AHISKA**

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bilimsel katkısı, yol gösterici ve sürekli teşvik edici sözleri ve uygulamalarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Prof. Dr. Raşit AHISKA hocama, yine yapıcı ve özendirici desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen tez izlememde değerli katkılarıyla yer alan kıymetli Doç. Dr. Ramazan BAYINDIR ve Yrd. Doç. Dr. İsmail ATACAK hocalarıma teşekkürlerimi ve saygılarımı bir borç bilirim.

Yine her zaman gösterdikleri sabırdan, manevi desteklerinden dolayı eşim Ayşe, oğullarım Burak Baki ve Mehmet Emin'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın 00769-STZ.2011-1/ "Bilgisayar Kontrollü Termoelektrik Jeneratörün Üretimi ve Uygulaması" proje numarası/ismi ile SANTEZ kapsamında desteklenmiştir. Yine projenin diğer bölümlerinin gerçekleştirilmesi için Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 07/2011-16/"Termoelektrik Jeneratör" nolu/ismimli BAP ve 07/2011-71/"Bilgisayar Kontrollü Termoelektrik Jeneratörün Üretimi için Elektronik Donanımın ve Test Sisteminin Geliştirilmesi ve Uygulaması" nolu/ismimli BAP-TEZ ile desteklenmiştir. T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na ve Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması sonucunda elde edilen ürünlerin üretimleri için destek sağlayan Ankara Sanayi Odası I. Organize Sanayi Bölgesi Yönetim Kurulu başkanı Nurettin ÖZDEBİR ve yönetim kurulu üyelerine değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xv
HARİTALARIN LİSTESİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ .....	1
2. TERMOELEKTRİK .....	8
2.1. Elektrik, Termoelektrik Etkiler ve Termoelektrik Elemanlar .....	8
2.1.1. Joule etkisi.....	8
2.1.2. Termoelektrik etkiler.....	8
2.2. Termoelement ve Termoelektrik Modül .....	11
2.2.1. Termoelektrik yarıiletkenler ve elde edilme yöntemleri .....	11
2.2.2. Termoelement.....	13
2.2.3. Termoelektrik modül.....	15
2.2.4. Termokupl ve termoelementler arasındaki farklar .....	17
2.2.5. Termoelektrik modülün avantajları ve uygulama alanları .....	18
2.3. Termoelektrik Modülün Soğutucu Olarak Kullanılması.....	19
2.4. Termoelektrik Modülün Jeneratör Olarak Kullanılması .....	20

**Sayfa**

2.4.1. Termoelektrik jeneratör verimi .....	20
2.4.2. Termoelektrik jeneratör çıkış karakteristiği .....	22
2.4.3. Termoelektrik jeneratör tipleri .....	23
3. TERMOELEKTRİK MODÜLÜN JENERATÖR OLARAK MATEMATİKSEL MODELLEMESİ VE DENEYSEL ÇALIŞMASI .....	25
3.1. Matlab Programı .....	25
3.2. Simulink Benzetim Programı .....	26
3.3. Termoelektrik Jeneratör Modelleme .....	28
3.4. Metotlar .....	29
3.4.1. Termoelektrik jeneratör denklemleri.....	29
3.4.2. Termoelektrik jeneratör Simulink benzetimi .....	31
3.5. Prototip Termoelektrik Jeneratör Deneysel Kurulumu .....	35
3.5.1. Termoelektrik jeneratör prototip deneysel kurulumu.....	35
3.5.2. Termoelektrik jeneratör prototip performans testi .....	38
3.6. Termoelektrik Matlab/Simulink benzetimi ve prototip performans testinin değerlendirilmesi .....	41
4. SCADA'LI TEG-PAS SİSTEMİ .....	43
4.1. SCADA Sistemleri .....	43
4.1.1. SCADA'nın yapısı .....	44
4.2. Programlanabilir Lojik Denetleyici .....	46
4.3. Termoelektrik Jeneratör Veri Edinim Sistemleri .....	47
4.4. TEG-PAS Sistemi .....	50
4.4.1. TEG-PAS sisteminin kurulumu .....	50
4.4.2. Programlanabilir lojik denetleyici programı .....	53



**Sayfa**

4.4.3. SCADA programı.....	57
5. DÜŞÜK JEOTERMAL SICAKLIKLAR İÇİN YENİ TİCARİ PORTATİF TERMOELEKTRİK JENERATÖR TASARIMI VE UYGULAMASI.....	59
5.1. Jeotermal Enerji.....	59
5.2. Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi.....	61
5.3. Termoelektrik Jeneratör Çalışmaları .....	65
5.4. Düşük Sıcaklıklı Jeotermal Alanlar İçin Yeni Bir Ticari Portatif Termoelektrik Jeneratör Tasarımı ve Uygulaması .....	67
5.4.1. Termoelektrik jeneratör verim hesaplama denklemleri .....	67
5.4.2. Sıcak/soğuk su sirkülatörü .....	68
5.4.3. Yeni ticari portatif termoelektrik jeneratörün kurulumu .....	71
5.5. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma .....	73
6. TERMOELEKTRİK JENERATÖR SİSTEMLERİ VE FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN ENERJİ ÜRETİMİNDE KAPLADIKLARI ALAN AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI .....	88
6.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları .....	88
6.2. Fotovoltaik Sistemler ve Termoelektrik Jeneratörlerin Karakteristikleri.....	92
6.3. Deneysel Kurulum.....	93
6.3.1. Deneysel fotovoltaik panel kurulumu .....	93
6.3.2. Deneysel termoelektrik jeneratör kurulumu.....	94
6.4. Deneysel Sonuçlar ve Değerlendirme .....	95
7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	98
KAYNAKLAR .....	101
EKLER.....	111
EK-1. Akım izleme modülü katalog bilgileri .....	112
EK-2. Gerilim izleme modülü katalog bilgileri.....	113

	<b>Sayfa</b>
EK-3. PLC katalog bilgileri.....	115
EK-4. Veri edinim sistemi PLC programı.....	118
EK-5. Debimetre katalog bilgileri .....	123
ÖZGEÇMİŞ .....	124

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1. TEG–PAS sisteminin diğer kullanılan sistemlerle karşılaştırılması.....	49
Çizelge 4.2. TEG–PAS’ın genel karakteristik özellikleri .....	51
Çizelge 4.3. TEG–PAS ile ölçülen parametreler .....	52
Çizelge 5.1. Jeotermal enerjinin, kaynağın sıcaklığına göre kullanımı .....	61
Çizelge 6.1. Yenilenebilir enerji kaynakları .....	88
Çizelge 6.2. PV panelden değişik yükte ve sıcaklıklarda alınan veriler. ....	96
Çizelge 6.3. $\Delta T = 66,8$ °C değerinde TEJ verileri .....	96

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Seebeck etkiyi açıklayan TE devre .....	9
Şekil 2.2. Peltier etkiyi açıklayan TE devre .....	10
Şekil 2.3. Thomson etkiyi açıklayan TE devre .....	11
Şekil 2.4. Termoelementin temel yapısı.....	14
Şekil 2.5. Termoelementin soğuyan levhasında akıma bağlı ısı değişimleri .....	15
Şekil 2.6. TEM'ün yapısı [51] .....	16
Şekil 2.7. Çeşitli yapı ve özelliklerde TE modüller [40].....	16
Şekil 2.8. T-tip termokupl .....	17
Şekil 2.9. TES modda bir TEM.....	19
Şekil 2.10. TEJ modda bir TEM .....	20
Şekil 2.11. TEJ eşdeğer elektrik devresi .....	22
Şekil 3.1. TEJ Matlab/Simulink benzetimi .....	33
Şekil 3.2. TEJ Matlab/Simulink bloğu.....	34
Şekil 3.3. TEJ V-I-P karakteristikleri .....	34
Şekil 3.4. TEJ sistem deney düzeneği kesit görünümü.....	37
Şekil 3.5. Deneysel prototip TEJ V-I-P karakteristikleri .....	39
Şekil 3.6. Benzetim ve deney V-I eğrilerinin karşılaştırılması .....	40
Şekil 3.7. Benzetim ve deney P eğrilerinin karşılaştırılması .....	40
Şekil 3.8. Benzetim ve deney V-I-P eğrilerinin karşılaştırılması.....	41
Şekil 4.1. TEG-PAS blok diyagramı .....	50
Şekil 4.2. PLC programı akış diyagramı.....	55

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.1. Soğuk su sistemi çalıştırıldığında maksimum soğutma ve sıcak su sisteminin etkilenmesi .....	70
Şekil 5.2. Sıcak su sistemi çalıştırıldığında maksimum ısıtma ve soğuk su sisteminin etkilenmesi .....	70
Şekil 5.3. Soğuk ve sıcak su sistemleri çalıştırıldığında maksimum soğutma ısıtma .....	70
Şekil 5.4. 100 W portatif yeni TEJ sistemi yapısı.....	72
Şekil 5.5. Sıcak taraf akış debisi 3 lt/dk'da tutulup, soğuk taraf akış debisi arttırıldığında $\Delta T$ ve güçteki değişim.....	74
Şekil 5.6. TEG'in sıcak taraf sıcaklığına bağlı olarak iç direncindeki değişim.....	75
Şekil 5.7. 100 W portatif TEJ'in, TEJ yük direnci sabit kalmak koşuluyla, TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkına bağlı olarak elde edilen deneysel gerilim, akım ve güç değişim eğrileri.....	76
Şekil 5.8. 100 W portatif TEJ'in yük değişimine göre çıkışından elde edilen gerilim, akım ve güç eğrileri.....	77
Şekil 5.9. Sıcak su akışı oranının bir fonksiyonu olarak TEJ çevrim verimliliği .....	78
Şekil 5.10. Sıcak taraf sıcaklığının bir fonksiyonu olarak TEJ çevrim verimliliği....	79
Şekil 5.11. $R_L = 5 \Omega$ 'da sabit tutulduğunda $\Delta T$ 'ye bağlı I-V-P eğrileri .....	79
Şekil 5.12. $R_L = 10 \Omega$ 'da sabit tutulduğunda $\Delta T$ 'ye bağlı I-V-P eğrileri .....	80
Şekil 5.13. $R_L = 25 \Omega$ 'da sabit tutulduğunda $\Delta T$ 'ye bağlı I-V-P eğrileri .....	80
Şekil 5.14. TEJ'in sıcak yüzeyine bağlı güç çıkışı.....	81
Şekil 5.15. $d_H = 1,7$ lt/dk'da sabit tutulup $d_C$ değiştirildiğinde sıcaklık değişimleri.....	82
Şekil 5.16. $d_H = 2,1$ lt/dk'da sabit tutulup $d_C$ değiştirildiğinde sıcaklık değişimleri.....	82
Şekil 5.17. $d_H = 3,0$ lt/dk'da sabit tutulup $d_C$ değiştirildiğinde sıcaklık değişimleri.....	83

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.18. $d_C = 3,3$ lt/dk'da sabit tutulup $d_H$ değiştirildiğinde sıcaklık değişimleri.....	83
Şekil 5.19. $d_C = 6,5$ lt/dk'da sabit tutulup $d_H$ değiştirildiğinde sıcaklık değişimleri.....	84
Şekil 5.20. $d_C = 12,5$ lt/dk'da sabit tutulup $d_H$ değiştirildiğinde sıcaklık değişimleri.....	84
Şekil 5.21. $d_H = 1.7$ lt/dk ve $R_L = 15 \Omega$ 'da sabit tutulduğunda, $d_C$ 'ye bağlı olarak deneysel I-V-P eğrileri.....	85
Şekil 5.22. $d_H = 2.1$ lt/dk ve $R_L = 15 \Omega$ 'da sabit tutulduğunda, $d_C$ 'ye bağlı olarak deneysel I-V-P eğrileri.....	85
Şekil 5.23. $d_H = 3.0$ lt/dk ve $R_L = 15 \Omega$ 'da sabit tutulduğunda, $d_C$ 'ye bağlı olarak deneysel I-V-P eğrileri.....	86
Şekil 5.24. Sıcak taraf akış debisi 3 lt/dk'da tutulup, soğuk taraf akış debisi arttırıldığında $\Delta T$ ve güçteki değişim.....	86
Şekil 5.25. Sıcak taraf akış debisi 3 lt/dk'da tutulup, soğuk taraf akış debisi arttırıldığında $\Delta T$ ve güçteki değişim.....	87
Şekil 6.1. (a) PV hücrelerin elektriksel modeli, (b) aydınlanmaya karşı V-I eğrileri.....	93

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.1. TEJ kurulumu .....	36
Resim 3.2. Prototip TEJ deneysel kurulumu.....	38
Resim 4.1. TEG-PAS .....	51
Resim 4.2. SCADA program sayfası.....	58
Resim 5.1. Sıcak/soğuk su sirkülatörü .....	68
Resim 5.2. 100 W ticari portatif yeni TEJ sistemi deneysel kurulumu.....	73
Resim 6.1. PV sistem kurulumu.....	94
Resim 6.2. Deneysel ticari portatif TEJ kurulumu.....	95

**HARİTALARIN LİSTESİ**

<b>Harita</b>	<b>Sayfa</b>
Harita 5.1. Türkiye jeotermal kaynaklar dağılımı ve uygulama haritası.....	63



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamalar ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
<b>COP</b>	Performans katsayısı
$d_H$	Sıcak su debisi
$d_L$	Soğuk su debisi
<b>I</b>	TEM akımı
$I_L$	Yük akımı
$I_{\max}$	TEM maksimum akımı
$I_{SC}$	TEJ kısa devre akımı
<b>K</b>	Kelvin derece
<b>m</b>	Yük ve iç direnç arasındaki oran
$m_{\text{opt}}$	Yük karşılaşmasında, yük ve iç direnç arasındaki oran
<b>N</b>	TEM’de bulunan TE sayısı
<b>P</b>	TEM güç üretimi
$P_A$	Alınan güç
$P_L$	Yükte harcanan güç
$P_{L\max}$	Yükte harcanan maksimum güç
$P_V$	Verilen güç
$Q_C$	TEM’in soğuk yüzeyinden verilen ısı güç
$Q_{C\max}$	Soğurulan maksimum ısı yük
$Q_H$	TEM’in sıcak yüzeyinden verilen ısı güç
$Q_j$	Joule ısı gücü
$Q_p$	Peltier ısı gücü
$Q_T$	Thomson ısı
$R_{in}$	TEJ direnci

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$R_L$	Yük direnci
$T$	Mutlak sıcaklık
$T_{amb}$	Ortam sıcaklığı
$T_{avg}$	TEJ yüzeyler arası ortalama sıcaklığı
$T_C$	TEJ soğuk yüzey sıcaklığı
$T_H$	TEJ sıcak yüzey sıcaklığı
$V$	TEJ gerilimi
$V_L$	TEJ yük gerilimi
$V_{max}$	TEJ maksimum gerilimi
$V_{OC}$	TEJ açık devre gerilimi
$\Delta T$	TEJ yüzeyler arası sıcaklık farkı
$\Delta T_{max}$	Maksimum sıcaklık farkı
$\Delta V$	Potansiyel fark
$Z$	TEM kalite katsayısı
$\alpha$	Yarıiletken Seebeck katsayısı
$\rho$	Yarıiletkenin özdirenci
$\pi$	Yarıiletken Peltier katsayısı
$\sigma$	Stefan Boltzmann sabiti
$\eta$	Verim
$\eta_{max}$	Maksimum verim
$\kappa$	Yarıiletkenin termal iletkenliği

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>CPU</b>	Mikroişlemci
<b>HSC</b>	Yüksek Hızlı Sayıcı
<b>IO</b>	Giriş–Çıkış
<b>LAN</b>	Yerel Alan Ağı
<b>LED</b>	Işık Yayan Diyot
<b>MPPT</b>	Maksimum Güç Noktası İzleyici

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>MTU</b>	Ana Terminal Ünitesi
<b>OP</b>	Operatör Panel
<b>PLC</b>	Programlanabilir Mantık Denetleyici
<b>PV</b>	Fotovoltaik
<b>PPI</b>	Noktadan Noktaya Arayüz
<b>RTU</b>	Uzak Terminal Ünitesi
<b>SCADA</b>	Denetleyici Gözetim ve Veri Edinim Sistemi
<b>TE</b>	Termoelektrik
<b>TEJ</b>	Termoelektrik Jeneratör
<b>TEJ-VES</b>	Termoelektrik Jeneratör Veri Edinim Sistemi
<b>TEM</b>	Termoelektrik Modül
<b>TES</b>	Termoelektrik Soğutucu
<b>QW</b>	Quantum Wells
<b>WAN</b>	Geniş Alan Ağı

## 1. GİRİŞ

Yarıiletken teknolojileri birçok teknolojinin temelini oluşturmaktadır ve bu konuda dünyada geniş çapta çalışmalar yapılmaktadır. Çevre ve enerji sorunlarının arttığı günümüzde termoelektrik (TE) yarıiletkenler ve bunlara bağlı teknolojilerin önemi artmaktadır. Bu açıdan sessiz, güvenilir, basit yapılı ve uzun ömürlü olmalarının yanı sıra DC gerilim ile çalışmaları, sıcaklık kontrollerinin kolaylıkla yapılabilmesi, bakım gerektirmemeleri gibi birçok avantaja sahip çevre dostu termoelektrik modüllere (TEM) olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır [1]. Hem soğutma–ısıtma hem de elektrik enerjisi üretimi amaçlı olarak kullanılabilen TEM'lerin uygulama alanları başta askeri, uzay, tıp, bilimsel çalışmalar olmak üzere hızla yaygınlaşmakta ve TE ürünlere yönelik piyasanın ekonomik hacmi büyümektedir. Bu piyasanın büyümesi TEM'lerin tasarlanması ve doğru seçilmesine bağlıdır. TE sistemlerin temelinde termoelementlerden oluşan TEM'ler yer almaktadır. TEM'ler iki seramik tabaka arasında elektriksel olarak birbirine seri, termal olarak birbirine paralel olacak şekilde bağlantılı n– ve p–tip yarıiletkenlerinden oluşmaktadır [2]. TE sistemlerin ısı transferlerinin yüksek, güç tüketimlerinin düşük ve ekonomik olmaları istenmektedir. TE sistemlerin seçimi ve tasarımı, TEM'lerin katalog verilerindeki performans eğrileri dikkate alınarak yapılmaktadır. TEM'lerin performansı, termoelektrik soğutucu (TES) modunda çalıştırılan TEM için, uygulanan DC akım giriş parametresine bağlı olarak yüzeyler arasında elde edilebilecek maksimum sıcaklık farkı ( $\Delta T_{max}$ ) veya TEM'in soğuk yüzeyinden soğurulan maksimum ısı yükü ( $Q_C$  – Soğutma Gücü) olarak tanımlanabilir [3]. Aynı zamanda TEM'ün performansı, onun ısı pompalama kapasitesi olarak da ifade edilebilir. Termoelektrik jeneratör (TEJ) modunda çalıştırılan TEM için ise, uygulanan TEJ yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) giriş parametresine bağlı çıkış uçlarından elde edilebilecek maksimum güç ( $P_{max}$ ) olarak tanımlanabilir [4].

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte kullanılan teknolojik cihazların çoğu elektrik enerjisiyle çalıştırılmakta ve elektrik enerjisine olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde kullanılan petrol, kömür gibi fosil yakıtların sınırlı oluşu ve çevreye sera

gazı yaymaları, aynı zamanda küresel ısınmanın hızlanmasına neden olmaları, insanların yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve enerjinin daha verimli kullanılması çabalarını arttırmaktadır. Dünyadaki insan nüfusunun arttığı dikkate alındığında, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payının artırılması ve enerjinin verimli kullanılması kaçınılmazdır. Fosil yakıtların çevreye yaydıkları sera gazı etkisi de göz önünde bulundurulduğunda, yenilenebilir ve çevre dostu olan enerji kaynaklarının önemi daha da belirginleşmektedir [5]. Günümüzde rüzgâr, güneş, biyo kütle, hidrolik, jeotermal ve hidrojen gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla enerji elde edim çalışmaları hızlı bir şekilde devam etmektedir [6].

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan, jeotermal enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesinde TEJ'ler kullanılır [3]. TEJ'ler giriş kaynağı olarak, atık ısı kullandığı için elektrik üretiminde tamamen çevre dostudur ve enerjinin verimli kullanılmasına olanak sağlarlar [7]. TEJ'lerden elektrik enerjisi üretimi Seebeck etkiye dayanır. TEJ yüzeyleri arasında ne kadar yüksek sıcaklık farkı olursa o oranda elektrik enerjisi üretimi artar. Bu sıcaklık farkı kullanılan kaynağa göre değişkenlik gösterdiğinden sabit gerilim elde edebilmek amacıyla gerilim düzenlemesine ihtiyaç duyarlar [8]. TEJ'lerin dezavantajları arasında; diğer yenilenebilir enerji teknolojileriyle karşılaştırıldığında, TEJ'lerde kullanılan yarıiletkenlerin kalite faktörünün (Z figure-of-merit) küçüklüğü ve buna bağlı olan çevrim verimliliğinin %10'dan düşük düzeyde olmasıdır [9]. Son yıllara kadar, TE uygulamalar TEM'lerin üretiminde kullanılan yarı iletkenlerin ZT değerlerinin 1'den küçük olmasından dolayı sınırlı iken, 1990'ların başlarından itibaren, ZT'lerinin 1'den 2 değerlerine yaklaşmasıyla ilgili raporlar yayınlanmıştır. Buna bağlı olarak, TEM uygulamaları hızla artmış ve artacağı da anlaşılmıştır [10]. Fakat bu dezavantajının yanında, TE enerji üretim sistemlerinde kullanılan ısı kaynağının atık, jeotermal ve güneş enerjisi ısıları gibi, yenilenebilir olduğu düşünüldüğünde bu çevrim sistemlerindeki verimliliğinin göz ardı edilebileceği görülmektedir [11]. TEJ veriminin düşük olmasına karşın, enerji giriş kaynağının yenilenebilir olması bu sistemlerin ekonomikliğini arttırmaktadır ve uygulamalar bunu göstermiştir. Son yıllarda, TEJ'lerle elektrik enerjisi üretimi üzerine yapılan çalışmalar endüstriyel fabrikalar, jeotermal alanlar, otomobil

motorları, tümleşik devreler, bilgisayarlar ve insan vücudundan atılan atık ısıların geri kazanımı üzerine odaklanmıştır [1]. Dünyada enerji ihtiyacının devamlı artış gösterdiği, hali hazırda kullanılan enerji kaynakları nedeniyle çevre kaygıları devam ettiği müddetçe ve enerjinin verimli kullanımı dikkate alındığı sürece yenilenebilir enerji kaynaklarından olan TEJ'lere ihtiyaç sürekli olacak ve sıcak araştırma konuları arasında yer almayı sürdürecektir.

TEM üretim teknolojisinde ve güç elektroniğindeki değişimler nedeniyle TEM'lerin matematiksel modellenmeleri ve en yüksek verimle çalıştırma çabaları devam etmektedir [12–16]. TEJ modellemeleri ısı iletimi ve elektrotermal özelliklerin incelenmesi üzerinedir. Bununla birlikte, TEJ'lerin elektronik devrelerin benzetim programlarında kullanabilmesi amacıyla da modellemeleri yapılmıştır. Atık ısıdan TEJ yardımıyla elektrik enerjisi elde edilmesinde TEJ'den en iyi verimin alınması için TEJ iç direnciyle ( $R_{in}$ ) yük direnci ( $R_L$ ) birbirine eşit olmalıdır. TEJ'ler farklı sıcaklık aralıklarında kullanıldıkları için buna bağlı olarak parametreleri sürekli olarak değişim göstermektedir [17–21].

TEJ'ler jeotermal enerji ile birlikte kullanıldıklarında, bu enerji kaynağının temelinde ıslığı kullanır. Isı sıcaklık farkı ya da basınç farkıyla iletilen bir enerji çeşidi olup, Termodinamiğin II. Kanununa göre normal şartlarda yüksek sıcaklıktaki bir ortamdan daha düşük sıcaklıktaki bir ortama kendiliğinden iletilmektedir. Ancak yine Termodinamiğin II. Kanununa göre sisteme dışarıdan uygulanan bir enerji ile ısının düşük sıcaklıktaki bir ortamdan alınarak daha yüksek sıcaklıktaki bir ortama verilmesi de mümkün olmaktadır. Gerçekleştirilen bu işleme soğutma, bu prensibe göre çalışan cihazlara da soğutucu veya başka bir ifade ile ısı pompası adı verilmektedir. Isı geçişi katı, sıvı ve gazlarda maddenin molekülleri arasındaki etkileşim sonucu iletim (kondüksiyon) yoluyla; katı bir yüzey ile onun temas ettiği akışkan arasında taşınım (konveksiyon) yoluyla ve ayrıca maddenin elektron düzeninde olan değişmeler sonucunda yayılan elektromanyetik dalgalar veya fotonlar aracılığıyla ışıınım (radyasyon) yoluyla olmak üzere üç türlü gerçekleşebilmektedir. Isının iletim yoluyla geçtiği ortamlardaki sıcaklıkların zamanla sabit kalma hali 'Sabit Rejim', zamanla değişme hali ise 'Değişken Rejim' olarak adlandırılmaktadır.

Soğuk, bir nesnenin sıcaklığını, bilinen başka bir sıcaklıkla karşılaştırarak göreceli olarak yapılan bir tanımdır. Sıcaklık ise, atomların sahip oldukları kinetik enerjilerinin bir ifadesi olup, atom hareketleri hızlandıkça sıcaklık da artmaktadır [22–23].

Gelişen teknoloji ile birlikte bilgisayar sistemleri daha güçlü ve daha hızlı bir yapıya kavuşmuştur. Bununla birlikte bilgisayar arabirim bağlantıları da daha hızlı, hassas ve güvenilir bir hale gelmiştir. Ayrıca yazılım geliştirme araçlarının sunduğu görsel ve grafik tabanlı programlama yetenekleri sayesinde de daha kullanışlı, göze hoş gelen kullanıcı dostu arayüzler oluşturulabilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı günümüzde sistemlerin izlenmesi ve kontrol edilmesi amacıyla Bilgisayarlı Veri Toplama ve Kontrol Sistemlerinin (Supervisory Control and Data Acquisition System – SCADA) önemi artmakta ve kullanımları hızla yaygınlaşmaktadır [24]. Bilgisayar tabanlı olarak ölçme, kontrol, analiz ve depolama işlemlerinin geliştirilen yazılımlar sayesinde istenilen özellik ve çeşitlilikte yapılması ve bu sayede değerlendirme sürecinin iyileştirilmesi mümkün olmaktadır. TE sistemlere yönelik yapılan araştırmalarda da çok yönlü, pratik kullanıma dayalı ve kullanıcı dostu gelişmiş bilgisayar yazılımlarına ihtiyaç duyulmakta ve buna paralel olarak da kullanımları hızla yaygınlaşmaktadır [25].

TEJ'lerin elektrik enerjisi kullanımında parametrelerinin ölçülerek performanslarının hesaplanması için değişik ölçüm cihazları kullanılmıştır. Genellikle, anlık değerlerinin ölçülmesinde el tipi ölçü cihazları tercih edilmiştir. TEJ deneylerinde elde edilen verilerin bilgisayar ortamına aktarılması için ise veri edinim kartları kullanılmıştır. Elde edilen verilerin bilgisayar ortamında kayıt altına alınması için ayrı bir bilgisayar programı yazılmış veya hazır programlardan faydalanılmıştır [16, 26–34].

Veri toplama işlemi, fiziksel büyüklüklerin bir bilgisayar tarafından işlenmesi, analiz edilmesi ve depolanması amacıyla; ölçülerek sayısal formatta elektrik sinyallerine dönüştürülmesi sürecidir. Kontrol ise, sistem donanımından gelen sayısal kontrol sinyallerinin, hareketlendirici cihaz (actuator) ya da röle gibi kontrol cihazları

tarafından kullanılmak üzere, bir sinyal biçimine toplandığı süreçtir. Veri elde etme, izleme, kontrol, analiz ve depolama fonksiyonlarına sahip SCADA'ların temel elemanları arasında; algılayıcılar (sensör) ve güç dönüştürücüler (transducer), sinyal şartlandırıcılar, kontrol cihazı donanımı, bilgisayar, işletim sistemi ve uygulama yazılımı yer almaktadır. Kontrol cihazları hem dâhili olarak bilgisayarın genişleme yuvalarına takılabilen kartlar şeklinde hem de harici olarak bilgisayarın USB (Evrensel Seri Veriyolu), seri, paralel vb. bağlantı noktalarına bağlanacak şekilde modüler yapıda tasarlanabilmektedirler [35–39].

SCADA için büyük öneme sahip yazılım, temelde veri edinim ve kontrol cihazı ile uygulama yazılımından oluşmaktadır. Sürücü yazılımı kontrol cihazı donanımına özgü olup, donanımın işletim sistemi tarafından anlaşılır hale gelmesine yönelik komut kümesinden oluşmaktadır. Bu sayede alt düzey programlama bilgisine gerek kalmadan, uygulama yazılımlarının geliştirilmesi daha kolay bir hale gelmektedir. Veri edinim ve kontrol cihazı yazılımları genellikle ilgili üretici tarafından hazırlanarak kullanıma sunulurken, uygulama yazılımları ise temelde kullanıcı arayüzü niteliğindedir. Uygulama yazılımları hem temel işlevleri yerine getirecek şekilde üretici tarafından, hem de isteğe özel olarak tasarımcı tarafından geliştirilebilmektedir [40].

Bu çalışmada; TEJ'in elektriksel, termoelektriksel ve ısı parametrelerinin incelenmesi için programlanabilir mantık denetleyiciyle (PLC) haberleşebilen yeni bir bilgisayarlı veri edinim ve test sistemi (TEG–PAS) gerçekleştirilmiştir. Matlab/Simulink benzetim programı yardımıyla TEM'in TEJ olarak kullanılması için, TEJ'in matematiksel modelinin benzetimi Simulink programıyla yapılmış ve TEJ'in sıcak–soğuk yüzeyleri arasındaki değişik sıcaklık farkları için Simulink benzetim sonuçları prototip olarak kurulan TEJ modelinde TEG–PAS'dan yardımıyla alınan ve hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. TEJ benzetim ve prototip uygulama sonuçlarına bağlı olarak, TEG–PAS'ın üzerinde deneneceği ve düşük sıcaklıklı jeotermal alanlarda kullanılabilecek TEJ yüzeyler arası sıcaklık farkı 100 °C olduğunda yaklaşık 100 W güç verebilen ticari yeni bir portatif TEJ sistemi kurulmuştur. Bu TEJ'in tüm parametreleri TEG–PAS yardımıyla ölçülmüş ve



analizleri gerçekleştirilmiştir. Bilgisayarda yazılan SCADA programı sayesinde ticari olarak üretilen TEJ'e ait tüm parametreler kayıt altına alınmış ve ayrıca anlık olarak gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, bilgisayarın olmadığı ortamlarda anlık TEJ verilerinin gözlemlenebilmesi için, PLC'yle haberleşebilen bir operatör panelinin (OP) programı yazılmış ve kullanılmıştır. Ticari olarak üretilen ve üzerinde TEG–PAS'ın denendiği TEJ ve ticari bir güneş paneli (solar panel – photovoltaic – PV) elde edilen enerji miktarına göre kapladıkları alan açısından karşılaştırılmıştır. Ticari olarak üretilen yeni portatif TEJ testlerinde, TEJ'in yük direnci 15  $\Omega$ 'da sabit tutulup, sıcak suyun debisi 3,7 lt/dk ve soğuk suyun debisi 12,8 lt/dk'ya çıkarıldığında, TEJ yüzeyleri arasında 67 °C sıcaklık farkı elde edilmiştir. Bu durumda, TEJ'in çıkış gücü 41,6 W ve verimi maksimum %3,9 olarak ölçülmüştür. Ticari olarak üretilen bu TEJ ve bir ticari güneş paneli (PV) ile elde edilen enerji miktarına göre, kapladıkları alanlar açısından karşılaştırılmıştır [41–47].

Bu tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. Tezin ikinci bölümünde; TE olaylar, TE yarıiletkenler, TEM'ler, TEM'lerin farklı kullanım şekilleri, TEM'lerin TEJ olarak kullanılması, TEJ verimi, TEJ jeneratör çıkış karakteristikleri ve TEJ tipleri incelenmiştir. Tezin üçüncü bölümünde, TEM'in TEJ olarak modellenmesinin Matlab/Simulink benzetim çalışmaları ve elektrik, termoelektrik ve ısı parametrelerinin TEG–PAS yardımıyla elde edildiği bir prototip TEJ ile deneylerinin gerçekleştirilmesi ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur. Tezin dördüncü bölümünde, TEJ'lerin elektrik üretimindeki parametrelerinin incelenmesi için PLC'li TEG–PAS sisteminin kurulumu ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Diğer TEJ veri edinim sistemlerinden üstünlükleri ifade edilmiştir. Beşinci bölümde ise, geliştirilen TEG–PAS sisteminin üzerinde denenmesi için, TEJ'lerin ticari olarak kullanımını ifade eden düşük termal sıcaklıklar için yeni bir portatif TEJ tasarımı, uygulaması ve analizleri verilmiştir. Tezin altıncı bölümünde, TEJ'ler ile yine başka bir yenilenebilir enerji kaynağı olan PV sistemlerin karakteristikleri karşılaştırılmış ve tüm analizleri TEG–PAS ile gerçekleştirilen ticari portatif TEJ ile ticari bir PV panelin, ürettikleri güce göre her ikisinin kapladıkları alan açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Tezin sonuç bölümünde; tasarlanan TEG–PAS ve üzerinde TEG–PAS'ın

denendiği TEJ sisteminin genel bir değerlendirmesi yapılarak kullanılabilirliği, avantajları ve geliştirilebilirliği hakkında düşünceler sunulmuştur.

## 2. TERMOELEKTRİK

### 2.1. Elektrik, Termoelektrik Etkiler ve Termoelektrik Elemanlar

Uygulama açısından büyük öneme sahip olan maddenin elektriksel özelliklerini Joule ve TE etkiler karakterize etmektedir [48].

#### 2.1.1. Joule etkisi

James Prescott Joule'un isminin verildiği ve elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümünü ifade eden kanununa göre; bir iletkenin ısı, direnci ve içinden geçen akımın karesiyle orantılı olarak artar. Bir elektrik devresinde birim zamanda ortaya çıkan Joule ısı ( $Q_J$ ) miktarı Watt olarak;

$$Q_J = I^2 \cdot R \quad (2.1)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Burada  $I$  iletkenin geçen akım ve birimi Amper (A),  $R$  ise iletkenin direncidir birimi ise Ohm'dur ( $\Omega$ ) [40, 48].

#### 2.1.2. Termoelektrik etkiler

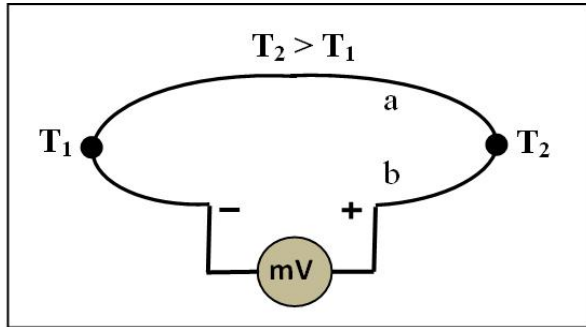
TE etki, ısı enerjisi ile elektrik enerjisinin birbirlerine doğrudan dönüşümü olarak tanımlanır. TE etki, İngiliz fizikçi James P. Joule'un tanımladığı geri dönüşümü olmayan elektrik-ısı dönüşümü ile tersine çevrilebilir Seebeck, Peltier ve Thomson etkilerini kapsamaktadır. Seebeck etki 1821 yılında Alman Fizikçi Thomas Johann Seebeck, Peltier etki 1834 yılında Jean Charles Athanese Peltier, Thomson etki ise 1856 yılında William Thomson (Lord Kelvin) tarafından keşfedilmiş ve adları bu olaylara verilmiştir. Peltier etki TE soğutucuların, Seebeck etki ise TE jeneratörlerin temelini oluşturmaktadır. Thomson etki ise düşük etkili olduğundan genellikle göz ardı edilmektedir. Isı ve elektriksel etkilerin bir arada bulunduğu ve etkileşim halinde olduğu devreye TE devre, TE prensibine göre çalışan sistemlere de TE sistem adı verilmektedir [40, 48].

### Seebeck etki

Alman fizikçi Thomas Johann Seebeck 1821 yılında, farklı metallere yapılmış iki iletkenin uçları birleştirilerek oluşturulan ve termokupl olarak adlandırılan kapalı bir TE devrede; iletkenlerin birleşim noktaları arasında oluşturulan sıcaklık farkıyla doğru orantılı bir gerilim meydana geldiğini bulmuştur. Seebeck etkinin anlatıldığı TE seri devre Şekil 2.1’de görülmektedir. Burada a ve b gibi farklı iletken kullanılarak oluşturulan seri devrede, iletkenlerin birleşim noktalarına birbirinden farklı  $T_1$  ve  $T_2$  sıcaklıkları uygulandığında, iletken uçlarında bir potansiyel farkı meydana gelmektedir.  $\Delta T$  sıcaklık farkıyla doğru orantılı olarak meydana gelen bu potansiyel fark ( $\Delta V$ );

$$\Delta V = \alpha \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada  $\alpha$ , Seebeck katsayısı (termoemk) olup birimi  $V / K$ ’dir. Seebeck etkinin, TE yarıiletkenlerde jeneratör olarak, metallere ise ısı ölçümü (termokupl) olarak kullanıldığı iki önemli ana uygulaması vardır [49].



Şekil 2.1. Seebeck etkiyi açıklayan TE devre

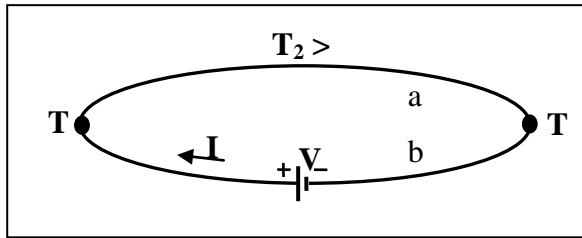
### Peltier etki

Fransız fizikçi Jean Charles Athanese Peltier 1834’te Seebeck etkinin tersi durumunda olan Peltier etkiyi keşfetmiştir. Peltier etkiyi açıklayan TE devre Şekil 2.2’de görülmektedir. Eğer termokupl içerisinde bir DC akım geçerse, Joule Isısı ile birlikte akım yönüne bağlı olarak temas noktalarının birinden ısı emilirken (soğutma)

diğer temas noktasından ısı açığa çıkmaktadır (ısıtma). Joule ısısından farklı olarak ortaya çıkan bu ısıya Peltier Isısı denir. Açığa çıkan ısı miktarı, uygulanan akım şiddetiyle doğru orantılıdır ve yönü akım yönünün değiştirilmesi ile değişir. Birim zamanda üretilen Peltier Isısı ( $Q_P$ ) Watt olarak Eş. 2.3 ile ifade edilir:

$$Q_P = \pi.R \quad (2.3)$$

Burada;  $\pi$  Peltier katsayısıdır [40].



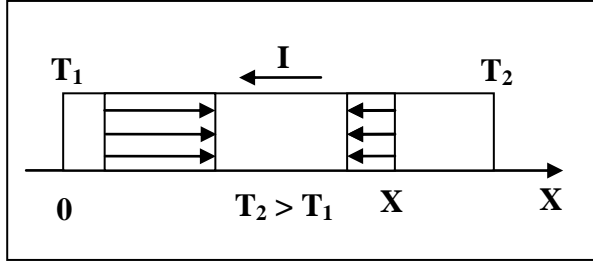
Şekil 2.2. Peltier etkiyi açıklayan TE devre

### Thomson etki

İskoç bilim adamı William Thomson (Lort Kelvin), 1856 yılında termoemk ( $\alpha$ ) ve Peltier katsayısı ( $\pi$ ) arasında,

$$\alpha = \frac{\pi}{T(^{\circ}\text{K})} \quad (2.4)$$

eşitliğini ifade etmiştir. Ayrıca kendi ismini taşıyan ve 1867'de Leru tarafından deneysel olarak kanıtlanan Thomson etkisinin hipotezini öne sürmüştür. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi, akım taşıyan bir iletkenin herhangi iki noktası arasında bir sıcaklık farkı varsa, akım yönüne göre iletkende Joule ısısına ek olarak Thomson ısısı ( $Q_T$ ) açığa çıkmaktadır.



Şekil 2.3. Thomson etkiyi açıklayan TE devre

Birim zamanda ortaya çıkan Thomson ısısı,

$$Q_T = I \cdot \alpha \cdot \Delta T = I \cdot \alpha_T \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.5)$$

şeklinde akım şiddeti ( $I$ ) ve sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) ile doğru orantılı olarak ifade edilir. İki farklı metalden oluşan bir devre için Thomson termoemk değerleri arasındaki ilişki ise;

$$\alpha_T = (\alpha_{Ta} - \alpha_{Tb}) \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (2.6)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada  $\alpha_T$  Thomson etkisi ile meydana gelen termoemk miktarıdır.  $\alpha_{Ta}$  ve  $\alpha_{Tb}$  ise farklı maddelerden oluşan devreyi ifade etmek için kullanılmaktadır. TE etkilerin olduğu devrelerde Thomson etkisini yok etmek amacıyla  $\alpha_T$  değerleri eşit olan malzemeler seçilmelidir [49].

## 2.2. Termoelement ve Termoelektrik Modül

### 2.2.1. Termoelektrik yarıiletkenler ve elde edilme yöntemleri

Yarıiletkenlerin elde edilmesi, özelliklerinin araştırılması, çeşitli cihaz ve sistemlere uyarlanarak sanayiye kazandırılmasına kadar uzanan birçok teknolojiyi içeren yarıiletken teknolojileri üzerinde dünyada geniş çapta araştırmalar yapılmaktadır [1, 40, 51].

Maddeler elektrik iletimine göre iletken, yarıiletken ve yalıtkan olmak üzere üçe ayrılırlar. Elektrik akımını oluşturan yük taşıyıcıları; elektrolitlerde iyonlar, metallerde elektronlar, yarıiletkenlerde ise elektron ve deliklerdir. n–tip yarıiletkenlerde negatif yük taşıyıcıları (elektronlar), p–tip yarıiletkenlerde ise pozitif yük taşıyıcıları (delikler) çoğunluktadır. Sahip oldukları serbest elektrik yükleri sayesinde elektrik akımını iyi ileten maddelere iletken, serbest elektrik yüklerine sahip olmayan ve bu nedenle elektrik akımını iletmeyen maddelere ise yalıtkan veya dielektrik adı verilir. Yarıiletkenler ise; iletkenlik özelliği iletken ve yalıtkan arasında bulunan maddelerdir [49–51].

İyi bir TE yarıiletkende aranan özellikler şu şekilde sıralanabilir [52]:

- Gereken gerilimi sağlamak için yüksek Seebeck katsayısına ( $\alpha$ ) sahip olmalıdır.
- İstenmeyen Joule ısısını ( $Joule, I^2R$ ) azaltmak için çok iyi elektriksel iletkenliğe ( $\sigma$ ) sahip olmalıdır.
- Isı kayıplarının azaltılması için düşük ısı iletkenliğe ( $k$ ) sahip olmalıdır.

Seebeck katsayısının değeri madde cinsine göre değişmektedir. Seebeck katsayısı metallerde  $50 \mu V/K$ 'den küçük, yarıiletkenlerde ise  $200 - 300 \mu V/K$  arasındadır. Seebeck katsayısı ( $\alpha$ ),  $100 \mu V/K$ 'den büyük yarıiletkenlere TE yarıiletken adı verilmektedir. TE özelliği yüksek yarıiletkenlere Bizmut (Bi), Antimon (Sb), Selenyum (Se) ve Telleryum (Te) örnek olarak gösterilebilir. Ayrıca  $Bi_2Te_3$ ,  $Bi_2Se_3$ ,  $Sb_2Te_3$  vb. bileşimler ile  $Bi_2Te_3+Bi_2Se_3$ ,  $Sb_2Te_3+Bi_2Te_3$  gibi alaşımların da TE özelliği oldukça yüksektir. Dünyada soğutucu ve jeneratörlerin üretiminde genellikle Seebeck katsayısı  $200-240 \mu V/K$  arasında değişen  $Bi_2Te_3+Bi_2Se_3$  ve  $Sb_2Te_3+Bi_2Te_3$  gibi alaşımlar kullanılmaktadırlar. Seebeck katsayısının işareti yarıiletkenlerin tipine göre değişmektedir. Elektron fazlalığı olan n–tip TE yarıiletken negatif Seebeck katsayılı iken, elektron eksikliği olan p–tip TE yarıiletken ise pozitif Seebeck katsayılıdır [49–51].

TE yarıiletkenlerin üretilmesine yönelik araştırmalardaki temel amaç, yüksek Z parametresine sahip alaşımların elde edilmesi olmuştur. Bu nedenle TE

yarıiletkenlerin elde edilmesine yönelik birçok yöntem geliştirilmiştir. Ancak bu işlem için genellikle Bölge Eritme ve Presleme Yöntemi kullanılmaktadır [53].

Bölge Eritme Yöntemi (Travelling Heater Method, THM) ile TE yarıiletken üretiminde; öncelikle n-tip yarıiletkenler için %80  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  + %20  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  bileşimi, p-tip yarıiletkenler için ise %74  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  + %26  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  bileşimi kum şeklinde kuvarz tüplerin içine konularak basınç  $1,3 \times 10^{-6}$  atm = 0,133 Pa'ya kadar basınç düşürülür ve tüplerin açık kalan uçları kaynak yapılarak kapatılır. Bu aşamadan sonra tüpler bölge eritme makinesine monte edilir ve elektrik rezistans ısıtıcıyla bölge bölge eritilmektedir. Bölge eritme makinesinde ısıtıcı çok düşük hızla yukarı aşağı hareket ederek, tüpteki tüm maddenin erimesi sağlanır. Bu yöntemde n-tip yarıiletkenlerin erime sıcaklığı 706 °C iken p-tip yarıiletkenlerin ise 711 °C'dir. Kuvarz tüplerin iç çapına göre elde edilen alaşımların kesitleri değişebilmekle birlikte, genelde kesiti 8 mm olan yarıiletkenler üretilmektedir [40, 49].

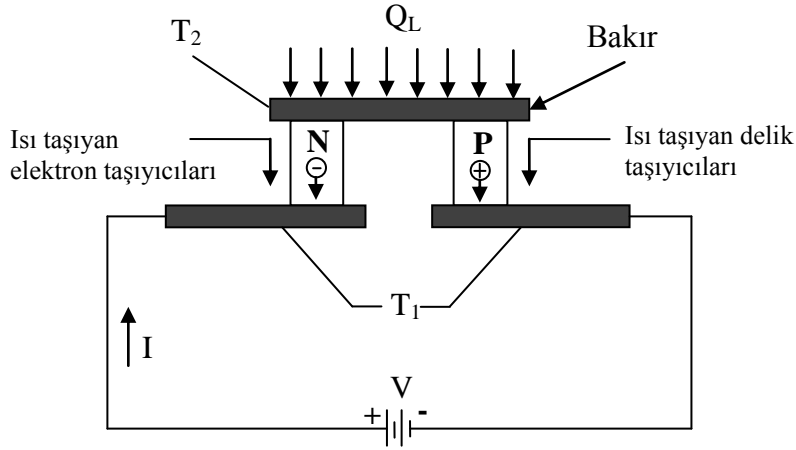
TE yarıiletkenlerin elde edilmesinde kullanılan bir diğer önemli yöntem olan Presleme Yöntemi ise toz metalürji tekniğine dayanmaktadır. Bu yöntemde etrafi ısıtıcıyla sarılarak oluşturulmuş düz prizma şeklindeki kalıbın içine toz haline getirilmiş n-tip yarıiletken için %80  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  + %20  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 'den oluşan, p-tip yarıiletken için %74  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  + %26  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ 'den oluşan bir karışım konulur. Kalıp 400 °C'ye kadar ısıtılarak presle 7 atm =  $7 \times 10^5$  Pa basınca tabi tutulur. Kalıbın boyutlarına göre üretilen yarıiletkenlerin çapları değişmekle birlikte, genelde kesiti kare şeklinde ve alanı  $7 \times 7 = 49 \text{ mm}^2$  olan n- ve p-tip kristaller elde edilmektedir [50].

### 2.2.2. Termoelement

Herhangi bir TE devre veya sistemin temelinde, ısı pompası olarak çalışan bir TEM (Peltier Soğutucu) yer almaktadır. TEM'lün temelini ise elektriksel yönden seri termal yönden paralel olarak bağlantılı termoelementler oluşturmaktadır. Şekil 2.4'te temel yapısı görülen bir termoelement, n- ve p-tip yarıiletkenlerin birbirine iletkenler yardımıyla elektriksel yönden seri bağlanmasıyla oluşmaktadır. Eğer



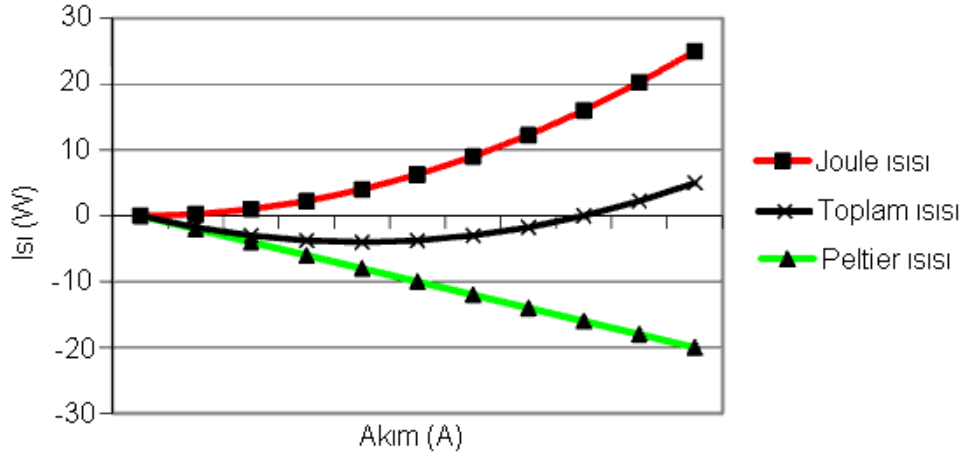
termoelemente bir DC akım uygulanırsa; yük taşıyıcıları enerji seviyesi düşük olan üstteki bakırdan yarıiletkenlere geçerler ve böylelikle de üstteki bakırın sıcaklığı düşer. Alttaki bakıra gelince; yüksek enerji seviyesinden düşük enerji seviyesine geçen yük taşıyıcıları sahip oldukları fazla enerjiyi alttaki iletkenine aktararak onun ısınmasına neden olurlar. Bu geçiş sırasında soğuyan yüzeyden emilen ısı, ısınan yüzeye transfer edilir. Böylelikle soğuyan yüzeyin sıcaklığı düşerken, ısınan yüzeyin sıcaklığı da artacaktır. Termoelemente uygulanan DC akım yönü değiştirildiğinde ise; soğuyan yüzey ısınmaya, ısınan yüzey de soğumaya başlar [1].



Şekil 2.4. Termoelementin temel yapısı

Eğer termoelementin ısınan yüzeyindeki ısı, bir ısı transfer sistemi ile alınıp  $T_1$  sıcaklığı sabitlenirse; devreye uygulanan  $I$  akımına bağlı olarak soğuyan yüzey sıcaklığı da belli bir  $T_2$  değerine kadar düşer. Termoelemente uygulanan  $I$  akımını sabit tutulduğunda ise;  $T_2$  ısınan yüzey sıcaklığı, soğuyan yüzeyden gelen ve emilen ısı yüküne bağlı olarak değişir. Bu ısı yükü; öncelikle dış ortam ile ısınan levhadan ısı iletim yoluyla soğuyan levhaya gelen ısıdan ve termoelement devresinde  $I$  akım şiddetine bağlı olarak açığa çıkan Joule ısısından oluşmaktadır [1, 49].

Şekil 2.5'te verilen grafikte; bir termoelementin soğuyan levhasına düşen Joule ve Peltier ısıları ile bu ısıların toplamının akım şiddetine göre değişimleri görülmektedir.

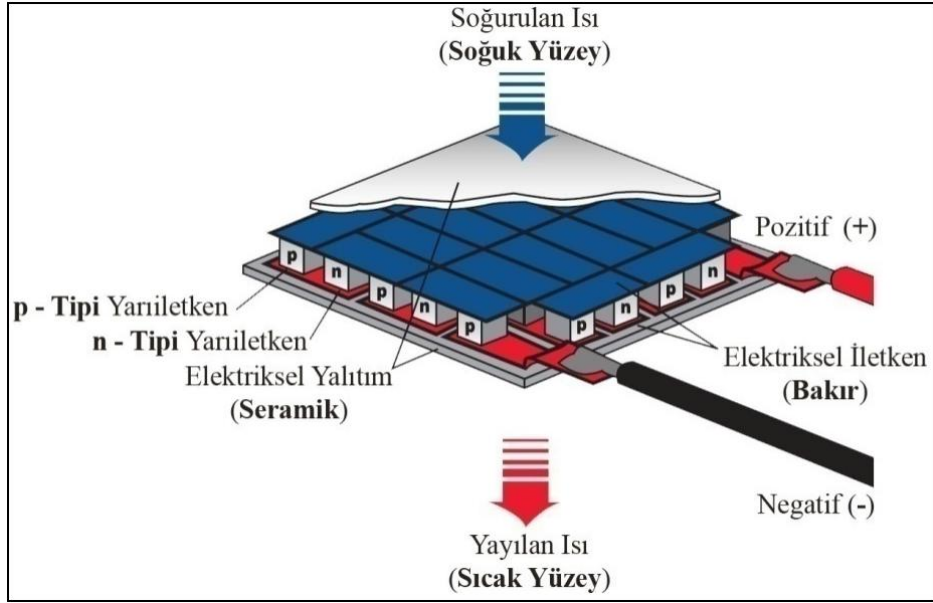


Şekil 2.5. Termoelementin soğuyan levhasında akıma bağlı ısı değişimleri

Termoelementte toplam ısının minimum olduğu akım şiddetine maksimum akım ( $I_{max}$ ) denir. Bir termoelemente uygulanan akım  $I_{max}$  iken, soğuyan levha sıcaklığı minimum olur.  $I_{max}$  değeri TE yarıiletkenlerin kalitesine, boyutlarına ve yapısal özelliklerine göre değişmektedir. Uygulanan akım ( $I > I_{max}$ ) olması durumunda; Joule ısısı Peltier ısısına oranla daha fazla artacağından soğutma etkisi azalır. Uygulanan akım ( $I = 2I_{max}$ ) olduğunda; Peltier ısısı Joule ısısını dengeler ve soğutma işlemi gerçekleşmez. Uygulanan akım ( $I > 2I_{max}$ ) olduğunda ise; Joule ısısı Peltier ısısından daha fazla olacağından termal denge bozulur. Böylelikle termoelement bir rezistans gibi davranarak ısınır ve soğutma özelliğini kaybeder [40, 49].

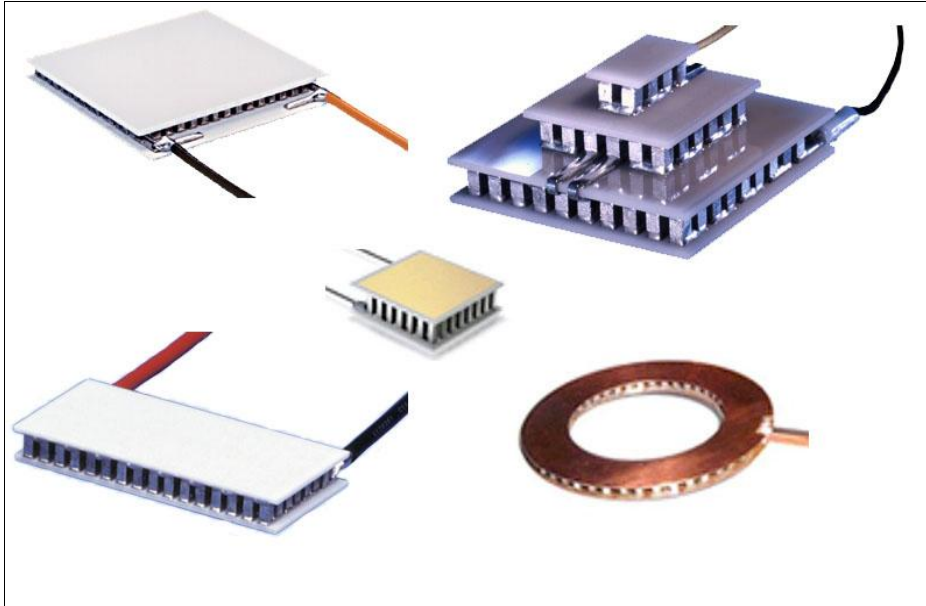
### 2.2.3. Termoelektrik modül

TEM'lerin temelinde elektriksel yönden seri, termal yönden paralel bağlantılı n- ve p- tipi yarıiletkenlerin oluşturduğu termoelementler yer almaktadır. Termoelementler seramik iki plaka arasına yine aynı şekilde elektriksel yönden seri, termal yönden paralel olacak şekilde paketlenmişlerdir. Şekil 2.6'da temel yapısı görülen bu pakete TEM adı verilmektedir. TEM'lerin paketlenmesinde seramik plakalar; mekanik gerilim, elektriksel direnç ve termal iletkenlik arasında en iyi uyumu sağladığından endüstri standardı olmuştur. Seramiğin dış yüzeyleri, dış dünya ve TEM arasında termal arabirim olarak kullanılmaktadır [54].



Şekil 2.6. TEM'ün yapısı [51]

Üretim aşamasında belirli bir sayıda termoelementin bir araya getirilmesiyle değişik yapı ve büyüklüklerde TEM'ler elde edilmektedir. Şekil 2.7'de çeşitli yapı ve özelliklerde TEM'ler verilmiştir.

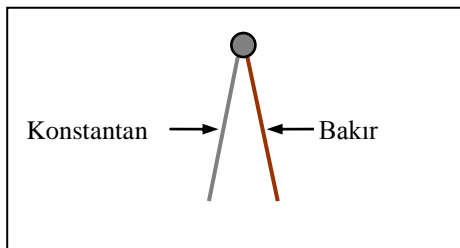


Şekil 2.7. Çeşitli yapı ve özelliklerde TE modüller [40]

Uygulamalarda tek bir TEM, birkaç TEM kaskat veya paralel bağlanarak kullanılabilir. Kaskat bağlantıda TEM'ler üst üste yerleştirilerek aynı güçte daha fazla  $\Delta T$  sıcaklık farkı elde edilmektedir. Isı transfer yönüne dikkat edilerek TEM'lerin yan yana yerleştirildiği paralel bağlantıda ise aynı  $\Delta T$  sıcaklık farkıyla daha fazla soğutma gücü elde edilmektedir. TEM'ün maksimum akım ( $I_{max}$ ) şiddetinin değeri TE yarıiletkenlerin kalitesine, boyutlarına ve imalat özelliklerine göre değişmektedir [1, 55–56].

#### 2.2.4. Termokupllar ve termoelementler arasındaki farklar

TE'lerle termokupllar arasında bağlantı kurulmaya çalışılmaktadır. Fakat aralarında çok büyük fark vardır. Termokupllarla TE'ler Seebeck etkisi dışında bir benzerlik göstermezler. Termokupllar iki farklı metalden yapılmaktadırlar, Şekil 2.8'de bakır ve konstantandan yapılmış olan bir T-tip termokupl verilmiştir. Termokuplların birleşim noktası sıcakta veya soğukta tutulup çevre sıcaklığıyla karşılaştırıldığında, Seebeck etkisiyle her bir derece sıcaklık değişiminde  $40 \mu V/^{\circ}C$ 'ye yakın değerlerde küçük gerilim oluştururlar. Termokupllar soğutucular, ısıtıcılar ve klimalar gibi sıcaklığın ölçülmesi gereken yerlerde sıcaklık algılayıcısı olarak çok tercih edilirler [5].



Şekil 2.8. T-tip termokupl

TE'ler, iki yarıiletkenin bir uçlarının birleştirilmesinden oluşturulur. TE'lerin sıcaklık farkına bağlı olarak gerilim üretme değeri termokupllara çok göre yüksektir. Örneğin,  $Bi_2Te_3$  yarıiletkeninden yapılan bir termoelementin Seebeck katsayısı  $560\text{--}640 \mu V/^{\circ}C$  olup, yapısı termokuplla nazaran farklıdır [5].

### 2.2.5. Termoelektrik modülün avantajları ve uygulama alanları

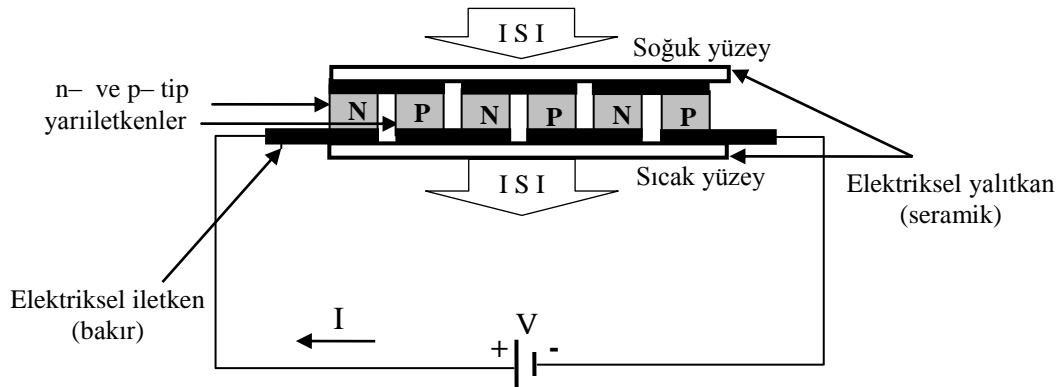
Soğutma, ısıtma ve elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılabilen TEM'lerin sahip oldukları avantajlar şu şekilde sıralanabilir [1, 5, 40, 48–57]:

- Küçük, hafif ve basit yapıdadırlar.
- Hareketli parçaları olmadığından sessiz, sarsıntısız ve güvenilir bir şekilde çalışırlar.
- Herhangi bir yönde çalışabilirler.
- Ortalama ömürleri 200 000 saat kadardır (> 22 yıl). Montaj edildikten sonra uzun süre bakım gerektirmezler.
- Sıcaklık kontrolleri hassasiyeti yüksek ve etkin bir şekilde kolaylıkla yapılabilmektedir.
- Elektriksel ve elektromanyetik gürültüleri minimum seviyededir.
- Yerçekimi ve titreşimden etkilenmezler.
- TEM'ler DC akım ile çalışırlar.
- Uygulanan akım yönü değiştirilerek, TEM'deki ısınma ve soğuma yüzeyleri yer değiştirilebilir.
- Rejime girme süresi kısadır.
- Seebeck etkisinden yararlanılarak elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanılabilirler.
- Çevreye zararlı etkileri yoktur.

TEM'ler sahip oldukları bu özellikler sayesinde birçok alanda rahatlıkla kullanılabilir. TEM'ler TES modda ulaşım araçlarında, ilaç muhafazalarında ve elektrik donanımlarında soğutucu olarak kullanılırken [40], TEJ modda hem jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üretmekte hem de kullanılan jeotermal enerjinin geri kazandırılmasında enerji verimliliğine katkıda bulunmaktadır [57]. TEJ'lerin kullanım alanları çok çeşitlidir. Bunlar; kablosuz algılayıcılar [32,58], güneş enerjisinin direkt olarak elektriğe çevrilmesi [59], biyomedikal sistemler [60] ve ısı geri kazanım sistemleri [29, 31, 61] gibi çeşitli alanlar görülmektedir.

### 2.3. Termoelektrik Modülün Soğutucu Olarak Kullanılması

Şekil 2.9'da TEM'in TES modunda kullanıldığı TE devre görülmektedir. TEM'de Peltier etkisi ile oluşan ısı transferi sonucunda yüzeylerden biri soğumakta, diğeri ısınmaktadır. TEM'ün uygun kutbuna DC akımın uygulanmasıyla üst tabakadan alt tabakaya doğru ısı pompalanacak ve sonuçta üst yüzey soğuyacaktır. Peltier etkisiyle ısı soğuyan yüzeyden alınarak ısınan yüzeye transfer edilmektedir. Eğer TEM'e uygulanan DC akım yönü değiştirilirse; bu işlem tersine işleyecek ve dolayısıyla TEM'ün soğuyan ve ısınan yüzeyleri de kendi arasında yer değiştirmiş olacaktır. TEM'e uygulanan enerji tamamen kesildiğinde ise; ısı hızlı bir şekilde sıcaklık dengesi sağlanıncaya kadar yine TEM üzerinden ters yönde transfer edilmektedir [3].



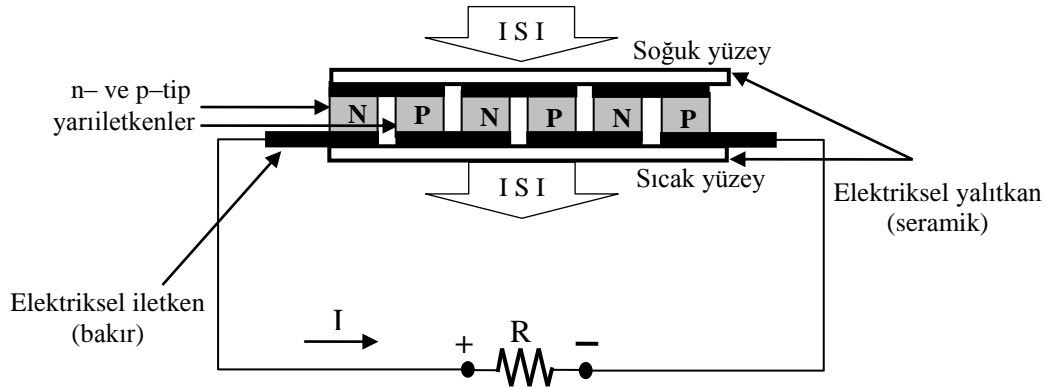
Şekil 2.9. TES modda bir TEM

Sonuç olarak, TEM'ün uçlarına uygulanan DC akım yönü ve şiddetine bağlı olarak kolaylıkla ısıtma veya soğutma yapılabilmektedir. Bu sayede TEM'ler; hem hızlı soğutma-ısıtma istenildiğinde yüksek ısı pompalama kapasitesi modunda hem de istenen sıcaklık elde edildiğinde minimum güç tüketimi (yüksek COP) ile düşük ısı pompalama kapasitesi modunda olmak üzere iki farklı modda çalıştırılabilmektedirler. Eğer TEM açık-kapalı modunda işletilirse; sıcak kenarda genişleme ve soğuk kenarda da büzülme meydana gelerek TEM'deki stresi artırmaktadır. Bu durum da TEM'ün güvenilirliğini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, TEM'deki ısı sızıntısının ve stresin en aza indirilmesi amacıyla

PID (Oransal - Integral - Türev) tekniğiyle çalışan bir sıcaklık kontrolünün kullanılması TEM'ün çalışması açısından daha uygun olmaktadır [1, 5, 62–68].

#### 2.4. Termoelektrik Modülün Jeneratör Olarak Kullanılması

Çok sayıda TE'in birleşmesinden TEM oluşturulur. TEM'ler, Seebeck etkisinin kullanılmasıyla jeneratör olarak çalışabilmektedirler. Şekil 2.10'da TEM'ün TEJ modunda kullanıldığı TE devre görülmektedir. Bir TEJ sistemi temelde üç parçadan meydana gelir; (1) ısıtıcı blok, (2) soğutucu blok ve (3) TEM [12]. TEM'ün yüzeyleri arasında bir sıcaklık farkı oluşturulduğunda; Termodinamiğin II. Kanunu gereğince ısı sıcak yüzeyden soğuk yüzeye doğru transfer edilecek ve bu durumda TEJ uçlarında bir DC gerilim düşümü olacaktır [69]. TEJ uçlarına harici bir yük bağlanırsa, yük üzerinden bir I akımı geçişi olur. TEJ'den elde edilen P gücü veya I akımı;  $\Delta T$  sıcaklık farkına, yarıiletken materyallerin özelliklerine ve harici  $R_L$  yük direncinin değerlerine bağlıdır [70]. Elektrik enerjisi, ısı transferine bağlı olarak TE yarıiletkenler boyunca elektriksel yük taşıyıcıların hareketinden üretilmektedir.



Şekil 2.10. TEJ modda bir TEM

##### 2.4.1. Termoelektrik jeneratör verimi

TEJ'ün verimi; alınan gücün ( $P_A$ ) verilen güce ( $P_V$ ) oranı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır [5]:

$$\eta = P_A / P_V \quad (2.7)$$

Bir TEJ’de kullanılan yarıiletken güç ölçümü, kalite faktörü (ZT) olarak da verilmektedir. Yarıiletkenin güç ölçümü kalite faktörü ZT aşağıdaki gibidir:

$$ZT = \frac{\alpha^2}{KR_{in}} T \quad (2.8)$$

Burada; T sıcaklık (Kelvin),  $\alpha$  ( $\alpha = \alpha_{pn} = |\alpha_p| + |\alpha_n|$ ) Seebeck sabiti (V/K), K termal iletkenliktir (W/mK). Bir TEJ’de ZT ve TEM yüzeyleri arası sıcaklık farkının  $\Delta T$  bir fonksiyonudur. Son yıllarda üretilen TEJ’lerin ZT’leri yüksektir ve buna bağlı olarak verimlerinde de kayda değer bir artış olmuştur [42].

TEJ verimliliği Carnot verimliliği terimleriyle de ifade edilmektedir. Carnot verimliliği TEJ’ler için aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta_{max} = \frac{(T_H - T_C)}{T_H} \times \frac{\sqrt{1 + ZT_{ave}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{ave}} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (2.9)$$

Burada;  $T_H$  TEJ’in sıcak taraf sıcaklığı,  $T_C$  TEJ’in soğuk taraf sıcaklığı ve  $T_{ave}$  TEJ’in ortalama  $(T_H + T_C) / 2$  sıcaklığıdır [71–72]. TEJ tarafından üretilen gerilimin en yüksek değeri uçlarının açık olduğu zamandır. Açık devre gerilimi  $V_{OC}$  aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$V_{OC} = N(\alpha_p - \alpha_n)(T_H - T_C) \quad (2.10)$$

TEJ açık devre gerilimi doğrudan doğruya termoelementlerin sayısı N, TEJ’in sıcak taraf yüzey sıcaklığı  $T_H$  ve soğuk taraf yüzey sıcaklığı  $T_C$  arasındaki sıcaklık farkı  $\Delta T$  ve kullanılan p–tip yarıiletken materyalin Seebeck sabiti  $\alpha_n$  ve n–tip yarıiletken materyalin Seebeck sabitiyle  $\alpha_p$  orantılıdır [71].



### 2.4.2. Termoelektrik jeneratör çıkış karakteristiği

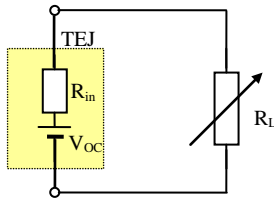
Tek bir termoelemente bağlı yük  $R_L$  üzerinde üretilen güç  $P_L$  aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$P_L = I_L V_L = I_L [\alpha \Delta T - I_L R_{in}] = \alpha^2 \Delta T^2 \frac{R_L}{(R_{in} + R_L)^2} \quad (2.11)$$

Burada;  $P_L$  TEJ'in yük üzerinden elde edilen çıkış gücü,  $I_L$  TEJ'in yük üzerinden geçirdiği elektrik akımı,  $V_L$  TEJ'in bağlanan yük üzerinde oluşturduğu gerilimdir [73]. Yük direnci  $R_L$  TEJ'in iç direncine  $R_{in}$  eşit olduğunda, TEJ'in maksimum çıkış gücü ürettiği yük karşılaşma durumu oluşur ve alınacak maksimum güç  $P_{Lmax}$  değeri aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$P_{Lmax} = \frac{\alpha^2 \Delta T^2}{4R_{in}} \quad (2.12)$$

TEJ uçları açık devre yapıldığında TEJ'den maksimum gerilim  $V_{OC}$ , kısa devre yapıldığında ise maksimum akım  $I_{SC}$  elde edilir. TEJ'den elde edilen güç  $P_L$  bağlanan yükün değerine bağlı olarak değişim gösterir [73].



Şekil 2.11. TEJ eşdeğer elektrik devresi

Bir TEJ açık devre geriliminin  $V_{OC}$  kısa devre akımına  $I_{SC}$  bölümünden ( $V_{OC}/I_{SC}$ ) elde edilebilen TEJ iç direncine  $R_{in}$  sahip  $V_{OC}$  gerilim kaynağı olarak modellenebilir. Burada açık devre gerilimi;  $V_{OC}$  sıcaklık farkı  $\Delta T$  ve Seebeck sabiti  $\alpha$  ile orantılı açık devre gerilimidir. TEJ kısa devre akımı  $I_{SC}$  ise belirli bir sıcaklık farkında  $\Delta T$  uçları kısa devre edilmiş TEJ'ün akımıdır. TEM'ün TEJ olarak kullanılmasıyla ilişkili

eşdeğer elektrik devresi Şekil 2.11’de verilmiştir. Yük direncinin  $R_L$  değerine bağlı olarak TEJ’den elde edilen güç miktarı değişir [16].

### 2.4.3. Termoelektrik jeneratör tipleri

TE güç üretim teknolojisi, termal enerjiyi elektrik enerjisine çevirmeyi amaçlar. Yüksek güçlü uygulamalarda büyük hacimli TEM’lerden oluşan TEJ’ler ve ince filmlili TEM’lerden oluşan TEJ’ler (mikro TEJ’ler) kullanılmaktadır ve nano yapıli TEJ’lerin üretim çalışmaları devam etmekte ve verimin artırılmasıyla ilgili umut verici sonuçlar elde edilmektedir. Mikro TEJ’ler, 50  $\mu\text{m}$  kalınlığından daha az kalınlıklı TE gerektirirler. Ticari olarak bulunan ve yaygın olarak kullanılan TEJ’lerin kalınlığı genelde 500  $\mu\text{m}$ ’nin üzerindedir. Bu değerin altına düştüğünde üretim verimliliği dikkate değer bir şekilde azalır [71,74–75].

Mikro TEJ’ler hacimli TEJ’lerden daha ince ve daha küçüktür. Bu nedenle daha az yer kaplarlar ve bunların endüstri–standart üretim metotlarına doğrudan bütünleşmesi umut verici olarak görülmektedir. Mikro TEJ’lerde bulunan ince filmler bir nanometreden birkaç mikrona kadar kalınlıkta bölümlü katmanlardaki materyallerdir. İnce film TE materyaller değişik yollarla büyütülebilir. Bunlar swiss yuvarlak, film ve termopil gibi çeşitli düğümlerden oluşurlar ve termopilin sahip olduğu güç yoğunluğundan daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler. Bu nedenle araştırmalar için daha değerlidirler [39,41]. Hacimli bütünleşik TEJ en fazla çıkış gücü ve gerilimi sağlar. Bunlar kolaylıkla düşük güçlü çeşitli algılayıcıların enerji ihtiyacını sağlamak için yeterli miktarda gerilim (5  $^{\circ}\text{C}$  sıcaklık farkı olduğunda bile) üretebilirler. Mikro TEJ’ler, elektrik enerjisi elde edinim uygulamaları için kullanıldığında yüksek sıcaklık farklarında olduğunda daha verimlidirler. [71–74].

Mikro TEJ’lerin ve hacimli TEJ’lerin performans değerlerinin artırılması için üç önemli faktör vardır. Bunlar TEJ termal direncinin artırılması, TEJ bloğunu oluşturan soğutucu sisteminin ısı giriş–çıkış termal dirençlerinin düşürülmesi ve termoelementler arasındaki kontak elektrik dirençlerinin minimize edilmesidir [74]. TEM’lerde kullanılan TE materyaller metaller, yarı iletkenlerden seramiğe kadar

farklı materyal sistemleri, mono kristal, kutuplu kristallerden nano kompozitlere kadar değişik kristal şekilleri ve hacimli, film, telden kümelere kadar değişik boyutlar içeren termoelektrik materyaller olmak üzere büyük bir çeşitlilik gösterir [76–77].

TE materyallerin kalite faktörünün arttırılması materyallerin temel özellikleri nedeniyle oldukça zordur. Son yıllarda, TEM kalite faktörü olan ZT'nin arttırılmasıyla ilgili çalışmalar nano yapılı materyallerin kullanımına doğru gitmektedir [78]. Yeni TEJ'lerin üretiminde nano yapılı materyaller olarak genellikle quantum wells (QW) [79], superlattices [80], nano teller [81–82] ve nano grains [83] gibi materyaller kullanılmaktadır. Nano yapılı malzemelerin kullanımıyla birlikte termoelektrik iletkenlik oldukça düşürülebilmektedir [84].

QW olarak isimlendirilen yeni nano materyaller 10 nm kalınlıklı silikon ve SiGe filmlerden oluşmaktadır. Bunlar TE'in kalite faktörünün arttırılmasına çok büyük katkı sağlamışlardır. Bu materyallerle oda sıcaklığında kalite faktörü 3'den büyük termoelementler elde edilmiştir [80]. Bu değer 1'den daha küçük kalite faktörlerine sahip olan hacimli TEJ'lere göre çok önemli bir gelişmedir [85]. QW materyallerle yapılmış TEM'lerin çevrim verimlilikleri %20'lere kadar yaklaşmaktadır [86].

Nano kablolardan nano kristallere kadar nano yapılı termoelektrik materyallerin son yıllarda gelişme çabaları aynı kimyasal yapıdan oluşan hacimli kristallerin performansı ile kıyaslandığında nano ölçülü yüzeyler ve ara yüzeylerde foton yayılmasıyla çarpıcı biçimde termal iletkenliği azaltması yüzünden büyük üstünlükler göstermektedir. Fakat kritik boşluklar hala kalmaktadır. Bu nedenle, ölçülendirilebilirlik, pratik üretim ve nano termoelektrik cihazların geniş yayılımını kısıtlamaktadır [87–88]. Enerji dönüşüm teknolojileri (1) süreç basitliği ve materyalin ölçülendirilebilmesi, (2) üretimde ve geri dönüşümde ekonomik idame, (3) var olan üretim alt yapısıyla uyumluluk ve bütünleşebilirlik ve (4) performansın geliştirilebilirlik şartlarını gerektirir. Bu gereksinimler nano yapılı TE gelecek araştırma yönünü belirlemektedir [87].

### **3. TERMOELEKTRİK MODÜLÜN JENERATÖR OLARAK MATEMATİKSEL MODELLEMESİ VE DENEYSEL ÇALIŞMASI**

#### **3.1. Matlab Programı**

Matlab ilk defa 1985’de Cleve Moler tarafından matematik ve özellikle de matris esaslı matematik ortamda kullanılmak üzere geliştirilmiş, MATrix LABoratory kelimelerinin kısaltılmasıyla isimlendirilmiş, etkileşimli bir paket programlama dilidir. İlk sürümleri Foltran diliyle hazırlanmıştır. Fakat 2010 yılı itibariyle son sürümleri C dilinde yazılmıştır. Matlab mühendislik alanındaki sayısal hesaplamalar, veri çözümleri ve grafik işlemlerinde kullanılabilen genel amaçlı bir program olmasının yanı sıra özel amaçlı modüler paketlere de sahiptir. Bütün dünyada teknoloji geliştiren çoğu bilim insanları, şirketler ve araştırmacılar çalışmalarını hızlandırmak ve piyasaya daha gelişmiş ürünler sunmak amacıyla Matlab kullanmaktadırlar.

Matlab yazılımının birçok alanda uygulamaları vardır. İçerdiği “toolbox” adı verilen paketler aracılığıyla sayısal işaretleme, kontrol tasarımı, test, ölçüm, finansal modelleme, analiz ve haberleşme gibi birçok alanda kullanılabilir. Ayrıca Windows ortamında çalışan Simulink programı da etkileşimli benzetim programlarının hazırlanması ve çalıştırılmasında büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Matlab ile teknik hesaplama problemleri C, C++ ve Foltran gibi geleneksel programlama dillerinden daha hızlı bir şekilde çözülebilir. Matlab ile lineer cebir, veri çözümleri, işaret işleme, polinom ve ara değer işlemleri, integral alma işlemleri ve diferansiyel denklem işlemleri kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Bu grafikler üzerinde renk ve ışık ayarları yapılabilir ayrıca animasyon haline getirilebilir. Dahası Matlab kodları C ve Foltran gibi başka programlama dillerine çevrilebilir.

Matlab’ın açık mimari yapısı ve kullanım kolaylığı bizlere yapay sinir ağlarından güç sistemleri analizine, görüntü işlemeden finansal modelleme araçlarına, kontrol sistemlerinden veri tabanı uygulamalarına, havacılık sistemlerinden otomotiv uygulamaları konularına ve çok daha fazla sayıdaki farklı alanlara yönelik özel

ürünleri, kullanıcılara problemlerini en hızlı ve kolay yoldan çözebilme, algoritma hazırlama ve kişisel araçlar ve fonksiyonlar geliştirebilme imkânı sağlar.

Matlab'ın önemli özellikleri şu şekilde ifade edilebilir:

- Özel amaçlı kullanıcı arayüz geliştirme araçları,
- Tasarım, inceleme ve problem çözümü için etkileşimli araçlar,
- Görselleştirme amaçlı iki ve üç boyutlu grafik fonksiyonları,
- Teknik hesaplama için yüksek seviyeli programlama dili,
- Kod, dosya ve veri yönetimi için geliştirme ortamı,
- Doğrusal cebir, Fourier analizi, filtreleme, istatistik, eniyileme ve sayısal integral fonksiyonları,
- Matlab tabanlı algoritmaları C, C++, Fortran, Java, Com ve Microsoft Excel gibi dil ve uygulamalarla bütünleştirme araçları [89].

### **3.2. Simulink Benzetim Programı**

Simulink; Matlab ailesinin kullanıcılara, zaman domeni ile ilgili dinamik ve arayüzleri görsel sistem modellerinin kurulması, benzetimi ve çözümü konusunda hizmet sunan bir üründür. Simulink ile hazırlanan uygulamalar bir test ortamındaymışçasına sürekli veya ayırık zamanlı analiz edilebilir. Analize bağlı tasarım ve geliştirme işlemleri gerçekleştirilebilir. Simulink programı Matlab'ın nümerik, grafiksel ve programlama alanlarındaki tüm işlevselliğini koruyan blok şemaları arayüzü aracılığıyla çalışır.

Simulink birçok matematiksel ifadeden başlayarak; havacılık, haberleşme, elektrik, elektronik, kontrol sistemleri, finansal, mekanik, kablosuz sistemler ile sinyal işleme, sanal gerçeklik, yüksek seviyeli gerçek zamanlı donanımsal çalışma, gömülü kontrol, otomatik kod üretimi ile birim programlama gibi birçok alana yönelik blok kütüphaneleri içerir. Simulink ile modelleme bir sistemin kâğıt üstüne taslak çizimi yapılması kadar kolaydır. Simulink grafiksel kullanıcı arayüzü hâlihazırda barındırdığı çeşitli blok setleriyle “Sürükle ve Bırak” işlemine dayanan basit bir

mantıkla, sistem elemanlarını ve sistemleri oluşturur. Sistem elemanlarının parametrelerini değiştirmek temel çift tıklama ile yapılabilmektedir. Sistem özellikleri de hazır kullanıcı arayüzleri ile belirlenmektedir. İstenildiği takdirde, kullanıcılar kendi bloklarını oluşturabilmekte ve kendi kütüphanelerini hazırlayabilmektedirler.

Simulink kullanıcılara modellemek istedikleri sistemler için bir yol haritası sunar. Standart programlamada mevcut olan kod yazma mantığına karşın Simulink'te bloklar ile görsel programlama yapıldığından, kullanıcılar bir bakışta modellemek istedikleri sistemleri görebilir, girişlerin hangi aşamalardan geçtiğini ve hangi çıkışları oluşturduğunu pratik bir şekilde gözleyebilirler. Analizler sonucu elde edilen veriler Matlab ve Simulink ortamındaki diğer ürünler ile etkileşimli bir şekilde kullanılabilir. Bu verilere yönelik farklı bilim dallarında görsellemeler ve işlemler tek platform özelliği ile uygulanabilir.

Simulink blok kümeleri adı verilen ek ürünler, konuya özel modelleme ve tasarım, kod üretme, algoritma uygulama, test ve doğrulama gibi alanlarda Simulink ortamını daha da geniş kılmaktadır. Simulink'le elektromekanik sistemlerin tasarımı modülü sayesinde doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerin zaman ve frekans alanlarında analizleri yapılabilmekte ve kutup-sıfır dinamikleri kolaylıkla modellenmektedir. Simulink'in belirleyici özellikleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- Ayrıntılı ve daha da genişletilebilir önceden tanımlı bloklar,
- Blok şemalarını düzenlemek için etkileşimli grafiksel editör,
- Karmaşık modelleri basitleştirmek için hiyerarşik model yapısı,
- Model katları arasında rahat çalışmayı sağlayan "Model Gezgini",
- Farklı benzetim programlarıyla bağlantı kurma, elle Matlab algoritmalarını dâhil edebilme,
- Değişken veya sabit adım aralığı ile benzetim yapabilme,
- Görsel hata ayıklayıcı,
- Veri analizi, görselleme ve arayüz oluşturma için Matlab ile tam iletişim,

- Model tutarlılığı ve modelleme hatalarının tespiti için model analizi ve hata tanı koyma araçları.

Geliştirilen modeller fiziksel sistemlere bağlanarak gerçek zamanlı PC tabanlı benzetimler Simulink'in sağladığı hızlı prototipleme yetenekleri sayesinde gerçekleştirilebilir. Yine Simulink ile modelleme yaparken, işaretler üzerinde de kapsamlı bir denetime sahip olunur. Tek/çift duyarlıklı 8/16/32 bit tamsayı formatlı gerçek veya karmaşık işaretler tanımlanabilir, format dönüşümleri gerçekleştirilebilir. Ek bir modül kullanılarak sabit noktalı verilerle benzetim yapılabilmektedir. Simulink, Matlab ile uyumlu çalışarak kontrol, denetleme, anahtarlamalı lojik, durum makineleri içeren gömülü sistemlerin tasarımında etkin bir çözüm sunar. Gömülü sistem uygulamaları için Simulink kod üretme araçlarıyla "Durum Akış" modellerinden C/C++ kodu üretilebilir ve bu kodlar sayısal işaret işlemcilere veya CPU'lara aktarılabilir [90].

### 3.3. Termoelektrik Jeneratör Modelleme

TEM üretim teknolojisinde ve güç elektroniğindeki değişimler nedeniyle TEM'lerin matematiksel modellenmeleri ve en iyi güç alınması çalışmalarını hız kesmeden devam etmektedir. TEJ modellemeleri ısı iletimi ve elektrotermal özelliklerin incelenmesi üzerinedir. Bununla birlikte, TEJ'lerin elektronik devrelerin benzetim programlarında kullanabilmesi amacıyla da modellemeleri yapılmıştır. Atık ısıdan TEJ yardımıyla elektrik enerjisi elde edilmesinde TEJ'den maksimum verim almak için TEJ iç direnciyle yük direnci birbirine eşit olmalıdır [1, 5, 40].

TEJ'ler farklı sıcaklık aralıklarında kullanıldıkları için parametreleri sürekli olarak değişim göstermektedir. Ayrıca ürettikleri gerilimde sıcaklık farkı değişimi nedeniyle sürekli değişmektedir. Bunlara ek olarak, 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 en iyi güç çekme özelliğinin olması gerekir [13].

Bu bölümde; TEM'lerin farklı sıcaklık aralıklarında TEJ olarak kullanımı için performans testleri gerçekleştirilmiştir. Bir TEJ üreticisinin kullanım kitapçıklarında verilen temel parametrelere göre, seçilen matematiksel modelin Matlab/Simulink benzetimi yapılmış ve benzetim sonuçları bir prototip üzerinde deneysel olarak doğrulanmıştır. Bu benzetim ve uygulama çalışması, tasarımı planlanan daha yüksek güçlerdeki TEJ üretimlerinin temelini oluşturmaktadır [41–43, 46–47].

### 3.4. Metotlar

Burada, TEJ benzetimlerinin yapılması için kullanılan matematiksel modeller ve Matlab/Simulink benzetim programında yapılan benzetim çalışması ve prototip çalışmasından elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

#### 3.4.1. Termoelektrik jeneratör denklemleri

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  $R_{in}$ , yük karşılaşmasındaki ( $R_L = R_{in}$ ) yük gerilimi  $V_{max}$  ( $V_{Rin} = V_{RL}$ ) 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  $R_{in}$  ve düşük termal iletkenlik  $\kappa_{th}$  değerleri etkindir. TEJ'lerde kalite faktörü (Figure of Merit - FOM) aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$Z = \frac{\alpha^2}{R_{in} \kappa_{th}} \quad (3.1)$$

TEJ'in elektrik direnci  $R_{in}$  ve Seebeck sabiti  $\alpha$  aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$R_{in} = R_L = \frac{V_{max}^2}{P_{max}} \quad (3.2)$$



$$\alpha = \frac{2V_{\max}}{\Delta T} \quad (3.3)$$

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

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{[(1+m)R_{in}]} \quad (3.4)$$

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

$$\eta = \frac{I^2 R_L}{Q_H} \quad (3.5)$$

Ayrıca, TEJ'in verimliliği m katsayısı ve TEJ yüzey sıcaklıkları dikkate alınarak yeniden formüleleştirilebilir:

$$\eta = \frac{mZ\Delta T}{\{(1+m)^2 + Z[(m+0,5)T_H + 0,5T_C]\}} \quad (3.6)$$

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

$$m_{opt} = (1 + ZT_{ave})^{0,5} \quad (3.7)$$

Ticari olarak verilen bir TEJ parametreleriyle, direnç oranı m aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$m_{opt} = \frac{(\Delta T + \eta_{\max} T_C)}{(\Delta T - \eta_{\max} T_H)} \quad (3.8)$$

Ayrıca FOM değeri aşağıdaki gibi bulunur:

$$Z = \frac{(m_{\text{opt}}^2 - 1)}{T_{\text{ave}}} \quad (3.9)$$

TEJ termal iletkenliği, aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\kappa_{\text{th}} = \frac{\alpha^2}{R_{\text{in}} Z} \quad (3.10)$$

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

$$I_{\text{max}} = \frac{\alpha \Delta T}{2R_{\text{in}}} \quad (3.11)$$

Verim aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{Z \Delta T}{[4 + Z(1,5T_{\text{H}} + 0,5T_{\text{C}})]} \quad (3.12)$$

Verim verilmiş FOM değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Z = \frac{4\eta_{\text{TEJ}}^{\text{max}}}{[\Delta T - \eta_{\text{TEJ}}^{\text{max}} (1,5T_{\text{H}} + 0,5T_{\text{C}})]} \quad (3.13)$$

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak sonunda, Eş. 3.10'dan TEJ'nin termal iletkenliği belirlenir [1–12].

### 3.4.2. Termoelektrik jeneratör Simulink benzetimi

TEJ uygulamalarında, TEJ'den en yüksek çıkış gücünün çekilmesi her zaman istenir. TEJ maksimum akımı  $I_{\text{max}}$ , yük geriliminin  $V_L = 0$  olduğu andır. Bu akıma kısa devre akımı  $I_{\text{SC}}$  denir ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir:

$$I_{SC} = 2I_{max} = \frac{2P_{max}}{V_{max}} \quad (3.14)$$

TEJ'in çıkış gerilim değeri de aşağıdaki eşitlikle bulunabilir:

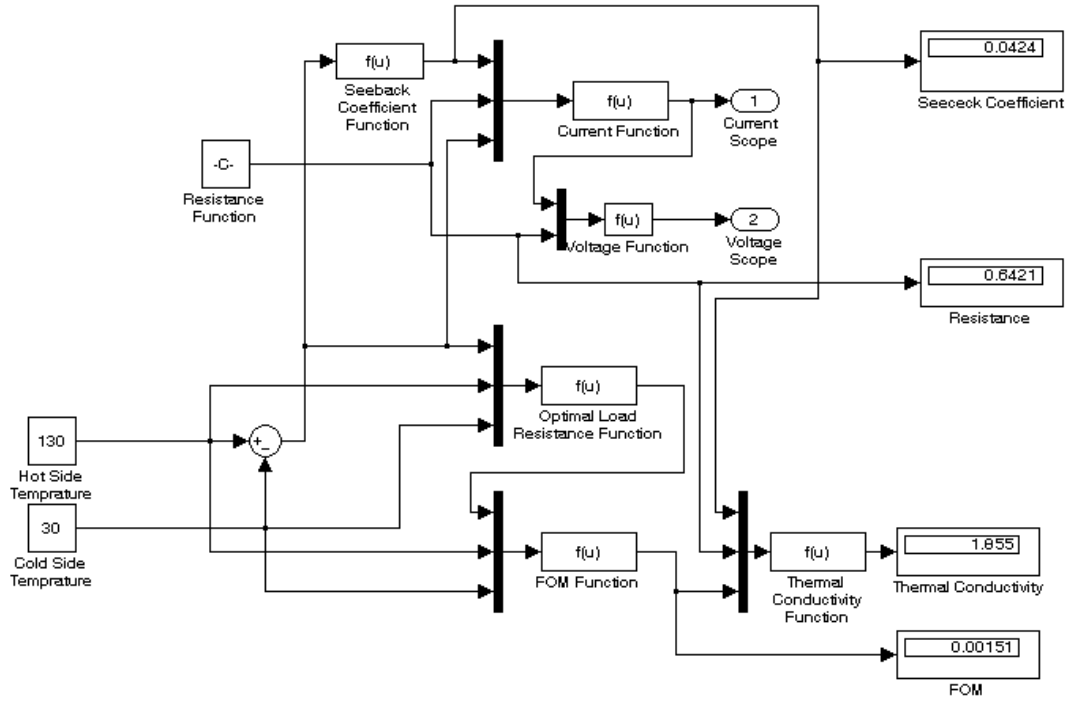
$$V_L = -R_{in}(I - I_{SC}) \quad (3.15)$$

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 [12].

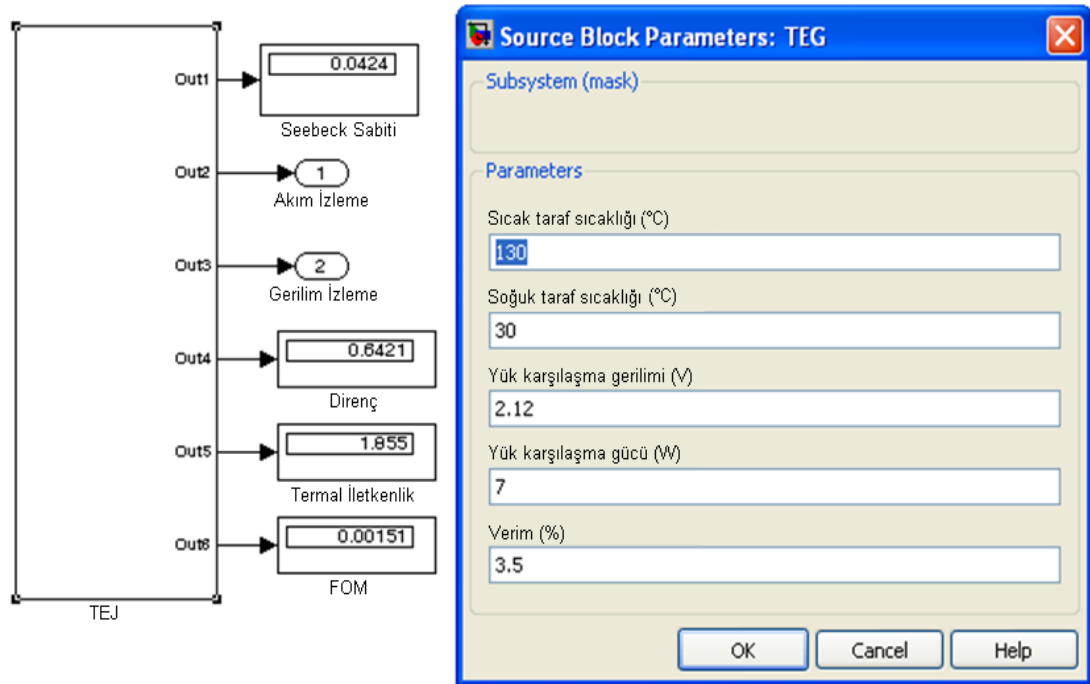
Burada, ticari olarak bulunabilen ALTEC-GM-1 marka-kodlu TEM kullanılmıştır [91]. Üreticinin kullanım kitapçığında verilen parametreler şunlardır; ortam sıcaklığı  $T_{amb} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$  değerindeyken, iç direnci  $R_{in} = 0,495 \text{ } \Omega$ , sıcak taraf ısı  $T_H = + 130 \text{ }^\circ\text{C}$ , soğuk taraf sıcaklığı  $T_C = + 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. TEJ'in maksimum gerilimi  $V_{max} = 2,12 \text{ V}$ , maksimum akımı  $I_{max} = 3,31 \text{ A}$ , maksimum gücü  $P_{max} = 7,0 \text{ W}$  ve verimi  $\eta_{max} = \%3,5$ 'dir. 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 3.1'de görüldüğü gibi, Matlab/Simulink benzetiminde, verilen eşitlikler kullanılarak, TEM parametreleri hesaplanmıştır. Şekil 3.2'deki gibi TEJ bloğu oluşturulmuştur. TEJ blok yapılandırmasında sıcak taraf sıcaklığı, soğuk taraf sıcaklığı, maksimum yük karşılaşma gerilimi, en yüksek güç ve verimlilik değerleri benzetim kullanıcısı tarafından girilmiştir. Girilen bu verilere bağlı olarak Eş. 3.3'ten Seebeck sabiti  $\alpha$ , Eş. 3.2'den maksimum gücün elde edilebildiği TEJ-yük iç direnç karşılaşma değerindeki TEJ'e bağlanan yük değeri  $R_L$ , Eş. 3.13'ten FOM değeri  $Z$  ve Eş.3.10'dan termal iletkenlik değeri  $\kappa_{th}$  hesaplanmıştır. TEJ blok diyalog yapılandırmasından girilen örnek verilere göre Seebeck sabiti  $\alpha = 0,0424 \text{ V/K}$ , yük karşılaşmasındaki ( $R_L = R_{in}$ ) direnç değeri  $R_{in} = 0,642 \text{ } \Omega$ , FOM değeri

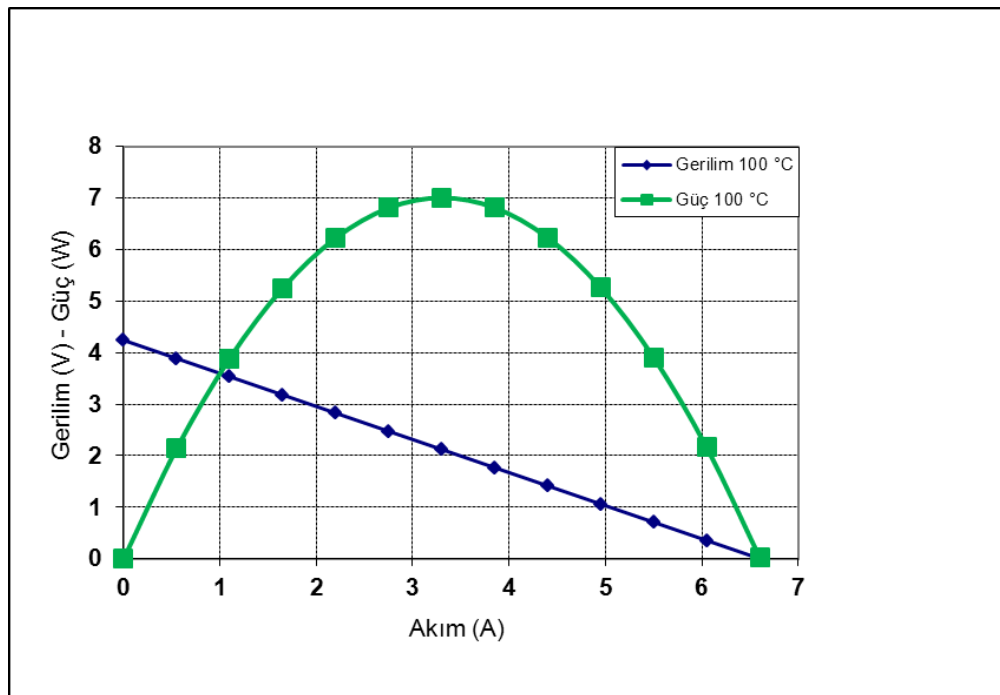
$Z = 1,511 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  ve termal iletkenlik  $\kappa_{th} = 1,855 \text{ W/K}$  sonuçları elde edilmiştir. Sıcaklık farkı  $\Delta T$  sabit tutulmak şartıyla, yük değerinin değişimine  $R_L$  bağlı olarak, Eş. 3.8 ile  $m_{opt}$  değeri hesaplanmış, Eş. 3.4 yardımıyla akımdaki  $I$ , Eş. 3.15 yardımıyla da gerilimdeki  $V$  değişimler bulunmuştur. Akım ve gerilim değerlerinden de güç değerleri  $P$  elde edilmiştir. Elde edilen veriler Şekil 3.3’de TEJ  $V-I-P$  karakteristikleri olarak verilmiştir. TEM’den alınan maksimum güç değeri, benzetim eğrileri incelendiğinde TEJ’in iç direnç değerinin  $R_{in} = 0,642 \Omega$  olduğu anda elde edilmiştir. Bu değer yükün direncine eşit olmuştur ( $R_L = R_{in}$ ).



Şekil 3.1. TEJ Matlab/Simulink benzetimi



Şekil 3.2. TEJ Matlab/Simulink bloğu



Şekil 3.3. TEJ V-I-P karakteristikleri

Şekil 3.3’de benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçların görüldüğü grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde 100 °C sıcaklık farkında TEM’den alınan en yüksek güç değeri yaklaşık  $P_{max} = 7 \text{ W}$  olmuştur.  $R_L$  değerinin elde edilen maksimum güç değeri dışındaki diğer değişimlerinde güç değerinde azalma meydana gelmiştir.

### 3.5. Prototip Termoelektrik Jeneratör Deneysel Kurulumu

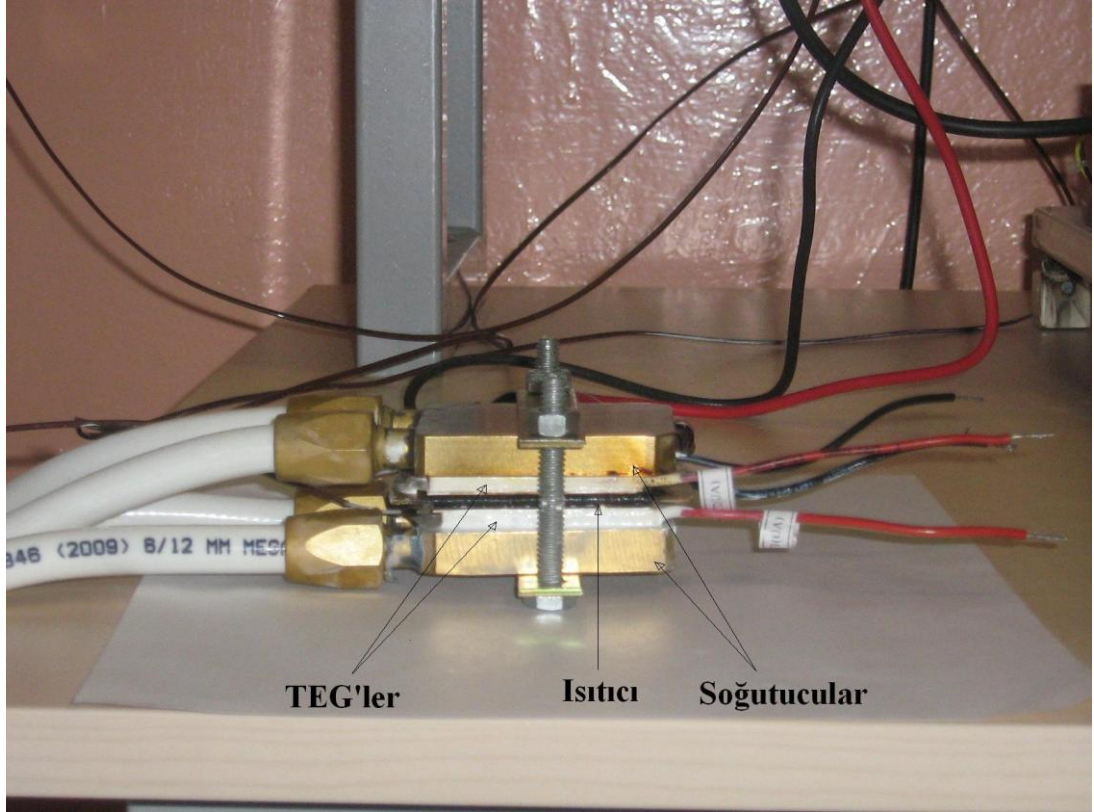
Bu kısımda; TEJ uygulamalarının yapılması için bir TEJ prototip deney seti kurulumu ve TEJ performans sonuçları verilmiştir.

#### 3.5.1. Termoelektrik jeneratör prototip deneysel kurulumu

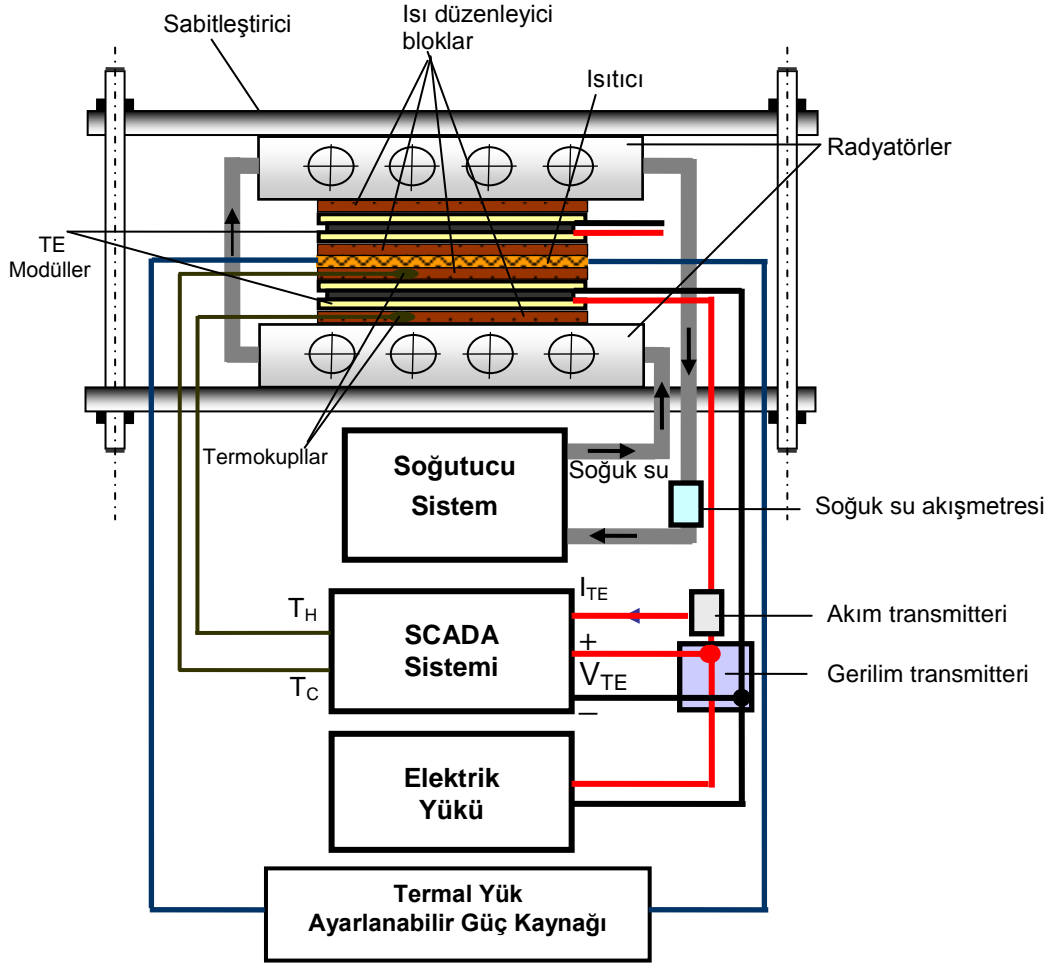
TEJ performans testlerinin yapılabilmesi için, Resim 3.1’deki kurulum gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4’de de bu kurulumun TEJ sistem deney düzeneği kesit görünümü verilmiştir. Burada iki tane ticari olarak bulunabilen ALTEC–GM–1 marka–kodlu TEJ arasına, sıcak yüzey ısını sağlayabilmek amacıyla krom–nikel telden 500 W’lık bir düz ısıtıcı tasarlanmış ve üretilmiştir. Isıtıcının sıcak yüzey ısının istenilen değerde tutulmasını sağlamak için, giriş gerilimi 220 V AC, çıkış gerilimi 0–250 V AC, gücü 2 kVA 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 bir 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, yüzeyler arasına silikon jel sürülmüştür.

TEJ’lerden alınan akım, gerilim, güç, sıcak yüzey sıcaklığı, soğuk yüzey sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve soğutucu su sebilinin ısını sürekli olarak izlemek için bir

SCADA sistemi kullanılmıştır. Bu SCADA sistemi, dördüncü bölümde detaylarıyla açıklanmıştır. Prototip TEJ deneysel kurulumu Resim 3.2'de verilmiştir. Akım, gerilim ve sıcaklık ölçümlerinin kalibrasyonu Fluke 725, çok fonksiyonlu Süreç Kalibratör cihazı kullanılmıştır.



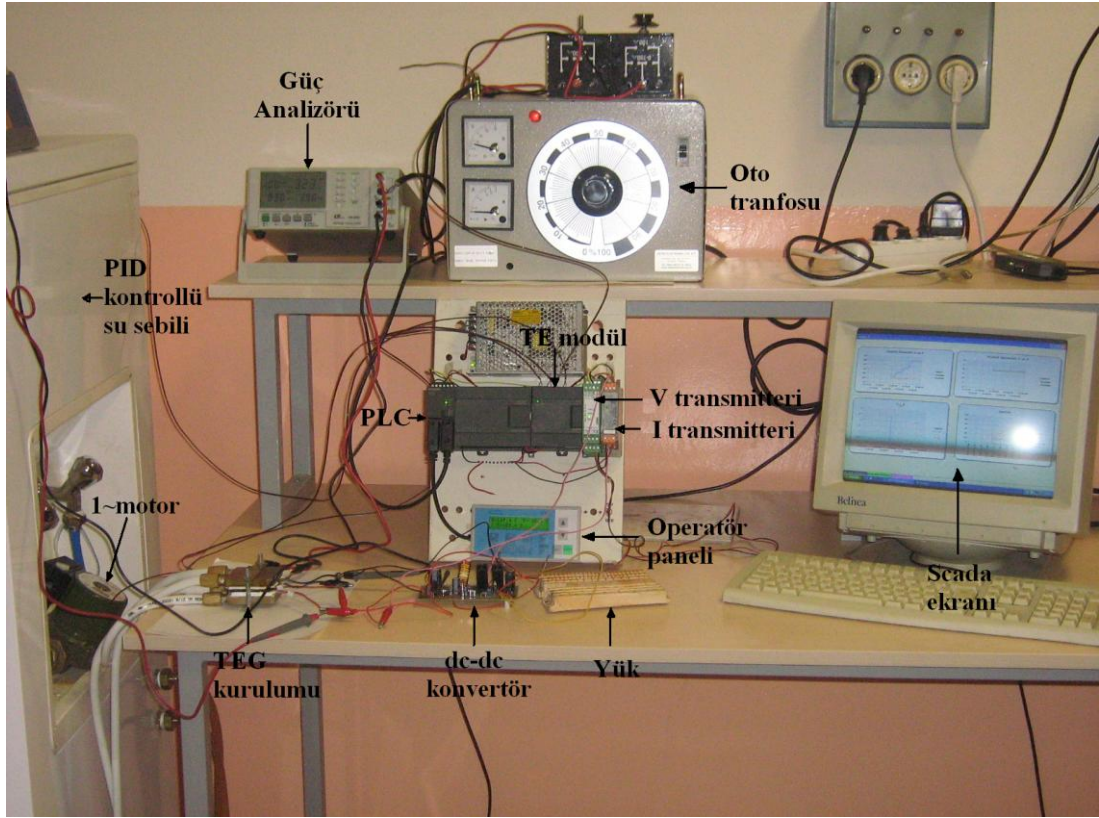
Resim 3.1. Prototip TEJ kurulumu



Şekil 3.4. Prototip TEJ sistem deney düzeneği kesit görünümü

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.

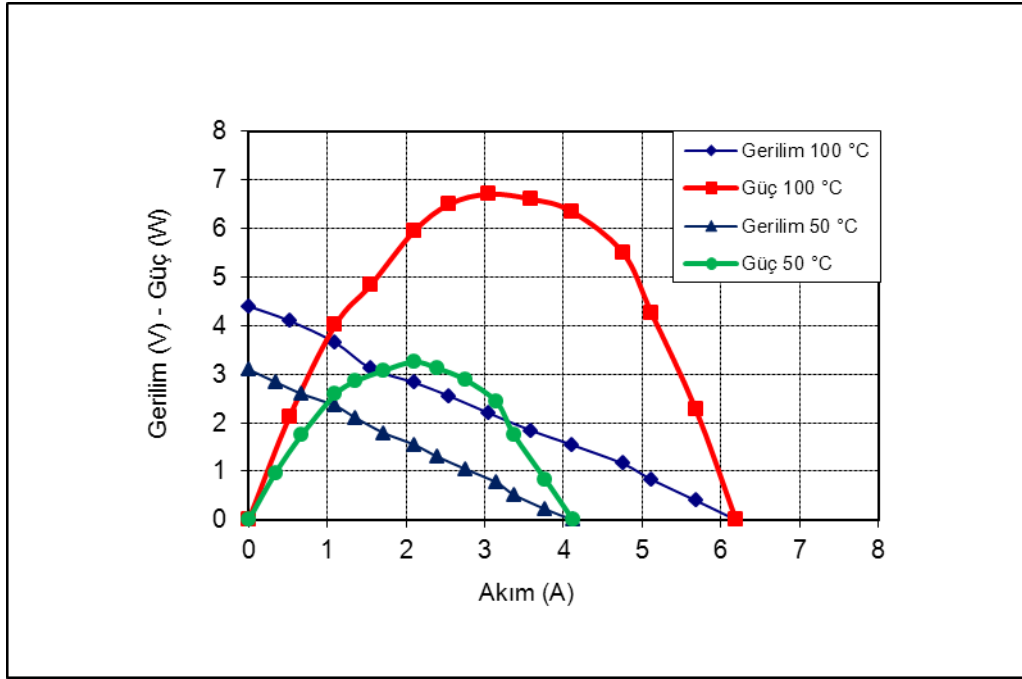




Resim 3.2. Prototip TEJ deneysel kurulumu

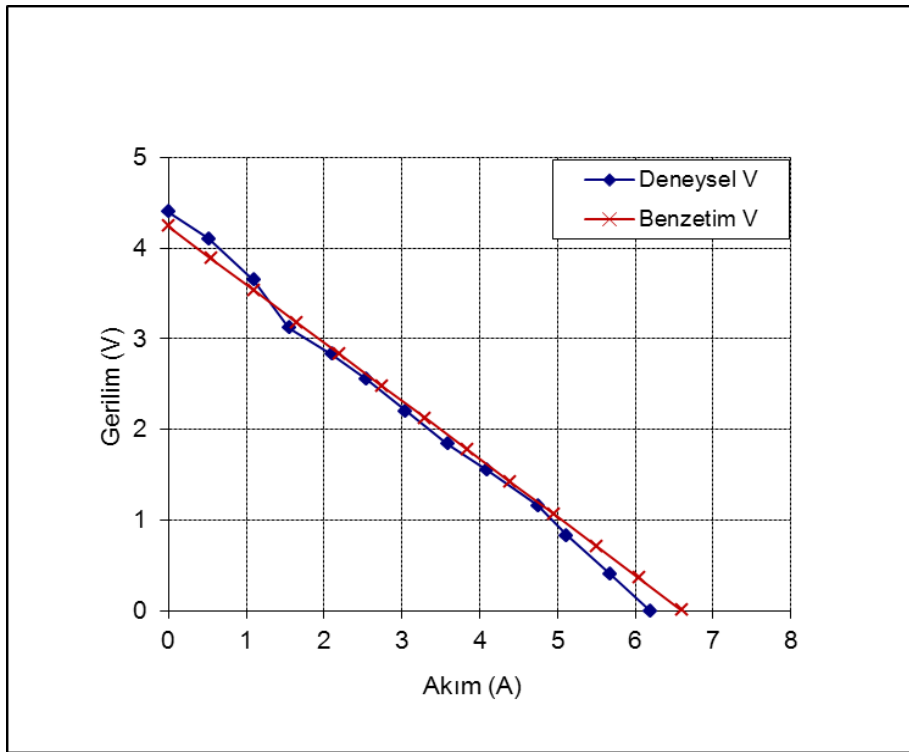
### 3.5.2. Termoelektrik jeneratör prototip performans testi

Kullanılan Altec marka TEM'lerin yalnızca birinin değişik sıcaklık farkları için, performans test sonuçlarının grafikleri Şekil 3.5'de 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.

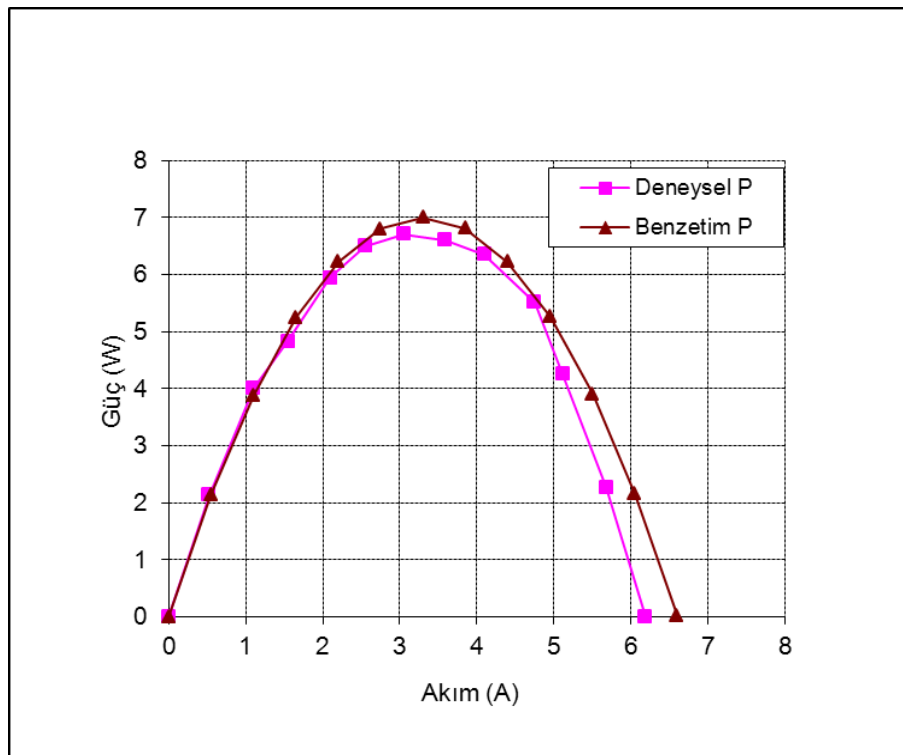


Şekil 3.5. Deneysel prototip TEJ V-I-P karakteristikleri

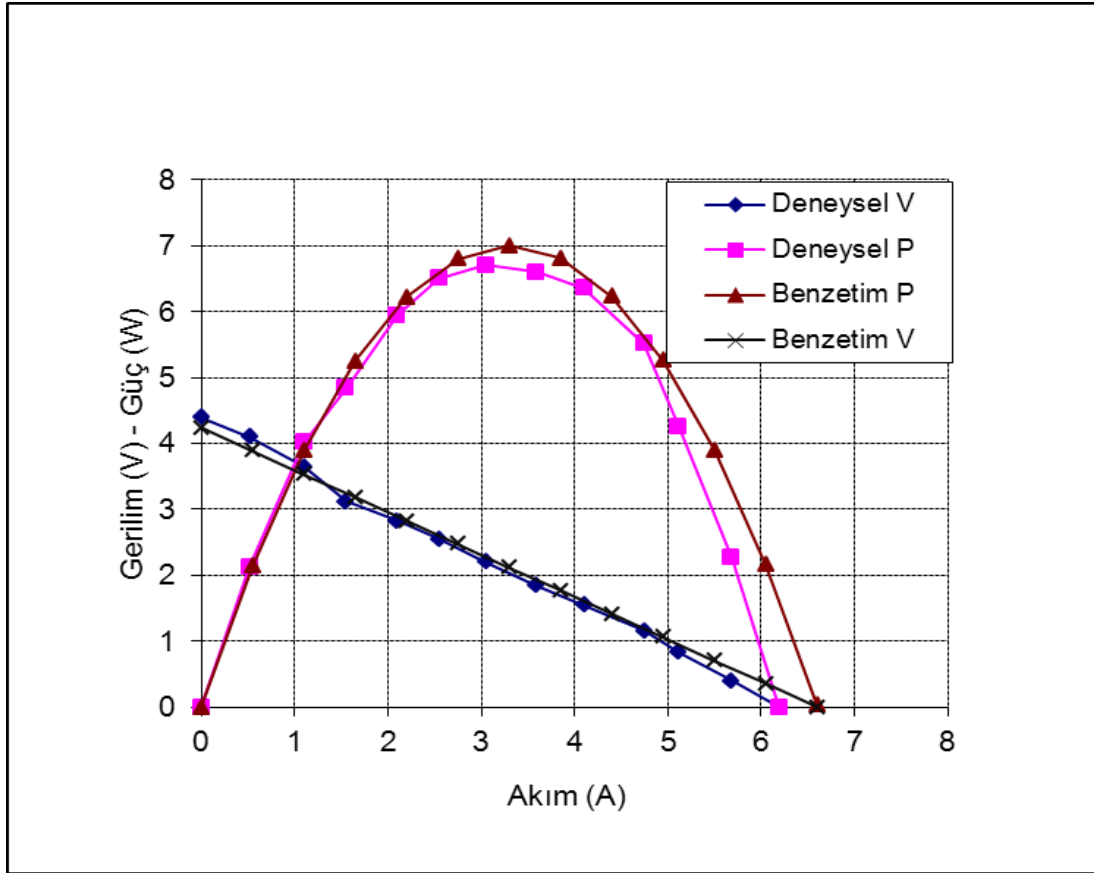
Altec kullanım kitapçıklarındaki  $\Delta T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık farkında alınan maksimum gücün  $P_{\max} = 7 \text{ W}$  olduğu ifade edilmiştir. Deneysel olarak, belirtilen sıcaklık farkı değerinde, yük direncinin değeri  $R_L = 0,72 \text{ } \Omega$  olduğunda en yüksek güç değeri alınmış ve yaklaşık olarak bu değer  $P_{\max} = 6,71 \text{ W}$  elde edilmiştir. Bu durumda giriş gücü  $Q_H = 197 \text{ W}$  ve verim  $\eta = \%3,4$  olarak ölçülmüştür. TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı  $\Delta T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  değerine getirildiğinde, maksimum gerilim  $V_{\max}$ , kısa devre 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 ve güç eğrilerinin karşılaştırılması sırasıyla; Şekil 3.6, 3.7 ve 3.8'de verilmiştir. Elde edilen eğrilerden matematiksel modelin doğruluğu görülmüştür.



Şekil 3.6. Benzetim ve deney V-I eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 3.7. Benzetim ve deney P eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 3.8. Benzetim ve deney V-I-P eğrilerinin karşılaştırılması

### 3.6. Termoelektrik Jeneratör Matlab/Simulink Benzetimi ve Prototip Performans Testinin Değerlendirmesi

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 yapımının temelini oluşturan bu benzetim modeli, giriş değerleri sıcaklık farkına bağlı olan bir dc-dc konvertör ve invertör ile birlikte rahatlıkla kullanılabilir.

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  $\Delta T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  iken, çıkış gerilimi  $V_{\max} = 2,2 \text{ V}$ , çıkış gücü  $P_{\max} = 6,71 \text{ W}$  ve verim  $\eta_{\max} = \%3,4$  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.

#### 4. SCADA'LI TEG-PAS SİSTEMİ

Tezin bu bölümünde; TEM'lerin TEJ olarak kullanımında, TEJ verilerinin alınabilmesi ve analiz edilebilmesi için geliştirilen PLC'li yeni bir TEJ güç analiz sistemi (TEG-PAS) açıklanmıştır. TEG-PAS ile TEJ'den elektrik enerjisi elde edilmesinde, TEJ yüzey sıcaklıkları, çıkıştan alınan akım-gerilim değerleri ve debiler anlık olarak ölçülmüştür. Bu parametrelerin tamamı bilgisayarda bulunan bir SCADA programı yardımıyla da bilgisayardan sürekli olarak izlenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Aynı zamanda, bilgisayarın olmadığı ortamlarda anlık TEJ verilerinin gözlemlenmesi için, PLC ile haberleşebilen bir OP kullanılmıştır. TEJ'lerde elektrik üretiminde etkin olan parametrelerin tamamı TEG-PAS'da toplanmıştır. Kurulan ölçüm sistemi prototip TEJ olarak geliştirilen 10 W ve düşük sıcaklıklardaki jeotermal alanlarda kullanmak için ticari olarak tasarlanan 100 W'lık TEJ sistemlerinde kullanılmıştır [41, 47].

##### 4.1. SCADA Sistemleri

SCADA sistemleri; PLC'ler, döngü kontrolörleri, dağıtık kontrol sistemleri ve veri edinim kartları gibi çeşitli cihazlardan saha verilerini sürekli ve gerçek zamanlı olarak toplayan, tanımlanan kıstaslara göre bu bilgileri değerlendirmeye tabi tutup gerektiğinde kullanıcıya erken uyarı mesajları üreten, sistemi etkileyen çeşitli etkenlerin merkezi bir noktadan grafiksel olarak gözetlenmesini ve kontrolünü sağlayan sistemler olarak tanımlanır.

SCADA sisteminin birçok kullanım alanı vardır. Geniş bir coğrafi alana yayılmış, bölgesel ve yerel tesislerin birçoğunda kullanılmaktadır. Başka sistemlere de alt yapı teşkil etmektedir. SCADA sisteminin başlıca kullanım alanları şunlardır:

- Kimya endüstrisi,
- Doğalgaz ve petrol boru hatları,
- Elektrik üretim ve iletim sistemleri,
- Su toplama, arıtma ve dağıtım tesisleri,

- Hava kirliliği kontrolü ve
- Bina otomasyonu sistemleridir.

Genel olarak bir SCADA sisteminden istenilen işlevler dört grupta toplanır. Bunlar:

- İzleme,
- Kontrol,
- Veri toplama ve
- Verilerin kaydıdır.

SCADA sistemleri kullanarak uygulama yazılımı geliştirmek için iletişim protokollerinin tanımlanması ve veri tabanı yapısının belirlenmesi gerekmektedir. İletişim protokolleri SCADA'nın sistemdeki cihazlarla bilgi alış-verişi yapması için birimlerin haberleşmesini sağlar [24, 92–93].

#### **4.1.1. SCADA'nın yapısı**

SCADA üç ana kısımdan oluşur. Bunlar:

- Uzak uç birim (RTU),
- İletişim sistemi ve
- Kontrol merkezi (MTU) sistemidir.

RTU'lar, bulunduğu merkezin sistem değişkenlerine ilişkin bilgileri toplayan, depolayan, gerektiğinde bu bilgileri kontrol merkezine belirli bir iletişim ortamı yolu ile gönderen, kontrol merkezinden gelen komutları uygulayan SCADA'nın bir birimidir. SCADA sistemleri içerisinde yerel ölçüm ve kumanda noktaları oluşturan RTU'lar kumanda kabiliyetine sahiptirler. Ölçülmesi gereken akım, gerilim, aktif ve reaktif güç, güç faktörü gibi değerler ölçülebilirler ve kullanıldığı sisteme ait tüm bilgileri SCADA merkezine gönderebilirler.

RTU'lar gelişen teknoloji ile birlikte birçok aşamadan geçmişlerdir. İlk zamanlarda kontrol sistemlerinde kullanılan RTU'lar mikroişlemcisizdir (CPU). Bu tür RTU'lar

sadece ölçüm yaparak, bu ölçüm bilgilerini merkeze bildirerek merkezden gelen komutlar doğrultusunda işlem görürlerdi. Bu tür RTU'lar ile oluşturulan SCADA sistemlerinde birçok olumsuzluklar ortaya çıkmıştır. Oysaki daha sonradan geliştirilen CPU'lu RTU'lar, tüm olumsuz durumları değerlendirerek alarm uyarıları üretebilir ve bu durumlarda ne yapılacağına anında kendileri karar vererek yerinde müdahale edebilir. Aynı zamanda işlemcili RTU'lar kullanıcının özel isteklerini yerine getirecek şekilde programlanabilir, böylece denetleyici cihazların kullanıcı gereksinimlerini karşılayacak şekilde çalışması sağlanmış olur. Bu esnada diğer işlemcili RTU'larla haberleşerek işlemlerin yerine getirilmesi sağlanmış olur. RTU'lar bilgilerin toplanmasını ve gönderilmesini RS-232 veya RS-485 seri formatta çalışan cihazlarla yaparlar. RTU'ların temel değişmeyen görevleri arasında; bilgi toplama ve depolama ve gerekli kumandaları gerçekleştirmek vardır.

İletişim sistemi, SCADA sisteminin bulunduğu MTU ile RTU arasındaki iletişimin kurulmasını sağlar. Bu iletişim ortamı birden fazla olabilir. Günümüzde, bu ortamlar üzerine kurulu bir takım iletişim standartları ve bu standartların oluşturduğu iletişim protokolleri vardır. İletişim ünitesi MTU'dan gelen ve bu protokoller dâhilinde oluşturulmuş komutları değerlendirerek, gerekli işlemleri ana işlemciyle temasa geçerek başlatır. Bu işlemlerin sonunda da uygun cevapları aynı protokoller çerçevesinde düzenleyerek MTU yönünde iletişim ortamına yollar. RTU ve MTU arasındaki iletişim, genellikle uzun mesafe olduğu için seri iletişimdir. İletişim sistemlerinde kullanılan bağlantı türleri fiziksel bağlantı biçimine ve ağ bileşenlerinin coğrafi konumuna göre yerel (LAN) ve geniş alan ağları (WAN) olarak sınıflandırılırlar. LAN'lar küçük boyutlu iletişim ağlarıdır. SCADA sisteminde MTU ile RTU küçük bir alan içerisinde kuruluyorsa bu durumda iletişim bağlantısı yerel alan ağ şeklini alır. LAN küçük bir alanla sınırlı iken, WAN birbirinden çok uzak olan sistemleri haberleştirir. Birimler birbirinden coğrafi olarak yayılmış uzak mesafelerde bulunuyorsa bu durumda iletişim bağlantısı bu ağ türüne dönüşür.

MTU birimi yöneticilerin sistem operatörlerini, bakım elemanlarını ve tüm işletim sistemini gerçek zamanlı görsel olarak izleyebildikleri fiziksel çevredir. MTU birimleri SCADA sisteminde geniş bir alana yayılmış RTU birimleriyle koordineli



çalışması, gelen bilgilerin yorumlanması, kullanıcılara sunulması, ayrıca kullanıcıların isteklerini RTU birimlerine ileterek merkezi kumandanın sağlanması işlevlerine SCADA sisteminde MTU yerine getirir.

Algılayıcılar saha, süreç ve sisteme ait verilerin toplandığı SCADA kontrol sistemlerinin en alt seviyesini ve önemli bir parçasını oluştururlar. Bunlar fiziksel ve elektronik algılama cihazları olup, sistem için gerekli ve sistem içinde yer alan denetleyicilerdir. Fiziksel çevrenin bilgilerini bu seviyede elektrik/elektronik standart sinyallere çevirerek SCADA sistemine gönderirler [91–92].

#### **4.2. Programlanabilir Lojik Denetleyici**

PLC, algılayıcılardan aldığı bilgiyi kendine verilen programa göre işleyen ve sonuçlarını iş elemanlarına aktaran, aynı zamanda SCADA sistemine bilgileri gönderen ve SCADA sisteminden bilgileri alarak sistem elemanlarını kontrol eden bir mikrobilgisayar sistemidir. İlk olarak, röleli kontrol sisteminin olumsuz yönlerini gidermek amacıyla geliştirilmiştir. Zamanla özellikleri geliştirilerek ardışık kontrol, doğrusal ve döner hareket denetimi, sıcaklık, basınç, nem, hız, makine veya süreç hakkında veri toplama, izleme ve raporlama gibi amaçlarla endüstriyel kontrol alanlarında kullanılabilir hale getirilmiştir. Her ne kadar farklı firmalara ait PLC'lerin farklı özellikleri olsa da programlama mantığı birbirlerine çok benzemektedir. Başlangıçta yalnızca basit işlemler için kullanılan PLC'ler günümüzde çeşitli firmalar tarafından geliştirilerek çok daha karmaşık sorunları çözebilecek özelliklerle donatılmış ve endüstriyel kontrol alanlarında güvenle kullanılmaya başlanmıştır.

PLC'ler içerisinde CPU, giriş–çıkış (IO) ara yüzleri ve hafıza bulduran bir endüstriyel mikrobilgisayardır. PLC ile kontrolde, programlama konsolundan PLC'ye IO sinyalleri ve kontrol içerikleri gönderilir. Sonuç olarak da çıkış sinyalleri, çıkış elemanlarına yöneltilir. IO gereçleri ve PLC arasındaki sinyal değişiminde giriş arabirimi ve çıkış arabirimi olarak adlandırılan tekrarlayıcı gereklidir. Giriş elemanı olarak buton, anahtar, seçici anahtar, dijital anahtar, sınır anahtarı, fotoelektrik anahtar, yaklaşım anahtarı, debimetre, termokupl vb. kullanılabilir. Bu elemanlardan

gelen sinyaller PLC'nin CPU'suna giriş arabirimi üzerinden gönderilir. CPU, hafızaya kaydedilmiş olan programın içeriğine ve giriş sinyallerine göre çıkış sinyallerini kontrol eder. Çalıştırılması istenen donanımlar çıkış elemanı olarak isimlendirilir. Elektromanyetik valf, lamba, küçük güçlü motor vb. alıcılar elektriksel değerleri uygun olması durumunda doğrudan PLC'ye bağlanabileceği gibi transistör, röle vb. diğer kontrol elemanları üzerinden de kontrol edilebilirler.

PLC'ler diğer kontrol cihazlarına nazaran birçok avantajlara sahiptirler. Bunlardan bazıları şunlardır:

- Programlama ile karmaşık kontrol devreleri yapılabilirler,
- Programı değiştirerek kontrolde istenilen değişiklik yapılabilirler,
- Yarı iletken teknolojisinden dolayı yüksek güvenilirliğe sahiptirler,
- Programın değiştirilmesi ile tekrar tekrar ve farklı yerlerde kullanılması mümkündür,
- Çalışma limitine kadar genişlemesi mümkündür,
- Üniteleri değiştirilebilir ve tamir edilebilir,
- Çok farklı modellerde üretilirler ve genelde de küçük boyutludur,
- Tasarım ve fabrikasyon için fazla zamana ihtiyaç yoktur ve
- Karmaşık kontrol işlemlerinin yapılabilmesinde pahalı değildir [94–96].

#### **4.3. Termoelektrik Jeneratör Veri Edinim Sistemleri**

TEJ'lerin veri edinimleri için yapılan çalışmalarda değişik ölçüm cihazları kullanılmıştır. Genellikle, anlık değerlerinin ölçülmesinde el tipi ölçü cihazları tercih edilmiştir. TEJ deneylerinde elde edilen verilerin bilgisayar ortamına aktarılması için ise veri edinim kartları kullanılmıştır. Elde edilen verilerin bilgisayar ortamında kayıt altına alınması için ayrı bir bilgisayar programı yazılmış veya hazır programlardan faydalanılmıştır. Gold ve ark [97] TEM'lerin güç üretim performansı ve mikro-elektrik ölçümü için yaptıkları deneyler için bir termoelektrik test sistemi tasarladılar. Onların donanımı National Instrument LabView yazılımıyla çalışan standart bir personel bilgisayarı, veri edinim (DAQ) PC kartı, Pico Teknolojili termokupl veri

biriktirme ünitesi, çok sayıda termokupldan meydana getirildi. Bu sistem Melcor CP1.4–127–05L modül için denendi. Eklund ve ark. [27] DAQ bordu kullandılar. Han ve ark. [28] analizler için TEJ sisteminin sıcaklık ve gerilim çıkışı kararlı hala ulaştıktan sonra bir DAQ kullandılar. Kim [29] ve Hasebe [30] bir DAQ PC, veri depolayıcı Agilent 34970A ve K–tip termokupllar kullanarak çevre, ısı giriş sıcaklığı ve ısı çıkış sıcaklıklarını izlediler. Singh ve ark. [31] ve Champier ve ark. [61] iki elle tutulan cihaz ve bir veri depolayıcıyla tüm TEJ verilerini izlediler. Küçükkömürler [32], Zhou ve ark. [33] ve Rinalde ve ark. [34] el tipi ölçüm cihazlarını kullandılar.

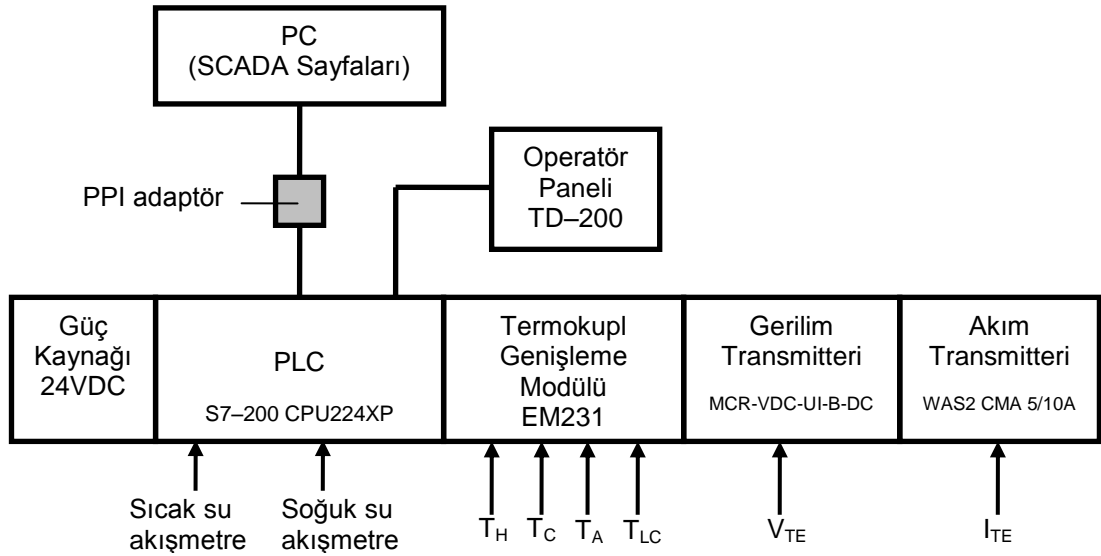
Bu çalışmada ise, TEJ’lerden elde edilen verilerin ölçülmesi için PLC’li veri edinim ve test ölçüm sistemi kullanılmıştır. TEJ’in ölçüm verileri yeni test ölçüm ve SCADA sisteminde toplanmıştır. Bu veri edinim sistemi yardımıyla TEJ’in sıcak/soğuk yüzeylerin sıcaklıkları, sıcak/soğuk yüzeylerden geçen akışkanın debisi, akım, gerilim ve güç gibi değerleri ölçülmüştür. Ölçülen veriler PLC cihazına bağlanmış ve programı yazılmış bir OP’den anlık izlenmiştir. Ölçülen verilerin bilgisayarda da izlenebilmesi için bir SCADA sistemi programı yazılmıştır. SCADA programı yardımıyla tüm veriler bilgisayarda görselleştirilmiştir. Aynı zamanda ölçülen verilerin analizlerinin yapılabilmesi için tüm veriler MySQL veri tabanına aktarılmıştır. Tüm TEJ hesaplamaları hem OP’de hem de SCADA programlarında yapılmıştır. Kurulan TEG–PAS sisteminin kabiliyetleri diğer sistemlerle karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.1’de verilmiştir [41].



#### 4.4. TEG–PAS Sistemi

##### 4.4.1. TEG–PAS sisteminin kurulumu

TEJ'den elde edilen elektrik enerjinin, TEJ'lerin sıcak/soğuk yüzey sıcaklıklarının, verdikleri gerilim ve akımın, TEJ sisteminden geçen sıcak/soğuk suların debi miktarlarının sürekli olarak izlenmesi kayıt altına alınması amacıyla kurulan TEG–PAS'ın blok diyagramı Şekil 4.1'de verilmiştir. TEG–PAS cihazının iç ve dış görünüşleri ise Resim 4.1'de verilmiştir. Burada kullanılan elemanlar DIN rayına monte edilmiş güç kaynağı, PLC, termokupl genişleme modülü (EM), gerilim transmitteri, akım transmitteri, ayarlı direnç, OP, PLC–OP paneli iletişim kablosu, PLC bilgisayar iletişim kablosu, bilgisayar ve iki tane akış debimetresinden oluşmaktadır.



Şekil 4.1. TEG–PAS blok diyagramı



Resim 4.1. TEG-PAS

TEJ güç analizi için geliştirilen TEG-PAS'ın genel karakteristik özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Çizelge 4.3'de ise TEJ'lerin TEG-PAS ile doğrudan ve dolaylı ölçülebilecek parametreler verilmiştir.

Çizelge 4.2. TEG-PAS'ın genel karakteristik özellikleri

Karakteristik	Özellik
Uygulama alanı	TEJ'ler
Yaptığı ölçümler	Akım, gerilim, sıcak-soğuk debiler, sıcaklıklar
TE çalışma modu	Elektrik üretimi
Besleme gerilimi	AC 220 V
Elektrik güç tüketimi	< 30 W
Ağırlık	2,5 kg
Bilgisayar haberleşmesi	RS-485
Akım ölçme aralığı	0-10 A DC
Gerilim ölçme aralığı	0-550 V DC
Sıcaklık ölçme aralığı	-270 ~ 400 °C (T tip termokupl)
Debi ölçme aralığı	Minimum debi: 1 m <sup>3</sup> /h, Maksimum debi: 15 m <sup>3</sup> /h (1" boru ölçüsü için)

Çizelge 4.3. TEG–PAS ile ölçülen parametreler

<b>Doğrudan ölçülen parametreler</b>	<b>Simge</b>	<b>Birim</b>	<b>Ölçüm aralığı</b>	<b>Doğruluk</b>
Sıcaklıklar	$T_A, T_B, T_C, T_D$	°C	- 270...+400	± 0,6
TEJ'den çekilen akım	I	A	0...10	± 0,01
TEJ uçlarındaki gerilim	V	V	0...550	± 0,01
Sıcak su debisi	$d_H$	m <sup>3</sup> /h	1...15	± 0,01
Soğuk su debisi	$d_C$	m <sup>3</sup> /h	1...15	± 0,01
<b>Dolaylı ölçülen parametreler</b>				
TEJ elektrik gücü	P	W	0...5,5 kW	
TEJ verimi	$\eta$			
Sıcaklık farkları	$\Delta T_{A-B}, \Delta T_{C-D}$	°C		
TEJ elektriksel iç direnci	$R_{in}$	$\Omega$		
TEJ giriş-çıkış sıcaklık farkları	$\Delta T$	°C		
TEJ sıcak su ısı enerjisi giriş-çıkış gücü	$Q_H$	W		
TEJ soğuk su ısı enerjisi giriş-çıkış gücü	$Q_C$	W		
TEJ maksimum gücü	$P_{Lmax}$	W		

TEG–PAS sistemin beslemesi 24 VDC, 150 W gücündeki kesintisiz güç kaynağıyla sağlanmıştır. TEJ'in sıcak/soğuk taraf sıcaklıkları T tipi nokta uçlu termokupl algılayıcılarıyla ölçüldükten sonra, dört tane sıcaklık algılayıcısı bağlanabilen Siemens marka EM231 EM sayesinde S7–200 CPU224XP PLC'ye aktarılmıştır. EM231 yardımıyla analog sıcaklık sinyalleri sayısal sinyallere çevrilmiş ve işlenmiştir. TEJ'in ürettiği akım ve gerilim değerlerinin algılanabilmesi için, sırasıyla, WeidMüller marka WAS2 CMA 5/10A DC akım transmitteri ve Phoenix Contact marka MCR-VDC-UI-B-DC gerilim transmitteri kullanılmıştır. Kullanılan akım transmitteri sayesinde 10 A'e kadar DC akımlar, gerilim transmitteri sayesinde

de 550V DC'ye kadar gerilimler algılanabilmektedir. Akım–gerilim analog verilerini sayısal verilere çevirmek için PLC'nin AN0 ve AN2 analog girişleri kullanılmıştır. Bu sistem yaklaşık 5 kW gücünde TEJ sistemlerinde de kullanılabilir. TEJ soğuk ve sıcak yüzeyinden geçen suyun debisinin ölçümünde iki tane akış transmitteri kullanılmış ve bunların palsleri direkt olarak PLC girişlerine verilmiştir. Akış metre palslerini algılamak için PLC'nin hızlı sayıcılarından faydalanılmıştır. Alınan tüm verilerin anlık değerlerinin gözlemlenmesi için Siemens TD200 OP kullanılmıştır. Kullanılan OP iki satırlı ve her bir satırına 20 karakter alabilmektedir. Üzerinde fonksiyon tuşları da bulunmaktadır. Bu OP'de 4 noktadan gelen sıcaklık değerleri, sıcak/soğuk yüzey arasındaki sıcaklık farkı, akım, gerilim, güç, sıcak/soğuk debilerin değerleri ve diğer verim hesaplamaları anlık olarak izlenmektedir. Akım, gerilim ve sıcaklık ölçümlerinin ayarları Fluke 725, Multifunction Process Calibrator cihazıyla yapılmıştır.

#### **4.4.2. Programlanabilir lojik denetleyici programı**

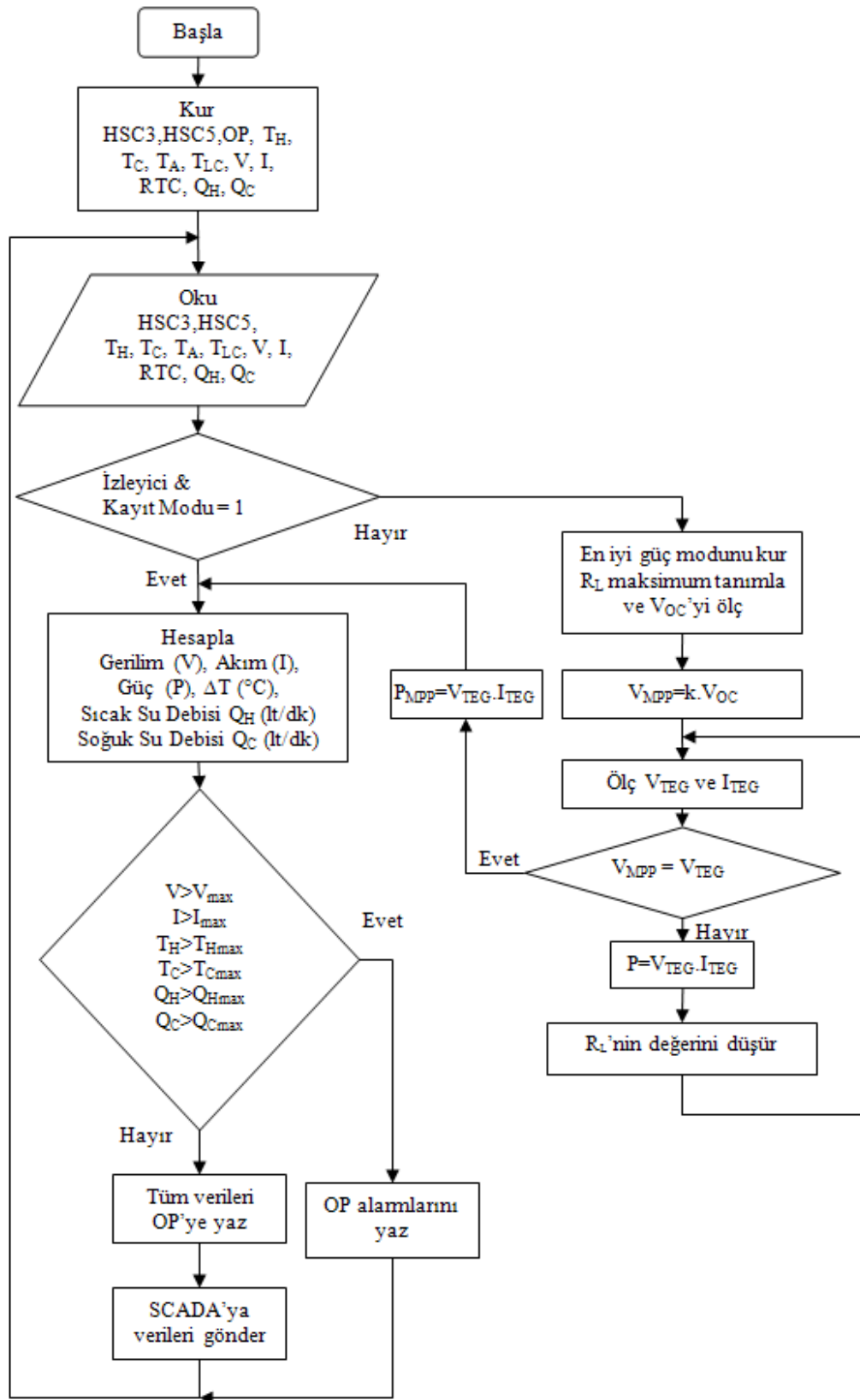
TEJ-TEs sisteminde kullanılan Siemens S7–200 CPU224XP PLC sistemin beyni hükmündedir. PLC'nin programı STEP–7 MicroWin programı ile yazılmıştır. PLC'nin veri girişleri sıcak/soğuk su debimetreleri, TEJ sıcak/soğuk yüzey sıcaklıkları, çevre sıcaklığı, soğuk su çıkış sıcaklığı, TEJ çıkış akımı ve TEJ çıkış gerilimidir.

Kullanılan PLC'nin iki tane iletişim portu vardır. Bunların sayesinde PLC içerisindeki veriler hem OP'den izlenebilmekte hem de SCADA programına aktarılabilir. Eğer tek portlu bir PLC seçilseydi, OP ve SCADA aynı anda kullanılamayacaktı. PLC'nin iki portu sayesinde istenildiğinde SCADA sistemi ile OP birlikte çalıştırılabilir. SCADA'dan bağımsız çalışılmak istenildiğinde ise OP'nin bağlı olduğu PLC portundan veriler okunup anlık olarak OP'den izlenebilmektedir.

PLC program algoritması Şekil 4.2'de verilmiştir. TEJ çıkış akım ve gerilim değerleri PLC'nin, sırasıyla AI0 ve AI2 girişlerine bağlanmıştır. Kullanılan PLC'nin



analog saklayıcıları 16 bitlidir. Kullanılan transmitterler 0–10 V analog çıkış verecek şekilde kalibre edilmiştir. Gelen 0–10 V arası sinyaller PLC’de dijitale çevrilerek gerekli matematiksel hesaplamalar yapıldıktan sonra TEJ çıkış akımı, gerilimi ve gücü bulunmuştur. Sıcak/soğuk su debilerinin ölçümü için PLC’nin hızlı sayıcı girişleri DI1 ve DI4 kullanılmıştır. Bu palslerin sayılması PLC’nin hızlı sayıcıları olan HSC3 ve HSC5 ile yapılmıştır. HSC3 ve HSC5 herhangi bir başlangıç vermeksizin sürekli olarak gelen palsleri sayacak şekilde yapılandırılmıştır. Her gelen 10 palste HSC3 ve HSC5 kesmeleri oluşturulmuştur. Her kesme alt programında sıcak su debisi için Sayıcı 0 (C0) değeri, soğuk su debisi için de Sayıcı 1 (C1) değeri bir arttırılmıştır. Kesmenin sonunda yine her on palste bir kesme oluşması için HSC3 ve HSC5 kurulmuştur. lt/dk debi hesabının yapılması için PLC’nin gerçek zaman saati kurularak her bir dakikadaki palsler sayılmış ve darbe değeri lt/dk olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. PLC programı akış diyagramı

TEJ'in yük ve sıcaklığındaki değişimler TEJ'in verebileceği maksimum gücünün dışındaki bir gerilim değerinde çalışmasına neden olur. Bu yüzden, TEJ'in en yüksek gücü üretmesi için maksimum güç izleyici (MPPT) algoritmalarına ihtiyacı vardır. TEJ'ler için pek çok MPPT algoritması vardır ve bunların çoğu PV sistemlerde kullanılanların TEJ'lere uyumlaştırılmasıyla oluşturulmuştur [19]. Burada maksimum gücün izlenmesi için açık devre gerilim yöntemi manüel olarak uygulanmıştır. Açık devre gerilim yöntemi genellikle sabit gerilim yöntemi olarak bilinmektedir. TEJ'in açık devre gerilimi  $V_{OC}$  maksimum gücün alındığı gerilim  $V_{MPP}$  değerinin yaklaşık olarak iki katı değerindedir. Aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir:

$$V_{MPP} = kV_{OC} \quad (4.1)$$

Burada k sabit sayıdır ve TEJ'in I-V karakteristikleri lineer olduğu için, genellikle 0,5 olarak alınır. Bu algoritma TEJ'in elektrik yükünün  $R_L$  manüel olarak değiştirilmesiyle maksimum gücün alındığı maksimum gerilim miktarının belirlenmesiyle yapılmıştır. Eş. 4.1'den maksimum gücün elde edildiği gerilim  $V_{MPP}$  değeri hesaplanmıştır.

Dört farklı sıcaklık değerinin PLC ortamına aktarılması için EM231 TC genişleme modülü kullanılmıştır. Bunlar PLC'nin AI4, AI6, AI8 ve AI10 girişlerini oluşturmuştur. Sıcaklık algılamaları 400 °C'ye kadar sıcaklık algılaması yapabilen T tipi termokupl sıcaklık algılayıcılarıyla gerçekleştirilmiştir.

OP'nin programı MicroWin programının kurulum sihirbazı kullanılarak yazılmıştır. OP de dört menü vardır: hesaplamalar, akışlar, I\_V\_P ve sıcaklıklar. PLC'den PC SCADA programına verilerin aktarılması için noktadan noktaya arayüz kablosu (PPI-RS485) kullanılmıştır.

#### 4.4.3. SCADA programı

Yazılan SCADA programının ara yüz sayfası Resim 4.2’de verilmiştir. SCADA programı sıcaklıklar, debiler, V\_I\_P\_R ve tüm veriler olmak üzere dört sayfadan meydana gelmektedir. Kullanıcı görmek istediği TEJ verilerine sayfalar yardımıyla rahatlıkla ulaşabilmektedir. Verilerin geçmişe yönelik değerlerini excel, pdf gibi programlara eğerilerin üzerine gelerek aktarabilmektedir.

TEJ parametreleri PLC’de işlenip RS485 iletişim hattıyla ticari olarak bulunan WinTr SCADA programına aktarılmıştır. Bu program sayesinde PLC’de işlenen tüm veriler bilgisayar ortamında görselleştirilmiştir. Aktarım işlemi RS485 haberleşme protokolüyle 9600 baud/rate hızında bilgisayarın seri portundan yapılmıştır. Bu SCADA programında akım, gerilim, güç, soğuk/sıcak taraf sıcaklıkları ve sıcaklık farkı değerleri bir saniye zaman aralıklarıyla MySQL veri tabanında kayıt altına alınmıştır. Veriler SCADA programında kaydedilmeli olarak programlanmıştır. Bu veriler istenildiği zaman TEJ çevrim verimliliğinin hesaplanması, analizlerinin yapılabilmesi ve herhangi bir arızanın tespiti için saklanılmıştır. TEJ sisteminde etkin olan ve TEJ’den elde edilen verilerin tamamı SCADA’da anlık olarak gözlenmekte ve verilerin tamamının zamana bağlı olarak grafikleri elde edilmektedir. İstenilen zaman aralıklarındaki verileri daha sonradan kullanmak amacıyla raporlama yapılabilmektedir. Bunun sayesinde üretilecek olan TEJ’lerin uzun süreli verileri kaydedilecek ve analizleri yapılabilecektir. Sistemde olabilecek arızaları bildirmek ve uyarıları kullanıcılara iletebilmek amacıyla alarm ve uyarılar programa eklenmiştir.



Resim 4.2. SCADA program sayfası

Bu bölümde, TEJ performans analizlerinin gerçekleştirilmesi için geliştirilen TEG-PAS açıklanmıştır. Ölçülen TEJ parametrelerinin, sıcak/soğuk taraf sıcaklıkları, sıcak/soğuk su debileri, sıcaklıklar arasındaki farklar, elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri bilgisayardan izlenebilmesi ve kayıt altına alınabilmesi için bir SCADA programının geliştirilme aşamaları açıklanmıştır. Bilgisayardan bağımsız verilerin anlık izlenebilmesi amacıyla PLC ile haberleşebilen bir OP programı yazımı ve kullanımı verilmiştir. Düşük sıcaklıklı jeotermal alanlarda kullanılmak üzere tasarlanan yeni yaklaşık 100 W'lık TEJ'in üzerindeki kullanımı ve sonuçları bu TEJ'in detaylı analizlerinin gerçekleştirildiği Bölüm 5'de verilmiştir.

## 5. DÜŞÜK JEOTERMAL SICAKLIKLAR İÇİN YENİ TİCARİ PORTATİF TERMOELEKTRİK JENERATÖR TASARIMI VE UYGULAMASI

### 5.1. Jeotermal Enerji

Jeotermal kelimesi jeo–yer ve termal–ısı kelimelerinden oluşur. Jeotermal yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş ısının oluşturduğu, kimyasallar içeren sıcak su, buhar ve gazlardır. Jeotermal enerji de bu jeotermal kaynaklardan ve bunların oluşturduğu enerjiden doğrudan veya dolaylı yollardan faydalanmayı kapsamaktadır. Jeotermal enerji yeni, yenilenebilir, sürdürülebilir, tükenmez, ucuz, güvenilir, çevre dostu, yerli ve yeşil bir enerji türüdür.

Jeotermal kaynaklar ile:

- Elektrik enerjisi üretimi,
- Merkezi ısıtma, merkezi soğutma, sera ısıtması vb. ısıtma/soğutma uygulamaları,
- Proses ısısı temini, kurutma işlemleri gibi endüstriyel amaçlı kullanımlar,
- Karbondioksit, gübre, lityum, ağır su, hidrojen gibi kimyasal maddelerin ve minerallerin üretimi,
- Termal turizmde kaplıca amaçlı kullanım,
- Düşük sıcaklıklarda (30 °C'ye kadar) kültür balıkçılığı,
- Mineraller içeren içme suyu üretimi,

gibi uygulama ve değerlendirme alanlarında kullanımlar gerçekleştirilmektedir.

Jeotermal enerji;

- Yenilenebilir, sürdürülebilir, tükenmez bir enerji kaynağı olması,
- Türkiye gibi jeotermal enerji açısından şanslı ülkeler için bir öz kaynak teşkil etmesi,
- Temiz ve çevre dostu olması; yanma teknolojisi kullanılmadığı için sifıra yakın emisyonu sebebiyet vermesi,

- Konutlarda, tarımda, endüstride, sera ısıtmasında ve benzeri alanlarda çok amaçlı ısıtma uygulamaları için ideal şartlar sunması,
- Rüzgâr, yağmur, güneş gibi meteoroloji şartlarından bağımsız olması,
- Kullanıma hazır niteliği,
- Fosil enerji veya diğer enerji kaynaklarına göre çok daha ucuz olması,
- Arama kuyularının doğrudan üretim tesislerine ve bazen de reenjeksiyon alanlarına dönüştürülebilmesi,
- Yangın, patlama, zehirlenme gibi risk faktörleri taşımadığından güvenilir olması,
- %95'in üzerinde verimlilik sağlaması,
- Hidroelektrik, güneş, rüzgâr ve fosil enerji gibi diğer enerji türleri üretiminin aksine tesis alanı ihtiyacının asgari düzeylerde kalması,
- Yerel niteliği nedeniyle ithalinin ve ihracının uluslararası durum, krizler, savaşlar gibi faktörlerden etkilenmemesi ve
- Konutlara fueloil, mazot, kömür, odun taşınması gibi problematikler içermediği için yerleşim alanlarında kullanımının rahatlığı

gibi nedenlerle büyük avantajlar sağlamaktadır.

Jeotermal enerji yağmur, kar, deniz ve magma sularının yeraltındaki gözenekli ve çatlaklı kayaç kütlelerini besleyerek oluşturdukları jeotermal rezervleri, yeraltı ve reenjeksiyon koşulları devam ettiği müddetçe yenilenebilir ve sürdürülebilir özelliklerini korur. Kısa süreli atmosfer koşullarından etkilenmez.

Jeotermal enerjide reenjeksiyon işlemi yapılır. Bu reenjeksiyon işlemi, jeotermal rezervuarlardan yapılan sondajlı üretimlerde jeotermal akışkanın çevreye atılmaması ve rezervuarı beslemesi bakımından, işlevi tamamlandıktan sonra tekrar yeraltına gönderilmesi işlemidir. Reenjeksiyon birçok ülkede yasalarla zorunlu hale getirilmiştir [98].

Jeotermal enerji kaynakları en çok jeotermal sıvının entalpisine (sıvının ısı içeriği) göre sınıflandırılır:

- Düşük 20 – 70 °C
- Orta 60 – 150 °C ve
- Yüksek 150 °C

olarak üç gruba ayrılmaktadır. Kaynağın sıcaklığına göre de jeotermal enerjinin kullanım alanları değişmektedir. Kullanım alanları Çizelge 5.1’de verilmiştir [99].

Çizelge 5.1. Jeotermal enerjinin, kaynağın sıcaklığına göre kullanımı [99]

Sıcaklık (°C)	Kullanım alanı	Elektrik Üretimi
180	Amonyum absorpsiyonu ile soğutma	Konvansiyonel
170	Kâğıt hamuru yumuşatma	
160	Balık ürünlerinin kurutulması	
150	Bayer’s yoluyla alüminyum edesi	
140	Konverse üretimi	
130	Şeker endüstrisinde buharlaştırma	Binary saykıl
120	Buharlaştırma	
110	Çimento bloklarının kurutulması	
100	Organik maddelerin kurutulması	
90	Balık kurutma	–
80	Konut ve sera ısıtması	–
70	Soğutma	–
60	Havalandırma	–
50	Hayvancılık	–
40	Zemin ısıtma	–
30	Yüzme havuzları, eritme	–
20	Balık çiftlikleri	–

## 5.2. Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi

Hazne sıcaklığı 200 °C ve daha fazla olan jeotermal akışkandan elektrik üretimi gerçekleşmektedir. Ancak günden güne gelişmekte olan yeni teknolojilere göre 150

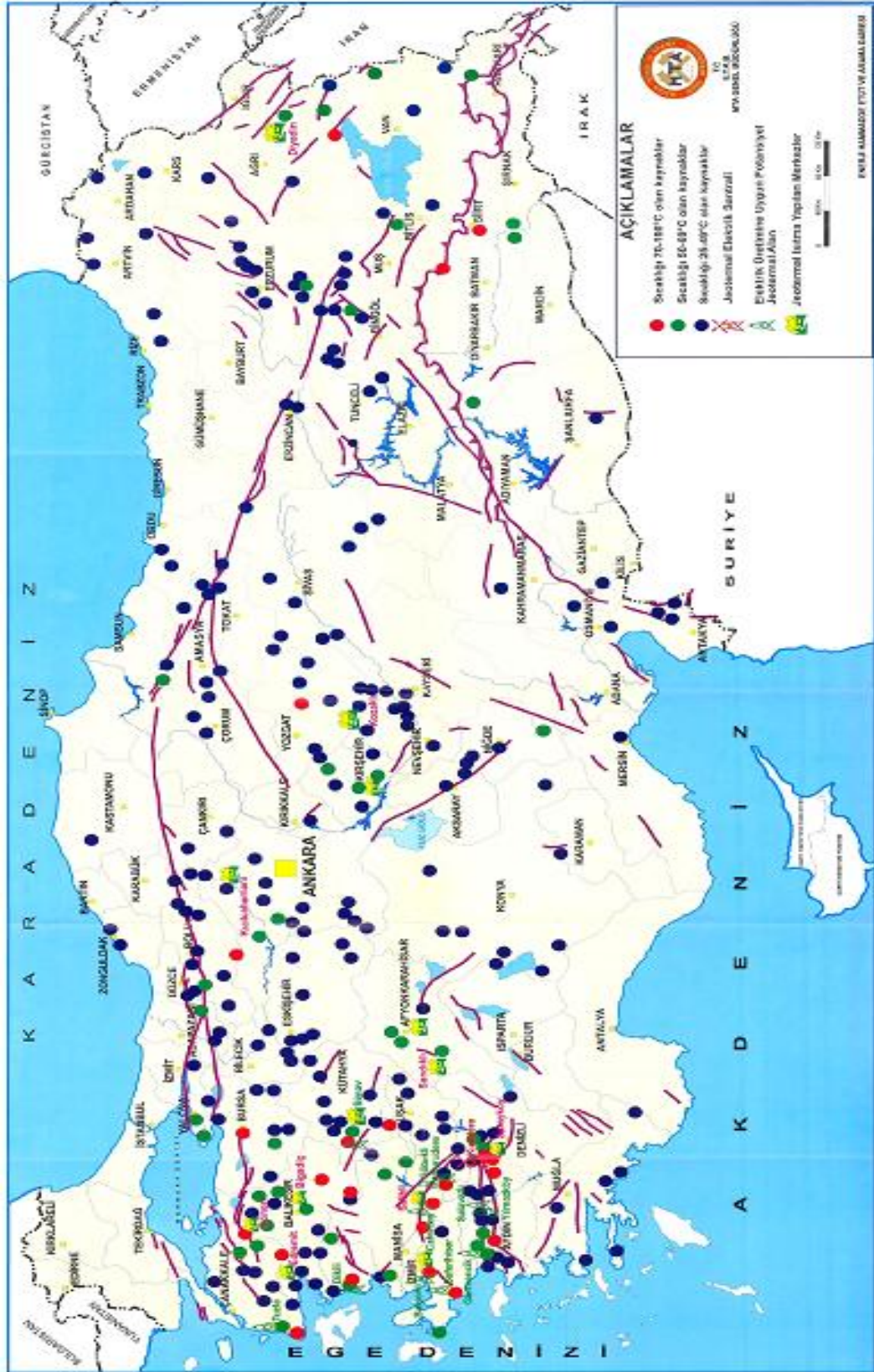


°C'ye kadar düşük hazne çıkışlı akışkandan da elektrik üretilebilmektedir. Son yıllarda geliştirilen ve ikili (binary) çevrim olarak adlandırılan bir sistemle, buharlaşma noktaları düşük gazlar (freon, izobütan vb.) kullanılarak  $70\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar sıcaklıktaki sulardan türbinlerle elektrik üretilebilmektedir. Jeotermal enerjiden elektrik üretimi ilk olarak 1904 yılında İtalya'da olmuştur. Jeotermal akışkandan elektrik üretimi başta A.B.D. ve İtalya' da olmak üzere Japonya Yeni Zelanda, El Salvador, Meksika, İrlanda, Filipinler, Endonezya, Türkiye vd. ülkelerde yapılmaktadır.

Dünyada halen kurulu gücü 8912 MW (2005 yılı verileri ile) olan jeotermal enerjiden elektrik üretimi gün geçtikçe artmaktadır. Buhar ve sıvı baskın sistemlerin elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi için çeşitli sistemler mevcuttur [98, 100].

Türkiye enerji için dışa bağımlı ülkeler arasında yer alır ve enerjinin büyük bir bölümünü dış ülkelere temin etmektedir. Fakat Türkiye jeotermal enerjide dünya ülkeleri arasında beşinci sırada, Avrupa ülkeleri arasında da birinci sırada yer almaktadır. Jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üretimi için sayılı türbinli elektrik enerjisi santrallerine sahiptir. Bu jeotermal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürülmesinde pek de verimli olduğu söylenemez. Jeotermal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için yöntemlerden biri de TEJ'lerin kullanımınıdır. Bu TEJ'ler düşük verimliliğe ve yüksek kurulum maliyetlerine sahip olmasına rağmen, uzun ömürlü ve kullanılan enerjinin yenilenebilir olması nedeniyle çok az da olsa olsun Türkiye'nin enerji ihtiyacını karşılayabilecek ve var olan jeotermal enerji potansiyelini en verimli bir şekilde kullanmasını sağlayacaktır. Türkiye'nin jeotermal kaynakları dağılımı ve uygulama haritası Harita 5.1'de verilmiştir [99]

Türbinli yöntem kullanılarak elektrik enerjisi üretiminde kullanımı en kolay olan sahalar kuru buhar sahalarıdır. Kuyudan alınan buhar filtreden geçirilerek bir yoğunlaştırıcı türbine gönderilir. Kondensere ilave olarak doğal ya da mekanik soğutma kulesi kullanılır [101].



Harita 5.1. Türkiye jeotermal kaynaklar dağılımı ve uygulama haritası [99]

Sıvı baskın sahalarda kullanılan türbinler:

- Atmosferik Egzozlu Konvansiyonel Buhar Türbinleri,
- Yoğunlaştırılmalı Konvansiyonel Buhar Türbinleri,
- Çift Kademeli Buharlaştırma,
- Çoklu Buharlaştırma,
- İkili Çevrim Santralleri,
- Hibrit Fosil Jeotermal Sistemler ve
- Toplu Akış

türbinleridir.

Atmosferik egzozlu konvansiyonel buhar türbinleri, en basit ve ilk yatırım masrafları açısından en ucuz türbinlerdir. Bu tip bir santralde, jeotermal akışkan önce ayırıcıya gelir. Burada sıvı ve buhar fazları ayrılır. Buhar fazı bir buhar türbinini besler ve çürük buhar direkt olarak atmosfere atılır.

Yoğuşturılmalı konvansiyonel buhar türbinleri, atmosferik egzoz tasarımının termodinamik olarak gelişmişidir. İki fazlı akışkan önce ayırıcıda sıvı ve buhar fazlarına ayrılır. Buhar, türbinden direkt atmosfere atılmak yerine çok düşük bir basınçta tutulan (yaklaşık 0.12 bar) bir yoğunlaştırıcıya atılır.

Çift kademeli buharlaştırma da kuyubaşı akışkanı önce ayırıcıya gider, buhar ve sıvı fazlarına ayrılır. Buhar bir yüksek basınç türbinine, su ise bir buharlaştırıcıya gönderilir. Burada düşük bir basınçta değiştirilen sıvının kalanı enjeksiyona, elde edilen buhar alçak basınç türbinine gönderilir. Böylece sistem verimi arttırılmış olur. Çoklu buharlaştırma da ise ayırıcıdan ayrılan sıvı ikinci bir ayırıcıya gönderilir, ayırıcı sayısı ekonomik kısıtlar çerçevesinde arttırılabilir.

Jeotermal sahalarda en önemli atık ısı kaynağı ayırıcıda ayrılmış sıvıdır. Konvansiyonel buhar türbinleri sadece buhar kullandıkları için kalan büyük miktarlardaki sıvı genelde yerüstü sularına atılmakta ya da yeraltına enjekte edilmektedir. Binary teknolojisi, orta-düşük sıcaklıklı kaynaklardan elektrik üretmek,

termal kaynakların kullanımını arttırarak atık ısıyı geri kazanmak amacıyla geliştirilmiştir. Binary sistemler, düşük kaynama sıcaklıklı ve düşük sıcaklıklarda yüksek buhar basıncına sahip ikincil bir çalışma akışkanı kullanırlar. Bu ikincil akışkan, konvansiyonel bir çevrime uygun olarak çalışır. Uygun bir çalışma akışkanı ile binary sistemler, 80–170 °C aralığındaki giriş sıcaklıklarında çalışabilirler.

Hibrit fosil-jeotermal sistemler de jeotermal enerji, ya ön ısıtıcı olarak, ya da kızgın buhar elde edilmesinde kullanılır. Toplu akış sistemlerinde ise iki fazlı buhar/su karışımlarından doğrudan enerji elde etmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu tip santrallerin ekonomisi henüz iyi belirlenememiştir. Çünkü işletme tecrübesi 5 yıldan fazla değildir [98–101].

### **5.3. Termoelektrik Jeneratör Çalışmaları**

TEJ'ler hem jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üretmekte hem de kullanılan jeotermal enerjinin geri kazandırılmasında enerji verimliliğine katkıda bulunmaktadır. TEJ'lerin kullanım alanları çok çeşitlidir. Kullanım alanlarına örnek olarak; elektrik enerjisinin olmadığı alanlarda bataryanın yerine geçebilmesi için kendinden güçlendirilmiş kablosuz algılayıcılar, güneş enerjisinin direkt olarak elektriğe çevrilmesi ve şebeke bağlantılı/bağlantısız sistemler, insanın vücut sıcaklığıyla çevre sıcaklığı arasındaki farkı kullanan biyomedikal sistemler, az enerji ihtiyacına gereksinim duyan telemetri sistemleri, yanma nedeniyle ısı enerjisinin çok fazla açığa çıktığı ve bunun çoğunun çevreye bırakıldığı içten yanmalı motorlu araçlar için motor soğutucusu kullanan ısı geri kazanım sistemleri, elektrik hatlarının bulunmadığı alanlarda ısınmış yollardan elektrik enerjisi üretimi ve uyarı amaçlı sinyalizasyonda kullanımı, şebekeden bağımsız enerji elde edinimi, uzay çalışmaları gibi alanlar verilebilir.

Zorbas ve ark. [102] TEJ'i arabanın egzozunda kullanmışlar ve yaklaşık olarak TEJ'in sıcak taraf sıcaklığı 220 °C'de iken 2,6 W elde etmişler ve TEJ'in verimini de %5,4 olarak hesapladılar. Bununla arabanın elektronik devrelerini ve alıcılarını beslemişlerdir. Ayrıca, TEJ'in performans hesaplamalarının yapılması için, TEJ'in

termal kontak direncini ve iki seramik plakasının termal direncini hesaba katarak bir model geliştirmişlerdir. Yine, Thacher ve ark. [103] 1999 model GMC Sierra pikap kamyonunun egzozunda AETEG marka TEJ'lerin kamyonlarda performansını ölçmek ve AETEG tasarımlarının iyileştirilmesi için önemli faktörlerin belirlenmesi amacıyla TEJ'leri kullanmışlardır. Testlerinin sonucunda önemli çıktılar olarak; egzoz yalıtımı ve soğutucu sıcaklığın düşürülmesi, güçte pozitif etki yaptığı ve TEJ yüksekliğinden kaynaklanan bozucu kayıplar ve soğutucu pompa gücünün önemli olduğu sonucuna varmışlar, 112,6 km/h hızda 177 W elde etmişlerdir. Hsu ve ark [104] 24 tane TEJ'i (TMH400302055, Wise Life Technology, Taiwan) arabanın egzozunda kullanmış ve %0,3 verim ile 12,41 W'ı elde etmiştir. Champier ve ark [16, 61] elektrik şebekesinin bulunmadığı kırsal alanlarda küçük cihazların elektriğini besleyecek TEJ sistemini gerçekleştirmişlerdir. Onlar TEJ'in kontak direncinin ısı transferi için çok önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Yaptıkları çalışmayı teorik analizlerle karşılaştırmışlar, uygulamanın hemen hemen teorik analizlere yaklaştığını görmüşlerdir. Qui ve ark. [105] bir sobanın jeotermal ısını kullanarak TEJ'in sıcak taraf sıcaklığı 630 °C ve soğuk taraf sıcaklığı da 75 °C'de iken, 553,9 W gücünde TEJ sistemi gerçekleştirmişlerdir. Bununla kendinden ısıtmalı bir ısıtıcı tasarlamışlardır. Lertsatitthanakorn [106] Taihuaxing model TEJ1–1264–3.4 nolu TEJ'leri katı yakıt yakan sobada kullanmıştır. Sıcaklık farkı yaklaşık 150 °C iken 2,4 W güç elde etmiş ve TEJ verimliliğini %3,2 hesaplamıştır. Geliştirdiği TEG sisteminin ekonomik analizlerini gerçekleştirmiş ve bu sistemin pillere göre daha uygulanabilir olduğu kanısına varmıştır.

Burada açıklanan çalışmada, TEG–PAS sisteminin üzerinde deneneceği düşük jeotermal sıcaklıklı jeotermal alanlarda veya atık ısı suların olduğu tesislerde jeotermal enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesi için 100 W'lık yeni ticari bir portatif TEJ yapılmış ve deneysel testleri ve analizleri geliştirilen TEG–PAS ile gerçekleştirilmiştir. TEJ'in güç çıkışına ve verimliliğine etki eden sıcak–soğuk debi miktarları ve TEJ çıkışına bağlanan yükün etkileri TEG–PAS sistemiyle araştırılmıştır. Yapılan TEJ, yalnızca elektrik enerjisi elde etmekle kalmamakta bunun yanı sıra enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır.

## 5.4. Düşük Sıcaklıklı Jeotermal Alanlar İçin Yeni Bir Ticari Portatif Termoelektrik Jeneratör Tasarımı ve Uygulaması

### 5.4.1. Termoelektrik jeneratör verim hesaplama denklemleri

TEJ'lerden elde edilen maksimum güç değeri  $P_{Lmax}$  açık devre geriliminin  $V_{OC}$  yarısına yakın değerlerde elde edilir. Bu değer maksimum güç noktası izlemek için MPPT devrelerde kullanılır [13]. Ayrıca, TEJ'lerden herhangi bir sıcaklık farkında  $\Delta T$  alınacak maksimum güç  $P_{Lmax}$  değeri kısa devre akımı  $I_{SC}$  ve açık devre gerilimi  $V_{OC}$  cinsinden Eş.5.1'deki gibi de ifade edilebilmektedir [107]:

$$P_{Lmax} = \frac{V_{OC} I_{SC}}{4} \quad (5.1)$$

TEJ'in iç direncinin değeri sıcaklık değerine bağlı olarak değişmektedir. Herhangi bir andaki TEJ'in iç direncinin  $R_{in}$  değeri açık devre geriliminin  $V_{OC}$  kısa devre akımına oranı olarak Eş. 5.2'deki gibi ifade edilebilir:

$$R_{in} = \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \quad (5.2)$$

TEJ'in sıcak yüzeyinin sıcaklığını sağlamak için kullanılan sıvının sağladığı enerji miktarı Eş. 5.3'deki gibi ifade edilmektedir:

$$Q_H = G_h \rho_h C_h \Delta t_h \quad (5.3)$$

Burada,  $Q_H$  sıcak sıvının sağladığı enerji,  $G_h$  sıcak sıvı akış hacmi,  $\rho_h$  sıcak sıvı yoğunluğu,  $C_h$  sabit basınçta sıcak sıvının kendine özgü ısı kapasitesi ve  $\Delta t_h$  sıvı geçişinde sıcak sıvının sıcaklık düşüşüdür. Bu durumda çevrim verimliliği Eş. 5.4'deki gibi elde edilebilir:

$$\eta = \frac{P_L}{Q_H} \quad (5.4)$$

Burada,  $\eta$  verim,  $P_L$  TEJ'in uçlarındaki yükten alınan güçtür [57].

#### 5.4.2. Sıcak/soğuk su sirkülatörü

Laboratuvar ortamında, TEJ deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için, Resim 5.1'deki sıcak/soğuk su sirkülatör sistemi kurulmuştur. Sistemin ana parçaları sıcak su tankı, soğuk su tankı, elektrikli ısıtıcı, soğutucu motorlar, aç-kapa denetleyiciler, sıcak/soğuk açma kapama valfleri, sirkülasyon motorları ve akış metrelerden oluşmaktadır. TEJ performans karakteristikleri, sıcak yüzey  $T_H$  ve soğuk yüzey  $T_C$  sıcaklıklarının belirlenen referans değerinde sabit tutulmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu amacı gerçekleştirmek için geliştirilen sıcak-soğuk su sirkülatör sistemi hem sıcak su hem de soğuk su kaynağı olarak kullanılmıştır.



- |                              |                           |                          |
|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 1. Soğuk su biriktirme tankı | 4. Soğutucu motorlar      | 7. Sirkülasyon motorları |
| 2. Sıcak su biriktirme tankı | 5. Aç-kapa denetleyiciler | 8. Akışmetreler          |
| 3. Elektrikli ısıtıcı        | 6. Sıcak/soğuk vanaları   |                          |

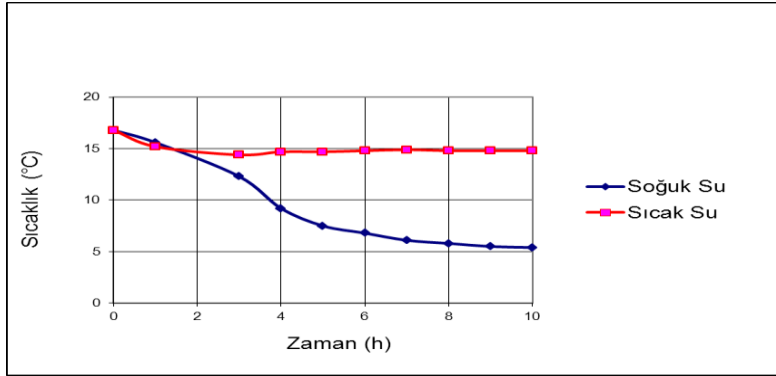
Resim 5.1. Sıcak/soğuk su sirkülatörü

Soğuk su sistemi temelinde sudan havaya ısı transferi olmak üzere klasik soğutmalı

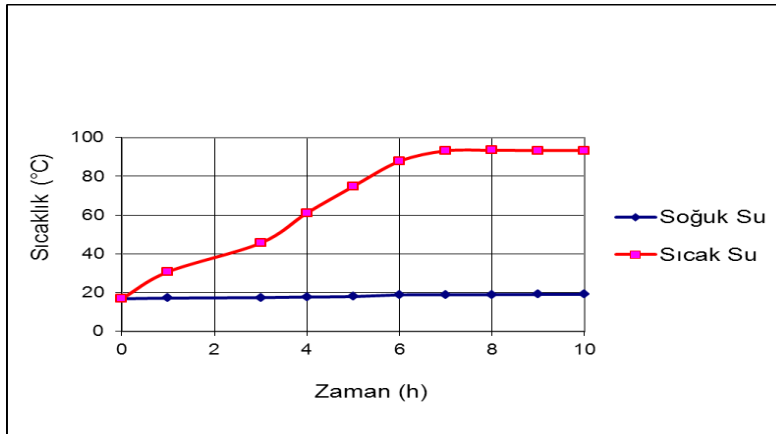
sistem yer almaktadır. Sıcak–soğuk su TEJ’in sıcak ve soğuk yüzeylerinden geçerken birbirlerini etkilemektedir. Bu etkileşimin minimuma indirilmesi yalıtımla sağlanmıştır. Soğutmanın daha güçlü gerçekleştirilmesi amacıyla iki tane klasik soğutma sistemi kullanılmıştır. Sıcak/soğuk su sıcaklıklarının algılanmasında T tip termokupl ve kontrolleri de Elimko firmasına ait E–72 sıcaklık kontrol cihazları aç–kapa kontrollü olarak kullanılmıştır. Aç–kapa kontrollerde histerezis aralığı olarakta 3 °C tanımlanmıştır. Sıcak/soğuk suyun sirkülasyonlarının yapılması için üç hız kademeli 80 W gücünde 1 fazlı devir–daim pompaları kullanılmıştır. Sıcak su sisteminde, suyun ısıtılması için 2 kW gücünde bir elektrikli su ısıtıcısından faydalanılmıştır. Sıcak suyun TEJ sıcak yüzeyinden dolaşımının sağlanması için üç hız kademeli 80 W gücünde 1 fazlı devir-daim pompasıyla gerçekleştirilmiştir. TEJ’den elektrik enerjisi üretiminde etkin olan diğer bir etken de debidir. Sıcak/soğuk su sirkülator sisteminin debilerinin ölçümü için Mikronet firmasının ARF–4 SS debimetreleri kullanılmıştır. Bu debimetrenin ölçüm aralığı 1–15 m<sup>3</sup>/sn’dir.

Sıcak/soğuk su sirkülator sisteminde kullanılan su depolarının boyutları 49×69×60cm’dir. Birbirleri arasındaki sıcaklık geçişlerini minimuma indirmek amacıyla 1 cm kalınlığında aralarına ve çevrelerine strafor konulmuştur. Sıcak/soğuk su sisteminin değişik çalışma durumları için deneyleri gerçekleştirilmiş ve bunların sıcaklık değişimleri Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3’de verilmiştir. Çevre sıcaklığı 20 °C’de, sıcak/soğuk su sistemi depoları su ile dolu ve soğuk su sistemi çalıştırıldığında, soğuk suyun sıcaklık değeri yaklaşık olarak 5 °C’ye kadar yaklaşık 6 saatte düşürülebilmektedir. Aynı şekilde, çevre sıcaklığı 20 °C’de, sıcak/soğuk su sistemi depoları su ile dolu ve soğuk su sistemi çalıştırıldığında, sıcak su sistemi çalıştırıldığında sıcaklık maksimum 93 °C değerine ulaşması yaklaşık 6 saatte gerçekleşmiştir. Sıcak/soğuk su sistemi birlikte çalıştığında, sıcak suyun maksimum ve soğuk suyun minimum değerine ulaşması yaklaşık olarak 7 saatte gerçekleşmiştir. Bu durumda sıcak suyun sıcaklık değeri 93 °C ve soğuk suyun sıcaklığı da 5 °C’ye ulaşmıştır. Sıcak ve soğuk suyun sıcaklıkları birbirini etkilememiştir.

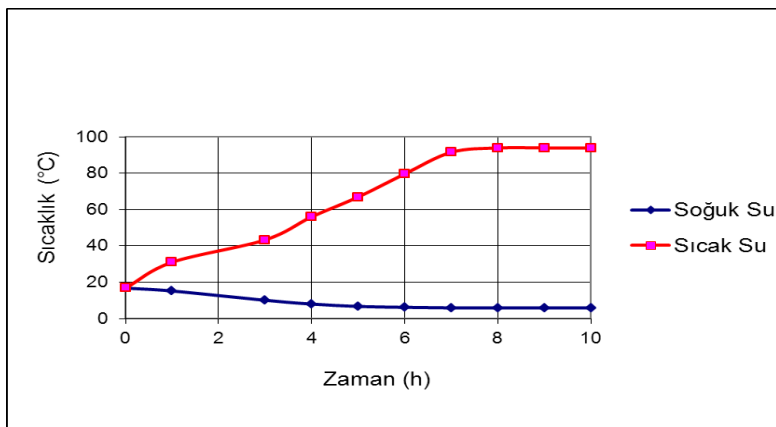




Şekil 5.1. Soğuk su sistemi çalıştırıldığında maksimum soğutma ve sıcak su sisteminin etkilenmesi



Şekil 5.2. Sıcak su sistemi çalıştırıldığında maksimum ısıtma ve soğuk su sisteminin etkilenmesi



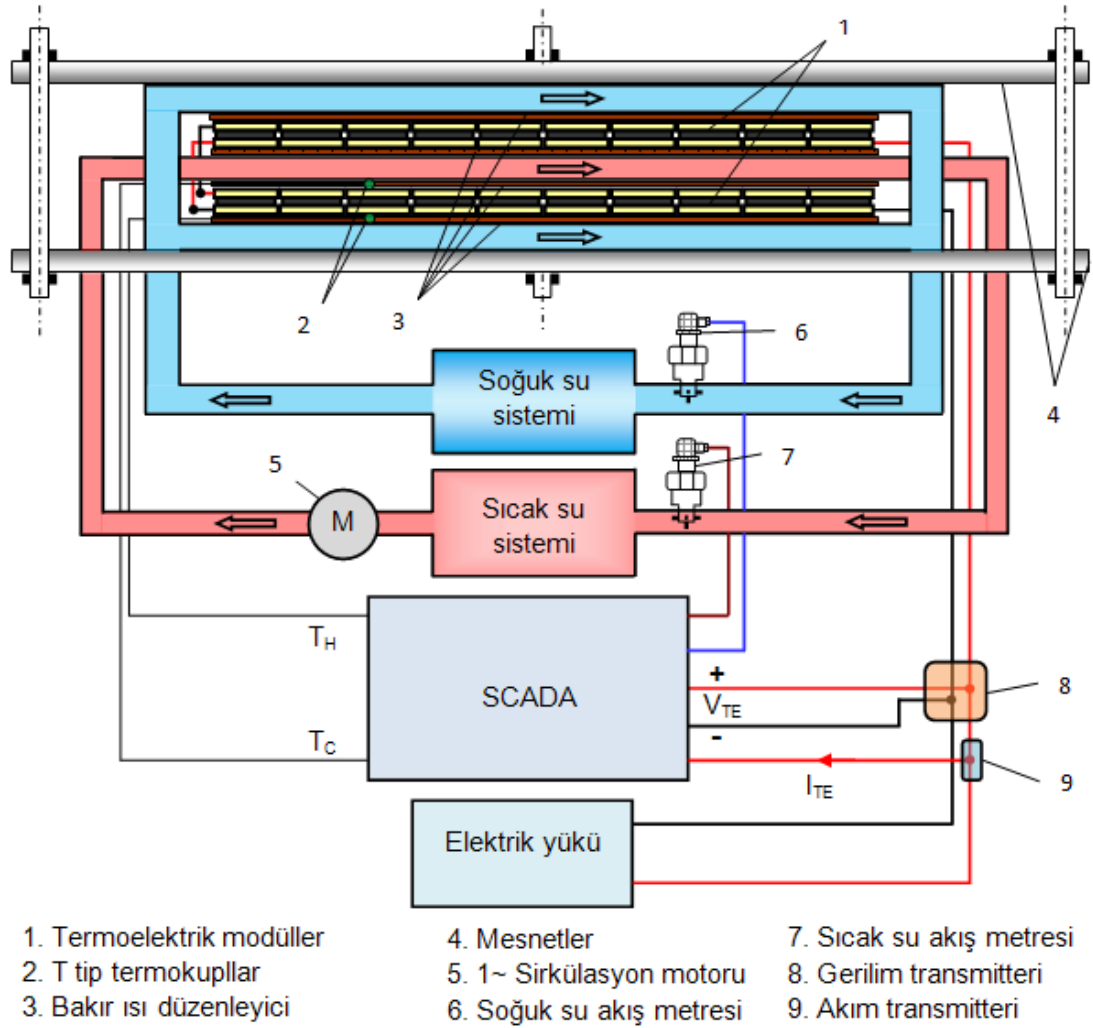
Şekil 5.3. Soğuk ve sıcak su sistemleri çalıştırıldığında maksimum soğutma ısıtma

### 5.4.3. Yeni ticari portatif termoelektrik jeneratörün kurulumu

Çalışmanın bu bölümünde, jeotermal kaynağın elektrik enerjisine çevrilmesinde kullanılan yaklaşık 100 W'lık yeni ticari portatif TEJ'in yapısı ve yeni portatif TEJ'in performans analizlerinin gerçekleştirilmesi için deneysel kurulum sunulmuştur.

#### 100 W yeni ticari portatif TEJ yapısı

Düşük sıcaklıklı jeotermal alanlar için yaklaşık 100 W'lık yeni ticari portatif TEJ'in yapısı Şekil 5.4'de verilmiştir. Herhangi bir jeotermal kaynağın bulunduğu alanda TEJ'lerin elektriksel enerji kaynağı olarak kullanılabilmesinin gösterilmesi amacıyla TEJ tasarımı portatif olarak yapılmıştır. TEJ'de yirmi tane  $5 \times 5 \times 0,4$  cm ebatlarında TES Ltd. şirketinden sağlanan TEM kullanılmıştır. Bunların her birinin iç direnci  $21,7$  °C ortam sıcaklığında yaklaşık olarak  $0,56$   $\Omega$  civarındadır. Bu TEM'ler termal iletimin fazla olması için onlu iki grup halinde  $5,5 \times 5,5 \times 2$  cm ebatlarındaki pirinçten yapılan plakaların arasına yerleştirilmiştir. Tüm TEM'ler üretilen gerilimi arttırmak için elektriksel olarak seri, termal iletkenliği arttırmak için ise termal olarak paralel bağlanmıştır. Yine termal iletkenliğin artırılması için, TEJ'ler ile sıcak ve soğuk suyun geçtiği yüzeyler arasına termal gres sürülmüştür. TEM'ler ve diğer termal parçalar  $20 \times 25 \times 40$  cm ölçülerindeki paslanmaz bir kutuya yerleştirilmiştir. Jeotermal kaynaktan elde edilen ve TEJ'in sıcak tarafının sıcaklığını sağlayacak olan sıcak akışkanın ve TEJ'in soğuk taraf sıcaklığını sağlayacak olan soğuk akışkanın hortumlarının TEJ giriş-çıkışlarına kolaylıkla bağlanabilmesi için her iki tarafında konnektörler kullanılmıştır. TEJ'in elektriksel bağlantı kolaylığının sağlanması için TEJ'in çıkışına bağlantı konnektörleri takılmıştır. TEJ'in toplam iç direnci, ortam sıcaklığı  $21,7$  °C iken yaklaşık  $R_{in} = 11,25$   $\Omega$  ölçülmüştür. Bu değer, maksimum gücün hangi yük direncinde  $R_L$  elde edilebileceğinin hesaplaması için önemlidir ve sıcaklık artışına bağlı olarak değişim gösterir.



Şekil 5.4. 100 W portatif yeni TEJ sistemi yapısı

TEJ sisteminde sıcak su kaynağı olarak sirkülatörün sıcak suyu kullanılmıştır. Sirkülatörden sağlanan sıcak suyun debisi üç farklı hız ayarına sahiptir. TEJ sistemde soğuk su kaynağı olarak da daha farklı debi değerlerinin elde edilebilmesi ve bu debi değerlerinin sistemdeki sıcaklık farkına etkilerinin araştırılabilmesi için sıcaklığı 12 °C olan şebeke suyu kullanılmıştır. TEJ'den elde edilen elektrik enerjinin, TEJ'lerin sıcak/soğuk yüzey sıcaklıklarının sürekli olarak izlenmesi kayıt altına alınması amacıyla TEG-PAS sistemi kullanılmıştır.

### Yeni ticari portatif TEJ deneysel kurulumu

100 W yeni portatif TEJ sistemi deneysel kurulumu Resim 5.2’de verilmiştir. TEJ sistemi deneysel kurulumu: (1) TEJ, (2) sıcak/soğuk su sirkülasyon sistemi, (3) şebeke suyu, (4) SCADA, (5) TEG-PAS (6) yükten meydana gelmektedir.

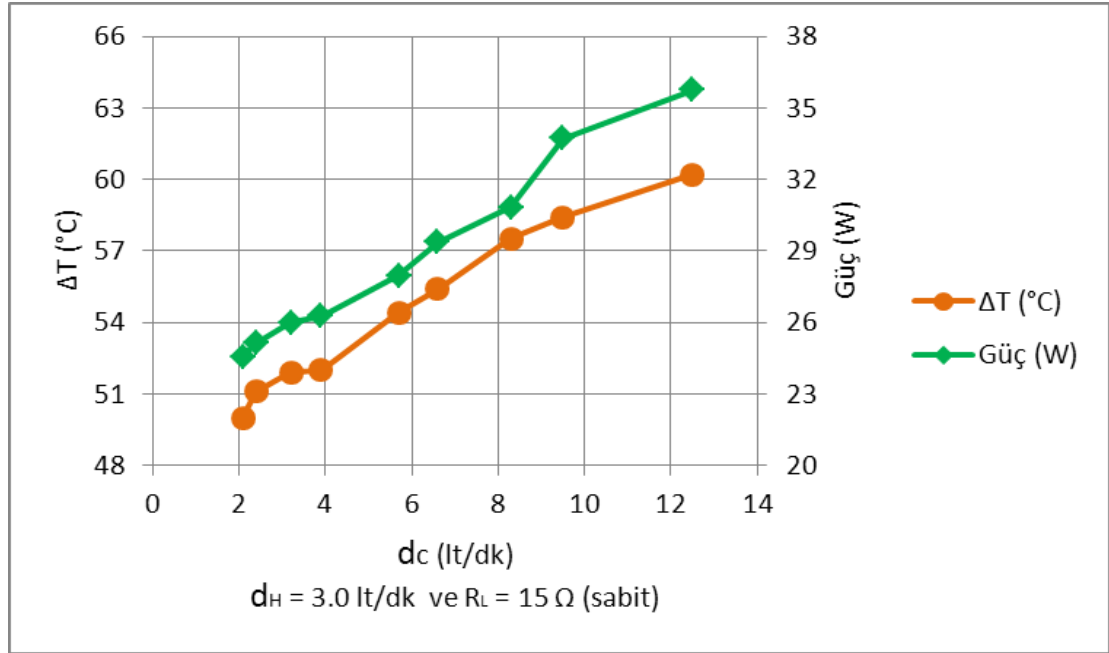


Resim 5.2. 100 W ticari portatif yeni TEJ sistemi deneysel kurulumu

### **5.5. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma**

TEG-PAS sistemiyle verileri elde edilen ticari TEJ’in sıcak yüzeyinin sıcaklığını sağlamak için sıcak su kaynağı olarak sıcak/soğuk su sirkülasyon sistemi, soğuk yüzey sıcaklığının sağlanması ve daha farklı debilerdeki değerlerin bulunması için ise şebeke suyu kullanılmıştır. Sıcak su dolaşımını bir fazlı üç hız kademeli Alarko marka bir dolaşım motoru ile yapılmıştır. Sıcak suyun sıcaklığı maksimum 97 °C’ye kadar çıkarılmış, soğuk su olarak kullanılan şebeke suyunun sıcaklığı da minimum yaklaşık 12 °C olarak ölçülmüştür. Soğuk suyun debisi 1,8 lt/dk ile 12,8 lt/dk arasındaki

değerler arasında değiştirilebilmiştir. Sıcak ve soğuk suların debilerindeki değişime bağlı olarak, sirkülatördeki sıcak suyun sıcaklığı maksimum değerine çıkarıldığında ve şebeke suyu sıcaklığı değiştirilmediğinde, TEJ yüzeyleri arasında üretilen sıcaklık farkı  $\Delta T$  değerleri ve üretilen TEJ gücü Şekil 5.5’de verilmiştir.

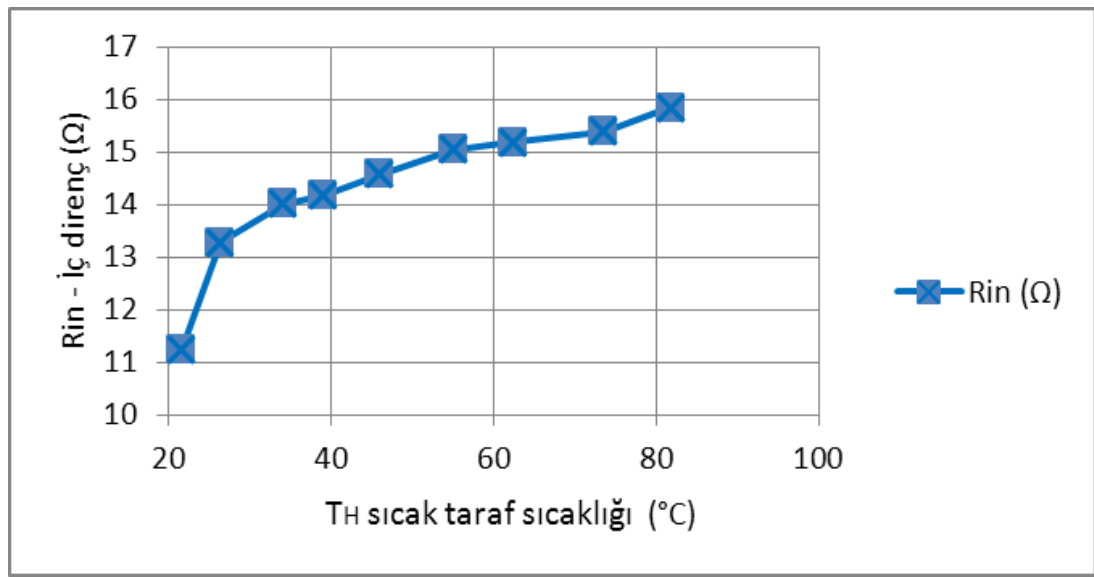


Şekil 5.5. Sıcak taraf akış debisi 3 lt/dk’da tutulup, soğuk taraf akış debisi arttırıldığında  $\Delta T$  ve güçteki değişim

Şekil 5.5 incelendiğinde, suların sıcaklıkları sabit tutulmak şartıyla debilerdeki artışa bağlı olarak TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı  $\Delta T$  artmıştır. Sıcaklık farkındaki artışın nedeni geçen su kütle miktarının artmasıdır. Yine, TEJ’in iç direnci sıcaklığa bağımlı olarak değişir, Şekil 5.6’da bu değişimin grafiği verilmiştir. Buna bağlı olarak, TEJ’in maksimum yük karşılaşma direnç değeri de değişir. Bu değişim miktarı 21,7 °C değerinde 11,25  $\Omega$  değerinden başlayıp maksimum sıcak taraf sıcaklığı 81,8°C değerinde 15,85  $\Omega$  olmuştur. İç direnç değişimi MPPT’li devreler için önemlidir.

TEJ’in performans değerlerinin ölçülmesi için sıcak suyun sıcaklığı yaklaşık olarak 30 °C’den başlatılmış ve kademe kademe 97 °C’ye kadar arttırılmıştır. 100 W yeni portatif TEJ içerisindeki TEJ’in sıcak ve soğuk yüzeyleri sıcaklıkları T tip

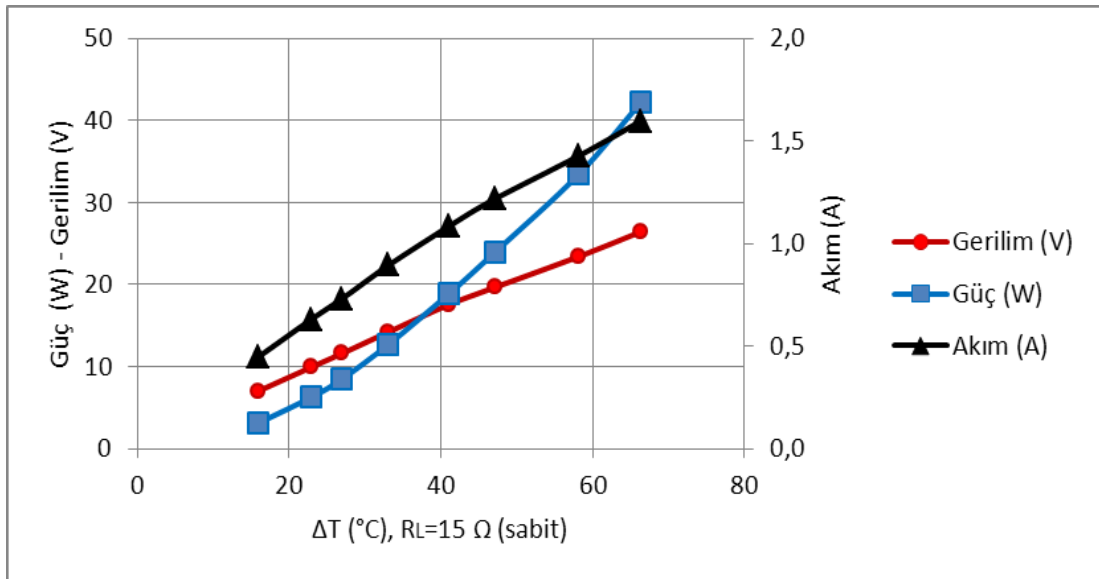
termokupllarla ölçülmüş ve sıcaklık farkı hesaplanmıştır. Sıcak-soğuk suyun birbirinden etkileşimi ve debinin az olması nedenlerinden dolayı TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı maksimum 67 °C'ye kadar arttırılabilmektedir. Sıcak suyun debisi maksimum 3,7 lt/dk'ya, soğuk suyun debisi ise şebeke suyu kullanıldığı için 12,8 lt/dk'ya kadar arttırılabilmektedir. Bu debi miktarları jeotermal alanlarda daha yüksek değerlere çıkabilmektedir. Böylelikle daha fazla sıcaklık farkı elde edilecek ve daha fazla güç üretilebilecektir.



Şekil 5.6. TEG'in sıcak taraf sıcaklığına bağlı olarak iç direncindeki değişim

100 W yeni portatif TEJ'in değişik sıcaklık farklarında yük sabit tutularak elde edilen deneysel verileri Şekil 5.7'de verilmiştir. TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı  $\Delta T = 67$  °C'de, TEJ açık devre gerilimi  $V_{OC} = 51,5$  V ve kısa devre akımı  $I_{SC} = 3,1$  A elde edilmiştir. Eş. 3'den TEJ maksimum güç değeri yaklaşık  $P_{Lmax} = 40$  W'tır. 100 W yeni portatif TEJ deneylerinde, TEJ iç direnci  $R_{in}$  ve bağlanılan yükün değeri  $R_L = 15$  Ω ( $R_{in} = R_L$ ) eşitlendiğinde maksimum güç  $P_{Lmax}$  elde edilmiştir. Bu durumda TEJ'den elde edilen güç değeri yaklaşık  $P_{Lmax} = 41,6$  W olmuştur. Teori ve uygulamadaki güç farkı TEJ'in iç direncinin sıcaklığa bağlı olarak değişiminden kaynaklanmaktadır ve güç hatası  $P_{Le} = 1,6$  W'tır. Üretilen akım ve gerilimin değişimi doğrusal, gücün değeri de parabolik olarak değişmiştir. Şekil 5.7'de, TEJ maksimum gücünün  $P_{Lmax}$  elde edildiği TEJ yük direnci yaklaşık  $R_L = 15$  Ω değerinde sabit

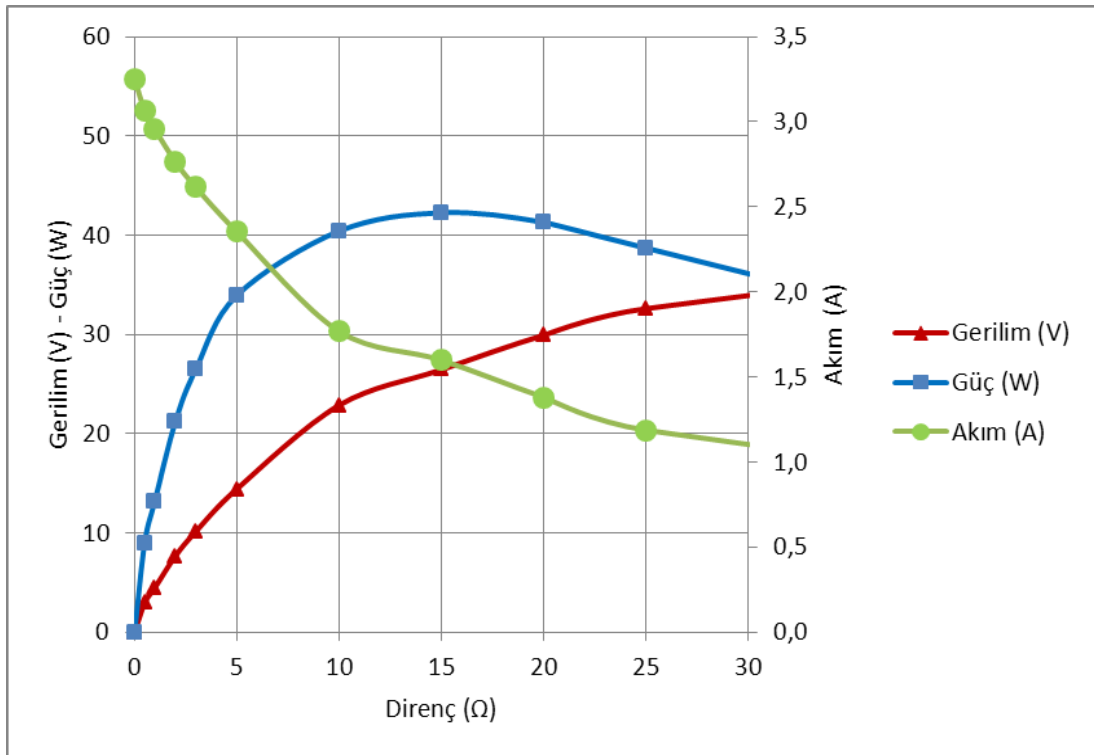
tutulup, TEJ yüzeyler arası sıcaklık farkı  $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye getirildiğinde, TEJ'den elde edilen gerilim  $V = 9,1 \text{ V}$ , TEJ akımı  $I = 0,6 \text{ A}$  ve TEJ gücü  $P = 5,5 \text{ W}$  olmuştur. TEJ yüzeyler arası sıcaklık farkı  $\Delta T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  olduğunda, TEJ'den elde edilen gerilim  $V = 17 \text{ V}$ , TEJ akımı  $I = 1,1 \text{ A}$  ve TEJ gücü  $P = 18,7 \text{ W}$  olmuştur. Deneyde maksimum sıcaklık farkına çıkılabildiği  $\Delta T = 67 \text{ }^\circ\text{C}$  değerinde, TEJ sıcak tarafının sıcaklığı  $T_H = 81,8 \text{ }^\circ\text{C}$  ve TEJ soğuk tarafının sıcaklığı  $T_C = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  değerindedir. Bu durumda, TEJ'den elde edilen gerilim  $V = 26 \text{ V}$ , TEJ akımı  $I = 1,6 \text{ A}$  ve TEJ gücü  $P_{Lmax} = 41,6 \text{ W}$  olmuştur. Güçteki artış doğrusal değildir. Sıcaklık farkı yaklaşık  $\Delta T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye çıkarıldığında TEJ'den alınacak maksimum teorik güç değeri de  $P_{Lmax} = 100 \text{ W}$ 'a çıkarılabilecektir. Bunun için jeotermal alandaki sıcak suyun sıcaklığı ve daha fazla sıcaklığın etki ettirilebilmesi için debisinin artırılması önem kazanacaktır.



Şekil 5.7. 100 W portatif TEJ'in, TEJ yük direnci sabit kalmak koşuluyla, TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkına bağlı olarak elde edilen deneysel gerilim, akım ve güç değişim eğrileri

TEJ'den üretilen elektrik enerjisi, bağlanılan yükün değerine göre değişim gösterir. Maksimum güç değeri TEJ iç direnci  $R_{in}$  ile bağlanılan yükün  $R_L$  değerinin eşitlendiği zamandır. Diğer durumlarda elde edilen elektrik enerjisinde belirgin bir şekilde düşme meydana gelir. Buna bağlı olarak, TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını sabit tutmak amacıyla debisi sabit tutulup, yükün değeri değiştikçe üretilen gerilimin ve akımın değerinde de değişim meydana gelmektedir. 100 W yeni portatif

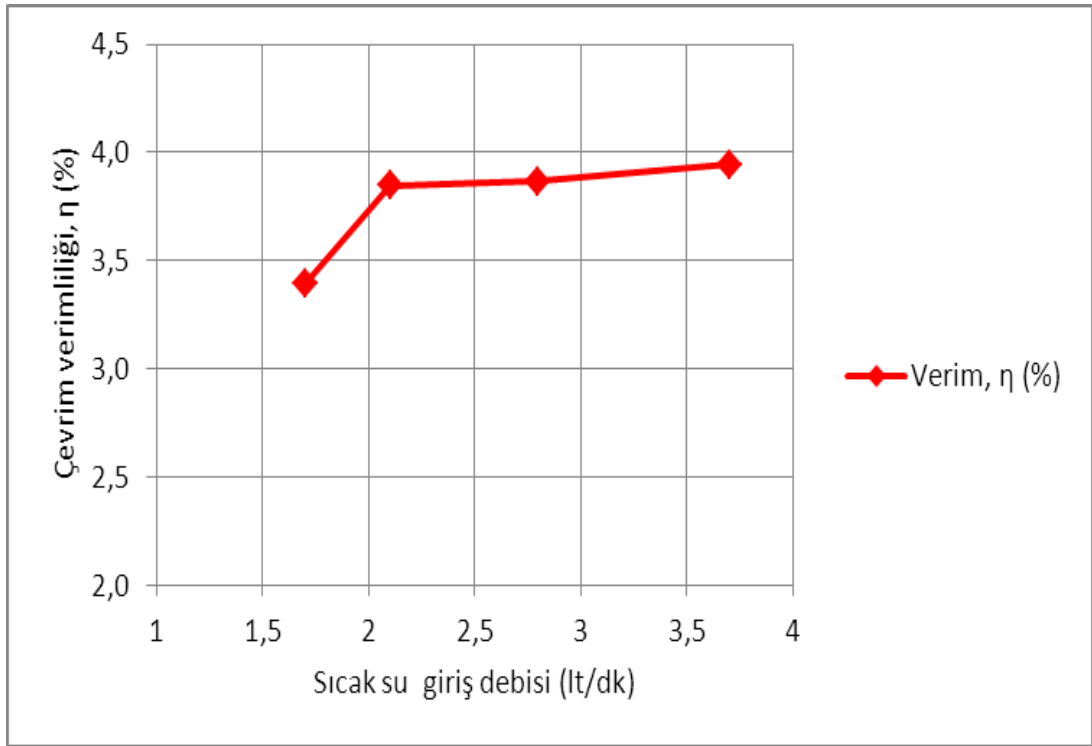
TEJ için, TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı  $\Delta T = 67 \text{ }^\circ\text{C}$  değerine çıkarıldığında, TEJ'e bağlanılan yükün değerine göre üretilen gerilim, akım ve gücün değişim eğrileri Şekil 5.8'de verilmiştir. Şekil 5.8'e göre, TEJ yük direnci  $R_L = 10 \ \Omega$  olduğunda, TEJ'den elde edilen akım  $I = 1,76 \text{ A}$ , gerilim  $V = 22,8 \text{ V}$  ve güç değeri de yaklaşık  $P = 40,1 \text{ W}$ 'tır. TEJ maksimum gücünün elde edildiği durumda, TEJ yük direnci  $R_L = 15 \ \Omega$ , gerilim  $V = 26 \text{ V}$ , akım  $I = 1,6 \text{ A}$ , TEJ gücü yaklaşık  $P_{Lmax} = 41,6 \text{ W}$ 'tır. TEJ yük direnci  $R_L = 25 \ \Omega$  olduğunda, TEJ'den elde edilen akım  $I = 1,2 \text{ A}$ , gerilim  $V = 32,5 \text{ V}$  ve güç değeri de yaklaşık  $P = 39 \text{ W}$ 'tır. TEJ yükünün değeri  $R_L = 10\text{--}20 \ \Omega$  aralığı TEJ maksimum güç değerine yakın olan aralıklardır. Bağlanılan yükün değerine göre, TEJ'in ürettiği gerilimdeki değişim kısa devre gerilimi  $V_{SC} = 0 \text{ V}$  değerinden açık devre gerilimi  $V_{OC} = 51,5 \text{ V}$ 'a kadar geniş bir aralıktır. TEJ'in ürettiği akımdaki değişim ise açık devre akımı  $I_{OC} = 0 \text{ A}$  ve kısa devre akımı  $I_{SC} = 3,1 \text{ A}$  aralığındadır. TEJ'den üretilen gerilim ve akımın değeri bağlanılan yük ile geniş bir aralıkta değişmektedir.



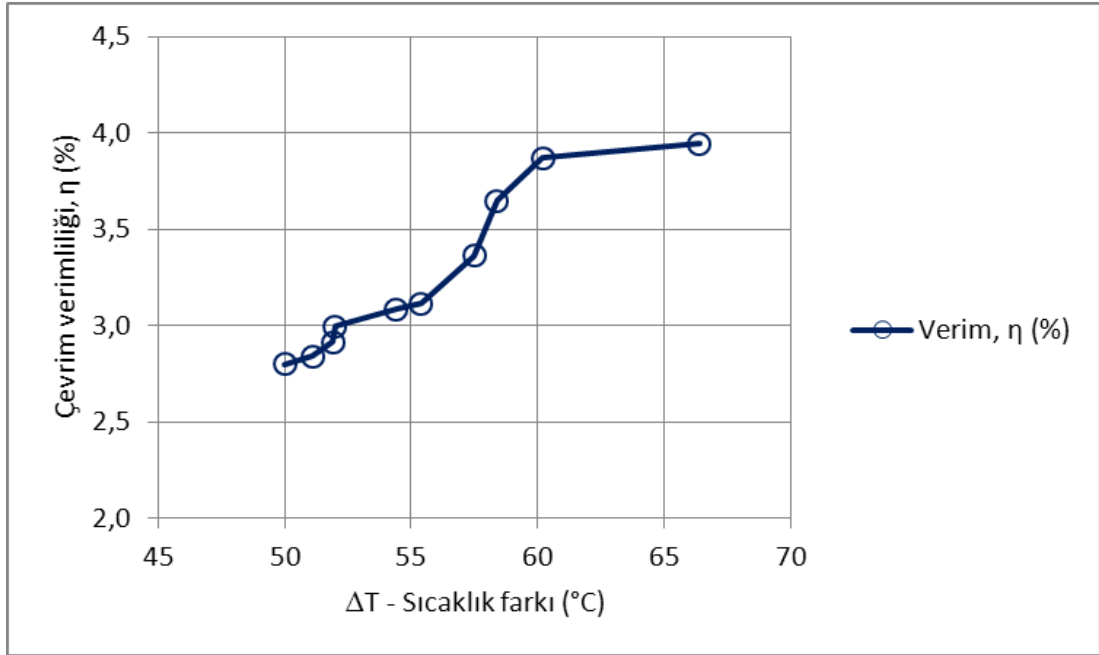
Şekil 5.8. 100 W portatif TEJ'in yük değişimine göre çıkışından elde edilen gerilim, akım ve güç eğrileri



TEJ'in sıcak ve soğuk yüzeylerinin sıcaklıklarını sağlayan suların akış oranları artırıldığında, bunlara bağlı olarak verimliliği de artmıştır. TEJ deneylerinden elde edilen verilere bağlı olarak, maksimum çevrim verimliliği %3,9 olarak hesaplanmıştır. Sıcak su akış oranının ve sıcak taraf sıcaklığının bir fonksiyonu olarak TEJ verimliliği Şekil 5.9 ve 5.10'da, sırasıyla verilmiştir. Sıcak taraf sıcaklığı ve sıcak taraf su giriş debisi arttıkça TEJ'in çevrim verimliliğinde artış göze çarpmaktadır.

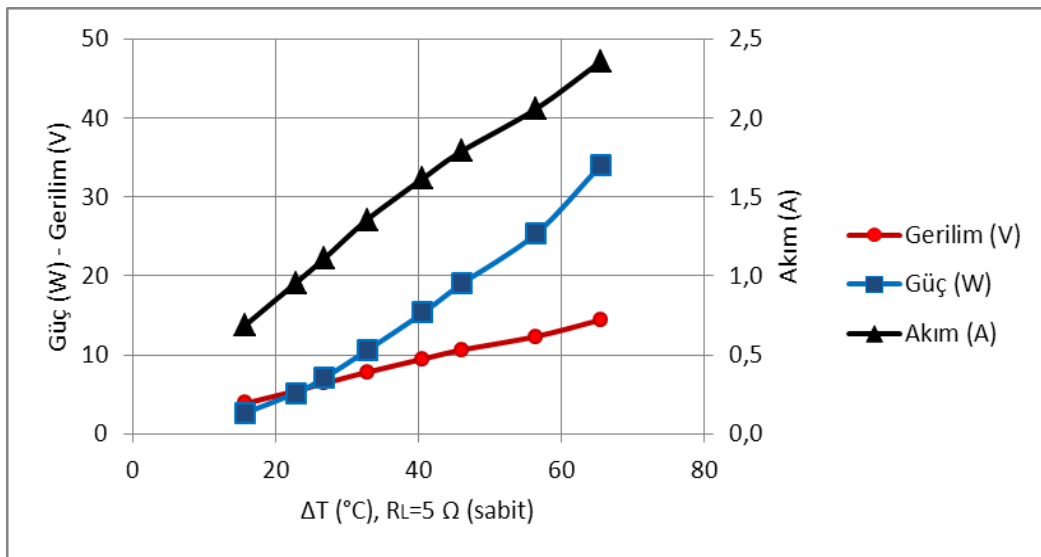


Şekil 5.9. Sıcak su akışı oranının bir fonksiyonu olarak TEJ çevrim verimliliği

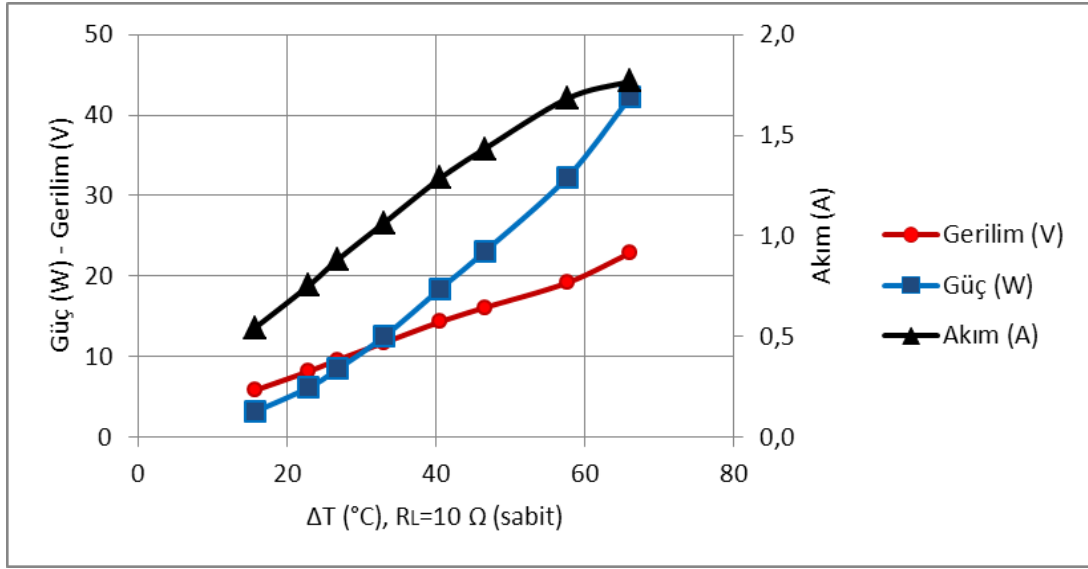


Şekil 5.10. Sıcaklık farkının bir fonksiyonu olarak TEJ çevrim verimliliği

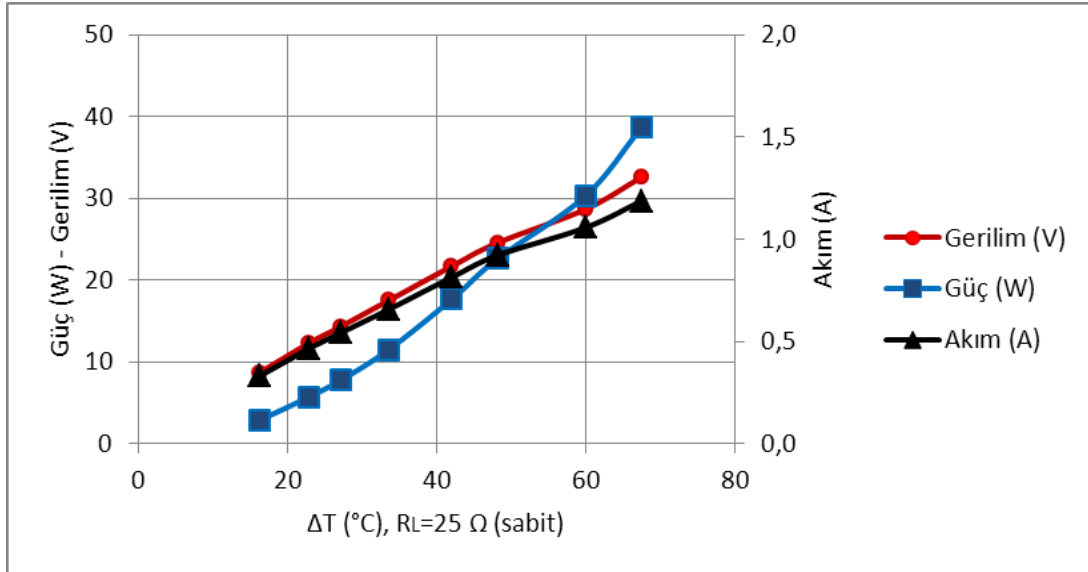
100 W portatif ticari TEJ'in, TEJ yük direnci değişik değerlerde sabit kalmak koşuluyla, TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkına bağlı olarak elde edilen deneysel gerilim, akım ve güç değişim eğrileri Şekil 5.7, 5.11, 5.12 ve 5.13'de verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde en yüksek güç değeri Şekil 5.7'deki  $R_L = 15 \Omega$  civarındayken elde edilmiştir.



Şekil 5.11.  $R_L = 5 \Omega$ 'da sabit tutulduğunda  $\Delta T$ 'ye bağlı I-V-P eğrileri



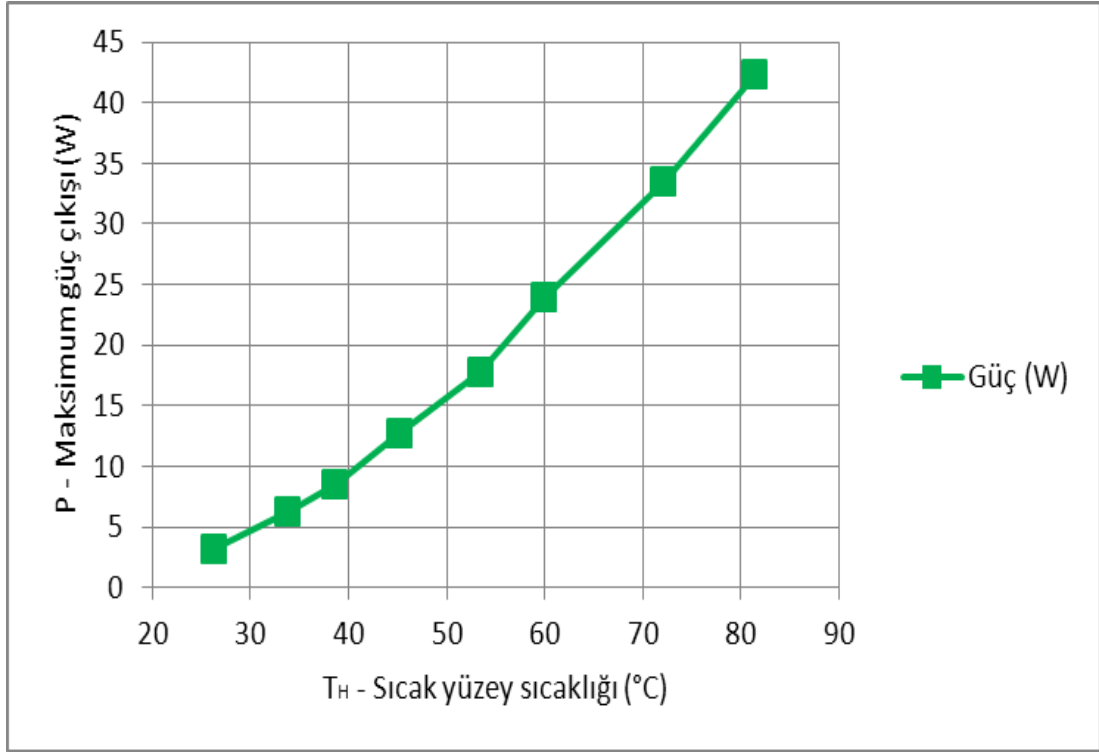
Şekil 5.12.  $R_L = 10 \Omega$ 'da sabit tutulduğunda  $\Delta T$ 'ye bağlı I-V-P eğrileri



Şekil 5.13.  $R_L = 25 \Omega$ 'da sabit tutulduğunda  $\Delta T$ 'ye bağlı I-V-P eğrileri

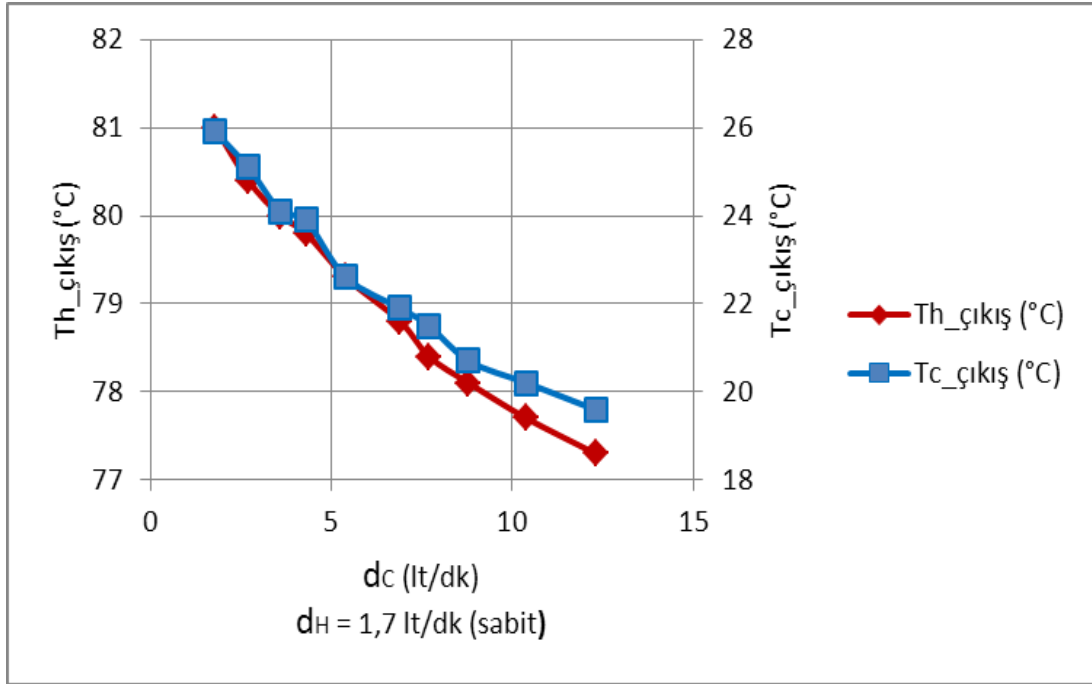
TEJ'den elde edilen güç miktarı sıcaklık artışının karesine bağlı olarak değişmektedir. Yapılan deneylerde yaklaşık olarak sıcak tarafın sıcaklığı  $81 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar çıkarılabilmektedir. Bu durumda elde edilen güç yaklaşık olarak  $P = 42 \text{ W}$ 'tır. Düşük sıcaklık değerlerinde, örneğin  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de elde edilen güç miktarı yaklaşık  $P = 5 \text{ W}$  civarındadır. Şekil 5.14'de TEJ'in sıcak yüzeyine bağlı olarak elde edilen güç eğrisi verilmiştir. Eğer sıcaklık miktarı debinin artışına bağlı olarak daha da

arttırılabilirse elde edilen sıcaklık miktarı artacak dolayısıyla güç miktarı da artacaktır.

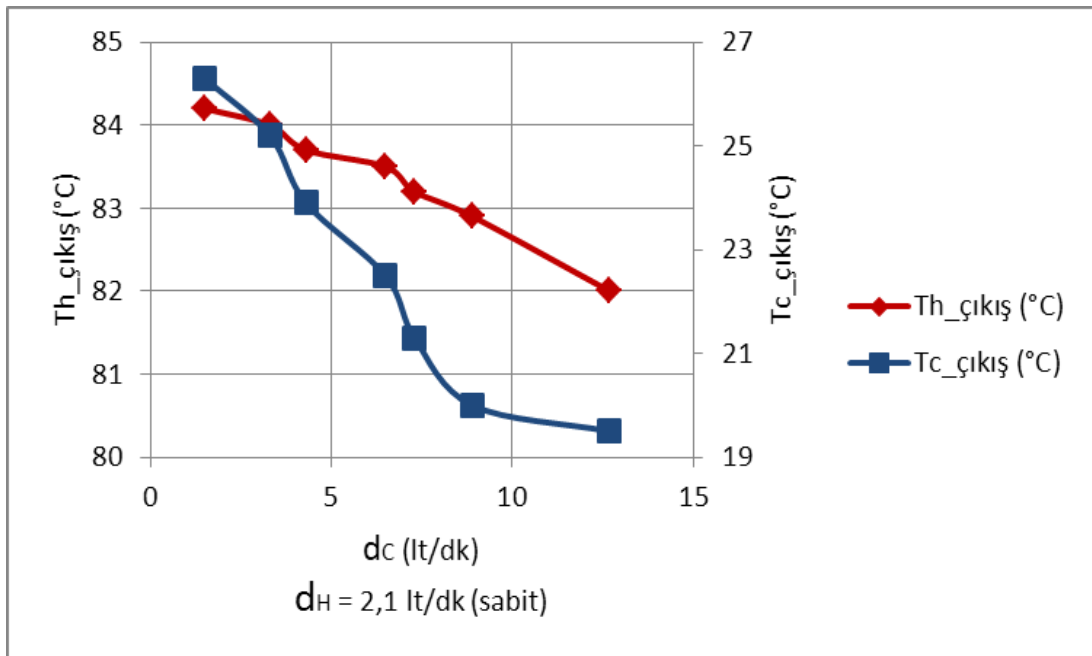


Şekil 5.14. TEJ'in sıcak yüzeyine bağlı güç çıkışı

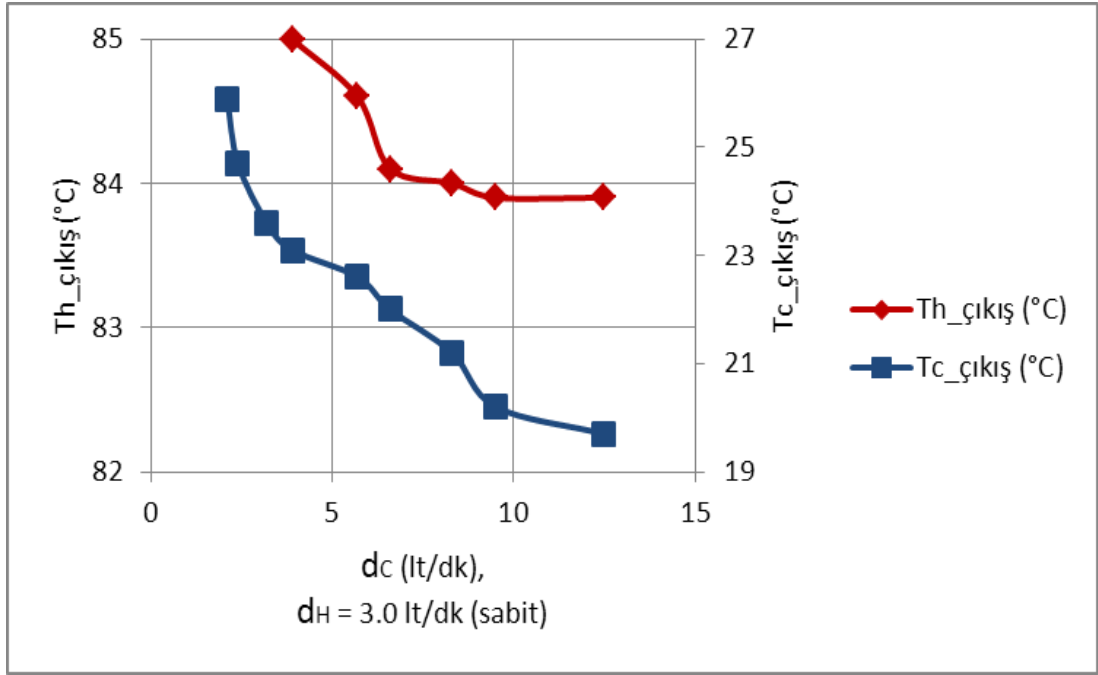
TEJ verim hesaplamalarının gerçekleştirilmesi için TEJ'e giren ve çıkan sıvılarda meydana gelen sıcaklık değişimlerinin bilinmesi gerekmektedir. TEJ'e giren sıvının debisi arttığında sıvının sıcaklığındaki düşme miktarı azalmaktadır. Dolayısıyla sıcaklık farkı artmakta ve bu da verimin artışını sağlamaktadır. TEJ verim hesaplamalarının yapılması için TEJ giriş-çıkış sıcaklıklarındaki deneysel olarak alınan verilere bağlı olarak değişimler Şekil 5.15, 16, 17, 18, 19 ve 20'de verilmiştir.



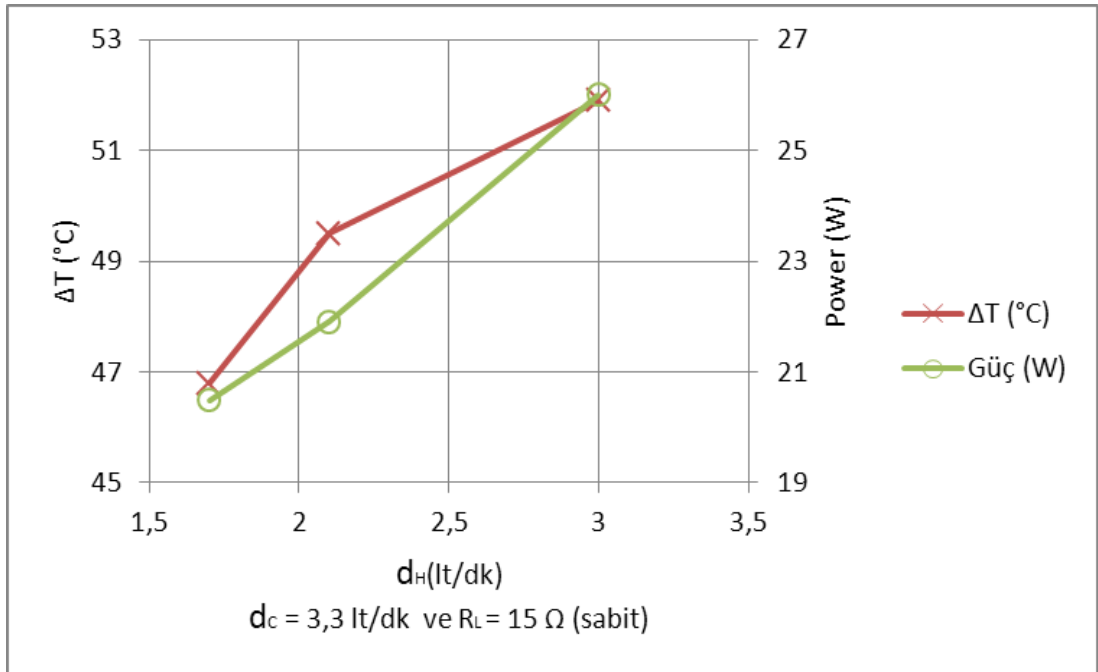
Şekil 5.15.  $d_H = 1,7$  lt/dk'da sabit tutulup  $d_c$  değiştirildiğinde sıcaklık değişimleri



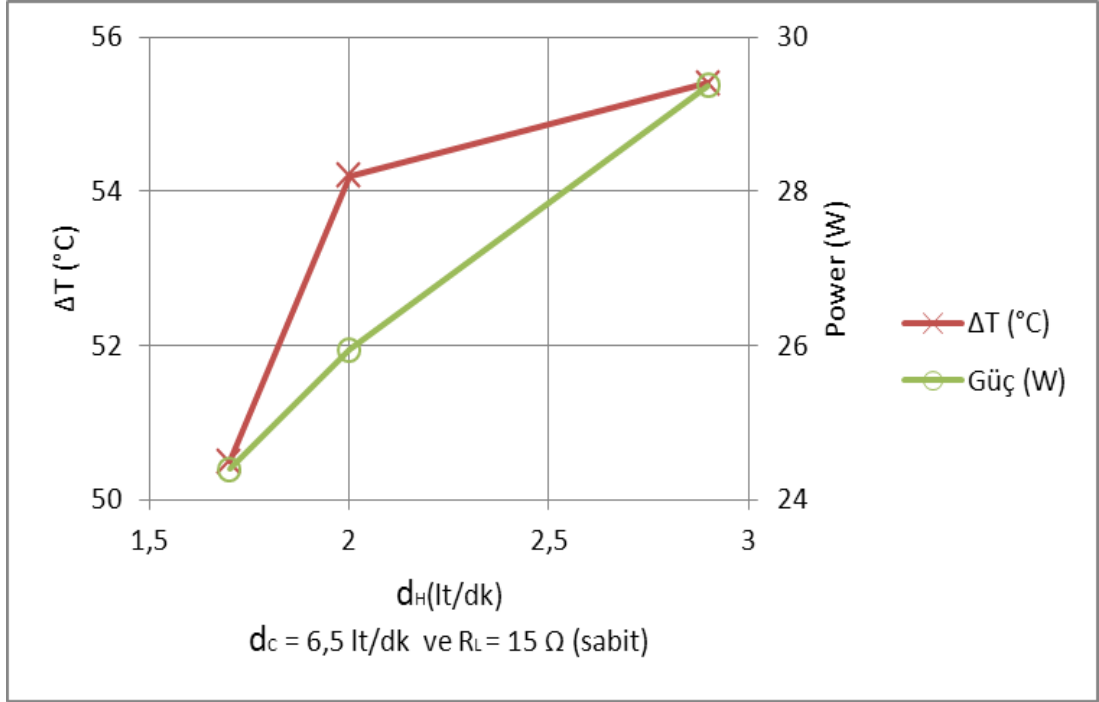
Şekil 5.16.  $d_H = 2,1$  lt/dk'da sabit tutulup  $d_c$  değiştirildiğinde sıcaklık değişimleri



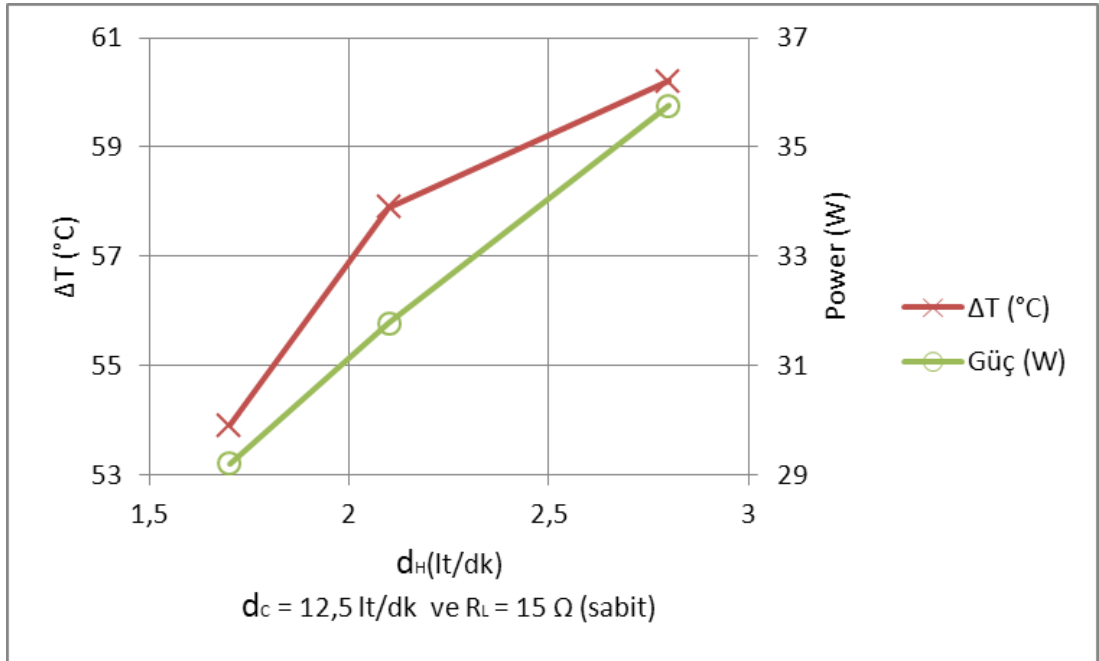
Şekil 5.17.  $d_H = 3,0$  lt/dk'da sabit tutulup  $d_C$  değiştirildiğinde sıcaklık değişimleri



Şekil 5.18.  $d_C = 3,3$  lt/dk'da sabit tutulup  $d_H$  değiştirildiğinde sıcaklık değişimleri

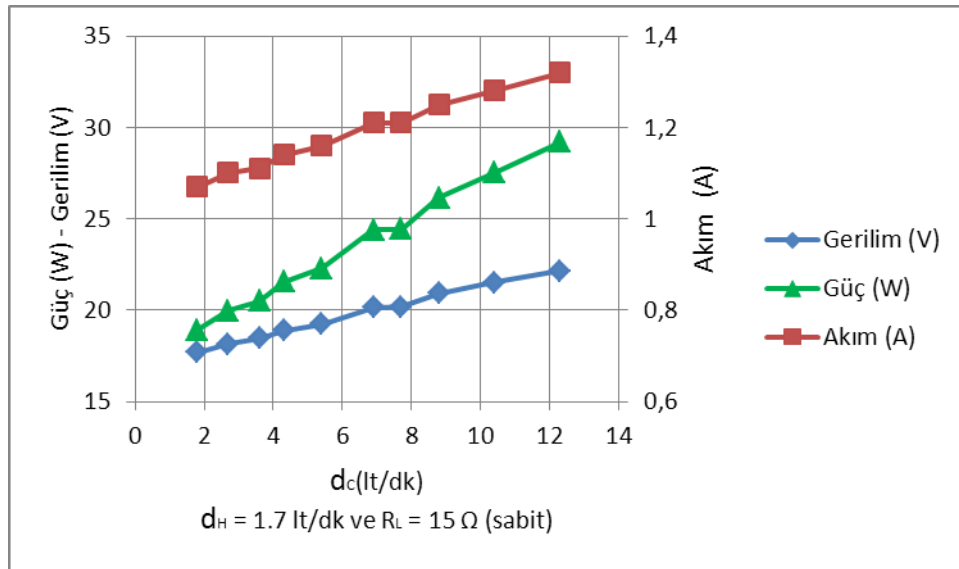


Şekil 5.19.  $d_C = 6,5$  lt/dk'da sabit tutulup  $d_H$  değiştirildiğinde sıcaklık değişimleri

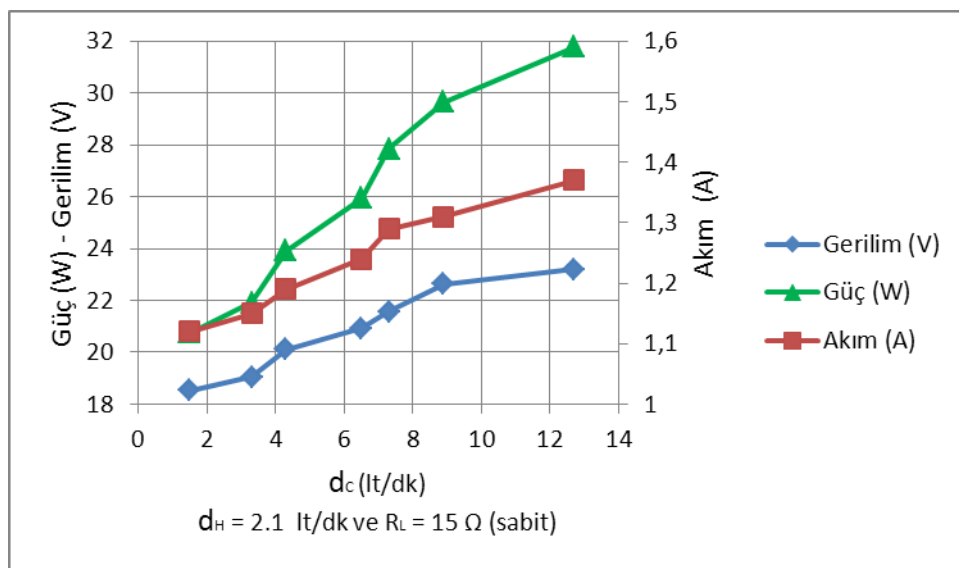


Şekil 5.20.  $d_C = 12,5$  lt/dk'da sabit tutulup  $d_H$  değiştirildiğinde sıcaklık değişimleri

TEJ'den geçen sıcak suyun debisi ve TEJ'e bağlanan yükün değeri belirli bir değerde sabit tutulduğunda, TEJ'den elde edilen I-V-P eğrileri Şekil 5.21, 22 ve 23'de verilmiştir. Bu eğriler elde edilirken maksimum gücün elde edildiği  $R_L = 15 \Omega$  sabit tutulmuştur.  $Q_H$  ve  $Q_C$  değerlerindeki artışa bağlı olarak elde edilen gerilim, akım ve güç miktarları artmıştır.

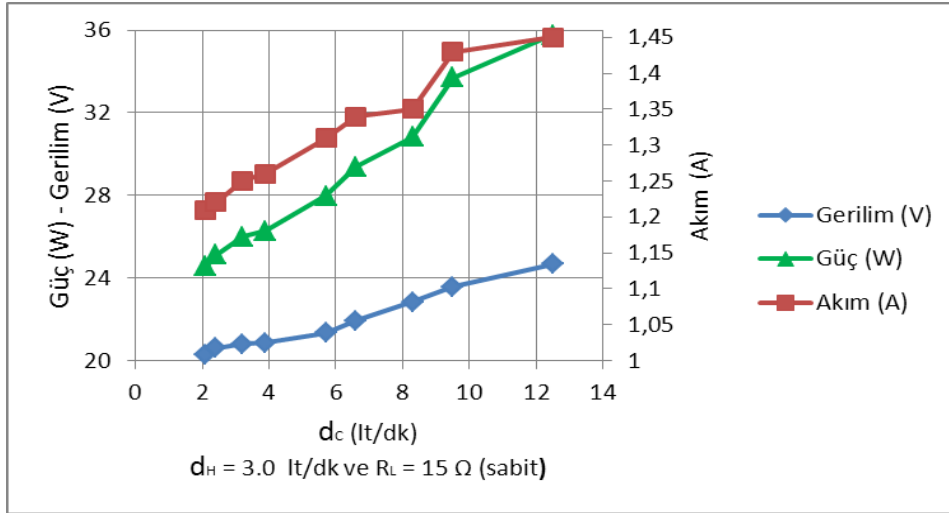


Şekil 5.21.  $d_H = 1.7 \text{ lt/dk}$  ve  $R_L = 15 \Omega$ 'da sabit tutulduğunda,  $d_c$ 'ye bağlı olarak deneysel I-V-P eğrileri



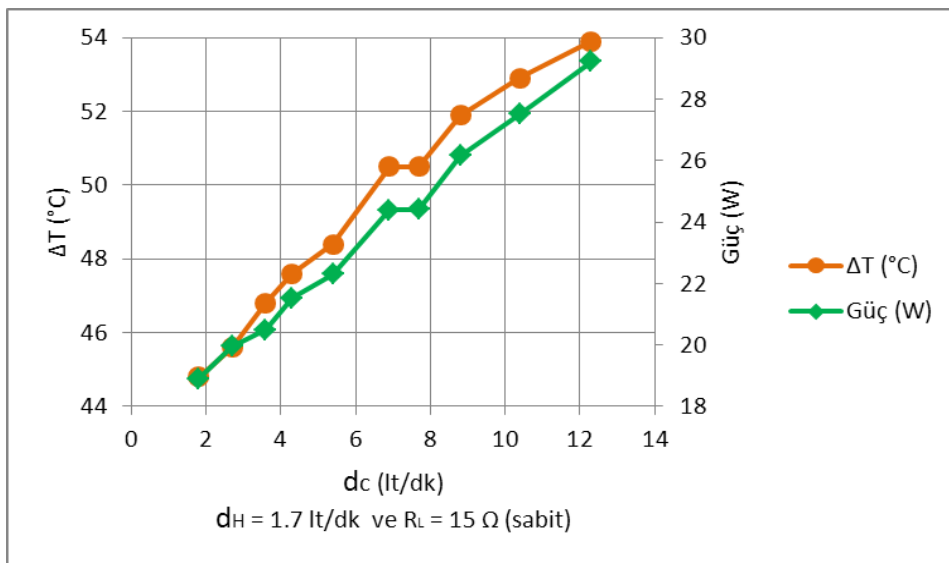
Şekil 5.22.  $d_H = 2.1 \text{ lt/dk}$  ve  $R_L = 15 \Omega$ 'da sabit tutulduğunda,  $d_c$ 'ye bağlı olarak deneysel I-V-P eğrileri



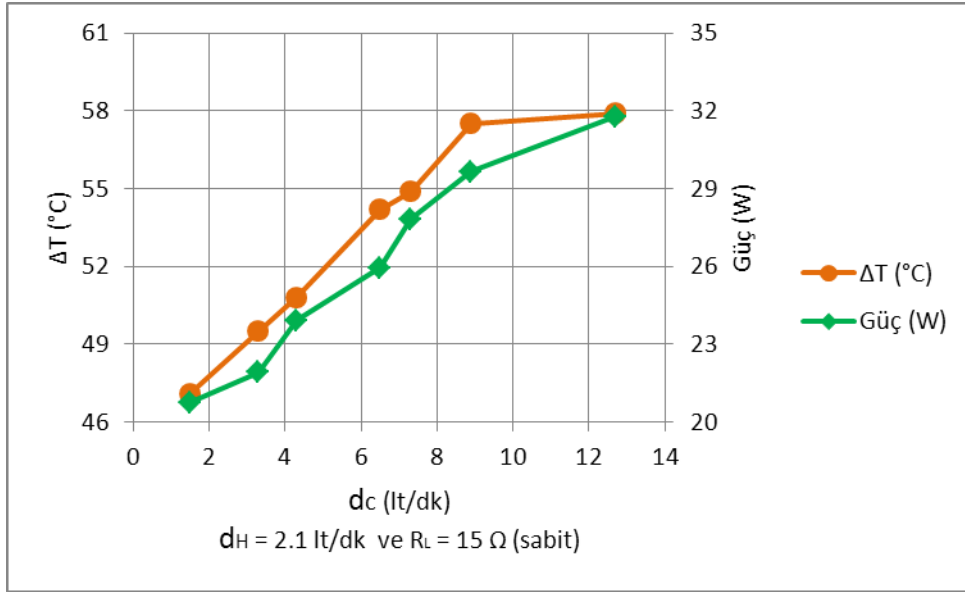


Şekil 5.23.  $d_H = 3.0$  lt/dk ve  $R_L = 15 \Omega$ 'da sabit tutulduğunda,  $d_c$ 'ye bağlı olarak deneysel I-V-P eğrileri

TEJ'den geçen sıcak-soğuk suyun debilerinin değişimine bağlı olarak TEJ'in yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı değişir. TEJ yük direnci  $R_L = 15 \Omega$ 'da sabit tutulup, sıcak-soğuk su debilerine bağlı olarak TEJ yüzeyleri arasında elde edilen sıcaklık farkı  $\Delta T$  ve TEJ'den elde edilen güç eğrileri Şekil 5.5, 24 ve 25'de verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde debi artışlarına bağlı olarak elde edilen sıcaklık farkı ve güç artmıştır.



Şekil 5.24. Sıcak taraf akış debisi 3 lt/dk'da tutulup, soğuk taraf akış debisi artırıldığında  $\Delta T$  ve güçteki değişim



Şekil 5.25. Sıcak taraf akış debisi 3 lt/dk'da tutulup, soğuk taraf akış debisi artırıldığında  $\Delta T$  ve güçteki değişim

Bu bölümde, düşük sıcaklıklardaki jeotermal atık ısıların elektrik enerjisi olarak geri kazanımının çevrimi için gerçekleştirilen 100 W'lık portatif ticari bir TEJ tasarımı sunulmuş ve performans testleri değişik sıcaklık farkları, sıcak-soğuk su akış debileri ve yük değerleri için analiz edilmiştir. Bunun sonucunda, TEJ yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı 67 °C, sıcak-soğuk su sıcaklıkları ve onların akış oranları  $T_H = 81,8$  °C,  $T_C = 15$  °C,  $d_H = 3,7$  lt/dk ve  $d_L = 12,8$  lt/dk, yapıldığında, %3,9 verimlilik ve 41,6 W'lık maksimum çıkış gücü elde edilmiştir. Burada bir dezavantaj çevrim verimliliğinin azlığı ve kurulum maliyetinin yüksekliğidir. Fakat jeotermal enerjiden geri kazanım düşünüldüğünde kaynağın bize bir maliyeti yoktur. Bu durumda düşük verimlilik hesaba katılmayabilir. Bu bölümde yapılan çalışmayla, TEJ'in sıcak-soğuk yüzey sıcaklıklarının sağlayan sıcak-soğuk suyun akış oranları, bunların sıcaklıkları ve yük direncinin etkileri araştırılmıştır. Yük direnci, sıcaklık farkı ve akış oranlarına bağlı olan güç gerilim ve akım eğrileri çıkarılmıştır. Sıcak-soğuk suyun akış oranları değiştirildiğinde, TEJ'in yüzeylerindeki sıcaklık farkı doğrusal olarak değişmiş ve buna bağlı olarak çıkış gücü de doğrusal değişmiştir. Uygulama alanlarında, eğer sıcak-soğuk suyun akış oranları arttırılabilirse, TEG'in çıkış gücü daha da artacaktır.

## 6. TERMOELEKTRİK JENERATÖR SİSTEMLERİ VE FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN ENERJİ ÜRETİMİNDE KAPLADIKLARI ALAN AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

Çalışmanın bu bölümünde, TEJ'lerin enerji üretiminde PV sistemlerle kapladıkları yüzey alan açısından karşılaştırılması uygulamalı olarak sunulmuştur. TEJ'ler herhangi bir ısı kaynağından aldıkları ısıyı direkt elektrik enerjisine dönüştürürken, PV'ler ise yalnızca güneş ışın enerjisini elektrik enerjisine çevirirler. Her ikisinde de maksimum güç iç dirençleri ile bağlanan yükün direnç değeri eşit olduğunda elde edilir. TEJ'lerle gece-gündüz fark etmeksizin elektrik enerjisi elde edilirken, PV'lerde güneşe bağımlılık söz konusudur [46].

### 6.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları büyük bir çeşitlilik gösterir. Bu kaynaklardan bazıları ve kullandıkları enerji kaynakları Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Yenilenebilir enerji kaynakları [101]

Yenilenebilir Enerji Kaynakları	Kaynak ve Yakıtı
Güneş enerjisi	Güneş
Rüzgâr enerjisi	Rüzgâr
Dalga enerjisi	Okyanuslar ve Denizler
Biyokütle enerjisi	Biyolojik atıklar
Jeotermal enerji	Yer altı suları
Hidrolik enerji	Nehirler
Hidrojen enerjisi	Su ve hidroksitler

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan hidrojen gazının helyuma dönüşme süreci ile (füzyon) açığa çıkan ışıma enerjisidir. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, yaklaşık olarak  $1370 \text{ W/m}^2$  değerindedir, ancak yeryüzüne ulaşan miktarı atmosferden dolayı  $0-1100 \text{ W/m}^2$  değerleri arasında değişim gösterir. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji

tüketiminden kat kat fazladır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermiş, çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir. Dünya ile güneş arasındaki mesafe 150 milyon km'dir. Dünya'ya güneşten gelen enerji, Dünya'da bir yılda kullanılan enerjinin 20 bin katıdır. Güneş ışınımının tamamı yer yüzeyine ulaşamaz, %30 kadarı atmosfer tarafından geriye yansıtılır. Güneş ışınımının %50'si atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşır. Bu enerji ile Dünya'nın sıcaklığı yükselir ve yeryüzünde yaşam mümkün olur. Rüzgâr hareketlerine ve okyanus dalgalanmalarına da bu ısınma neden olur. Güneşten gelen ışınımının %20'si atmosfer ve bulutlarda tutulur. Yer yüzeyine gelen güneş ışınımının %1'den azı bitkiler tarafından fotosentez olayında kullanılır. Bitkiler, fotosentez sırasında güneş ışığıyla birlikte karbondioksit ve su kullanarak, oksijen ve şeker üretirler. Fotosentez, yeryüzünde bitkisel yaşamın kaynağıdır. Güneş, nükleer enerji dışındaki bütün enerjilerin dolaylı veya direkt kaynağıdır. Güneş enerjisi teknolojileri yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından çok çeşitlilik göstermekle birlikte iki ana gruba ayrılabilir: (1) Fotovoltaik güneş teknolojisi: Fotovoltaik hücreler denen yarı iletken malzemeler güneş ışığını doğrudan elektriğe çevirirler. (2) Isıl güneş teknolojileri: Bu sistemlerde öncelikle güneş enerjisinden ısı elde edilir. Bu ısı doğrudan kullanılabilen gibi elektrik üretiminde de kullanılabilir.

Rüzgâr enerjisi; doğal, yenilenebilir, temiz ve sonsuz bir güç olup kaynağı güneştir. Güneşin dünyaya gönderdiği enerjinin %1-2 gibi küçük bir miktarı rüzgâr enerjisine dönüşmektedir. Güneşin, yer yüzeyini ve atmosferi homojen ısıtmamasının bir sonucu olarak ortaya çıkan sıcaklık ve basınç farkından dolayı hava akımı oluşur. Bir hava kütlesi mevcut durumundan daha fazla ısınırsa atmosferin yukarısına doğru yükselir ve bu hava kütlelerinin yükselmesiyle boşalan yere, aynı hacimdeki soğuk hava kütlesi yerleşir. Bu hava kütlelerinin yer değiştirmelerine rüzgâr adı verilmektedir. Diğer bir ifadeyle rüzgâr; birbirine komşu bulunan iki basınç bölgesi arasındaki basınç farklarından dolayı meydana gelen ve yüksek basınç merkezinden alçak basınç merkezine doğru hareket eden hava akımıdır. Rüzgârlar yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına akarken; dünyanın kendi eksenini etrafında

dönmesi, yüzey sürtünmeleri, yerel ısı yayılımı, rüzgâr önündeki farklı atmosferik olaylar ve arazinin topografik yapısı gibi nedenlerden dolayı şekillenir. Rüzgârın özellikleri, yerel coğrafi farklılıklar ve yeryüzünün homojen olmayan ısınmasına bağlı olarak, zamansal ve yöresel değişiklik gösterir. Rüzgâr hız ve yön olmak üzere iki parametre ile ifade edilir. Rüzgâr hızı yükseklikle artar ve teorik gücü de hızının küpü ile orantılı olarak değişir. Rüzgâr enerjisi uygulamalarının ilk yatırım maliyetinin yüksek, kapasite faktörlerinin düşük oluşu ve değişken enerji üretimi gibi dezavantajları yanında üstünlükleri genel olarak şunlar sayılabilir; atmosferde bol ve serbest olarak bulunması, yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağı, çevre dostu olması, kaynağı güvenilir, tükenme ve zamanla fiyatının artma riskinin olmaması, maliyeti günümüz güç santralleriyle rekabet edebilecek düzeye gelmiş olması, bakım ve işletme maliyetleri düşüklüğü ve işletmeye alınması kısa bir sürede gerçekleştirilmesidir.

Dalga enerjisinde, okyanusların dalgalarından ve gelgitlerden yararlanır. Güneş her ne kadar okyanusları büyük ölçüde etkilese de, gelgitler temel olarak ayın çekim kuvvetinden dolayı oluşur. Dalgalar ise büyük oranda rüzgâra bağlı olarak oluşurlar. Bir başka deyişle gelgitler ve dalgalar periyodik enerji kaynakları olmakla birlikte, okyanusun termal enerjisi aşağı yukarı sabittir. Aynı zamanda termal enerjiden elektrik üretiminin aksine, rüzgâr ve dalga enerjisi mekanik cihazlar kullanır. Bir baraj, deniz suyunu türbinleri çevirmeye zorlayarak dalga enerjisinden elektrik üretmeyi sağlar. Dalga enerjisinden elektrik üretmek için üç temel yöntem vardır: (1) Suyu rezervuarlara yönlendiren kanal sistemleri, (2) hidrolik pompalar kullanan yüzen sistemler ve (3) dalgaları bir haznedeki havayı sıkıştırmak için kullanan dalgalanan su sütunları sistemi. Bu sistemler yardımı ile üretilen mekanik enerji ya doğrudan bir jeneratör ile elektrik üretiminde ya da bir sıvının aktarımı ile elektrik üretiminde kullanılır.

Enerjinin çevresel kirliliğe yol açmadan sürdürülebilir olarak sağlanabilmesi için kullanılacak kaynakların başında biyokütle enerjisi gelmektedir. Biyokütle enerjisi tükenmez bir kaynak olması, her yerde elde edilebilmesi, özellikle kırsal alanlar için sosyo-ekonomik gelişmelere yardımcı olması nedeniyle uygun ve önemli bir enerji

kaynağı olarak görülmektedir. Biyokütle için mısır, buğday gibi özel olarak yetiştirilen bitkiler, otlar, yosunlar, denizdeki algler, hayvan dışkıları, gübre ve sanayi atıkları, evlerden atılan tüm organik çöpler kaynak oluşturmaktadır. Bitkilerin ve canlı organizmaların kökeni olarak ortaya çıkan biyokütle, genelde güneş enerjisinin fotosentez yardımıyla depolayan bitkisel organizmalar olarak adlandırılır. Biyokütlenin enerji kaynağı olarak avantajları arasında; hemen her yerde yetiştirilebilmesi, üretim ve çevrim teknolojilerinin iyi bilinmesi, her ölçekte enerji verimi için uygun olması, düşük ışık şiddetlerinin yeterli olması, depolanabilir olması gibi avantajlar sayılabilir.

Hidroelektrik santraller (HES) akan suyun gücünü elektriğe dönüştürürler. Akan su içindeki enerji miktarını suyun akış veya düşüş hızı tayin eder. Büyük bir nehirde akan su büyük miktarda enerji taşımaktadır. Ya da su çok yüksek bir noktadan düşürüldüğünde de yine yüksek miktarda enerji elde edilir. Her iki yolla da kanal ya da borular içine alınan su, türbinlere doğru akar, elektrik üretimi için pervane gibi kolları olan türbinlerin dönmesini sağlar. Türbinler jeneratörlere bağlıdır ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Hidroelektrik santraller; yenilenebilir kaynak olan sudan enerji elde etmeleri, sera gazı yayılımı yaratmamaları, inşaatın yerli imkânlarla yapılabilmesi, teknik ömrünün uzun olması ve yakıt giderlerinin olmaması, işletme bakım giderlerinin düşük olması yönünden en önemli yenilenebilir enerji kaynağıdır.

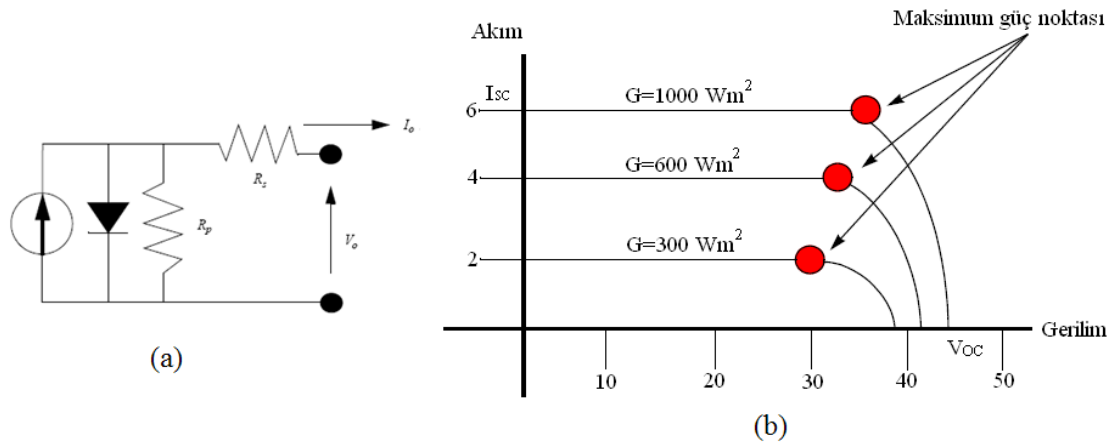
Hidrojen birincil enerji kaynaklarından üretilen bir yakıt olup temiz bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir önemli bir elementtir. Fakat dünyada tek başına bulunmadığından önce üretilmesi gerekir. Hâlihazırda çok pahalı olan bu üretim, su ve doğalgaz gibi elementlerdeki hidrojenin ayrıştırılmasıyla yapılır. Bu şekilde elde edilen hidrojen pillerine yakıt hücresi adı verilmektedir. Şu anda bazı otomobiller hem benzin, hem de hidrojenin kullanıldığı hibrit yakıt yöntemiyle çalışmaktadır. Böylece açığa çıkan kirli havanın miktarı %30–40 oranında azaltılabilmektedir [98–99, 100–101].

## 6.2. Fotovoltaik Sistemler ve Termoelektrik Jeneratörlerin Karakteristikleri

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi sonsuz, temiz, yenilenebilir ve PV paneller sayesinde doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi gibi avantajlarından dolayı özellikle elektrik şebekesinden uzak yerleşim alanlarında yaygın kullanım alanı bulmuştur. PV sistemlerden elde edilen elektrik enerjisinin kW başına maliyeti su, kömür ve petrol gibi kaynaklara göre yüksektir. Bu birim maliyeti genelde PV paneller ve kullanılan batarya gurubu oluşturmaktadır. Son zamanlarda birim maliyeti azaltmak ve güneş enerjisinden azami derecede faydalanabilmek için batarya gurubunun kullanımı azalmış direkt şebekeyle bağlantılı PV sistemler geliştirilmiştir. Günümüzde PV sistemler yaklaşık %20 verimle çalıştırılmaktadır. Yeni geliştirilen optik yoğunlaştırıcılar sayesinde bu verim değeri yaklaşık %30'lara kadar çıkarılmıştır [108].

Bugün çok yaygın PV teknolojileri tekli kristal ve çoklu kristal silikon modüllerden oluşan yarıiletken cihazlardır. PV hücreler n- ve p-tip iki yarıiletken malzemeden oluşur. Işınım etkisiyle fotonlar PV hücresine çarparak elektronların hareketini sağlar ve yük üzerinden geçmesine neden olur. Işınım şiddeti yükseldikçe PV hücrenin çalışma verimi artar. PV hücreler akım kaynağı gibi çalışırlar [6]. Bir PV hücre Şekil 6.1(a)'daki gibi modellenilebilir. PV hücresinin modeli akım kaynağı, diyot, paralel direnç  $R_p$  ve seri dirençten  $R_s$  meydana gelir. PV hücresi açık devre olduğunda akım diyot üzerinden, kısa devre edildiğinde ise harici yük üzerinden devresini tamamlar. Paralel direncin değeri çok büyük olmasına rağmen seri direncin değeri çok düşüktür. Bağlanan yükün direnciyle PV hücrenin iç direnci eşit olduğunda maksimum güç elde edilir. PV hücrelerden maksimum gücü yakalamak için, solar invertörlerin MPPT kontrol döngüleri kullanılır. Şekil 6.1(b)'de gösterildiği gibi, bir PV hücresi PV panelin büyüklüğüne veya ona bağlanan yükün tipine ve güneş ışığının yoğunluğuna bağlı olarak farklı davranışlar gösterir. PV hücresinin karakteristiği, farklı yükler bağlandığında gerilim ve akım değişimi olarak açıklanır. PV hücresi güneş ışığında uçları açıkken uçlarında maksimum gerilim  $V_{OC}$  ölçülür. Bu gerilim açık devre gerilimidir. PV hücresinin iki ucu kısa devre edildiğinde maksimum akım  $I_{SC}$  geçer ve bu durumda gerilim sıfırdır. Geçen akım kısa devre

akımı olarak isimlendirilir. Sıcaklık ve ışık yoğunluğu PV hücrelerin çıkış karakteristiklerini etkiler. Akım ışık yoğunluğuyla doğru orantılıdır. Gerilim de yayılan ışık seviyesiyle değişir fakat bu değişim çok azdır. Maksimum güç noktası PV sistemden alıcılara en yüksek gücün iletildiği noktadır. PV'ler geniş gerilim ve akım aralıklarında çalışırlar. Bu nedenle çıkış gücü sürekli değişir [109]. TEJ'lerin karakteristikleri Bölüm 3'de detaylarıyla açıklanmıştır.



Şekil 6.1. (a) PV hücrelerin elektriksel modeli, (b) aydınlanmaya karşı V-I eğrileri

### 6.3. Deneysel Kurulum

#### 6.3.1. Deneysel fotovoltaik panel kurulumu

Deneysel PV kurulumu Resim 6.1'deki gibi gerçekleştirilmiştir. Deneyde solar panel olarak 72 PV hücreden oluşan LCS Solar Strom AG tip ve  $1880 \times 808 \times 40$  mm boyutlarında PV panel kullanılmıştır. PV panelin maksimum gücü etiket değerinde  $200 \text{ W}$ 'tır. PV panelin farklı iki zamanda değerleri alınmıştır. PV panelin karakteristiklerini elde etmek için ayarlı direnç kullanılmıştır.

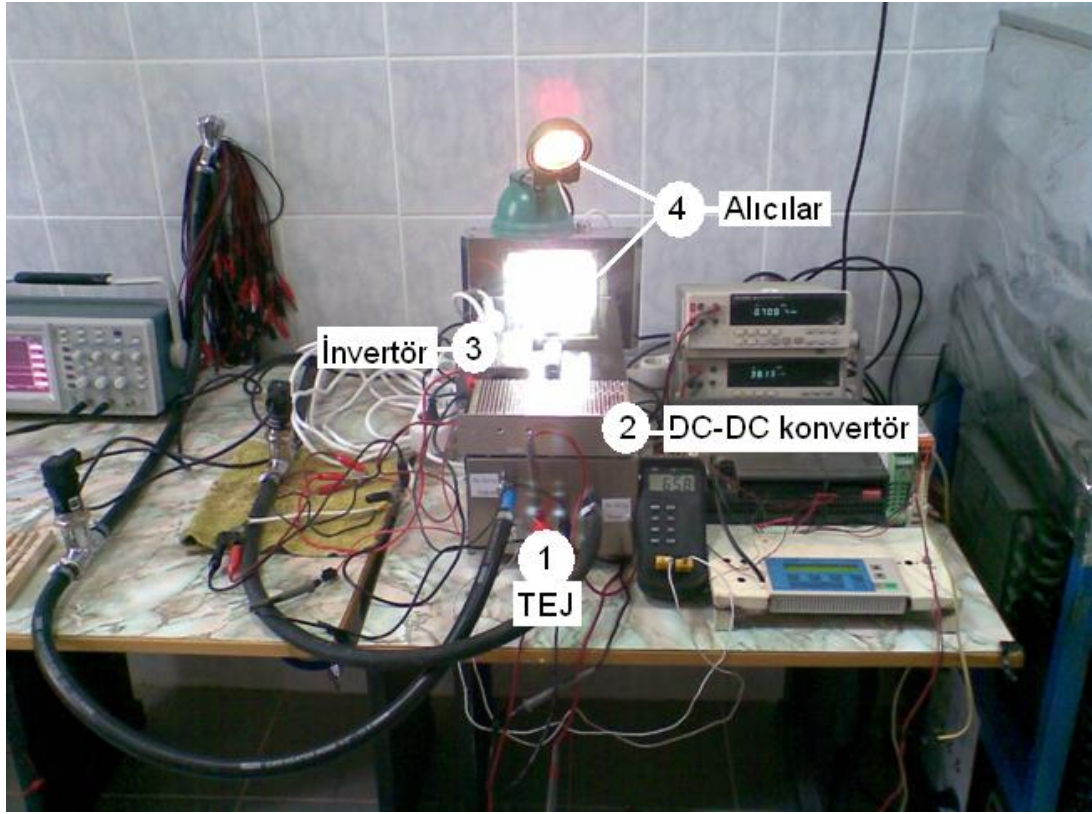




Resim 6.1. PV sistem kurulumu

### 6.3.2. Deneysel termoelektrik jeneratör kurulumu

Deneysel TEJ kurulumu Resim 6.2’de verilmiştir. Bu TEJ sistemi portatif olarak tasarlanmıştır. İstenildiğinde herhangi bir jeotermal kaynakta kullanılabilir. TEJ sistemi dört kısımdan meydana gelmektedir: (1) TEJ, (2) DC-DC konvertör, (3) invertör ve (4) alıcılar. Alıcı olarak tasarlanan LED armatür ve bir çalışma lambası kullanılmıştır. Bu deneysel kurulum detaylarıyla Bölüm 5’de açıklanmıştır.



Resim 6.2. Deneysel ticari portatif TEJ kurulumu

#### 6.4. Deneysel Sonuçlar ve Değerlendirme

PV sistem deneylerinde Çizelge 6.2’de elde edilen veriler elde edilmiştir. Deneyler 8 °C ve 14 °C iki farklı çevre sıcaklık değerleri için gerçekleştirilmiştir. Maksimum güç değeri yük direnci 10  $\Omega$ , geçen akım değeri 3,727 A ve gerilim 36,8 V iken yaklaşık 137 W olmuştur. Birim alana düşen elektrik enerjisi üretim miktarı 91,3 W/m<sup>2</sup> olmuştur.

TEJ deneyleri ortam sıcaklığı yaklaşık 20 °C’de yapılmıştır. TEJ’in iç direnci 11,25  $\Omega$  ölçülmüştür. Sıcak su için laboratuvar ortamları için kurulan bir sıcak-soğuk su sirkülasyon sisteminden sağlanmıştır. Soğuk su için de şebeke suyu kullanılmıştır. Deneysinden alınan değerler Çizelge 6.3’de verilmiştir.  $I = 1,598$  A,  $V = 26,452$  V iken maksimum güç  $P_{max} = 42,27$  W olmuştur. Sıcaklık farkı arttıkça TEJ’den alınan elektrik gücünde artış olmuştur. Sistemin jeotermal kaynağı olarak sıcak ve soğuk su kullanıldığı için sıcak taraf sıcaklığında suyun sıcaklığı 93 °C’ye kadar

çıkartılabilmektedir. Bu sıcak su TEJ'e verildiğinde soğuk su ile etkileşime girmiş ve sıcaklık değeri maksimum 66,8 °C'ye çıkarılabilmektedir. Bu durumda sıcak suyun debisi yaklaşık 3,8 lt/dk soğuk suyun debisi de 12,8 lt/dk'dır. Debilerde az bir düşüş sıcaklık farkındaki azalmayı netice vermekte ve elde edilen güçte azalma olmaktadır. Jeotermal alanlarda sıcak suyun debisi daha fazla olacağı için daha yüksek sıcaklık farklarına çıkılabilecek ve elde edilecek elektrik gücünde artış olacaktır. Maksimum güç değeri TEJ iç direnci ile harici yükün direncinin eşitlendiğinde elde edilmiştir. Birim alana düşen elektrik enerjisi üretim miktarı 840 W/m<sup>2</sup> olmuştur.

Çizelge 6.2. PV panelden değişik yükte ve sıcaklıklarda alınan veriler

Ryük (Ω)	I (A) 8°C	V (V) 8°C	P (W) 8°C	I (A) 14°C	V (V) 14°C	P (W) 14°C
sonsuz	0	41,5	0	0	41,5	0
0	5,43	0	0	5	0	0
100	0,40	40,9	16,6	0,43	42,1	18,3
90	0,45	40,7	18,5	0,46	41,9	19,6
80	0,50	40,7	20,7	0,52	41,9	21,7
70	0,57	40,6	23,1	0,6	41,7	25
60	0,68	40,6	27,6	0,68	41,6	28,3
50	0,80	40,5	32,4	0,82	41,5	34,2
40	0,97	40,1	39,1	1,02	41,4	42,2
30	1,29	39,7	51,5	1,35	41,1	55,6
20	1,93	38,8	75,1	1,96	40,3	79,3
15	2,69	37,7	101,7	2,72	39,2	106,6
10	3,63	36,3	131,9	3,72	36,8	137,1
5	5,4	25,1	135,7	4,39	20,8	91,4

Çizelge 6.3. ΔT = 66,8 °C değerinde TEJ verileri

ΔT	Sıcak yüzey °C	Soğuk yüzey °C	TEG I (A)	TEG V (V)	TEG P (W)	Ryük (Ω)	Sıcak su debi lt/dk	Soğuk su debi lt/dk
66,8	82,5	15,7	0	51,5	0	sonsuz	3,7	12,8
66,8	81,8	15	3,10	0	0	0	3,7	12,8
67,4	82,2	14,8	1,18	32,60	38,69	25	3,7	12,8
66,6	81,5	14,9	1,38	29,92	41,29	20	3,7	12,8
66,4	81,4	15	1,59	26,45	42,27	15	3,7	12,8
66	81,1	15,1	1,76	23,86	42,18	10	3,7	12,8
65,4	80,8	15,4	2,35	14,41	33,93	5	3,7	12,8
65,2	80,7	15,5	2,61	10,13	26,49	3	3,7	12,8
65	80,6	15,6	2,76	7,66	21,19	2	3,7	12,8
64,6	80,4	15,8	2,95	4,47	13,22	1	3,7	12,8
65,1	80,8	15,7	3,06	2,93	8,98	0,5	3,7	12,8

TEJ'ler jeotermal gibi kaynakla elektrik enerjisi üretirken, PV sistemler güneş enerjisi ile üretirler. Bu nedenle PV sistemler güneşe bağımlıdır ve yalnızca güneşli günlerde verimli olarak kullanılırlar. TEJ'lerde ise jeotermal kaynak gibi bir kaynak var olduğu sürece elektrik enerjisi üretimi söz konusudur. Kurulan TEJ sisteminde birim alan başına elde edilen elektrik enerjisi miktarı  $840 \text{ W/m}^2$  iken, PV sistemde  $91,3 \text{ W/m}^2$  olmuştur. TEJ sisteminde birim alan başına düşen elektrik enerjisi miktarı, PV sistemden 9,2 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Her iki enerji kaynağı da çevre dostu ve yenilenebilirdir.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, TEJ'lerin elektriksel, termoelektriksel ve ısıl parametrelerinin alınabilmesi, testlerinin yapılabilmesi ve sürekli çalışma değerlerinin alınıp saklanabilmesi için yeni bir TEG–PAS sistemi kurulmuştur. Matlab/Simulink benzetim programıyla TEM'in TEJ olarak kullanılması için, matematiksel modelinin benzetimi yapılmış ve farklı sıcaklık aralıkları için benzetim sonuçları deneylerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında, TEG–PAS'ın üzerinde denenmesi ve düşük sıcaklıklı jeotermal alanlardaki ısının kullanılması amacıyla yeni bir ticari portatif TEJ gerçekleştirilmiştir ve bu TEJ'in parametreleri TEG–PAS yardımıyla alınarak tüm analizleri yapılmıştır. Ticari bir PV paneller ve yine ticari olarak üretilen ve tüm testlerinde TEG–PAS sisteminin kullanıldığı yaklaşık 100 W'lık olan TEJ'in elektrik üretiminde kapladıkları alan açısından karşılaştırması yapılmıştır.

Matlab/Simulink programıyla yapılan TEJ benzetim çalışmaları bir prototip TEJ üzerinde gerçekleştirildiğinde, teorik sonuçlar ve SCADA'lı TEG–PAS sistemiyle ölçülen deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, 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  $Q_H = 197 \text{ W}$  iken, TEJ ve yük dirençleri birbirine eşitlendiğinde; çıkış gerilimi  $V_{\max} = 2,2 \text{ V}$ , çıkış gücü  $P_{\max} = 6,71 \text{ W}$  ve verim %3,4 elde edilmiştir.

Ticari TEJ sistemi ve prototip TEJ sistemlerinin analizleri TEG–PAS yardımıyla gerçekleştirilmiştir. TEJ'lerden elektrik enerjisi elde edilmesinde, TEJ yüzey sıcaklıkları, çıkıştan alınan akım–gerilim değerleri ve debiler anlık olarak TEG–PAS sistemiyle ölçülmüştür. Bu verilerin tamamı bir SCADA programı yardımıyla da bilgisayardan sürekli olarak izlenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Aynı zamanda, bilgisayarın olmadığı ortamlarda anlık TEJ verilerinin gözlemlenmesi için, PLC'yle haberleşebilen bir OP kullanılmıştır. TEJ'in ölçüm verilerinin tamamı yeni TEG–PAS sisteminde toplanmıştır. Kurulan ölçüm sistemi yaklaşık 10 ve 100 W gücündeki TEJ sistemlerinde kullanılmıştır. Altec firmasının ürettiği modüller TEG–PAS sistemi ile incelenmiş ve maksimum güç ve verim hesaplamaları yapılmıştır.

TEJ deneylerinin laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilmesi için sıcak–soğuk su sirkülator sistemi kurulmuştur. Kurulan sirkülator sistemi ve TEG–PAS sayesinde, TEJ'in verimine ve çıkış gücüne etki eden akışkan ve yükün etkisi araştırılmıştır. TEJ'in yüzey sıcaklıklarını sağlayan sıcak ve soğuk suyun sıcaklıkları sabit tutulup, debileri arttırıldığında, termoelektrik jeneratörün yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı belirli bir değere kadar çıkarılabilmiş ve bunun sonucu olarak da üretilen güç artmıştır. Yük direnci, sıcaklık farkı ve akış oranlarına bağlı olan güç gerilim ve akım eğrileri çıkarılmıştır. Sıcak–soğuk suyun akış oranları değiştirildiğinde, TEJ'in yüzeylerindeki sıcaklık farkı doğrusal olarak değişmiş ve buna bağlı olarak çıkış gücü de artmıştır. Kurulan sistemde, termoelektrik jeneratörün yüzeylerinden geçirilen sıcak suyun debisi 3,7 lt/dk ve soğuk suyun debisi 12,8 lt/dk değerlerine kadar çıkarılabilmıştır. Bu durumda, TEJ yüzeyleri arasında sıcaklık farkı 67 °C ölçülmüştür. Maksimum güç, TEJ yük direnci 15  $\Omega$  olduğunda, 41,6 W elde edilmiş ve maksimum çevrim verimliliği %3,9 olarak ölçülmüştür. Uygulama alanlarında, eğer sıcak–soğuk suyun akış oranları arttırılabilirse, TEJ'in çıkış gücü artacaktır.

TEJ'ler PV sistemlerle birbirlerine çok büyük benzerlikler göstermektedir. Neredeyse PV sistemlerde kullanılan yöntemlerin çoğu TEJ sistemlerine adapte edilebilir. TEJ'ler jeotermal alanlarda kullanıldıklarında günün tüm saati enerji üretmektedir. Fakat PV sistemler yalnızca gündüz elektrik enerjisi üretir. Her ikisinde de maksimum güç iç dirençleri ile bağlanan yükün direnç değeri eşit olduğunda elde edilir. Yeni ticari portatif olarak üretilen yaklaşık 100 W'lık TEJ sistemi bir PV sistemle ürettikleri güce göre kapladıkları alan açısından karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, kurulan TEJ sisteminde birim alan başına elde edilen elektrik enerjisi miktarı 840 W/m<sup>2</sup> iken, PV sistemde 91,3 W/m<sup>2</sup> olmuştur. TEJ sisteminde birim alan başına düşen elektrik enerjisi miktarı, PV sistemden yaklaşık dokuz kat daha fazla olduğu görülmüştür.

TEJ'lerin verimlerinin düşük olması ve kurulum maliyetlerinin yüksek oluşu ilk bakışta bir çekince oluşturmaktadır. Fakat kullandıkları enerji kaynağının yenilenebilir olması ve yaklaşık kırk yıl gibi bir kullanım ömürlerinin olması bu çekinceyi gidermektedir. TEJ'ler termal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine

çevirirler. Sessiz çalışmaları, ölçeklenebilir olmaları, hareketli parçalarının ve sera gazı salınımlarının olmaması gibi çeşitli avantajlara sahiptirler. Dünya'da enerji ihtiyacının devamlı artış gösterdiği, hali hazırda kullanılan enerji kaynakları nedeniyle çevre kaygıları devam ettiği müddetçe yenilenebilir enerji kaynaklarından olan TEJ'lere ihtiyaç sürekli olacak ve sıcak araştırma konuları arasında yer almayı sürdürecektir.

Türkiye jeotermal potansiyel de Dünya'da beşinci, Avrupa ülkeleri arasında da birinci sırada yer almaktadır. Bu enerjinin konut ısıtması, sera ısıtması, termal tesisler ve elektrik üretiminde kullanılmasıyla büyük bir tasarruf elde edilecektir. TEJ'lerin düşük jeotermal sıcaklıklar da dahi elektrik enerjisi üretimine katkıda bulunmasıyla, Türkiye'de jeotermal alanlarda TEJ santrallerinin kurulmasıyla bu tasarrufa ve verimliliğe katkıda bulunulacağı düşünölmektedir.

### KAYNAKLAR

1. Riffat, S. B. ve Ma, X., “Thermoelectrics: A review of present and potential applications”, *Applied Thermal Engineering*, 23(8): 913–935 (2003).
2. Ahıska, R. ve Dişlitaş, S., “Microcontroller based thermoelectric generator application”, *Gazi University Journal of Science*, 19(2): 1–7 (2006).
3. Ahıska, R., Ahıska, G. ve Ahıska, K., “Analysis of a new method for measurement of parameters of real thermoelectric module employed in medical cooler for renal hypothermia”, *Instrumentation Science & Technology*, 37(1): 102–123 (2009).
4. Ahıska, R. ve Ahıska, K., “New method for investigation of parameters of real thermoelectric modules”, *Energy Conversion and Management*, 51: 338–345 (2010).
5. Rowe, D. M., “Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source”, *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*, 1(1): 13–23 (2006).
6. Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K. ve Al–Hallaj, S., “A review on phase change energy storage: Materials and applications”, *Energy Conversion and Management*, 45(9–10): 1597–1615 (2004).
7. Dai, D., Zhou, Y. ve Liu, J., “Liquid metal based thermoelectric generation system for waste heat recovery”, *Renewable Energy*, 36(12): 3530–3636 (2011).
8. Nagayoshi, H., Tokimusu, K. ve Kajikawa, T., “Evaluation of multi MPPT thermoelectric generator system”, *26<sup>th</sup> International Conference on Thermoelectrics*, Jeju, 318–321 (2007).
9. Karabetoğlu, S., Şişman, A., Öztürk, Z. F. ve Sahin, T., “Characterization of a thermoelectric generator at low temperatures”, *Energy Conversion and Management*, 62(1): 47–50 (2012).
10. Zhao, L. D., Zhang, B. P., Li, J. F., Zhou, M., Liu, W. S. ve Liu, J., “Thermoelectric and mechanical properties of nano–SiC–dispersed Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering”, *Journal of Alloys and Compounds*, 455(1–2): 259–264 (2008).
11. Xi, H., Luo, L. ve Fraise, G., “Development and applications of solar–based thermoelectric technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(5): 923–936 (2007).



12. Tsai, H. L. ve Lin, J. M., “Model building and simulation of thermoelectric module using Matlab/Simulink”, *Journal of Electronic Materials*, 39(9): 2105–2111 (2010).
13. Kim, S., Cho, S., Kim, N. ve Park, J., “A maximum power point tracking circuit of thermoelectric generators without digital controllers”, *IEICE Electronics Express*, 7(20): 1539–1545 (2010).
14. Liang, X., Sun, X., Shu, G., Sun, K., Wang, X. ve Wang X., “Using the analytic network process (ANP) to determine method of waste energy recovery from engine”, *Energy Conversion and Management*, 66(2): 304–311 (2013).
15. Şahin, A. Z. ve Yılbaş, B. S., “The thermoelement as thermoelectric power generation: Effect of leg geometry on the efficiency and power generation”, *Energy Conversion and Management*, 65(1): 26–32 (2013).
16. Champier, D., Bedecarrats, J. P., Rivaletto, M. ve Strub, F., “Thermoelectric power generation from biomass cook stoves”, *Energy*, 35(2): 935–942 (2010).
17. Fraisse, G., Ramousse, J., Sgorlon, D. ve Goupil, C., “Comparison of different modeling approaches for thermoelectric elements”, *Energy Conversion and Management*, 65(1): 351–356 (2013).
18. Gou, X., Xiao, H. ve Yang, S., “Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system”, *Applied Energy*, 87(10): 3131–3136 (2010).
19. Stevens, J. W., “Performance factors for ground-air thermoelectric power generators”, *Energy Conversion and Management*, 68(4): 114–123 (2013).
20. Lossec, M., Multon, B., ve Ahmed, H. B., “Sizing optimization of a thermoelectric generator set with heatsink for harvesting human body heat”, *Energy Conversion and Management*, 68(4): 260–265 (2013).
21. Hadjistassou, C., Kyriakides, E., ve Georgiou, J., “Designing high efficiency segmented thermoelectric generators”, *Energy Conversion and Management*, 66(2): 165–172 (2013).
22. Çengel, Y. A. ve Boles, M. A., “Thermodynamics: An Engineering Approach 5<sup>th</sup> Ed.”, Çev. Ed.: Pınarbaşı, A., *McGraw-Hill*, 60–62, 279–295 (2008).
23. Dağsöz, A. K., “Isı Geçişi Isı Transferi 4. Baskı”, *META Basım Yayım*, İstanbul, 1 (1990).
24. İnternet : National Communications System “Supervisory Control and Data Acquisition” [http://www.ncs.gov/library/tech\\_bulletins/2004/tib\\_04-1.pdf](http://www.ncs.gov/library/tech_bulletins/2004/tib_04-1.pdf) (2004).

25. Ahıska, R. ve Dişlitaş, S., “Computer controlled test system for measuring the parameters of the real thermoelectric module”, *Energy Conversion and Management*, 52(1): 27–36 (2011).
26. Gould, C. A., Shammaş, N. Y. A., Grainger, S. ve Taylor, I., “A comprehensive review of thermoelectric technology, micro–electrical and power generation properties”, *26<sup>th</sup> International Conference on Microelectronics*, Nis, 329–332 (2008).
27. Eklund, J. M., Spencer, I., Zheng, J., Mercy, D., Elliot, C. ve Marnoch, I., “Data collection, simulation and design of a waste heat energy conversion system”, *2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference*, Montreal, 1–6 (2009).
28. Han, H. S., Kim, Y. S., Kim, Y., Umd, S. ve Hyuna, J. M., “Performance measurement and analysis of a thermoelectric power generator”, *12<sup>th</sup> IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, Las Vegas, 1–7 (2010).
29. Kim, K. J., “Thermal and power generating performances of thermoelectric energy recovery modules”, *12<sup>th</sup> IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, Las Vegas, 1–7 (2010).
30. Hasebe, M., Kamikawa, Y. ve Meiarashi, S., “Thermoelectric generators using solar thermal energy in heated road pavement”, *25<sup>th</sup> International Conference on Thermoelectrics*, Vienna, 697–700 (2006).
31. Singh, R., Tundee, S. ve Akbarzadeh, A., “Electric power generation from solar pond using combined thermosyphon and thermoelectric modules”, *Solar Energy*, 85(2): 371–378 (2011).
32. Küçükkömürler, A., “Thermoelectric powered high temperature wireless sensing and telemetry”, *4<sup>th</sup> IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Xi’an, 1080–1086 (2009).
33. Zhou, Y., Paul, S. ve Bhunia, S., “Harvesting wasted heat in a microprocessor using thermoelectric generators: Modeling, analysis and measurement”, *Design, Automation and Test in Europe*, Munich, 98–103 (2008).
34. Rinalde, G.,F., Juanico, L. E., Taglialavore, E., Gortari, S. ve Molina, M. G., “Development of thermoelectric generators for electrification of isolated rural homes”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(11): 5818–5822 (2010).
35. Park, J. ve Mackay, S., “Practical data acquisition for instrumentation and control systems”, *Elsevier: Butterworth-Heinemann*, 1–75 (2003).

36. Kuo, B. C., “Otomatik Kontrol Sistemleri”, Çev. Ed.: Bir, A., *Literatür:Yayincılık*, İstanbul, 1–20 (2006).
37. Yarman, F. T. ve Erten, Y. M., “Bilgisayar Sistemleri”, *Akademik Yayincılık*, Ankara, 1–150 (2000).
38. Schleicher, M. ve Blasinger, F., “Control Engineering: A Guide for Beginners”, *Jumo*, Germany, 9–66 (2000).
39. Boztepe, M., “LabView programı ile veri toplama, veri işleme ve veri izlemenin e-öğrenme olarak hazırlanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 24–59 (2005).
40. Dişlitaş, S., “Bilgisayar kontrollü termoelektrik performans analiz sistemi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü*, Ankara, 1–17 (2009).
41. Ahıska, R. ve Mamur, H., “A test system and supervisory control and data acquisition application with programmable logic controller for thermoelectric generators”, *Energy Conversion and Management*, 64(12): 15–22 (2012).
42. Ahıska, R., Mamur, H. ve Uliş, M., “Modeling and experimental study of thermoelectric module as generator”, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26(4): 889–896 (2011).
43. Ahıska, R., Mamur, H. ve Uliş, M., “Characterization of thermoelectric module as generator”, *X. International Conference on Sustainable Energy Technologies*, İstanbul (2011).
44. Ahıska, R., Mamur, H., ve Korkmaz, F., “The potentials and applications of thermoelectric generators in the recovery of geothermal energy”, *6<sup>th</sup> IEESE International Ege Energy Symposium and Exhibition*, İzmir, 328–338 (2012).
45. Ahıska, R., Mamur, H. ve Uliş, M., “The application of low–power dc-dc boost converter for thermoelectric generators”, *MKT2012 Project Based Mechatronics Education Workshops*, Ilgaz, Cankiri, 57 (2012).
46. Ahıska, R., Mamur, H., Korkmaz, F., Topaloğlu, I., Dönertaş, M.A., İçyer, A. ve Sahin, U., “The comparison of thermoelectric generator systems and photovoltaic systems in energy production”, *MKT2012 Project Based Mechatronics Education Workshops*, Ilgaz, Cankiri, 58 (2012).
47. Ahıska, R. ve Mamur, H., “Data acquisition system for thermoelectric generators”, *XIII International Conference on Physics and Technology of Thin Films and Nanostructures*, Ivano–Frankivsk, 240–242 (2011).

48. Kapıdere, M., “Mikrodenetleyici kontrollü termohipoterm tıp cihazı tasarımı ve gerçekleştirilmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 14–26 (2005).
49. Fidan, U., “Mikrodenetleyici kontrollü taşınabilir termoelektrik tıp kiti cihazı tasarımı ve uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1–60 (2000).
50. Ökten, E., “Mikrodenetleyicili sıcaklık ve hız kontrollü termoelektrik yarıiletken üretim sistemi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3–35 (2007).
51. Boztepe, M., “Güneş pilleri ile çalışan peltier elemanlı bir soğutucu sistemin geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 1–35 (1995).
52. Möröyör, E., “Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> ve Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> içerikli bileşenlerin termoelektrik, yapısal ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 18–36 (2005).
53. Yang, J., Aizawa, T., Yamamoto, A. ve Ohta, T., “Thermoelectric properties of p-type (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>)<sub>x</sub>(Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub> prepared via bulk mechanical alloying and hot pressing”, *Journal of Alloys and Compounds*, 309(1–2): 225–228 (2000).
54. İnternet : Tellurex Corporation Ltd. “An Introduction to Thermoelectrics” <http://www.tellurex.com/cthermo.html> (2009).
55. Pramanick, A. K. ve Das, P. K., “Constructal design of a thermoelectric device”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(7–8): 1420–1429 (2006).
56. Mcenaney, K., “Modeling of solar thermal selective surfaces and thermoelectric generators”, *Massachusetts Institute of Technology*, Massachusetts, 67–70 (2010).
57. Niu, X., Jianlin, Y. ve Wang, S., “Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator”, *Journal of Power Sources*, 188(2): 621–626 (2009).
58. Pasold, G., Etlin, P., Hahn, M., Muster, U., Nersessian, V., Bonfrate, D., Buser, R., Cucinelli, M. ve Gutsche, M., “Powering wireless sensors: microtechnology-based large-area thermoelectric generator for mass applications”, *2011 IEEE Sensors*, Limerick, 1293–1296 (2011).
59. Chavez-Urbiola, E. A., Vorobiev, Y. V. ve Bulat, L. P., “Solar hybrid systems with thermoelectric generators”, *Solar Energy*, 86(1): 369–378 (2012).

60. Koplou, M., Chen, A., Steingart, D., Wright, P. K. ve Evans, J. W., “Thick film thermoelectric energy harvesting systems for biomedical applications”, *5<sup>th</sup> International Summer School and Symposium on Medical Devices and Biosensors*, Hong Kong, 322–325 (2008).
61. Champier, D., Bédécarrats, J. P., Kousksou, T., Rivaletto, M., Strub, F. ve Pignolet, P., “Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove”, *Energy*, 36(3): 1518–1526 (2011).
62. Dikmen, E., “Termoelektrik soğutucuların çalışma kriterlerine etki eden faktörlerin ve endüstrideki kullanım alanlarının tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 1–45 (2002).
63. Güler, N., F. ve Ahıska, R., “Design and testing of a microprocessor-controlled portable thermoelectric medical cooling kit”, *Applied Thermal Engineering*, 22(11): 1271–1276 (2002).
64. Kapıdere, M., Ahıska, R. ve Güler, İ., “A new microcontroller based human brain hypothermia system”, *Journal of Medical Systems*, 29(5): 501–512 (2005).
65. Ahıska, R., Fidan, U. ve Dişlitaş, S., “Farklı sıcaklık kontrol sistemlerinin termoelektrik tıp kitinin performansına etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(2): 441–447 (2008).
66. Dişlitaş, S. ve Ahıska, R., “Çok fonksiyonlu termoelektrik buzdolabının absorb buzdolabı ile enerji tüketimi açısından karşılaştırılması”, *YEKS’2005 – Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları / Enerji Yönetimi Sempozyumu*, Kayseri, 315–322 (2005).
67. Çakır, H., “Güneş piliyle elde edilen elektrik enerjisinin termoelektrik soğutmada kullanılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 41–63 (2006).
68. Min, G. ve Rowe, D., M., “Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators”, *Applied Energy*, 83(2): 133–152 (2006).
69. Buist, R. J. ve Lau, P. G., “Thermoelectric power generator design and selection from TE cooling module specifications”, *XVI. International Conference on Thermoelectrics*, Dresden, 551–554 (1997).
70. Ahıska, R., “New method for study dynamic exit properties of thermoelectric modules”, *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, 22(4): 709–716 (2007).
71. Bierschenk, J., “Optimized thermoelectric for energy harvesting applications”, *17th International Symposium on the Applications of Ferroelectrics ISAF 2008*, Santa Re, 1–4 (2008).

72. Yoshida, K., Tanaka, S., Tomonari, S., Satoh, D. ve Esashi, M., “High–energy density miniature thermoelectric generator using catalytic combustion”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 15(1): 195–203 (2006).
73. Ferrari, M., Ferrari, V., Guizzetti, M., Marioli, D. ve Taroni, A., “Characterization of thermoelectric modules for powering autonomous sensors”, *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Warsaw, 1–3 (2007).
74. Glatz, W., Schwyter, E., Durrer, L. ve Hierold, C., “Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>–based flexible micro thermoelectric generator with optimized design”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 18(3): 763–772 (2009).
75. Glatz, W. ve Hierold, C., “Flexible micro thermoelectric generator”, *IEEE 20<sup>th</sup> International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Kobe, 89–92 (2007).
76. Liu, W., Yan, X., Chen, G. ve Ren, Z., “Recent advances in thermoelectric nanocomposites”, *Nano Energy* 1(1): 42–56 (2012).
77. Kim, D. H., Kim, C., Ha, D. W. ve Kim, H., “Fabrication and thermoelectric properties of crystal–aligned nano–structured Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>”, *Journal Alloy Compounds*, 509(17): 5211–5215 (2011).
78. Zhao, L. D., Zhang, B. P., Li, J. F., Zhou, M., Liu, W. S. ve Liu, J., “Thermoelectric and mechanical properties of nano–SiC–dispersed Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering”, *Journal Alloy Compounds*, 455(1–2): 259–264 (2008).
79. Harman, T. C., Taylor, P. J., Spears, D. L. ve Walsh, M. P., “Quantum dot superlattice thermoelectric materials and devices”, *Journal Electronic Material Letters*, 28, L1 (1999).
80. Venkatasubramanian, R., Siivola, E., Colpitts, T. ve O’Quinn, B., “Thin–film thermoelectric devices with high room–temperature figures of merit”, *Nature*, 413, 597–602 (2001).
81. Sun, X., Lin, Y. M., Cronin, S. B., Dresselhaus, M. S., Ying, J. Y. ve Chen, G., “Theoretical modeling of thermoelectricity in Bi nanowires”, *Eighteenth International Conference on Thermoelectrics*, Cambridge, 394–397 (1999).
82. Chen, T. G., Yu, P., Chou, R. H. ve Pan, C. L., “Phonon thermal conductivity suppression of bulk silicon nanowire composites for efficient thermoelectric conversion”, *Optics Express*, 18(S3): 467–479 (2010).
83. Poudel, B., Hao, Q., Ma, Y., Lan, Y., Minnich, A., Yu, B., Yan, X. , Wang, D., Muto, A., Vashae, D., Chen, X., Liu, J., Dresselhaus, M. S., Chen, G. ve Ren,

- Z., “High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys”, *Science Express*, 320(5876): 634–642 (2008).
84. Fang, F., Opila, R. L., Venkatasubramanian, R. ve Colpitts, T., “Preparation of clean Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> and Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> thin films to determine alignment at valence band maxima”, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, A29(3): 31403–31408 (2011).
85. Jovanovic, V., Ghamaty, S. ve Bass, J. C., “New thermoelectric materials and applications”, *13<sup>th</sup> IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, San Diego, 1159–1169 (2012).
86. Jovanovic, V., Ghamaty, S., Elsner, N. B., Krommenhoek, D. ve Morris, J., “New technique for testing performance of thermoelectric quantum well materials”, *ASME 2009 Conference on Energy Sustainability*, San Francisco, 317–320 (2009).
87. Wu, Y., Finefrock, S. W. ve Yang, H., “Nanostructured thermoelectric: Opportunities and challenges”, *Nano Energy*, 1(5): 651–653 (2012).
88. Francoeur, M., Vaillon, R. ve Mengüç, M. P., “Thermal impacts on the performance of nanoscale-gap thermophotovoltaic power generators”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(2): 686–698 (2011).
89. İnternet : MathWorks “Matlab Documentation” <http://www.mathworks.com/help/matlab/index.html> (2012).
90. İnternet : MathWorks “Simulink Documentation” <http://www.mathworks.com/help/simulink/index.html> (2012).
91. İnternet : Institute of Thermoelectricity “Thermoelectric Modules for Generators” <http://ite.inst.cv.ua/index.php> (2012).
92. İnternet : Mikrosay Yazılım ve Elektronik A. Ş. “TEOS Denetleyici Gözetim ve Veri Toplama Sistemi” <http://www.mikrosay.com.tr/TeosVIP.html> (2012).
93. İnternet : Fultek Kontrol Sistemleri San. Tic. Ltd. Şti. “Wintr SCADA” <http://www.fultek.com.tr/programlar/scada/> (2012).
94. Otter, J. D., “Programlanabilir Mantık Denetleyicileri 1. Baskı”, Çev. Ed.: Akmeriç, H., Ed.: Tacer, E., *MEB*, Ankara, 50–54 (1994).
95. Sancak, Z., “Programlanabilir Kumanda ve PLC 1. Baskı”, *Gendaş A.Ş.*, İstanbul, 3–18 (1994).

96. Uğur, N., “Programlanabilir Kontrolcüler 3. Baskı”, *KOSGEB*, Ankara, 1–10 (1995).
97. Gould, C. A., Shammaş, N. Y. A., Grainger, S. ve Taylor, I., “A comprehensive review of thermoelectric technology, micro-electrical and power generation properties”, *26<sup>th</sup> International Conference on Microelectronics*, Nis, 329–332 (2008).
98. Barbier, E., “Geothermal energy Technology and current status: an overview”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1–2): 3–65 (2002).
99. Akkuş, İ, Akıllı, H., Ceyhan, S., Dilemre, A. ve Tekin, Z., “Türkiye jeotermal kaynakları envanteri”, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*, Ankara, 1–5 (2005).
100. Dinçer, İ., “Renewable and sustainable development: a crucial review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(2): 157–175 (2000).
101. İnternet : Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü “Jeotermal Enerji Kullanım Alanları” [http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/jeo\\_kullanim\\_alanlari.aspx](http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/jeo_kullanim_alanlari.aspx) (2012).
102. Zorbas, K. T., Hatzikraniotis, E. ve Paraskevopoulos K. M., “Power and efficiency calculation in commercial TEG and application in wasted heat recovery in automobile”, *European Conference on Thermoelectrics*, Odessa, 221–225 (2007).
103. Thacher, E. F., Helenbrook, B. T., Karri, M. A. ve Richter, C. J., “Testing of an automobile exhaust thermoelectric generator in a light truck”, *Journal Automobile Engineering*, 221(1): 95–107 (2007).
104. Hsu, C. T., Huang, G. Y., Chu, H. S., Yu B. ve Yao, D. J., “Experiments and simulations on low-temperature waste heat harvesting system by thermoelectric power generators”, *Applied Energy*, 88(4): 1291–1297 (2011).
105. Qiu, K. ve Hayden, A. C. S., “Integrated thermoelectric generator and application to self-powered heating systems”, *International Conference on Thermoelectrics*, Vienna, 198–203 (2006).
106. Lertsatitthanakorn, C., “Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator”, *Bioresource Technology*, 98(8): 1670–1674 (2007).
107. 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”, *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Palm Springs, 2226–2230 (2010).



108. Sefa, İ. ve Özdemir Ş., “Experimental study of interleaved MPPT converter for PV system”, *35<sup>th</sup> Annual Conference of IEEE on Industrial Electronics*, Porto, 456–461 (2009).
109. Chowdhury, S. R. ve Saha, H., “Maximum power point tracking of partially shaded solar photovoltaic arrays”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(9): 1441–1447 (2010).

**EKLER**

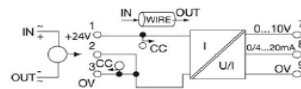
## EK-1. Akım izleme modülü katalog bilgileri (Weidmüller WAS2 CMA)

**WAVESERIES**  
**WAS2 CMA 5/10A uc**

**Weidmüller Interface GmbH & Co. KG**  
Klingenbergstraße 16  
D-32758 Detmold  
Germany  
Fon: +49 5231 14-0  
Fax: +49 5231 14-292083  
www.weidmueller.com

**General ordering data**

Order No.	8526610000
Type	WAS2 CMA 5/10A uc
Version	WAVESERIES, Current monitoring, 0...5 A AC/DC / 0...10 A AC/DC, 1, 1, Screw connection
GTIN (EAN)	4032248154333
Qty.	1 pc(s).

**Technical data****Dimensions and weights**

Length	92.4 mm	Width	22.5 mm
Depth	112.4 mm	Net weight	106.7 g

**Temperatures**

Operating temperature	0 °C...+50 °C	Storage temperature	-20 °C...+70 °C
-----------------------	---------------	---------------------	-----------------

**Probability of failure**

MTTF	334 Years
------	-----------

**Input**

Number of inputs	1	Sensor	Hall sensor (internal)
Voltage of measuring circuit	400 VAC, > 400 VAC depending on wire insulation	Max. current	Depends on wire cross-section
Input current	0...5 A AC/DC / 0...10 A AC/DC	Input frequency	0...2 kHz (True RMS)
Diameter of cable feed-through	8 mm		

**Output**

Accuracy	1 % FSR	Function	Cable entry/coil principle
Number of outputs	1	Offset current	max. 150 µA
Offset voltage	max. 0.08 V	Output current	0(4)...20 mA
Output signal limit	Approx. 13 V or 24 mA	Output voltage, note	0...10 V
Status indicator	LED ON: OK; FLASHING: signal out of range; LED OFF: Error	Step response time	typ. 700 ms
Temperature coefficient	≤ 650 ppm/K	load impedance current	≤ 600 Ω
load impedance voltage	≥ 1 kΩ		

**General data**

Current consumption	50 mA @ I <sub>OUT</sub> = 20 mA	Default setting	0...5 A, 4...20 mA
Galvanic isolation	2-way isolator	Mounting rail	TS 35
Supply voltage	24 V DC ± 10 %	Type of connection	Screw connection

**Insulation coordination**

Clearance & creepage distances	≥ 5.5 mm	EMC standards	EN 55011, EN 61000-6
Impulse withstand voltage	6 kV	Insulation voltage	4 kV <sub>eff</sub> / 5 s
Pollution severity	2	Rated voltage	300 V
Rated voltage	300 V	Standards	DIN EN 50178 (secure separation)
Surge voltage category	III		

**Classifications**

eClass 6.0	27-21-09-02	eClass 7.0	27-37-18-02
------------	-------------	------------	-------------

## EK-2. Gerilim izleme modülü katalog bilgileri (Phoenix Contact MCR-VDC-UI-B-DC)

# MCR-VDC-UI-B-DC

## Voltage Transducer for DC Voltages

### INTERFACE

Data Sheet  
100260\_en\_01

© PHOENIX CONTACT - 11/2007



### Technical Data

Voltage Measuring Input	
Input voltage range (input resistance)	$\pm 550$ V DC (550 k $\Omega$ ) $\pm 370$ V DC (370 k $\Omega$ ) $\pm 250$ V DC (250 k $\Omega$ ) $\pm 170$ V DC (170 k $\Omega$ ) $\pm 120$ V DC (120 k $\Omega$ ) $\pm 80$ V DC (80 k $\Omega$ ) $\pm 54$ V DC (54 k $\Omega$ ) $\pm 36$ V DC (36 k $\Omega$ ) $\pm 24$ V DC (24 k $\Omega$ )
Maximum input voltage	$\pm 660$ V DC (not grounded)
Maximum input voltage	$\pm 100$ V DC (to ground)
Voltage Output	
Voltage output signal	-10 V ... 10 V
Maximum voltage output signal	$\pm 15$ V
Load/output load voltage output	> 10 k $\Omega$
Ripple	< 50 mV <sub>pp</sub>
Current Output	
Current output signal	-20 mA ... 20 mA
Maximum current output signal	$\pm 30$ mA
Load/output load voltage output	< 500 $\Omega$
Ripple	< 50 mV <sub>pp</sub>
Power Supply	
Supply voltage range	18.5 V DC ... 30.2 V DC
Maximum current consumption	< 50 mA
General Data	
Limit frequency (3 dB)	40 Hz
Measuring principle	True r.m.s. value measurement
Maximum transmission error	< 1% (of final value)
Maximum temperature coefficient	< 0.015%/K
Zero adjustment	$\pm 20\%$
Span adjustment	$\pm 20\%$
Step response (10 - 90%)	12 ms
Degree of protection	IP20

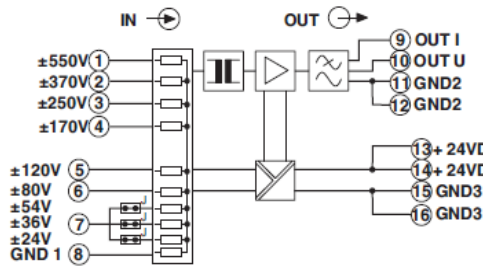
EK-2. (Devam) Gerilim izleme modülü katalog bilgileri (Phoenix Contact MCR-VDC-UI-B-DC)

**Ambient Conditions**

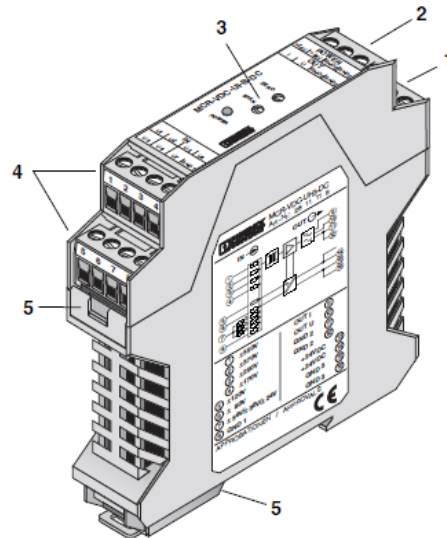
Ambient temperature (operation)

-25°C ... +50°C

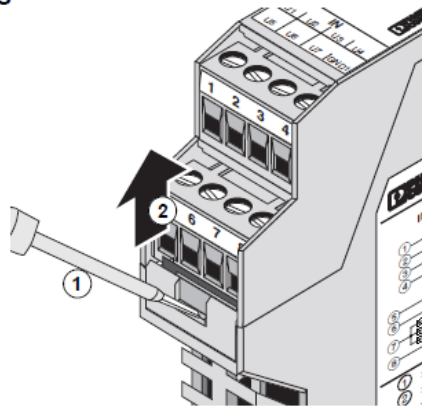
**Block Diagram**



**Structure**



**Configuration**



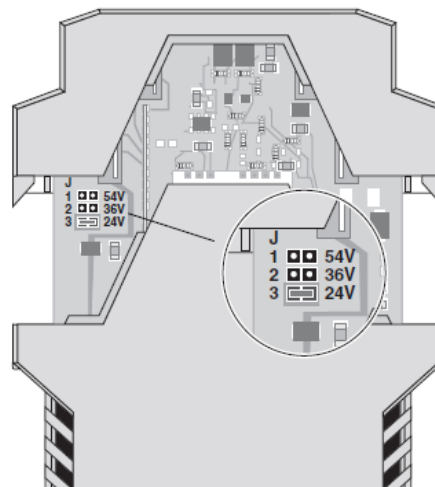
- 1 Supply voltage
- 2 Output
- 3 Potentiometer for adjustment
- 4 Inputs
- 5 Upper part of the housing can be removed to set the jumpers
- 6 Universal snap-on foot for EN DIN rails

**Jumper Settings**

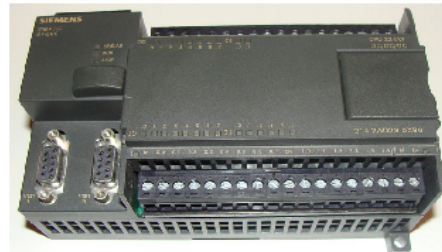
- Place the jumper (J) in the desired setting for the input voltage.
- Close the housing again until it engages with a click.

**Selecting the Input Voltage Range**

Input Voltage	Adjustment Range (±20%) [V DC]	Input Terminal Block	Jumper/Setting
0 ... ±550 V	(440 ... 660)	1	
0 ... 370 V	(296 ... 444)	2	
0 ... 250 V	(200 ... 300)	3	
0 ... 170 V	(136 ... 204)	4	
0 ... 120 V	(96 ... 144)	5	
0 ... 80 V	(64 ... 96)	6	
0 ... 54 V	(43 ... 65)	7	J1/setting 1
0 ... 36 V	(28 ... 43)	7	J1/setting 2
0 ... 24 V	(19 ... 29)	7	J1/setting 3 (default setting)



## EK-3. PLC katalog bilgileri (Siemens S7200 CPU224XP)



### CPU Specifications

Table A-2 CPU Order Numbers

Order Number	CPU Model	Power Supply (Nominal)	Digital Inputs	Digital Outputs	Comm Ports	Analog Inputs	Analog Outputs	Removable Connector
6ES7 214-2AD23-0XB0	CPU 224XP	24 VDC	14 x 24 VDC	10 x 24 VDC	2	2	1	Yes

Table A-3 CPU General Specifications

Order Number	Module Name and Description	Dimensions (mm) (W x H x D)	Weight	Dissipation	VDC Available +5 VDC	VDC Available +24 VDC <sup>1</sup>
6ES7 214-2AD23-0XB0	CPU 224XP DC/DC/DC 14 Inputs/10 Outputs	140 x 80 x 62	390 g	8 W	660 mA	280 mA

<sup>1</sup> This is the 24 VDC sensor power that is available after the internal relay coil power and 24 VDC comm port power requirements have been accounted for.

Table A-4 CPU Specifications

	CPU 221	CPU 222	CPU 224	CPU 224XP CPU 224XPai	CPU 226
<b>Memory</b>					
User program size with run mode edit without run mode edit	4096 bytes 4096 bytes		8192 bytes 12288 bytes	12288 bytes 16384 bytes	16384 bytes 24576 bytes
User data	2048 bytes		8192 bytes	10240 bytes	10240 bytes
Backup (super cap)	50 hours typical (8 hours min. at 40°C)		100 hours typical (70 hours min. at 40°C)	100 hours typical (70 hours min. at 40°C)	
(optional battery)	200 days typical		200 days typical	200 days typical	
<b>I/O</b>					
Digital I/O	6 inputs/4 outputs	8 inputs/6 outputs	14 inputs/10 outputs	14 inputs/10 outputs	24 inputs/16 outputs
Analog I/O	none			2 inputs/1 output	none
Digital I/O image size	256 (128 In/128 Out)				
Analog I/O image size	None	32 (16 In/16 Out)	64 (32 In/32 Out)		
Max. expansion modules allowed	None	2 modules <sup>1</sup>	7 modules <sup>1</sup>		
Max. intelligent modules allowed	None	2 modules <sup>1</sup>	7 modules <sup>1</sup>		
Pulse Catch inputs	6	8	14		24
High-Speed Counters Single phase	4 counters total 4 at 30 kHz		6 counters total 6 at 30 kHz	6 counters total 4 at 30 kHz 2 at 200 kHz 3 at 20 kHz 1 at 100 kHz	6 counters total 6 at 30 kHz
Two phase	2 at 20 kHz		4 at 20 kHz		4 at 20 kHz
Pulse outputs	2 at 20 kHz (DC outputs only)			2 at 100 kHz (DC outputs only)	2 at 20 kHz (DC outputs only)
<b>General</b>					
Timers	256 total timers; 4 timers (1 ms); 16 timers (10 ms); 236 timers (100 ms)				
Counters	256 (backed by super capacitor or battery)				
Internal memory bits Stored on power down	256 (backed by super capacitor or battery) 112 (stored to EEPROM)				
Timed interrupts	2 with 1 ms resolution				
Edge interrupts	4 up and/or 4 down				
Analog adjustment	1 with 8 bit resolution		2 with 8 bit resolution		
Boolean execution speed	0.22 µs per instruction				
Real Time Clock	Optional cartridge		Built-in		
Cartridge options	Memory, Battery, and Real Time Clock		Memory and battery		
<b>Communications Built-in</b>					
Ports (Limited Power)	1 RS-485 port			2 RS-485 ports	
PPI, DP/PT baud rates	9.6, 19.2, 187.5 kbaud				
Freeport baud rates	1.2 kbaud to 115.2 kbaud				
Max. cable length per segment	With isolated repeater: 1000 m up to 187.5 kbaud, 1200 m up to 38.4 kbaud Without isolated repeater: 50 m				
Max. number of stations	32 per segment, 126 per network				
Max. number of masters	32				
Peer to Peer (PPI Master Mode)	Yes (NETR/NETW)				
MPI connections	4 total, 2 reserved (1 for a PG and 1 for an OP)				

<sup>1</sup> You must calculate your power budget to determine how much power (or current) the S7-200 CPU can provide for your configuration. If the CPU power budget is exceeded, you may not be able to connect the maximum number of modules. See Appendix A for CPU and expansion module power requirements, and Appendix B to calculate your power budget.

## EK-3. (Devam) PLC katalog bilgileri (Siemens S7200 CPU224XP)

Table A-5 CPU Power Specifications

	DC	AC
<b>Input Power</b>		
Input voltage	20.4 to 28.8 VDC	85 to 264 VAC (47 to 63 Hz)
Input current	CPU only at 24 VDC 80 mA 85 mA 110 mA 120 mA 120 mA 150 mA	Max. load at 24 VDC 450 mA 500 mA 700 mA 900 mA 900 mA 1050 mA
		CPU only 30/15 mA at 120/240 VAC 40/20 mA at 120/240 VAC 60/30 mA at 120/240 VAC 70/35 mA at 120/240 VAC - 80/40 mA at 120/240 VAC
		Max. load 120/60 mA at 120/240 VAC 140/70 mA at 120/240 VAC 200/100 mA at 120/240VAC 220/100 mA at 120/240 VAC - 320/160 mA at 120/240VAC
Inrush current	12 A at 28.8 VDC	20 A at 264 VAC
Isolation (field to logic)	Not isolated	1500 VAC
Hold up time (loss of power)	10 ms at 24 VDC	20/80 ms at 120/240 VAC
Fuse (non-replaceable)	3 A, 250 V Slow Blow	2 A, 250 V Slow Blow
<b>24 VDC Sensor Power</b>		
Sensor voltage (Limited Power)	L+ minus 5 V	20.4 to 28.8 VDC
Current limit	1.5 A peak, thermal limit non-destructive (See Table A-3 for rated load.)	
Ripple noise	Derived from input power	Less than 1 V peak-to-peak
Isolation (sensor to logic)	Not isolated	

Table A-6 CPU Digital Input Specifications

General	24 VDC Input (CPU 221, CPU 222, CPU 224, CPU 226)	24 VDC Input (CPU 224XP, CPU 224XPsi)
Type	Sink/Source (IEC Type 1 Sink)	Sink/Source (IEC Type 1 Sink, except I0.3 to I0.5)
Rated voltage	24 VDC at 4 mA typical	24 VDC at 4 mA typical
Max. continuous permissible voltage	30 VDC	
Surge voltage	35 VDC for 0.5 s	
Logic 1 (min.)	15 VDC at 2.5 mA	15 VDC at 2.5 mA (I0.0 to I0.2 and I0.6 to I1.5) 4 VDC at 8 mA (I0.3 to I0.5)
Logic 0 (max.)	5 VDC at 1 mA	5 VDC at 1 mA (I0.0 to I0.2 and I0.6 to I1.5) 1 VDC at 1 mA (I0.3 to I0.5)
Input delay	Selectable (0.2 to 12.8 ms)	
Connection of 2 wire proximity sensor (Bero) Permissible leakage current (max.)	1 mA	
Isolation (field to logic) Optical (galvanic) Isolation groups	Yes 500 VAC for 1 minute See wiring diagram	
High Speed Counter (HSC) input rate HSC Inputs All HSC All HSC HC4, HC5 on CPU 224XP and CPU 224XPsi only	Logic 1 Level 15 to 30 VDC 15 to 26 VDC > 4 VDC	Single phase 20 kHz 30 kHz 200 kHz
		Two phase 10 kHz 20 kHz 100 kHz
Inputs on simultaneously	All	All CPU 224XP AC/DC/RELAY only: All at 55° C with DC inputs at 26 VDC max. All at 50° C with DC inputs at 30 VDC max.
Cable length (max.) Shielded Unshielded	500 m normal inputs, 50 m HSC inputs <sup>1</sup> 300 m normal inputs	

<sup>1</sup> Shielded twisted pair is recommended for HSC inputs.

Table A-8 CPU 224XP and CPU 224XPsi Analog Input Specifications

General	Analog Input (CPU 224XP, CPU 224XPsi)
Number of inputs	2 points
Analog input type	Single-ended
Voltage range	±10 V
Data word format, full scale range	-32,000 to +32,000
DC Input impedance	>100 KΩ
Maximum input voltage	30 VDC
Resolution	11 bits plus 1 sign bit
LSB value	4.88 mV
Isolation	None
Accuracy Worst case 0° to 55° C Typical 25° C	±2.5% of full scale ±1.0% of full scale
Repeatability	±0.05% of full scale
Analog to digital conversion time	125 msec
Conversion type	Sigma Delta
Step response	250 ms max.
Noise rejection	-20 dB @ 50 Hz typical

## EK-3. (Devam) PLC katalog bilgileri (Siemens S7200 CPU224XP)

Table A-7 CPU Digital Output Specifications

General	24 VDC Output (CPU 221, CPU 222, CPU 224, CPU 226)	24 VDC Output (CPU 224XP)	24 VDC Output (CPU 224XPsi)	Relay Output
Type	Solid State-MOSFET (Sourcing)		Solid State-MOSFET (Sinking)	Dry contact
Rated voltage	24 VDC	24 VDC	24 VDC	24 VDC or 250 VAC
Voltage range	20.4 to 28.8 VDC	5 to 28.8 VDC (Q0.0 to Q0.4) 20.4 to 28.8 VDC (Q0.5 to Q1.1)	5 to 28.8 VDC	5 to 30 VDC or 5 to 250 VAC
Surge current (max.)	8 A for 100 ms			5 A for 4 s @ 10% duty cycle
Logic 1 (min.)	20 VDC at maximum current	L+ minus 0.4 V at max. current	External Voltage Rail minus 0.4V with 10K pullup to External Voltage Rail	-
Logic 0 (max.)	0.1 VDC with 10 K $\Omega$ Load		1M + 0.4V at max. load	-
Rated current per point (max.)	0.75 A			2.0 A
Rated current per common (max.)	6 A	3.75 A	7.5 A	10 A
Leakage current (max.)	10 $\mu$ A			-
Lamp load (max.)	5 W			30 W DC; 200 W AC <sup>2, 3</sup>
Inductive clamp voltage	L+ minus 48 VDC, 1 W dissipation		1M +48 VDC, 1 W dissipation	-
On State resistance (contact)	0.3 $\Omega$ typical (0.6 $\Omega$ max.)			0.2 $\Omega$ (max. when new)
Isolation	500 VAC for 1 minute			-
Optical (galvanic, field to logic)	-			-
Logic to contact	-			1500 VAC for 1 minute
Resistance (logic to contact)	-			100 M $\Omega$
Isolation groups	See wiring diagram			See wiring diagram
Delay (max.)	2 $\mu$ s (Q0.0, Q0.1), 15 $\mu$ s (all other)		0.5 $\mu$ s (Q0.0, Q0.1), 15 $\mu$ s (all other)	-
Off to on ( $\mu$ s)	10 $\mu$ s (Q0.0, Q0.1), 130 $\mu$ s (all other)		1.5 $\mu$ s (Q0.0, Q0.1), 130 $\mu$ s (all other)	-
On to off ( $\mu$ s)	-		-	10 ms
Switching	-		-	-
Pulse frequency (max.)	20 kHz <sup>1</sup> (Q0.0 and Q0.1)	100 kHz <sup>1</sup> (Q0.0 and Q0.1)	100 kHz <sup>1</sup> (Q0.0 and Q0.1)	1 Hz
Lifetime mechanical cycles	-	-	-	10,000,000 (no load)
Lifetime contacts	-	-	-	100,000 (rated load)
Outputs on simultaneously	All at 55° C (horizontal), All at 45° C (vertical)			
Connecting two outputs in parallel	Yes, only outputs in same group			No
Cable length (max.)	500 m			
Shielded	150 m			
Unshielded	-			

<sup>1</sup> Depending on your pulse receiver and cable, an additional external load resistor (at least 10% of rated current) may improve pulse signal quality and noise immunity.

<sup>2</sup> Relay lifetime with a lamp load will be reduced by 75% unless steps are taken to reduce the turn-on surge below the surge current rating of the output.

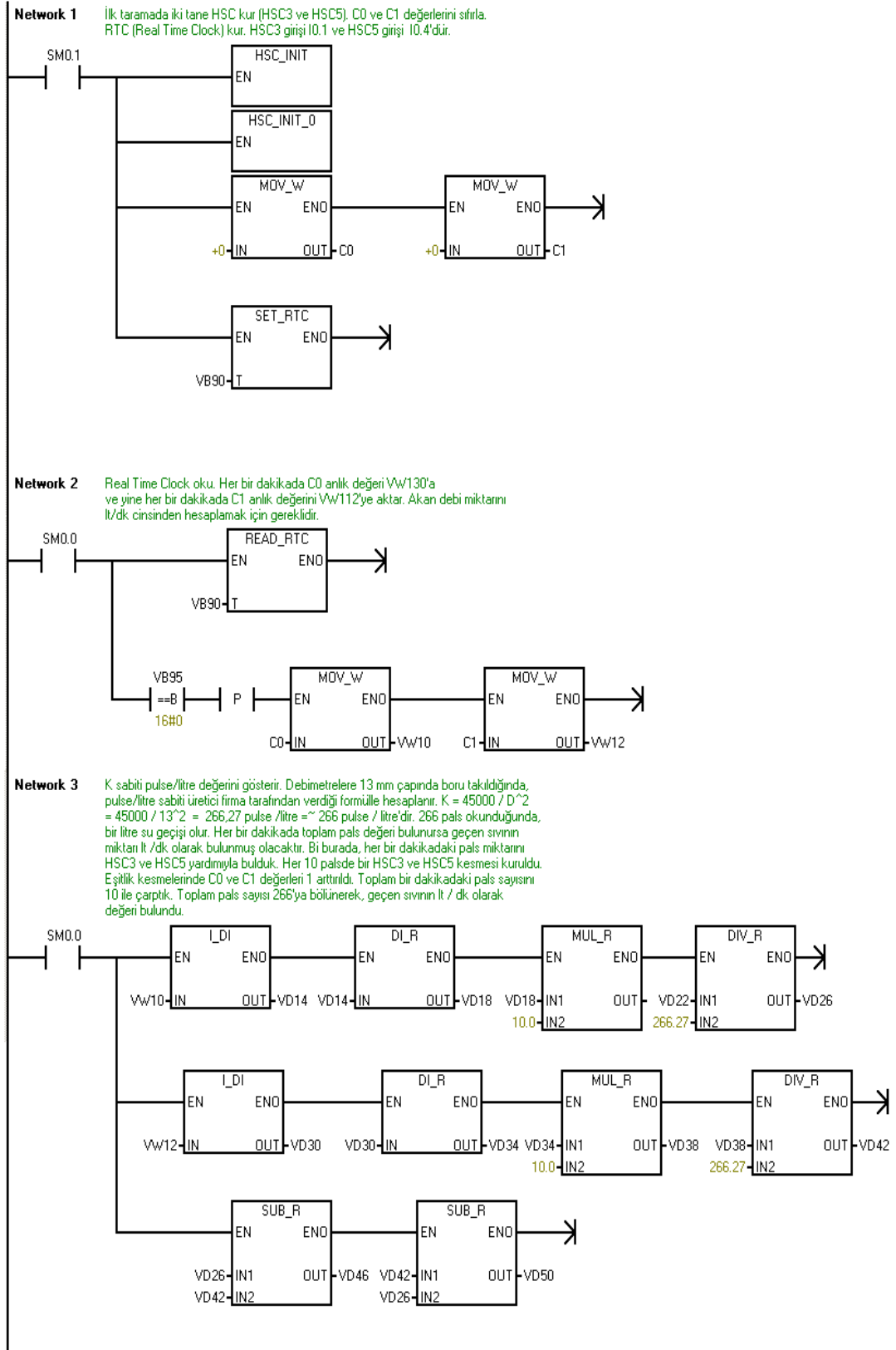
<sup>3</sup> Lamp load wattage rating is for rated voltage. Reduce the wattage rating proportionally for voltage being switched (for example 120 VAC - 100 W).

Table A-9 CPU 224XP and CPU 224XPsi Analog Output Specifications

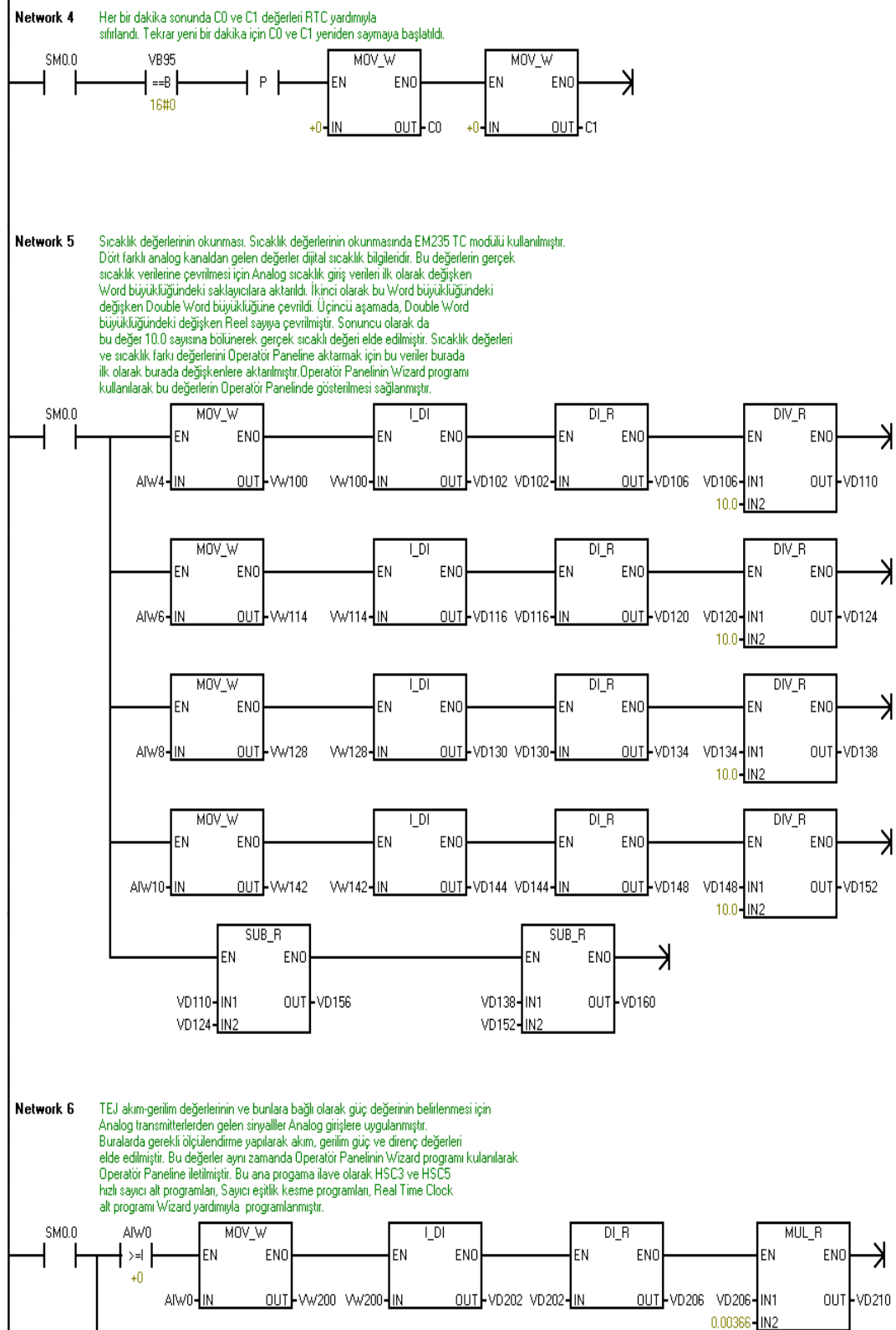
General	Analog Output (CPU 224XP, CPU 224XPsi)
Number of outputs	1 point
Signal range	
Voltage	0 to 10 V (Limited Power)
Current	0 to 20 mA (Limited Power)
Data word format, full range	0 to +32767
Date word format, full scale	0 to +32000
Resolution, full range	12 bits
LSB value	
Voltage	2.44 mV
Current	4.88 $\mu$ A
Isolation	none
Accuracy	
Worst case, 0° to 55° C	
Voltage output	$\pm$ 2% of full-scale
Current output	$\pm$ 3% of full-scale
Typical 25° C	
Voltage output	$\pm$ 1% of full-scale
Current output	$\pm$ 1% of full-scale
Settling time	
Voltage output	< 50 $\mu$ s
Current output	< 100 $\mu$ s
Maximum output drive	
Voltage output	$\geq$ 5000 $\Omega$ minimum
Current output	$\geq$ 500 $\Omega$ maximum



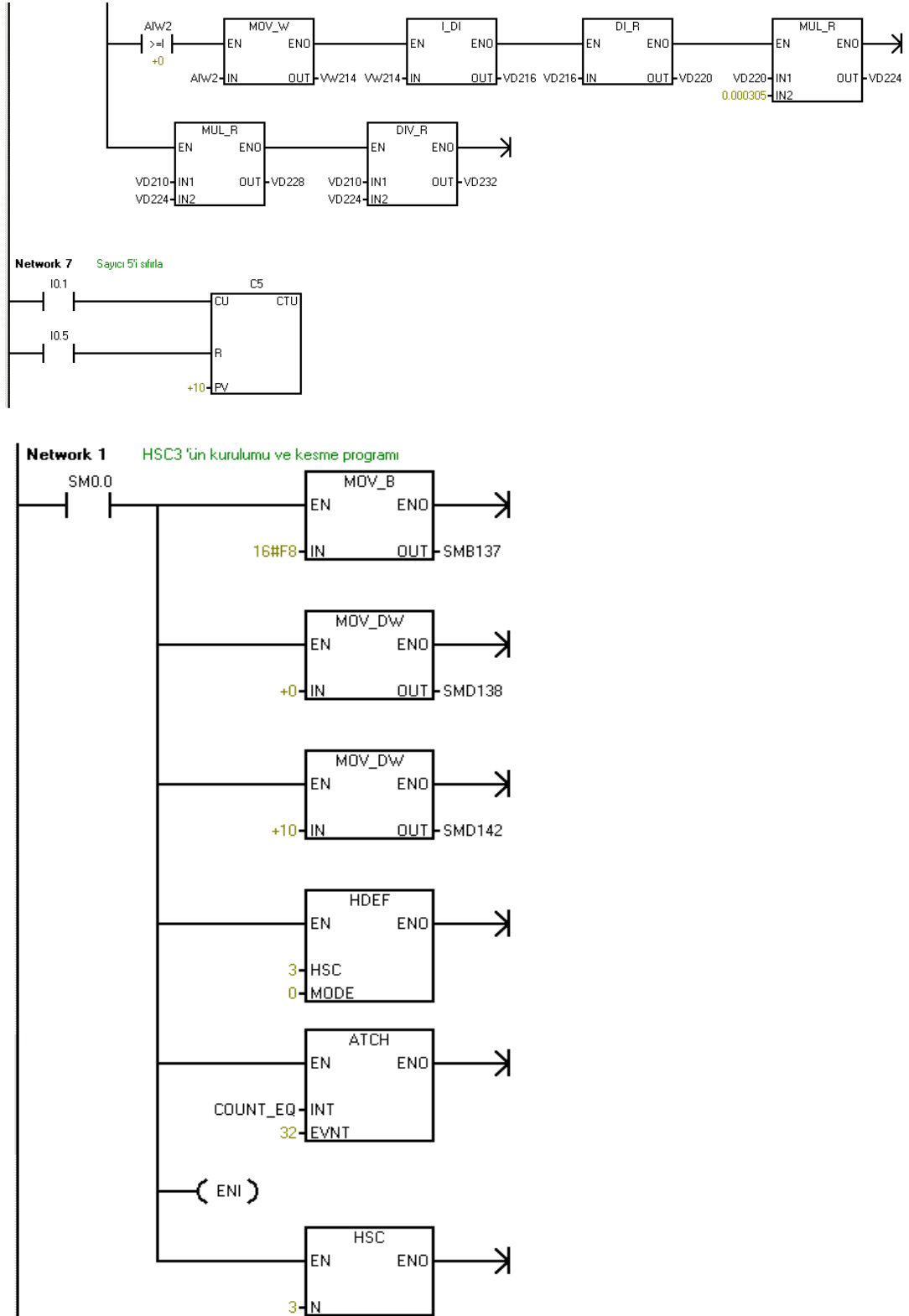
## EK-4. Veri edinim sistemi PLC programı



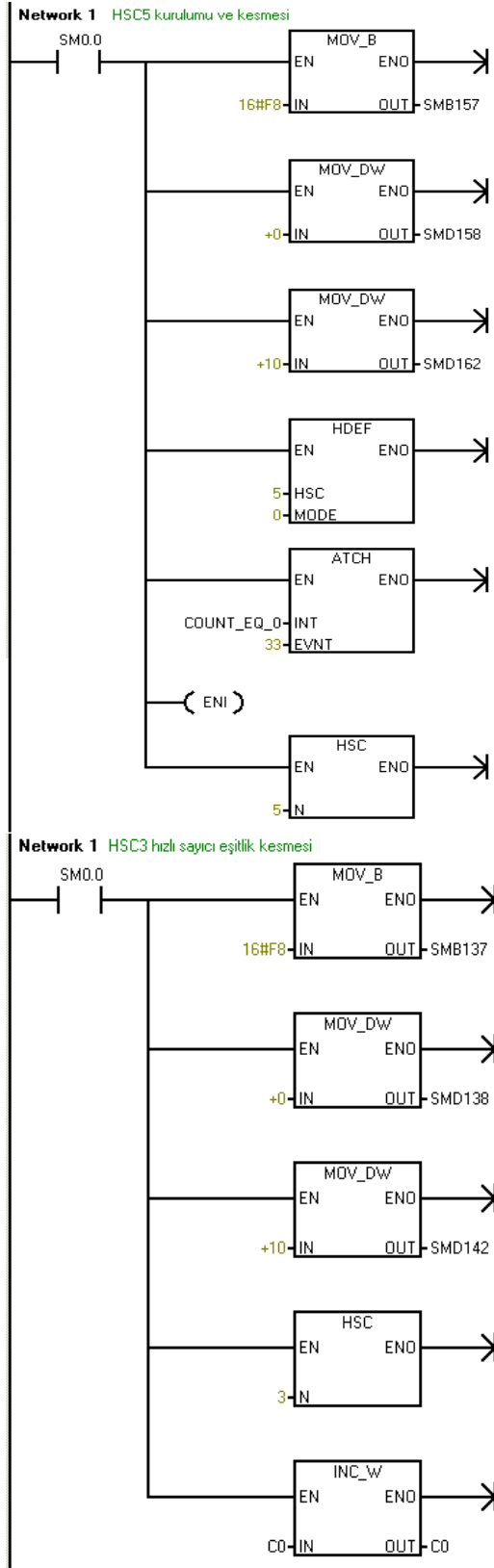
## EK-4. (Devam) Veri edinim sistemi PLC programı



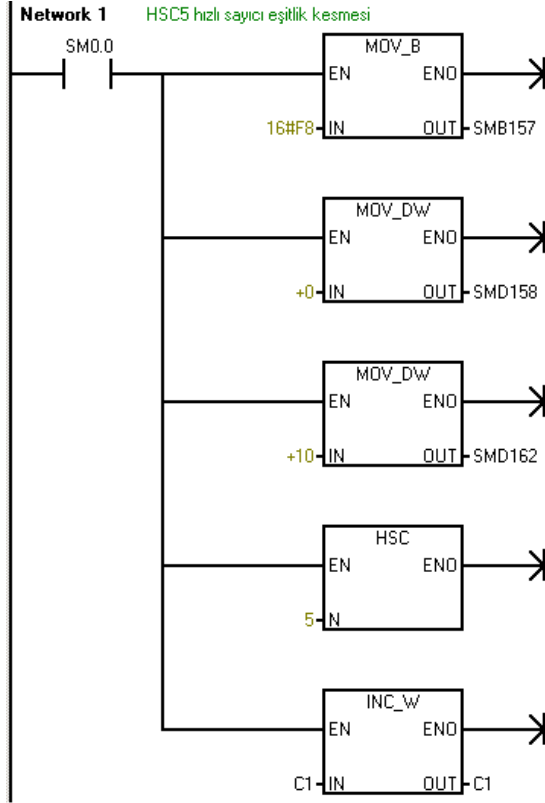
## EK-4. (Devam) Veri edinim sistemi PLC programı



## EK-4. (Devam) Veri edinim sistemi PLC programı



## EK-4. (Devam) Veri edinim sistemi PLC programı

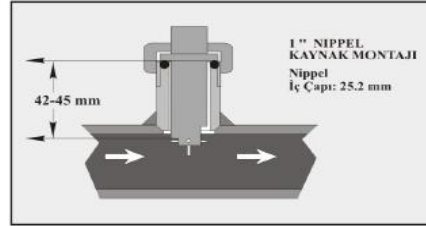


## EK-5. Debimetre katalog bilgileri (Artes Elektronik ARF-4)



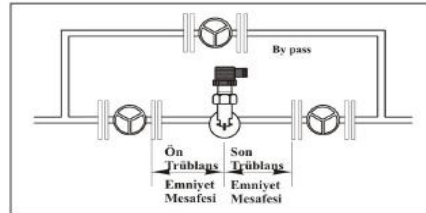
GENEL ÖZELLİKLER :	
<b>ARF - 4</b> çoğunlukla partikül içermeyen sıvı akışkanlarda akış hızı ve miktarı ölçümü için oldukça ucuz ve pratik bir çözümdür.	
Çalışma prensibi kabaca hareket eden sıvının, hareket yönüne dik doğrultuda eksanlenmiş pervaneyi kendi hareket hızında döndüreceği esasına dayalıdır.	
Sensörün hareketi algılayan elektronik ölçüm hücresi tamamen dış gövde ile kapalı olup sıvı ve ortamdan izole edilmiştir.	
Akışkan temas bölgesi ile elektronik hücre ve dış ortam arasında herhangi mekanik bağlantı olmadığından gövde tamamıyla kapalı, sızdırmaz ve basınca dayanıklıdır.	
<b>Teknik özellikler :</b>	
Ölçüm aralığı :	0,5 - 15 metre / saniye
Lineerite :	% ± 5
Toleranslırabilirlik :	% ± 1,5
Besleme gerilimi :	5 - 25 Vdc

## BORU HATTINA MONTAJ

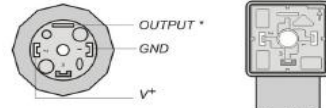


## ÖLÇÜM ARALIKLARI TABLOSU

Boru Ölçüsü (inch)	Boru İç Çapı (mm)	K. Faktör (pulse / lt)	Min. Debi (m <sup>3</sup> /h)	Max. Debi (m <sup>3</sup> /h)
1"	26,5	64	1	15
1,5"	38	32	2	30
2"	53	16	4	60
2,5"	64	11	6	90
3"	79	7,2	9	135
4"	107	3,9	16	245
5"	132	2,6	25	375
6"	158	1,8	35	535
8"	208	1,0	60	920
10"	260	0,66	95	1450
12"	310	0,47	135	2050
14"	340	0,39	165	2450
16"	390	0,29	215	3250

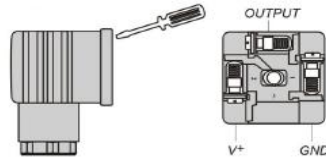


## ELEKTRİK BAĞLANTILARI



Soket Üstten Görünüş

\* 4-20 mA'lık Sensör için boş bırakılacaktır.



Not : Katsayı ( K faktör ) ve akış limitleri tabloda verilen boru iç çapları için geçerlidir.

## ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLER

	BESLEME	ÇIKIP	ÇIKIP ARALIDI
ARF - 4F - XX	5 - 25 V DC Ripple : %10	Frekans NPN (V <sup>+</sup> - 2) V Kare Dalga	15 - 250 Hz
ARF - 4C - XX	12 - 24 V DC Ripple : %10	Akım (max. : 20 V)	4 - 20 mA
ARF - 4V - XX	12 - 24 V DC Ripple : %10	Gerilim (max. : 10 mA)	0 - 10 V

Besleme gerilimleri Ters bağlamaya, çıkışlar kısa devreye karşı korunmuştur.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : MAMUR, Hayati  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 04.07.1974, Bolu  
 Medeni Hali : Evli  
 Telefon : 0 (376) 213 11 95  
 Faks : 0 (376) 213 36 01  
 E-Posta : [hmamur@karatekin.edu.tr](mailto:hmamur@karatekin.edu.tr), [hayatimamur@yahoo.com](mailto:hayatimamur@yahoo.com)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniv. Elektronik-Bilgisayar Eğitimi	2005
Lisans	Gazi Üniv. Elektrik Eğitimi	1996
Lise	Bolu Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi	1992

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007–	Çankırı Karatekin Üniversitesi MYO	Öğr. Gör.
2000–2007	Ankara Üniversitesi Çankırı MYO	Öğr. Gör.
1996–1998	Çorum Alaca Çok Programlı Lisesi	Öğretmen

### Yabancı Dil

İngilizce (UDS Ekim–2009: 78,25)

### Yayınlar

1. Ahıska, R., **Mamur, H.** ve Ulaş, M., “Modeling and experimental study of thermoelectric module as generator”, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26(4): 889–896 (2011) (SCI C Sınıfı).
2. Ahıska, R. ve **Mamur, H.**, “A test system and supervisory control and data acquisition application with programmable logic controller for thermoelectric generators”, *Energy Conversion and Management*, 64(12): 15–22 (2012) (SCI A Sınıfı).
3. Ahıska, R. ve **Mamur, H.**, “The potentials and applications of thermoelectric generators in the recovery of geothermal energy”, *6<sup>th</sup> IEESE International Ege Energy Symposium and Exhibition*, İzmir, 328–338 (2012), *International Journal of Energy Research* dergisi tarafından *Selected Paper* seçilmiş ve yayın için dergi formatında dergiye editörün istediği düzeltmeler yapılarak gönderilmiştir (SCI A Sınıfı).

4. Ahıska, R. ve **Mamur, H.**, “The design and implementation of a new portable thermoelectric generator for low geothermal temperatures”, *IET Renewable Power Generation* dergisine gönderilmiş, hakem cevapları gelmiş, küçük değişikliklerle kabul edilmiştir. Küçük değişiklikler yapılarak tekrar gönderilmiştir (SCI A Sınıfı).
5. Topaloğlu, İ., Korkmaz, F., **Mamur, H.**, ve Gürbüz, R., “Closed-loop speed control of PM-BLDC motor fed by six step inverter and effects of inertia changes for desktop CNC machine”, *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 19(1): (2013) (SCI C Sınıfı – Selected Paper).
6. Ahıska, R. ve **Mamur, H.**, “The role of thermoelectric generators in conversion of geothermal energy from the renewable energy sources into electrical energy”, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences* dergisine gönderilmiş. Hakem cevabı beklenmektedir (SCI Expanded).
7. Gürbüz, R., Dönertaş, M. A. ve **Mamur, H.**, “Experimental torque-speed analysis of selected AC servo motors for desk-top CNC milling machine”, *Opole University of Technology Mechatronic System and Materials 2010*, 81–87 (2011) (Selected Paper).
8. Ahıska, R., **Mamur, H.** ve Uliş, M., “Characterization of thermoelectric module as generator”, *X. International Conference on Sustainable Energy Technologies*, İstanbul, (2011).
9. Ahıska, R., **Mamur, H.**, “Data acquisition system for thermoelectric generators”, *XIII International Conference on Physics and Technology of Thin Films and Nanostructures*, Ivano-Frankivsk, 240–242 (2011).
10. Ahıska, R., **Mamur, H.** ve Uliş, M., “The application of low-power dc-dc boost converter for thermoelectric generators”, *MKT2012 Project based mechatronics education workshops*, Çankırı, 57 (2012).
11. Ahıska, R., **Mamur, H.**, Korkmaz, F., Topaloğlu, İ., Dönertaş, M.A., İçyer, A., ve Şahin, U., “The comparison of thermoelectric generator systems and photovoltaic systems in energy production”, *MKT2012 Project based mechatronics education workshops*, Çankırı, 58 (2012).
12. Topaloğlu, İ., Korkmaz, F., **Mamur, H.**, ve Gürbüz, R., “Closed-loop speed control of PM-BLDC motor fed by six step inverter and effects of inertia changes for desktop CNC machine”, *16th International Conference ELECTRONICS'2012*, Lithuania, 18–20 Haziran, Palanga, 2012.
13. Gürbüz, R., Dönertaş, M. A. ve **Mamur, H.**, “Experimental torque-speed analysis of selected AC servo motors for desk-top CNC milling machine”, *6<sup>th</sup> International Conference Mechatronic Systems and Materials*, Opole, (2010).



14. Ahıska, R. ve **Mamur, H.**, “The implementation of thermoelectric generator for geothermal areas”, *6<sup>th</sup> International Exergy, Energy and Environment Symposium*, Rize, 1–4 Temmuz 2013 konferansında kabul edildi.
15. Ahıska, R. ve **Mamur, H.**, “The design and application of a LED driver and a LED armature with a thermoelectric generator”, *4<sup>th</sup> International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, İstanbul, 13–17 Mayıs 2013 konferansında kabul edildi.
16. Ahıska, R. ve **Mamur, H.**, “Thermoelectric Module Structures”, *XIV International Conference on Physics and Technology of Thin Films and Nanostructures*, Ivano–Frankivsk, 20–25 Mayıs 2013 konferansında kabul edildi.

### **Hobiler**

Futbol, gezi, yüzme, balık tutmak.