

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERİN ÇOK DÜŞÜK SICAKLIKLARDA
TEORİK VE DENEYSEL KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elek. Müh. Haluk ÖZGÜN**

Anabilim Dalı : Enerji Bilim ve Teknoloji

Programı : Enerji Bilim ve Teknoloji

OCAK 2009

**TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERİN ÇOK DÜŞÜK SICAKLIKLARDA
TEORİK VE DENEYSEL KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elek. Müh. Haluk ÖZGÜN
(301051033)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 Aralık 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 20 Ocak 2009**

**TEZ DANIŞMANI : Doç.Dr. Altuğ ŞİŞMAN (İ.T.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Yr.Doç.Dr.Burak BARUTÇU (İ.T.Ü)
Doç.Dr.Cenap Ş. ÖZBEN (İ.T.Ü)**

OCAK 2009

ÖNSÖZ

Mikro ölçekte insanlar ve canlılar, makro ölçekte ülkeler ve dünya açısından enerjiye olan gereksinim, var oluş sürecinden başlayıp günümüz ve geleceği de kapsayacak şekilde artış göstermektedir. Ülkemizin enerjiye olan talebi her geçen gün artmaktadır. Talep edilen enerjinin yerli kaynaklar, yerli teknolojiler ile üretilebilir olması ve çevreci olması çok önemlidir. Bu tez çalışmasıyla doğrudan enerji dönüşümü yapan çevreci bir teknoloji çalışılmış olup ilgilenen herkes için faydalı olmasını umut ederim.

Bu tez çalışması süresince beni teknik ve teorik düzeyde her aşamada, bilgi ve deneyimleri ile yönlendiren, sabır ve anlayış gösteren değerli tez danışmanım sayın Doç. Dr. Altuğ Şişman'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Veri işleme ve LabVIEW programı konusunda bilgisini ve yardımlarını esirgemeyen sayın Yrd.Doç.Dr.Burak Barutcu'ya teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2009

Haluk ÖZGÜN
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xvi
GİRİŞ	1
1.1. Dünyada Enerji Kaynaklarının Kullanımı ve Doğrudan Enerji Dönüşümü.....	1
1.2. Tezin Konusu ve Ele Alınan Problem.....	3
1.3. Kaynak Taraması	4
1.4 Tezde Yapılanlar ve Elde Edilen Temel Bulgular	6
2. TEMEL BİLGİLER	7
2.1 Termoelektrik Etkiler	8
2.1.1. Seebeck Etkisi	8
2.1.2. Peltier Etkisi	10
2.1.3. Thomson Etkisi.....	10
2.1.4. Kelvin İlişkileri.....	10
2.2. Termoelektrik Jeneratörler ve Soğutucular	11
2.2.1. Temel Çalışma Prensipleri	15
2.2.2. Uygulama Alanları	20
2.2.3. Basitleştirilmiş Matematiksel Modeller	28
2.2.3.1. Kısa Devre Akımı ve Maksimum Güç İfadesi	33
2.3. Termoelektrik Modülde Kullanılan Malzemeler ve Klasik İlkeler.....	35
2.3.1. Malzeme Bilgisi ve Yapısal Temeller	35
2.3.2. Elektriksel ve Termal İletkenlik	35
2.3.2.1. Metallerde Elektriksel İletkenlik	35
2.3.2.2. Metallerde Termal İletkenlik.....	40
2.4 Yarı İletkenler ve Enerji Bantları	41
2.5 Yarı İletken Çeşitleri ve Özellikleri	43
2.5.1. Yarı İletkenlerde İletkenlik.....	43
2.5.2. Yarı İletken Çeşitleri	45
2.5.2.1. n-Tipi Yarı İletkenler	45
2.5.2.2. p-Tipi Yarı İletkenler	47
2.5.3. İletkenliğin Sıcaklık Bağımlılığı	48
2.5.3.1. Taşıyıcı Konsantrasyonunun Sıcaklık Bağımlılığı	48
2.5.3.2. Sürüklenme Mobilitesi	49
2.6 Yarı iletkenlerde Seebeck ve Peltier Etkileri	52
2.6.1. Seebeck Etkisi	52
2.6.2. Ohmik Kontak ve Peltier Etkisi	56
2.7 Figure of Merit	59

2.8	Rejeneratif Güç Yedekleme Sistemlerine bir Alternatif Olarak	
	Kriyojenik Isı Rezervuarlı Termoelektrik Jeneratörler	62
2.8.1.	Kriyojenik Akışkan olarak Sıvı Azot ve Özellikleri	66
3.	TERMOELEKTRİK JENERATÖR MODÜLÜNÜN MATEMATİKSEL	
	MODELLEMESİ VE TEORİK KARAKTERİZASYONU	67
3.1.	Teorik Model	67
3.1.1.	Seebeck Katsayısı-Sıcaklık Grafiği	69
3.1.2.	Elektriksel iletkenlik-Sıcaklık Grafiği	71
3.1.3.	Öz direnç-Sıcaklık Grafiği	73
3.1.4.	Termal iletkenlik-Sıcaklık Grafiği	76
3.2.	Tellurex Termoelektrik Jeneratör Modülü için Teorik Karakterizasyon	79
3.2.1.	Voltaj-Akım Grafiği	79
3.2.2.	Güç-Akım Grafiği	81
3.2.3.	Verim-Akım Grafiği	83
3.2.4.	Verim-Güç Grafiği	85
4.	TERMOELEKTRİK JENERATÖR MODÜLÜNÜN DENEYSSEL	
	KARAKTERİZASYONU	87
4.1.	Deney Sisteminin Tanıtımı: Bileşenler, Ölçüm Sistemi ve Özellikleri	87
4.1.1.	Isı Rezervuarları	87
4.1.2.	Ara Malzemeler	90
4.1.3.	Termoelektrik Jeneratör Modülleri	92
4.1.4.	Elektriksel Yük	94
4.1.5.	Ölçüm Araçları	95
4.1.5.1.	Sıcaklık Ölçümleri	95
4.1.5.2.	PCI 6229 National Instruments Veri Toplama Kartı	98
4.1.5.3.	Voltaj ve Akım Ölçümleri	102
4.1.6.	Deney Sistemi	103
4.2.	Kriyojenik Sıcaklıklarda Ölçümler ve Deneysel Karakterizasyonu	106
4.2.1.	Karakterizasyonun Bölümleri	106
4.2.1.1.	Sıcak Deney	107
4.2.1.2.	Soğuk Deney	107
4.2.1.3.	Hızlı Deney	107
4.2.2.	Sıcak ve Soğuk Deney için Voltaj-Akım Grafikleri	108
4.2.3.	Sıcak ve Soğuk Deney için Güç-Akım Grafikleri	114
4.2.4.	Sıcak ve Soğuk Deney için Voltaj-Yük Direnci Grafikleri	118
4.2.5.	Sıcak ve Soğuk Deney için Güç-Yük Direnci Grafikleri	123
4.2.6.	İç Direnç-Ortalama Sıcaklık Grafiği	128
4.2.7.	İletkenli-Ortalama Sıcaklık Grafiği	128
4.2.8.	Seebeck katsayısı-Ortalama Sıcaklık Grafiği	129
4.2.9.	P_{mak} , V_0 , I_{sc} - Sıcaklık Farkı Grafiği	130
4.2.10.	Sıcaklık Farkları Aynı Fakat Ortalama Sıcaklıkları Farklı Olan Durumlar için Maksimum Güç-Ortalama Sıcaklık Grafiği	132
4.2.11.	Hızlı Deney	133
5.	SONUÇ	135
	KAYNAKLAR	137
	ÖZGEÇMİŞ	139

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1	:Farklı metaller için Seebeck katsayıları.....	9
Tablo 2.2	:Farklı metaller ve yarı iletkenlerin Seebeck katsayıları.....	55
Tablo 3.1	:Bi ₂ Te ₃ tabanlı n ve p tipi yarı iletken için Seebeck katsayısı, elektriksel ve termal iletkenliğin sıcaklığa bağlı değerleri.....	68
Tablo 3.2	:Şekil 3.1'de çizdirilen eğrilerin denklemleri, katsayıları ve ortalama sapma değerleri	69
Tablo 3.3	:Tellurex firması tarafından geliştirilmiş termoelektrik modülün Seebeck katsayısının farklı sıcaklıklar için teorik olarak öngörülen değerleri.....	71
Tablo 3.4	:Şekil 3.3'de çizdirilen eğrilerin denklemleri, katsayıları ve ortalama sapma değerleri	72
Tablo 3.5	:Şekil 3.4'de çizdirilen eğrilerin denklemleri, katsayıları ve ortalama sapma değerleri	74
Tablo 3.6	:Tellurex firması için teorik olarak öngörülen iç direncin farklı sıcaklıklara göre değişimi.....	75
Tablo 3.7	:Şekil 3.6'da çizdirilen eğrilerin denklemleri, katsayıları ve ortalama sapma değerleri	76
Tablo 3.8	:Tellurex firması için teorik olarak öngörülen termal iletkenliğin farklı sıcaklıklara göre değişimi	77
Tablo 3.9	:Tellurex firması için teorik olarak öngörülen ve T _{sc} =300 K sabit olması koşuluyla farklı ΔT'ler için V-I denklemleri	80
Tablo 3.10	:Tellurex firması için teorik olarak öngörülen ve T _{sc} =300 K sabit olması koşuluyla farklı ΔT'ler için P-I denklemleri, P _{mak} ve I _{kd} değerleri.....	82
Tablo 3.11	: Tellurex firması için teorik olarak öngörülen ve T _{sc} =300 K sabit olması koşuluyla farklı ΔT'ler için Verim denklemleri, P _{mak} ve I _{kd} değerleri.....	84
Tablo 4.1	:Silikon ısı pastasının özellikleri	91
Tablo 4.2	:Tellurex termoelektrik jeneratör modülünün katalog değerleri	92
Tablo 4.3	:Hi-Z termoelektrik jeneratör modülünün katalog değerleri.....	93
Tablo 4.4	:Te Technology firmasının termoelektrik soğutucu modülünün katalog değerleri	94
Tablo 4.5	:Ölçüm aralıkları.....	100
Tablo 4.6	:Bilgisayara yazdırılan değerler.....	102
Tablo 4.7	:Soğuk çalışmada yarı iletkenin özellikleri	110

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1	: Dünya popülasyonunun gelişimi.....	1
Şekil 1.2	: 2006 Yılları için enerji kaynakları pay grafiği.....	2
Şekil 2.1	: Basit termik çift devresi.....	8
Şekil 2.2	: Temel Termal çift devresi.....	11
Şekil 2.3	: Termoelektrik modül bileşenleri.....	12
Şekil 2.4	: Hi-Z Termoelektrik Jeneratör	13
Şekil 2.5	: Beş Peltier elemandan oluşan test düzeneği	14
Şekil 2.6	: Ticari bir kaskad bağlı Peltier soğutucu	14
Şekil 2.7	: (a) Konvansiyonel güç çevrimi (b) Termoelektrik güç çevrimi ...	15
Şekil 2.8	: (a) Konvansiyonel soğutma çevrimi (b) Termoelektrik soğutma çevrimi	16
Şekil 2.9	: Bir termoelektrik jeneratör modülünün bileşenleri	18
Şekil 2.10	: (a) Termoelektrik jeneratör. (b) Termoelektrik soğutucu.....	19
Şekil 2.11	: (a) Plutonium-238 peleti (b) Cassini uzay aracı ve üzerindeki RTG üniteleri.....	20
Şekil 2.12	: (a) MMRTG Termoelektrik modül (b) MMRTG Birimi	21
Şekil 2.13	: 2010 da çıkacak olan BMW 5 serisi araçta termoelektrik yapılarla atık ısı geri kazanımı sağlanacaktır.....	21
Şekil 2.14	: Araçlarda atık ısının termoelektrik jeneratörlerle elektrığe çevrimi.....	22
Şekil 2.15	: Termoelektrik jeneratörlerin evsel ve saha uygulamaları	23
Şekil 2.16	: Güneş enerjisi ve termoelektriğin evsel bir uygulaması.....	24
Şekil 2.17	: (a)Termoelektrik jeneratör ile çalışan saat.(b) Termoelektrik jeneratör ile çalışan kablosuz veri transferi sistemi.....	25
Şekil 2.18	: Evsel uygulamalarda soğutma sistemi	25
Şekil 2.19	: USS Dolphin AGSS 555 Termoelektrik havalandırma test çalışması	26
Şekil 2.20	: Savaş uçaklarında kullanılan termoelektrik soğutucu	26
Şekil 2.21	: (a) Termoelektrikli fan sistemi (b) Isıtıcı ünite.....	27
Şekil 2.22	: İklim koşullarına göre termal konfor sağlayan askeri giysiler.....	27
Şekil 2.23	: Termoelektrik jeneratör hücresi.....	28
Şekil 2.24	: Aktif bir devrenin Tevenin eşdeğeri.....	33
Şekil 2.25	: E_x elektrik alan içerisinde belirli bir yönde yönelmiş elektronlar	37
Şekil 2.26	: (a) Elektron bulutunu oluşturan elektronlardan birinin termal etki sonucu titreşen merkez atomları çevresinde yaptığı rasgele hareketler. (b) Elektron bulutu içerisindeki bir elektronun E_x elektriksel alan etkisiyle yaptığı yönelmiş hareketler.....	37

Şekil 2.27 : S titreşme alanına sahip iki atom arasında elektronun keyfi hareketi	38
Şekil 2.28 : Enerji bant diyagramı.....	39
Şekil 2.29 : Isının metal içerisinde serbest elektronlar ile iletimi	40
Şekil 2.30 : Si Kristal oluşum aşamaları.....	41
Şekil 2.31 : Yarı iletken yapı içinde elektron-boşluk çiftinin termal yönden oluşumu	42
Şekil 2.32 : Bir fotonun kristal yapı içindeki elektronu uyarması sonucu oluşan elektron-boşluk çifti	43
Şekil 2.33 : Elektron-boşluk çiftinin elektrik alan içindeki davranışı.....	44
Şekil 2.34 : Arsenik atomunun Si ile yaptığı bağ ve serbest elektronun yörüngedeki hareketi	46
Şekil 2.35 : Si yapıya 1ppm As eklenmiş n tipi bir yarı iletkenin enerji bant diyagramı	46
Şekil 2.36 : (a) Bor atomunun bağdaki bir atomu yutması sonucu oluşan boşluk (b) Boşluğun Bor atomu çevresindeki yörüngesi ve serbest hale geçişi.....	47
Şekil 2.37 : Si yapıya 1ppm B eklenmiş p tipi bir yarı iletkenin enerji bant diyagramı	48
Şekil 2.38 : (a) n tipi bir yarı iletkenin çok düşük sıcaklıktan doyum sıcaklığına kadar ki davranışı.(b) Doyma sıcaklığından iyonlaşma sıcaklığına kadar olan değişim.(c) İyonlaşma sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklardaki değişim	49
Şekil 2.39 : Elektronun sahip olduğu enerjiye göre izleyebileceği yollar	50
Şekil 2.40 : Sürüklenme mobilitesinin bağışlayıcı atom konsantrasyonuna göre sıcaklıkla değişimi	51
Şekil 2.41 : n tipi bir yarı iletkenin elektriksel iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi	51
Şekil 2.42 : Sıcaklık farkı ile oluşturulan potansiyel fark	52
Şekil 2.43 : Seebeck katsayısının değişimi	53
Şekil 2.44 : Metal ve n-tipi yarı iletkenle ohmik kontak	56
Şekil 2.45 : n tipi bir yarı iletken için akım yönüne göre kontaklardaki durum.....	57
Şekil 2.46 : n ve p tipi yarı iletkenlerde sıcak ve soğuk kontak oluşumu.....	58
Şekil 2.47 : Termoelektrik soğutucu modülü.....	58
Şekil 2.48 : Sıcaklık farkı ile verimin değişmesi ve Figure-of-Merit	59
Şekil 2.49 : Malzeme içerisinde taşıyıcı konsantrasyonuna göre iletkenlik, Seebeck katsayısı, güç faktörü ve termal iletkenliğin değişimi	60
Şekil 2.50 : Termoelektrik malzemelerin performansları.....	61
Şekil 2.51 : Yenilenebilir enerji teknolojileri laboratuvarı, İTÜ Enerji Enstitüsü	63
Şekil 2.52 : Kriyojenik rezervuarlı rejeneratif güç üretim sistemi	64
Şekil 2.53 : Sıvı azotla çalışan LN2000	65
Şekil 3.1 : n ve p tipi yarı iletkenlerin Seebeck katsayısının sıcaklığa göre grafiği.($T_{sc}=300K$).....	69
Şekil 3.2 : Tellurex firmasının jeneratör modülü için teorik olarak öngörülen Seebeck katsayısının sıcaklıkla değişimi	71
Şekil 3.3 : n ve p yarı iletkenlerinin elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa göre değişim grafiği.($T_{sc}=300K$).....	72

Şekil 3.4	: n ve p yarı iletkenlerini için öz direncin sıcaklığa göre grafiği.($T_{sc}=300K$)	73
Şekil 3.5	: Tellurex firmasının jeneratör modülü için teorik olarak öngörülen iç direncin sıcaklıkla değişimi	75
Şekil 3.6	: n ve p yarı iletkeninin termal iletkenliğin sıcaklığa göre grafiği.($T_{sc}=300K$)	76
Şekil 3.7	: Tellurex firmasının jeneratör modülü için teorik olarak öngörülen iç direncin sıcaklıkla değişimi	78
Şekil 3.8	: Tellurex firmasının jeneratör modülü için teorik olarak öngörülen voltaj-akım grafiği	80
Şekil 3.9	: Tellurex firmasının jeneratör modülü için teorik olarak öngörülen güç-akım grafiği.....	82
Şekil 3.10	: Tellurex firmasının jeneratör modülü için teorik olarak öngörülen verim-akım grafiği	84
Şekil 3.11	: Tellurex firmasının jeneratör modülü için teorik olarak öngörülen verim-güç grafiği	86
Şekil 4.1	: (a) Dewar kabı (b) Oda koşullarındaki bakır kaptaki buharlaşan azot (c)Soğuk rezervuar	88
Şekil 4.2	: (a) Isıtıcı ve bakır plaka (b) 3.5 kW variak trafo	89
Şekil 4.3	: Strafor yalıtım malzemesinin bakır blok üstündeki yeri	90
Şekil 4.4	: Silikon ısı pastası	91
Şekil 4.5	: Termoelektrik jeneratörün boyutları	92
Şekil 4.6	: Termoelektrik jeneratörün performans grafiği	93
Şekil 4.7	: Tek turlu potansiyometre.....	94
Şekil 4.8	: J tipi termal çiftler	95
Şekil 4.9	: Termal çiftlerin sisteme yerleştirilmesi.....	96
Şekil 4.10	: Sıcak ve soğuk rezarvuarların birleşimi ve T_{sc} ölçümü yapan J tipi termal çift.....	97
Şekil 4.11	: BNC -2110 Veri toplama paneli	98
Şekil 4.12	: Ön panel görünümü	100
Şekil 4.13	: Blok diyagram.....	101
Şekil 4.14	: Mutimetreler	103
Şekil 4.15	: Devar kabına daldırılmış bakır blok ve ölçüm sistemleri.....	104
Şekil 4.16	: Voltaj ve akım değerlerinin okutulduğu devre	104
Şekil 4.17	: Deney bağlantı noktaları ve veri toplama paneli solda	105
Şekil 4.18	: Tellurex firmasının termoelektrik jeneratör modülü için sıcak deney voltaj – akım grafiği	109
Şekil 4.19	: Tellurex firmasının termoelektrik jeneratör modülü için soğuk deney voltaj – akım grafiği	110
Şekil 4.20	: Hi-Z termoelektrik jeneratörünü için voltaj – akım grafiği.....	111
Şekil 4.21	: TE Technology firmasının termoelektrik soğutucu modülü için sıcak deney voltaj-akım grafiği	112
Şekil 4.22	: Te Technology firmasının termoelektrik soğutucu modülü için soğuk deney voltaj-akım grafiği.....	113
Şekil 4.23	: Tellurex termoelektrik jeneratörün sıcak deney için güç-akım grafiği.....	114
Şekil 4.24	: Tellurex termoelektrik jeneratörün soğuk deney için güç-akım grafiği.....	115
Şekil 4.25	: Hi-Z termoelektrik jeneratör modülü için güç-akım grafiği.....	116

Şekil 4.26 : TE Technology termoelektrik soğutucu modülü sıcak deney için güç-akım grafiği	117
Şekil 4.27 : TE Technology termoelektrik soğutucu modülü soğuk deney için güç-akım grafiği	118
Şekil 4.28 : Tellurex termoelektrik jeneratörün sıcak deney için voltaj-yük direnci grafiği.....	119
Şekil 4.29 : Tellurex termoelektrik jeneratörün soğuk deney için voltaj-yük direnci grafiği.....	120
Şekil 4.30 : Hi-Z firmasının termoelektrik jeneratörü için voltaj-yük direnci grafiği.....	121
Şekil 4.31 : TE Technology termoelektrik soğutucu modülü sıcak deney için voltaj-yük direnci grafiği	122
Şekil 4.32 : TE Technology termoelektrik soğutucu modülü soğuk deney için voltaj-yük direnci grafiği	122
Şekil 4.33 : Tellurex termoelektrik jeneratörün sıcak deney için güç-yük direnci grafiği.....	124
Şekil 4.34 : Tellurex termoelektrik jeneratörün soğuk deney için güç-yük direnci grafiği.....	125
Şekil 4.35 : Hi-Z termoelektrik jeneratörün için güç-yük direnci grafiği	126
Şekil 4.36 : TE Technology termoelektrik soğutucu modülü sıcak deney için güç- yük direnci grafiği	127
Şekil 4.37 : TE Technology termoelektrik soğutucu modülü soğuk deney için güç- yük direnci grafiği	127
Şekil 4.38 : Tellurex termoelektrik jeneratörün iç direnç- ortalama sıcaklık grafiği.(Ki kare: 0.8678).....	128
Şekil 4.39 : Tellurex termoelektrik jeneratörün iletkenlik- sıcaklık grafiği. (Ki kare: 2.6425×10^4)	129
Şekil 4.40 : Tellurex termoelektrik jeneratörün Seebeck katsayısı- sıcaklık grafiği. (Ki kare: 0.0036).....	130
Şekil 4.41 : Tellurex termoelektrik jeneratörün maksimum güç-sıcaklık farkı grafiği. ($T_{sc}=283$ K sabit ve Ki kare: 0.0249)	131
Şekil 4.42 : Tellurex termoelektrik jeneratörün açık devre voltajı-sıcaklık farkı grafiği. ($T_{sc}=283$ K sabit ve Ki kare: 0.1335).....	132
Şekil 4.43 : Tellurex termoelektrik jeneratörün kısa devre akımı-sıcaklık farkı grafiği. ($T_{sc}=283$ K sabit ve Ki kare: 0.0537)	132
Şekil 4.44 : Tellurex termoelektrik jeneratör için sıcaklık farkları aynı olan ortalama sıcaklıkları farklı olan durumlar için maksimum güç-ortalama sıcaklık grafiği.....	133
Şekil 4.45 : Ani akım değişimlerine karşılık TEG modülün davranışı	134

SEMBOL LİSTESİ

A	: Alan, m ²
A _n	: n tipi yarı iletkenin alanı, m ²
A _p	: p tipi yarı iletkenin alanı, m ²
AC	: Alternatif gerilim, V
DC	: Doğru gerilim, V
E _x	: Elektrik alan x yönünde, V/m
E _F	: Fermi enerji seviyesi, eV
E _{Fm}	: Metalin Fermi enerji seviyesi, eV
E _{Fn}	: n tipi yarı iletkenin Fermi enerji seviyesi, eV
E _i	: İletkenlik bandının enerjisi, eV
E _v	: Valans bandının enerjisi, eV
E _{ef}	: Enerji bantları arasındaki enerji farkı, eV
emk	: Elektromotor kuvveti, W/Q
I	: Akım, A
I _{kd}	: Kısa devre akımı, A
I	: Gücün maksimum olduğu noktada akımın aldığı değer, A
J	: Elektrik akımı yoğunluğu, W/m ²
K	: Isıl iletkenlik, W/K
L	: Boy, m
L _n	: n tipi yarı iletkenin boyu, m
L _p	: p tipi yarı iletkenin boyu, m
ℓ	: Ortalama serbest yol, m
m	: Kütle, kg
m _c [*]	: Elektronun kütlesi, kg
m _b [*]	: Boşluğun kütlesi, kg
m [']	: R ₀ /R _i
N _p	: Pelet sayısı
P	: Güç, W
P ₀	: Çıkış gücü, W
P _{Yük}	: Yük üzerindeki güç, W
P _{mak}	: Maksimum güç, W
Q̇ _{sc}	: Sıcak yüzeye verilen ısı, W
Q̇ _{sğ}	: Soğuk yüzeye verilen ısı, W
Q̇ _F	: Fourier ısı iletimi, W
Q̇ _P	: Peltier etkisiyle oluşan ısı, W
(Q̇ _P) _{sc}	: Peltier etkisiyle sıcak yüzeyde oluşan ısı, W
Q̇ _J	: p ve n yarı iletkenlerinde toplam Joule kaybı, W
(Q̇ _J) _{sc}	: Sıcak yüzeyde Joule kaybı, W

$(\dot{Q}_J)_{s\ddot{g}}$: Soğuk yüzeyde Joule kaybı, W
R_0	: Yük direnci, ohm
R_i	: İç direnç, ohm
R_t	: Toplam direnç, ohm
T_{sc}	: Sıcak yüzeyin sıcaklığı, K
$T_{s\ddot{g}}$: Soğuk yüzeyin sıcaklığı, K
$T_{s\ddot{g}b}$: Soğuk blok sıcaklığı, K
\bar{T}	: Ortalama sıcaklık, K
TEG	: Termoelektrik jeneratör
V	: Voltaj, V
V_0	: Açık devre voltajı, V
$V_{Yük}$: Yük üzerindeki gerilim düşümü sabiti, V
V_g	: Termoelektrik jeneratör kolları arası voltaj, V
v_{dx}	: x yönünde belirli bir zaman aralığı için ortalama hız, m/s
\bar{v}_e	: Elektronun ortalama hızı, m/s
Z	: Figure of Merit
Z_{mak}	: Figure of Merit'in maksimum değeri
ZT	: Figure of Merit'in boyutsuz olarak gösterimi

Grekçe Semboller

α	: Seebeck katsayısı, μ V/K
α_M	: Modülün Seebeck katsayısı, V/K
β	: Thomson katsayısı, V/K
η_t	: Termal verim
$\eta_{t(mak)}$: Maksimum termal verim
λ	: Isıl iletkenlik, W/mK
λ_e	: Elektriksel ısıl iletkenlik, W/mK
λ_L	: Latis ısıl iletkenlik, W/mK
λ_n	: n tipi yarı iletken için ısıl iletkenlik, W/K
λ_p	: p tipi yarı iletken için ısıl iletkenlik, W/K
μ_e	: Elektronun sürüklenme mobilitesi, m/s
μ_h	: Boşluğun sürüklenme mobilitesi, m/s
Π	: Peltier katsayısı, W/A
ρ	: Öz direnç, ohm.m
ρ_n	: n yarı iletkeni için öz direnç, ohm.m
ρ_p	: p yarı iletkeni için öz direnç, ohm.m
σ	: İletkenlik, S
τ	: Zaman, s
μ_e	: Elektronun sürüklenme mobilitesi, m/s
μ_h	: Boşluğun sürüklenme mobilitesi, m/s
χ^2	: Ki kare
ψ	: Dalga fonksiyonu
ψ_{hib}	: Hibrit dalga fonksiyonu
ψ_A	: Bağ yapmayan dalga fonksiyonu
ψ_B	: Bağ yapan dalga fonksiyonu

TERMÖELEKTRİK JENERATÖRLERİN ÇOK DÜŞÜK SICAKLIKLARDA TEORİK VE DENEYSEL KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Mikro ölçekte insanlar ve canlılar, makro ölçekte ülkeler ve dünya açısından enerjiye olan gereksinim, var oluş sürecinden başlayıp günümüz ve geleceği de kapsayacak şekilde artış göstermektedir. Sürdürülebilir bir kalkınma için enerjinin sonlu kaynaklardan değil, kendini yenileyen ve çevreci teknolojilerle üretilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, doğrudan enerji dönüşümü yapan sistemlerin geliştirilmesi ile enerji dönüşüm kayıpları azaltılabileceği gibi sistemler daha basit yapılara indirgenebilecektir. Enerji üretimi, soğutma, uzay ve havacılık uygulamaları, sensörler ve atık ısı geri kazanımı olmak üzere çok geniş uygulama alanı olan termoelektrik cihazlar bu çalışmanın temel konusunu oluşturmaktadır.

Isı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren termoelektrik jeneratörlerin yaygın çalışma koşullarının tersine çok düşük sıcaklıklarda (kriyojenik sıcaklıklar) çalışma performanslarının teorik ve deneysel olarak incelenmesi bu çalışmanın esasını oluşturmaktadır. Olağan uygulamalarda termoelektrik jeneratörler için soğuk ısı kaynağı olarak atmosfer, sıcak ısı kaynağı olarak da yaklaşık 373–523 K sıcaklığındaki ısı kaynakları kullanılır. Bu nedenle de performans değerleri ile akım-gerilim ve akım-güç karakteristikleri bu sıcaklık bölgesinde incelenir. Bu çalışmada ise, atmosferik basınçta sıvılaştırılmış 77K sıcaklığındaki azotun soğuk ısı kaynağı ve 293 K sıcaklığındaki atmosferi sıcak ısı kaynağı olarak kullanılması durumunda termoelektrik jeneratörler ve termoelektrik soğutucular teorik ve deneysel olarak incelenecektir. Bu çalışma sonucunda elde edilen bilgiler, kriyojenik tabanlı termoelektrik güç yedekleme sistemlerinin geliştirilmesine temel oluşturacaktır.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL CHARACTERISATION OF THERMOELECTRIC GENERATORS FOR CRYOGENIC TEMPERATURES

SUMMARY

From the very beginning of the world up to those days need for energy have been increased and will be increase in the future. At the micro scale for human kind and for all living beings, and at the macro scale for all countries and for the whole world. For a sustainable development, usage of conventional sources for energy production must be reduced, usage of renewable energy sources and environmentally friendly technologies must be increase. In this content, energy conversion systems will be develop; energy loses due to the energy conversion processes will be minimized and more simple systems will be invent. Main subject of this teases is thermoelectric generators which has wide applications in many areas such as; energy production, cooling, space and aviation, sensors and west heat recovery.

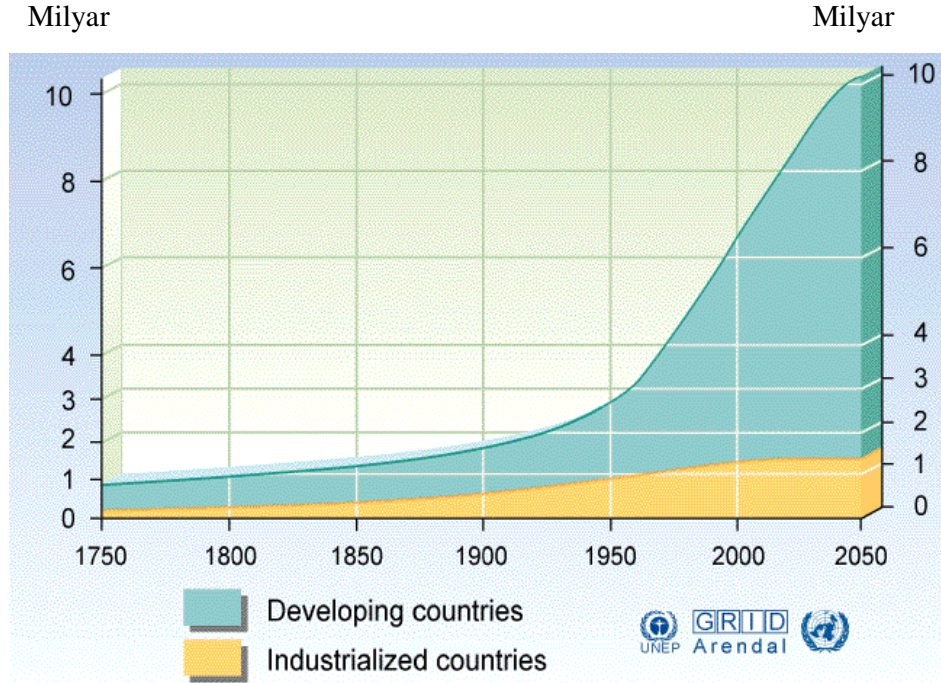
Thermoelectric generators are the devices converting the heat energy directly to the electrical one. Theoretical and experimental investigations of the performance of thermoelectric generators working at cryogenics temperatures are the main subjects of this project. In ordinary applications, thermoelectric generators are operated between cold reservoir at atmospheric temperatures and hot reservoir at 373-523K. In this project, the same characteristics will be both theoretically and experimentally analyzed for the case in which the atmosphere (293 K) is used as a hot reservoir while the liquefied nitrogen at atmospheric pressure 77 K is used as a cold reservoir. The results of this project will constitute a basic knowledge to develop cryogenic based power backup systems.

GİRİŞ

1.1 Dünyada Enerji Kaynaklarının Kullanımı ve Doğrudan Enerji Dönüşümü

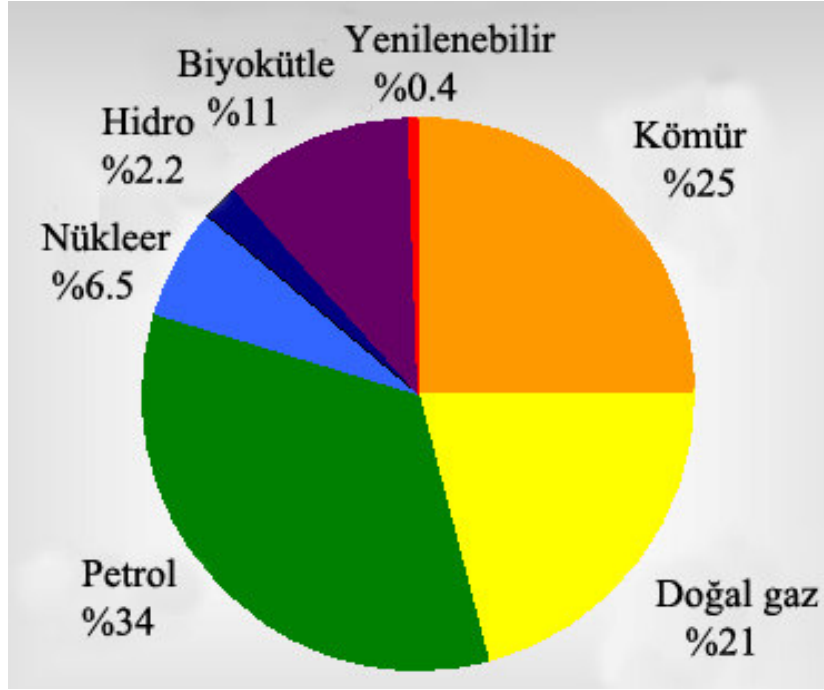
İnsanlığın enerjiye olan gereksinimi var oluşumuzdan beri hiç tükenmediği gibi her geçen gün daha da çok artmaktadır. Mevcut enerji döngüsünün sonlu olan fosil yakıtlar kökenli olması ve çevreye verdiği olumsuz etkilerden dolayı insanlık yeni nesil enerji teknolojilerini geliştirme ve var olan kaynakları verimli kullanmayı hedef edinmiştir.

Şekil 1.1'de verilen istatistiksel eğrisinden görüleceği gibi 300 yıllık bir projeksiyon için dünya nüfusunda 10 kat artış yaşanacaktır. Bu artışla birlikte insanlık için en önemli iki parametre besin ve enerji olacaktır. Son dönemlerde biyoyakıtlar alanında yaşanan ikili çekişme de bunun bir göstergesi olmaktadır. Fakat her ne şekilde olursa olsun teknolojik gelişim sağlandığı ölçüde bu sorunlar aşılabacaktır.



Şekil 1.1 : Dünya popülasyonunun gelişimi[1].

Şekil 1.2’de dünyanın 2006 yılı için EIA tarafından verilen enerjinin kaynaklara göre kullanımları gösterilmiştir. Konvansiyonel kaynaklar içerisinde yenilenebilir enerjilerin payının çok düşük düzeyde kaldığı görülmektedir.



Şekil 1.2 : 2006 Yılları için enerji kaynakları pay grafiği[2].

Yenilenebilir enerji yapısal olarak kaynağını doğadan alan ve kendini yenileyebildiği gibi çevre üzerinde olumsuz etkileri bulunmayan kaynaklardır. Günümüzde en yaygın olarak güneş, rüzgâr, hidrolik, biokütle ve jeotermal enerji kaynakları kullanılmakta ve buna bağlı olarak teknolojiler geliştirilmektedir.

Çoğu ülke gelişmişlik düzeyini AR&GE yatırımlarına ayırdığı bütçeler sayesinde sürdürmekte ve değişen dünya düzeninde ayakta kalmaya çalışmaktadır. Enerjiye olan talebin hızlı bir şekilde artması sonucu fosil yakıtların tüketimi artmış ve bu durum çevre sorunlarını ve sağlık problemlerini beraberinde getirmiştir. Özellikle küresel ısınma yerel sorunlar olmaktan çıkmış ülkeleri ve dünyayı etkileyecek boyutlara gelmiştir. Sera gazı emisyonlarını azaltmak üzere Kyoto Protokolü imzalanmış ve bu sayede gelişmekte olan ülkelerin yenilenebilir enerji teknolojilerine yatırım yapması için kredi sağlanmaya çalışılmıştır.

Enerjinin kontrol edilebilmesi ve istediğimiz formlara dönüşüyor olması gerekmektedir. Yenilenebilir enerjilerde doğadan aldığımız enerjileri kayıpsız bir şekilde yararlı işe dönüştürülebilmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm oranları bazı sistemlerde termodinamik, bazı sistemlerde elektrokimyasal sınırlarla belirlenmiştir. Bunların yanında sistemler arasında dönüşümler ve dağıtım işlemleri sırasında empedans kaynaklarının da devreye girmesiyle enerjinin kullanılabilirliği azalmaktadır. Doğrudan enerji dönüşümü yapan teknolojilerle kayıplar azaltılmaya çalışılmaktadır. Doğrudan enerji dönüşüm sistemlerinde güneş panelleri çoğu kişi tarafından bilinmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Güneş pilleri ile termoelektrik yapılar dönüştürdükleri enerji formları birbirlerinden farklı olsalar da temelde iki sistem de yarı iletken malzemeden üretilmektedir. Tarihsel olarak incelendiğinde ise iki teknoloji de ilk olarak uzay araçlarında kullanılmıştır. Güneş panelleri üzerine yapılan çalışmalar ve seri üretim ile güneş enerjisinden yararlanma yaygınlaşmış fakat termoelektrik yapılar bu gelişimin gerisinde kalmıştır. Şimdilerde termoelektrik tabanlı enerji sistemleri üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmış ve verim değerleri iyileşmeye başlamıştır.

1.2 Tezin Konusu ve Ele Alınan Problem

Bu çalışma, telekomünikasyon baz istasyonlarının enerji gereksinimlerini rejeneratif güç yedekleme sistemleri ile çözmeyi hedefleyen kriyojenik ısı rezervuarlı termoelektrik jeneratörlerinin incelendiği bir ön çalışma olarak düşünülmüştür. Son yıllarda şebekeden uzaktaki yerleşim alanları, telekomünikasyon, uydu ve ölçüm istasyonlarının güç gereksinimleri için güneş, rüzgar ve akü guruplu hibrit enerji sistemleri tercih edilmeye başlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin depo edilmesi sorunu bu sistemlerin tasarımında en önemli dizayn parametrelerinden biridir. Geliştirilmesi düşünülen rejeneratif güç yedekleme sistemi sıvı azotu enerji depo kaynağı olarak kullanacaktır. Sıvı azot özel dizayn edilmiş bir ısı değiştiricisinden geçirilerek gaz forma geçirilecektir. Isı değiştiricisi üzerine yerleştirilen termoelektrik jeneratörlerden DC elektrik üretilmesi planlanmaktadır. Buharlaşan sıvı azotun pnömatik motoru döndürmesi ve pnömatik motorun tahrik ettiği alternatörün AC elektrik üretmesi planlanmaktadır.

Kurulacak olan bu rejeneratif güç yedekleme sisteminde DC elektrik üretecek olan termoelektrik jeneratörün ısı değiştiricisinin üzerinde kriyojenik sıcaklıklarda çalışılacağı düşünülürse modülün önceden çalışma koşullarının bilinmesi önemlidir. Literatürde yapılan incelemelerde termoelektrik jeneratörlerin kriyojenik sıcaklıklarda çalışması konusunda çok az sayıda kaynağa rastlanmıştır. Bu tez kapsamında, dizayn edilmesi düşünölen ısı dönüştürücüsünün üzerine yerleştirilecek olan termoelektrik jeneratörlerin DC elektrik üretiminin düşük sıcaklıktaki çalışma koşullarından nasıl etkileneceği incelenecektir. Termoelektrik jeneratörlerin soğuk ortam koşullarında hangi sıcaklık aralıklarında daha verimli çalıştığını tespit etmek, toplamda sistem performansını ön kestirme ve en iyileme imkanı sağlayacaktır. Tek bir termoelektrik jeneratörün özellikleri elde edildikten sonra isteğe göre kW'lar seviyesinde sistemler tasarlanabilir. Bu nedenle termoelektrik jeneratörlerin kriyojenik sıcaklıklarda karakterizasyonunun elde edilmesi, doğru bir ısı değiştiricisi ve sistem tasarlama imkanı sağlayacaktır.

1.3 Kaynak Taraması

Termoelektrik jeneratörler ve soğutucuların uygulamaları, mühendislik ve temel bilimsel hesaplamaları ile ilgili literatürde çok çeşitli yayınlar mevcuttur, [3-26]. Bu tez çalışmasında yapılan kaynak araştırmasında incelenen makalelerin özeti aşağıda verilmiştir.

Sivapurapu, S. V. K. [6] tarafından yapılan çalışmada, yakıt olarak sıvı azot kullanan araçlarda kriyojenik termoelektrik modüllerin kullanılması ile araç tahrik sistemlerinin verimlerinin artırımı konusu incelenmiştir. Sıvı azotun buharlaştırılması sırasında çekilen ısıdan faydalanarak termoelektrik jeneratörlerle aracın tahrik sisteminin verimi %2.5 arttırılacağını hesaplama yöntemleri ile göstermeye çalışmışlardır. Bununla birlikte termoelektrik modüllerin kriyojenik sıcaklıklarda karakterizasyonu ele alınmamış, sadece düşünölen yarı iletken olan CsBi₄Te₆ malzemesinin Seebeck katsayısının oda sıcaklığına yakın sıcaklıklardaki maksimum değeri esas alınmıştır. Deneysel alışma yapılmadan ve 225 K gibi kriyojenik sıcaklık sayılmayacak değerlerde çalışarak kriyojenik ortamda dizayn yaptıklarını söylemektedirler. Tezde sıcaklık düşümleri ve buna bağlı olarak hesaplanan ısı akısı tamamen varsayımlar üzerine kurulmuştur. Wei Sun ve diğ. [7] tarafından yapılan çalışmada, LNG gazının buharlaşması sırasında ortaya çıkan sıcaklık farkından

yararlanıp termoelektrik modüllerin enerji dönüşüm değerlerini analitik ve nümerik yollarla hesaplamaya çalışmışlardır. Atık ısının geri kazanımı sırasında büyük sıcaklık farklarının maliyetsiz bir şekilde oluşturulması nedeniyle termoelektrik malzemelerin kullanımının avantajlı olacağını belirtmişlerdir. Sato, K. ve diğ. [8] tarafından yapılan çalışmada, çok yüksek akımların taşınabilmesi için geliştirilen Peltier akım uçları ısı kaçakların düşürülmesi için Peltier akım ucunun bir parçasının da termoelektrik soğutucular ile dizayn edilmesi gerektiğini savunmaktadırlar. Termoelektrik soğutucuların bu yapılarda kullanılması ile sıcak ve çok soğuk yüzeyler arasında bağlantıyı sağlayan, elektrik iletkenliği yüksek, termal iletkenliği düşük malzemeler için ısı kaçaklarının %30 azaltılacağını hesaplamışlardır. Bu çalışmada soğutucu gaz ile malzemenin yapı boyunca aynı sıcaklıkta olduğu kabul edilmiş fakat sabit olmadığı deneylerde görülmüştür. Termoelektrik modülün Seebeck katsayısı, termal iletkenlik ve verim değerleri sabit olarak alınmış, bu büyüklüklerin sıcaklık bağımlılıkları göz önüne alınmamıştır. Metzger, T. ve Huebener, R.P. [9] tarafından yapılan çalışmada, Peltier modüllerinin kaskad şekilde termal olarak seri bağlı dizaynı yapılarak maksimum soğutma yüzeyi oluşturulmaya çalışılmıştır. Beş katlı kaskad bir yapı dizaynı ile 128 K sıcaklık farkı yaratılarak maksimum 158 K lik soğuk yüzey yaratılmıştır. Teorik çalışmada Seebeck katsayısını, termal ve elektriksel iletkenlikleri sabit alarak çalışmışlardır. Bu büyüklüklerin sıcaklıkla olan değişimlerini ihmal ederek teorik modelde büyük oranda yaklaşımlarla sonuca gitmeye çalışmışlardır. Huong, N.T. ve diğ [10] tarafından yapılan çalışmada, p- $\text{Bi}_{1.8}\text{Sb}_{0.2}\text{Te}_{3.259}$ tipi termoelektrik malzemenin 4.2 K'den 300 K'e kadarki sıcaklık aralığında Seebeck katsayısı, elektriksel iletkenlik, ısı iletkenlik ve Hall katsayılarının belirlenmesine çalışılmıştır. $\text{Bi}_{1.8}\text{Sb}_{0.2}\text{Te}_{3.259}$ malzemesinin Seebeck katsayısının ($\alpha > 500 \mu\text{VK}^{-1}$) en yüksek olduğu sıcaklık değeri 200 K olarak tespit edilmiştir ve $ZT=1.1$ bulunmuştur. $\text{Bi}_{1.8}\text{Sb}_{0.2}\text{Te}_{3.259}$ malzemesi laboratuvar koşullarında elde edilmiş olup ve piyasada herkesin ulaşabileceği bir malzeme değildir. Bu nedenle termoelektrik malzemelerin ulaşılacağı üst limitleri görmek açısından güzel bir çalışma olup, verileri ekonomik olarak herkesin ulaşabileceği modüllerin özelliklerini tespit etmenin çok uzağındadır.

Bu tez çalışmasında ise, ekonomik ve kolay elde edilebilen termoelektrik modüllerin, ki bunlar Bi_2Te_3 esaslı yapılardan oluşmaktadır, hem teorik hem de deneysel olarak kriyojenik sıcaklıklardaki gerçek karakterizasyonlarının elde edilmesi amaçlanmıştır.

1.4 Tezde Yapılanlar ve Elde Edilen Temel Bulgular

Tezin temel bilgiler bölümünde termoelektrik etkilerin tanımları yapılmış, termoelektrik malzemelerin özellikleri, yarı iletken teknolojisi ile termoelektrik cihazlarda gözlenen gelişmeler açıklanmıştır. Ayrıca düşük sıcaklıklardaki çalışma koşullarının yarı iletkenlerde ne gibi etkiler yaratacağı ve bunun limitleri anlatılmıştır.

Tez çalışmasının temel bölümlerinden birini oluşturan termoelektrik jeneratörün matematiksel modellemesi ve teorik karakterizasyonu bölümünde; öncelikle malzemenin Seebeck katsayısı, elektriksel iletkenliği ve ısıl iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi için beklenen davranışlar verilmiş, güç, güç yoğunluğu, voltaj-akım, güç-akım, verim-akım ve verim-güç ilişkileri teorik olarak modellenmiştir.

Deneysel kısımda ise farklı sıcak ve soğuk çalışma koşulları için çok sayıda akım, voltaj, sıcaklık, güç, yük direnci gibi büyüklüklerin ölçümleri yapılmış veriler toplanmıştır. Veriler saniyelik olarak NI PCI-6229 National Instruments veri toplama kartı ile bilgisayara kaydı edilip MATLAB® ortamında analiz edilmiştir. Temelde Tellurex firmasının 5.7 W'lık G1-1.4-219-1.14 termoelektrik jeneratörü üzerinde çalışılmıştır. Bunun dışında belirli sayıda ölçüm de Hi-Z firmasının 2 W'lık jeneratörü ile TE Technology firmasının High Performance HP-199-1.4-0.8 Peltier soğutucu modülünün jeneratör modundaki çalışması incelenmiştir.

Veri toplama kartı ile elde edilen veriler soğuk ve sıcak ortam olmak üzere iki bölüme ayrılıp, MATLAB® ortamında termoelektrik jeneratörün karakteristiklerini verecek olan grafiklerin çizdirilmesinde kullanılmıştır. Bu grafikler; voltaj-akım, güç-akım, voltaj-iç direnç, güç-iç direnç, iç direnç-ortalama sıcaklık, iletkenlik-ortalama sıcaklık, Seebeck-ortalama sıcaklık, sıcak yüzeyin 283K'de sabit tutulması koşulu için maksimum güç- sıcaklık farkı, sıcak yüzeyin 283K'de sabit tutulması koşulu için voltaj- sıcaklık farkı, sıcak yüzeyin 283K'de sabit tutulması koşulu için kısa devre akımı- sıcaklık farkı, hızlı çalışma deneyi için Peltier etkisinin sistemi nasıl etkilediğinin gösterilmesi ve son olarak sıcaklıkları aynı, ortalama sıcaklıkları farklı olan çalışmalar için maksimum güç-ortalama sıcaklık grafikleri çizdirilmiş ve yorumlanmıştır.

2. TEMEL BİLGİLER

Termoelektriğin tarihi ve termoelektrik yapıların temelleri 1821 yılında Alman fizikçi Thomas Johann Seebeck tarafından atılmıştır. Seebeck iki farklı metalin uçları arasında sıcaklık farkı yaratıldığında pusula iğnesinin saptığını keşfetmiştir. Seebeck etkisi olarak bilinen ve Seebeck'in ölümünden sonra gerçek anlamıyla tanımlanan bu etki sıcaklık farkı ile yaratılan elektriksel potansiyel sonucunda oluşan devreye bağlanan bir yük direncinden akım akmasıyla sonuçlanmaktadır.

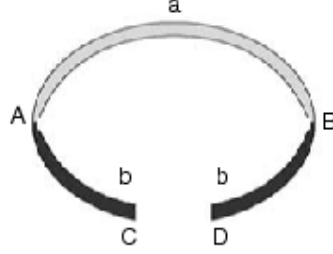
Bu buluştan on üç yıl sonra Fransız fizikçi Jean Charles Athanase Peltier tarafından Peltier etkisi bulunmuştur. Peltier iki farklı iletkenin ara yüzeyinden akım geçirilmesi sırasında ısının ya absorblandığını veya dışarı verildiğini bulmuştur. Son olarak William Thomson (Lord Kelvin) tarafından bu iki etki termodinamik yasaları çerçevesinde incelenip bütünleştirilmiştir. Thomson kendi adıyla yayınladığı bu etkiyi şu şekilde tanımlamıştır; iki farklı iletken hem ısıtılıp hem de üzerlerinden akım akması sağlandığında, bütün yapı boyunca ısı ya absorblanır veya dışarı verilir. [26]

Termoelektrik malzemelerin önemli teorik ifadeleri Edmund Altenkirch tarafından ortaya konmuştur. Altenkirch iyi bir termoelektrik malzemenin karakteristiğini belirlerken Seebeck katsayısı ve elektriksel iletkenliği yüksek, fakat termal iletkenliğin kötü olması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu yaklaşımlar termoelektrik yapıların daha iyi açıklanmasına imkan veren *figure of merit* (Z) parameteresinin tanımlanmasını sağlamıştır. Yarı iletken malzemelerin gelişimleri ile verimleri %5-6 seviyesine çıkan termoelektrik yapıların gelişimi hızla devam etmektedir. Kuantum kuyu biçiminde yapılandırılmış malzemelerle verimler bugün laboratuvar ölçeğinde %20 değerlerine ulaşmıştır.[26]

2.1 Termoelektrik Etkiler

2.1.1 Seebeck Etkisi

Seebeck etkisi; iki farklı metalin uçları arasında oluşturulan sıcaklık farkının yarattığı elektriksel potansiyel fark olarak tanımlanmıştır. Şekil 2.1 de gösterilen a ve b iletkenleri ile termal yönden paralel ve elektriksel yönden seri bir devre oluşturulur.



Şekil 2.1 : Basit termik çift devresi[3].

Oluşturulan bu devre üzerinde A ve B bağlantı noktalarında T_1 ve T_2 sıcaklık farkları yaratılırsa, C ve D açık uçlarında V elektriksel potansiyel farkı meydana gelecektir. Oluşan bu gerilimin değeri;

$$V_0 = \alpha_{ab} (T_1 - T_2) \quad (2.1)$$

şeklinde belirlenir ve bu ifadede;

$$\alpha_{ab} = V_0 / \Delta T \quad (2.2)$$

Seebeck katsayısı olarak tanımlanır. Seebeck katsayısı termal emk şeklinde tanımlanabildiği gibi α yerine S şeklinde gösterimleri de bulunmaktadır. Birim olarak V/K veya daha yaygın olarak $\mu V/K$ olarak ifade edilebilir. Tablo 2.1’de değişik metaller için Seebeck katsayısının nasıl değiştiği gösterilmektedir. Seebeck katsayılarını gösteren Tablo 2.1 Platin metali referans alınarak oluşturulmuştur.

Tablo 2.1: Farklı metaller için Seebeck katsayıları[18].

Metaller	Seebeck Katsayısı ($\mu\text{V/K}$)
Antimon	47
Nikrom	25
Molibden	10
Kadmiyum	7.5
Tungsten	7.5
Altın	6.5
Gümüş	6.5
Bakır	6.5
Rodyum	6.0
Alüminyum	3.5
Karbon	3.0
Civa	0.6
Platin	0
Sodyum	-2.0
Potasyum	-9.0
Nikel	-15
Konstantan	-35
Bizmut	-72

2.1.2 Peltier Etkisi

Peltier etkisi; İki iletkenin ara yüzeyinden akım geçirilmesi sırasında ısı ya absorblanır veya dışarı verilir şeklinde tanımlanmıştır. Seebeck etkisinin tersi olarak düşünülebilir.

Şekil 2.1 de oluşturulan devre üzerinde; C ve D uçlarına V gerilimi uygulanıp devreden elektrik akımı akması sağlandığında A veya B bağlantı noktalarından birinde q değerinde ısıtıcı bir etki yaratılırken diğer bağlantı noktasında -q değerinde bir soğutma etkisi yaratılır. Oluşan ısının devreden geçen akıma oranı Peltier katsayısı olarak bilinir ve aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\Pi = \frac{\dot{Q}}{I} \quad (2.3)$$

Birimi W/A dir.

2.1.3 Thomson Etkisi

Termoelektrik enerji dönüşüm etkilerinden sonuncusu olan Thomson etkisi, William Thomson (Lord Kelvin) tarafından tanımlanmıştır. Uçları arasında ΔT sıcaklık farkı bulunan bir iletkenin elektrik akımı geçirildiğinde iletkenin bir parçasında tersinir ısı üretimi gerçekleşir. Sağlanan ΔT sıcaklık farkının küçük olması durumu için β Thomson katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{q}''' = \beta \times I \times \Delta T \quad (2.4)$$

Seebeck katsayısında olduğu gibi Thomson katsayısı birimi V/K dir.

2.1.4 Kelvin İlişkileri

Yukarıda verilen üç büyüklük Kelvin eşitlikleri ile aşağıda verildiği gibi ilişkilendirilebilir:

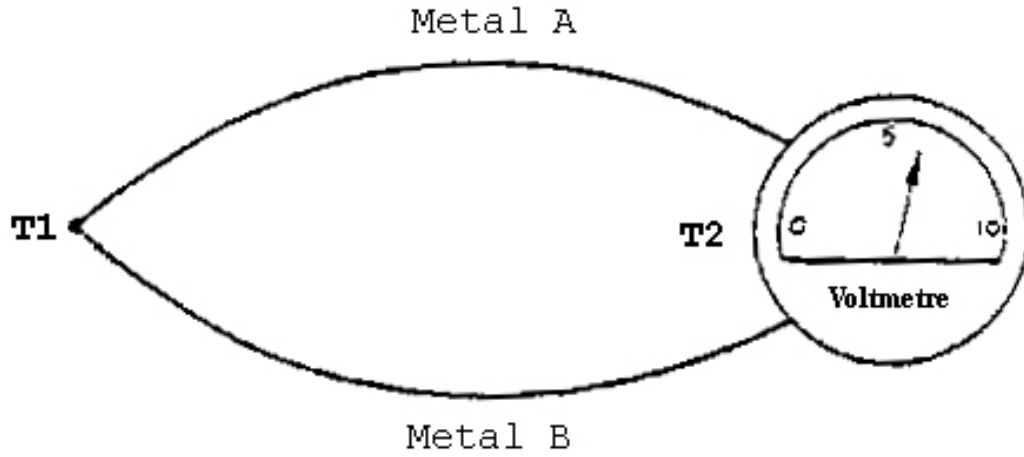
$$\alpha_{ab} = \frac{\pi_{ab}}{T} \quad (2.5)$$

$$\frac{d\alpha_{ab}}{dT} = \frac{\beta_a - \beta_b}{T} \quad (2.6)$$

Termodinamiğin tersinmezlik formüllerinden türetilen bu ilişkiler birçok materyal üzerinde test edilmiş ve doğrulanmıştır.

2.2 Termoelektrik Jeneratörler ve Soğutucular

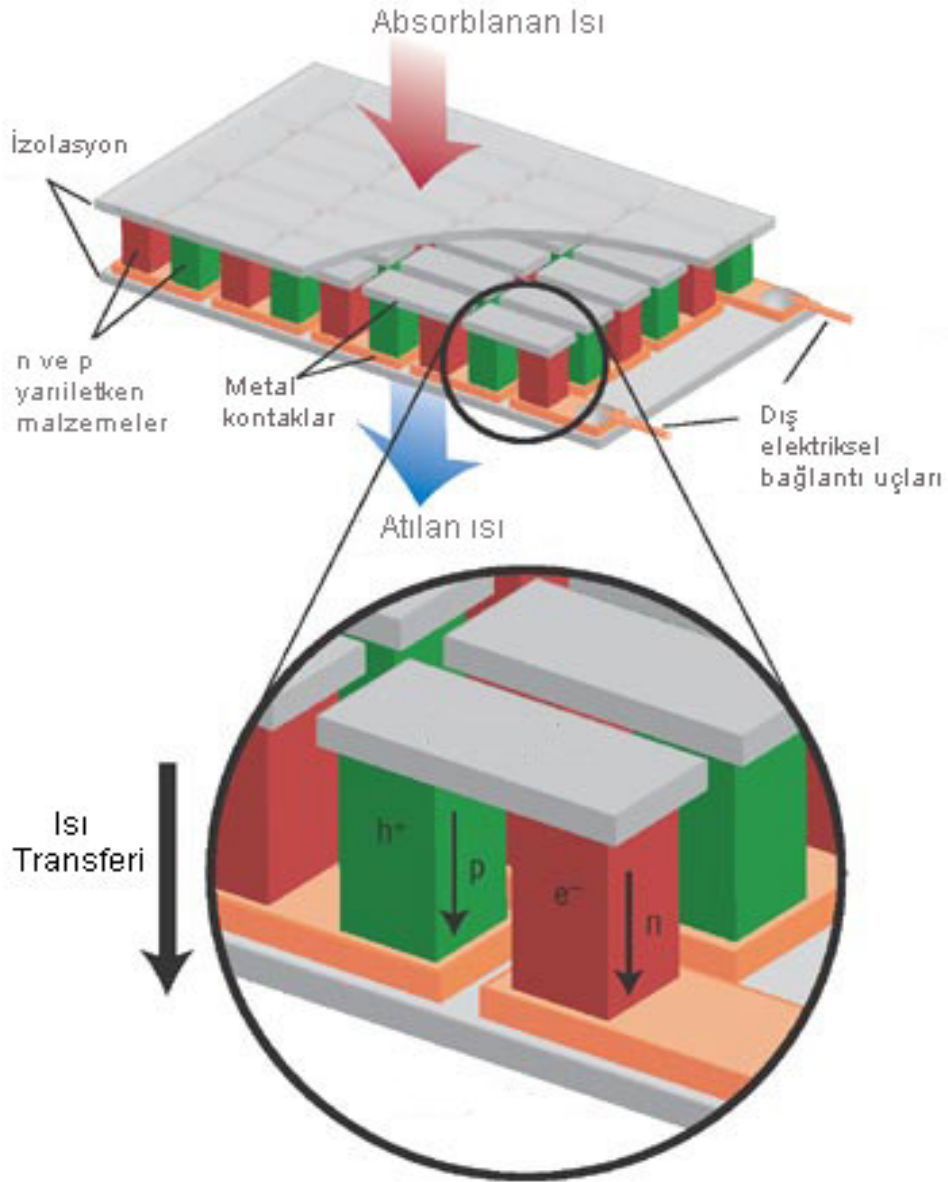
Termoelektrik yapıların basit bir uygulaması olarak sıcaklık ölçülümde kullanılan termal çift örnek olarak gösterilebilir (Şekil 2.2). İki farklı metalin birleşmesinden oluşan bu yapının bir ısı kaynağına dokundurulması sonucunda sıcaklık farkı ve daha önce değinilmiş olan Seebeck etkisine bağlı olarak mili voltlar seviyesinde gerilim üretilmektedir. Üretilen bu gerilim termometre cihazına yansıtılıp kaynağın sıcaklık bilgisi sayısal olarak gösterilecektir. Bu uygulamada termoelektrik yapı bir sensör görevi görmüş ve analog verilerin dış ortamdaki alınmasını sağlamıştır.



Şekil 2.2: Temel Termal çift devresi[12].

Tez kapsamında incelenecek olan termoelektrik malzemeler n ve p tipi yarı iletken yapılardan oluşmaktadır. Bu yapılar birbirlerine termal olarak paralel elektriksel olarak seri bağlanarak oluşturulmuşlardır. Jeneratör olarak çalışan termoelektrik modüllerin tasarımları yapılırken; elektriksel olarak seri bağlama ile sıcaklık farkından yarı iletken yapılar üzerinde üretilen düşük gerilim seviyelerinin yükseltilmesi sağlanmaktadır. Yine aynı prensipten soğutucu olarak çalışan termoelektrik modüllerin girişlerine yüksek gerilim uygulanması sonucu düşük akımlarda çalıştırılması sağlanır.

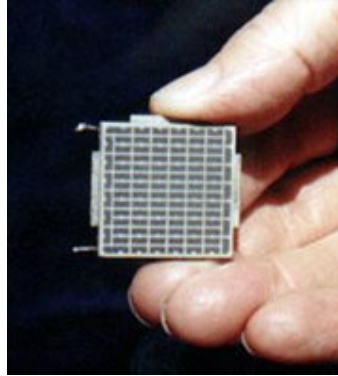
Akım gerilim değerlerinin optimizasyonu yarı iletken malzemelerin karakteristikleri ile yakından ilişkilidir. Şekil 2.3’de termoelektrik modülün bileşenleri gösterilmektedir. Seri bağlı n ve p tipi yarı iletkenler, metal kontaklar, izolasyon malzemesi modülün bileşenlerini oluşturur. İzolasyon olarak genelde ince seramik kullanılır.



Şekil 2.3 : Termoelektrik modül bileşenleri[13].

Termoelektrik modüller daha önce bahsedilen Seebeck ve Peltier temel prensiplerine göre jeneratör veya soğutucu olarak dizayn edilirler. Termoelektrik yapılar teoride tersinir çalışıyor olmalarına karşın pratikte seçilen yarı iletken malzemenin cinsi talep edilen işe göre değişiklik göstermektedir. Bu konuda Peltier elemanını yani bir termoelektrik soğutucuyu jeneratör olarak kullanmak her koşul için istenilen performansı vermese de bu çeşit bir çalışma mümkündür.

Jeneratör olarak dizayn edilen termoelektrik yapıların uzay ve havacılıkta güç üretimi, araçlarda atık ısı geri kazanımları ve daha birçok alanda uygulaması bulunmaktadır. Termoelektrik jeneratörlerin malzemeleri genelde yüksek sıcaklıkta çalışmaları için dizayn edilmiştir. Bu nedenle, literatürde yayınlanan makalelerin büyük bir çoğunluğu 300 K ile 1300 K arasında çalışan jeneratörlerin incelenmesine ayrılmıştır. Kriyojenik ortamı ısı kaynağı olarak kullanan jeneratörlerin karakteristikleri hakkında yapılan çalışmalar ise çok sınırlıdır. Şekil 2.4 de ticari olarak piyasada bulunabilecek olan bir termoelektrik jeneratör modülü gözükmektedir.

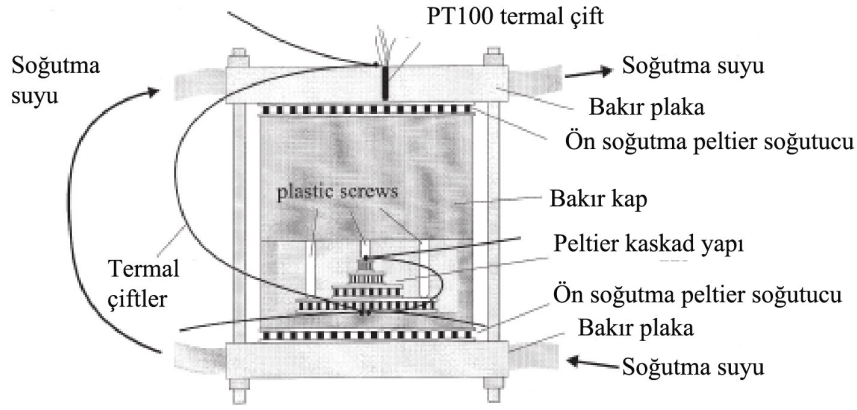


Şekil 2.4 : Hi-Z Termoelektrik Jeneratör[11].

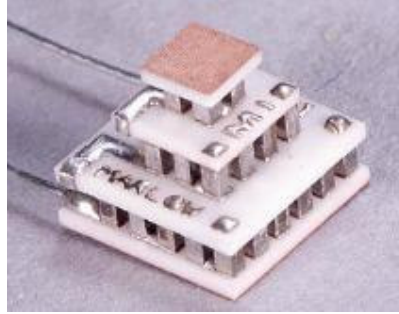
Soğutucu olarak kullanılan termoelektrik modülleri ısı pompası olarak da düşünebiliriz. Termoelektrik soğutucuları mikroçipin soğutulma prosesinde kullanırsak; mikroçipin yüzeyinden termoelektrik soğutucular ile ısı dış ortama pompalanır. Bu modüllerin kaskad bağlı bir şekilde dizayn edilmesi durumunda çok düşük sıcaklıklar elde edilebildiği literatürde verilmiştir.

Peltier elemanı üzerine yürütülen bir çalışmada; beş Peltier elemanı kaskad bağlanarak; sıcak yüzey 286 K’de sabit tutulduğunda soğuk yüzeyin 158 K olması sağlanmış ve toplamda 128 K’lık bir sıcaklık düşüşü yaratılmıştır [9]. Şekil 2.5’de bu

çalışma için kurulan deney düzeneği verilmiştir. Şekil 2.6’da piyasada kaskad bağlı Peltier soğutucu olarak bulabileceğimiz bir termoelektrik soğutucu modülü gözükmemektedir.



Şekil 2.5 : Beş Peltier elemandan oluşan test düzeneği[8].

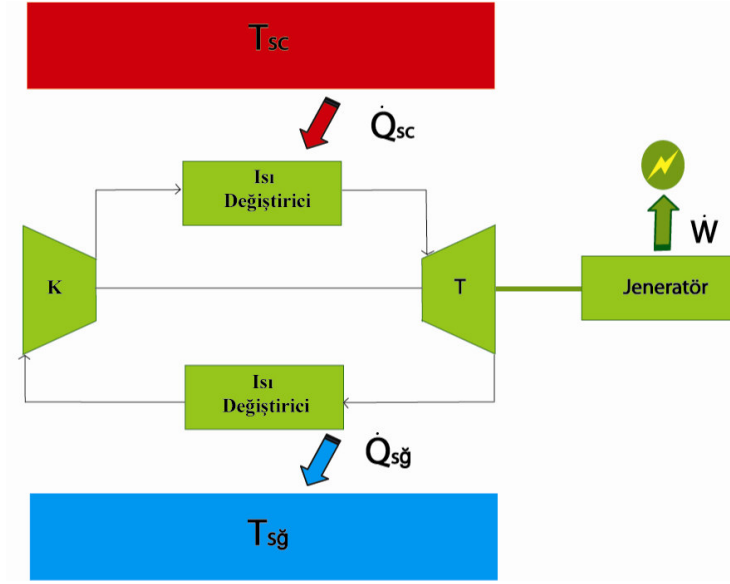


Şekil 2.6 : Ticari bir kaskad bağlı Peltier soğutucu[15].

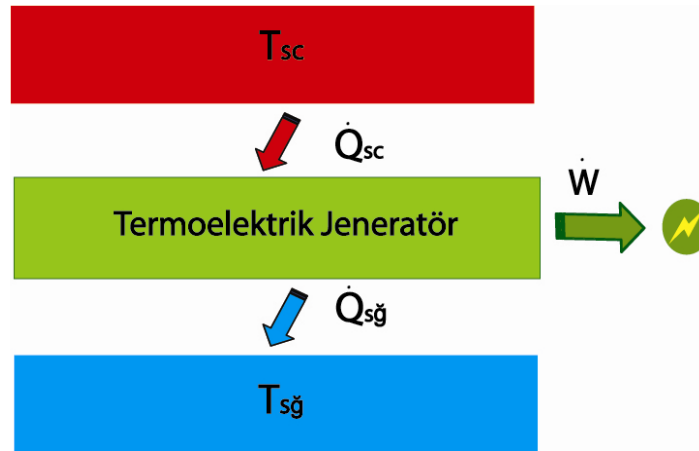
2.2.1 Temel Çalışma Prensipleri

Termoelektrik yapılar, termoelektrik jeneratörler ve soğutucular olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Termoelektrik jeneratörler ve soğutucular termodinamik kanunlarına bağlı olarak doğrudan enerji dönüşümlerini gerçekleştiren yapılardır.

Termoelektrik jeneratörler ısı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren yapılardır. Şekil 2.7’de konvansiyonel bir güç sisteminde elektriğin üretimi ile termoelektrik jeneratörlerden elektriğin üretimi karşılaştırılmaktadır.



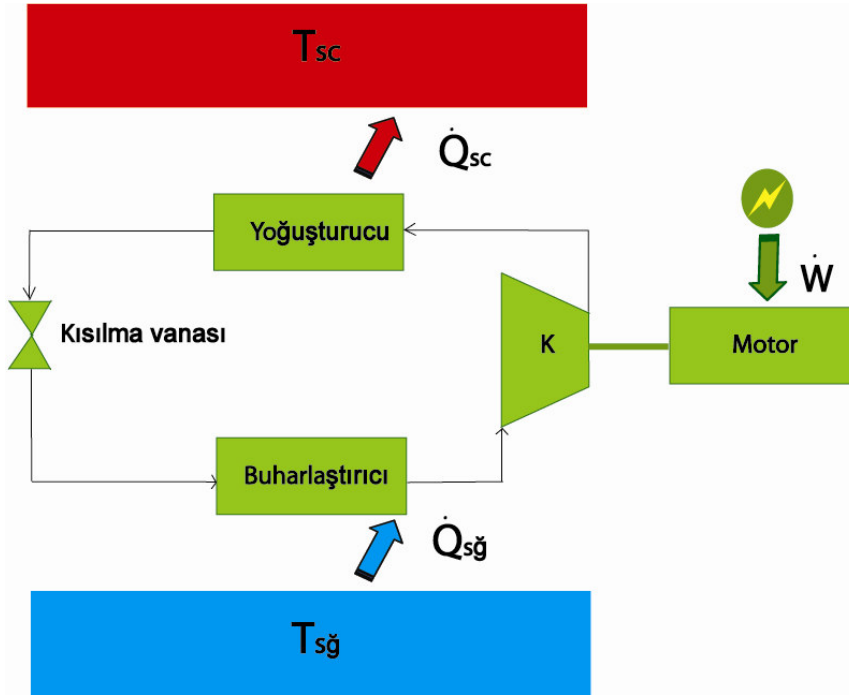
(a)



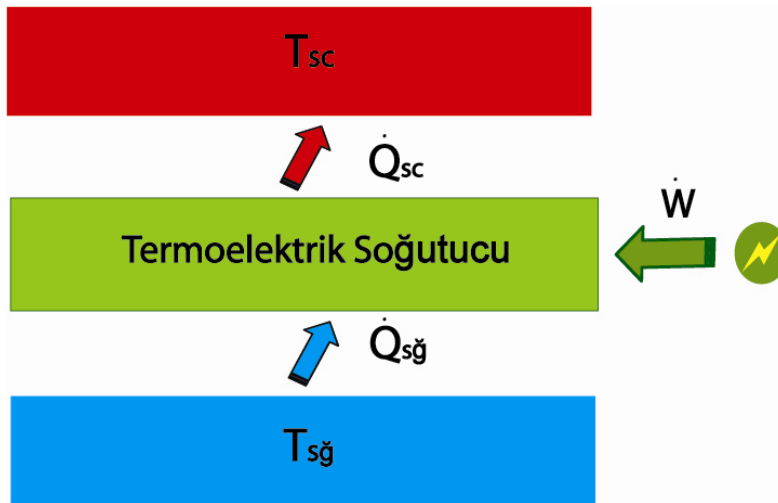
(b)

Şekil 2.7 : (a) Konvansiyonel güç çevrimi (b) Termoelektrik güç çevrimi.

Termoelektrik soğutucular ise ısının soğuk bölgeden sıcak bölgeye elektrik enerjisini kullanarak taşınmasını sağlayan ısı pompalarıdır. Şekil 2.8’de konvansiyonel soğutma çevrimi ile termoelektrik soğutma çevrimi gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2.8: (a) Konvansiyonel soğutma çevrimi (b) Termoelektrik soğutma çevrimi.

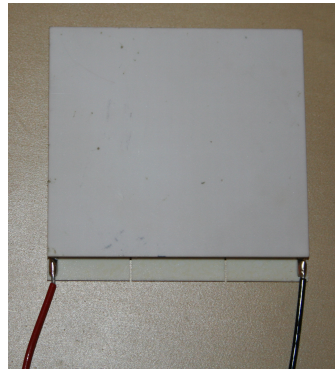
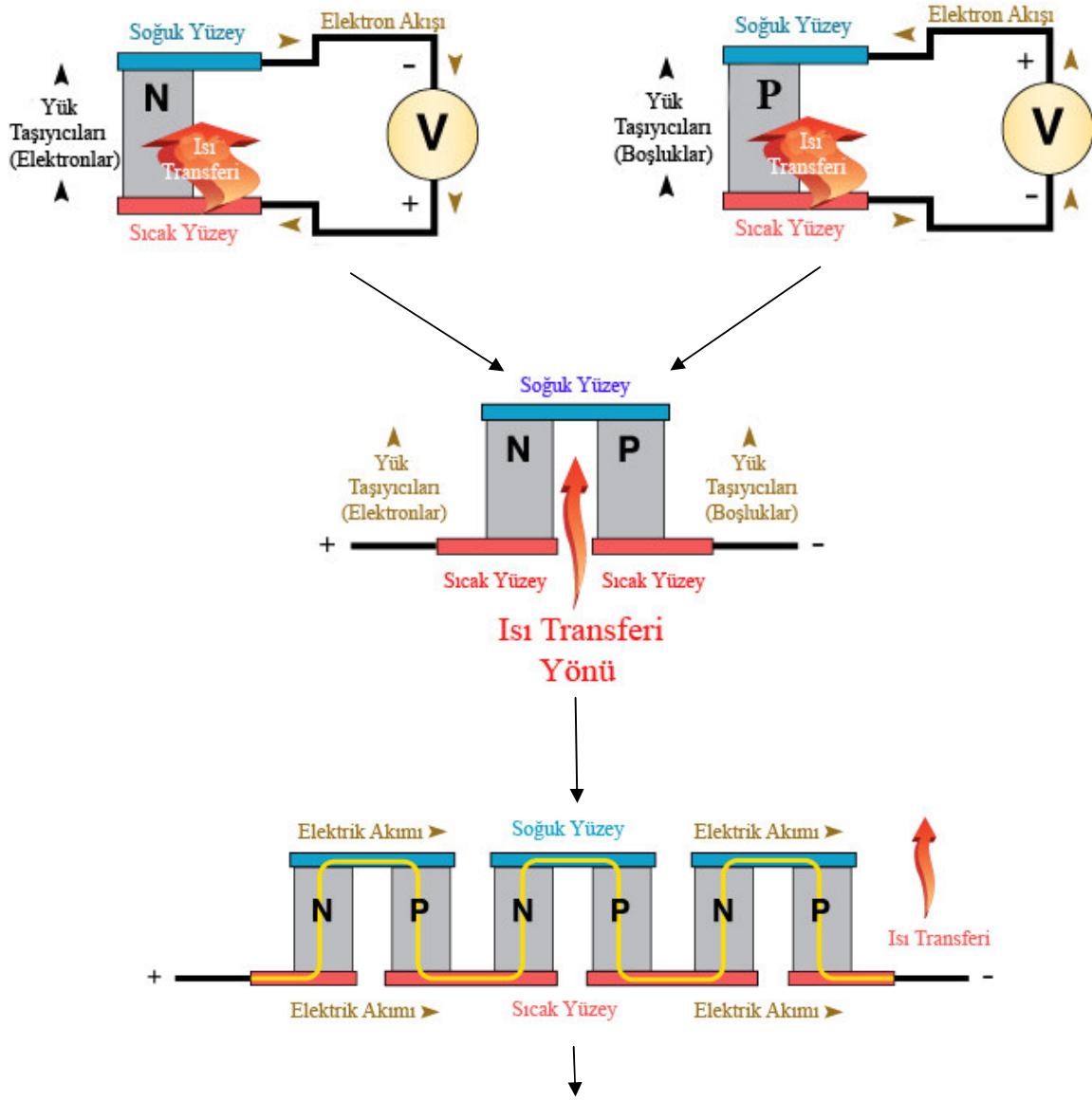
Buna ek olarak termoelektrik soğutucular için soğuk bölgeden sıcak bölgeye ısı transferinin gerçekleşmesi için dışarıdan bir iş uygulaması gerekliliği önemlidir. Bilgisayar mikroçiplerinde ısı pompası olarak görev yapan termoelektrik soğutucular DC gerilim uygulanarak sistemde biriken ısının dışarı pompalanmasında görev alırlar.

Termoelektrik jeneratörlerde ve soğutucularda yarı iletken malzemeler kullanılmakta ve kullanılan n ve p tipi yarı iletkenlerin ısı transferinde gösterdikleri tepkiler değişiklik göstermektedir.

n tipi yarı iletkenlerde ısı serbest olan elektronlar ile taşınırken p tipi yarı iletkenlerde boşluklar ile taşınır. n ve p tipi bu iki yarı iletkenin birbirlerine iletken bir malzeme ile bağlanması ile tek bir hücre oluşturulmuş olur. Bu hücrelerin birleştirilmesi ile termoelektrik modül oluşturulur.

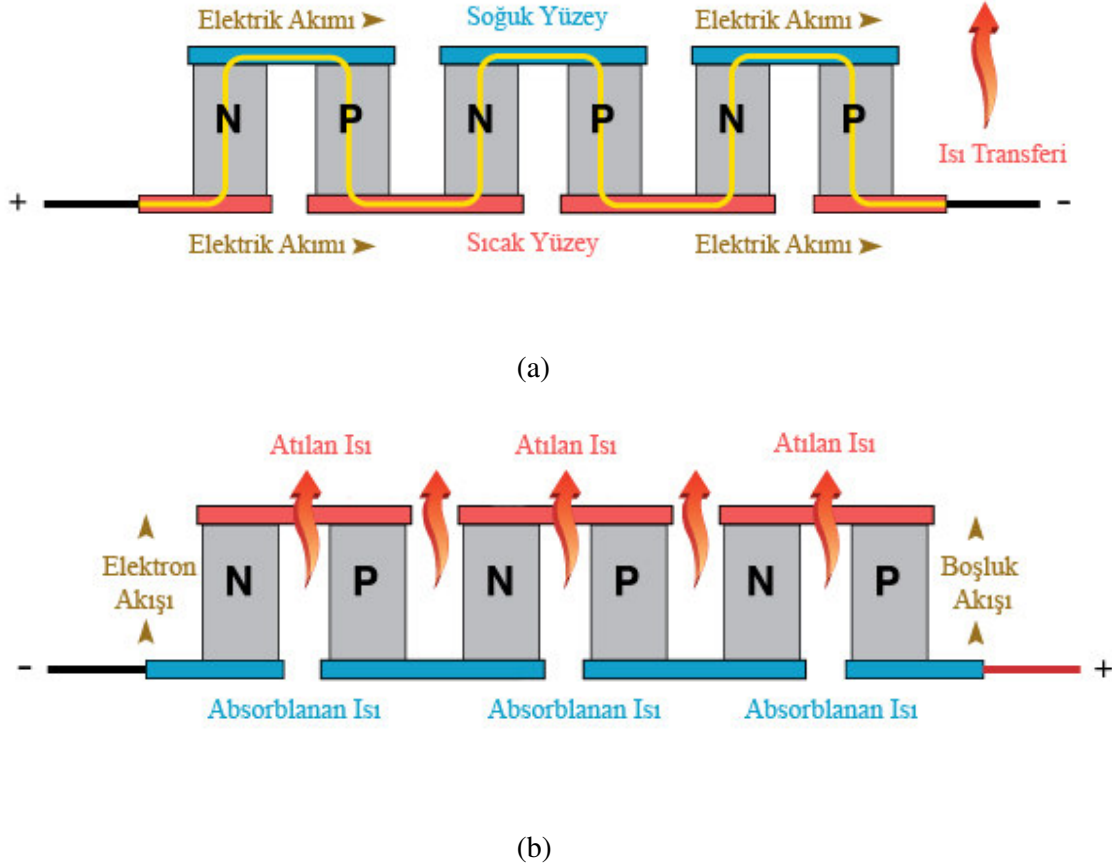
Seebeck termoelektrik etkisine göre çalışan termoelektrik jeneratörlerin yarı iletken malzemelerin gelişimlerine paralel olarak birim üretim maliyetleri, birim alanda ürettikleri güç değerleri, çalışma sıcaklık aralıkları, ekonomik ömürleri ve verimleri şekillenmektedir. Şekil 2.9'da bir termoelektrik modülün bileşenleri gösterilmektedir.

Yarı iletkenler bağlandıktan sonra ısı kaçakları azaltmak ve bağlantılarda elektriksel kısa devreleri önlemek için modüller ısı iletkenliği yüksek fakat elektriksel iletkenliği düşük yapılarla kaplanırlar. Kaplama işleminde en yaygın malzeme seramik olsa bile seramik malzemenin kalınlığı da sistemin verimini etkileyen parametrelerden biridir.



Şekil 2.9 : Bir termoelektrik jeneratör modülünün bileşenleri[11],[14].

Şekil 2.10'un (a) ve (b) figürlerinde termoelektrik modüllerin jeneratör ve soğutucu olarak çalıştırılma prensipleri gösterilmiştir.



Şekil 2.10 : (a) Termoelektrik jeneratör. (b) Termoelektrik soğutucu[14].

Şekil 2.10 (a)'da gösterilen termoelektrik jeneratör, teorik olarak Seebeck termoelektrik etkisine göre çalışan, sıcak ve soğuk yüzeylerde sıcaklık farkından yararlanarak DC gerilim üreten yapılardır. Şekil 2.10 (b)'de gösterilen termoelektrik soğutucu, teorik olarak Peltier termoelektrik etkisine göre çalışan, termoelektrik modülün elektriksel uçlarına DC gerilim uygulayarak iletkenlerin ara yüzeylerinin birinde ısının absorblanması diğerinde ısı atılmasını sağlayan, ısı pompası olarak ta düşünebileceğimiz yapılardır.

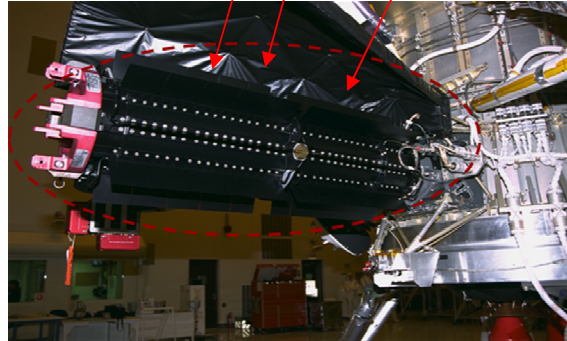
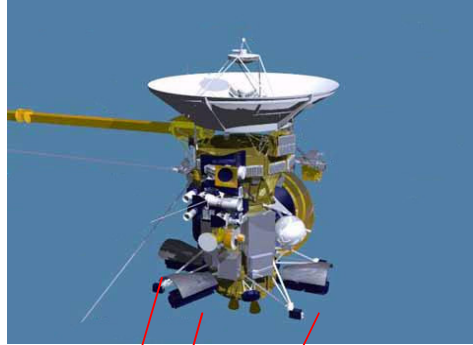
2.2.2 Uygulama Alanları

Termoelektrik yapılar sensör uygulamalarından, uzay havacılık sistemlerine, güç üretiminden, araçlarda ve fabrikalarda atık ısı geri kazanımlarına, karmaşık soğutucu sistemlerden basit buzdolaplarına, bilgisayarlardaki mikroçiplerin soğutulmasından, MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) sistemlerine uzanan uygulamalarıyla günlük kullanıma entegre olmaya başlamışlardır.

Termoelektrik uygulamaları ilk olarak uzay araçlarının enerji ihtiyaçlarının karşılamak için düşünülmüştür. Amerika 1961'den bu yana toplam 45 tane radyoizotop termoelektrik jeneratör ile çalışan sistemi uzaya yollamıştır. RTG üniteleri sıcak ısı kaynağı olarak Plütonyum -238, Küriyum-244 ve Stronsiyum-90 kullanmakta olup soğuk ısı kaynağı uzay boşluğunu kullanmaktadır. Soğuk ortama ısı RTG ünitesinin kanatları üzerinden radyasyonla uzaya verilmektedir. Şekil 2.11 (a)'da sıcak ısı kaynağı olarak kullanılan Plütonyum -238 peleti görülmektedir. Şekil 2.11 (b)'de ise 1997 yılında gönderilen Cassini uzay aracı ve üzerindeki RTG üniteleri görülmektedir.



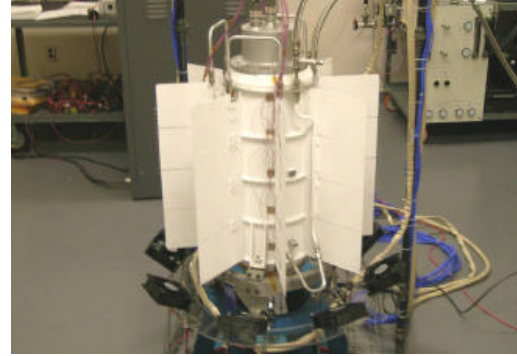
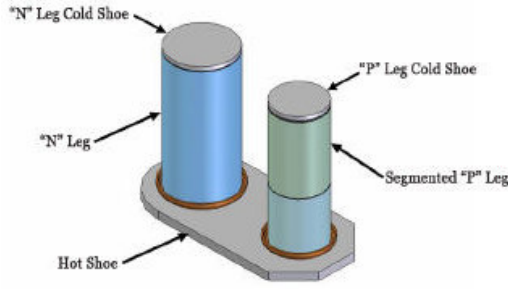
(a)



(b)

Şekil 2.11 : (a) Plutonium-238 peleti (b) Cassini uzay aracı ve üzerindeki RTG üniteleri[19].

Şekil 2.12’de ise MMRTG (Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator) 2009 yılında NASA tarafından Marsa gönderilecek güç üretimi birimi gösterilmektedir. 4.8 kg plütonyum dioksit içermekte ve 2000 W ısı 120 W elektrik enerjisi üretebilecek bir birimdir.

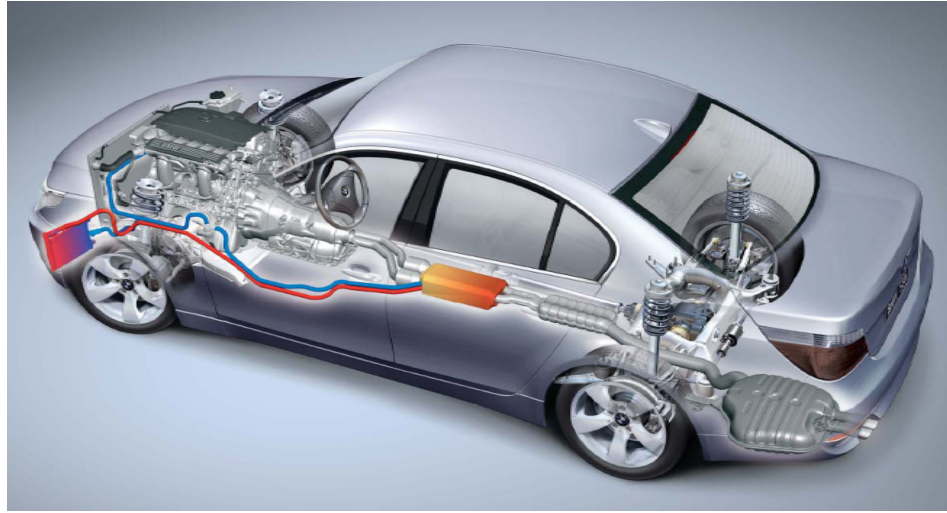


(a)

(b)

Şekil 2.12 : (a) MMRTG Termoelektrik modül (b) MMRTG Birimi[19].

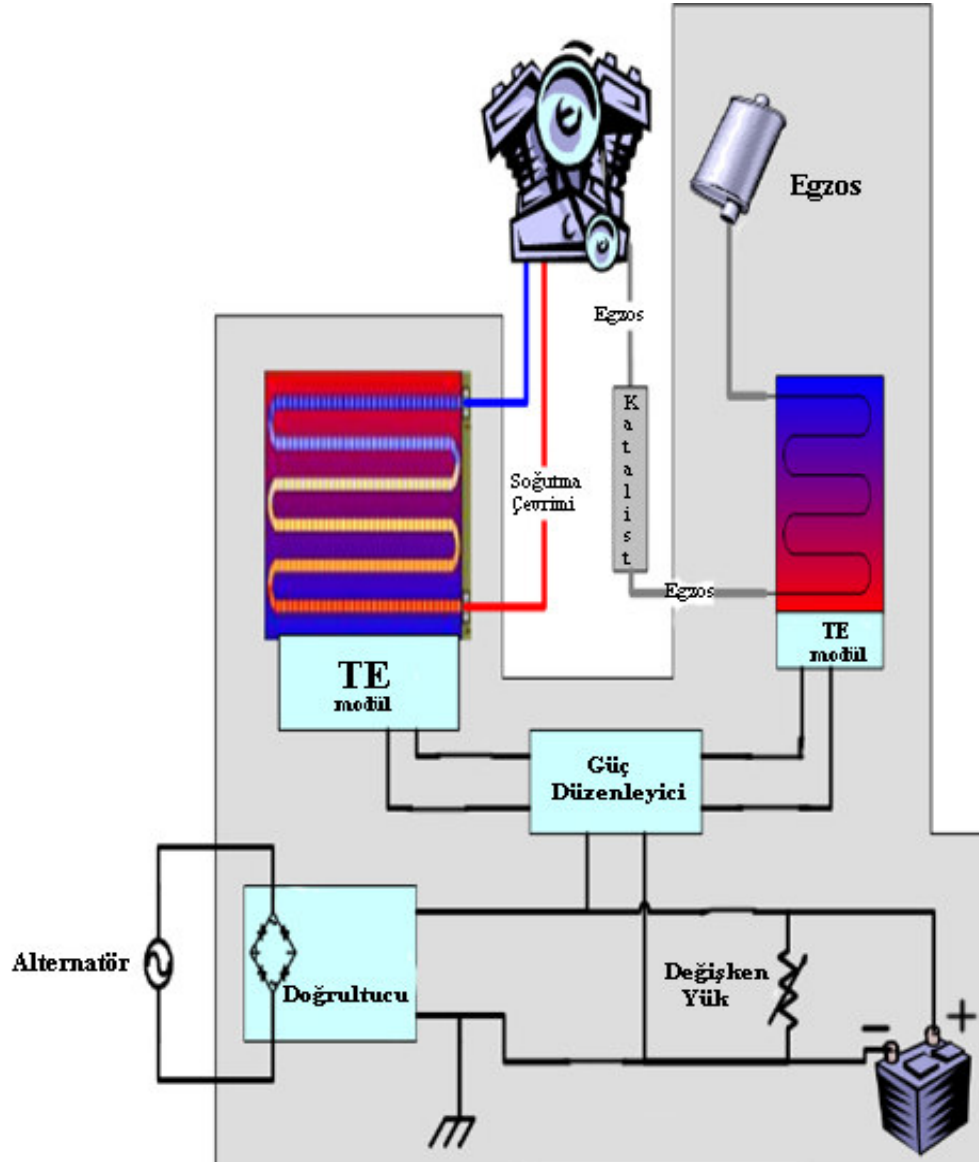
Şekil 2.13’de arabalarda atık ısıyı termoelektrik jeneratörlerle elektriğe çeviren yeni nesil araçlardan biri tanıtılmaktadır.



Şekil 2.13 : 2010’da çıkacak olan BMW 5 serisi araçta termoelektrik yapılarla atık ısı geri kazanımı sağlanacaktır[20].

Teknolojinin ilerlemesi ve tüketicilerden gelen taleplere bağlı olarak araçlarda konfor gün geçtikçe artmaktadır. Artan konfora paralel olarak araçlarda enerji tüketimi de artmaktadır. Soğutma ve ısıtma sistemleri, elektrikli camlar, minibar, yol bilgisayarı, radyo, açılabilir tavan, sensör ve güvenli sürüş elektronik ekipmanları ve

daha birçok birleşen elektrik enerjisine gereksinim duymaktadır. Elektrik enerjisinin depo edilme sorunu ve akü sistemlerinin araç üzerinde yarattığı ekstra yükler yakıt tüketimini arttırmaktadır. Bu nedenle enerjinin araç üzerinde daha hafif elemanlar ile üretimi gereksiz yüklerden kaçınılmasını ve fosil yakıtların daha az kullanılmasını sağlayacaktır. Şekil 2.14'deki gibi kurulacak bir sistem ile termoelektrik yapıların araçların belirli bölgelerinden sağladıkları atık ısıları elektriğe çevirmeleri sağlanıp yakıt tüketiminde azalma sağlanacak, enerjinin sürekliliği sağlanacak ve çevresel boyutta sera gazı salınımları azaltılacaktır.



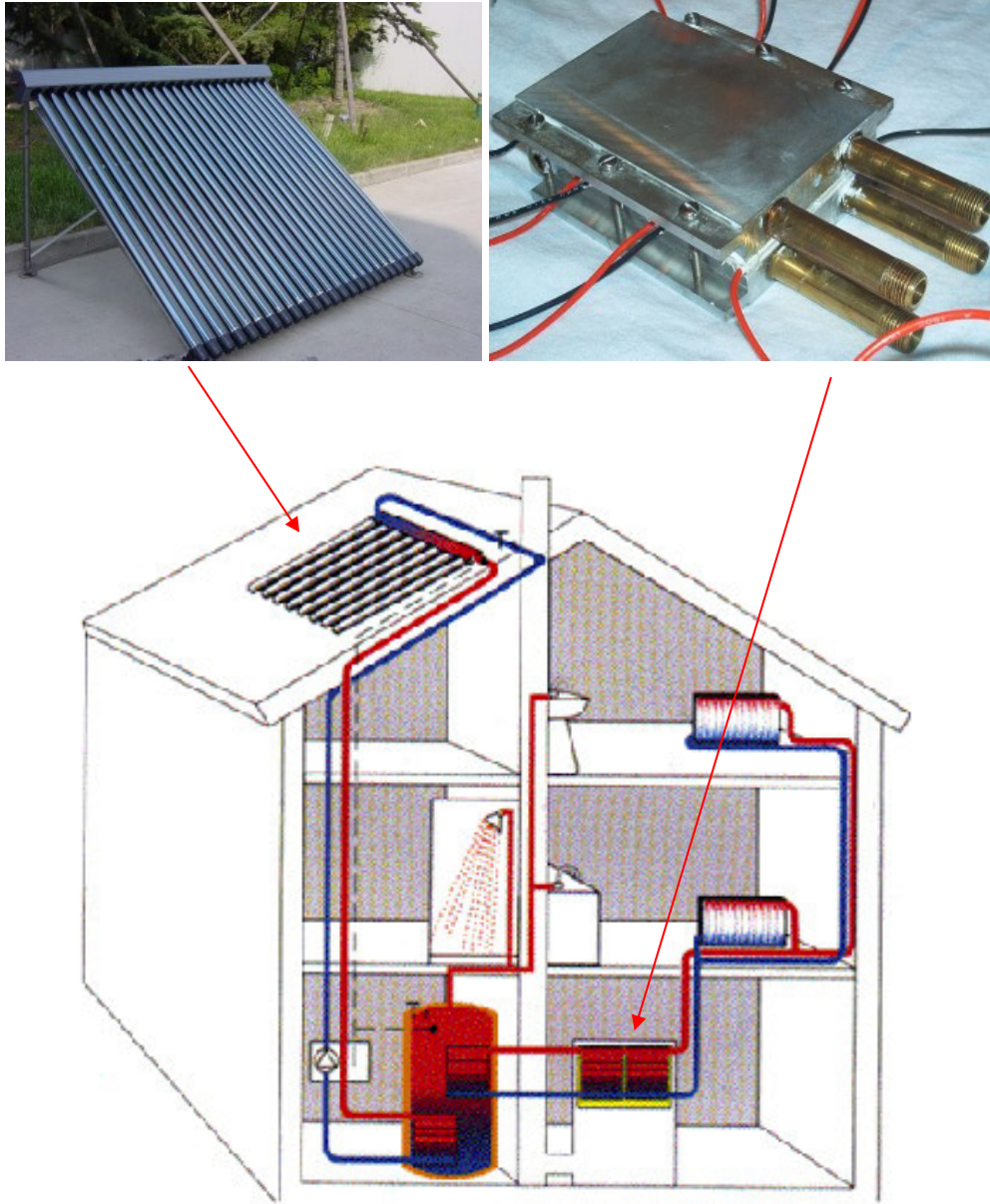
Şekil 2.14 : Araçlarda atık ısının termoelektrik jeneratörlerle elektriğe çevirimi[20].

Şekil 2.15’de İzlanda’da termoelektrik jeneratörlerin evlerde elektrik üretiminde kullanılmasına yönelik uygulamalar gösterilmektedir. Jeotermal kaynaklar yönünden zengin olan İzlandanın sıcak ısı kaynağı olarak jeotermal sıcak su veya kazan dairelerinde ısıtma amaçlı üretilen suyu kullanması ve soğuk ısı kaynağı olarak kış ortam sıcaklığının kullanılması ile elde edilen termal farktan elektrik üretebilen özel termoelektrik modüller geliştirilmiştir. Bu modüller 20 W ila 50W arasında üretilmektedirler.



Şekil 2.15: Termoelektrik jeneratörlerin evsel ve saha uygulamaları[19].

Şekil 2.16’da yine termoelektriğin evsel bir uygulamasına örnek gösterilmiştir. Bu uygulamada evin çatısına yerleştirilen güneş kolektörleri ile ısıtılan su hem duşlarda sıcak su ihtiyacını karşılamakta hem termoelektrik modül üzerinde sıcak ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Soğuk su da termoelektrik modül üzerinde soğuk yüzeyi oluşturmakta ve elektrik elde edilmektedir. Bu sistem için dizayn edilen termoelektrik jeneratörler 50W ile 100W arasında güç üretebilmektedir.



Şekil 2.16: Güneş enerjisi ve termoelektriğin evsel bir uygulaması[19].

Evlerde güneş enerjisi ve termoelektrik jeneratörlerin kullanımı ile sıfır enerjili binaların gelişimi olumlu yönde etkilenecektir.

Bununla birlikte vücudun ürettiği ısıyı kullanarak termoelektrik jeneratörler ile enerji üretmek ve bu enerji ile düşük enerji gereksinimi olan aygıtların çalışması sağlanabilmektedir. Şekil 2.17’de vücudun ürettiği ısıyı kullanarak termoelektrik jeneratörler ile çalışan bir kol saati ile kablosuz veri alışverişini sağlayan iki ayrı sistem görülmektedir.



(a)

(b)

Şekil 2.17: (a) Termoelektrik jeneratör ile çalışan saat.

(b) Termoelektrik jeneratör ile çalışan kablosuz veri transferi sistemi[19].

Genel tüketici olarak kullanımlarda evsel veya araç içi buzdolapları termoelektrik malzemelerle oluşturulabilir. Şekil 2.18’de termoelektrik buzdolapları görülmektedir.



Şekil 2.18 : Evsel uygulamalarda soğutma sistemi[18].

Termoelektrik modüller hafif olması, sessiz çalışmaları ve fiziksel etkilere karşı dayanıklı olması nedeniyle askeri uygulamalarda kullanılmaktadır. Şekil 2.19’de bir denizaltıda sesiz çalışan havalandırma testleri yapılmaktadır.



Şekil 2.19: USS Dolphin AGSS 555 Termoelektrik havalandırma test çalışması[18].

Amerikan ordusu savaş uçaklarındaki radyo iletişim sistemlerindeki aşırı ısınmayı özel dizayn edilmiş termoelektrik soğutucularla önleyebilmektedir. Şekil 2.20’de savaş uçaklarında kullanılan soğutucu gösterilmektedir.



Şekil 2.20: Savaş uçaklarında kullanılan termoelektrik soğutucu[18].

Şekil 2.21’de görüldüğü gibi askerlerin kaldıkları çadırların ısıtmasını konveksiyon yoluyla gerçekleştirmek için çadır içine termoelektrik jeneratörün ürettiği enerji ile çalışan bir fan yerleştirilmiştir. Bu fanın enerjisi ise çadırı ısıtmakta kullanılan ısıtıcı ünitenin atık ısıyı kullanılarak üretilmektedir.



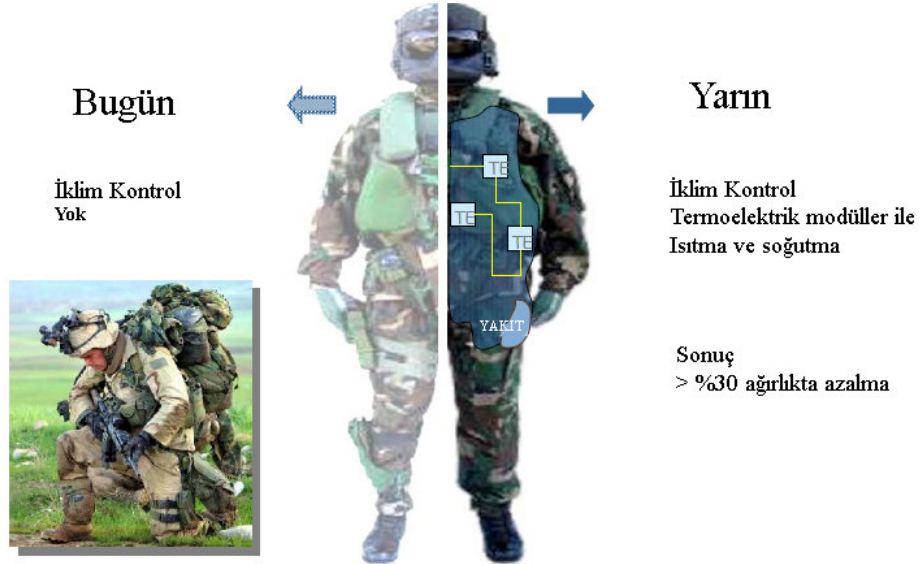
(a)



(b)

Şekil 2.21: (a) Termoelektrikli fan sistemi (b) Isıtıcı ünite[19].

Şekil 2.22’de askeri giysilerde iklim şartlarına göre vücut ısının korunması için ısıtma veya soğutma gereksinimleri termoelektrik modüllerde sağlanmaktadır.

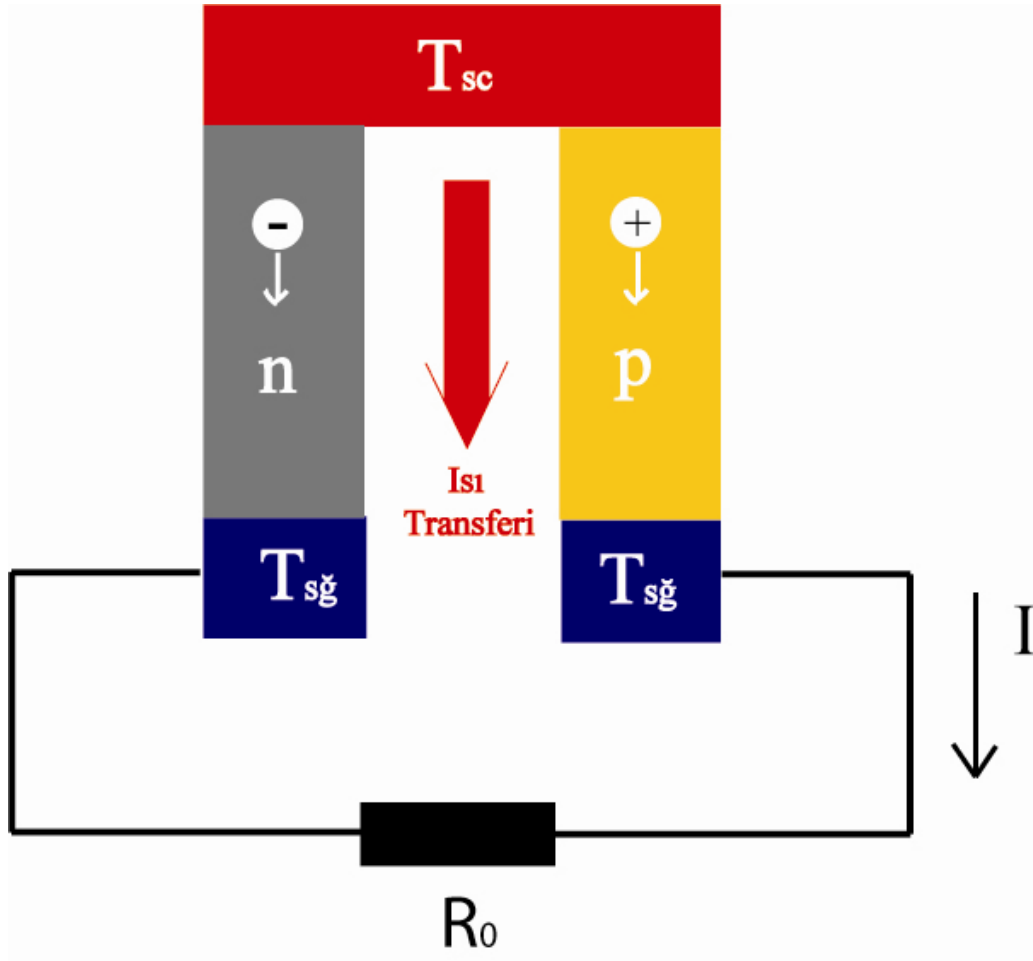


Şekil 2.22 : İklim koşullarına göre termal konfor sağlayan askeri giysiler[19].

Termoelektrik malzemelerin verimlerinin artması ile gelecek yıllarda her alanda kullanımlarının artacağı görülmektedir.

2.2.3 Basitleştirilmiş Matematiksel Modeller

Termoelektrik modüllerin analizleri yapılırken voltaj, akım, güç, birim alandan elde edilen maksimum güç ve verim ifadeleri bu başlık altında incelenecektir. Bir termoelektrik modül birçok termoelektrik peletin birleşiminden oluştuğundan tek peletin analizi modülün genel durumu hakkında gerekli bilgilere ulaşmamızı sağlayacaktır. Şekil 2.23’de tek bir termoelektrik hücre görülmektedir ve verilecek olan matematiksel ifadeler bu şekil üzerinden tanımlanacaktır. Bu bölümde türetilen ve verilen denklemler; malzemenin izotropik ve homojen olduğu, ısı ve elektrik transferinin 1 boyutlu olduğu, Seebeck katsayısının sıcaklık bağımlılığından kaynaklanan farklılıkların ve Thomson etkisinin ihmal edildiği ve yanal alanlardan ısı geçişinin ihmal edildiği varsayımlarına dayanmaktadır.



Şekil 2.23: Termoelektrik jeneratör hücresi.

Şekil 2.23’de görüldüğü gibi ısı transferi n ve p yarı iletken bacakları üzerinden T_{sc} bölgesinden $T_{sğ}$ bölgesine doğrudur.

Sisteme verilen ısı (sıcak taraf) denklem 2.7 deki gibi elde edilir.

$$\dot{Q}_{sc} = K\Delta T + \alpha T_{sc} I - 0.5I^2 R_i \quad (2.7)$$

Termoelektrik modüle sıcak taraftan verilen ısının hesaplanması için Kelvin ilişkisi, Joule ifadesi ve Fourier ısı transferi ifadeleri göz önüne alınmalıdır. Sıcak yüzeydeki ısı ifadesi denklemindeki birinci ifade, Fourier ısı iletimidir ve ifade 2.8 deki gibi tanımlanır;

$$\dot{Q}_F = K\Delta T \quad (2.8)$$

K burada ısıl iletkenliği tanımlamaktadır ve p ve n tipi malzemeler için ifade 2.9 daki gibi tanımlanır;

$$K = \lambda_n \frac{A_n}{L_n} + \lambda_p \frac{A_p}{L_p} \quad (2.9)$$

Denklemindeki ikinci kısım, ifade 2.5’de verilen Kelvin ilişkisinden türetilmiştir ve buradan Peltier genel ifadesinden ısıya geçilerek ifade 2.10 türetilmiştir;

$$\dot{Q}_P = \pi I = \alpha T I \quad (2.10)$$

Buradan sıcak yüzey Peltier ifadesi 2.11 aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$\left(\dot{Q}_P\right)_{sc} = \alpha T_{sc} I \quad (2.11)$$

Denklemindeki üçüncü ifade, dirençlerden kaynaklanan Joule ısı kayıplarını tanımlamaktadır;

$$\dot{Q}_J = I^2 R_i \quad (2.12)$$

Isının yarısı soğuk bölgeye ve diğer yarısı sıcak bölgeye gittiğinden Joule kayıpları ifade 2.13 ve 2.14’de verildiği şekilde tanımlanır.

$$\left(\dot{Q}_J\right)_{sc} = -\frac{1}{2} I^2 R_i \quad (2.13)$$

$$\left(\dot{Q}_J\right)_{sğ} = \frac{1}{2} I^2 R_i \quad (2.14)$$

Denklemin toplu bir şekilde ifadesi 2.15 deki gibi tanımlanabiliriz;

$$\dot{Q}_{sc} = \dot{Q}_F + (\dot{Q}_P)_{sc} + (\dot{Q}_J)_{sc} \quad (2.15)$$

Şekil 2.8 için Ohm kanunu yazılırsa R_o yük direnci üzerindeki çıkış voltajı

$$V = V_0 - IR_i \quad (2.16)$$

olarak yazılır. Burada dış direncin olmaması durumunda sistemin voltajı açık devre voltajı olan V_0 'a eşit olur. Buradan elektriksel çıkış gücü, P_o

$$P_o = I^2 R_o \quad (2.17)$$

olarak yazılır. Şekil 2.23'de gösterilen termoelektrik hücrede elektriksel direnç olarak hem yarı iletken malzeme hem de yük direncinin hesaba katılması ile toplam direnç

$$R_t = R_i + R_o \quad (2.18)$$

olarak yazılır. Termoelektrik malzemenin iç direnci, R_i

$$R_i = \frac{\rho_n L_n}{A_n} + \frac{\rho_p L_p}{A_p} \quad (2.19)$$

olarak yazılır. Seebeck etkisi ile endüklenen gerilim 2.1 ifadesinde verildiği gibi tanımlanır.

Devrede dolaşan akım, I

$$I = \frac{V_0}{R_t} = \frac{V_0}{R_i + R_o} \quad (2.20)$$

olarak yazılır.

Sistemde verim ifadesini bulmak için daha önce elektriksel çıkış gücü olarak tanımlanan P_o ve \dot{Q}_{sc} sıcak bölgedeki ısı girdisi kullanılır. Yukarıda tanımladığımız değerleri aşağıdaki termal verim ifadesinde yerine koyarak ifade 2.21'de verilen verim ifadesi bulunur.

$$\eta_t = \frac{P_o}{\dot{Q}_{sc}} = \frac{I^2 R_o}{K\Delta T + \alpha T_{sc} I - \frac{1}{2} I^2 R_i} \quad (2.21)$$

Büyüklikleri kolay ifade etmek için dış direnci iç dirence bölerek dirençte boyutsuzlaştırmaya gidilirse ifade 2.22 elde edilir.

$$m' = \frac{R_0}{R_i} \quad (2.22)$$

Buradan tekrar verim ifadesini verirsek ifade 2.23 elde edilir.

$$\eta_t = \frac{m' (\Delta T / T_{sc})}{\frac{(1+m')^2}{T_{sc}} \times \frac{RK}{\alpha^2} + (1+m') - \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T_{sc}}} \quad (2.23)$$

İfade 2.15 de görüldüğü gibi RK çarpımı ne kadar küçük olursa verim ifadesi o oranda artacaktır. RK çarpımının açılımı daha önce verilen ifade 2.9 ve ifade 2.19 den yararlanarak yazılırsa ifade 2.24 elde edilir.

$$R_i K = \left(\frac{\rho_n L_n}{A_n} + \frac{\rho_p L_p}{A_p} \right) \times \left(\lambda_n \frac{A_n}{L_n} + \lambda_p \frac{A_p}{L_p} \right) \quad (2.24)$$

Çarpımın minimum olduğu değer, türevinin sıfır olduğu durum olduğundan ifade 2.25 elde edilir.

$$(R_i K)_{\min} = \left[(\rho_n \lambda_n)^{\frac{1}{2}} + (\rho_p \lambda_p)^{\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (2.25)$$

Termoelektrik malzemenin özelliğini bize veren en önemli ifade olan *figure of merit* terimi daha sonra detaylı olarak incelemek olmasına rağmen bu aşamada maksimum değerinin verilmesi uygundur.

$$Z = \frac{\alpha}{R_i K}$$

Z terimi *figure of merit*'i tanımlamakta olup buradan $(R_i K)_{\min}$ değeri için maksimum değerini alır.

$$Z_{\max} = \frac{(|\alpha_n| + |\alpha_p|)}{\left[(\rho_n k_n)^{\frac{1}{2}} + (\rho_p k_p)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad (2.26)$$

İfade 2.26'yı termal verim ifadesinde yerine koyarsak ifade 2.27 elde edilir.

$$\eta_t = \frac{m' (\Delta T / T_{sc})}{\frac{(1+m')^2}{Z_{mak} T_{sc}} + (1+m') - \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T_{sc}}} \quad (2.27)$$

İfade 2.27 nin m' 'e göre türevin sıfır olduğu değer, termal verimin maksimum olduğu noktayı verir. $\bar{T} = \frac{1}{2}(T_{sc} + T_{s\ddot{g}})$ olması durumunda;

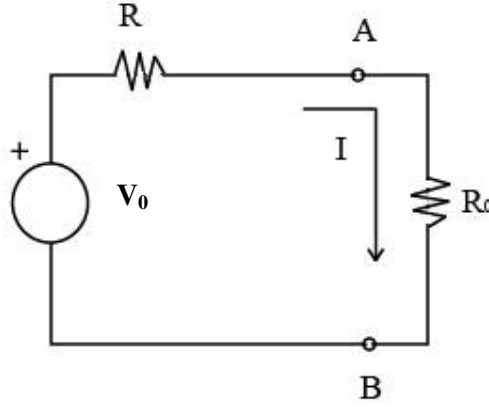
$$m'_{opt} = (1 + Z_{mak} \bar{T})^{1/2} \quad (2.28)$$

Sonuç olarak termal verimin maksimum olduğu değer hem yük direncinin hem de geometrinin optimize edildiği durum için ifade 2.29 elde edilir.

$$\eta_{t(mak)} = \left(1 - \frac{T_{s\ddot{g}}}{T_{sc}}\right) \frac{(m'_{opt} - 1)}{m'_{opt} + T_{sc}/T_{s\ddot{g}}} \quad (2.29)$$

2.2.3.1 Kısa Devre Akımı ve Maksimum Güç İfadesi

Şekil 2.24'deki devreyi göz önüne alarak A ve B uçları arasında bağlanan yük üstüne düşen voltajı, kısa devre akımını ve son olarak bağlanan yükün maksimum gücü çekebilmesi için bağlanması gereken direncin kaç ohm olması gerektiğinin incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 2.24: Aktif bir devrenin Thévenin eşdeğeri.

V_0 gerilim kaynağının iç direnci R_i olarak düşünülürse, A ve B uçları arasında bağlanmış yükte oluşan gerilim düşümü ifade 2.16'dan hesaplanır. Devrede $R \neq 0$ ve $V = 0$ olması halinde kısa devre akımı ifade 2.30'daki gibi tanımlanır.

$$I_{kd} = \frac{V_0}{R_i} \quad (2.30)$$

Devreye bağlanan yükün güç ifadesi 2.31'deki gibidir,

$$P_{yük} = V_0 I - I^2 R_i \quad (2.31)$$

2.32 ifadesi ile gücün maksimum olduğu akım değeri bulunur,

$$\frac{\partial P_{yük}}{\partial I} = 0 \quad (2.32)$$

$$V_0 - 2IR_i = 0 \quad (2.33)$$

$$I' = \frac{V_0}{2R_i} = \frac{I_{kd}}{2} = \frac{V_0}{R_i + R_0} \quad (2.34)$$

İfade 2.34'de gücün maksimum olduğu noktada akımın aldığı değeri vermektedir. İfade 2.35'de ise $R_0 = R_i$ durumu için maksimum gücün çekilebileceği durumu vermektedir.

$$P_{mak} = \frac{V_0^2}{4R_i} \quad (2.35)$$

Yani aktif bir devre için sisteme bağlanacak direnç değeri devrenin iç direncine eşit olduğunda maksimum güç çekilebilmektedir. Yukarıda verilen ifadeler termoelektrik modüllerin temel matematiksel ifadeleri olup, teorik ve deneysel karakterizasyon çalışmalarında kullanılacaktır.

2.3 Termoelektrik Modülde Kullanılan Malzemeler ve Klasik İlkeler

Daha önceki bölümlerde değinildiği gibi termoelektrik modüller yarı iletken malzemelerden yararlanılarak yapılmaktadır. Bu malzemelerin gelişimine paralel olarak birim alandan elde edilen güç ve verim değerleri artış göstermektedir. Yarı iletken fiziğini bilmek termoelektrik yapıların karakterizasyonu için temel teşkil etmektedir. Termoelektrik modüllerin özelliklerinin tam olarak kavranması sonucunda istenilen ölçekte jeneratör veya soğutucu dizaynı kolaylıkla yapılabilir. Örnek bir termoelektrik modülün bileşenleri Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Elektriksel ve termal iletim başta olmak üzere iletkenlik ve iletim kavramlarını bilmek sistemin çalışma prensiplerini anlamada bizlere büyük kolaylık sağlar.

2.3.1 Malzeme Bilgisi ve Yapısal Temeller

Elektriksel ve termal iletkenlik konusunda malzemelerin gösterdiği tepkiler farklılıklar göstermektedir. Bu malzemelerin en küçük yapı birimi olan atomlarından ve onların uzayda dizilişleri ile oluşturdukları geometrilerin incelenmesi, iletkenler ve yarı iletkenler için yapacağımız teorik çalışmaların başlangıç noktası olmalıdır.

Katıların modern teorisi, enerji bant teorisi ve katıların uzaydaki enerji bant dizilişlerine göre yorumlamaları yapılır. Bu nedenle temel atom ve kuantum mekaniği ileriki başlıklarda tez konusunun içeriği doğrultusunda incelenecektir.

2.3.2 Elektriksel ve Termal İletkenlik

Elektriksel ve termal iletkenlik özellikleri iletkenler ve yarı iletkenlerde farklılıklar göstermektedir. İletkenliğin nasıl değiştiği, klasik teori ve modern katılar teorisi olmak üzere iki yaklaşım altında incelenecektir.

2.3.2.1 Metallerde Elektriksel İletkenlik

Örnek olarak bakır metalini ele alınacak olursak tek bir valans elektronuna sahip olup, en dış yörüngede bulunan bu elektron bakır atomuna çok zayıf bağlanmıştır. Valans elektronları pozitif CU^+ iyonları etrafında bir elektron bulutu oluşturacak şekilde yapı içerisinde serbest halde dolaşırlar. Elektrik akımı bu elektron bulutu içerisinde bulunan elektronlar tarafından iletilir. Oda koşulları ile termal dengede olan bir bakır çubuk düşünüldüğünde elektronlar metal içerisinde rasgele hareket ederler, net bir yönelim söz konusu değildir. Rasgele yönelmiş elektronlar yapı

içinde sahip oldukları hızları ve yönleri dışında merkez atomların termal etkiden dolayı yaptıkları titreşimlerden, kristal yapı içindeki bozukluklardan ve yapıdaki safsızlıklardan etkilenirler ve çarpışmalar sonucunda yönlerinde ve enerjilerinde değişimler yaşanır. Bakır çubukta termal etkiyi arttırdığımızda elektronların hızları ve merkez atomların titreşim yarıçapları artsa da yine elektriksel yönden net bir yönelim yoktur.

Elektronların yönelmesi bakır çubuğun uçları arasında potansiyel fark yaratacak bir gerilim kaynağının bağlanması ile sağlanabilir. Gerilim kaynağının polaritesine göre elektronlar sağa veya sola doğru yönlendirilir.

Elektrik akım yoğunluğu ise J olarak gösterilip belirli bir sürede belirli bir yüzeyden geçen net elektriksel yük olarak tanımlanır.

$$J = \frac{\Delta q}{A\Delta t} \quad (2.36)$$

Elektrik alanın uygulanması ile elektronlar x yönünde ve belirli bir zaman aralığı için $\bar{v}_{dx}(t)$ ortalama hızı ile iletken içinde hareket ederler. Elektronların ortalama hızının iletken içindeki toplam elektron sayısına bölümü ise sürüklenme hızı olarak tarif edilir.

$$\bar{v}_{dx} = \frac{1}{N} [v_{x1} + v_{x2} + v_{x3} + \dots + v_{xN}] \quad (2.37)$$

Birim hacimdeki elektron sayısı;

$$n = \frac{N}{V} \quad (2.38)$$

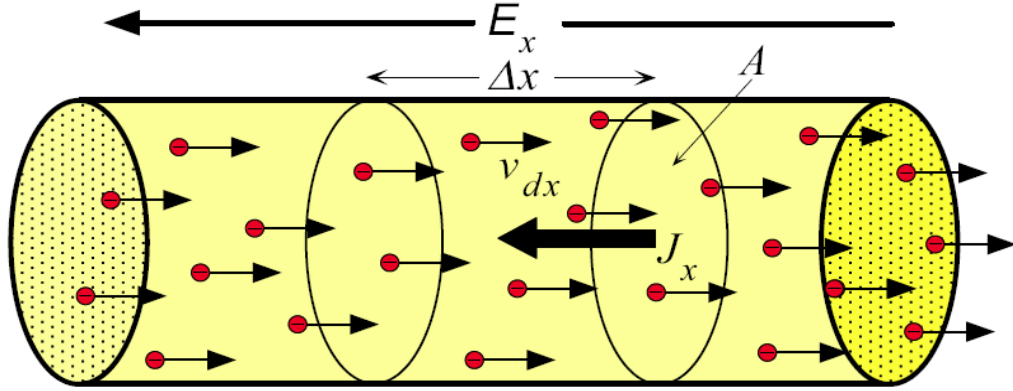
Δt sürede A kesitinden geçen yük için 2.36 ifadesi tekrar tanımlanırsa;

$$J_x = \frac{\Delta q}{A\Delta t} = \frac{enAv_{dx}\Delta t}{A\Delta t} = env_{dx} \quad (2.39)$$

İletkenin uçları arasına uygulanan gerilimin zaman içinde değişmesi olasılığı düşünüldüğünde $E_x = E_x(t)$ zamanın fonksiyonu olarak tanımlanırsa akım yoğunluğu ifadesi 2.40 şeklinde tanımlanır.

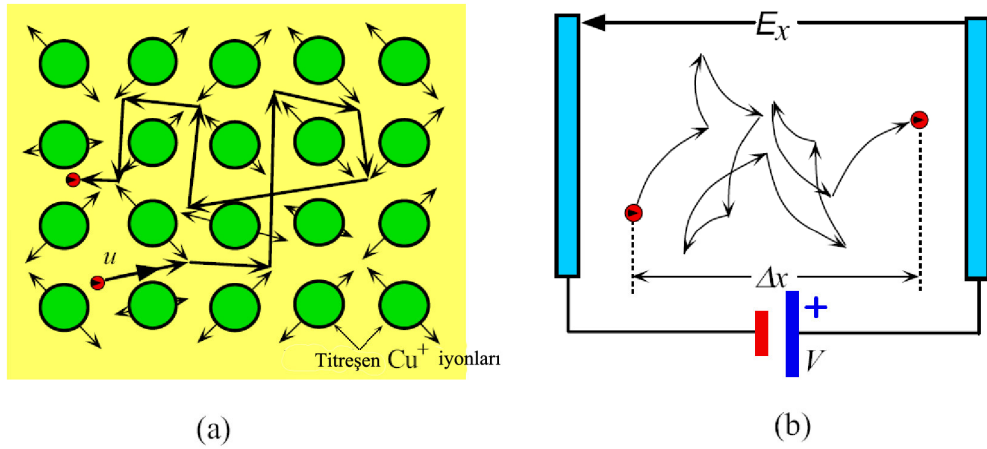
$$J_x(t) = env_{dx}(t) \quad (2.40)$$

Şekil 2.25'de E_x elektriksel potansiyeli altında elektronların iletken malzeme içerisinde nasıl ilerlediği ve Δx kesit alanında J_x elektron akısı detaylı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 2.25 : E_x elektrik alan içerisinde belirli bir yönde yönlendirilmiş elektronlar[5].

Şekil 2.26 (a) da elektronların iletken malzeme içerisinde rastgele yaptıkları salınımlar görülmektedir. Şekil 2.26 (b) de ise E_x elektrik alanı bu salınımlara yön vermekte ve anlamlı bir yönelim sağlanmaktadır.



Şekil 2.26 : (a) Elektron bulutunu oluşturan elektronlardan birinin termal etki sonucu titreşen merkez atomları çevresinde yaptığı rasgele hareketler.

(b) Elektron bulutu içerisindeki bir elektronun E_x elektriksel alan etkisiyle yaptığı yönlendirilmiş hareketler[5].

İletken malzeme içerisindeki elektron E_x elektriksel alanı içerisinde çarpışmalar ve yön değiştirmeler sonucu pozitif yönde rasgele hareketlerle net olarak belli bir

mesafe kat edecektir. Bu yönlenmeyi olumsuz etkileyen faktörler olarak termal yönden uyarılan merkez atomların çok büyük salınımlar yapması, iletkendeki saflığı bozan yabancı maddeler ve kristal yapı bozuklukları olarak sıralayabiliriz. X yönünde E_x alanı uygulandığında elektronların sürüklenme hızı ifade 2.41 gibi gösterilir.

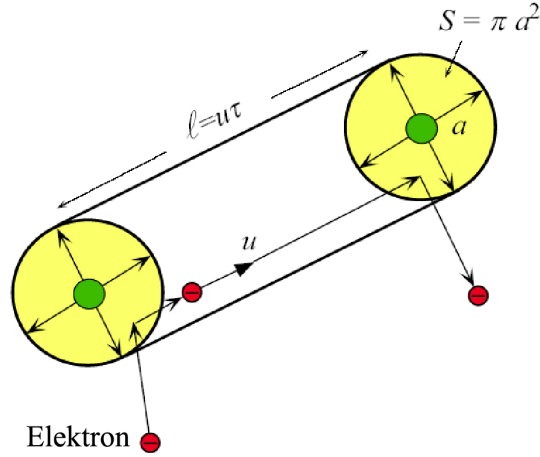
$$v_x = u_{xi} + \frac{eE_x}{m_e}(t - t_i) \quad (2.41)$$

Burada u_{xi} çarpışmadan sonra başlangıç hızı, t_i son çarpışmanın gerçekleştiği zaman olarak düşünülürse $(t - t_i)$ çarpışma olmadan geçen zamandır.

Sürüklenme mobilitesi ise elektrik alan uygulandığında bir elektronun çarpışma olmadan nasıl hızlandığının ifadesidir ve μ_e olarak ifade edilir.

$$\mu_e = \frac{e\tau}{m_e} \quad (2.42)$$

Bir elektronun iletken içindeki hareketini daha küçük ölçekte Şekil 2.27 deki gibi düşünecek olursak;



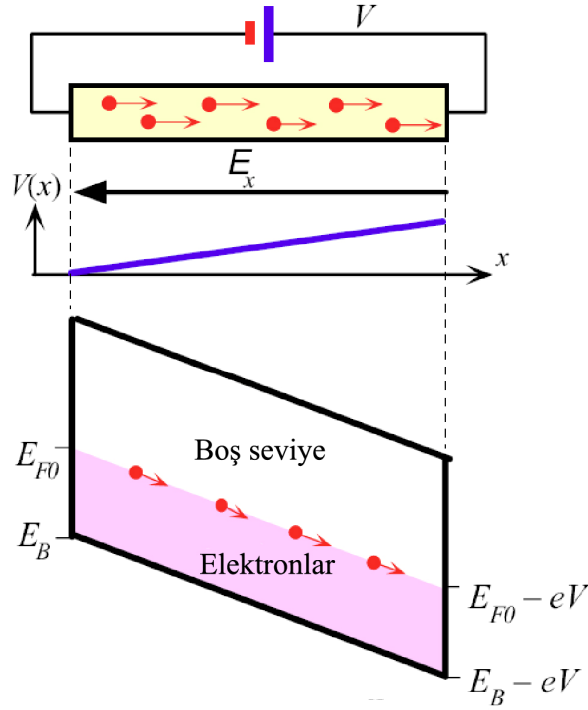
Şekil 2.27 : S titreşme alanına sahip iki atom arasında elektronun keyfi hareketi[5].

L mesafesi termal elektronun iki atom arasında alabileceği ortalama serbest yol, u hızı ve τ süre olarak tanımlanır. Elektronun iletken içerisinde alacağı mesafenin uzunluğu iletkenliğin bir ölçütüdür. İletkenlik ifadesi ise sürüklenme mobilitesi ve sistemde bulunan serbest elektron sayısı ile doğru orantılı olan bir fonksiyondur ve σ ile simgelenmiştir.

$$\sigma = en\mu_{sk} \quad (2.43)$$

Sonuç olarak bir iletken ne kadar çok serbest elektrona sahip olursa birim zamanda taşıyabileceği yük miktarı o derece fazla olur. Elektronlar iletken içerisinde ne kadar az çarpışma yaparsa enerjinin iletimi o derece kayıpsız olur. Bunun için malzeme seçimlerinde Joule kayıplarını azaltmak için saf metaller ve kristal yapısı bozulmamış metaller kullanılmaya çalışılmaktadır.

Metallerdeki iletkenliği enerji bant teorisi ile açıklamaya çalışırsak: Şekil 2.28 uçları arasında gerilim uygulanmış bir iletkenin elektronların hareketini göstermektedir.



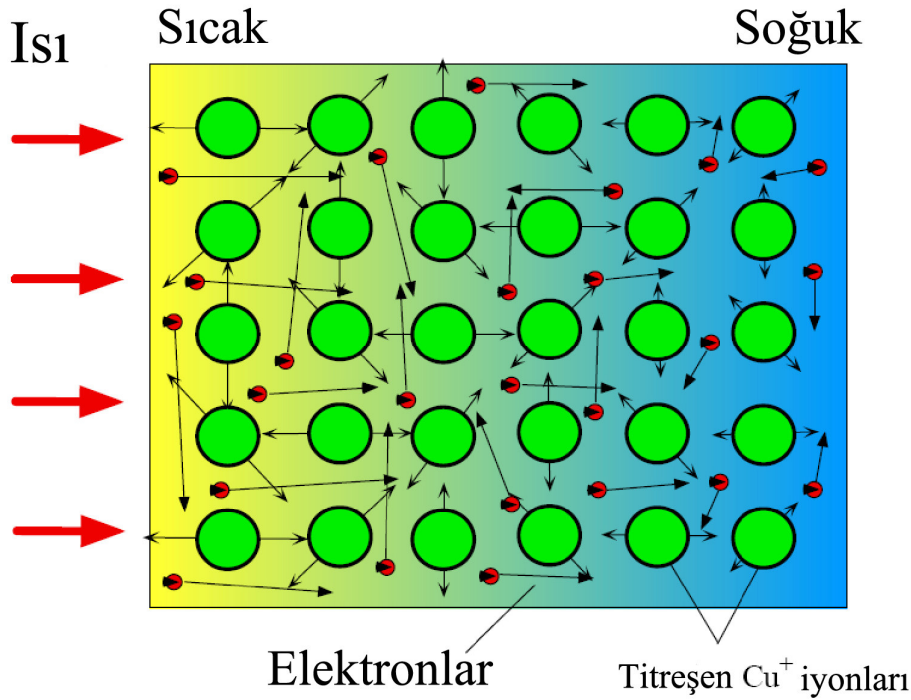
Şekil 2.28: Enerji bant diyagramı[5].

Uçlar arasında potansiyel fark uygulanmasıyla pozitif uç tarafında $-eV$ ’luk bir azalma gerçekleşir ve enerji bandı kayar.

2.3.2.2 Metallerde Termal İletkenlik

Metal içinde ısının iletimi yine serbest elektronlar sayesinde gerçekleşir. Metal bir ucundan ısıtılmaya başlandığında serbest elektronlar ve merkez atomlar artan salınımlar ile titreşmeye başlarlar. Şekil 2.29’da gösterildiği gibi S çaplarını

genişleten merkez atom serbest halde dolaşan elektrona çarpar ve enerjisinin bir kısmını elektrona nakleder ve hızlanan elektron soğuk bölgede daha küçük S çapına sahip atomlara çarparlar. Sıcak bölgeden hızla gelen serbest elektron soğuk bölgedeki merkez atomlara çarparak onların da S çaplarını büyütmesi ve daha enerjik hale gelmelerini sağlarlar. Belirli bir süre sonunda ısıtılmaya başlanan uç ile soğuk uç arasında termal dengeye ulaşılır ve sistemde bulunan bütün atomlar aynı S çapında titreşimlerini sürdürürler.



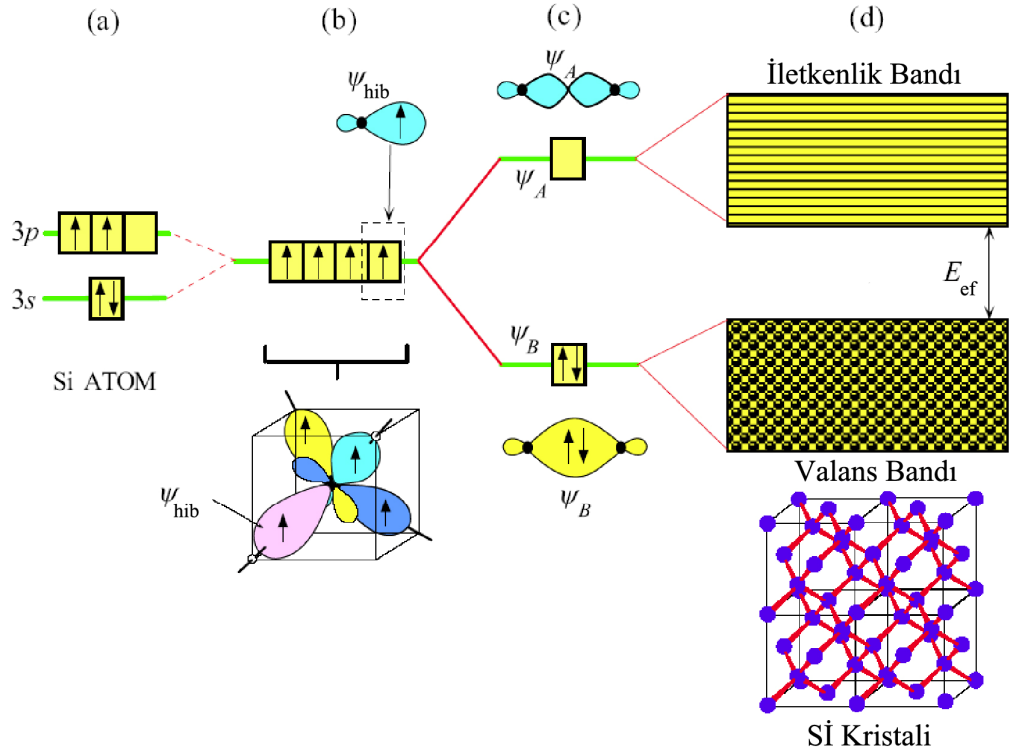
Şekil 2.29 : Isının metal içerisinde serbest elektronlar ile iletimi[5].

Şekil 2.29'da görüldüğü gibi sıcak uça hem elektronların hem de merkez atomların soğuk uca göre vektörel genlikleri daha büyüktür. Serbest elektronların soğuk bölgedeki merkez atomlarıyla çarpışmaları sonucu enerjilerinin azalmasına karşın sıcak bölgeden aldıkları enerjiyle bu çarpma işlemleri defalarca tekrarlanır ve ısı iletimi termal dengeye ulaşınca kadar sürer.

2.4 Yarı İletkenler ve Enerji Bantları

Si atomu 14 elektron içermekte ve bu elektronlar farklı enerji düzeylerine dağılmış durumdadır. 3p ve 3s orbitalleri birbirine çok yakındır ve 5 adet Si atomu birbirine yaklaştığında, etkileşim sonrası dört adet yeni hibrit orbital oluşturur. Bunların dalga

fonksiyonu ise $\psi(3s), \psi(3p_x), \psi(3p_y), \psi(3p_z)$ olarak gösterilebilir. Bu dört hibrit ψ_{hib} orbital birbirlerinden 109.5° açı yapacak şekilde birbirlerinden uzaklaşırlar. Komşu iki Si atomu yaklaştığında ψ_{hib} etkileşir ve bağ yapan ψ_B orbitalle bağ yapmayan ψ_A orbitalini oluştururlar. Şekil 2.30 Si kristal oluşum aşamalarını göstermektedir.

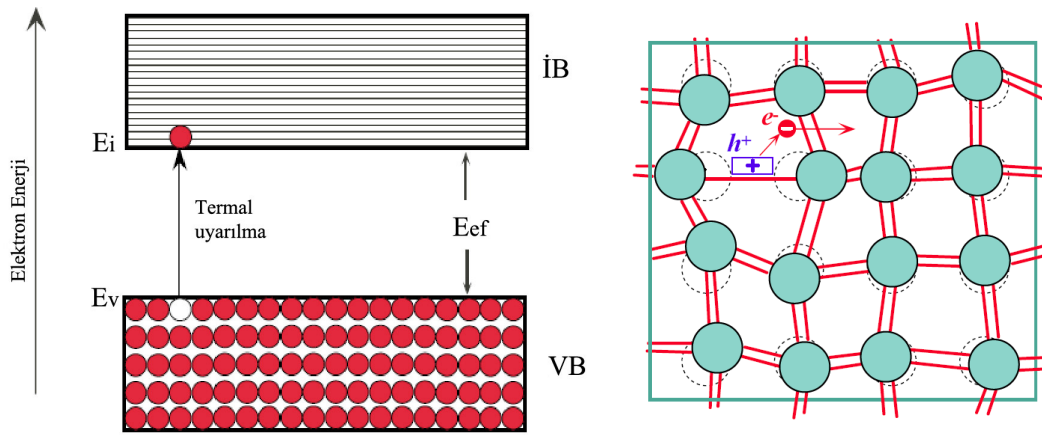


Şekil 2.30 : Si Kristal oluşum aşamaları[5].

ψ_B orbitaline yerleşmiş olan elektronlar E_B enerji değerine sahip olup bu değer ψ_A orbitalinde bulunması olası elektronların enerji değeri olan E_A dan düşüktür. ψ_B orbitallerinin birbirleri ile etkileşmesi sonucu E_B enerji değerine sahip bir bant oluşur ve bu banda Valans bandı denir. Valans bandı tek bir atoma bağlı kalmadan kristal yapı içerisinde olan valans elektronlarından oluşmaktadır. ψ_A orbitallerinin etkileşmesi sonucu E_A enerji seviyesinde bir enerji bandı oluşturulur ve bu bant iletkenlik bandı olarak bilinir. İletkenlik bandı ile valans bandı birbirlerinden E_{ef} enerji farkı ile ayrılırlar ve bir yarı iletkenin iletken hale geçebilmesi için bu enerji

bariyerinin aşılması gerekmektedir. Mutlak sıfır değerinde valans bandının valans elektronları ile tamamen dolu olduğu ve iletkenlik bandının boş olduğu kabul edilir. Oda koşullarında Si atomları arasındaki bağlar sürekli titreşim halindedir ve yeterli enerjinin verilmesi ile elektronlar valans bandından iletkenlik bandına geçiş yapabilirler. İletkenlik bandına geçen elektron ise valans bandında bir boşluk bırakır ve boşluk pozitif değerlikli olarak kabul edilir. Yarı iletken yapı içinde oluşan elektron boşluk çiftleri bu malzeme için enerji iletiminin temelini oluşturur.

Şekil 2.31 termal etki ile enerjilenmiş bir elektronun iletkenlik bandına transferini göstermektedir.

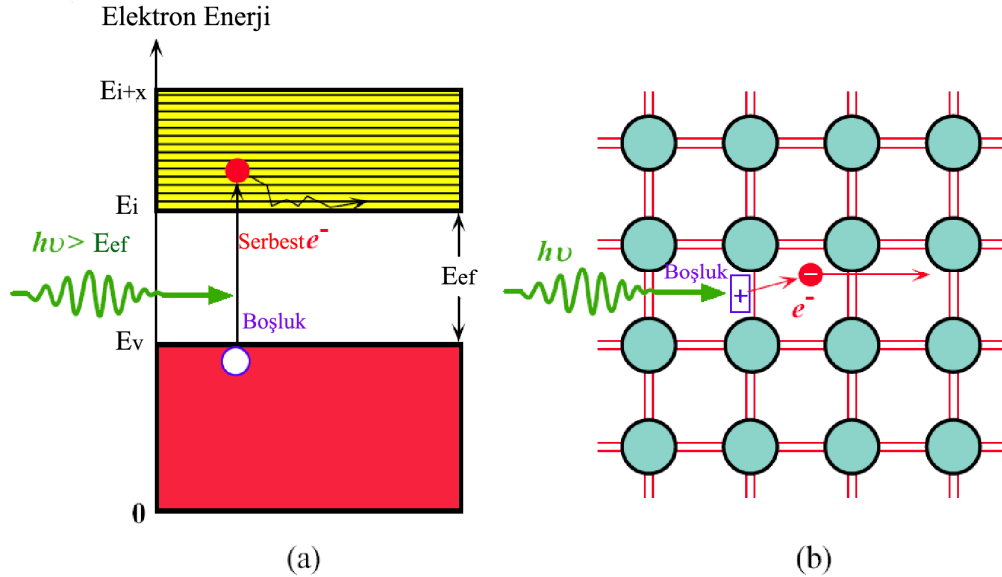


Şekil 2.31: Yarı iletken yapı içinde elektron-boşluk çiftinin termal yönden oluşumu[5].

2.5 Yarı İletken Çeşitleri ve Özellikleri

2.5.1 Yarı İletkenlerde İletkenlik

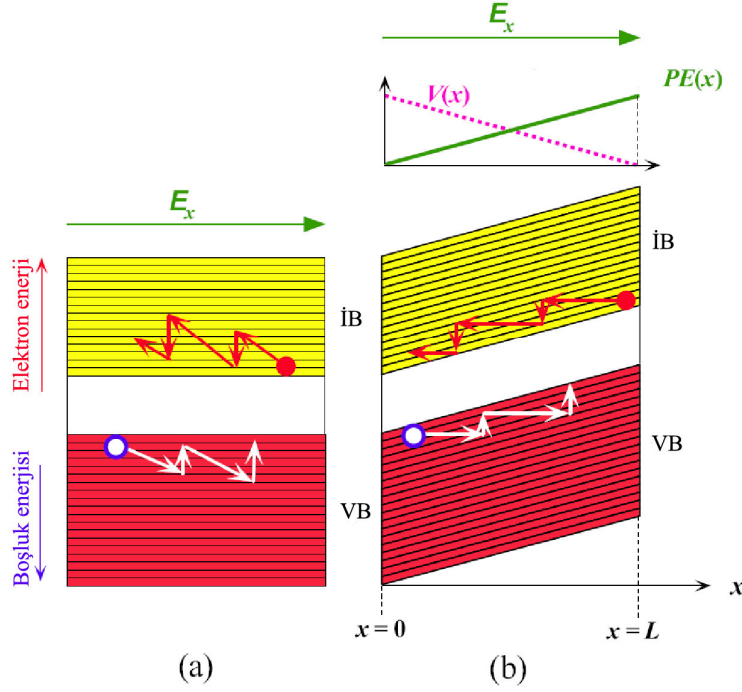
Modern katılar teorisi kullanılarak yarı iletkenler; saf yapıda olduklarında ve mutlak sıfır derecesinde valans bandı valans elektronları ile dolu olup iletkenlik bantları boş olacak şekilde tanımlanmışlardır. Dış etmenler ile kristal yapıdaki kovalent bağların kırılması ile elektron boşluk çiftleri oluşturulur. Oluşan bu elektron boşluk çiftleri yarı iletkenler için iletimi sağlayan yapıları oluşturur. Bu iki farklı taşıyıcı birbirlerinden E_{ef} enerji farkı ile birbirlerinden ayrılmıştır. Elektronlar iletkenlik bandında iletimi sağlarken boşluklar valans bantlarında iletimi sağlarlar. Şekil 2.32 foton yarı iletken içinde bir bağı uyarılmış ve taşıdığı enerji E_{ef} den büyük olacak şekilde enerjisi elektronu transfer ettiğinden elektron valans bandından iletkenlik bandına taşınmış ve geride pozitif yüklü bir boşluk bırakmıştır. Birbirlerinden bağımsız olarak hareket eden bu taşıyıcı yapılar bağlar arasındaki titreşmeyi azaltacak yönde bir dış etmene maruz bırakıldığında elektron boşluk çifti tekrar birleşecek ve bu birleşme sonucu ısı açığa çıkacaktır. Bu birleşme bazı yarı iletkenlerde dışarı foton salınımına da neden olabilir.



Şekil 2.32 : Bir fotonun kristal yapı içindeki elektronu uyarması sonucu oluşan elektron-boşluk çifti[5].

Yarı iletkenin uçları arasında potansiyel fark uygulanması ile iletkenlik bandında elektronlar uygulanan alanın tersi yönde ilerlerken boşluklar aynı yönde ilerler.

Şekil 2.33’de elektron ve boşlukların elektriksel potansiyel altında enerji bantlarında yaptıkları hareketler gösterilmektedir.



Şekil 2.33 : Elektron-boşluk çiftinin elektrik alan içindeki davranışı[5].

Elektronların ve boşlukların elektrik alan içerisinde oluşturduğu akım yoğunluğu ifade 2.44’de verilmiştir.

$$J = env_{de} + epv_{db} \quad (2.44)$$

Bu ifadede n iletkenlik bandındaki elektron konsantrasyonunu, p valans bandındaki boşluk konsantrasyonunu, v_{de} ve v_{db} sırasıyla elektron ve boşluğun sürüklenme hızını göstermektedir. Elektronların ve boşlukların sürüklenme hızları ifade 2.45 verilmiştir.

$$v_{de} = \mu_e E_x \text{ ve } v_{db} = \mu_b E_x \quad (2.45)$$

Sürüklenme mobilitesi olarak elektron ve boşluk için μ_e ve μ_b şeklinde tanımlanır. Kristal yapı içerisinde dolaşan elektronların yapı içindeki iyonlardan da etkileneceği düşünüldüğünde elektronun kütlesi m_e^* olarak belirlenir. Buradan elektronun iletkenlik bandındaki sürüklenme mobilitesi ifade 2.46’daki gibi tanımlanır.

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e^*} \quad (2.46)$$

Aynı düşünceyi boşluklar için uygulayabiliriz. Kütlelerin ivmelenmeyi zorlaştırıcı bir etmen olduğu düşünüldüğünde boşluğun da bir kütlelerinin olduğu yorumu yapılabilir. Boşluğun ivmelenmesi demek elektronun bağlar arasında tünelleme yapması demektir ve buradan boşluk için sürüklenme mobilitesi ifade 2.47 deki gibi tanımlanır.

$$\mu_b = \frac{e\tau_b}{m_b^*} \quad (2.47)$$

Buradan yarı iletkenler için iletkenliği 2.54 ifadesini kullanarak tanımlarsak 2.48 ifadesi elde edilir.

$$\sigma = en\mu_e + ep\mu_b \quad (2.48)$$

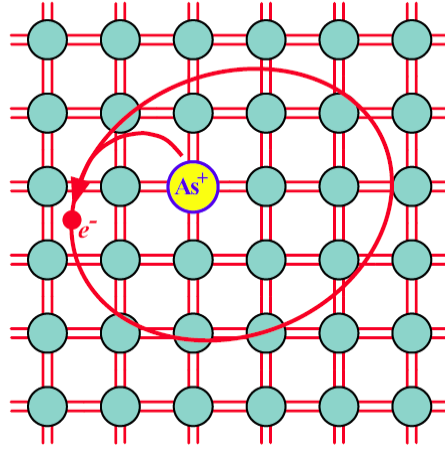
İfadedeki n ve p elektron ve boşluk konsantrasyonunu temsil etmektedir.

2.5.2 Yarı İletken Çeşitleri

Yarı iletkenler yapılarına eklenen maddelerde tek bir polarite gösterecek şekilde imal edilebilirler. Bu yarı iletkenler n ve p tipi olmak üzere ikiye ayrılır ve yapıdaki elektron veya boşluk fazlalığı yarı iletkenin tipini belirler.

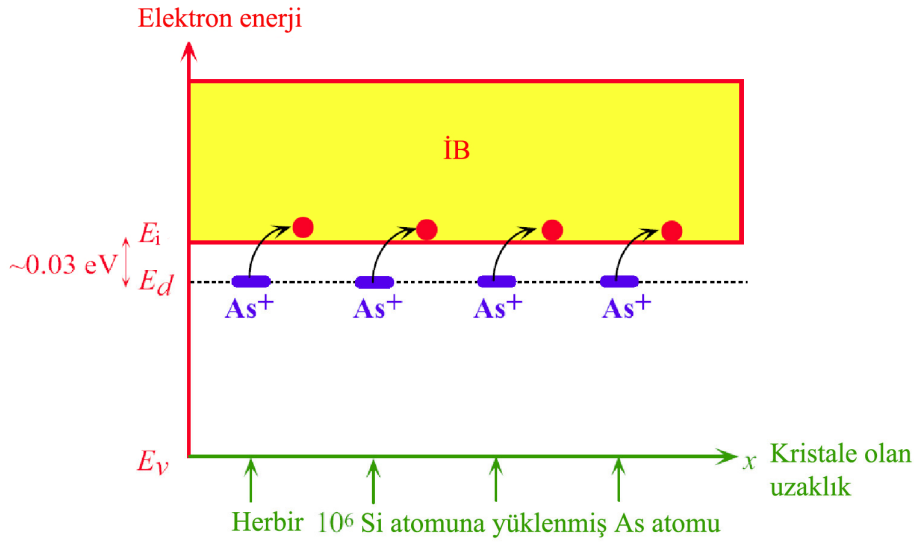
2.5.2.1 n-Tipi Yarı İletkenler

Periyodik cetvelin 5'inci grubunda bulunan As, P, Sb gibi metallerin Si yapıya eklenmesi ile oluşurlar. Silisli yapıya Arsenik eklemesi yapılacağını düşünürsek; Arsenik 5 valans elektrona sahiptir ve Silisyumun 4 valans elektronu vardır. Arsenik Silisyumun 4 elektronu ile bağ yaptıktan sonra bir valans elektronu dışarıda kalır. Bağ yapamayan bu valans elektronu As etrafındaki bir yörüngede dolaşır ve gerekli enerjinin verilmesi ile iletkenlik bandına geçiş yapar. Sistem bu fazlalık elektron nedeniyle n tipi yarı iletken olarak tanımlanır. Bu proses serbest dolaşan bir elektron fakat hareketsiz bir As^+ iyonu yaratır. Arseniğin iletkenlik bandına elektron vermesinden dolayı da Arsenik atomuna bağışlayıcı atom denilir. Şekil 2.34'de Arsenik atomunun latis yapı içerisindeki konumu gösterilmiştir.



Şekil 2.34: Arsenik atomunun Si ile yaptığı bağ ve serbest elektronun yörüngedeki hareketi[5].

Saf bir yarı iletkenin iletkenlik bandına elektron transferini sağlamak için verilmesi gereken enerji değeri çok büyükken, As yüklenmiş n tipi bir yarı iletken için bu değer çok küçüktür. Şekil 2.35’de gösterildiği gibi As eklenmiş bir yarı iletkenin iyonizasyonu ile iletkenlik bandına elektron transfer etmesi için 0.03 eV kadar bir enerjiye gereksinim duyulmaktadır. Ortalama olarak oda koşulları atomların titreşmesini sağlayacak 0.07 eV termal enerjiyi sağlayabilmektedir. Bu nedenle As atomunun iletkenlik bandına elektron transfer etmesi saf bir yarı iletkeninkinden çok daha kolaydır.

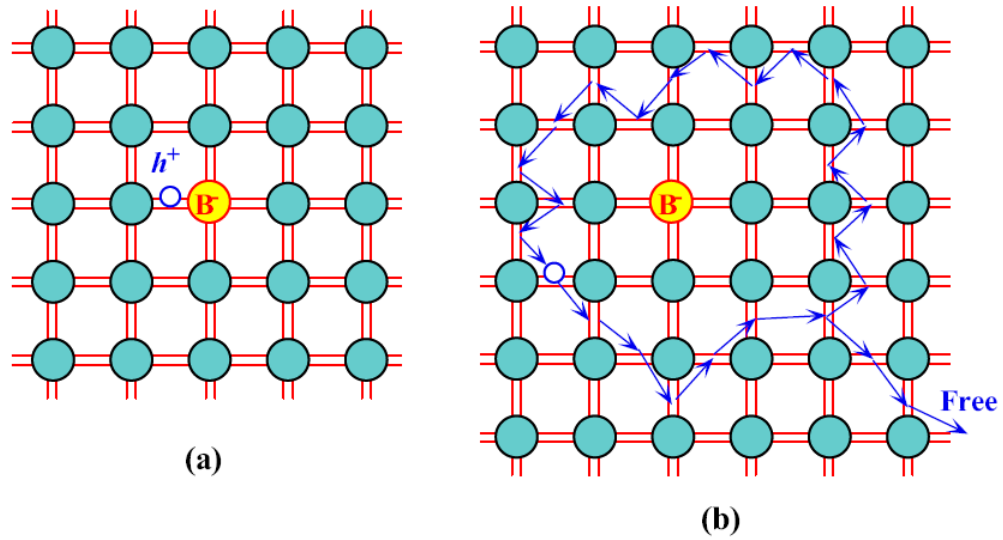


Şekil 2.35: Si yapıya 1 ppm As eklenmiş n tipi bir yarı iletkenin enerji bant diyagramı[5].

2.5.2.2 p-Tipi Yarı İletkenler

Valans elektronu 3 olan metallerin Si kristal yapıya eklenmesi ile oluşurlar. Silis kristaline Bor eklendiğini düşünürsek;

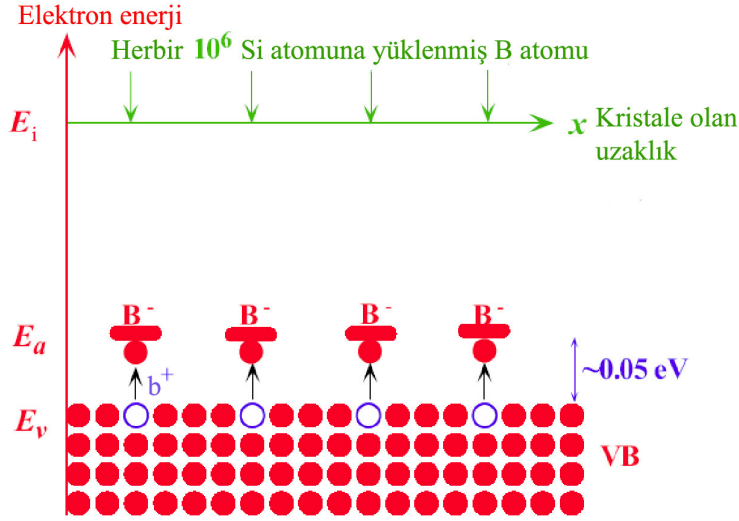
Bor 3 valans elektronuna sahiptir ve Silisyumun 4 valans elektronu vardır. Bor Silisyumla bağ kurarken bağdaki elektronlardan birini yutar ve geride boşluk bırakır. Elektronların tünelleme yapması ile boşluk Bor atomu çevresinde bir yörünge oluşturur ve yeterli enerjinin verilmesi ile boşluk yörüngeden kurtulur. Yörüngeden kurtulan boşluk valans bandında serbest halde dolaşabilir hale gelir. Bu işlem sonucunda valans bandında serbest halde dolaşabilen bir boşluk oluşturur. Elektron yutarak boşluğun oluşmasına neden olduğu için Bor atomuna alıcı atom denilir. Şekil 2.36'da Bor atomunun latis yapısı içerisindeki konumu gösterilmiştir.



Şekil 2.36 : (a) Bor atomunun bağdaki bir atomu yutması sonucu oluşan boşluk[5].

(b) Boşluğun Bor atomu çevresindeki yörüngesi ve serbest hale geçişi.

Şekil 2.37'de gösterildiği gibi B eklenmiş bir yarı iletkenin iyonizasyonu ile valans bandında boşluğun dolaşabilmesi için 0.05 eV kadar bir enerjiye gereksinim duyulmaktadır. Ortalama olarak oda koşulları atomların titreşmesini sağlayacak 0.07 eV termal enerjiyi sağlayabilmektedir.



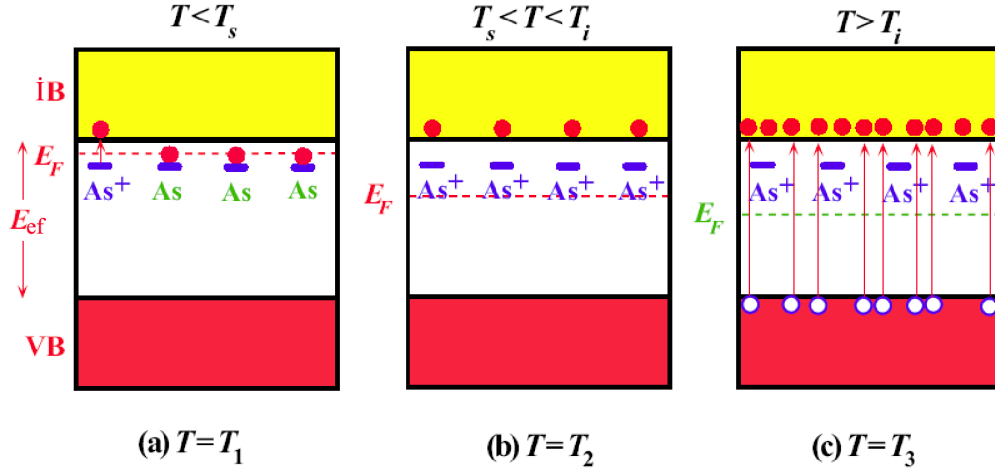
Şekil 2.37: Si yapıya 1ppm B eklenmiş p tipi bir yarı iletkenin enerji bant diyagramı[5].

2.5.3 İletkenliğin Sıcaklık Bağımlılığı

Yarı iletkenlerin farklı sıcaklıklardaki iletkenliğini etkileyen iki faktör önemlidir; taşıyıcı konsantrasyonunun sıcaklık bağımlılığı ve sürüklenme mobilitesi.

2.5.3.1 Taşıyıcı Konsantrasyonunun Sıcaklık Bağımlılığı

n veya p tipi bir yarı iletkenin sıcaklığını çok düşürdüğümüzü varsayarsak iletkenlik neredeyse durur. Sıcaklığı yavaşça arttırdığımızda bağışlayıcı atom iyonize olarak elektronunu iletkenlik bandına transfer eder. Sıcaklığın daha fazla artırılması ile bütün bağışlayıcı atomlar elektronlarını iletkenlik bandına transfer eder. Çok daha yüksek sıcaklıklarda ise Si-Si bağlarından kopan elektronların da iletkenlik bandına geçişi gerçekleşebilir. Bu durum iletkenlik bandındaki elektron sayı kadar valans bandında boşluk yaratılmasına neden olur. Şekil 2.38'de taşıyıcı konsantrasyonunun sıcaklıkla nasıl değiştiği ve sistemdeki elektron ve deliklerin enerji bantlarındaki durumları verilmiştir.



Şekil 2.38 : (a) n tipi bir yarı iletkenin çok düşük sıcaklıktan doyum sıcaklığına kadar ki davranışı.

(b) Doyma sıcaklığından iyonlaşma sıcaklığına kadar olan değişim.

(c) İyonlaşma sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklardaki değişim.[5]

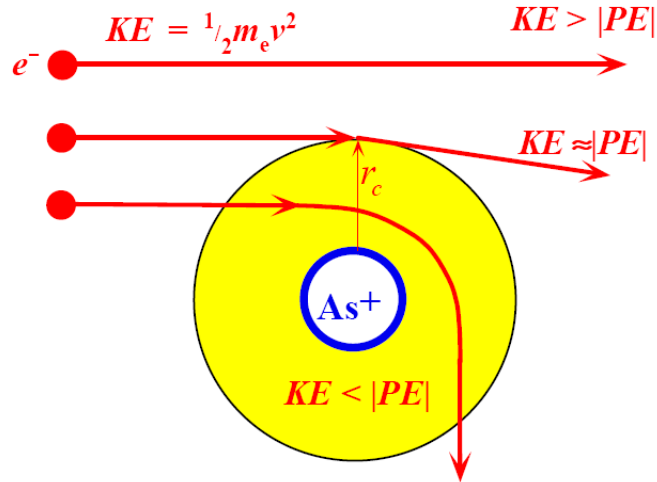
2.5.3.2 Sürüklenme Mobilitesi

Sürüklenme mobilitesi iki farklı sıcaklık aralığı için farklılıklar göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda sürüklenme mobilitesi latis yapının titreşimleri ile sınırlanır. Atomik yapının yaptığı titreşimler sıcaklığın artması ile artmaktadır. Sıcaklıkla sürüklenme mobilitesi arasındaki bağıntı $\mu \propto T^{-\frac{3}{2}}$ şeklinde tanımlanabilir.

Buna karşılık düşük sıcaklıklarda bağışlayıcı atomlar, yeterli enerjiye sahip olmamalarından dolayı iletkenlik bandına elektronlarını bağışlayamazlar. Düşük sıcaklıklarda mobilitiyi etkileyen sıcaklık bağıntısı da $\mu \propto T^{\frac{3}{2}}$ şeklinde tanımlanabilir. Daha önce 2.46 eşitliğinde verildiği gibi elektronun latis yapı içerisindeki sürüklenme mobilitesi $\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e^*}$ şeklinde tanımlanır. İki çarpışma arasındaki ortalama serbest yolda geçen süre ise ifade 2.49 de verilmiştir.

$$\tau = \frac{1}{S \bar{v} N_s} \quad (2.49)$$

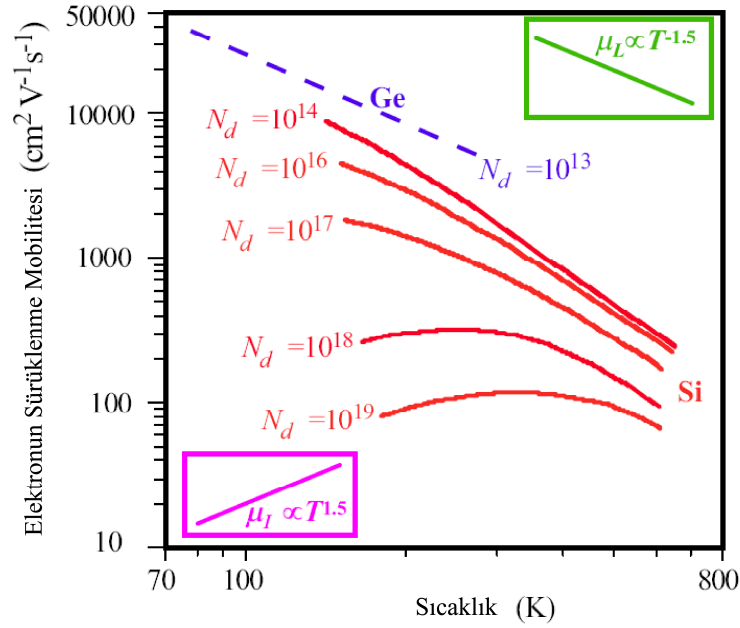
Bu ifadede S merkez atomun titreşme alanı, \bar{v}_e elektronun ortalama hızı, N_s birim hacimde saçılan elektron sayısıdır. Düşük sıcaklıklarda karşılaşılan bir diğer sorun ise elektronun merkez atom tarafından yaratılan Coulombic etki altında kalarak yön değiştirmesidir. Bu durum Şekil 2.39'da As^+ atomunun yarattığı potansiyel enerji ve elektronun sahip olduğu kinetik enerjiye göre izleyebileceği yollar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 2.39: Elektronun sahip olduğu enerjiye göre izleyebileceği yollar[5].

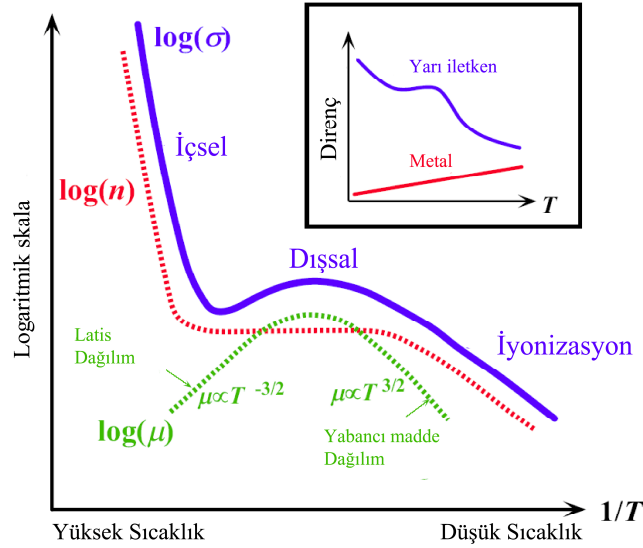
Yüksek sıcaklıklarda elektronun sahip olduğu KE yüksek olduğundan As^+ 'in yarattığı çekim alanından etkilenmez. Sıcaklık düştükçe KE enerji azalır ve elektronun sistem içinde sürüklenme mobilitesi azalır.

Sürüklenme mobilitesini etkileyen etmenlerden biri de sisteme eklenen bağışlayıcı atom sayısıdır. Düşük sıcaklıklarda eklenen atom sayısı arttıkça sürüklenme mobilitesi azalır. Bu ifade Şekil 2.40'da gösterilmiş olup $N_d \text{ cm}^{-3}$ de bulunan bağışlayıcı atom konsantrasyonudur.



Şekil 2.40: Sürüklenme mobilitésinin bağışlayıcı atom konsantrasyonuna göre sıcaklıkla değişimini[5].

Bağışlayıcı atom eklenmiş bir yarı iletkende iletkenlik elektron konsantrasyonu ve sürüklenme mobilitési ile değişmekte olup sistemin genel bir tanımı Şekil 2.41'de verilmiştir.

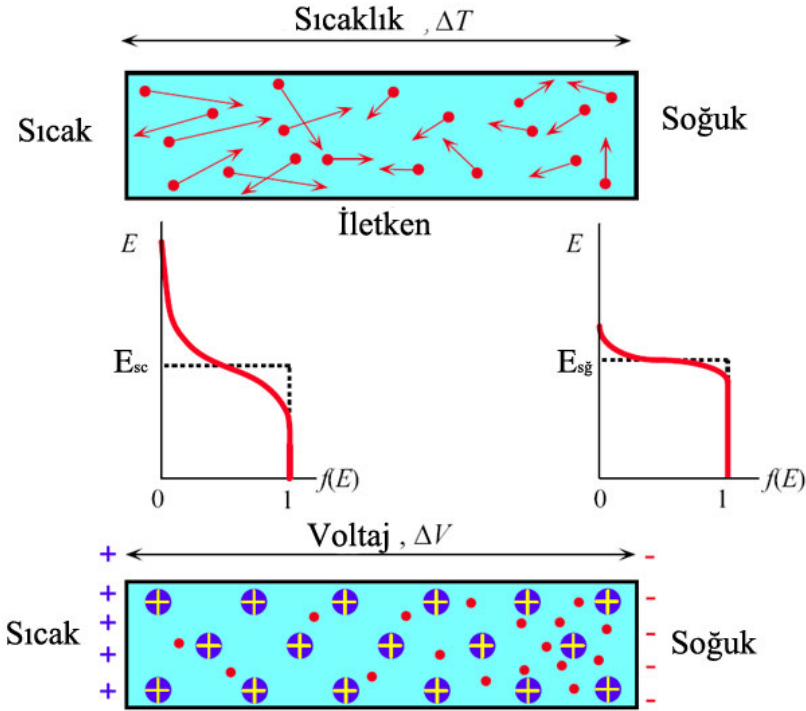


Şekil 2.41: n tipi bir yarı iletkenin elektriksel iletkenliğinin sıcaklıkla değişimini[5].

2.6 Yarı iletkenlerde Seebeck ve Peltier Etkileri

2.6.1 Seebeck Etkisi

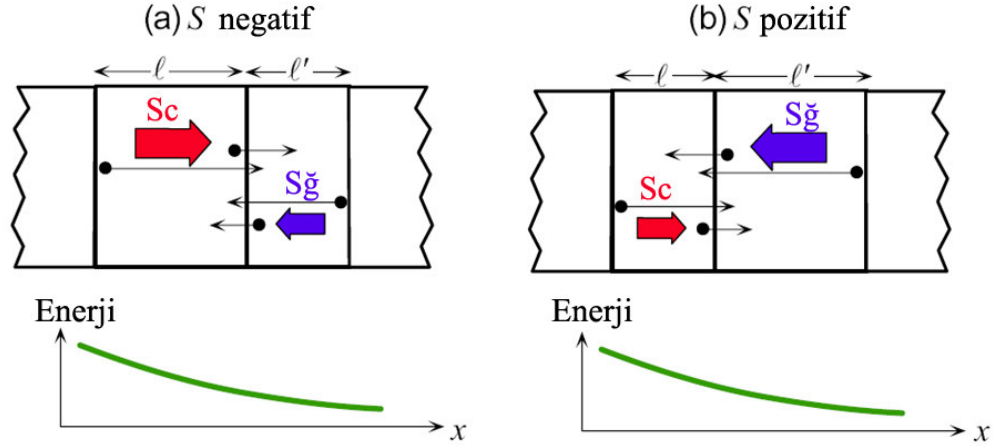
İletken olarak alüminyum bir çubuk düşünelim ve bunu bir ucundan ısıtmaya başlayalım. Şekil 2.42’de gösterildiği gibi sıcak uçtaki elektronların kinetik enerjileri fazla olduğundan soğuk bölgedekine göre daha hızlı hareket edeceklerdir. Genelde net elektron difüzyonu sıcak taraftan soğuk tarafa olacak ve belirli bir süre sonunda geride pozitif iyonları bırakarak elektronlar soğuk tarafta kümeleneyecektir. Isı serbest elektronlar sayesinde sıcak bölgeden soğuk bölgeye taşınırken bir yandan da potansiyel fark yaratılmış olacaktır. ΔT Sıcaklık farkı ile yaratılan ΔV potansiyel farka Seebeck etkisi olduğu daha öncede vurgulanmıştı.



Şekil 2.42: Sıcaklık farkı ile oluşturulan potansiyel fark[5].

Seebeck etkisi malzemenin cinsine göre pozitif veya negatif olabilmektedir. Seebeck katsayısının işareti soğuk tarafın sıcak tarafa göre potansiyeli göz önüne alınarak belirlenir. Alüminyum için soğuk tarafta toplanan elektronlar nedeniyle alüminyumun Seebeck katsayısı negatiftir.

Seebeck katsayısının işaretinin değişmesi temelde elektronun latis yapı içerisinde izlediği yolun uzunluğu ve süresi ile ilişkilidir. Şekil 2.43 üzerinden Seebeck katsayısının nasıl değiştiğini açıklayalım.



Şekil 2.43: Seebeck katsayısının değişimi[5].

İletken çubuğu sıcak ve soğuk bölge olarak ikiye ayırdığımızda elektronların hareketi için ortalama serbest yolları ℓ ve ℓ' düşünelim. Elektronların yarısı $+x$ yönünde ilerlerken diğer yarısı $-x$ yönünde ilerleyecektir. Kabaca iki yarı sistemde elektron konsantrasyonlarının eşit olduğu düşünülürse; Sıcak taraftan soğuk tarafa geçen elektronların sayısı $\frac{1}{2}n\ell$ olurken soğuk taraftan sıcak tarafa geçen elektron sayısı $\frac{1}{2}n\ell'$ olacaktır. Bunun sonucu olarak sıcak taraftan soğuk tarafa olan net difüzyon ifade 2.59 deki gibi belirlenir.

$$\text{Sıcaktan soğuk tarafa net difüzyon} = \frac{1}{2}n(\ell - \ell') \quad (2.50)$$

Alüminyum için bu ifadeyi tekrar düşünecek olursak;

Sıcak tarafta elektronların ortalama serbest yolları ℓ daha büyük olmaktadır. Bunun nedeni malzemenin cinsine göre değişmekte olup alüminyum için iki çarpışma arasında geçen süre fazla olduğundan elektronun aldığı yolda fazla olacak ve sıcak taraftan soğuk tarafa elektron transferi gerçekleşecektir. Soğuk tarafta elektron fazlalığı olduğundan alüminyum negatif Seebeck katsayısına sahiptir.

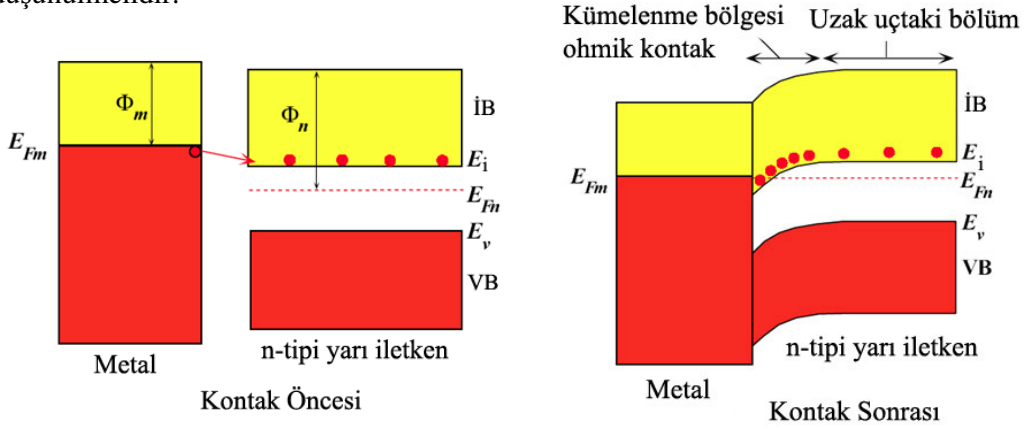
Bu bakır için düşünüldeğinde iletken içinde sıcaklığın artması ile elektronların iki çarpışma arası aldığı ortalama serbest yollar kısalmır ve $\ell' > \ell$ olduğundan soğuk taraftan sıcak tarafa elektron transferi olur. Sıcak taraftaki elektronlar soğuk taraftakinden daha fazla olduğundan bakır pozitif Seebeck katsayısına sahiptir. Seçilmiş bazı metaller için Seebeck katsayılarını gösteren ifadeler Tablo 2.2 de listelenmiştir.

Tablo 2.2: Farklı metaller ve yarı iletkenlerin Seebeck katsayıları[18].

Metaller	Seebeck Katsayısı ($\mu\text{V/K}$)	Yarı iletkenler	Seebeck Katsayısı ($\mu\text{V/K}$)
Antimon	47	Se	900
Nikrom	25	Te	500
Molibden	10	Si	440
Kadmiyum	7.5	Ge	300
Tungsten	7.5	n-tipi Bi_2Te_3	-230
Altın	6.5	p-tipi $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$	300
Gümüş	6.5	p-tipi Sb_2Te_3	185
Bakır	6.5	PbTe	-180
Rodyum	6.0	$\text{Pb}_{03}\text{Te}_{39}\text{Se}_{58}$	1670
Alüminyum	3.5	$\text{Pb}_{06}\text{Te}_{36}\text{Se}_{58}$	1410
Karbon	3.0	$\text{Pb}_{09}\text{Te}_{33}\text{Se}_{58}$	-1360
Civa	0.6	$\text{Pb}_{15}\text{Te}_{37}\text{Se}_{58}$	-1990
Platin	0	SnSb_4Te_7	25
Sodyum	-2.0	SnBi_4Te_7	120
Potasyum	-9.0	$\text{SnBi}_2\text{Sb}_2\text{Te}_7$	90
Nikel	-15	PbBi_4Te_7	-53
Konstantan	-35		
Bizmut	-72		

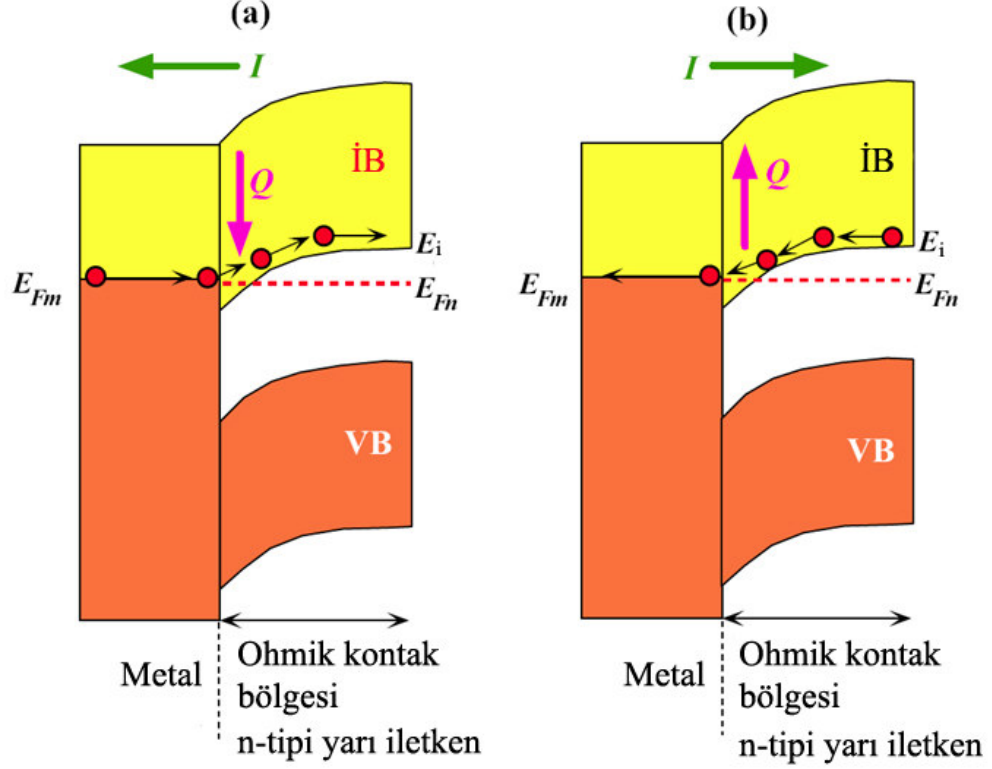
2.6.2 Ohmik Kontak ve Peltier Etkisi

Metal ile yarı iletken arasında yapılan kontaklara ohmik kontak denir ve termoelektrik modüller ohmik kontak esasına göre çalışırlar. Şekil 2.44'de bir metal ile n tipi bir yarı iletkenin Fermi enerji seviyeleri ve ohmik kontak sonucu enerji bantlarında meydana gelen değişim gösterilmektedir. Metal atomlarının iş fonksiyonları daha küçük olduğundan metaldeki elektronlar yarı iletkendeki elektronlara göre daha enerjiktirler. Bu nedenle metal ile yarı iletken birleştiğinde metaldeki elektronlar yarı iletkenin iletkenlik bandına tunnelling yaparlar. Yarı iletkenle metal arasındaki kontak bölgesinde elektron birikmesi olur ve bu bölge kümelenme bölgesi olarak tanımlanır. Kontak bölgesinde yarı iletkenin enerji bandını $E_c - E_{Fn}$ olacak şekilde aşağı kaydırır. Ayrıca kontak bölgesinde elektronların birikmiş olması iletkenliği arttırmaktadır. Ohmik kontak yapmış bir yapıda direnç gösterecek olan yapı, metalden çok yarı iletkenin kantağa uzak uçtaki bölümü olarak düşünülmelidir.



Şekil 2.44: Metal ve n-tipi yarı iletkenle ohmik kontak[5].

Ohmik kontakla birbirine bağlanmış ve DC akım uygulandığında soğutma etkisi yapan cihazlara da daha önce değindiğimiz gibi Peltier elemanı denir. Peltier etkisi kontaklarda ısı absorblanması ve ısı atımı şeklinde gerçekleşip akım yönüne göre değişmektedir. Şekil 2.45'de n tipi bir yarı iletken için bu durum açıklanmıştır.

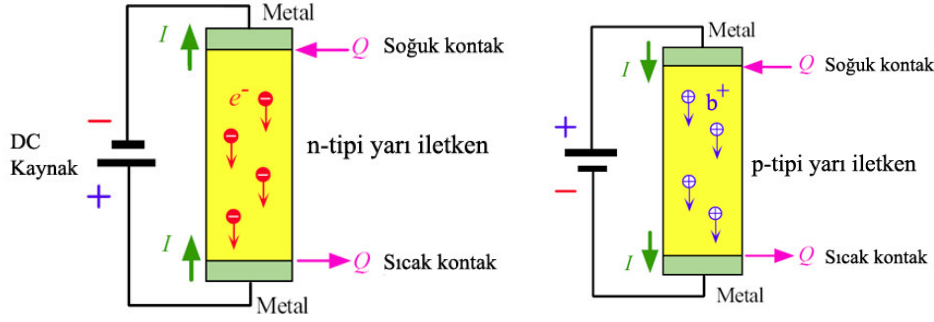


Şekil 2.45: n tipi bir yarı iletken için akım yönüne göre kontaklardaki durum[5].

Şekil 2.45 (a) DC akımın yönü yarı iletkenden metale doğrudur. Bunun sonucu olarak elektronlar metal üzerinden yarı iletkenin iletkenlik bandına geçecektir. Akım, elektronları metalin Fermi enerji seviyesinden taşıyarak kontak noktasına ulaştırır. Elektronlar tunneling yaparak yarı iletkenin iletkenlik bandına geçiş yaparlar. Kontak bölgesinde enerji seviyesi düşüktür fakat kontağın uzak ucunda elektronların enerjisi E_i artı KE kadar artmaktadır. Bu nedenle elektronların kontak bölgesinden kurtulabilmeleri için enerjilerini PE+KE olacak şekilde arttırmaları gerekmektedir. Gerekli olan bu enerji kontak bölgesinde dışarıdan ısı absorblanması ile sağlanır. Dışarıdan absorblanan bu enerji latis yapının titreşmesi için gereklidir.

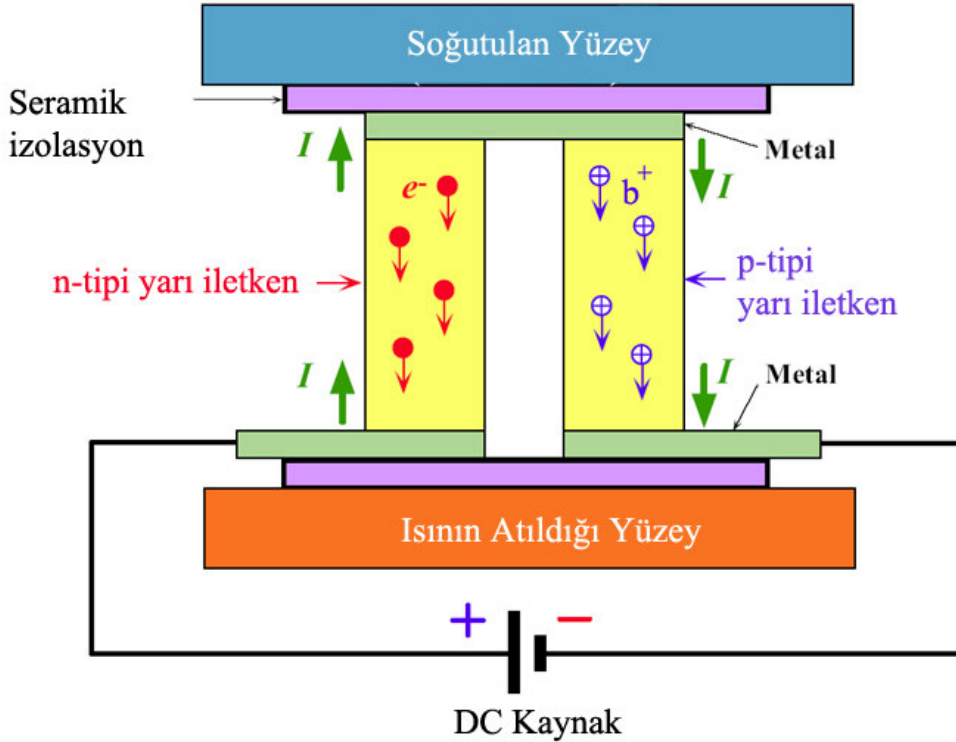
Şekil 2.45 (b) DC akımının yönü değiştirildiğinde elektronlar yarı iletkenin iletkenlik bandından metal üzerine transfer olacaktır. Bir önceki olayın aksine bu sefer elektronun sahip olduğu fazla kinetik enerji kontak bölgesinde ısı atılması şeklinde kendini gösterecektir.

P tipi yarı iletkenlerde durum n tipi yarı iletkenler için anlatılanların tam tersidir. Fakat burada valans bandında boşlukların görev aldığı gözden kaçırılmamalıdır.



Şekil 2.46: n ve p tipi yarı iletkenlerde sıcak ve soğuk kontak oluşumu[5].

Dışarıdan ısı absorblanması ile oluşturulan yüzeylerle soğuk yüzeyler ve dışarı ısı atılması ile sıcak yüzeyler oluşturulur. Sıcak ve soğuk yüzeyleri birbiri ile örtüşen p ve n tipi yarı iletkenlerin birbiri ile birleştirilerek termoelektrik modüller oluşturulur. Bu modüllerde elektronlar akış yönü yarı iletkenlerin bağlantı şekilleri ile kontrol edilip düzgün bir akış sağlanır. Şekil 2.47’de termoelektrik soğutucu modül ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.



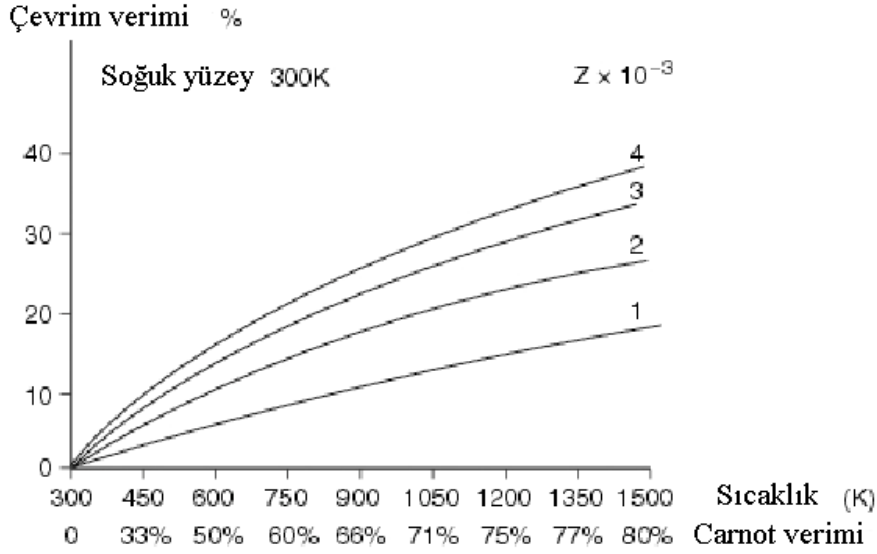
Şekil 2.47:Termoelektrik soğutucu modülü[5].

2.7 Figure of Merit

Figure of Merit boyutsuz bir büyüklük olup malzemenin özellikleri ile değişmekte ve dizayn aşamasında mühendisler Seebeck katsayısı, malzemenin direnci ve termal yönden iletkenliği arasında bağıntı kurma imkanı vermektedir.

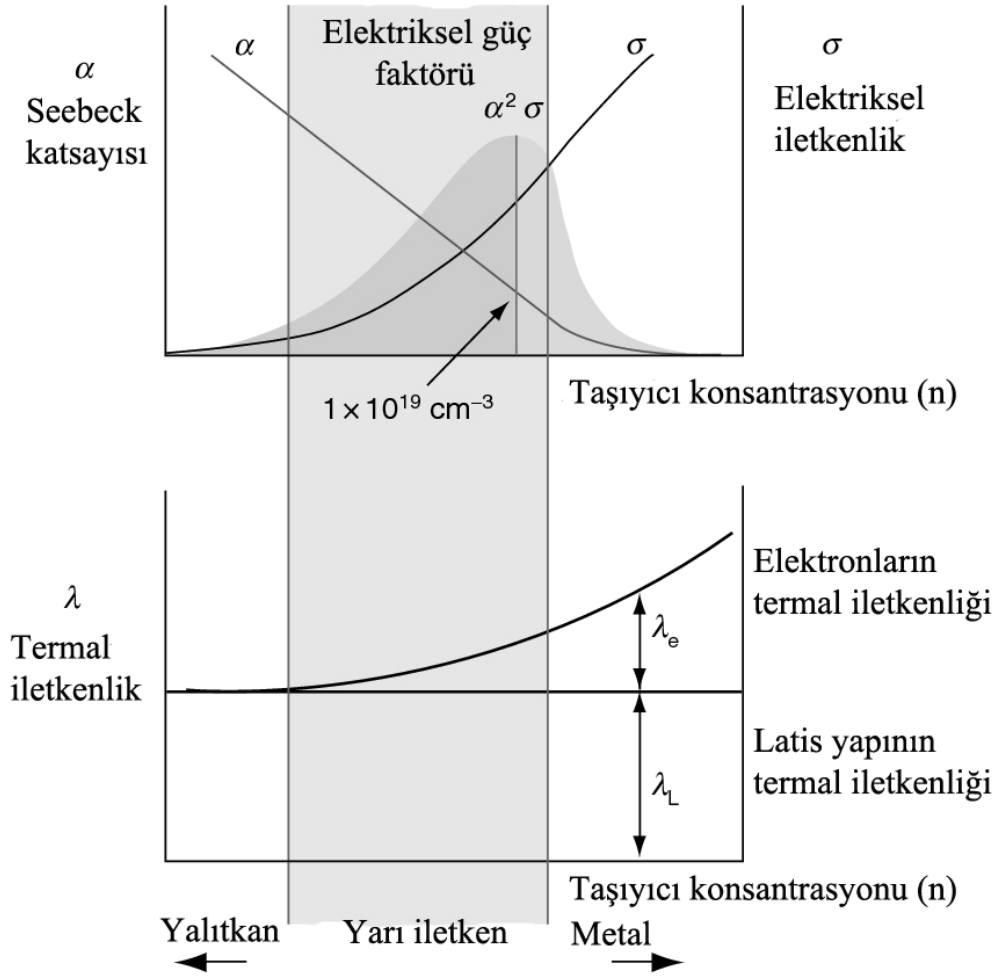
$$Z = \frac{\alpha^2}{R\lambda} = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \quad (2.51)$$

İfade 2.51 sıcaklıktan bağımsız ifade edilmiş olup $\alpha^2 \sigma$ değeri elektriksel güç faktörü olarak tanımlanır. Termoelektrik malzemelerde sıcaklık farkı artması ile birlikte çevirme oranları artar ve malzemenin Figure of Merit'i bundan etkilenir. Şekil 2.48'de sıcaklık farkı ile verimin değişimi ve Figure of Merit gösterilmiştir.



Şekil 2.48 : Sıcaklık farkı ile verimin değişmesi ve Figure of Merit[3].

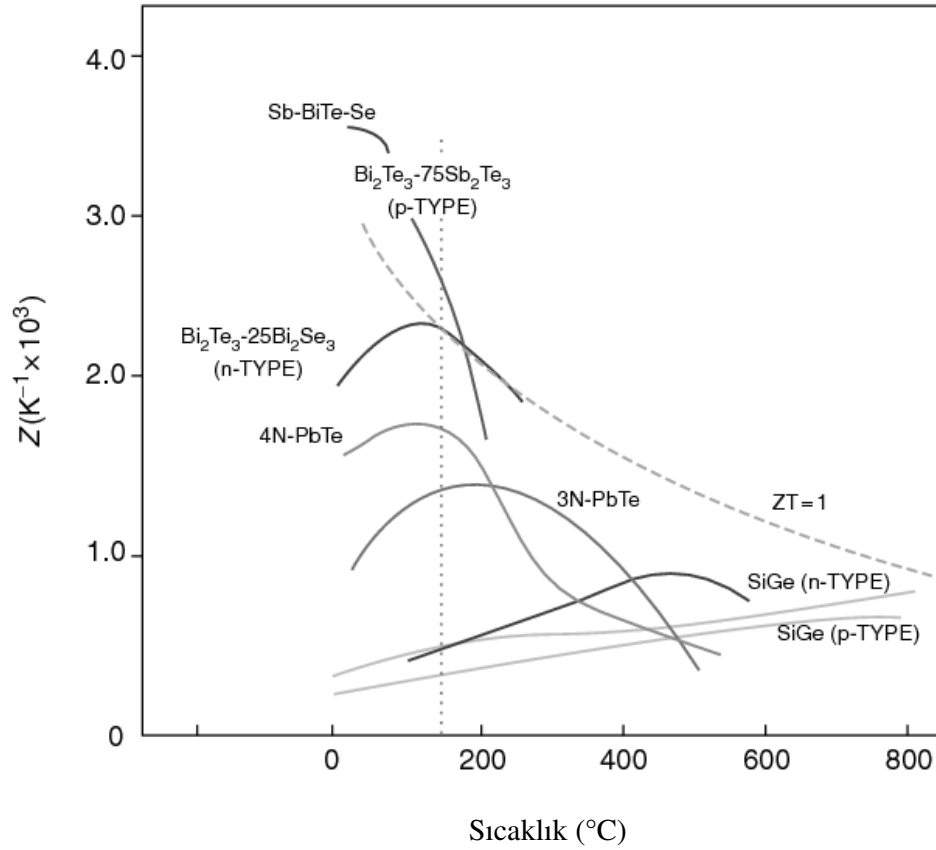
Elektriksel iletkenlik taşıyıcı yüklerin yoğunluğu ile artmakta iken Seebeck katsayısı ile azalmaktadır. Ayrıca Şekil 2.49'da görüldüğü gibi elektriksel güç faktörü yarı iletkenlerde taşıyıcı yüklerin yoğunluğu $10^{25}/\text{cm}^3$ koşulları için maksimize olmaktadır. Termal iletkenliğe taşıyıcı yüklerin katkısı λ_e , 1/3 oranında olmakta ve taşıyıcı yük yoğunluğunun artması ile bu değer artmaktadır. Görüldüğü gibi yarı iletken malzemenin taşıyıcı yük yoğunluğu Figure of Merit'i optimize ederken kullanabileceğimiz bir değerdir.



Şekil 2.49: Malzeme içerisindeki taşıyıcı konsantrasyonuna göre iletkenlik, Seebeck katsayısı, güç faktörü ve termal iletkenliğin değişimi[3].

Termoelektrik etki, sıcaklığın değişimi ile nerdeyse bütün iletkenler için geçerli bir kavram haline gelmektedir ki bu nedenle Figure of Merit'i boyutsuz olarak ortalama sıcaklık ile çarpılarak ZT şeklinde ifade etmek daha anlamlı bir büyüklük vermektedir. Bununla birlikte $ZT > 0.5$ olduğu değerler için malzeme termoelektrik malzeme olarak nitelenebilmektedir. ZT değerinin büyük çıkması termodinamik veriminin yüksek olduğunu gösterir. Bu nedenle ZT değeri iki farklı malzemenin verimlerini karşılaştırmakta kullanılabilir. ZT değeri konvansiyonel mekanik jeneratör ve soğutucular için 3-4 arasında değişirken bu değer termoelektrik yapılar için son gelişmelerle 2-3 arasında değişmektedir. Çoğu araştırmacı, nano ölçekte malzemenin Seebeck katsayısını arttırırken, termal iletkenliği azaltmak yönündeki

çalışmalarına devam etmektedir. Şekil 2.50'de termoelektrik malzemelerin ZT değerleri verilmiştir.



Şekil 2.50: Termoelektrik malzemelerin performansları[3].

Sıcaklık aralıklarına göre termoelektrik malzemeler literatürde 3 grupta incelenmektedir.

- 1) Düşük sıcaklıkta : Bizmut'un antimon, tellür ve selenyum ile yaptığı alaşımlardan oluşmakta olup 450 K üst sıcaklık limiti olarak belirlenmektedir. Bu malzemeler genelde termoelektrik soğutucu yapımında kullanılmaktadır.
- 2) Ara sıcaklık: 850 K sıcaklık değerine kadar çalışan kurşun tellürde alaşımlı malzemelerdir.
- 3) Yüksek sıcaklık: 1300 K sıcaklık değeri üst sınır olup silikon germanyum'dan yapılmaktadırlar.

2.8 Rejeneratif Güç Yedekleme Sistemlerine bir Alternatif Olarak Kriyojenik Isı Rezervuarlı Termoelektrik Jeneratörler

Rejeneratif güç yedekleme sistemleri kendi enerjilerini üretip depolayabilen ve uzun süreli kesintisiz güç taleplerini kendi iç döngüsüyle karşılayabilen sistemlerdir. Rejeneratif güç sistemlerinin en basit uygulamaları araçlarda akülerin şarj edilmesi ve üretilen elektriğin tekrar kullanımları ile başlamıştır. Bu sistemlerin daha karmaşık uygulamaları ise uzay çalışmaları ile sürdürülmüş olup, termoelektrik jeneratörler, güneş panelleri ve hidrojen yakıt pili teknolojilerinin hibrit kullanımları ile uzay araçlarının güç taleplerine çözüm üretilmiştir. Bununla birlikte şimdilerde şebekeden uzaktaki yerleşim alanları, telekomünikasyon, uydu ve ölçüm istasyonlarının güç gereksinimleri için dizayn edilen güneş, rüzgar ve akü guruplu hibrit enerji sistemleri tercih edilmeye başlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının depo edilmesi sorunu bu sistemlerin kurulumlarında en önemli dizayn parametresidir. Enerjinin sürdürülebilirliği vazgeçilmez olduğundan enerji depolama sistemlerinin enerji üretim kesintilerini sisteme yansıtmayacak bir kapasitede seçilmesi gereklidir. Bununla birlikte hidrojen enerjisi teknolojilerini enerji taşıyıcısı olarak kullanma çalışmaları yoğun bir şekilde sürse de bugünün şartlarında oldukça pahalı ve sorunlu sistemlerdir. Hidrojenin depo edilme sorunu ve yakıt pillerinin oldukça maliyetli ve ömürlerinin kısa oluşu nedeniyle çok özel uygulamalar dışında kullanımları henüz yaygın değildir. Bu kapsamda İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü rüzgar, güneş, PEM tipi hidrojen yakıt pili ünitesi ve üretilen enerjinin depo edildiği akü ve hidrojen tüpünden oluşan bir hibrit enerji sistemini yenilenebilir enerji teknolojileri laboratuvarında devreye almıştır. Şekil 2.51’de laboratuvar ve hibrit enerji sisteminin parçaları görülmektedir.

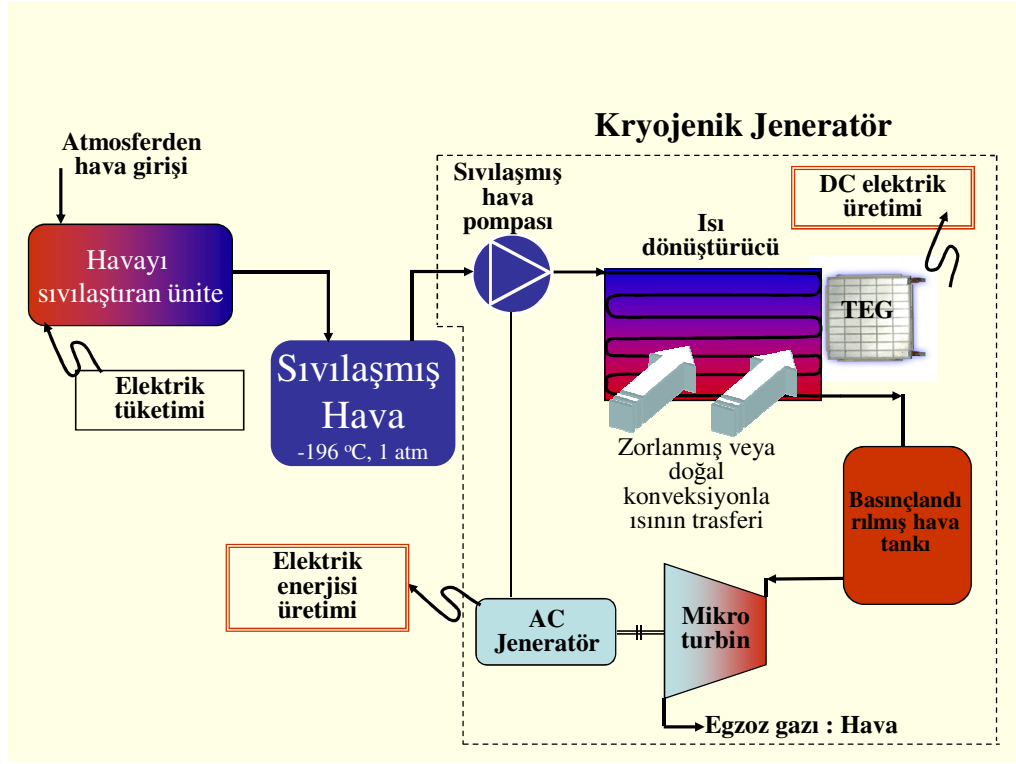


Şekil 2.51: Yenilenebilir enerji teknolojileri laboratuvarı, İTÜ Enerji Enstitüsü.

Yukarıda verilen hibrit enerji sistemleri dışında bu teknolojilere alternatif olarak İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında geliştirilen kriyojenik ısı rezervuarlı rejeneratif güç yedekleme sisteminin bir parçası olan termoelektrik jeneratörlerin incelenmesi bu tezin başlangıç noktasını oluşturmaktadır. Kriyojenik ısı rezervuarını depo kaynağı olarak kullanabilen bu güç yedekleme sisteminin temel çalışma prensiplerini kısaca açıklayacak olursak;

Sıvı azot $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'da devar kabında depolanır. Devar kabından pompalanan sıvı azot ısı dönüştürücü kullanarak buharlaştırılır. Sıvı azotun 1e 800 oranında genişlemesinden yararlanarak pnömomatik döndürülmesi için gerekli gaz akışkan üretilmiş olur. Havali motorun ucuna akuple edilmiş AC jeneratör tahrik edilerek elektrik üretilir.

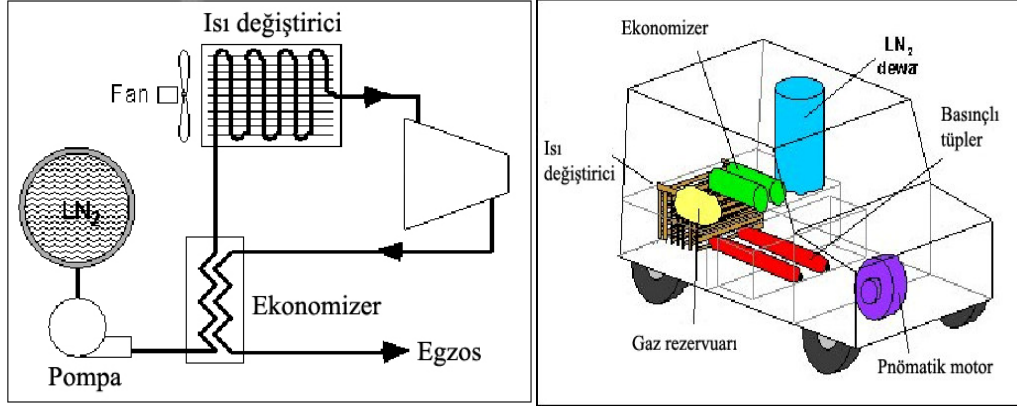
Şekil 2.52’de İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında geliştirilen kriyojenik rezervuarlı rejeneratif güç üretim sisteminin akış şeması verilmektedir.



Şekil 2.52 : Kriyojenik rezervuarlı rejeneratif güç üretim sistemi.

Sistemin devamlılığını bozan parametrelerden bir tanesi sıvı azotun buharlaşması esnasında dış ortamdan çok büyük enerji çekmesi ve ısı dönüştürücü yüzeyinde havada bulunan su buharının kristalleşerek ısı transferini olumsuz etkilemesidir. Belli bir süre sonra ısı dönüştürücüsü buharlaşma için gerekli olan ısıyı dış ortamdan sıvı azota transfer edemeyecek ve sistem duracaktır. Teknolojik olarak geliştirilen çözüm ise; termoelektrik jeneratörlerin ısı dönüştürücü yüzeyi üzerine akuple edilmesi ile hem sıvı azota transfer edilen ısının devamlılığı sağlanacak hem de sistem için ek bir DC elektrik üretimi gerçekleşecektir. Termoelektrik jeneratörlerle elektrik üretimi genelde sıcak yüzey ısı kaynağı olarak kullanılırken bu sistemde soğuk yüzey ısı kaynağı olarak kullanılacaktır. Termoelektrik jeneratörler bizmut tellür tabanlı yarı iletken malzemes kullanılarak üretildiğinden ve bu malzemenin düşük sıcaklıklarda yüksek verim gösterdiği bilgisinin doğrulanması tez kapsamında yapılacak karakterizasyon çalışmaları ile ortaya çıkacaktır.

Bununla birlikte Şekil 2.53’de sıvı azotla çalışan ve Washington Üniversitesinde geliştirilen araç; yine sıvı azotun buharlaşması esnasındaki akışkanın yarattığı etkiyle havalı motoru tahrik etmesiyle çalışmaktadır. Buna ek olarak sisteme eklenmiş termoelektrik modüller ile DC elektrik üretimi sağlanmıştır.



Şekil 2.53 : Sıvı azotla çalışan LN2000.[24]

2.8.1 Kriyojenik Akışkan Olarak Sıvı Azot ve Özellikleri

Azot, periyodik cetvelde N simgesi ile gösterilen bir element olup atom numarası 7 dir. Renksiz, kokusuz, tatsız ve inert bir gazdır. Azot, dünya atmosferinin %78'ini oluşturur ve tüm canlı dokularda bulunur. Azot ayrıca, amino asit, amonyak, nitrik asit, ve siyanür gibi önemli bileşikler de oluşturur.[16]

Genel Özellikler

Atom Numarası: 7

Element Serisi: Ametaller

Görünüş: Renksiz

Atom Ağırlığı: 14.0067 g/mol

Katı halde erime noktası: $-210^{\circ}C$

Erime Entalpisi (1.013 bar, üçlü noktada): 25.73 kJ/kg

Sıvı Halde Yoğunluğu (1.013 bar kaynama noktasında): 808.607 kg/m^3

Kaynama Noktası (1.013 bar): $-195.9^{\circ}C$

Buharlaşma Entalpisi(1.013 bar kaynama noktasında): 198.38 kJ/kg

Gaz Hali Gaz Yoğunluğu (1.013 bar kaynama noktasında): 4.614 kg/m^3

Gaz Yoğunluğu (1.013 bar ve $15^{\circ}C$): 1.185 kg/m^3

Isı Kapasitesi (C_v) (1.013 bar ve $25^{\circ}C$): 0.743 kJ/(kg.K)

(C_p) (1.013 bar ve $25^{\circ}C$): 1.041 kJ/(kg.K)

Termal İletkenlik (1.013 bar ve $0^{\circ}C$): 24 mW/(m.K)

3.TERMoeLEKTRİK JENERATÖR MODÜLÜNÜN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ VE TEORİK KARAKTERİZASYONU

Bu başlık altında teorik model oluşturularak deneysel çalışma sonunda elde edilecek verilerin literatürde verilen değerlerle karşılaştırması sağlayacaktır. Literatürde çok soğuk çalışma konusunda az sayıda makale bulunmakta olup Vayner A.L'nin Bi_2Te_3 yarı iletkeni için malzeme parametrelerinin sıcaklığa bağlı grafikleri referans alınacaktır. Bununla birlikte malzeme parametrelerinin sıcaklık ile değişimleri ortalama sıcaklıklar göz önüne alınarak hesaplatılacaktır.

3.1 Teorik Model

Çalışmada öncelikle Seebeck katsayısının, elektriksel iletkenliğin ve termal iletkenliğin sıcaklığa bağlı fonksiyonlarının belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde termoelektrik yapıların çok soğuk bölgelerde çalışmasına yönelik pek fazla çalışma olmamasına rağmen Vayner A.L. nin Thermoelectric Coolers, Moskova 1983 sayfa 176'da vermiş olduğu grafikleri referans alınmıştır. Bu grafiklere referanslar bölümünde [21] den ulaşılabilir. Bununla birlikte yine referanslar bölümünde verilen [7]'inci referans [21]'inci referansta verilen grafikler üzerinden giderek Vayner'in verileri için Seebeck katsayısı, elektriksel iletkenlik ve termal iletkenliğin sıcaklığa bağımlı denklemlerini vermiştir. Teorik model bölümünde yapılanlar ise referans [21]'de verilen grafikler üzerinden alınan çok sayıda noktanın belirlenmesi ve bu verilerin MATLAB ortamında analizi ile sıcaklık bağımlı denklemlerin türetilmesi ile başlayacaktır. Türetilen denklemler üzerinden farklı sıcaklıklar için termoelektrik modülün çalışma karakteristiği çıkarılmaya çalışılacaktır.

Referans [21] de Seebeck katsayısı, elektriksel ve termal iletkenliğin sıcaklığa bağlı grafikleri verilmiştir. Tellurex firmasının termoelektrik jeneratör modülü için

elektriksel iletkenlik değerinin Referans [21] de verilen eğrilerin bize uygun olan eğri seğilerek, çok fazla nokta için veri alınmıştır. Alınan bu verilerle teorik olarak Tellurex termoelektrik modülünde kullanılan malzemeler için sıcaklığa bağlı denklem eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğrilerden farklı sıcaklık noktaları için alınan değerler Tablo 3.1 de verilmiştir.

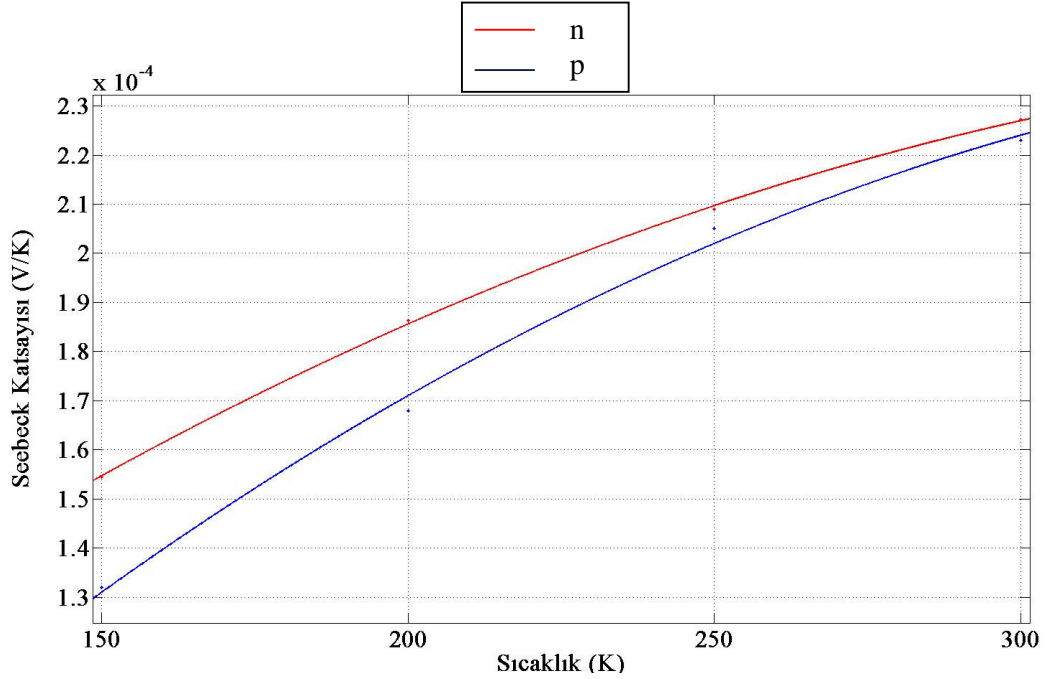
Tablo 3.1: Bi₂Te₃ tabanlı n ve p tipi yarı iletken için Seebeck katsayısı, elektriksel ve termal iletkenliğin sıcaklığa bağlı değerleri.

T (K)	150	200	250	300
α_n (V/K)	154.5x10 ⁻⁶	186.3 x10 ⁻⁶	209x10 ⁻⁶	227.2x10 ⁻⁶
σ_n (S./m)	181800	131800	100000	75000
k_n (W/m.K)	1.82	1.6	1.45	1.34
α_p (V/K)	132x10 ⁻⁶	168x10 ⁻⁶	205x10 ⁻⁶	223x10 ⁻⁶
σ_p (S./m)	259100	179500	122700	88600
k_p (W/m.K)	2.1	1.82	1.6	1.38

Referans [21] deki grafiklere dayanarak Tellurex firmasının termoelektrik jeneratör modülü için oluşturduğumuz eğrilerden elde ettiğimiz verilerin MATLAB[®] ortamında analizi *Curve Fitting Toolbox*'ı ile gerçekleştirilmiştir. Burada ncelikle Seebeck katsayısının sıcaklığa bağlı grafiği çizdirilip buradan eğrinin denklemine ulaşılmıştır. Bundan sonra elektriksel ve termal iletkenlik için de aynı işlemler tekrarlanmıştır. Bulunan bu denklemler üzerinden voltaj-akım, güç-akım, verim-akım ve verim-g grafiklerine geçilmiştir.

3.1.1 Seebeck Katsayısı-Sıcaklık Grafiği

Tablo 3.1 den dört farklı sıcaklık değeri için n ve p yarı iletkenlerinin Seebeck katsayılarını temsil eden noktalardan geçen en iyi eğriler Şekil 3.1 de gösterilmiştir. Bu eğriler için elde edilen değerler Tablo 3.2 de verilmiştir.



Şekil 3.1: n ve p tipi yarı iletkenlerin Seebeck katsayısının sıcaklığa göre grafiği. (T_{sc}= 300 K)

Tablo 3.2 : Şekil 3.1 de çizdirilen eğrilerin denklemleri ve katsayıları.

Denklem	n tipi	p tipi
	$\alpha_n(T) = p_1 T^2 + p_2 T + p_3$	$\alpha_p(T) = p_1 T^2 + p_2 T + p_3$
Katsayılar	<p>p1 = -1.36×10^{-9}</p> <p>p2 = 1.094×10^{-6}</p> <p>p3 = 2.129×10^{-5}</p>	<p>p1 = -1.8×10^{-9}</p> <p>p2 = 1.43×10^{-6}</p> <p>p3 = -4.3×10^{-5}</p>

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi sıcaklık düştükçe Seebeck katsayısı küçülmekte ve buna bağlı olarak üretilebilecek olan voltajda düşmektedir. Bununla birlikte n yarı iletkeninin p yarı iletkenine göre üretebileceği voltaj daha fazladır.

Literatürde yapılan birçok incelemede malzeme parametrelerinin sıcaklık bağımlılığı sabit alınmıştır. Referans [7]'de yapılan çalışmada ise Seebeck katsayısı, elektriksel ve termal iletkenlik gibi malzeme parametrelerinin sıcaklık bağımlılığını sabit almak yerine ortalama sıcaklık değerlerinden hesaplamanın daha uygun olduğunu savunmuştur. Bu tez çalışmasında malzemenin sıcaklık bağımlılığı ifadeleri ortalama sıcaklıklar kullanılarak hesaplatılmıştır.

Referans [21]'de verilen grafikler n ve p yarı iletkenlerinin mutlak değerleri için verilmiş olup, buradan ifade 3.1 göz önüne alınarak toplam Seebeck katsayısına geçilir.

$$\alpha = |\alpha_n| + |\alpha_p| \quad (3.1a)$$

$$\alpha_{pelet}(T) = -3.16 \times 10^{-9} T^2 + 2.524 \times 10^{-6} T - 2.171 \times 10^{-5} \quad (3.1b)$$

Bu tez çalışmasında Tellurex firmasının termoelektrik jeneratör modülü incelenmiş olup modülün detaylı bilgileri ilerleyen bölümlerde verilecektir. Tellurex firmasının 219 adet n ve p tipi yarı iletken peletten oluşan modülü için ifade 3.1b ve 3.2 kullanılarak jeneratörün toplam Seebeck katsayısı bulunur.

$$\alpha_M(T) = \alpha_{pelet}(T) \times N_{pelet} = \alpha_{pelet}(T) \times 219 \quad (3.2a)$$

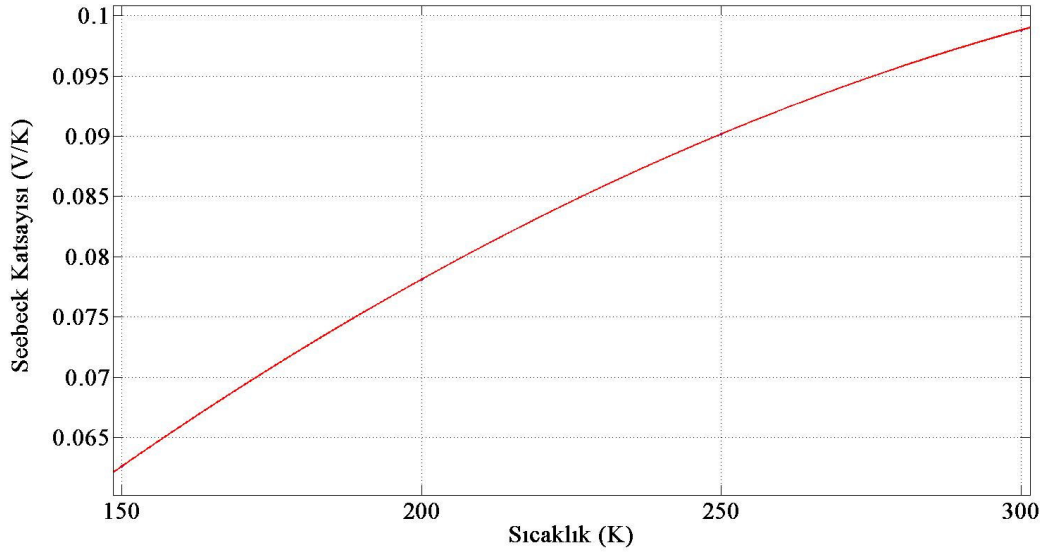
$$\alpha_M(T) = -6.92 \times 10^{-7} T^2 + 5.527 \times 10^{-4} T - 4.754 \times 10^{-3} \quad (3.2b)$$

Tellurex firmasının n ve p yarı iletkenlerinden oluşan modülü için teorik olarak öngörülen toplam Seebeck katsayısının farklı sıcaklıklardaki değerleri Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3: Tellurex firması tarafından geliştirilmiş termoelektrik modülün Seebeck katsayısının farklı sıcaklıklar için teorik olarak öngörülen değerleri.

T (K)	150	200	250	300
α (V/K)	2.85×10^{-4}	3.56×10^{-4}	4.12×10^{-4}	4.51×10^{-4}
$\alpha_M = 219 \times \alpha$ (V/K)	0.0626	0.0781	0.0902	0.0988

Tablo 3.3'deki verilere göre Tellurex firmasının termoelektrik jeneratör modülü için Seebeck katsayısının sıcaklığa bağlı grafikleri Şekil 3.2 deki gibi çizdirilir.

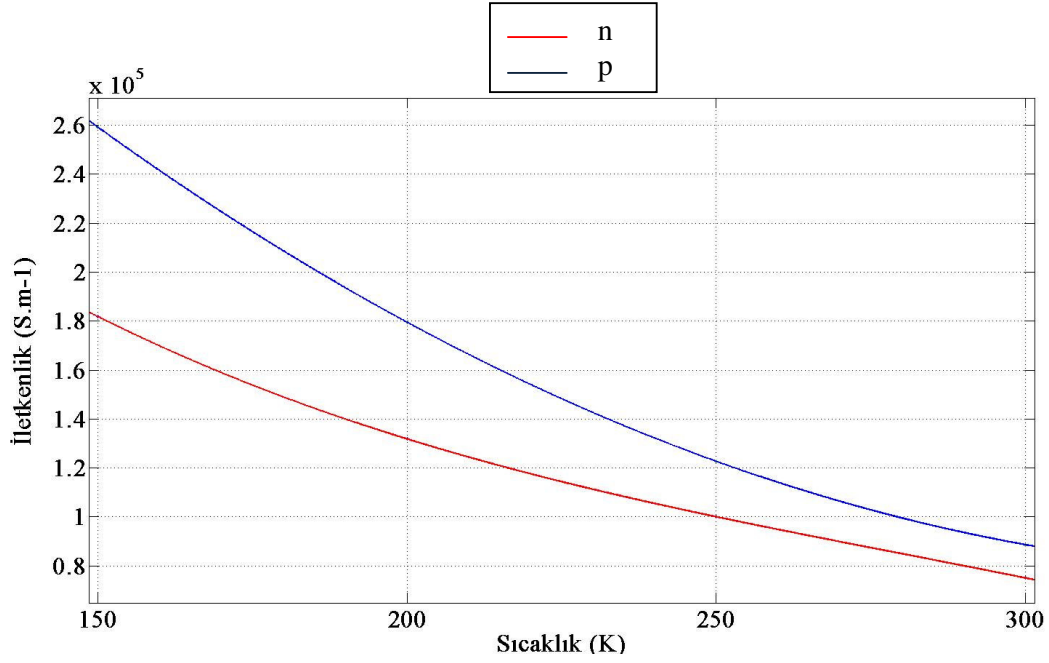


Şekil 3.2: Tellurex firmasının jeneratör modülü için teorik olarak öngörülen Seebeck katsayısının sıcaklıkla değişimi.

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi sıcaklık düştükçe Seebeck katsayısı düşmekte ve üretilebilecek gerilim azalmaktadır.

3.1.2 Elektriksel İletkenlik-Sıcaklık Grafiği

Tablo 3.1'den dört farklı sıcaklık değeri için n ve p yarı iletkenlerinin elektriksel iletkenlik değerlerini temsil eden noktalardan geçen en iyi eğriler Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Bu eğriler için elde edilen değerler Tablo 3.3'de verilmiştir. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi sıcaklık düştükçe iletkenlik artmaktadır.



Şekil 3.3: n ve p yarı iletkenlerinin elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa göre değişim grafiği. ($T_{sc}= 300$ K)

Tablo 3.4 : Şekil 3.3 de çizdirilen eğrilerin denklemleri, katsayıları.

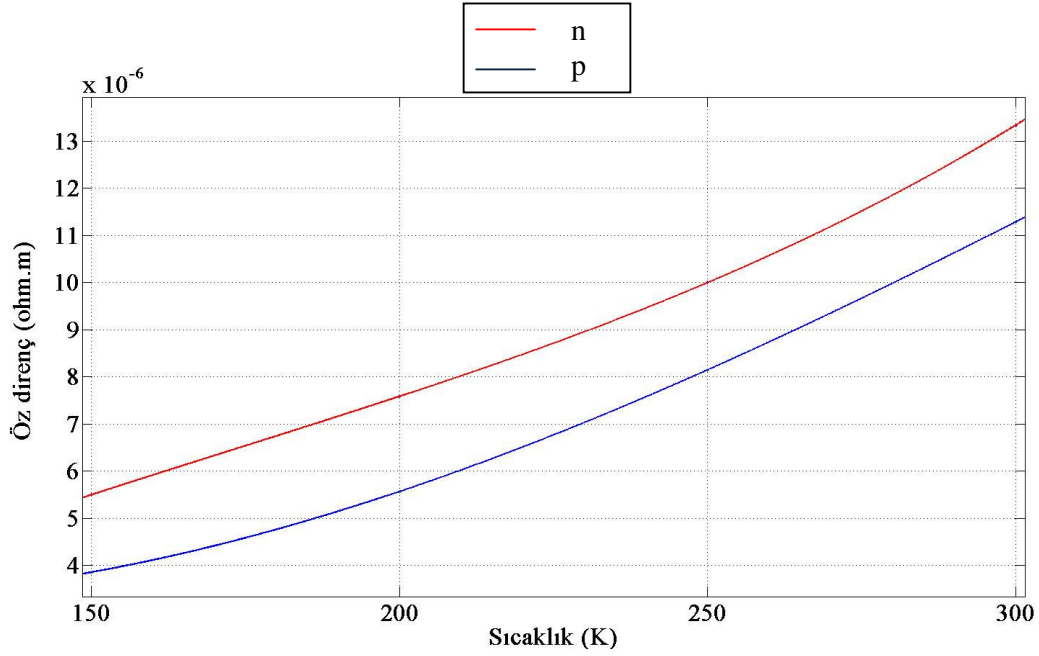
<u>Denklem</u>	n tipi	p tipi
	$\sigma_n(T) = p_1T^3 + p_2T^2 + p_3T + p_4$	$\sigma_p(T) = p_1T^3 + p_2T^2 + p_3T + p_4$
<u>Katsayılar</u>	<p>p1 = -0.0152</p> <p>p2 = 12.76</p> <p>p3 = -4060</p> <p>p4 = 5.55×10^5</p>	<p>p1 = -0.0001333</p> <p>p2 = 4.64</p> <p>p3 = -3204</p> <p>p4 = 6.357×10^5</p>

3.1.3 Öz direnç-Sıcaklık Grafiği

Tablo 3.1'den dört farklı sıcaklık değeri için n ve p yarı iletkenlerinin elektriksel iletkenlik değerlerini temsil eden değerler alınarak ifade 3.3a ve 3.3b de kullanılmış ve Şekil 3.6'de gösterilen eğriler elde edilmiştir. Bu eğriler için elde edilen değerler Tablo 3.4'de verilmiştir.

$$\rho_n = \frac{1}{\sigma_n} \quad (3.3a)$$

$$\rho_p = \frac{1}{\sigma_p} \quad (3.3b)$$



Şekil 3.4: n ve p yarı iletkenlerini için öz direncin sıcaklığa göre grafiği. ($T_{sc}=300$ K)

Şekil 3.4’de görüldüğü gibi sıcaklık düştükçe öz direnç düşmektedir. p yarı iletkeni n yarı iletkenine göre elektriği daha iyi iletmektedir.

Tablo 3.5 : Şekil 3.4 de çizdirilen eğrilerin denklemleri, katsayıları.

Denklem	n tipi	p tipi
	$\rho_n(T) = p_1T^3 + p_2T^2 + p_3T + p_4$	$\rho_p(T) = p_1T^3 + p_2T^2 + p_3T + p_4$
<u>Katsayılar</u>	<p>$p1 = 7.927 \times 10^{-13}$</p> <p>$p2 = -4.104 \times 10^{-10}$</p> <p>$p3 = 1.121 \times 10^{-7}$</p> <p>$p4 = -4.749 \times 10^{-6}$</p>	<p>$p1 = -4.128 \times 10^{-13}$</p> <p>$p2 = 4.212 \times 10^{-10}$</p> <p>$p3 = -7.5 \times 10^{-8}$</p> <p>$p4 = 7.026 \times 10^{-6}$</p>

İfade 2.19 kullanılarak peletin iç direnci hesaplanır. Tellurex firmasının n ve p yarı iletkenleri boyutlarını 1.4x1.4x1.4 (mm) şeklinde vermiştir. n ve p tipi yarı iletkenlerin boyutları aynı olduğundan bir pelet için direnç bulurken n ve p için toplam öz direncin verilen boyutlar ile çarpılması yeterli olacaktır. İfade 3.4 de toplam öz direnç verilmiştir. Bir peletin direnci bulunduktan sonra bu değeri pelet sayısı ile çarparak modülün toplam iç direnci bulunur. Tablo 3.6 da Tellurex firması için teorik olarak öngörülen iç direncin farklı sıcaklıklar için değerleri verilmiştir.

$$\rho(T) = 3.799 \times 10^{-13} T^3 + 0.108 \times 10^{-10} T^2 + 3.71 \times 10^{-8} T + 2.277 \times 10^{-6} \quad (3.4a)$$

$$R_{pelet}(T) = \rho(T) \times \frac{L}{A} = \rho(T) \times \frac{1.14 \times 10^3}{1.4 \times 1.4} \quad (3.4b)$$

$$R_{pelet}(T) = 2.209 \times 10^{-10} T^3 + 6.281 \times 10^{-9} T^2 + 2.157 \times 10^{-5} T + 1.324 \times 10^{-3} \quad (3.4c)$$

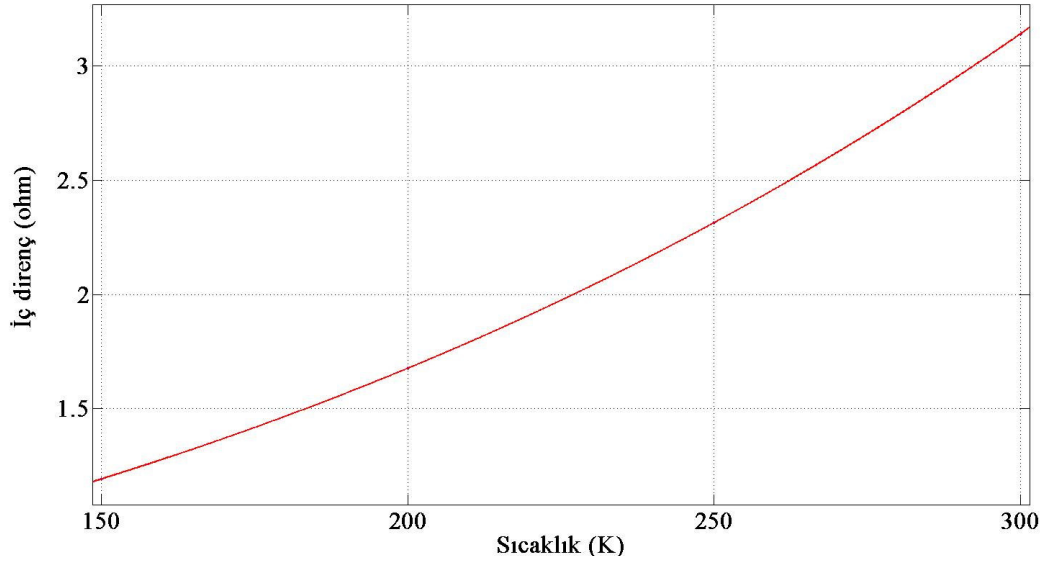
$$R_i(T) = R_{pelet} \times N_{pelet} = R_{pelet} \times 219 \quad (3.4d)$$

$$R_i(T) = 4.84 \times 10^{-8} T^3 + 1.375 \times 10^{-6} T^2 + 4.724 \times 10^{-3} T + 0.289 \quad (3.4e)$$

Tablo 3.6: Tellurex firması için teorik olarak öngörülen iç direncin farklı sıcaklıklara göre değişimi.

T (K)	150	200	250	300
R_{pelet} (Ω)	5.45×10^{-3}	7.66×10^{-3}	0.00106	0.0143
$R_i = 219 \times R_{pelet}$ (Ω)	1.1932	1.6773	2.3136	3.1381

Tablo 3.6'deki verilere göre iç dirençlerin sıcaklığa bağlı grafiği Şekil 3.5'deki gibi çizdirilir.

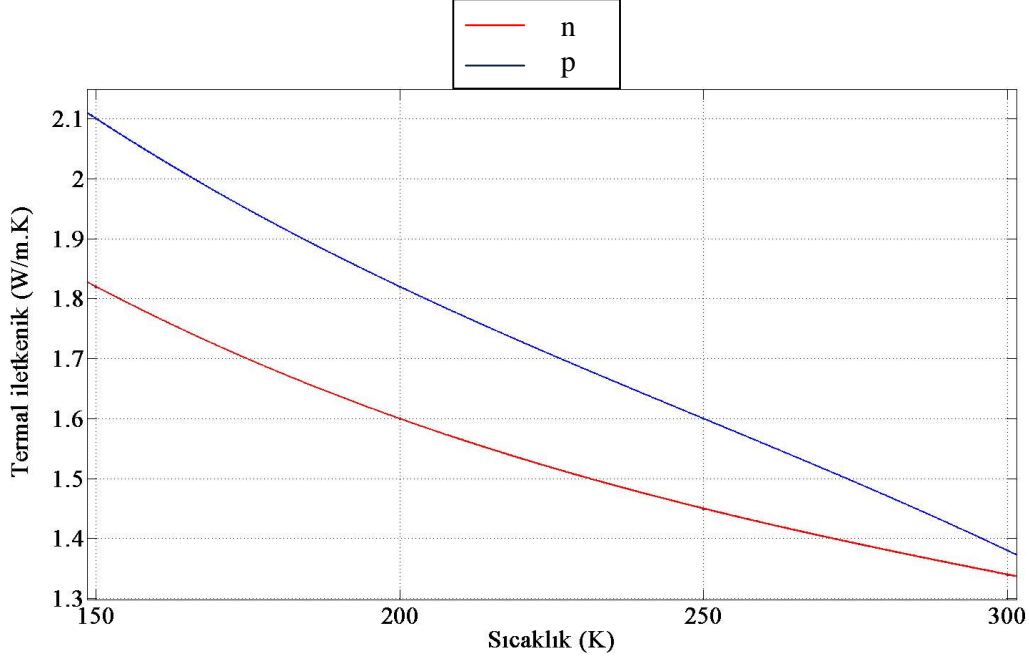


Şekil 3.5 : Tellurex firmasının jeneratör modülü için teorik olarak öngörülen iç direncin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 3.5'de görüldüğü gibi sıcaklık düştükçe iç direnç düşmektedir. İç direncin düşmesiyle Joule kayıpları azalmakta ve kullanılabilir olan güç artmaktadır.

3.1.4 Termal iletkenlik-Sıcaklık Grafiği

Tablo 3.1'den dört farklı sıcaklık değeri için n ve p yarı iletkenlerinin termal iletkenlik değerlerini temsil eden noktalardan geçen en iyi eğriler Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Bu eğriler için elde edilen değerler Tablo 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.6: n ve p yarı iletkeninin termal iletkenliğinin sıcaklığa göre grafiği. ($T_{sc}=300K$)

Tablo 3.7 : Şekil 3.6'da çizdirilen eğrilerin denklemleri, katsayıları ve ortalama sapma değerleri.

Denklem	n tipi	p tipi
	$k_n(T) = p_1T^3 + p_2T^2 + p_3T + p_4$	$k_p(T) = p_1T^3 + p_2T^2 + p_3T + p_4$
Katsayılar	<p>$p_1 = -4 \times 10^{-8}$</p> <p>$p_2 = 3.8 \times 10^{-5}$</p> <p>$p_3 = -0.014$</p> <p>$p_4 = 3.2$</p>	<p>$p_1 = -8 \times 10^{-8}$</p> <p>$p_2 = 6 \times 10^{-5}$</p> <p>$p_3 = -0.0192$</p> <p>$p_4 = 3.9$</p>

Şekil 3.6’da görüldüğü gibi sıcaklık düşmesi ile termal iletkenlik artmakta buna bağlı Z değerini küçültmektedir bu termoelektrik malzemede istenmeyen bir durumdur. n yarı iletkeni p yarı iletkenine göre daha yüksek Z değerine sahiptir.

İfade 2.9 kullanılarak peletin termal iletkenliği hesaplanır. Tellurex firmasının n ve p yarı iletkenleri boyutlarını 1.4x1.4x1.14 (mm) şeklinde vermiştir. n ve p tipi yarı iletkenlerin boyutları aynı olduğundan bir pelet için termal iletkenlik bulurken n ve p için toplam termal iletkenliğin verilen boyutlar ile çarpılması yeterli olacaktır. İfade 3.5’de toplam termal iletkenlik verilmiştir. Bir peletin termal iletkenliği bulunduğundan sonra bu değeri pelet sayısı ile çarparak modülün toplam termal iletkenliği bulunur. Tablo 3.8’de Tellurex firması için teorik olarak öngörülen termal iletkenliğin farklı sıcaklıklar için değerleri verilmiştir.

$$k(T) = -12 \times 10^{-8} T^3 + 9.8 \times 10^{-5} T^2 - 0.0332T + 7.1 \quad (3.5a)$$

$$K_{pelet}(T) = k(T) \frac{A}{L} = k(T) \times \frac{1.4 \times 1.4 \times 10^{-3}}{1.14} \quad (3.5b)$$

$$K_{pelet}(T) = -2.06 \times 10^{-10} T^3 + 1.685 \times 10^{-7} T^2 - 5.7 \times 10^{-5} T + 0.0122 \quad (3.5c)$$

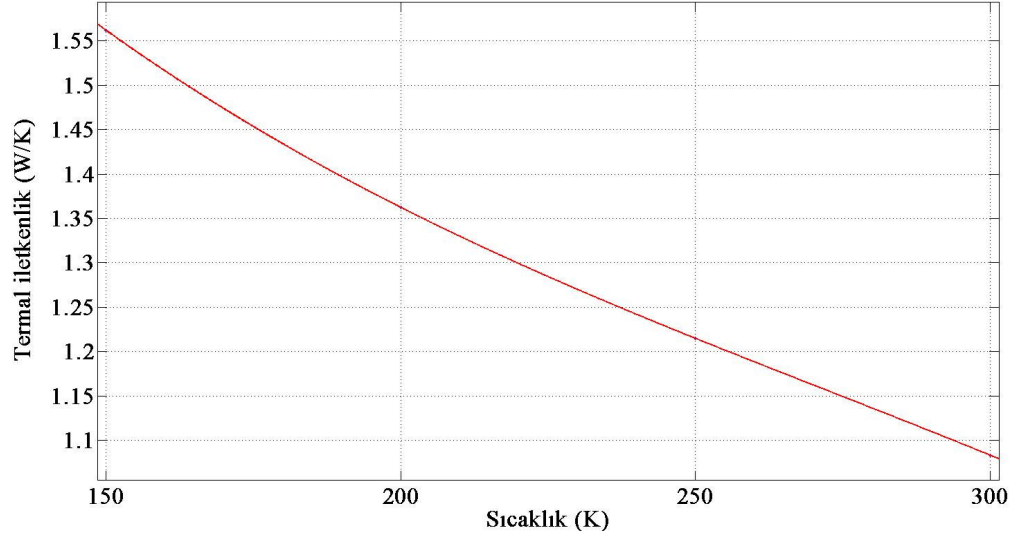
$$K(T) = K_{pelet} \times N_{pelet} = K_{pelet} \times 219 \quad (3.5d)$$

$$K(T) = -4.51 \times 10^{-8} T^3 + 3.69 \times 10^{-5} T^2 - 0.0125T + 2.672 \quad (3.5e)$$

Tablo 3.8: Tellurex firması için teorik olarak öngörülen termal iletkenliğin farklı sıcaklıklara göre değişimi.

T (K)	150	200	250	300
K_{pelet} (W/K)	0.0071	0.0062	0.0055	0.0049
$K = 219 \times K_{pelet}$ (W/K)	1.5615	1.3624	1.2150	1.0835

Tablo 3.8 deki verilere göre iç dirençlerin sıcaklığa bağlı grafiği Şekil 3.7 deki gibi çizdirilir.



Şekil 3.7: Tellurex firmasının jeneratör modülü için teorik olarak öngörülen iç direncin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 3.7’de görüldüğü gibi sıcaklık düştükçe termal iletkenlik yükseltmekte ve buna bağlı olarak Tellurex jeneratör modülünün Z değeri düşmektedir.

3.2 Tellurex Termoelektrik Jeneratör Modülü için Teorik Karakterizasyon

Seebeck katsayısı, elektriksel ve termal iletkenlik gibi malzeme parametrelerinin ortalama sıcaklıkların fonksiyonu olacak şekilde matematiksel olarak bir önceki bölümde çıkartılmıştı. Bu malzeme parametreleri ile ikinci bölümde verilen matematiksel ifadeler birlikte kullanılarak, teorik olarak termoelektrik jeneratörün karakterizasyonunu verecek olan bazı önemli grafiklerin çizdirilmesi sağlanmıştır. Bu grafikler; voltaj-akım, güç-akım, verim-akım ve verim-güç olarak verilebilir. Bu grafikler çizilirken $T_{sc}=300$ K değeri sabit tutularak sıcak soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı ΔT 'nin 50, 100, 150, 200 K olması durumları incelenecektir.

3.2.1 Voltaj-Akım Grafiği

İfade 2.16'da verilen voltaj eşitliğine Seebeck katsayısını katarak ve tek bir pelet için değeri ifade 3.6

$$V = V_0 - IR_i = \int_{T_{sg}}^{T_{sc}} \alpha_M(T) dT - IR_i \quad (3.6)$$

olarak yazılır. $T_{sc}=300$ K olması durumu için T_{sg} değerleri 250, 200, 150, 100 K olarak çizdirilecektir. Voltaj-akım grafikleri ifade 3.6'da görüldüğü $V = a-bI$ şeklinde lineer doğrular oluşturacaktır. R_i değerinin hesabı için ortalama pelet sıcaklığı esas alınmıştır. Bununla birlikte daha önce bulunan malzeme parametrelerini sıcaklığa bağlı parametrelerini tekrar yazmak faydalı olacaktır.

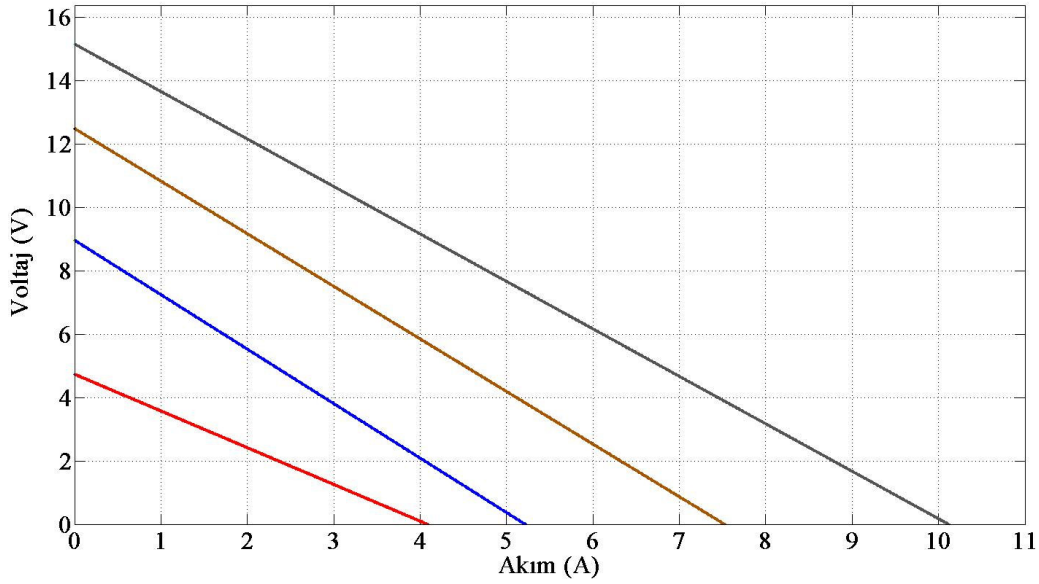
$$\alpha_M(T) = -6.92 \times 10^{-7} T^2 + 5.527 \times 10^{-4} T - 4.754 \times 10^{-3}$$

$$R_i(T) = 4.84 \times 10^{-8} T^3 + 1.375 \times 10^{-6} T^2 + 4.724 \times 10^{-3} T + 0.289$$

Tablo 3.9'da $T_{sc}=300$ K sabit alınarak farklı sıcaklar için voltaj-akım eşitlikleri yazılmıştır. Tablo 3.9 oluşturulurken Tellurex firmasının jeneratör modülü için 219 peletten oluştuğu göz önüne alınarak voltaj-akım eşitlikleri verilmiştir. Bu eşitliklerden yararlanarak Şekil 3.8'de verilen voltaj-akım grafikleri çizilmiştir.

Tablo 3.9: Tellurex firması için teorik olarak öngörülen ve $T_{sc}=300$ K sabit olması koşuluyla farklı ΔT 'ler için V-I denklemleri.

Sıcaklık (K) ($T_{sc}=300$ K sabit)				Denklem
—	$T_{sg}=250$	$\Delta T=50$	$\bar{T} = 275$	$V= 4.7304 - 2.6937xI$
—	$T_{sg}=200$	$\Delta T=100$	$\bar{T} = 250$	$V= 8.9571 - 2.3214xI$
—	$T_{sg}=150$	$\Delta T=150$	$\bar{T} = 225$	$V= 12.483 - 1.971xI$
—	$T_{sg}=100$	$\Delta T=200$	$\bar{T} = 200$	$V= 15.1548 - 1.6863xI$



Şekil 3.8: Tellurex firmasının jeneratör modülü için teorik olarak öngörülen voltaj-akım grafiği.

Şekil 3.8'de sıcaklık farkının artması ile voltaj ve akım değerinin arttığı görülmektedir.

3.2.2 Güç-Akım Grafiği

İfade 3.6'nın akım ile çarpılması sonucu güç elde edilir ve ifade 3.7

$$P = I \times (V_0 - IR_i) = I \times \int_{T_{sg}}^{T_{sc}} \alpha_M(T) dT - I^2 R_i \quad (3.7)$$

olarak yazılır. Daha önce değinildiği gibi $R_i(T)$ fonksiyonundaki \bar{T} değeri ortalama sıcaklık olarak alınmıştır. $\alpha(T)$ değeri $T_{sc}=300$ K durumu için T_{sg} değeri 250, 200, 150, 100 K değeri için çizilecektir. Bununla birlikte daha önce bulunan malzeme parametrelerinin sıcaklığa bağlı parametrelerini tekrar yazmak faydalı olacaktır.

$$\alpha_M(T) = -6.92 \times 10^{-7} T^2 + 5.527 \times 10^{-4} T - 4.754 \times 10^{-3}$$

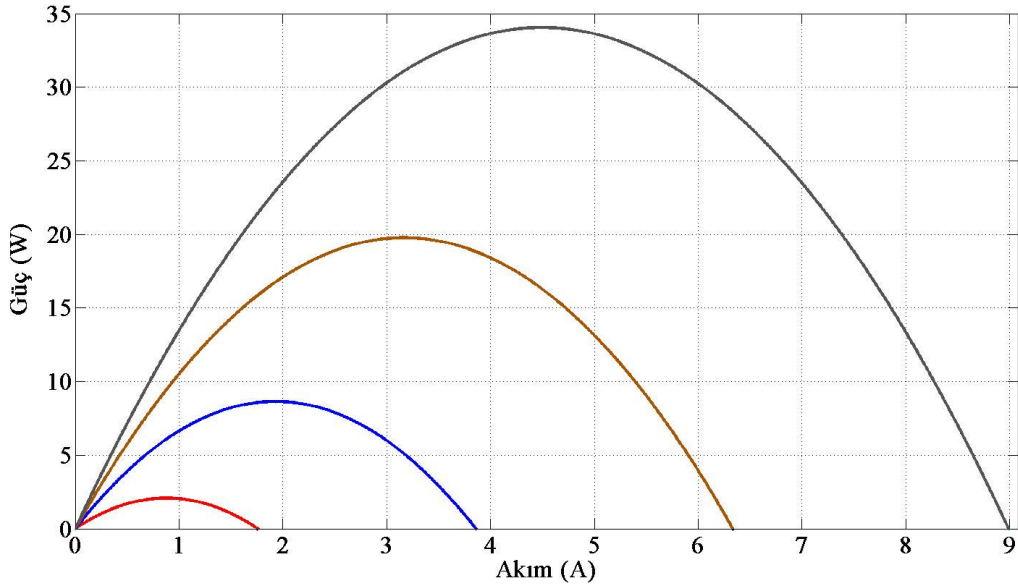
$$R_i(T) = 4.84 \times 10^{-8} T^3 + 1.375 \times 10^{-6} T^2 + 4.724 \times 10^{-3} T + 0.289$$

Güç-akım grafikleri ifade 3.7'de görüldüğü gibi $y = ax^2 + bx + c$ şeklinde ikinci dereceden bir denklemi temsil etmektedir. Bununla birlikte daha önceki ifade 3.1b, 3.4c ve 3.5c deki malzeme parametrelerine bağlı eşitlikler kullanılmıştır.

Tablo 3.10'da $T_{sc}=300$ K sabit alınarak farklı sıcaklıklar için güç-akım eşitlikleri yazılmıştır. Bu eşitliklerde I_{kd} ifade 2.30'den, I ifade 2.34'den ve P_{mak} ifade 2.35'den bulunur. Tablo 3.10 oluşturulurken, Tellurex firmasının jeneratör modülünün 219 peletten oluştuğu göz önüne alınarak güç-akım eşitlikleri verilmiştir. Bu eşitliklerden yararlanarak şekil 3.9'da verilen güç-akım grafikleri çizilmiştir.

Tablo 3.10: Tellurex firması için teorik olarak öngörülen ve $T_{sc}=300$ K sabit olması koşuluyla farklı ΔT 'ler için P-I denklemleri, P_{mak} ve I_{kd} değerleri.

Sıcaklık (K) ($T_{sc}=300$ K sabit)				Denklem	I_{kd} (A)	P_{mak} (W)	I' (A)
—	$T_{\text{öğ}}=250$	$\Delta T=50$	$\bar{T}=275$	$P= 4.7304xI$ $- 2.6937xI^2$	1.756	2.076	0.878
—	$T_{\text{öğ}}=200$	$\Delta T=100$	$\bar{T}=250$	$P= 8.9571xI$ $- 2.3214xI^2$	3.858	8.640	1.929
—	$T_{\text{öğ}}=150$	$\Delta T=150$	$\bar{T}=225$	$P= 12.483xI$ $- 1.971xI^2$	6.332	19.765	3.166
—	$T_{\text{öğ}}=100$	$\Delta T=200$	$\bar{T}=200$	$P= 15.1548xI$ $-1.6863xI^2$	8.988	34.049	4.494



Şekil 3.9: Tellurex firmasının jeneratör modülü için teorik olarak öngörülen güç-akım grafiği.

3.2.3 Verim-Akım Grafiği

İfade 2.21 kullanılarak verim ifadesi bulunur. Burada güç değerinin ifade 3.7'deki gibi yazılması işlemlerde kolaylık sağlayacaktır. Bununla birlikte ifade 2.7'de ısı ifadesi sıcak taraf için verildiğinden, Seebeck katsayısı ve termal iletkenlik terimlerinin sıcaklık değerleri T_{sc} değerini alır ve iç direnç R_i ise ortalama sıcaklık değerini alır. Verim değeri ifade 3.8 deki gibi tekrar tanımlanmıştır.

$$\eta_i = \frac{P_0}{\dot{Q}_{sc}} = \frac{I(V_0 - IR_i)}{K(T_{sc})\Delta T + \alpha_M(T_{sc})T_{sc}I - \frac{1}{2}I^2R_i(T)} \quad (3.8)$$

Bununla birlikte daha önce bulunan malzeme parametrelerinin sıcaklığa bağlı parametrelerini tekrar yazmak faydalı olacaktır.

$$\alpha_M(T) = -6.92 \times 10^{-7} T^2 + 5.527 \times 10^{-4} T - 4.754 \times 10^{-3}$$

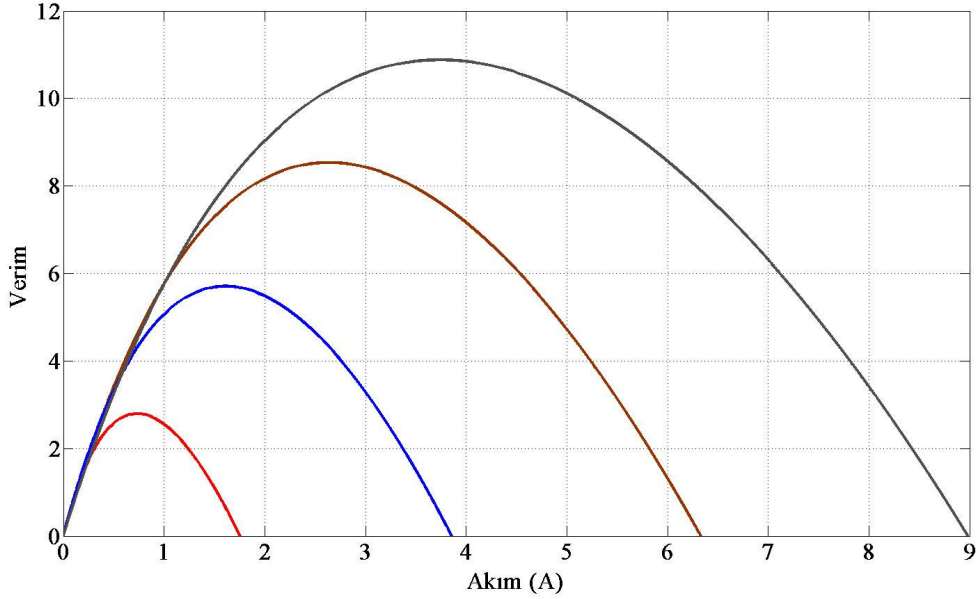
$$R_i(T) = 4.84 \times 10^{-8} T^3 + 1.375 \times 10^{-6} T^2 + 4.724 \times 10^{-3} T + 0.289$$

$$K(T) = -4.51 \times 10^{-8} T^3 + 3.69 \times 10^{-5} T^2 - 0.0125 T + 2.672$$

$T_{sc}=300$ K olması durumu için $T_{sđ}$ 250, 200, 150, 100 K değerleri için çizilecektir. Tablo 3.11'deki akımın farklı değerleri için Şekil 3.10'de verilen verim-akım grafiği çizdirilmiştir. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi verimin maksimum değeri aldığı nokta maksimum gücün çekildiği nota değildir, bu nedenle maksimum gücün çekildiği noktadaki akım değeri olan I' değeri yerine akım değeri daha düşük bir değer almıştır. Bu nedenle güç-akım grafiğinden farklı olarak verim-akım grafiği simetrik olarak dağılmamıştır.

Tablo 3.11: Tellurex firması için teorik olarak öngörülen ve $T_{sc}=300$ K sabit olması koşuluyla farklı ΔT 'ler için Verim denklemleri, P_{mak} ve I_{kd} değerleri.

Sıcaklık (K) ($T_{sc}=300$ K)			Verim
—	$\Delta T=50$	$\bar{T} = 275$	$\eta_t = \frac{4.7304 \times I - 2.6937 \times I^2}{51.265 + 29.64 \times I - 1.3468 \times I^2}$ $P_{mak} = 2.076 \text{ (W)} \quad I' = 0.878 \text{ (A)} \quad I_{kd} = 1.756 \text{ (A)}$
—	$\Delta T=100$	$\bar{T} = 250$	$\eta_t = \frac{8.9571 \times I - 2.3214 \times I^2}{102.53 + 29.64 \times I - 1.16 \times I^2}$ $P_{mak} = 8.640 \text{ (W)} \quad I' = 1.929 \text{ (A)} \quad I_{kd} = 3.858 \text{ (A)}$
—	$\Delta T=150$	$\bar{T} = 225$	$\eta_t = \frac{12.483 \times I - 1.971 \times I^2}{153.795 + 29.64 \times I - 0.98 \times I^2}$ $P_{mak} = 19.765 \text{ (W)} \quad I' = 3.166 \text{ (A)} \quad I_{kd} = 6.332 \text{ (A)}$
—	$\Delta T=200$	$\bar{T} = 200$	$\eta_t = \frac{15.1548 \times I - 1.6863 \times I^2}{205.06 + 29.64 \times I - 0.84 \times I^2}$ $P_{mak} = 34.049 \text{ (W)} \quad I' = 4.494 \text{ (A)} \quad I_{kd} = 8.988 \text{ (A)}$



Şekil 3.10: Tellurex firmasının jeneratör modülü için teorik olarak öngörülen verim-akım grafiği.

3.2.4 Verim-Güç Grafiği

Verim-güç grafiği çizmek için akımı gücün fonksiyonu şeklinde tanımlamak gerekir. İfade 3.7’de verilen güç ifadesini tekrar yazarak buradan akımı çekerek ikinci dereceden bir denklem ifade 3.9’deki gibi olur.

$$I^2 R_i - IV + P = 0 \quad (3.9)$$

Buradan ifade 3.9’da verilen ikinci dereceden denklemin kökleri akım için bulunarak uygun kök seçilmelidir.

$$I(P)_{1,2} = \frac{V_0 \mp \sqrt{1 - \frac{4R_i}{V_0^2} \times P}}{2R_i} \quad (3.10a)$$

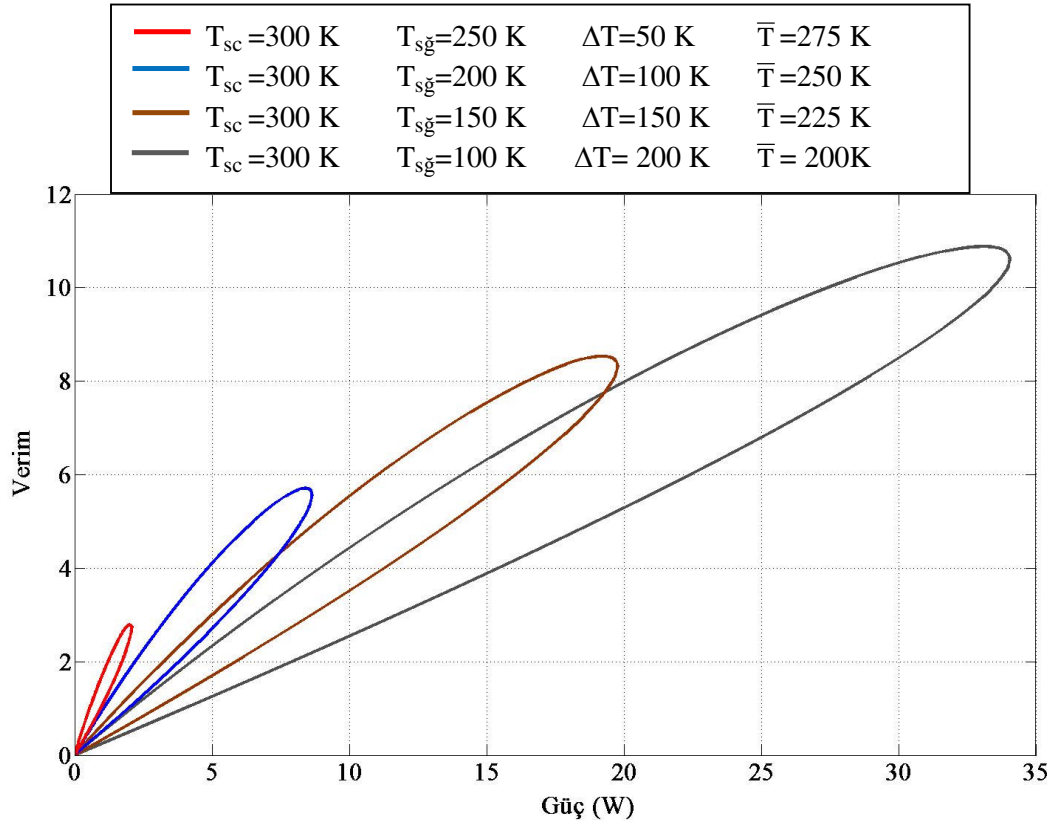
İfade 3.10a V_0 ortak parantezine alınırsa;

$$I(P)_{1,2} = \frac{1 \mp \sqrt{1 - \frac{P}{P_{mak}}}}{\frac{2R_i}{V_0}} \quad (3.10b)$$

olarak yazılır.

Akım ifadesini gücün fonksiyonu olarak tanımlayan 3.10b ifadesini ifade 3.8’de yerine koyar ve daha önce elde ettiğimiz malzeme parametrelerinin sıcaklığa bağımlı ifadelerini de göz önüne alarak verim-güç grafiği Şekil 3.11’de verildiği gibi çizilmiştir.

Şekil 3.11’de görüldüğü gibi verim gücün artması ile birlikte artmakta ve belirli bir değerden sonra azalmaya başlamaktadır. Gücün maksimum olduğu noktada verim maksimum olmamaktadır. Akım değeri gücün fonksiyonu olarak verilmiş ve artı ve eksi değerleri almaktadır.



Şekil 3.11: Tellurex firmasının jeneratör modülü için teorik olarak öngörülen verim-güç grafiği.

4.TERMoeLEKTRİK JENERATÖR MODÜLÜNÜN DENEYSEL KARAKTERİZASYONU

Bu bölümde daha önceki bölümlerde tanımlanan termoelektrik jeneratörün teorik değerlerinin gerçek çalışma koşullarında nasıl değiştiğini gösteren karakterizasyon testleri yapılacaktır.

4.1 Deney Sisteminin Tanıtımı: Bileşenler, Ölçüm Sistemi ve Özellikleri

4.1.1 Isı Rezervuarları

Termoelektrik jeneratörlerin Seebeck etkisine göre gerilim indükleyebilmesi için yüzeyleri arasında sıcaklık farkının yaratılması gerektiğini söylenmişti. Çalışmanın amacı olan termoelektrik modüllerin kriyojenik sıcaklıklardaki karakterizasyonunu çıkarmak olduğundan soğuk rezervuar olarak sıvı azot kullanılmıştır. Sıcak rezervuar olarak varyyak trafo üzerinden kontrol edilebilen bir ısıtıcı sistemi kullanılmıştır.

Soğuk rezervuar oluşturmak için ısı iletim katsayısı yüksek bakırdan yaptırılan bir blok kullanılmıştır. Devar kabının boğaz çapı ve yüksekliği göz önüne alınarak 6 cm çapında 53 cm boyunda içi dolu bakır bir bloğa 12 x 16 x 1 cm boyutlarında bir bakır plaka gümüş kaynağı ile kaynak yapılarak masif bir yapı oluşturulmuştur. Bakır plakanın ortası oyularak yapılan bu kaynakla maksimum düzeyde termal kontak sağlanmıştır. Deneyler esnasında devar kabının iç basıncının dengede tutulması ve buharlaşan havanın rahatça tahliye olması için bakır bloğun altına 1.8 cm kalınlığında strafor yalıtım malzemesi yerleştirilip hava kanalı açılmıştır. Şekil 4.1’de soğuk rezervuarı oluşturacak olan sıvı azotu tutan devar kabı, oda koşullarında bakır kaptaki buharlaşan sıvı azot ve soğuk rezervuar gözükmektedir.



(a)



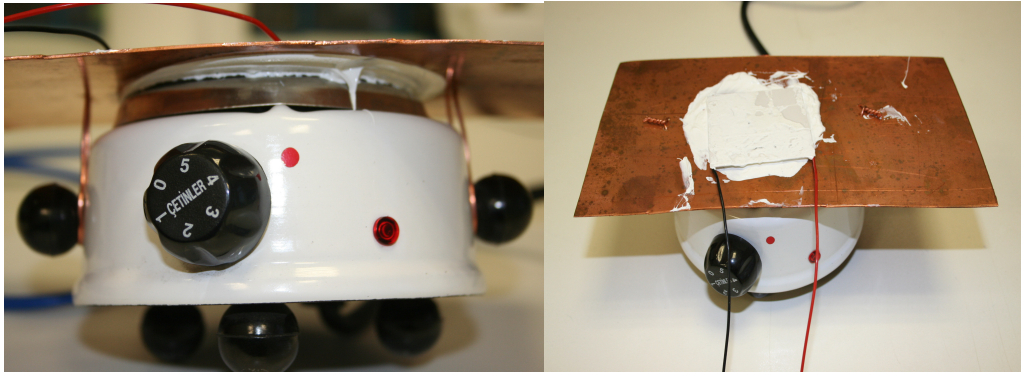
(b)



(c)

Şekil 4.1 : (a) Dewar kabı (b) Oda koşullarındaki bakır kaptaki buharlaşan azot (c)Soğuk rezervuar.

Sıcak rezervuar için kontrol edilebilen bir ısıtıcı sistemi düşünülmüştür. TEG modülün üst yüzeyi ayarlanabilir ısıtıcı sayesinde değişik sıcaklık aralıklarında test yapma olanağı sunmaktadır. Şekil 4.2’de sıcak rezervuarın bileşenleri gösterilmiştir. Elektrikli ısıtıcı yüzeyi ısı transferinin TEG yüzeyinde homojen bir şekilde iletilebilmesi için TEG yüzey alanı olan 54x54 mm boyutlarına uygun olarak seçilmiştir. Isıtıcının yüzeyinin pürüzlü olması nedeniyle üzerine bakır plaka monte edilmiş ve termal kontak kayıpları ısı pastası kullanılarak minimize edilmeye çalışılmıştır. Isıtıcının gerilimi 3.5 kW gücündeki variak trafo ile kontrol edilerek sistemin istenen sıcaklık değerleri arasında çalışması hedeflenmiştir.



(a)

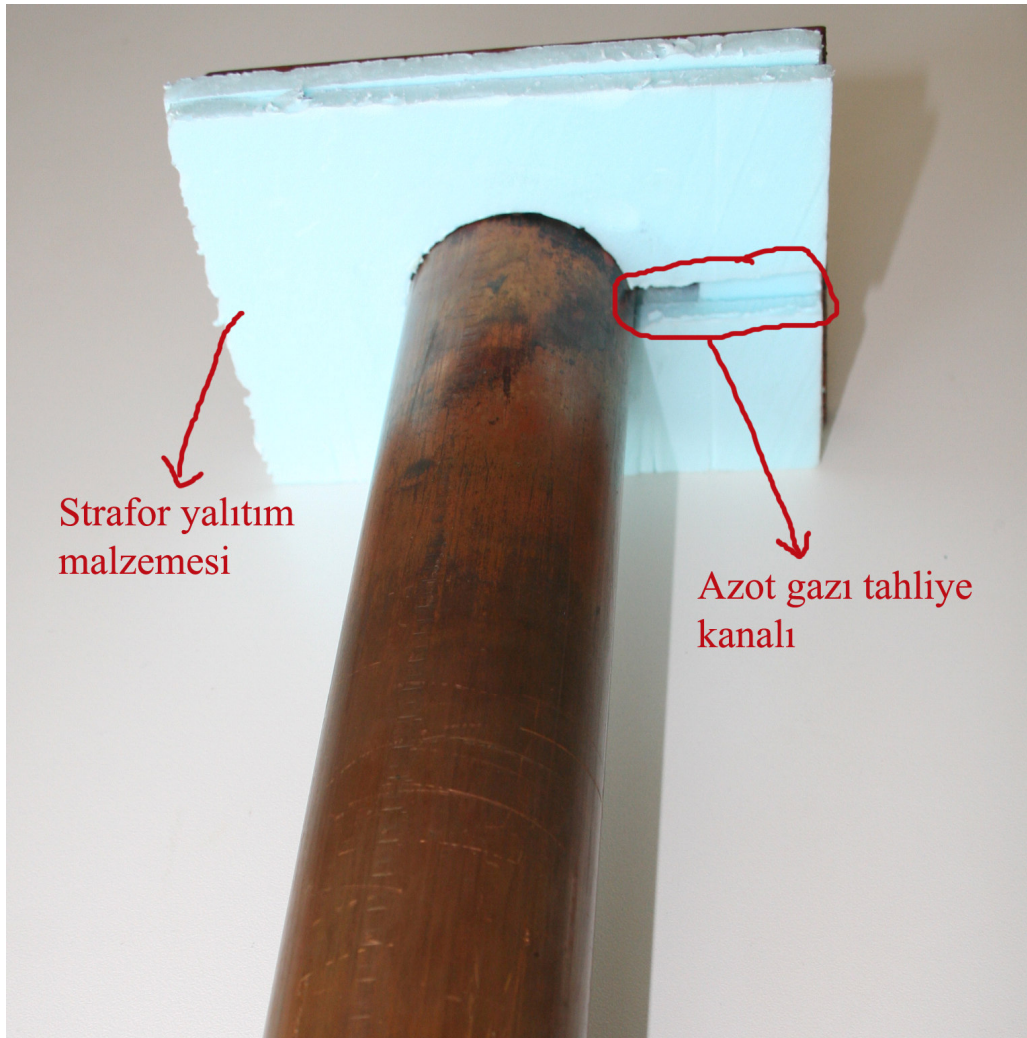


(b)

Şekil 4.2 : (a) Isıtıcı ve bakır plaka (b) 3.5 kW variak trafo.

4.1.2 Ara Malzemeler

Ara malzemeler olarak bakır blok ile devar kabı arasına konulan strafor yalıtım malzemesi ve termal iletkenliği sağlayan silikon ısı pastası kullanılmıştır. şekil 4.3'de strafor yalıtım malzemesi bakır bloğun boyutlarına göre kesilmiş ve azot gazının tahliye edilmesi için ayrıca bir kanal açılmıştır. Strafor malzemesi ile devar kabında azot gazının kaybı nlenmiş olup, devar kabı iç basıncının dış ortam basıncı ile dengede kalmasını sağlayacak tahliye kanalı da önemli bir işleve sahiptir.



şekil 4.3 : Strafor yalıtım malzemesinin bakır blok üstündeki yeri.

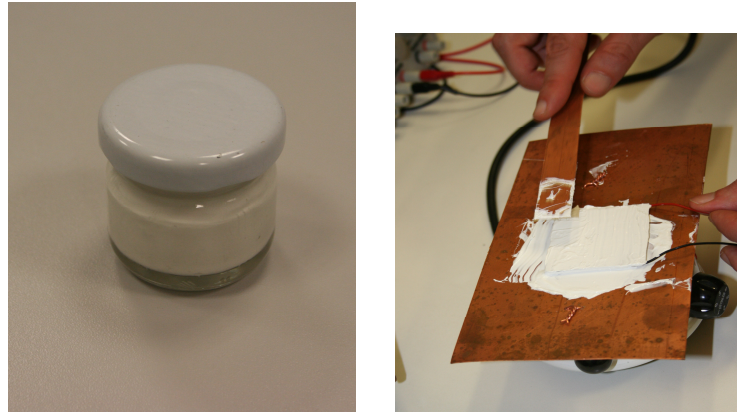
Termal iletkenliği arttırmak için silikon ısı pastası kullanılmıştır. Isı pastasının genel özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 : Silikon ısı pastasının özellikleri.

Termal iletkenlik (W/m-K)	Çalışma Aralığı (°C)	Elektriksel iletkenlik (ohm-cm)	Renk
0.92	-40 dan 250’ye	1.65×10^{14}	Beyaz

Isı pastasının kullanıldığı yerler ;

- 1) Isıtıcı ile bakır plaka arasında.
- 2) Termal çiftlerin TEG ile temas ettiği sıcak, soğuk yüzeyler ve bakır blok ile temas ettiği bölgeler.
- 3) TEG’in sıcak ve soğuk rezervuar ile temas ettiği yüzeyler.



şekil 4.4 : Silikon ısı pastası.

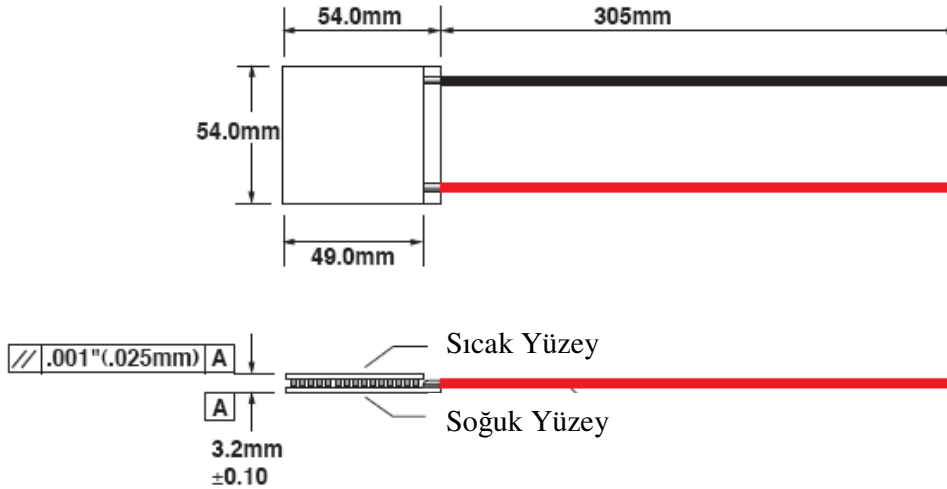
4.1.3 Termoelektrik Jeneratör Modülleri

Karakterizasyonda kullanılacak olan termoelektrik modülleri Bi_2Te_3 (Bismuth Telluride) tabanlı yarı iletken malzemesinden üretilmiştir. Tellurex firmasının jeneratör modülü toplam 219 adet termoelektrik p-n peletten oluşmaktadır.

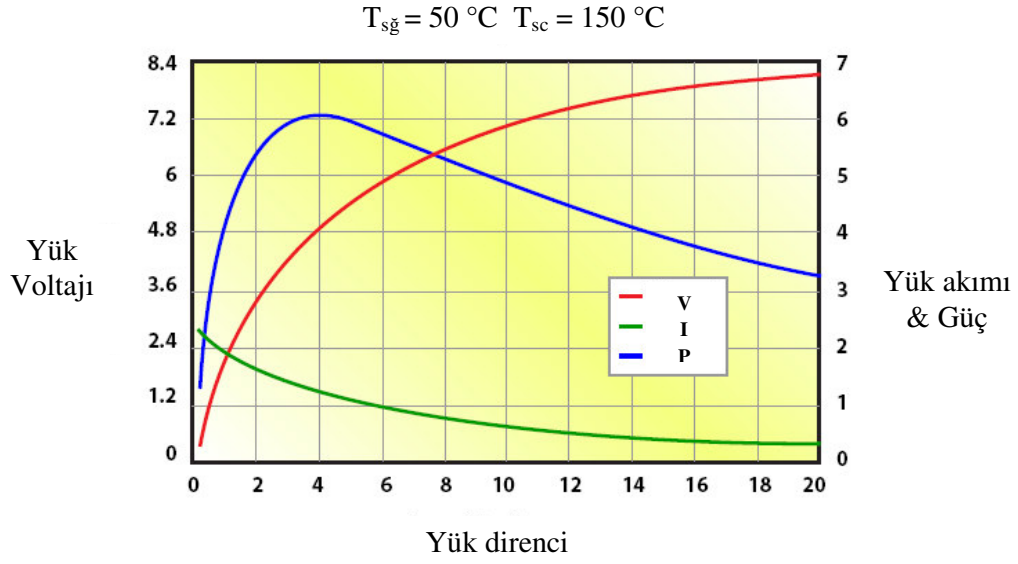
Tablo 4.2’de Tellurex firması tarafından verilen katalog değerleri gösterilmiştir. Bu değerlere göre TEG modül 4.8 V ve 1.2 A ile 5.2 W güç üretecek şekilde pelet çiftleri kendi aralarında seri veya paralel bağlanarak jeneratör dizaynı yapılmıştır. Şekil 4.3’de TEG modülün boyutları verilmiş, Şekil 4.4’de modülün performans grafiği gösterilmiştir.

Tablo 4.2: Tellurex termoelektrik jeneratör modülünün katalog değerleri[14].

Güç (W)	Akım (A)	Voltaj (V)	Direnç (Ω)	En (mm)	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)
5.7	1.2	4.8	4	54	54	3.2
Pelet Sayısı		Pelet Boyutları (mm)		Pelet malzemesi		
219		1.44x1.44x1.14		Bi_2Te_3		



Şekil 4.5 : Termoelektrik jeneratörün boyutları[14].



Şekil 4.6 : Termoelektrik jeneratörün performans grafiği[14].

Tablo 4.3’de Hi-Z firmasının termoelektrik jeneratör modülünün özellikleri verilmiştir. 200 K sıcaklık farkı altında 2.5 W güç ürettiği katalog bilgilerinde verilmiştir. Tablo 4.4’de ise Te Technology firmasının termoelektrik soğutucusunun özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.3: Hi-Z termoelektrik jeneratör modülünün katalog değerleri[11].

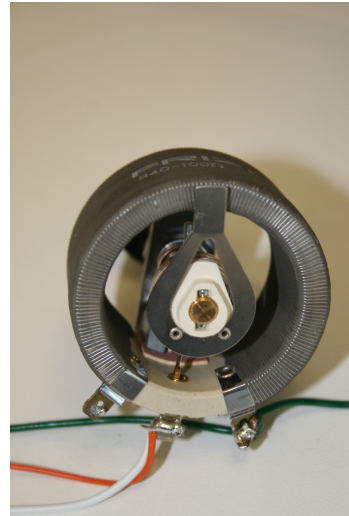
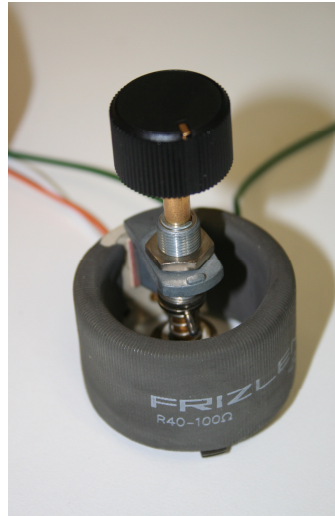
Güç (W)	Akım (A)	Voltaj (V)	Direnç (Ω)	En (mm)	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)
2.5	0.8	3.3	4	29	29	5
Pelet Sayısı				Pelet malzemesi		
97				Bi ₂ Te ₃		

Tablo 4.4: Te Technology firmasının termoelektrik soğutucu modülünün katalog değerleri[25].

Q_{mak} (W)	I_{mak} (A)	V_{mak} (V)	ΔT_{mak} (Ω)	En (mm)	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)
172	11.3	24.6	67	40	40	3.2
Pelet malzemesi						
Bi_2Te_3						

4.1.4 Elektriksel Yük

Karakterizasyonda elektriksel yük olarak ayarlanabilir tek turlu telli potansiyometre kullanılarak farklı direnç kademeleri için akım, voltaj ve güç değerlerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Şekil 4.5’de gösterilen tek turlu potansiyometre 50W ve 100 Ω değerinde olup uzun süreli ve yüksek akımlarda yapılan çalışmalara karşı dayanıklıdır.



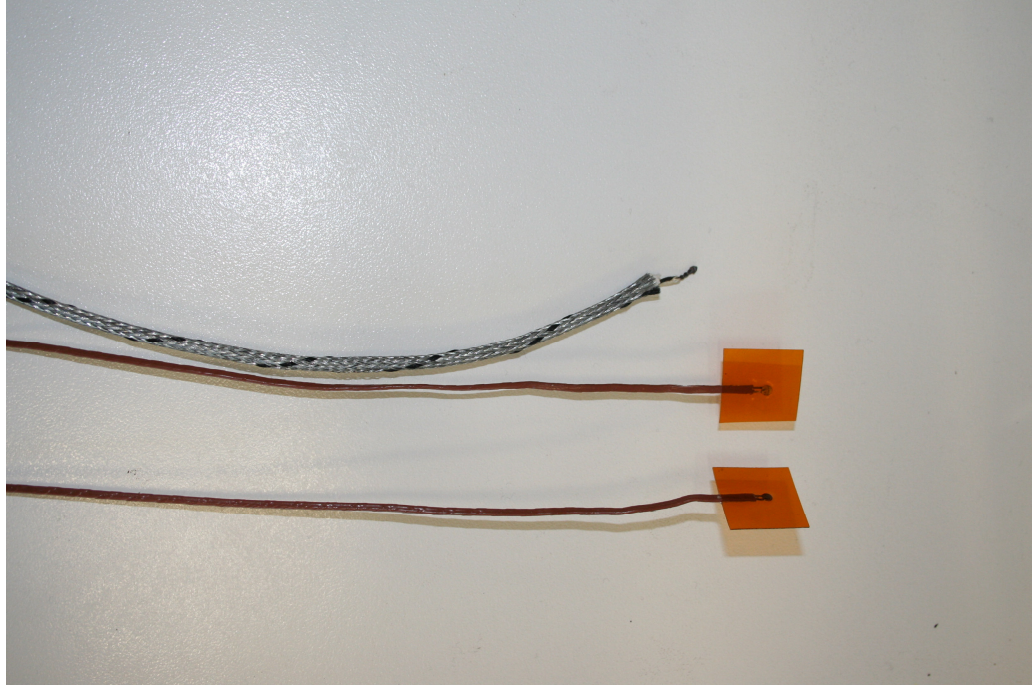
Şekil 4.7 : Tek turlu potansiyometre.

4.1.5 Ölçüm Araçları

Deney düzeneğinde sıcaklık, voltaj ve akım değerlerinin okutulması ve okutulan bu büyüklüklerin saniyelik olarak bilgisayara kaydının yaptırılması sağlanmıştır. Sıcaklık ölçmek için termal çiftler, voltaj ve akım değerlerini ölçmek için National Instruments veri toplama kartı kullanılmıştır. Termoelektrik modül üzerinde farklı bölgelerden verilerin toplanması ve bu verilerin bilgisayar ortamına değerlendirilebilmesi için National Instruments firmasının PCI 6229 tipi veri toplama kartı kullanılmıştır.

4.1.5.1 Sıcaklık Ölçümleri

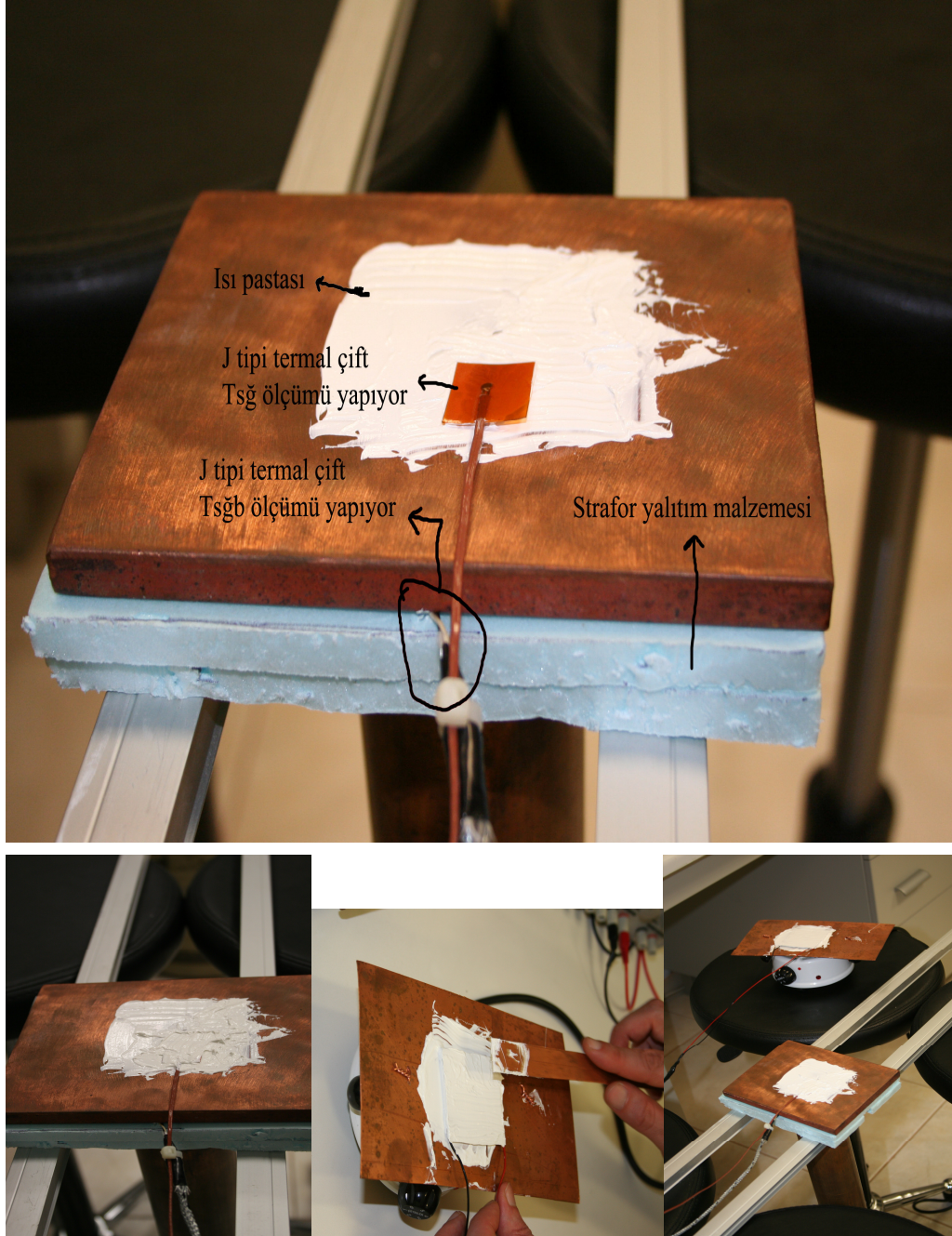
Sıcaklık ölçümleri için National Instruments PCI 6229 tipi veri toplama kartı ve J tipi termal çiftler kullanılmıştır. Şekil 4.4 de görülen alttaki 2 termal çift Minco firmasının TC40 JT80 tipi ürünü olup -200 - 200 °C arasında ölçüm yapabilmektedir. Termal çiftlerin uçları ince yapılı polyimide film ile kaplı olduğundan termal çiftin TEG yüzeyi üzerinde termal yünden iyi kontak yapması sağlanmıştır.



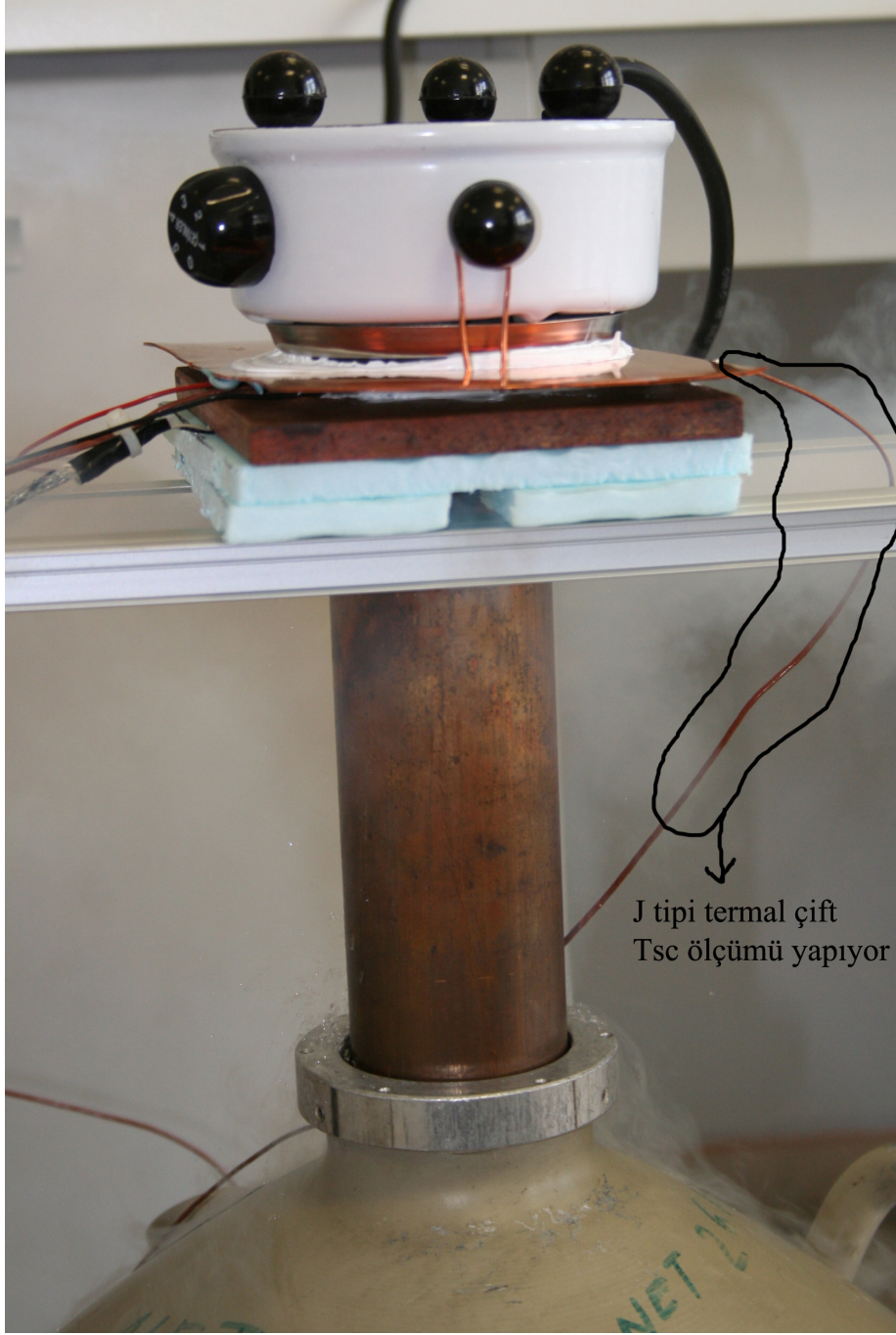
Şekil 4.8: J tipi termal çiftler.

Sıcaklık ölçümleri üç farklı bölgeden yaptırılmıştır. İnce film kaplı termal çiftler ile TEG'in sıcak ve soğuk yüzeylerinden veri toplanırken diğer termal çift strafor ile

bakır bloğun arasına yerleştirerek bloğun alt yüzeyiyle tam teması sağlanmıştır. Şekil 4.9'da problemlerin yerleşim yerleri gösterilmektedir. Şekil 4.10'da ise sıcak ve soğuk rezervuarlar ile birleşim şekli gösterilmiştir. Burada sağda gözüken termal çift ise sıcak yüzeyi ölçmektedir.



Şekil 4.9: Termal çiftlerin sisteme yerleştirilmesi.

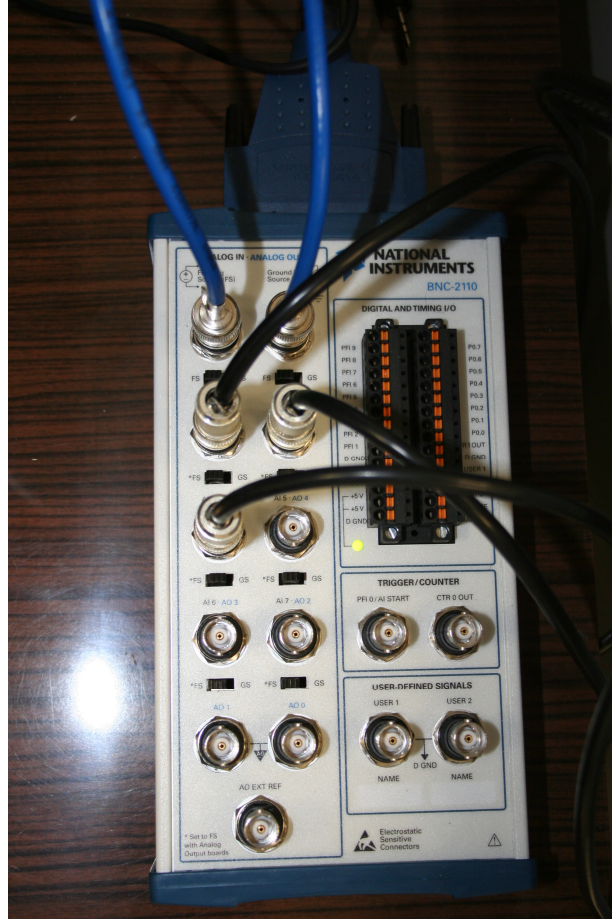


Şekil 4.10 : Sıcak ve soğuk rezarvuarların birleşimi ve Tsc ölçümü yapan J tipi termal çift.

4.1.5.2 PCI 6229 National Instruments Veri Toplama Kartı

Yapılan bütün ölçüm işlemleri bu kart üzerinden yapılmış ve deneyle eş zamanlı olarak verilerin sabit diske kaydı yaptırılmıştır. Bu veri toplama panelinde ise 15 adet BNC (Bayonet Neill Concelman) tipi bağlantı bölgesi bulunmaktadır. Analog bilgiler gürültüye karşı koruma sağlayan zırlı BNC kabloları ile bu panelde taşınırlar. Veriler veri toplama paneline bağlanmış sırası sol baştan başlayıp sağa sonra alt sıraya geçerek devam eder.

Şekil 4.11’de gösterilen sol üstteki mavi kablo devreden voltaj verisini alır. Sağ yanındaki mavi kablo akım değerini alır. İkinci sıradaki soldaki ilk siyah kablo T_{sc} değerini okurken solundaki siyah kablo T_{sg} değerini okur. En altta bulunan sağdaki siyah kabloda T_{sgb} değerini alır. Alınan bu analog veriler bilgisayarda yüklü olan LabVIEW 7.1 programı tarafından işlenir.



Şekil 4.11 : BNC -2110 Veri toplama paneli.

Veri Toplama Panelinin Fiziksel Özellikleri

Boyutlar :	19.05 cm x 10.48 cm x 3.51 cm
BNC konnektör:	15 adet
Kablo Boyutu:	28-16 AWG
D/A Konnektör:	68-pin SCSI konnektör
Çalışma Sıcaklığı:	0-70 °C

Veri toplama kartının özellikleri

Çözünürlük: 16 bit

Örnekleme hızı: 128 kHz

Kanal sayısı: 32 kanal [17]

Bir örnek verilecek olursa;

20V ölçüm bandında (0 - 20) 16 bitlik bir kartın ölçülebileceği en küçük gerilim değeri $20/2^{16}$ V olur. Bu kartın analog işareti dijitize ederken ölçülebileceği en küçük farktır. Bu çalışmada ölçtüğümüz büyüklükler;

- 1) TEG kolları arasındaki Voltaj (Vj)
- 2) Devreden geçen akım (I)
- 3) TEG üst yüzey sıcaklığı (Tsc)
- 4) TEG alt yüzey sıcaklığı (Tsğ)
- 5) Bakır bloğun sıcaklığı (Tsğb)

şeklindedir.

Toplanan veriler LabVIEW 7.1 programı ile işlenebilecek duruma getirilmiştir. LabVIEW 7.1 programı iki kısım altında incelenebilir. Bu kısımlardan birincisi ön panel olup hazırlanan program Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Bu ekranda voltaj, akım, sıcaklıklar ve güç değerleri gözükmektedir. Deney esnasında değişen büyüklükler bu ekrandan saniyelik veriler şeklinde takip edilebilmektedir.



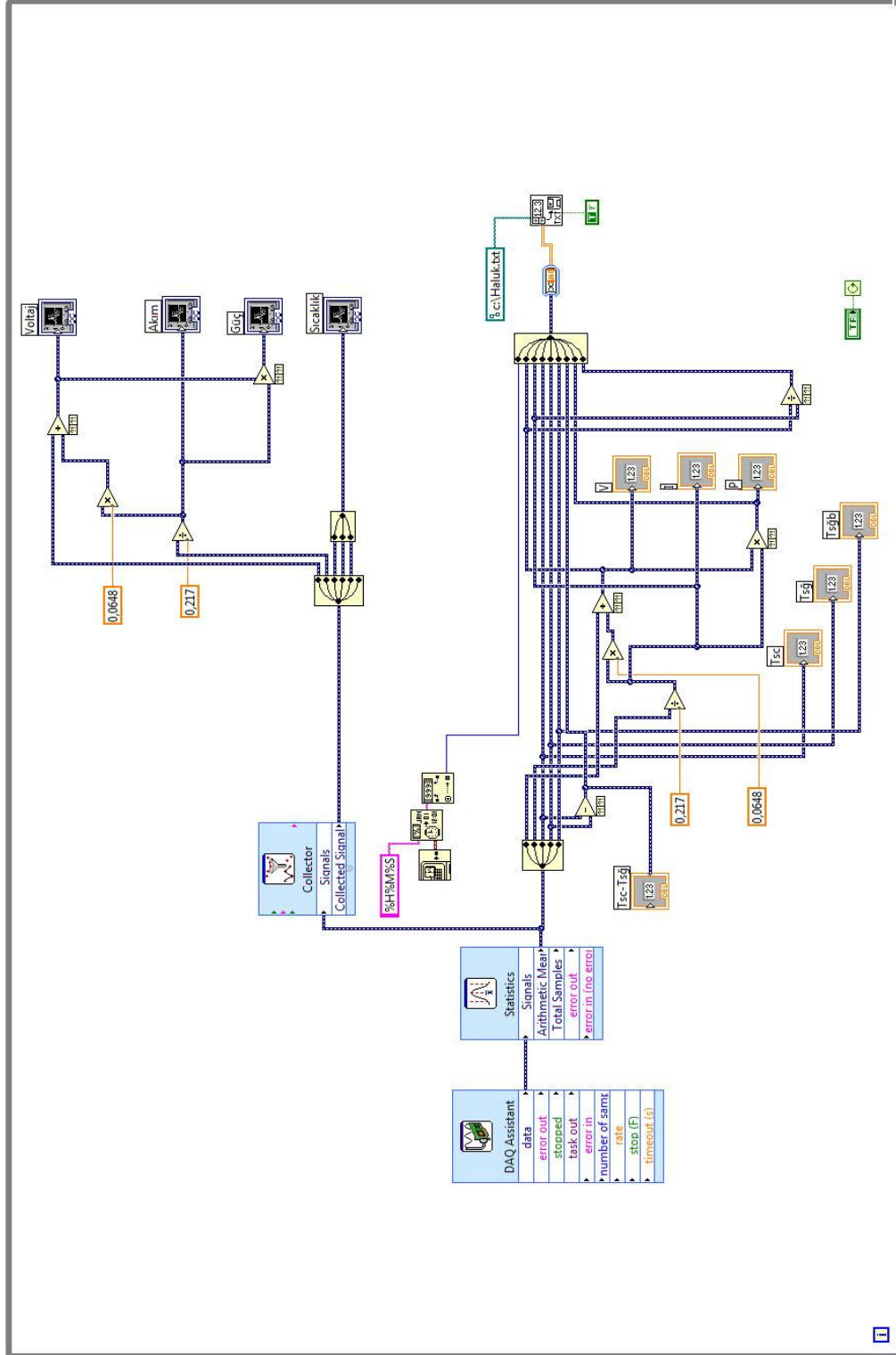
Şekil 4.12 :Ön panel görünümü.

Ön panelde yaratılan görselliğin dışında verilerin asıl işlemlerin yapıldığı kısım Block Diagram kısmıdır. Verilerin bilgisayara yazdırılması, verilerin hangi sınırlar içinde işleneceği, çıktıların bilgisayarın belleğine kayıt yaptırılmasına kadar daha birçok kontrol işlemi burada yapılır. Şekil 4.13’de deney sisteminin blok diyagramı gösterilmektedir. Blok diyagramında gözükten DAQ Assitant bölümünde ölçüm ayarlamaları yapılır. Deney sistemi için yapılan ayarlamalar Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5: Ölçüm aralıkları.

Voltaj (V)	Akım (A)	T_{sc} (°C) J tipi	T_{sg} (°C) J tipi	T_{sgb} (°C) J tipi
Max=10	Max=10	Max= 200	Max= 200	Max= 200
Min=0	Min=0	Min= -200	Min= -200	Min= -200

İşaretler 128 Hz örnekleme frekansı ile alınıp saniyelik işlenmiştir. (Her saniye toplanan 128 işaretin ortalaması kaydedilmiştir.)



Şekil 4.13: Blok diyagram.

Blok diyagramında voltaj ve akım değerinin değişik katsayılarla çarpılıp bölüdüğü görülmektedir. Sistemde oluşan kayıpları ölçüm sonuçlarına yansıtılmamak için iyileştirmeler yapılmıştır. Bu sayede TEG’de ölçülen gerçek değerin kaydı yapılmıştır. Saniyelik alınan verilerin bilgisayarın sabit diskine text dosyası olarak yazdırılması yine blok diyagram kısmından verilen komutlarla yaptırılmıştır. Örnek bir text dosyasında dokuz blok saniyelik olarak yazdırılmaktadır. Tablo 4.6’da bu blokların açıklamaları verilmiştir.

Tablo 4.6: Bilgisayara yazdırılan değerler.

Zaman	Voltaj	Akım	T_{sc}	$T_{s\check{g}}$	$T_{s\check{g}b}$	ΔT	Güç	R_L
-------	--------	------	----------	------------------	-------------------	------------	-----	-------

4.1.5.3 Voltaj ve Akım Ölçümleri

National Instruments veri toplama kartı voltaj okuma işlemlerini yapmaktadır. Deney düzeneğinden harici olarak da bir multimetre ile voltaj ölçümleri yapılabilmektedir. Veri toplama kartı sadece voltaj okuyabildiğinden akım ölçümleri deney düzeneğine bağlana bir multimetrenin akım skalasında yapılan ölçümlerden elde edilmiştir. Multimetrenin amper kademesindeki değeri voltaj bilgisi olarak veri toplama paneline gönderilmiştir. Bunun için LabVIEW blok diyagramındaki DAQ kısmında ikinci parametre olan akım sınırları Max=1 Min =0 olacak şekilde düzenlenmiştir. Ampermetrenin iç direnci çok düşük olsa da bir gerilim düşümü olmakta ve bu değer veri toplama kartında voltaj olarak okutulmakta ve akım değeri tespit edilmektedir. Bir önceki bölümde anlatılan iyileştirme işlemleri kapsamında deney düzeneğinde ampermetre ile okunan değerle LabVIEW front panelde okunan değerin uyumu sağlanmıştır. Deney düzeneğinde bir multimetre sabit kalırken başka bir multimetre ile kontrollere devam edilebilmiştir. Şekil 4.14’de kullanılan mutimetreler gösterilmektedir.

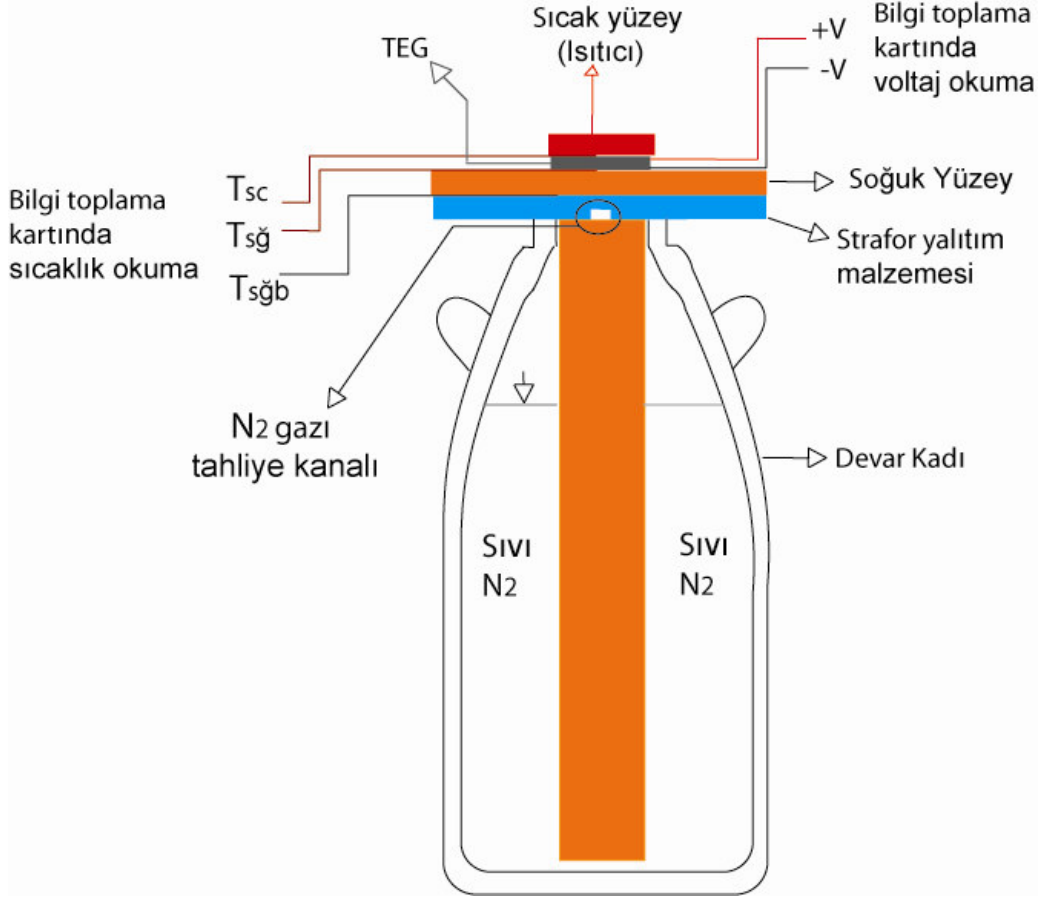


Şekil 4.14: Multimetreler.

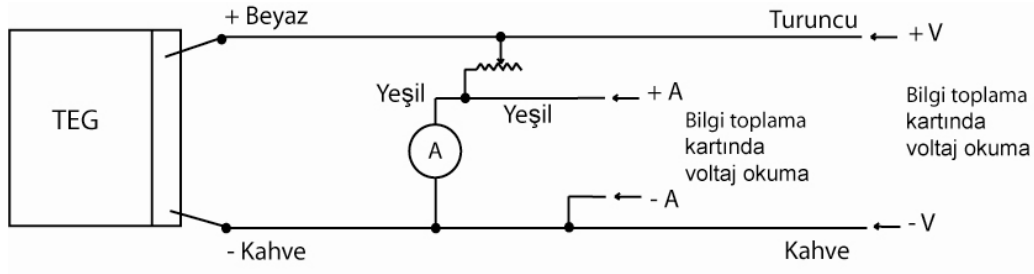
4.1.6 Deneysel Sistem

Daha önce tanımlanan parçaların deneysel sistemde bağlantı şekilleri elektriksel ve termal olarak Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da verilmiştir. Şekil 4.15’de deneysel sistemin termal ölçümlerinin nerelerde yapıldığı ve veri toplama kartına giden uçlar gösterilmektedir. Şekil 4.15’de görüldüğü gibi siyah J tipi termal çift strafor ile bakır blok arasında $T_{s_{gb}}$ ölçümünü yapmaktadır. Kahverengi olarak gösterilen siyahın üstündeki ilk termal çift soğuk yüzeyle TEG arasında T_{s_g} ölçümlerini yapmaktadır. Onun üstünde tekrar kahverengi olarak gösterilen J tipi diğer termal çift T_{sc} ölçümlerini yapmaktadır. Termal çiftlerden alınan bu analog değerler koaksiyel kablolar ile veri toplama kartına taşınırlar.

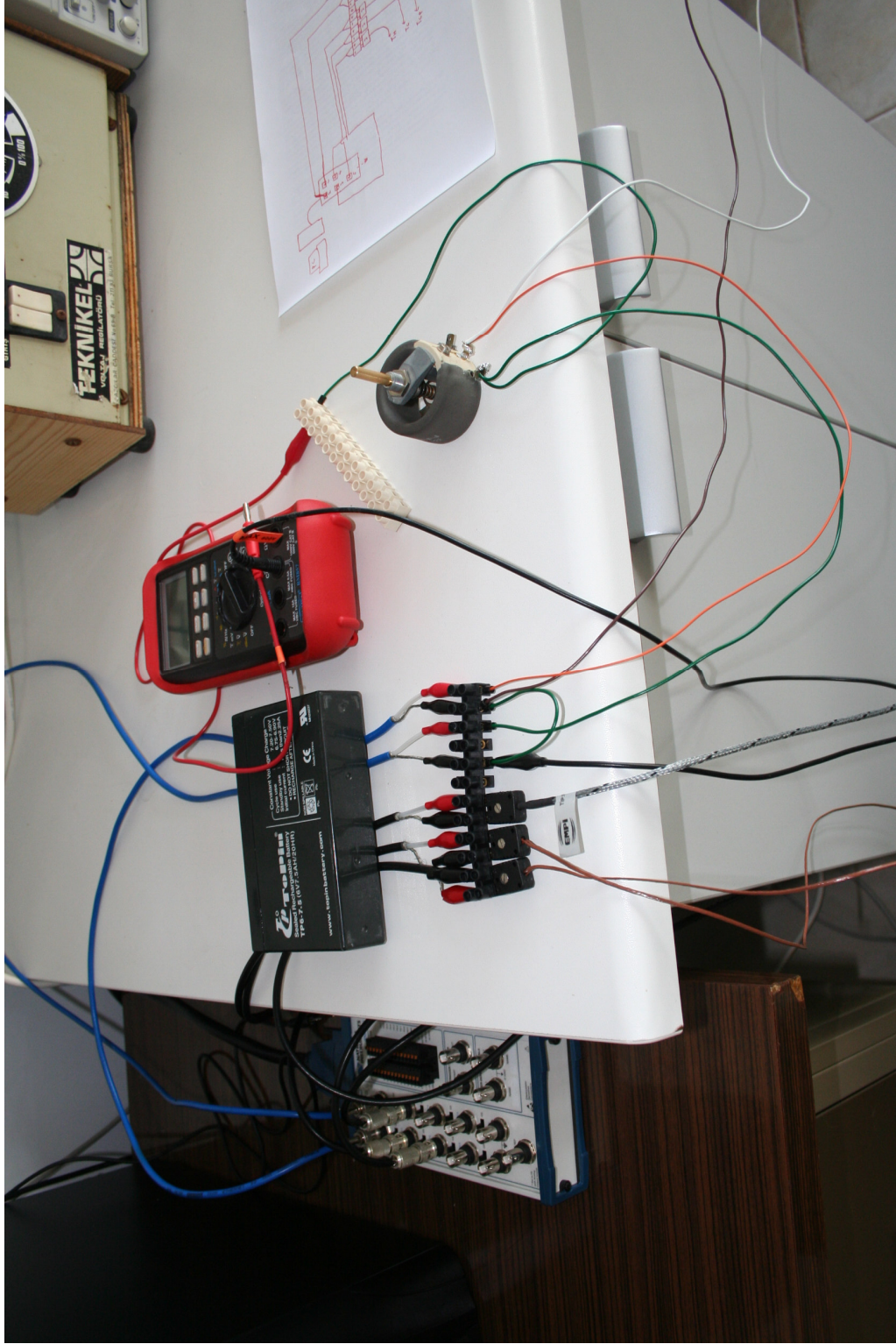
Şekil 4.16’da ise voltaj ve akım değerlerini okutmak için kurulan devre gösterilmektedir. TEG tarafından üretilen voltajın okutulması ve yük direncinin değiştirilmesi ile devreden geçen akımın okutulması yine analog değerlerin koaksiyel kablolar ile veri toplama paneline taşınması ile gerçekleşir.



Şekil 4.15: Devar kabına daldırılmış bakır blok ve ölçüm sistemleri.



Şekil 4.16: Voltaj ve akım değerlerinin okutulduğu devre.



Şekil 4.17: Deney bağlantı noktaları ve veri toplama paneli solda.

4.2 Kriyojenik Sıcaklıklarda Ölçümler ve Deneysel Karakterizasyonu

4.2.1 Karakterizasyonun Bölümleri

Deney düzeneğinde termal çiftlerin ve voltaj, akım büyüklüklerini taşıyan verilerin koaksiyel kablolar ile veri toplama kartına bağlanarak ölçüm sistemi hazırlanmıştır.

Ölçümlerde üç farklı koşul incelenmiştir;

- 1) Sıcak deney
- 2) Soğuk deney
- 3) Hızlı deney

Sıcak deneyde amaç;

- a) TEG'lerin karakteristiklerinin üretici firmanın verdiği çalışma sıcaklığı aralıklarında nasıl değiştiğini incelemek,
- b) 299 K ile 468 K arasında TEG modülü farklı aralıklarda çalıştırıp karakterize etmek,
- c) Kriyojenik sıcaklıklarda davranışların nasıl değiştiğinin anlaşılabilmesi için karşılaştırmanın yapılabileceği referans bir veri oluşturmak,

şeklinde sıralanabilir.

Soğuk deneyde amaç;

- a) TEG'lerin soğuk kaynak yerine sıcak kaynakla kullanıldığında davranışlarının nasıl değiştiğini tespit etmek,
- b) 148 K ile 371 K arasında TEG modülü farklı aralıklarda çalıştırıp karakterize etmek,
- c) Bu çalışma sonucunda elde edilen bilgiler, kriyojenik tabanlı termoelektrik güç yedekleme sisteminin tasarımı için bir ön çalışma yapmak

şeklinde sıralanabilir.

Hızlı deneyde amaç;

- a) Ani akım değişimlerine TEG modülün cevap verme süresini görmek,
- b) Böylece değişen ani akımla paralel olarak değişim gösteren Peltier etkisinin sıcak ve soğuk yüzeylerde yol açtığı sıcaklık değişimlerinin yerleşme

zamanını görerek sağlıklı veri toplanabilmesi için dış direnç değişimlerinden sonra beklenmesi gereken minimum sürenin tespitidir.

4.2.1.1 Sıcak Deney

Sıcak deney; sıvı azot kullanılmadan sadece ısıtıcı ünite kullanılarak TEG modülün 299 K ile 468 K arasında farklı sıcaklık aralıklarında çalıştırıp karakterize etme çalışması olarak tanımlanabilir. Sıcak deneyde soğuk yüzey olarak bakır blok oda koşullarında tutulmuş ve sıcak kaynak olarak ısıtıcı variak trafo ile ayarlanarak istenilen değerlerde sıcaklığın kontrolü sağlanmıştır. Ölçümler sırasında LabVIEW programı koşturularak verilerin bilgisayara kaydı yapılmıştır. Yük direnci olarak 100 Ω değerindeki tek turlu potansiyometre açık ve kısa devre konumlarını kapsayacak şekilde farklı direnç aralıklarında TEG modülün akım karakteristiklerini çıkartmakta kullanılmıştır.

4.2.1.2 Soğuk Deney

Soğuk deney; sıvı azot kullanılarak bakır blok üzerinde soğuk yüzey oluşturulmakta ve sıcak yüzey olarak yine ısıtıcı kullanılarak TEG modülün 148 K ile 371 K arasında farklı aralıklarda karakterize etme çalışması olarak tanımlanabilir. Soğuk deney sıcak deneyden daha kontrollü bir çalışmayı gerektirmektedir. Bunu nedeni oda koşullarındaki bakır bloğun devar kabına sokulması esnasında sıvı azotun çok hızlı bir şekilde buharlaşmasıdır. Bakır blok kontrollü bir şekilde önce yarısına kadar devar kabına daldırılmış ve bakır bloğun sıcaklığının belli bir değerin altına inmesi sağlanmıştır. Bunda sonra bakır blok tamamen devar kabına sokularak esas deney koşullarına geçilmiştir. Sıcak kaynak olarak ısıtıcı variak trafo ile ayarlanarak istenilen değerlerde sıcaklığın kontrolü sağlanmıştır. Ölçümler sırasında LabVIEW programı koşturularak verilerin bilgisayara kaydı yapılmıştır. Yük direnci olarak 100 Ω değerindeki tek turlu potansiyometre açık ve kısa devre konumlarını kapsayacak şekilde farklı direnç aralıklarında TEG modülün akım karakteristiklerini çıkartmakta kullanılmıştır.

4.2.1.3 Hızlı Deney

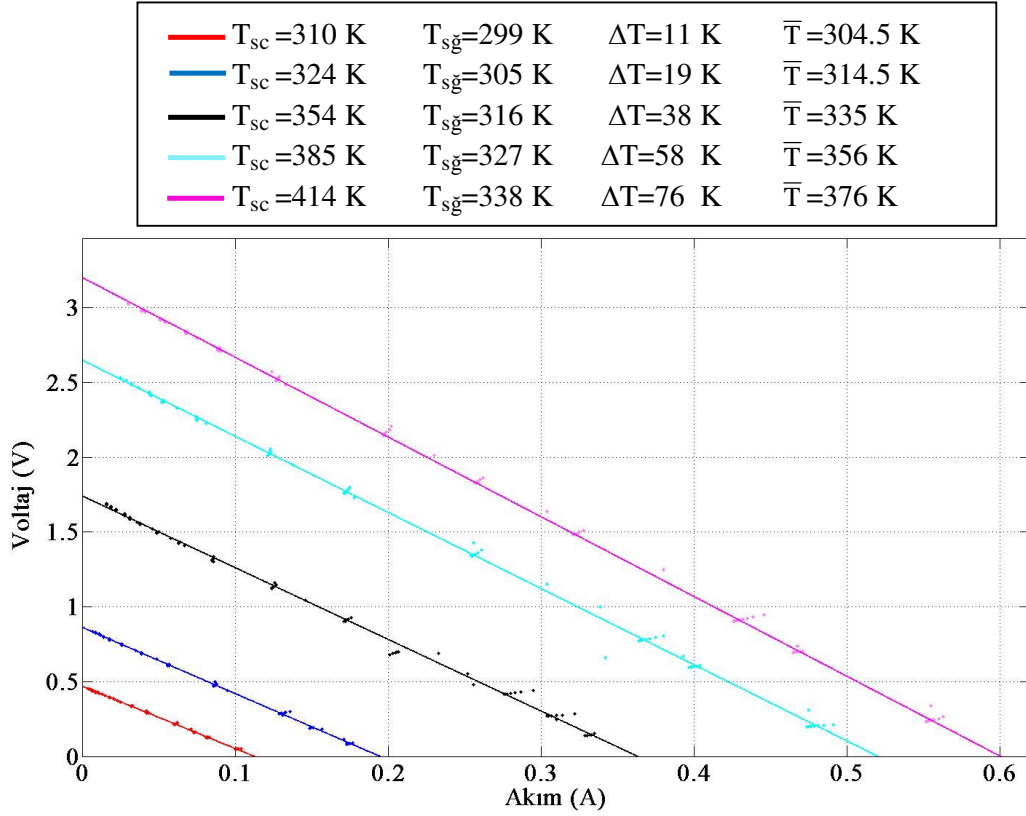
Hızlı deney soğuk ortam koşullarında yapılmıştır. Ani akım değişimlerine TEG modülün cevap verme süresini görmek hızlı deneyin amacını oluşturmaktadır.

Ölçümler sırasında LabVIEW programı koşturularak verilerin bilgisayara kaydı yapılmıştır. Yük direnci olarak 100 Ω değerindeki tek turlu potansiyometre kullanılmış olup direnç, açık ve kısa devre konumları arasında ani bir şekilde değiştirilmiştir. Bu sayede devreden geçen akımın ani değişmesi sağlanmış ve TEG modülün üst ve alt plaka sıcaklıklarında akımın ani değişimi nedeniyle oluşan değişimler incelenmiştir.

4.2.2 Sıcak ve Soğuk Dene için Voltaj-Akım Grafikleri

Kurulan deney düzeneği ile farklı yük direnci koşullarında voltaj ve akım ölçümleri farklı çalışma sıcaklıklarında yapılmış ve voltaj-akım grafikleri elde edilmiştir. Dene verilerine 2.16 ifadesi esas alınarak eğri uydurulması yardımıyla modülün iç direnci hesaplanmıştır. Daha sonra yine 2.16 ifadesi yardımıyla açık devre gerilimi V_0 ve kısa devre akımı I_{kd} elde edilmiştir.

Şekil 4.18'de artan sıcaklık farkı ile açık devre gerilimi ve kısa devre akımının beklendiği gibi artış gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte artan sıcaklıkla voltaj-akım doğrusunun eğimi artmaktadır. Bu lineer doğrunun eğimi R_i iç direnç olup direncin artması da kayıpların artmasına neden olmaktadır. Yine ifade 2.16 düşünülecek olursa iç direnç arttıkça kullanılabilir voltaj değeri düşmektedir.



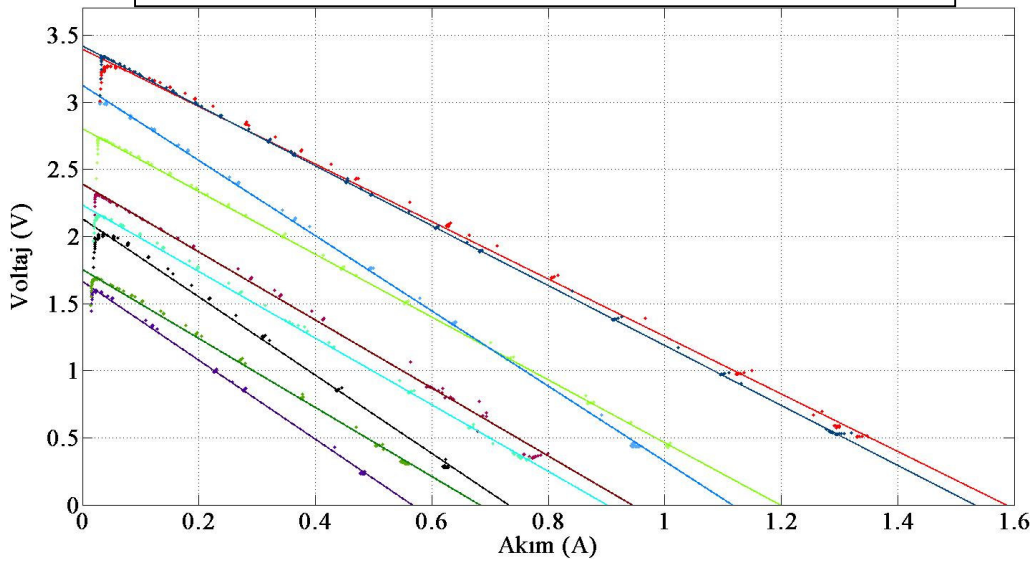
Şekil 4.18: Tellurex firmasının termoelektrik jeneratör modülü için sıcak deney voltaj – akım grafiği.

Şekil 4.19’da verilen soğuk deneyde ise voltaj – akım karakteristikleri sıcak çalışma deneyine göre farklılıklar göstermektedir. Şekil 4.19’da üç farklı durum göze çarpmaktadır. Tablo 4.7’de farklı sıcaklık değerleri için iç direnç ve gücün değerleri görülmektedir. Durum 1 ve 2 incelendiğinde direncin sıcaklık düştükçe azalması beklenirken artmış olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, termoelektrik yapıları oluşturan yarı iletkenlerde valans bandından iletkenlik bandına elektronların geçişini sağlayan ısıl uyarımın aşırı düşük sıcaklıklarda azalması ve böylece elektron-boşluk yoğunluğunun azalmasıdır. Buna bağlı olarak daha fazla sıcaklık farkı yaratılsa bile güç üretimi düşmektedir. 3 ve 4’üncü durumlar incelendiğinde, durum 1 ve 2’de olduğu gibi sıcaklık düştükçe direnç artmaktadır. Fakat durum 3 ve 4 deki güç 1 ve 2’dekine göre çok daha düşük çıkmaktadır. Bu durum sıcaklık farkının azalmış olmasından dolayı Seebeck etkisi ile üretilebilecek olan elektriksel potansiyel farkın azalması ile açıklanır.

Tablo 4.7: Soğuk çalışmada yarı iletkenin özellikleri.

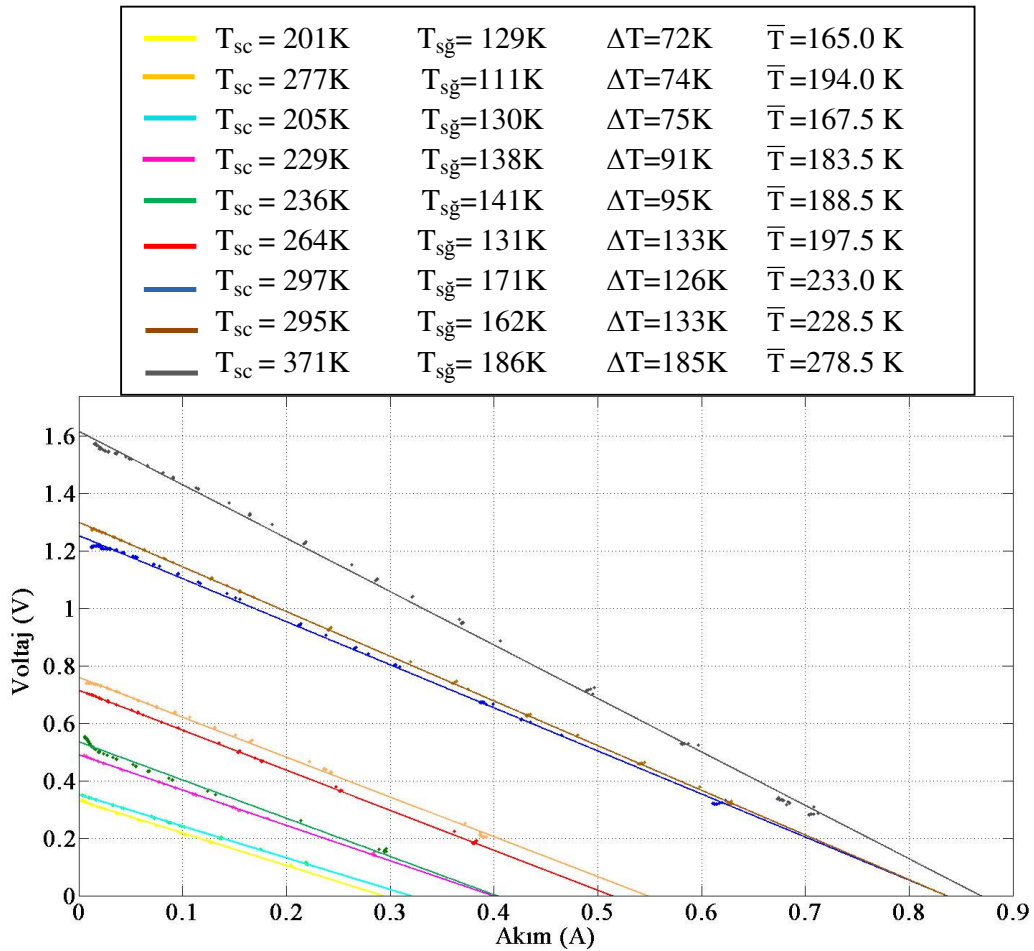
Durum	T_{sc} (K)	$T_{sğ}$ (K)	ΔT (K)	\bar{T} (K)	R_i (Ω)	P_{max} (W)
1	284	167	117	225.5	2.232	1.310
2	292	188	104	240	2.141	1.372
3	281	198	83	239.5	2.803	0.887
4	281	205	76	243	2.341	0.841
5	256	166	90	211	2.534	0.582

—	$T_{sc} = 282$ K	$T_{sğ} = 241$ K	$\Delta T = 41$ K	$\bar{T} = 261.5$ K
—	$T_{sc} = 285$ K	$T_{sğ} = 240$ K	$\Delta T = 45$ K	$\bar{T} = 262.5$ K
—	$T_{sc} = 283$ K	$T_{sğ} = 230$ K	$\Delta T = 53$ K	$\bar{T} = 256.5$ K
—	$T_{sc} = 282$ K	$T_{sğ} = 224$ K	$\Delta T = 58$ K	$\bar{T} = 253.0$ K
—	$T_{sc} = 256$ K	$T_{sğ} = 166$ K	$\Delta T = 90$ K	$\bar{T} = 211.0$ K
—	$T_{sc} = 281$ K	$T_{sğ} = 198$ K	$\Delta T = 83$ K	$\bar{T} = 239.5$ K
—	$T_{sc} = 281$ K	$T_{sğ} = 205$ K	$\Delta T = 76$ K	$\bar{T} = 243.0$ K
—	$T_{sc} = 284$ K	$T_{sğ} = 167$ K	$\Delta T = 117$ K	$\bar{T} = 225.5$ K
—	$T_{sc} = 292$ K	$T_{sğ} = 188$ K	$\Delta T = 104$ K	$\bar{T} = 240.0$ K



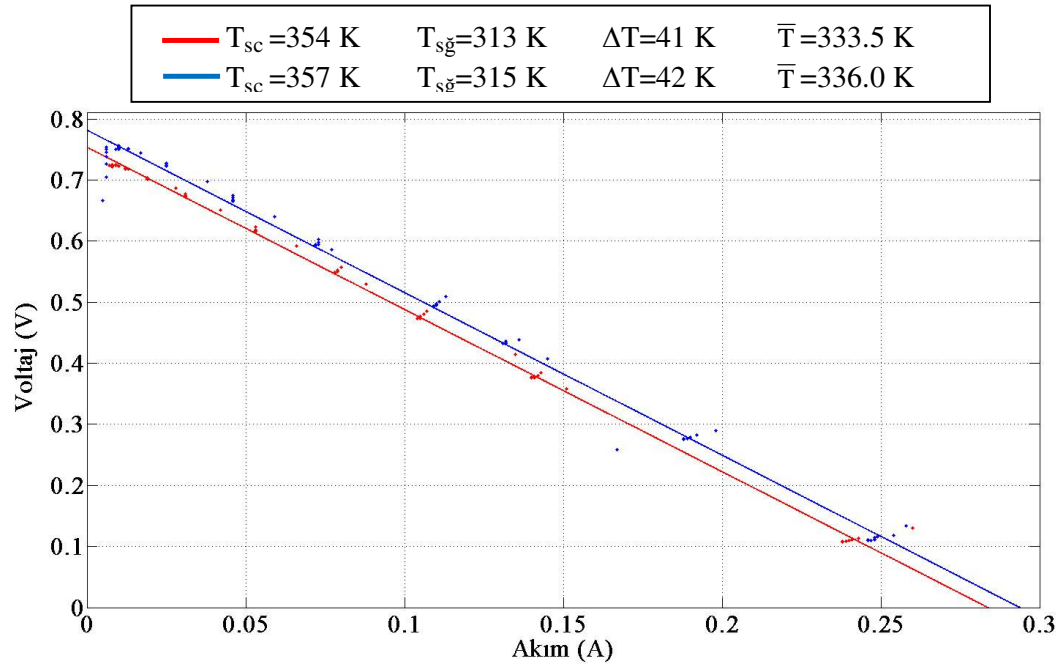
Şekil 4.19: Tellurex firmasının termoelektrik jeneratör modülü için soğuk deney voltaj – akım grafiği.

5'inci durumda ise çok sıcak ve soğuk yüzeyler arasında sıcaklık farkı 3 ve 4'üncü durumlardaki değerinden büyük olsa da güç üretimi çok düşmüştür. Bu davranış, sıcaklık farkı arttığında üretilen voltajın artması beklentisine ters düşmektedir. Bununla birlikte ısıl uyarımın düşmesi sonucu yukarıda açıklandığı gibi iç direnç büyük bir oranda artmıştır. Buna göre TEG modüllerinin davranışları belirli bir sıcaklığa kadar azalan çalışma sıcaklığı ile iyileşmekte, bir tepe değerden sonra da kötüleşmeye başlamaktadır. Tepe değere ulaşmasını sağlayan etken iç direncin düşmesi ile güç üretiminin artması iken, sıcaklık düştükçe olayları tersine çeviren etken yarı iletkenin iletkenlik bandına elektron transferini sağlayacak olan uyarılma enerjisinin istenen seviyeye ulaşmamasıdır. Bu durum düşük sıcaklıklarda yarı iletkenlerin davranışlarının anlatıldığı Bölüm 2.5.3.2'de yer alan Şekil 2.42 ile de uyumludur. Deneyi yapılan bir başka termoelektrik modül olan Hi-Z firmasının termoelektrik jeneratörün modülü için voltaj – akım grafiği Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20: Hi-Z termoelektrik jeneratörün için voltaj – akım grafiği.

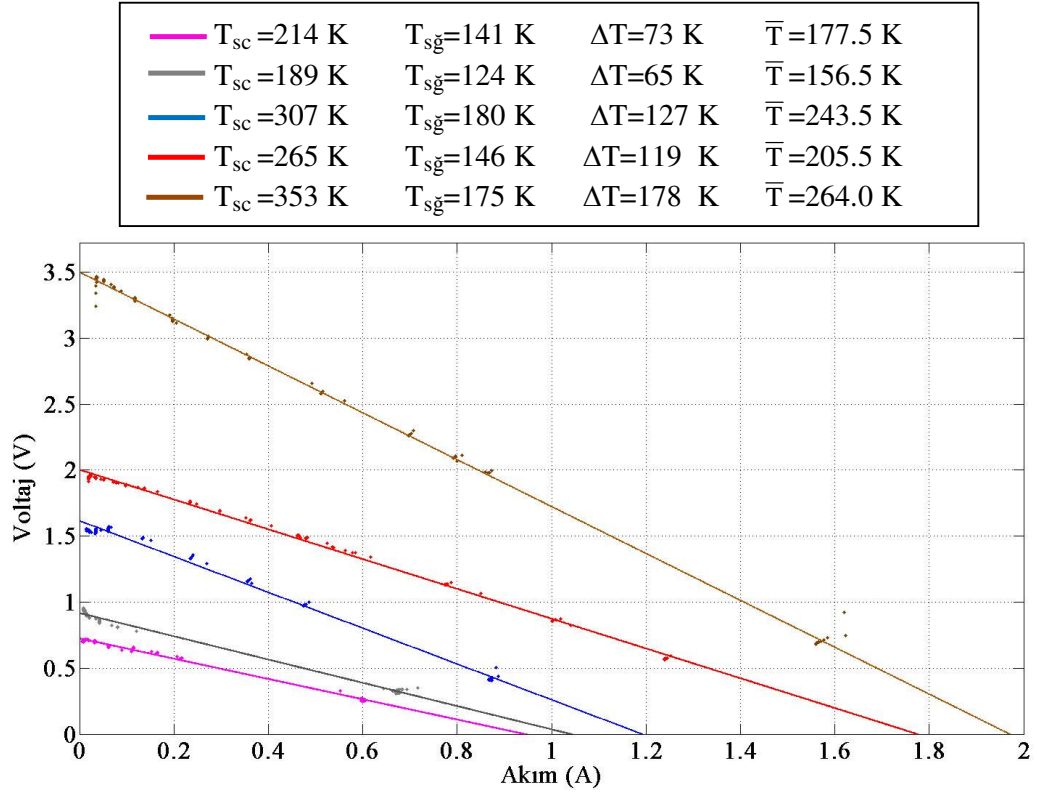
Hi-Z modülü için verilen Şekil 4.20 farklı sıcaklık değerleri için voltaj-akım grafikleri incelendiğinde Tellurex firmasının TEG modülü için yapılan incelemede benzer sonuçlar göze çarpmaktadır. Sıcaklık farkının artması ile açık devre voltajının ve kısa devre akımının artması her koşul için doğru değildir. Turuncu ve firuze rengi ile verilen grafikler incelendiğinde, firuze ile gösterilen grafiğin sıcaklık farkı turuncu grafiğe göre daha fazla olması ve bunun sonucu olarak voltajın daha fazla olması beklenirken, yarı iletken yapılarda ısıl uyarımın aşırı düşük sıcaklıklarda azalması ve böylece elektron-boşluk yoğunluğunun azalmasından dolayı voltaj düşmüştür. Buna bağlı olarak daha fazla sıcaklık farkı yaratılsa bile güç üretimi düşmektedir. Şekil 4.21’de TE Technology firmasının termoelektrik soğutucu modülünün termoelektrik jeneratör olarak çalışması durumu için farklı sıcaklıklardaki voltaj-akım grafiği verilmiştir.



Şekil 4.21: TE Technology firmasının termoelektrik soğutucu modülü için sıcak deney voltaj-akım grafiği.

Şekil 4.18’de TE Technology firmasının termoelektrik soğutucu modülünün termoelektrik jeneratör olarak çalışması durumu için sıcak deney voltaj-akım grafiklerinden görüldüğü gibi sıcaklık farkının artması ile üretilen voltaj ve akım değerleri artmaktadır. Bununla birlikte Te Technology firmasının termoelektrik

soğutucu modülünün jeneratör olarak çalışması durumu için Şekil 4.22’de verilen soğuk deney voltaj-akım grafiği gösterilmiştir. Soğutucu modülün soğuk bölgede çalışması durumunda modülün performansının arttığı gözlemlenmiştir. Soğutucu modülün iç direncinin düşmesi ve kayıpların azalması ile üretebileceği voltaj ve akım değerleri.

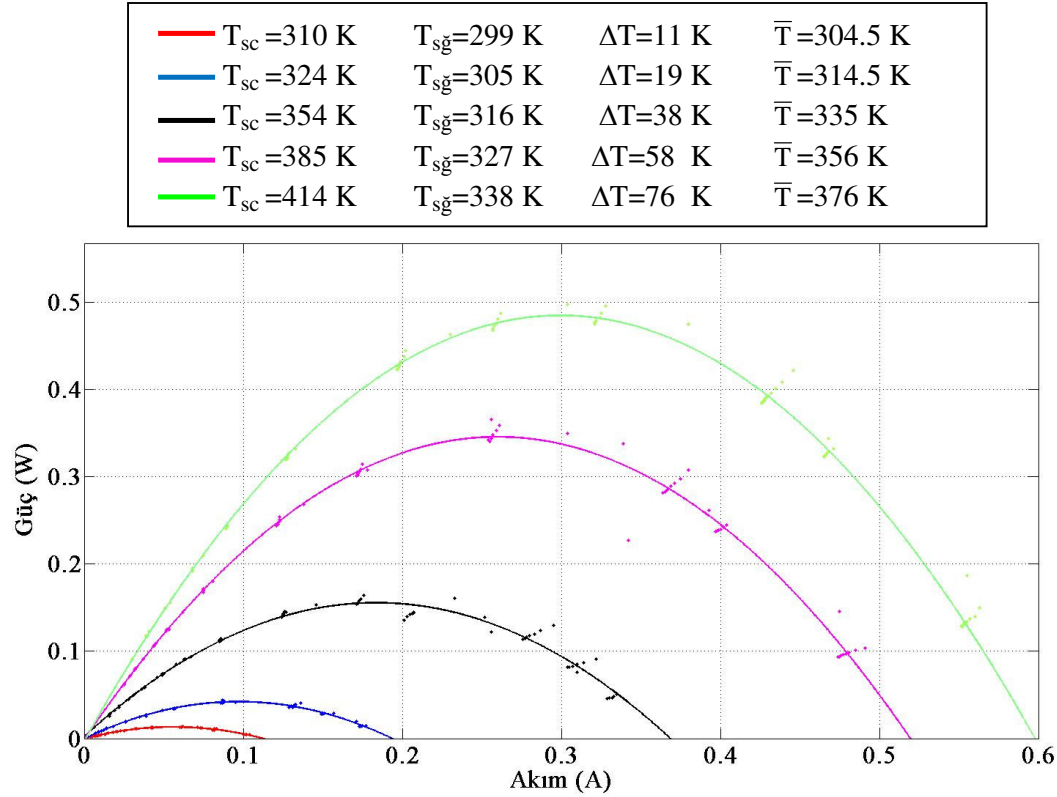


Şekil 4.22: Te Technology firmasının termoelektrik soğutucu modülü için soğuk deney voltaj-akım grafiği.

4.2.3 Sıcak ve Soğuk Deneysel İçin Güç-Akım Grafikleri

Şekil 4.23’de farklı çalışma sıcaklıklarında deneysel olarak elde edilen güç-akım değerleri görülmektedir. Bu deneysel verilere eğri uydurma işlemi yardımıyla 3.7 ifadesi uygulanmıştır.

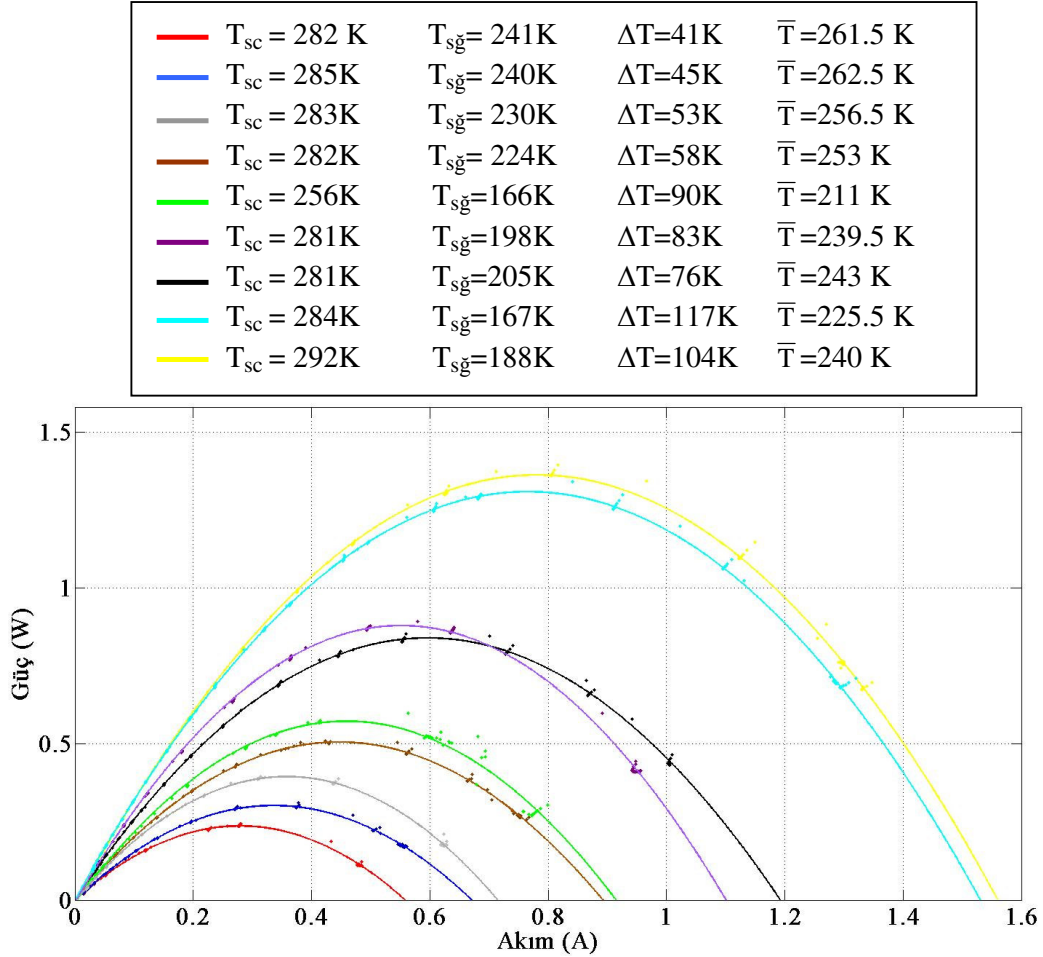
Şekil 4.23’de görülen güç akım grafiğinde sıcaklık farkının artmasına bağlı olarak Seebeck etkisiyle üretilen gerilim giderek artmakta güç değeri de buna bağlı olarak artmaktadır. Sıcaklığın artması ile iç dirençte artmakta ve joule kayıpları sonucu faydalı güç üretiminde düşüşler görülmektedir. Termoelektrik jeneratörlerin çalışma sıcaklıkları malzemeden malzemeye değişiklik göstermekte ve limitleri üretici firmalar tarafında verilmektedir. Deneylelerini yaptığımız termoelektrik modüllerin en yüksek çalışma sıcaklığı 437 K olarak verildiğinden sıcak deneylerde bu limit göz önüne alınmıştır.



Şekil 4.23: Tellurex termoelektrik jeneratörün sıcak deney için güç-akım grafiği.

Tablo 4.5’de soğuk deney için 3 ve 4’üncü durumlarda verilen değerler Şekil 4.24’de güç eğrilerinin birbirleri ile çakışmasını açıklamaktadır. Sıcak yüzey çalışma

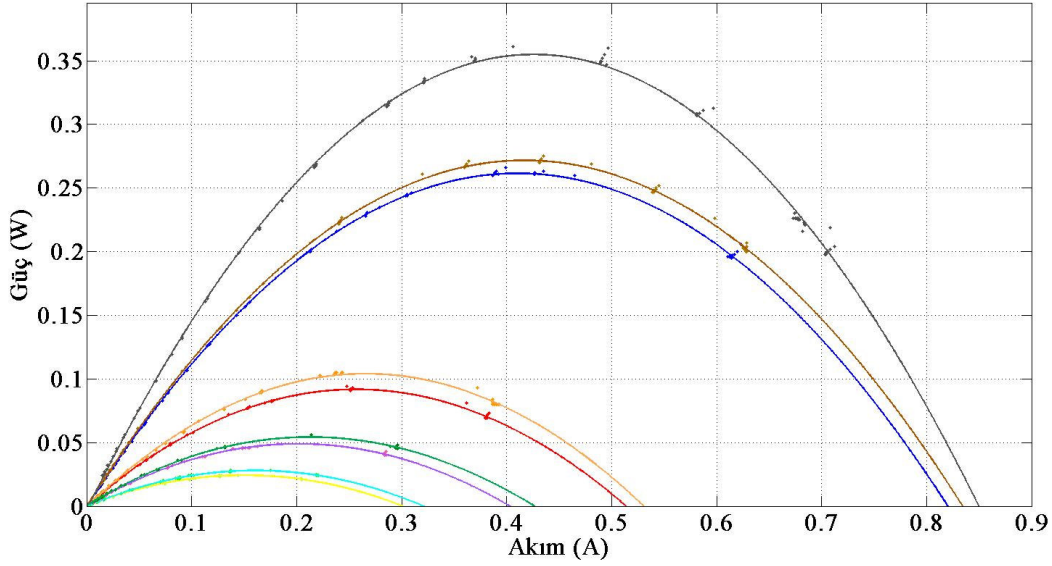
sıcaklıkları $T_{sc}=281K$ olup mor ile gösterilen eğrinin siyah ile gösterilen eğriye göre maksimum üretebileceği güç daha fazladır fakat mor eğrinin sahip olduğu iç direncin daha fazla olması akım değerini sınırlamakta ve siyah eğriye göre daha keskin bir dönüş eğrisi oluşturmaktadır.



Şekil 4.24 : Tellurex termoelektrik jeneratörün soğuk deney için güç-akım grafiği

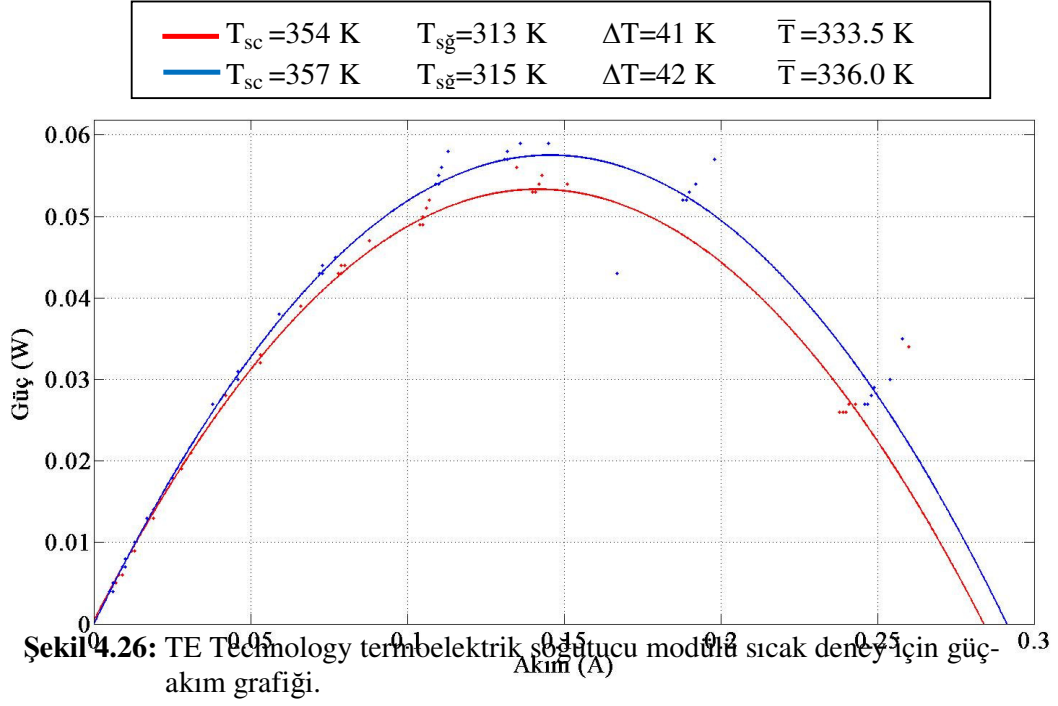
Şekil 4.25’de Hi-Z firması için deneysel olarak elde edilen güç-akım değerleri görülmektedir. Sıcaklık farkının artması ile üretilen voltaj ve akım değerlerinin artması ve buna bağlı olarak gücün artmaktadır. Şekil 4.25’de Turuncu ve firuze rengi ile verilen eğriler incelendiğinde, firuze ile gösterilen eğrinin sıcaklık farkı turuncu eğriye göre daha fazla olmasına karşın yarı iletken yapılarda ısıl uyarımın aşırı düşük sıcaklıklarda azalması ve böylece elektron-boşluk yoğunluğunun azalmasından dolayı voltaj ve akım düşmektedir. Buna bağlı olarak daha fazla sıcaklık farkı yaratılsa bile güç üretimi düşmektedir.

$T_{sc} = 201K$	$T_{sg} = 129K$	$\Delta T = 72K$	$\bar{T} = 165.0 K$
$T_{sc} = 277K$	$T_{sg} = 111K$	$\Delta T = 74K$	$\bar{T} = 194.0 K$
$T_{sc} = 205K$	$T_{sg} = 130K$	$\Delta T = 75K$	$\bar{T} = 167.5 K$
$T_{sc} = 229K$	$T_{sg} = 138K$	$\Delta T = 91K$	$\bar{T} = 183.5 K$
$T_{sc} = 236K$	$T_{sg} = 141K$	$\Delta T = 95K$	$\bar{T} = 188.5 K$
$T_{sc} = 264K$	$T_{sg} = 131K$	$\Delta T = 133K$	$\bar{T} = 197.5 K$
$T_{sc} = 297K$	$T_{sg} = 171K$	$\Delta T = 126K$	$\bar{T} = 233.0 K$
$T_{sc} = 295K$	$T_{sg} = 162K$	$\Delta T = 133K$	$\bar{T} = 228.5 K$
$T_{sc} = 371K$	$T_{sg} = 186K$	$\Delta T = 185K$	$\bar{T} = 278.5 K$

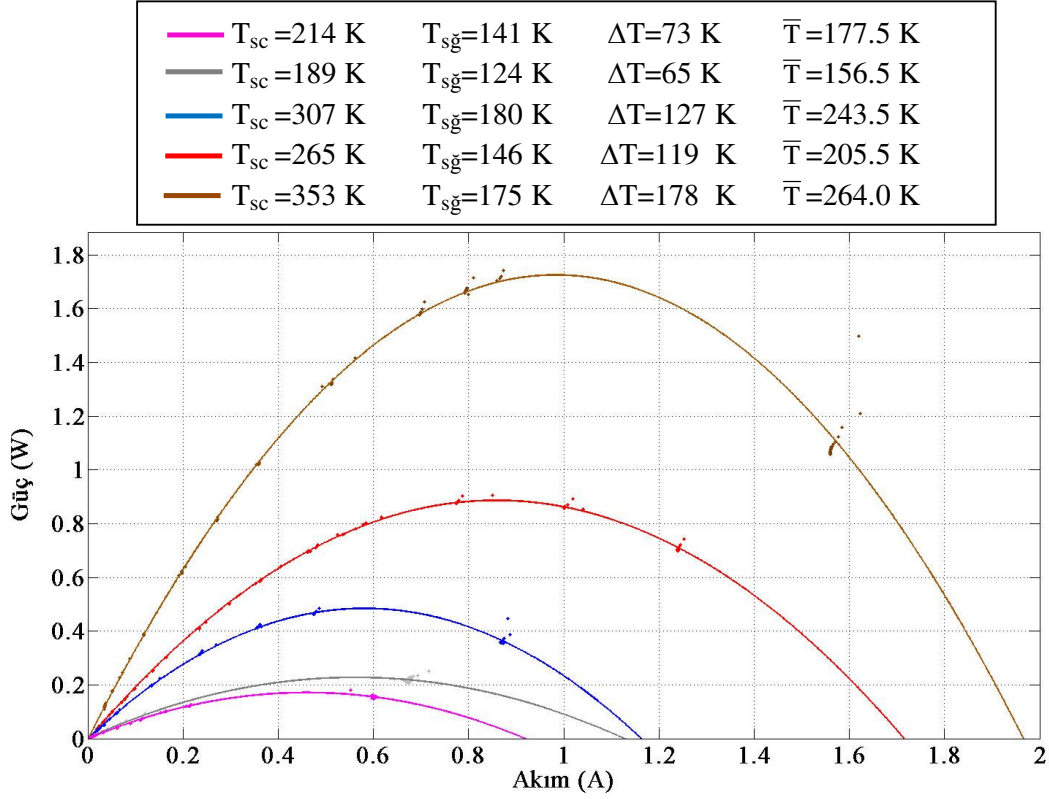


Şekil 4.25: Hi-Z termoelektrik jeneratör modülü için güç-akım grafiği.

Şekil 4.26'da TE Technology firmasının termoelektrik soğutucu modülünün termoelektrik jeneratör olarak çalışması durumu için farklı sıcaklıklardaki güç-akım grafiği verilmiştir. Soğuk ve sıcak yüzeylerdeki sıcaklık farklarının artması ile gücün arttığı görülmektedir.



TE Technology termoelektrik soğutucu modülü sıcak deneyde düşük güçler üretmesine karşın Şekil 4.27’de soğuk deney için verilen güç-akım grafiğinden görüldüğü gibi güç üretimi artmıştır. Soğuk deneyde iç direncin düşmesi nedeniyle Joule kayıpları azalmış ve buna bağlı olarak da güç üretimi artmıştır.



Şekil 4.27: TE Technology termoelektrik soğutucu modülü soğuk deney için güç-akım grafiği.

4.2.4 Sıcak ve Soğuk Deney için Voltaj-Yük Direnci Grafikleri

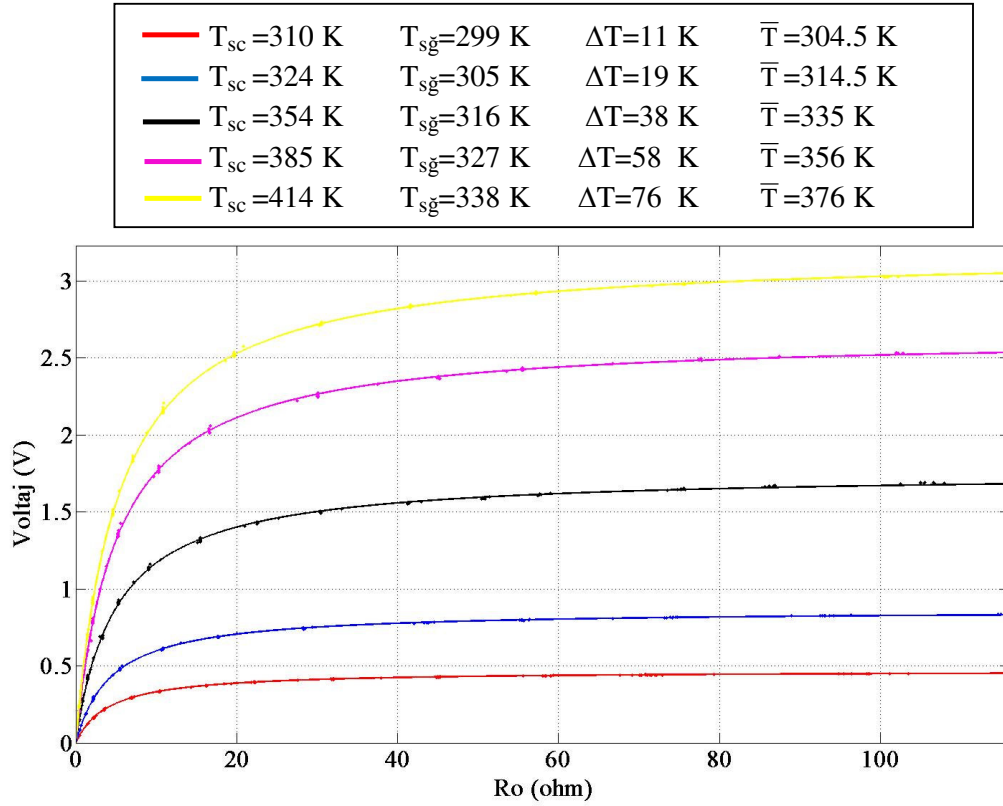
Şekil 4.28’de farklı çalışma sıcaklıklarında deneysel olarak elde edilen voltaj-yük direnci değerleri görülmektedir. Bu deneysel verilere eğri uydurma işlemi yardımıyla 4.1a ve 4.1b de düzenlenmiş olan ifadeler uygulanmıştır.

$$V = V_0 - IR_i = V_0 - \frac{V_0}{(R_0 + R_i)} \times R_i \quad (4.1a)$$

$$V = a - \frac{bx}{c+x} = \frac{ac+ax-bx}{c+x} = \frac{d+ex}{c+x} \quad (4.1b)$$

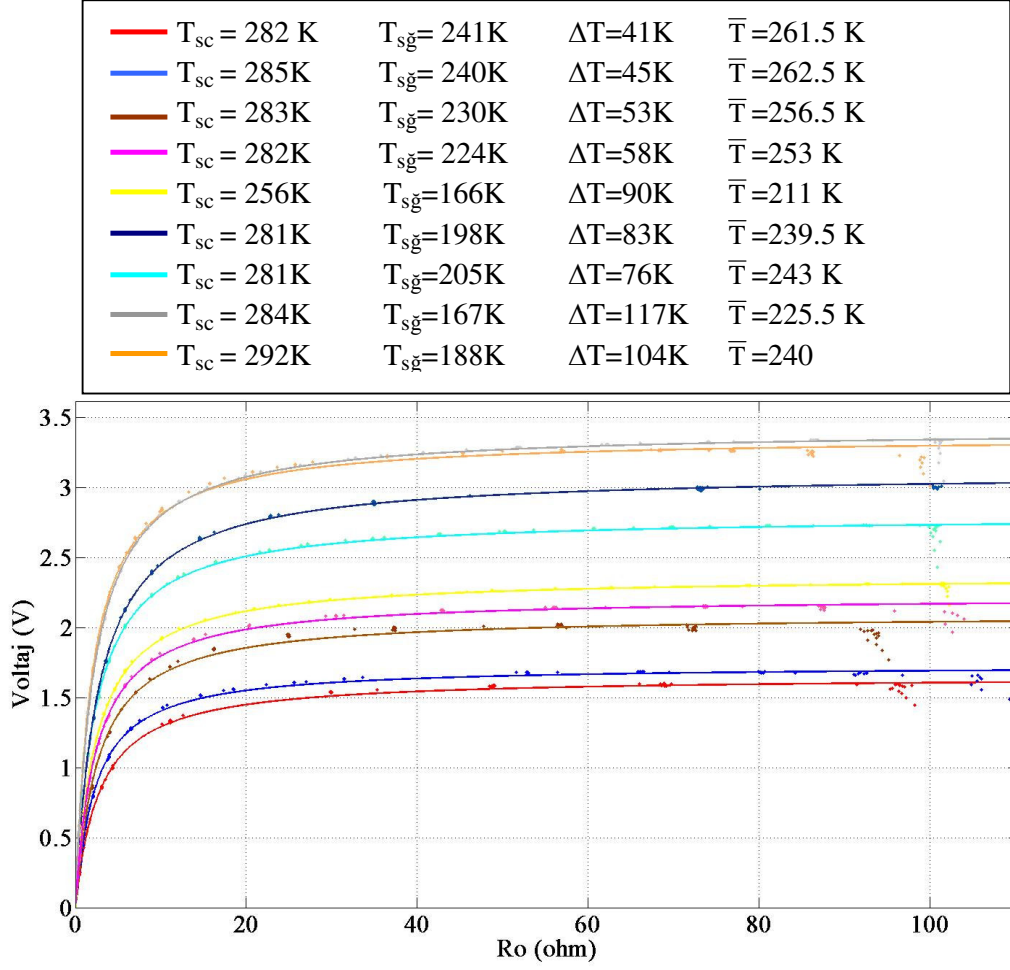
Dış direnç ayarlı bir potansiyometre ile değiştirilerek termoelektrik jeneratörün üretebileceği maksimum voltaj ile minimum voltaj arasında değişimi bu grafiklerden

okunabilmektedir. Şekil 4.28 de Tellurex firmasının sıcak çalışma deneyi için voltaj-yük direnci karakteristiklerini veren eğriler gösterilmiştir.



Şekil 4.28: Tellurex termoelektrik jeneratörün sıcak deney için voltaj-yük direnci grafiği.

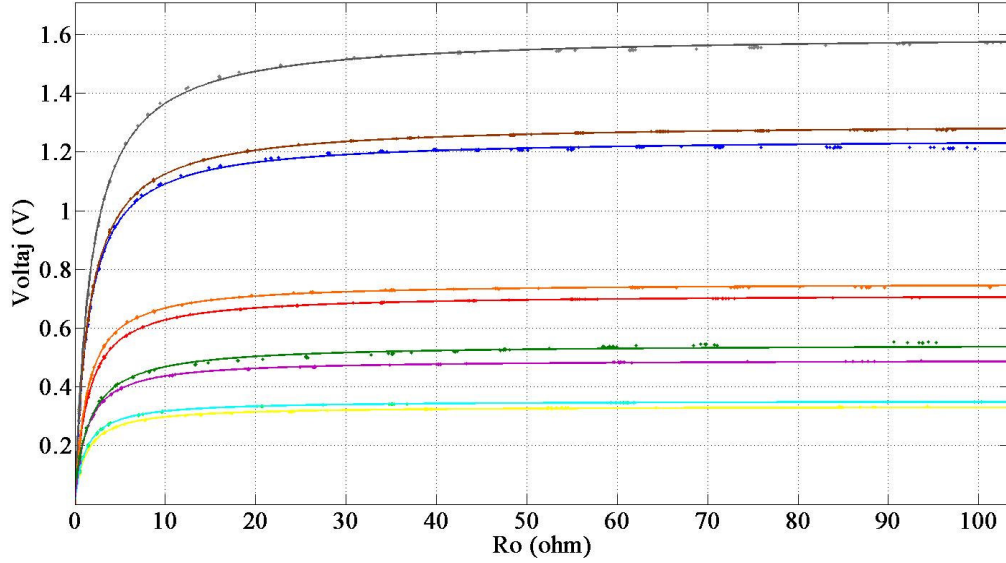
Sıcak çalışma deneyi için termoelektrik jeneratör modülü maksimum 76 K sıcaklık farkında 3 V seviyesine oturmuştur. Şekil 4.28’de görüldüğü gibi sıcaklık farkının artması ile voltaj artmakta ve yük direncinin değişimine göre voltaj, akım büyüklükleri ayarlanabilmektedir. Sıcaklık farkının fazla olduğu ve dolayısıyla gerilimin yüksek olduğu çalışma sıcaklıkları için yük direncinin daha büyük değerlerinde voltaj değerleri daha geç doyuma ulaşmaktadır. Şekil 4.29’da Tellurex firmasının jeneratör modülü için soğuk çalışma voltaj-yük direnci grafiği verilmiştir. İç direncin düşmesine ve sıcaklık farkının artmasına bağlı olarak üretilen voltaj yükselmiştir. İç direncin yük direncine eşit olduğu an ve dış direncin artan değeri için üretilen voltaj değerleri doyuma ulaşmaktadır. İç direncin sıcak deneye göre daha düşük ve üretilen voltajın daha büyük olması nedeniyle eğriler sıcak deneydekine göre daha keskin dönüşler yapmaktadır.



Şekil 4.29: Tellurex termoelektrik jeneratörün soğuk deney için voltaj-yük direnci grafiği.

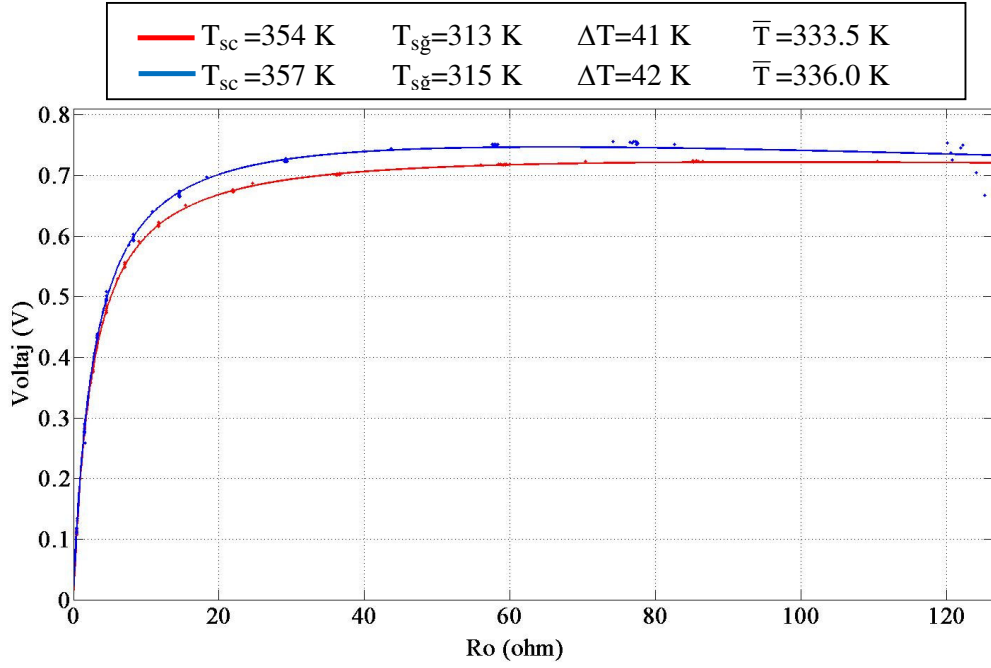
Şekil 4.30’da Hi-Z firmasının termoelektrik jeneratörünün deneysel olarak toplanan verilerden oluşturulan voltaj-yük direnç grafiği verilmiştir. Tellurex modülde tespit edilen şekilde yük direnci belirli bir seviyeye ulaştıktan sonra üretilen voltajın doyuma ulaşması bu grafiklerden görülmektedir.

— $T_{sc} = 201K$	$T_{sg} = 129K$	$\Delta T = 72K$	$\bar{T} = 165.0 K$
— $T_{sc} = 277K$	$T_{sg} = 111K$	$\Delta T = 74K$	$\bar{T} = 194.0 K$
— $T_{sc} = 205K$	$T_{sg} = 130K$	$\Delta T = 75K$	$\bar{T} = 167.5 K$
— $T_{sc} = 229K$	$T_{sg} = 138K$	$\Delta T = 91K$	$\bar{T} = 183.5 K$
— $T_{sc} = 236K$	$T_{sg} = 141K$	$\Delta T = 95K$	$\bar{T} = 188.5 K$
— $T_{sc} = 264K$	$T_{sg} = 131K$	$\Delta T = 133K$	$\bar{T} = 197.5 K$
— $T_{sc} = 297K$	$T_{sg} = 171K$	$\Delta T = 126K$	$\bar{T} = 233.0 K$
— $T_{sc} = 295K$	$T_{sg} = 162K$	$\Delta T = 133K$	$\bar{T} = 228.5 K$
— $T_{sc} = 371K$	$T_{sg} = 186K$	$\Delta T = 185K$	$\bar{T} = 278.5 K$

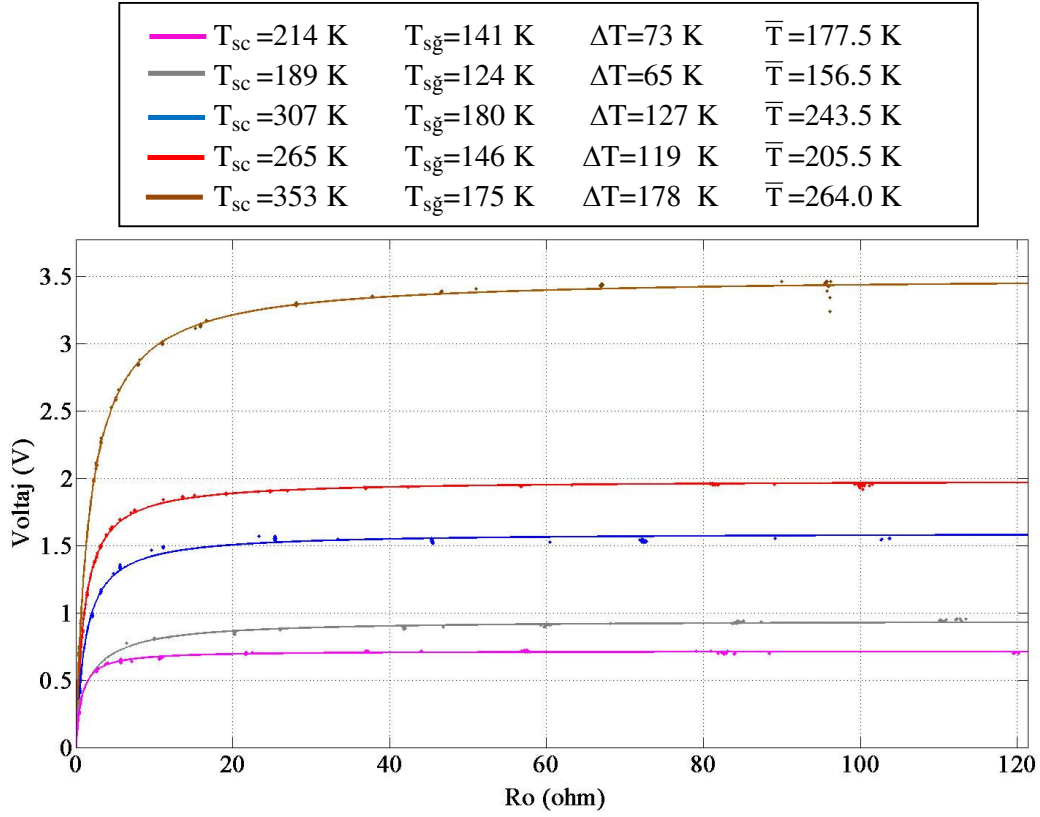


Şekil 4.30: Hi-Z firmasının termoelektrik jeneratörü için voltaj-yük direnci grafiği.

Şekil 4.31’de TE Technology firmasının termoelektrik soğutucu modülünün termoelektrik jeneratör olarak çalışması durumu için sıcak deney voltaj-yük direnci grafiği verilmiştir. Sıcaklık farkının artması ile üretilen voltaj artmakta ve yük direnci belirli bir seviyeye ulaştıktan sonra üretilen voltajın doyuma ulaşması bu grafikte görülmektedir. Şekil 4.32’de ise yine Te Technology firması tarafından üretilen soğutucu modülün soğuk deney için voltaj-yük direnci grafiği verilmiştir. İç direncin sıcak deneye göre daha düşük ve üretilen voltajın daha büyük olması nedeniyle eğriler sıcak deneydekine göre daha keskin dönüşler yapmaktadır.



Şekil 4.31: TE Technology termoelektrik soğutucu modülü sıcak deney için voltaj-yük direnci grafiği.



Şekil 4.32: TE Technology termoelektrik soğutucu modülü soğuk deney için voltaj-yük direnci grafiği.

4.2.5 Sıcak ve Soğuk Deney için Güç-Yük Direnci Grafikleri

Şekil 4.33’de farklı çalışma sıcaklıklarında deneysel olarak elde edilen güç-yük direnci değerleri görülmektedir. Bu deneysel verilere eğri uydurma işlemi yardımıyla 4.2a ve 4.2b de düzenlenmiş olan ifadeler uygulanmıştır.

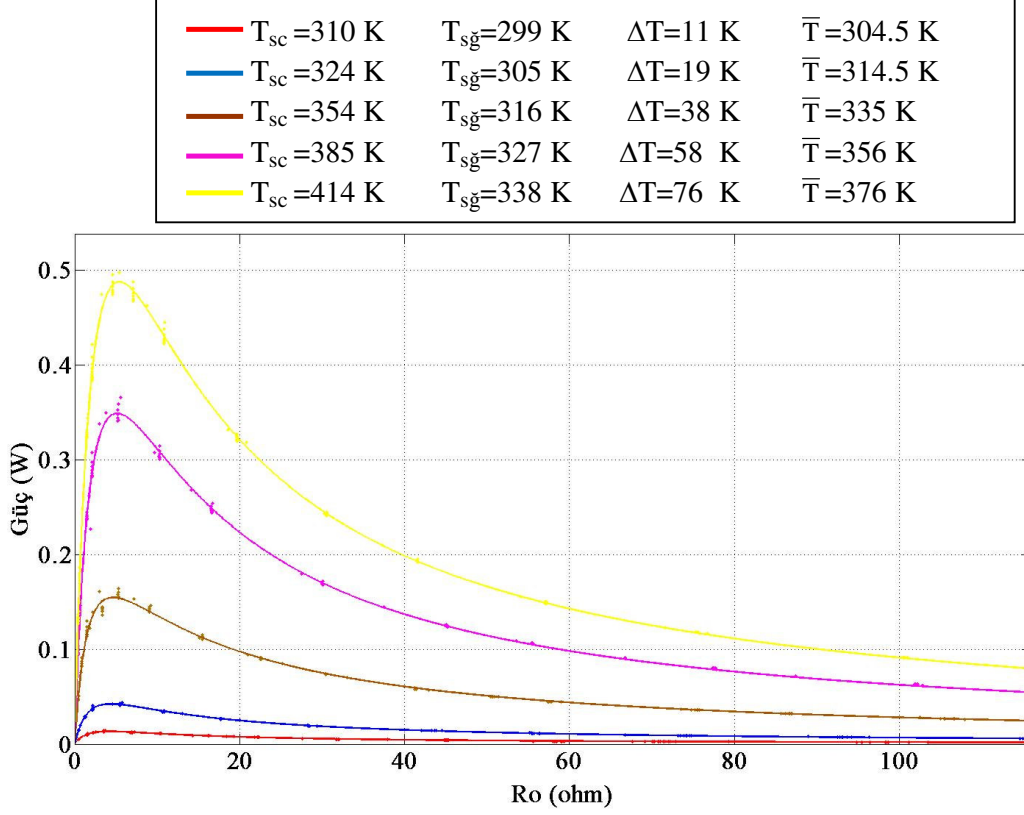
$$P = I \times (V_0 - IR_i) = \left[V_0 - \frac{V_0}{R_0 + R_i} \times R_i \right] \times \frac{V_0}{R_0 + R_i} \quad (4.2a)$$

$$P = \frac{V_0^2}{R_0 + R_i} - \frac{V_0^2 \times R_i}{(R_0 + R_i)^2} = \frac{V_0^2 \times R_0}{(R_0 + R_i)^2}$$

$$P = \frac{aR_0}{(b + R_0)^2} \quad (4.2b)$$

Yük direnci ayarlı potansiyometre ile değiştirilerek termoelektrik jeneratörün üretebileceği maksimum güç ile minimum güç arasındaki değişim bu grafiklerden okunabilmektedir. Şekil 4.33 de Tellurex firmasının sıcak çalışma deneyi için güç-yük direnci karakteristiklerini veren eğriler gösterilmiştir.

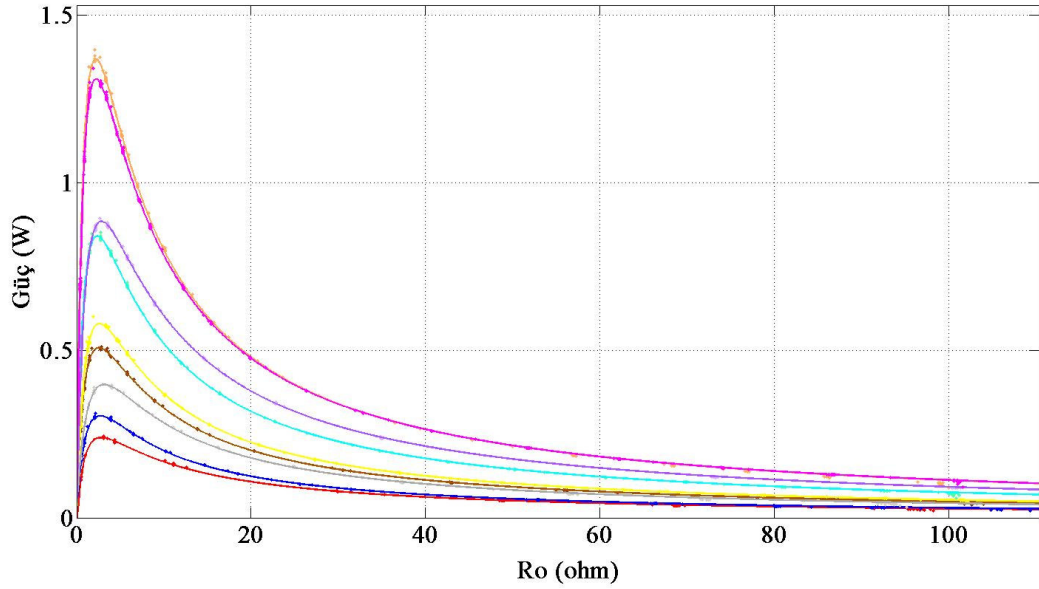
Şekil 4.33’de görüldüğü gibi güç, küçük yük direnci değerleri için maksimum değerini almakta ve yük direncinin artırılması ile azalma eğilimine girmektedir. Çok düşük direnç değerlerinde maksimum güç değerine çıkılmasının nedenini ifade 2.35 açıklamaktadır. Maksimum güç değerine iç direncin yük direncine eşit olduğu durumda ulaşıldığından ve TEG’nin iç direnci birkaç ohm gibi küçük değerler aldığından maksimum gücün gözlemlendiği yük direnci değeri de küçük olmaktadır.



Şekil 4.33: Tellurex termoelektrik jeneratörün sıcak deney için güç-yük direnci grafiği.

Şekil 4.34’de ise Tellurex modülün soğuk çalışma deneyi için güç-yük direnci grafiği görülmektedir. Soğuk çalışma deneyinde sıcak çalışmaya göre iç direncin daha düşük olması nedeniyle güç değeri yük direncinin daha küçük değerleri için maksimum değerini almaktadır. Soğuk çalışma deneyinde daha yüksek güçler elde edilse bile yük direncinin artırılması durumunda güç çok hızlı bir şekilde azalma eğilimi göstermektedir. Sıcak deneyde çok düşük güçler üretiliyor olması nedeniyle soğuk çalışmada gücün hızla azalması dezavantajı yine soğuk çalışmanın daha yararlı olduğunu ortaya koymaktadır.

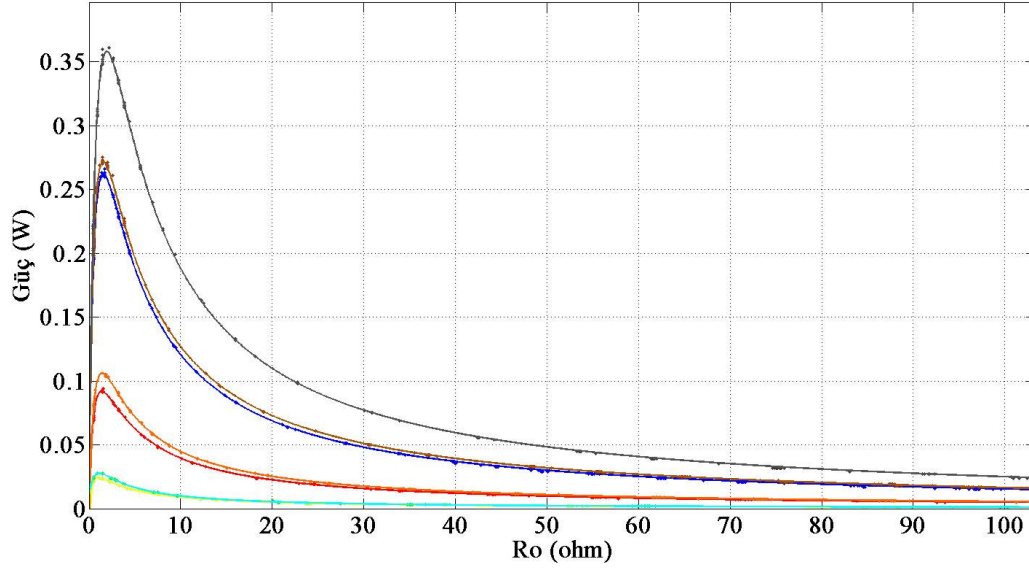
—	$T_{sc} = 282 \text{ K}$	$T_{s\bar{g}} = 241 \text{ K}$	$\Delta T = 41 \text{ K}$	$\bar{T} = 261.5 \text{ K}$
—	$T_{sc} = 285 \text{ K}$	$T_{s\bar{g}} = 240 \text{ K}$	$\Delta T = 45 \text{ K}$	$\bar{T} = 262.5 \text{ K}$
—	$T_{sc} = 283 \text{ K}$	$T_{s\bar{g}} = 230 \text{ K}$	$\Delta T = 53 \text{ K}$	$\bar{T} = 256.5 \text{ K}$
—	$T_{sc} = 282 \text{ K}$	$T_{s\bar{g}} = 224 \text{ K}$	$\Delta T = 58 \text{ K}$	$\bar{T} = 253 \text{ K}$
—	$T_{sc} = 256 \text{ K}$	$T_{s\bar{g}} = 166 \text{ K}$	$\Delta T = 90 \text{ K}$	$\bar{T} = 211 \text{ K}$
—	$T_{sc} = 281 \text{ K}$	$T_{s\bar{g}} = 198 \text{ K}$	$\Delta T = 83 \text{ K}$	$\bar{T} = 239.5 \text{ K}$
—	$T_{sc} = 281 \text{ K}$	$T_{s\bar{g}} = 205 \text{ K}$	$\Delta T = 76 \text{ K}$	$\bar{T} = 243 \text{ K}$
—	$T_{sc} = 284 \text{ K}$	$T_{s\bar{g}} = 167 \text{ K}$	$\Delta T = 117 \text{ K}$	$\bar{T} = 225.5 \text{ K}$
—	$T_{sc} = 292 \text{ K}$	$T_{s\bar{g}} = 188 \text{ K}$	$\Delta T = 104 \text{ K}$	$\bar{T} = 240 \text{ K}$



Şekil 4.34: Tellurex termoelektrik jeneratörün soğuk deney için güç-yük direnci grafiği.

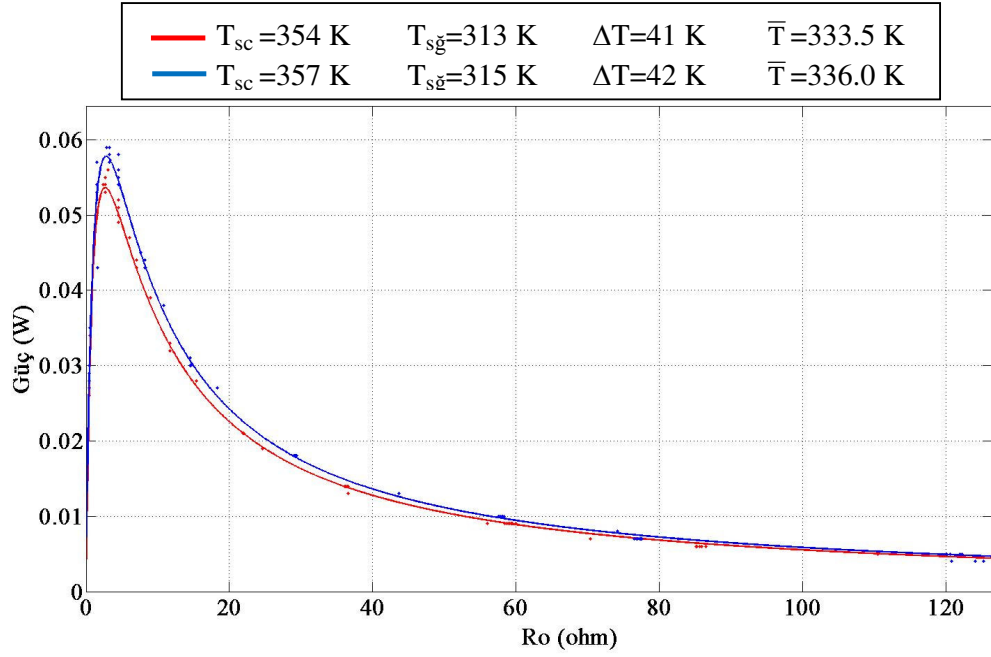
Bununla birlikte iç direnç ne kadar küçükse gücün artan yük direnciyle azalma eğilimi o kadar fazla olmaktadır. Şekil 4.35’de Turuncu ve firuze rengi ile verilen eğriler incelendiğinde, firuze ile gösterilen eğrinin sıcaklık farkı turuncu eğriye göre daha fazla olmasına karşın yarı iletken yapılarda ısıl uyarımın aşırı düşük olmasından dolayı voltaj ve akım düşmektedir ve buna bağlı olarak güç üretimi düşmektedir. Bununla birlikte firuze rengi ile verilen eğride iç direncin daha küçük olması turuncu eğriye göre daha düşük yük direnci değeri için maksimuma ulaşmasına neden olmuştur.

—	$T_{sc} = 201K$	$T_{sg} = 129K$	$\Delta T = 72K$	$\bar{T} = 165.0 K$
—	$T_{sc} = 277K$	$T_{sg} = 111K$	$\Delta T = 74K$	$\bar{T} = 194.0 K$
—	$T_{sc} = 205K$	$T_{sg} = 130K$	$\Delta T = 75K$	$\bar{T} = 167.5 K$
—	$T_{sc} = 264K$	$T_{sg} = 131K$	$\Delta T = 133K$	$\bar{T} = 197.5 K$
—	$T_{sc} = 297K$	$T_{sg} = 171K$	$\Delta T = 126K$	$\bar{T} = 233.0 K$
—	$T_{sc} = 295K$	$T_{sg} = 162K$	$\Delta T = 133K$	$\bar{T} = 228.5 K$
—	$T_{sc} = 371K$	$T_{sg} = 186K$	$\Delta T = 185K$	$\bar{T} = 278.5 K$

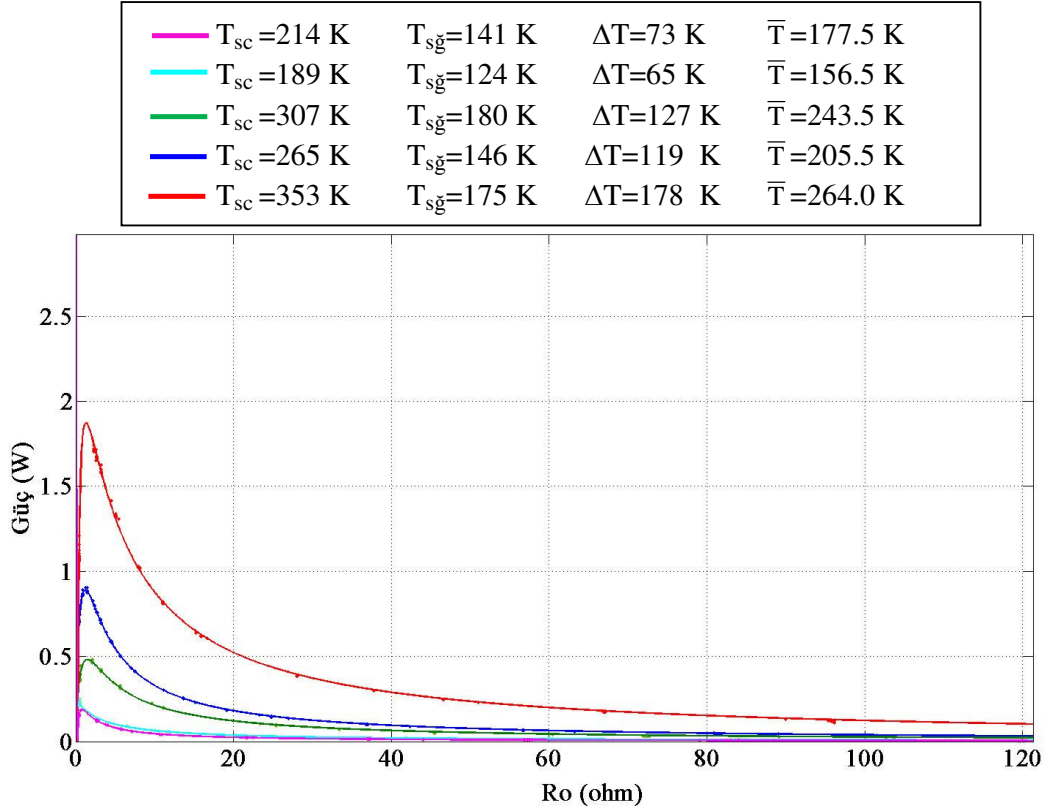


Şekil 4.35: Hi-Z termoelektrik jeneratörün için güç-yük direnci grafiği.

Şekil 4.36'da TE Technology firmasının termoelektrik soğutucu modülünün termoelektrik jeneratör olarak çalışması durumu için sıcak deney güç-yük direnci grafiği verilmiştir. Sıcaklık farkının artması ile üretilen güç artmakta ve yük direncinin iç dirence eşit olduğu anda maksimum seviyesine ulaşılmaktadır. Şekil 4.36'de ise yine Te Technology firması tarafından üretilen soğutucu modülün soğuk deney için güç-yük direnci grafiği verilmiştir. İç direncin sıcak deneye göre daha düşük ve üretilen gücün daha büyük olması nedeniyle eğriler sıcak deneydekine göre daha keskin azalma eğilimleri göstermektedir.



Şekil 4.36: TE Technology termoelektrik soğutucu modülü sıcak deney için güç-yük direnci grafiği.

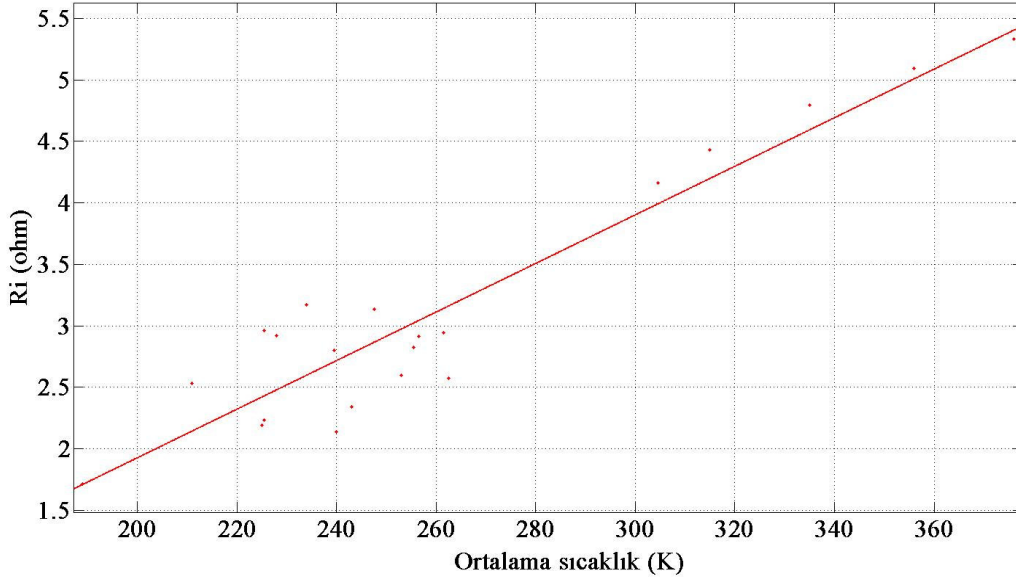


Şekil 4.37: TE Technology termoelektrik soğutucu modülü soğuk deney için güç-yük direnci grafiği.

4.2.6 İç Direnç-Ortalama Sıcaklık Grafiği

Şekil 4.38’de Tellurex firmasının termoelektrik jeneratör modülünün farklı çalışma sıcaklıklarında deneysel olarak elde edilen iç direnç- ortalama sıcaklık grafiği verilmiştir. Bu deneysel verilere eğri uydurma işlemi yardımıyla lineer bir doğru uydurulmuştur. Veri analizinde ki kare testi uygulanmıştır. Ki kare ifade 4.3 de verildiği gibi hesaplanır.

$$\chi^2 = \sum \frac{(Gözlenen - Beklenen)^2}{Beklenen} \quad (4.3)$$



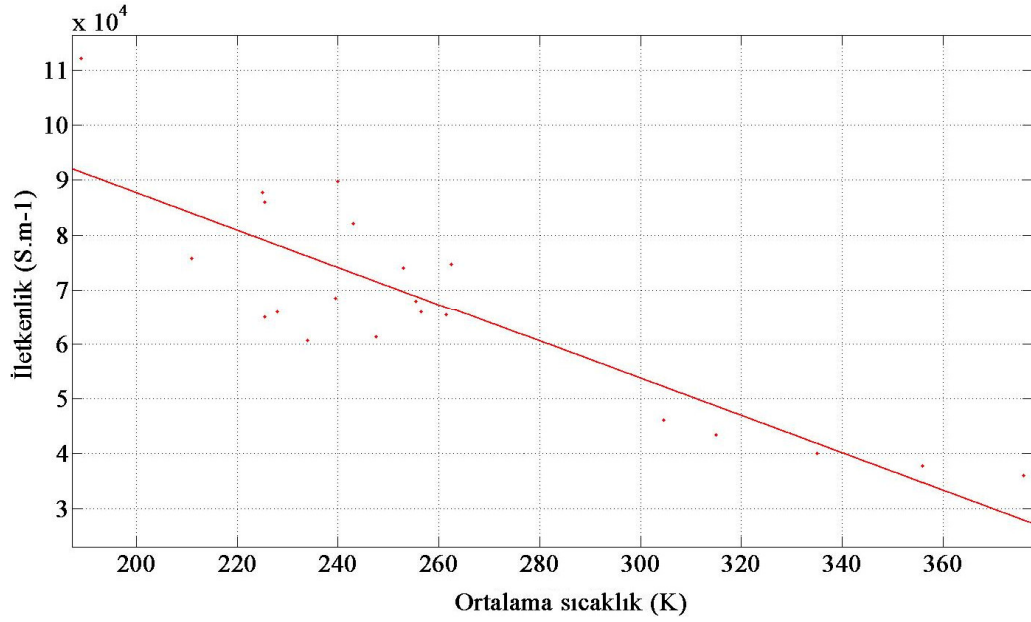
Şekil 4.38: Tellurex termoelektrik jeneratörünün iç direnç- ortalama sıcaklık grafiği. (Ki kare: 0.8678)

Şekil 4.38’de görüldüğü gibi sıcaklığın artması ile termoelektrik modülün iç direnci artmakta ve buna bağlı olarak Joule kayıpları da artmaktadır. Joule kayıplarını azaltmak için soğukta çalışmanın faydaları olmasına karşın çalışılan malzemenin metal değil yarı iletken olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Eğer yarı iletken malzemenin ısıl uyarılma enerjisi belirli bir değerden daha az olursa üretilebilecek güç azalmaktadır.

4.2.7 İletkenli-Ortalama Sıcaklık Grafiği

Şekil 4.39’da Tellurex firmasının jeneratör modülü için iletkenlik-sıcaklık grafiği gösterilmiştir. Sıcaklık düştükçe iletkenlik artmakta ve sıcaklık arttıkça iletkenlik

azalmaktadır. İletkenlik elektronların malzeme içerisinde ne oranda rahat ilerleyebildiğinin bir ölçütüdür. Bu nedenle soğuk bölgede elektronların ortalama serbest yolları fazla olmakta fakat yarı iletkenin uyarılma enerjisi az verildiğinden iletkenlik bandındaki elektron sayısı az olmaktadır. Elektron sayısının azlığı ise düşük güç üretimi anlamına geldiğinden istenmeyen bir durumdur.

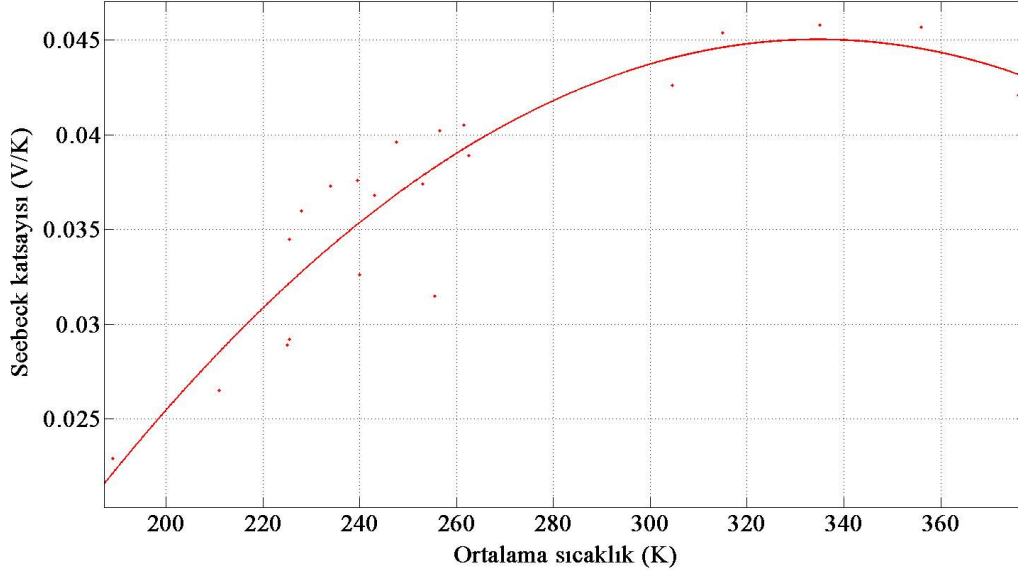


Şekil 4.39: Tellurex termoelektrik jeneratörün iletkenlik- sıcaklık grafiği.
(Ki kare: 2.6425×10^4)

4.2.8 Seebeck katsayısı-Ortalama Sıcaklık Grafiği

Şekil 4.40'da Tellurex termoelektrik jeneratör modülü için farklı çalışma sıcaklıklarında deneysel olarak elde edilen Seebeck katsayısı-sıcaklık grafiği verilmiştir. Birim Kelvin sıcaklık artışına karşı voltaj değişimini veren bu grafik termoelektrik malzemenin özelliklerini veren önemli bir grafikdir. Seebeck katsayısını tanımlayan eğri daha önce üçüncü bölüm Tablo 3.2 de n ve p yarı iletkenleri için verdiğimiz ikinci dereceden bir polinomu ifade etmektedir. Tellurex firmasının jeneratör modülünde toplam 219 adet n-p yarı iletken çifti bulunmaktadır. Bir n-p çiftin üretebileceği gerilim μV mertebesinde olup n-p peletlerin birbirleri ile seri bağlanması ile daha yüksek gerilim değerlerine ulaşılır. Sıcaklığın düşmesi ile iç direncin azalmasının Joule kayıpları yönünden yararlı bir etki yaratacağı daha önceki bölümlerde açıklanmıştı ve ayrıca yarı iletkenin uyarılma enerjisinin az olduğu

durumlarda iletkenlik bandına elektron transferinin azalacağı konusuna dikkat çekilmişti.



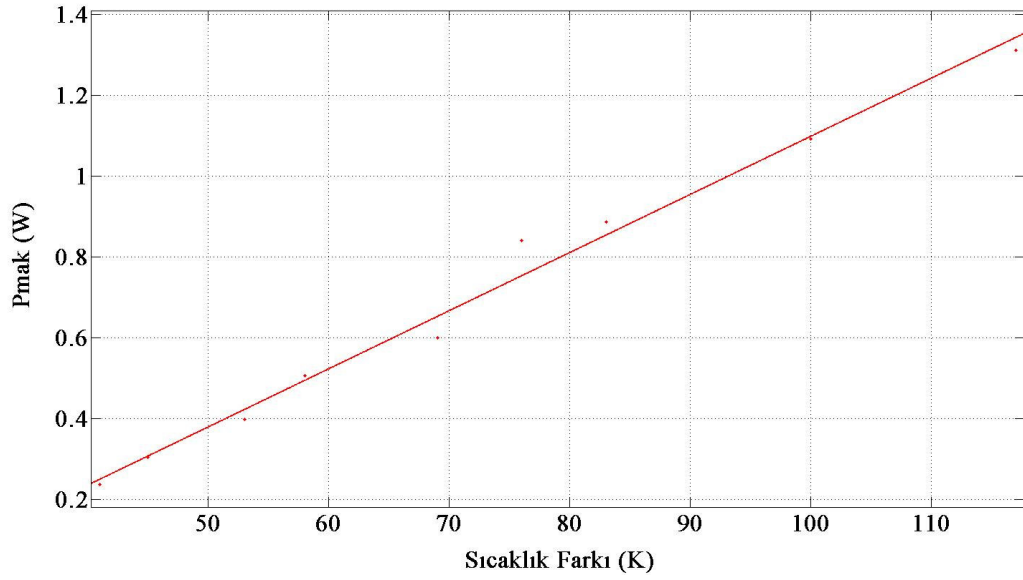
Şekil 4.40: Tellurex termoelektrik jeneratörünün Seebeck katsayısı- sıcaklık grafiği.
(Ki kare: 0.0036)

Şekil 4.40'da görüldüğü gibi sıcaklığın düşmesi Seebeck katsayısını olumsuz bir şekilde etkilemektedir. 220 K seviyesinden daha düşük sıcaklıklardaki çalışmalar için yarı iletkenin özelliğinden dolayı Seebeck katsayısı ve güç üretimi oldukça düşmektedir.

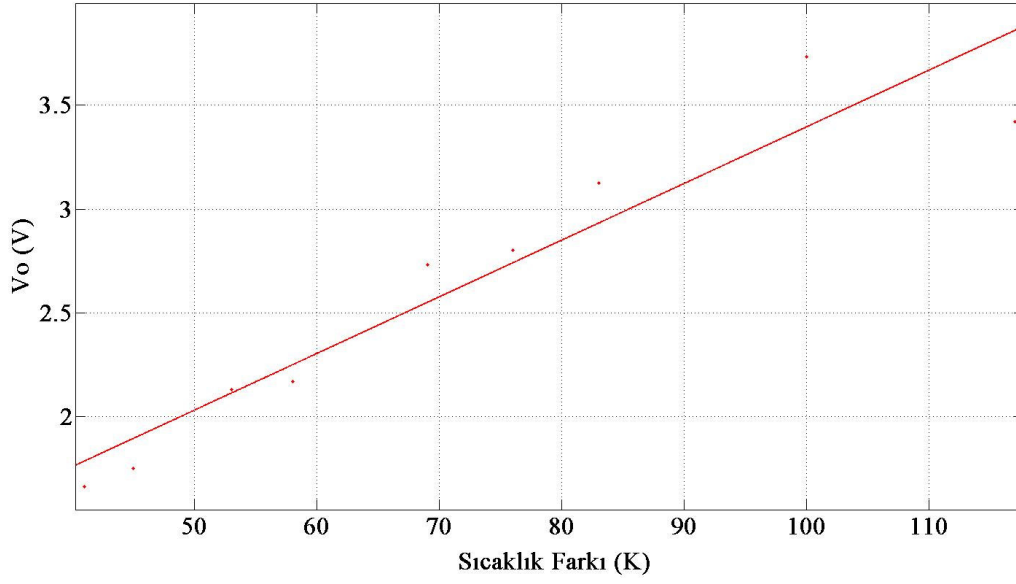
4.2.9 P_{mak} , V_0 , I_{sc} - Sıcaklık Farkı Grafiği

Şekil 4.41'de Tellurex termoelektrik jeneratör modülü için farklı çalışma sıcaklıklarında deneysel olarak elde edilen maksimum güç-sıcaklık farkı grafiği verilmiştir. $T_{\text{sc}}=283$ K sabit alınarak değişen sıcaklık farklarına göre elde edilen bu grafikten, sıcaklık farkının artması ile gücün arttığı görülmektedir. Bununla birlikte Şekil 4.42'de deneysel verilerden açık devre voltajı-sıcaklık farkı grafiği elde edilmiştir. $T_{\text{sc}}=283$ K sabit alınarak değişen sıcaklık farklarına göre elde edilen bu grafikten, sıcaklık farkının artması ile açık devre voltajının arttığı görülmektedir. Şekil 4.43'de kısa devre voltajı-sıcaklık farkı grafiği verilmiştir. $T_{\text{sc}}=283$ K sabit alınarak değişen sıcaklık farklarına göre elde edilen bu grafikten, sıcaklık farkının artması ile kısa devre voltajının arttığı görülmektedir.

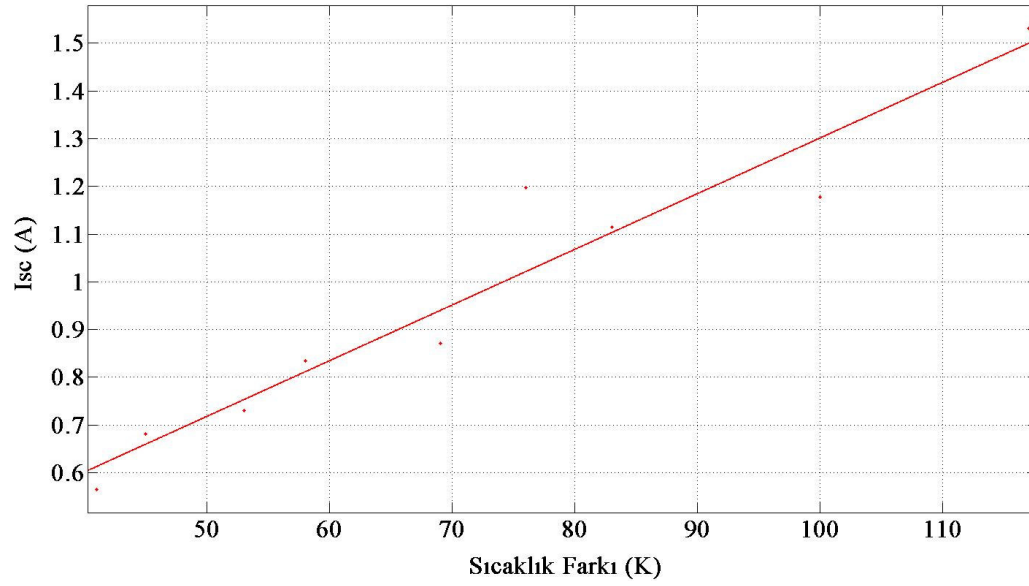
Bu üç grafik için $T_{sc}=283$ K sabit olarak alınması, termoelektrik yapıları oluşturan yarı iletkenlerde valans bandından iletkenlik bandına elektronların geçişini sağlayan ısı uyarımının benzer olmasını sağlamaktadır. Bunun yanında soğuk bölgede sıcaklığın düşürülmesi ile sıcaklık farkının artırılması sağlanarak iletkenlik artırılmıştır. İletkenliğin artması ile Joule kayıpları azalmakta ve üretilecek olan açık devre voltajı ve kısa devre akımı artmaktadır. Isıl uyarımın yarı iletken yapıda yeterli düzeyde elektron-boşluk çifti oluşturması sağlandığı durum için soğuk yüzeyde sıcaklığın düşürülmesi termoelektrik modülün performansını arttırmaktadır.



Şekil 4.41: Tellurex termoelektrik jeneratörün maksimum güç-sıcaklık farkı grafiği. ($T_{sc}=283$ K sabit ve K_i kare: 0.0249)



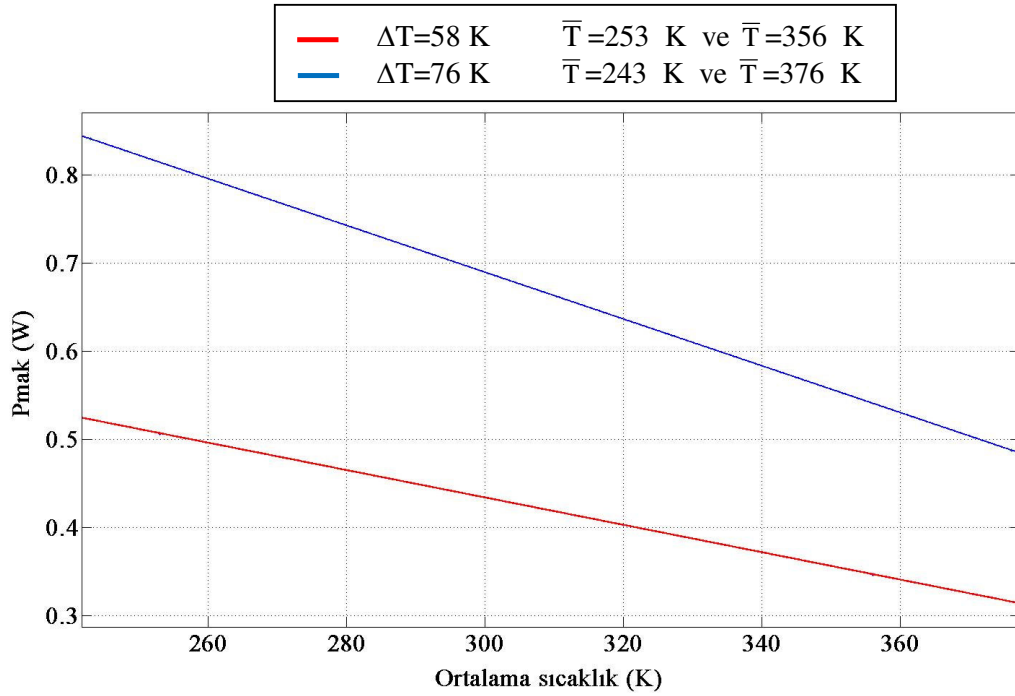
Şekil 4.42: Tellurex termoelektrik jeneratörün açık devre voltajı-sıcaklık farkı grafiği. ($T_{sc}=283$ K sabit ve K_i kare: 0.1335)



Şekil 4.43: Tellurex termoelektrik jeneratörün kısa devre akımı-sıcaklık farkı grafiği. ($T_{sc}=283$ K sabit ve K_i kare: 0.0537)

4.2.10 Sıcaklık Farkları Aynı Fakat Ortalama Sıcaklıkları Farklı Olan Durumlar için Maksimum Güç-Ortalama Sıcaklık Grafiği

Şekil 4.44’de sıcaklık farkları aynı fakat ortalama sıcaklıkları farklı olan durumlar için maksimum güç-ortalama sıcaklık grafikleri bulunmuştur. Sıcaklık farkları aynı 58 K olan $\bar{T}=253$ K ve $\bar{T}=356$ K değerleri için bir grafik ve sıcaklık farkları aynı $\Delta T=76$ K olan $\bar{T}=243$ K ve $\bar{T}=376$ K değerleri için lineer ikinci bir grafik elde edilmiştir. Şekil 4.43 bize sıcaklık farkının artması ile maksimum gücün arttığını göstermektedir. Fakat bundan daha da önemlisi soğuk deneylerde elde edilen maksimum güçlerin sıcak değerdekilerden daha büyük olduğunu göstermektedir. Bu da bize soğuk yüzeyde sıcaklığın düşürülmesi sonucu termoelektrik modülün üretebildiği gücün arttığını göstermektedir.

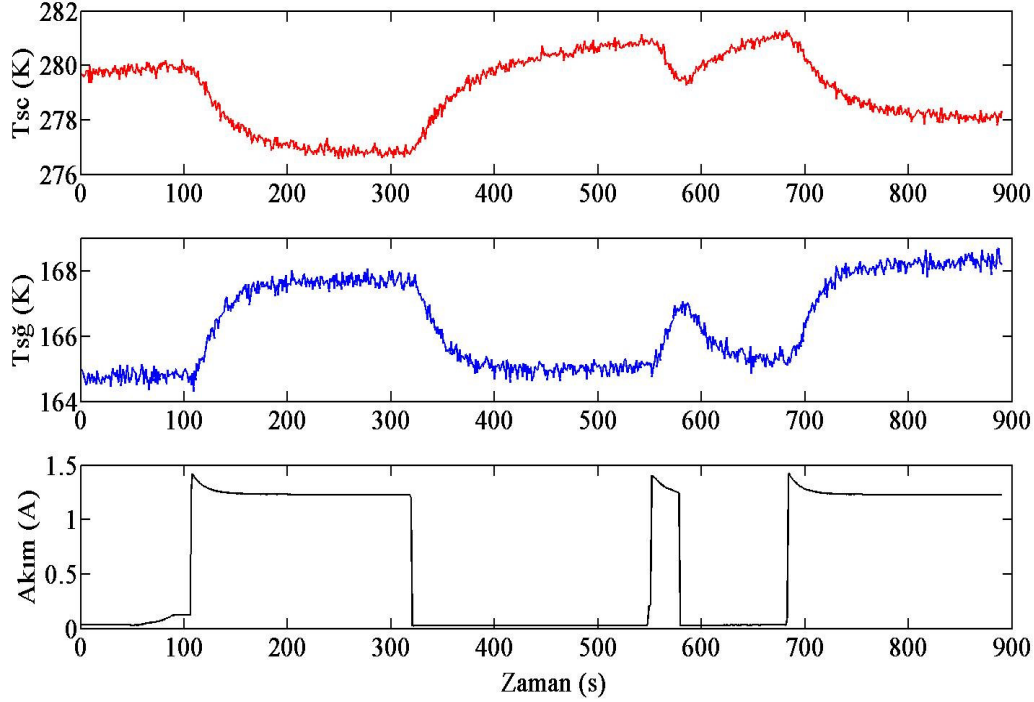


Şekil 4.44: Tellurex termoelektrik jeneratör için sıcaklık farkları aynı olan ortalama sıcaklıkları farklı olan durumlar için maksimum güç-ortalama sıcaklık grafiği.

4.2.11 Hızlı Deney

Yük direncinin açık ve kısa devre konumları arasında ani bir şekilde değiştirilerek devreden geçen akımın ani değişmesi sağlanmış ve TEG modülün üst ve alt plaka sıcaklıklarında akımın ani değişimi nedeniyle oluşan değişimler incelenmiştir. Ani akım değişimleri yaratılması sonucu deneysel olarak elde edilen veriler Şekil 4.45’de gösterilmiştir.

Şekil 4.45’de 100 üncü saniyede yük direnci kısa devre edilerek sistemden ani kısa devre akımının geçirilmesi sağlanmıştır. Elektron ve boşlukların termoelektrik yapılar da ısıyı taşıyan parçacıklar olarak görev yaptığı bu grafikten görülmektedir. Akımın ani bir şekilde değişmesiyle sıcak yüzeyin sıcaklığı soğuk yüzeye taşınırken buna bağlı olarak soğuk yüzeyin sıcaklığının artmakta ve sıcak yüzeyin soğumakta olduğu anlaşılmaktadır. Sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkının ani akımlarla azaldığı da görülmektedir. Yük direnci açık devre konumuna getirilince sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı tekrar artmaktadır.



Şekil 4.45: Ani akım değişimlerine karşılık TEG modülün davranışı.

5. SONUÇ

Bu tez kapsamında termoelektrik jeneratörler ve termoelektrik jeneratör olarak çalışan termoelektrik soğutucu modüllerin teorik ve deneysel çalışmalarla kriyojenik sıcaklıklardaki karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Tezin başlangıç noktası olan, termoelektrik jeneratörlerin çok soğuk çalışma sıcaklıklarında genel kullanılmaları olan sıcak çalışma koşullarına göre daha yüksek güç üretebilecekleri savı, teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda iki koşula bağlanarak doğrulanabilmektedir.

Birincisi, Bi_2Te_3 tabanlı yarı iletkenlerden üretilmiş olan bu modüllerin metallerde olan elektriksel iletim prensiplerinden farklı olarak, ısı uyarımla valans bandındaki elektronların iletkenlik bandına taşınmasıyla iletkenliğin sağlandığı gerçeğidir. Çok soğuk çalışmada sıcak ve soğuk yüzeylerin sıcaklıklarının çok düşmesi sonucu yarı iletkenin ısı yönden uyarılma enerjisi çok düşmekte ve buna bağlı olarak oluşturduğu elektron-boşluk çiftlerinin yoğunluğunun azalması sonucu düşük voltaj, akım ve güç üretmektedirler. Çok soğuk çalışma ile Joule kayıplarında azalma sağlanacağı ve güç üretiminin artacağı gerçeği yarı iletkenlerin çok soğuk çalışmada dirençlerinin artması sonucu her sıcaklık için doğru bir sonuç vermemektedir. Buna göre termoelektrik jeneratör modüllerinin davranışları belirli bir sıcaklığa kadar azalan çalışma sıcaklığı ile iyileşmekte, bir tepe değerden sonra da kötüleşmeye başlamaktadır. Tepe değere ulaşmasını sağlayan etken iç direncin düşmesi ile güç üretiminin artması iken, sıcaklık düştükçe olayları tersine çeviren etken yarı iletkenin iletkenlik bandına elektron transferini sağlayacak olan uyarılma enerjisinin istenen seviyeye ulaşmamasıdır.

İkincisi, yarı iletken malzemenin oluşturabileceği elektron-boşluk çiftlerinin yoğunluğu ısı uyarım ile yeterli düzeyde tutabilecek şekilde kontrol edilebilirse, ki bu sıcak yüzeyin belirli sıcaklık limitleri içinde sabit tutulmasıdır, soğuk yüzeyin

sıcaklığını çok düşük seviyelere çekmenin modülün performansını arttırdığı deneysel ve teorik çalışmalarla tespit edilmiştir. Burada kazanç hem iletkenliğin düşmesi hem de sıcaklık farkının artırılması ile üretilebilecek olan voltaj, akım ve güç değerlerinin artması olarak sıralanabilir. Modüllerin malzemeleri göz önüne alınacak olursa sıcak çalışma bölgeleri Bi_2Te_3 tabanlı yarı iletkenler için 448 K olarak üst limit verilmiştir. Buna karşın çok soğuk çalışma ile sıcaklık farkı sıcak çalışmaya göre daha fazla olacaktır ve buna bağlı olarak üretilebilen güç değerleri artacaktır.

Bu çalışma, telekomünikasyon baz istasyonlarının enerji gereksinimlerini rejeneratif güç yedekleme sistemleri ile çözmeyi hedefleyen kriyojenik ısı rezervuarlı termoelektrik jeneratörlerinin incelendiği bir ön çalışma olarak düşünüldüğünden yukarıda belirtilen koşullara göre dizayn yapılması gerekmektedir. Termoelektrik modüllerin sistem içinde ısı değiştirici ünite üzerine yerleştirileceği düşünülmektedir. Isı değiştirici ve termoelektrik modüllerin birlikte verimli çalışması için termoelektrik modülün sıcak yüzeyinin 300 K değerinin altına düşmemesi önemlidir. 300 K sıcaklıklarda termoelektrik modüllerdeki yarı iletken yapıların yeterli düzeyde ısıl yönden uyarılmalarını sağlayarak istenen düzeyde elektron-boşluk çiftleri oluşacak ve soğuk taraftaki sıcaklık değerinin aşağı çekilmesi ile birlikte hem elektriksel iletkenlik artacak hem de artan sıcaklık farkıyla üretilen voltaj, akım ve güç değerleri artacaktır.

Bu tez çalışmasının daha ileriye taşınması amacıyla, termoelektrik jeneratör modüllerini oluşturan tüm yapıların malzeme parametrelerinin sıcaklık bağımlılıkları gözönüne alınarak hem konuma hem de zamana bağlı biçimde matematiksel olarak modellenebilir. Bu tür bir çalışma burada sunulan analizi daha ileriye taşıyacak olup böyle bir çalışma İTÜ Bilimsel Araştırmaları Destekleme Projesi kapsamında devam etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] <<http://www.sustainablescale.org/>>, 15.10.2008
- [2] <<http://commerce.mt.gov/energy/energy.asp>>, 15.10.2008
- [3] **Rowe, D.M.**, 2006: *Thermoelectric Handbook Macro to Nano*, CRC Press, FL
- [4] **Rowe, D.M.**, 1995: *Handbook of Thermoelectrics*, CRC Press, London
- [5] **Kasap, S.O.**, 2006: *Principles of Electronic Materials and Devices*, Mc Graw Hill, NY
- [6] **Sivapurapu, S. V. K.**, 2007: Preliminary Design Of a Cryogenic Thermoelectric Generator, *Msc. Thesis*, Helsinki University of North Texas, USA.
- [7] **Sun, W., Hu, P., Chen, Z. and Jia. L.**, 2005: Performance of cryogenic thermoelectric generators in LNG cold energy utilization. *Energy Conversion and management* ,**46**, 789–796
- [8] **Sato, K., Okumura, H. and Satarou, Y.**, 2001: Numerical calculations for Peltier current lead designing. *Cryogenics*, **41**, 497-503
- [9] **Metzger, T. and Huebener, R.P.**, 1999: Modelling and cooling behavior of Peltier cascades. *Cryogenics*, **39**, 235-239
- [10] **Huong, N.T., Setou, Y., Nakamoto, G., Kurisu, M. Kajihara, T., Mizukami, H. and Sano, S.**, 2004: High thermoelectric performance at low temperature of p-BiSbTe grown by the gradient freeze method from Te-rich melt. *Journal of Alloys and Compounds*, **368**, 44-50
- [11] <<http://www.hi-z.com/hz2.php>>, 04.05.2008
- [12] <<http://www.branom.com/literature/thermocouple.html>>, 02.06.2008
- [13] <http://www.nature.com/nmat/journal/v7/n2/box/nmat2090_BX1.html>, 02.06.2008
- [14] <<http://www.tellurex.com/>>, 04.05.2008
- [15] <<http://www.marlow.com/Products/productlist.asp?ProductType=11>> , 04.05.2008
- [16] <<http://www.wikipedia.org/>> , 12.01.2008
- [17] <<http://www.ni.com/>> , 24.11.2008
- [18] <http://www.electronics-cooling.com/articles/2006/2006_nov_techdata.php>, 20.12.2008

- [19] **Şişman, A. and Özgün, H.**, 2008: Thermoelectric Generators and Their Applications for Energy from Space. *EFS 2008*, International Workshop on *Energy From Space for a Sustainable Environment*. Istanbul, Turkey.
- [20] **John, W.F.**, 2007: Vehicular Thermoelectrics Applications Overview. *U.S. Department of Energy*. Washington,USA
- [21] **Anatychuk, L.I., Luste, O.J. and Vikhor, L.N.**, 1996: Optimal Functions and Effective Method for Thermoelectric Devices Design. *15th International Conference on Thermoelectric*.Chernivtsi,Ukraine.
- [22] **Çengel, A. Y. and Michael, A.B.**, 2005: *Thermodynamics and Engineering Approach*,McGraw-Hill Science 5 edition.
- [23] **NASA**,2006. Space Radioisotope Power Systems Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator.
- [24] <<http://www.aa.washington.edu/AERP/CRYOCAR/CryoCar.htm>> ,13.03.2008
- [25] <<http://www.tetech.com/>>,11.01.2008
- [26] **Wagner, M.**, 2007: Simulation of Thermoelectric Devices. *PhD Thesis*, Technischen Universität Wien, Viyana, Avusturya.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Ankara da doğdu. Ankara Bahçelievler Deneme Lisesi'nden 2000 yılında mezun oldu. Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği bölümünden onur derecesi ile mezun oldu.

Birleşmiş Milletler (UN) kuruluşu UNIDO'ya bağlı, Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi (ICHET)'de Graduate Assistant olarak çalışmaya başladı. 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü yüksek lisans programına girdi. 2007 Temmuz ayından bu yana özel bir yatırım grubunda enerji konularında çalışmaktadır.