

**ATIK BACA GAZI KULLANIMI İLE
TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERDE
ELEKTRİK ÜRETİMİNİN FAYDALI
KULLANIMININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

**2014
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

Şahin BAŞ

**ATIK BACA GAZI KULLANIMI İLE TERMOELEKTRİK
JENERATÖRLERDE ELEKTRİK ÜRETİMİNİN FAYDALI
KULLANIMININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

Şahin BAŞ

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ocak 2014**

Şahin BAŞ tarafından hazırlanan “ATIK BACA GAZI KULLANIMI İLE TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERDE ELEKTRİK ÜRETİMİNİN FAYDALI KULLANIMININ DENEYSEL İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Bahadır ACAR

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 06 / 01/ 2014

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Öğr. Gör. Dr. Celil YAVUZ (SİNOP ÜNİV.)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Bahadır ACAR (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Engin GEDİK (KBÜ)



..../..../2014

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Şahin BAŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ATIK BACA GAZI KULLANIMI İLE TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERDE ELEKTRİK ÜRETİMİNİN FAYDALI KULLANIMININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Şahin BAŞ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Bahadır ACAR

Ocak 2014, 69 sayfa

Termoelektrik jeneratörlerde çok sayıda termoelementin birbirine seri bağlanması ile voltaj çıkışı yükseltilebilmekte, paralel bağlanması ile de akım değeri artırılabilir. Bu çalışmada, termoelektrik jeneratörler kullanılarak bir deney seti oluşturulmuş, jeneratörün sıcak tutulması gereken yüzeyi soba borusunda üretilen atık gaz tarafından ısıtılarak ve soğuk olan yüzeyi üzerinden su geçirilip soğutulmuş sıcaklık farkı ile elektrik üretimi sağlanmıştır. Çalışma esnasında gerilim değerlerinin 5,11V ile 8,69 V arasında değiştiği görülmüştür. Debi 0,083 lt/s olduğu anda 8,69 Volt ve 1,45 Amper’lik maksimum performans elde edilmiştir. Soğutma suyu debisi değiştirilerek yapılan deneylerde artan soğuk su debisi ile elektrik üretiminin doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiş, sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

Anahtar Sözcükler : Termoelektrik jeneratörler, peltier, atık ısı geri kazanımı, elektrik üretimi, soğutma.

Bilim Kodu : 914.1.150

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THE EXPERIMENTAL ANALYSIS OF ELECTRICITY GENERATION IN THERMOELECTRIC GENERATORS BY USING WASTE FLUE GAS

Şahin BAŞ

Karabuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Energy Systems Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Bahadır ACAR

January 2014, 69 pages

With thermoelectric generators, voltage values could be increased by connecting thermoelectric generators as serial to each other, also current values could be increased by connecting thermoelectric generators as parallel to each other. In this study, an experimental set is created by using thermoelectric generators, electricity generation is provided with temperature difference by heating the hot side with waste gas which is produced in stove pipe and cooling the cold side by passing water through. During this work, it's observed that voltage values changed between 5.11V and 8,69 V. After flow rate reached to 0,083 lt/s, it is obtained maximum performance as 8,69 Volt voltage value and 1,45 Ampere current value. In experiments made by changing the flow rate of cooling water, it is observed that electricity generation can be increased proportionally with increasing flow rate, and results are presented as graphics.

Keywords : Thermoelectric generators, peltier, energy generation, waste heat, recycling, performance analysis, electricity generation, cooling.

Science Code : 914.1.150

TEŞEKKÜR

Tez alıŐmama verdikleri desteklerden dolayı danıŐmanım Yrd. Do. Dr. Bahadır ACAR'a, ölçümler ve kaynak belirleme esnasındaki yardımlarından dolayı Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölüm Başkanı Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK, Enerji Sistemleri Mühendisliği Öğretim Görevlisi Yrd. Doç. Dr. Engin GEDİK ve Sinop Üniversitesi Öğretim Görevlisi Dr. Celil YAVUZ'a, tez koordi-nasyonunun sağlanmasında emeği geçen ve maddi manevi desteklerinden dolayı başta Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'ndeki ve hâlen görev yaptığım kurum olan Batı Karadeniz Kalkınma Ajansı'ndaki arkadaşlarım olmak üzere bütün arkadaşlarıma, ayrıca test düzeneğinin kurulmasında yardımlarda bulunan sevgili eşim Jurgita BAŞ, babam Hakkı BAŞ, annem Meziyet BAŞ'a ve moral motivasyonumu her zaman üst seviyede tutmamı sağlayan yeni doğan oğlum Berat BAŞ'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGİLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. YARI İLETKENLER.....	2
1.1.1. N ve P Tipi Yarı İletken Kristallerinde Elektron ve Pozitif Elektrik Yükü Hareketleri	3
1.1.2. Yarı İletken Elemanların Isı Kontrolü	5
1.2. TERMOELEKTRİK ETKİLER.....	7
1.2.1. Seebeck Etkisi.....	8
1.2.2. Peltier Etkisi.....	9
1.2.3. Thomson Etkisi.....	12
1.3. TERMOELEKTRİK MADDELERİN AKSİYON PRENSİPLERİ	12
BÖLÜM 2	15
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	15
BÖLÜM 3	23
TERMOELEKTRİK MODÜLLER.....	23
3.1. TERMOELEKTRİK MODÜLLERİN YAPISI	23
3.1.1. Materyal Türüne Göre Termoelektrik Modüller.....	25

	<u>Sayfa</u>
3.1.2. Termoelektrik Modülde Isının Taşınması	25
3.1.3. Termoelektrik Mikromodüllerin Birbirleriyle Bağlantısı	26
3.2. TERMOELEKTRİK MODÜLLERİN EKONOMİK YÖNDEN İNCELENMESİ	29
3.3. TERMOELEKTRİK SOĞUTUCULAR	30
3.3.1. Termoelektrik Soğutmanın Teorisi	31
3.3.2. Termoelektrik Soğutucularda Kullanılan Malzemeler	33
3.3.3. Termoelektrik Soğutucuların Avantajları ve Dezavantajları	34
3.4. TERMOELEKTRİK JENERATÖRLER	35
3.4.1. Termoelektrik Jeneratör Denklemleri	36
3.4.2. Termoelektrik Jeneratörün Mimarisi	39
3.4.2.1. Termoelektrik Jeneratör Materyalleri	41
3.4.2.2. Nanoteknolojili Termoelektrik Materyaller	43
BÖLÜM 4	45
YÖNTEM ÖLÇÜM VE HESAPLAMALAR	45
4.1. HAZIRLIK AŞAMASI	45
4.1.1. Deney Seti İçin Gerekli Malzemeler	45
4.1.1.1. Kullanılacak Termoelektrik Jeneratörün Genel Özellikleri	46
4.1.1.2. Termoelektrik Jeneratörün Kullanımı ve Basit Uygulama Örnekleri	47
4.1.2. Düzenek Temin Edilirken Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar	49
4.2. YÖNTEM	50
4.2.1. Deney Setinin Oluşturulması	50
4.2.2. Test Ortamının Hazırlanması ve Deney Setinin Montajı	51
4.3. ÖLÇÜM	52
4.4. DENEY SONUCU ANALİZLERİ	56
4.4.1. Termoelektrik Jeneratörün Performansı ve Verimliliği	57
4.4.2. Soğutma Suyu Akış Hızının Enerji Üretimine Etkisi	60
4.5. SOĞUTMA SUYU KONTROLÜYLE ENERJİ ÜRETİMİ	62
BÖLÜM 5	64
SONUÇ VE ÖNERİLER	64

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. N tipi yarı iletken.	3
Şekil 1.2. P tipi yarı iletken.	3
Şekil 1.3. Farklı metallerden oluşan bir devrede akım oluşumu	7
Şekil 1.4. Seebeck voltajının ölçümü	8
Şekil 1.5. Peltier etkisi devresi	10
Şekil 1.6. Bir termoelektrik çiftin fiziksel gösterimi	11
Şekil 1.7. Termoelektrik modüllerin yapısı	13
Şekil 1.8. Termoelektrik materyalin iç kesiti	13
Şekil 3.1. N-tipi yarıiletkende elektron akışını gösteren devre	24
Şekil 3.2. P-tipi yarı iletkenlerde delik akışını gösteren devre	24
Şekil 3.3. Malzeme türüne göre termoelektrik davranış	25
Şekil 3.4. N-tipi yarıiletkenlerin paralel bağlantısı	26
Şekil 3.5. N-tipi yarıiletkenlerin seri bağlantısı	27
Şekil 3.6. Termoelektrik mikro modüllerin seri bağlantısı.	27
Şekil 3.7. Çoklu termoelektrik mikromodüllerin seri bağlantısı	28
Şekil 3.8. Farklı modüller için modül sayısına bağlı olarak COP un değişimi.	30
Şekil 3.9. Bir termoelektrik soğutucu modülü	32
Şekil 3.10. Performans grafiği (ΔT ve Gerilim).....	33
Şekil 3.11. Performans grafiği (ΔT ve Q_c)	33
Şekil 3.12. Termoelektrik jeneratörün basit şematizesi.	35
Şekil 3.13. Tek bir termoelektrik mikro modül.....	37
Şekil 3.14. Modüllerin seri – paralel düzenlenmesiyle tipik termoelektrik jeneratör.	39
Şekil 3.15. Maksimum verimliliğin sıcaklığa göre değişimi.	39
Şekil 3.16. Dilimli (segmente) bacaklı termo çiftin yapısı	40
Şekil 3.17. Farklı kalınlıklardaki dilimli bacaklara sahip dikey termoelektrik çiftin yapısı	41
Şekil 3.18. P ve N tipi için ZT katsayısının 0-1000°C arasında sıcaklıklardaki değişimi	43

Sayfa

Şekil 3.19. Katmanlı Bi ₂ Te ₃ /Sb ₂ Te ₃ malzemelerinin artan yöne doğru kristal yapısı C yönü doğrultusunda Van der Walls bağı oluşumu	44
Şekil 3.20. Pt bağlı katı Si nano kablosunun elektron mikrografisi.	44
Şekil 4.1. Termoelektrik jeneratör modülü.	45
Şekil 4.2. Diğer malzemeler.	46
Şekil 4.3. Sıcak-soğuk su sıcaklık farkıyla elektrik üretimi.....	47
Şekil 4.4. Resistans ve buzun oluşturduğu sıcaklık farkıyla elektrik üretimi.	48
Şekil 4.5. Mum ve soğutma suyunun oluşturduğu sıcaklık farkıyla elektrik üretimi.	49
Şekil 4.6. Deney setinin hazırlanışı.	51
Şekil 4.7. Test sisteminin hazır hâle getirilmesi.	52
Şekil 4.8. Ölçümlerin gerçekleştirilmesi.	52
Şekil 4.9. Şebeke suyu sıcaklığı.	54
Şekil 4.10. Çeşitli yüzeylerdeki sıcaklık ölçümleri.	54
Şekil 4.11. LED lambanın çalıştırılması.	56
Şekil 4.12. Cep telefonunun şarj edilmesi.	56
Şekil 4.13. Zamana bağlı sıcaklık değişimleri.	58
Şekil 4.14. Zamana bağlı elektriksel değişim.	58
Şekil 4.15. ΔT 'ye bağlı olarak elektriksel değişim.	59
Şekil 4.16. Soğutma suyu akış hızının zamana göre değişimi.	60
Şekil 4.17. Soğutma suyunun akış hızının sıcaklığa etkisi.	61
Şekil 4.18. Soğutma suyunun akış hızının elektriksel değişime etkisi.	61
Şekil 4.19. Su kontrollü termoelektrik jeneratörlerin uygulama örneği.	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1. Yarı iletkenler ve kullanımları	6
Çizelge 3.1. Kullanılan termoelektrik modüllerin özellikleri.	29
Çizelge 3.2. Termoelektrik soğutucuların üstünlükleri	34
Çizelge 3.3. Termoelektrik soğutucuların dezavantajları.	34
Çizelge 4.1. TEG 12710 termoelektrik modülün genel özellikleri.	47
Çizelge 4.2. Sabit debili soğutma suyu kullanımında oluşan sıcaklık farkı ile alınan elektriksel değerler.	53
Çizelge 4.3. Sabit debili soğutma suyu kullanımında oluşan yüzey sıcaklıkları	53
Çizelge 4.4. Soğutma suyu debisi değişimine göre elektriksel değerler.	55
Çizelge 4.5. Soğutma suyu debisi değişimine göre termal değerler.	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- A : seebeck katsayısı ($V/^{\circ}C$)
t : thomson katsayısı ($V/^{\circ}C$)
 ρ : yarıiletkenin öz direnci (ohm.cm)
 Q_h : ısınan yüzeye aktarılan ısı yük miktarı (W)
 Q_c : soğuyan yüzeye aktarılan ısı yük miktarı (W)
 Π : peltier katsayısı (V)
a : yarıiletkenin kesit alanı (mm^2)
K : modülün termal iletkenliği (W/K)
Z : termoelektrik yarıiletkenin kalite katsayısı
 T_h : ısınan yüzey sıcaklığı ($^{\circ}C$)
 T_c : soğuk yüzey sıcaklığı ($^{\circ}C$)
 T_i : temel ısı ($^{\circ}C$)
N : modüldeki termoelement sayısı
P : güç (watt)
R : direnç (ohm)
I : akım (amper)
W : güç Birimi (watt)
V : potansiyel fark (volt)
 ΔT : sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
 $^{\circ}C$: santigrat derece
G : şekil faktörü
 μ : kesit ölçüsü (mikro)
 η : verimlilik (%)
Eg : jeneratör verimliliği (%)
C : sistem kurulum maliyeti

KISALTMALAR

COP	: coefficient of performance (performans katsayısı)
TE	: termoelektrik
TEM	: termoelektrik modül
TEG	: termoelektrik jeneratör
2DEG	: 2 boyutlu elektron gazı
IC	: entegre devre
LED	: ışık yayan diyot
PCL	: peltier akım taşıyıcıları
CFC	: kloroflorokarbon
NS	: N adet seri bağlı termoelektrik modül
NP	: N adet paralel bağlı termoelektrik modül
DC	: doğru akım
CRF	: sermaye geri ödeme faktörü
CCD	: charge coupled device, bağlı şarj aygıtı
BİTE	: biyokütle fırını termoelektrik jeneratörü
Ayg	: aygıt
Max	: en yüksek
Min	: en düşük
Ave	: ortalama
Opt	: uygun
Rad	: radyasyon
Conv	: konveksiyon

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Termoelektriksel modüller 1960'lara kadar ticari gelişimi göstermemiş olmasına rağmen, aslında modern termoelektrik soğutucular üzerindeki fizik kanunlarının temeli 1800'lü yılların ilk yarısına dayanmaktadır [1].

Termoelektriğe ilişkin ilk bulgu, 1821 yılında, Alman bilim adamı Thomas Seebeck tarafından ortaya konulan iki farklı tür metalin içerisinde bulunduğu kapalı bir devrede elektrik akımı dolaştırıldığında, metal çiftlerin iki farklı sıcaklık değeri tepkisini gösterdiği bulgusudur. Aslında Seebeck bu keşfin temelini fark etmemiştir. Bununla beraber ne yazık ki süregelen sıcaklık üretiminin, dolaşan elektrik akımı ile aynı etkiyi yarattığını farz etmiştir [1].

1834'lere gelindiğinde, Fransız saat üreticisi ve aynı zamanda part-time fizikçi olan Jean Peltier, Seebeck Etkisi'ni araştırırken, elektrik akımının kapalı bir döngüde dolaştığı sırada termal enerjinin farklı kesitlerden birinde absorbe edilirken, diğerinde deşarj olduğunu fark ederek, teoriye bambaşka bir bakış açısı getirmiştir. Bundan 20 yıl sonra William Thomson (Lord Kelvin olarak da bilinir), Seebeck ve Peltier etkilerini kapsayan ve bunların ilişkilerini açıklayan bildiri yayımlamıştır. Bununla beraber, o zamanlarda bu öngörülerin hala daha fazla laboratuvar çalışmalarına konu olması gerektiği ve pratik uygulamalardan yoksun olduğu düşünülmüştür [1].

1930'larda ise Rus bilim adamları, bazı termoelektrik çalışmaları kullanarak, ülkeleri boyunca uzak yerleşim yerlerinde kullanılmak üzere güç jeneratörleri kurma girişimi ile araştırmalarına başlamışlardır. Rusların termoelektrik üzerine yoğunlaşan bu ilgisi nihayetinde dünyanın diğer ülkelerine de yansımış ve daha pratik termoelektrik modüllerin gelişimini yaygınlaştırmıştır. Bugün daha önceki deneylerde kullanılan

farklı metal kesitleri yerine, termoelektrik soğutucularda modern yarı iletken materyaller teknolojisinin kullanımı sağlanmıştır. Seebeck, Peltier ve Thomson etkileri ile birlikte diğer bulgular da, işlevsel termoelektrik modülün temellerini oluşturmaktadırlar [2].

Termoelektrik soğutucular, sıcaklık dengesi, sıcaklık döngüsü veya ortam altında soğutma gerektiren uygulamalarda kullanılan katı haldeki ısı pompalarıdır. CCD kameralar (charge coupled device), lazer diyotlar, mikro denetleyiciler, kan analizatörleri ve ayarlanabilir ve taşınabilir soğutucular gibi birçok yerde termoelektrik soğutucu ürünleri kullanılabilir. İlk bölümde termoelektrik soğutucuların termal ve elektriksel etkilerinin denklemsel ve pratik teorilerini incelenecektir.

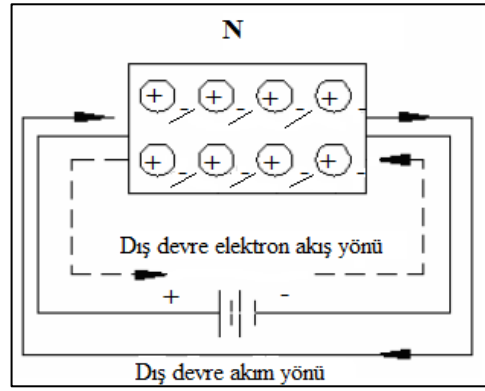
1.1. YARI İLETKENLER

Termoelektrik prensibine geçmeden önce yarı iletkenlerin özelliklerine hakim olmamız gerekir. Elektrik akımının bir değere kadar akmasına izin vermeyen, bu değerden sonra sonsuz küçük direnç gösteren maddelere yarı iletken denir. Yarı iletkenler periyodik cetvelde 3. ve 5. gruba girerler. Bu demektir ki son yörüngelerinde elektron alıcılığı veya vericiliği iletkenlerden az, yarı iletkenlerden fazla olmalıdır. Yarı iletkenler; S, Ge, Br, Al, In (indiyum) ve benzeri elementlerdir [3].

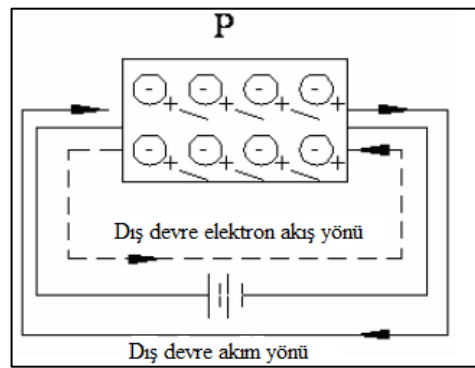
Yarı iletkenler; iletkenlik bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasında yer alırlar, normal halde yalıtkandırlar, ancak ısı, ışık ve manyetik etki altında bırakıldığında veya gerilim uygulandığında bir miktar valans elektronu serbest hale geçer, yani iletkenlik özelliği kazanır. Bu şekilde iletkenlik özelliği kazanması geçici olup, dış etki kalkınca elektronlar tekrar atomlarına dönerler. Tabiiatta basit eleman halinde bulunduğu gibi laboratuvarında bileşik eleman halinde de elde edilir. Yarı iletkenler kristal yapıya sahiptirler. Yani atomları kübik kafes sistemi denilen belirli bir düzende sıralanmıştır. Bu tür yarı iletkenler, belirtildiği üzere; ısı, ışık etkisi ve gerilim uygulanması ile belirli oranda iletken hale geçirilerek ve içlerine bazı özel maddeler katılarak da iletkenlikleri artırılmaktadır. Katkı maddeleriyle iletkenlikleri artırılan yarı iletkenlerin elektronikte ayrı bir yeri vardır. Bunun nedeni elektronik devre elemanlarının üretiminde kullanılmalarıdır [3].

1.1.1. N ve P Tipi Yarı İletken Kristallerinde Elektron ve Pozitif Elektrik Yükü Hareketleri

N tipi yarı iletken kristaline gerilim uygulandığında, kristal içerisindeki serbest elektronlar, Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Gerilim kaynağının pozitif kutbunun çekme kuvveti ve negatif kutbunun da itme kuvveti etkisiyle, kaynağın pozitif (+) kutbuna doğru akar. Bu arada, kaynağın negatif (-) kutbundan çıkan elektronlar da kristale doğru hareket eder. Akımın bir devredeki işlevi bakımından, yönün önemi yoktur. Ancak bazı devre hesaplarında yön işareti koymak gerekebilir. Böyle bir durumda "+" → "-" yönü pozitif yön ve "-" → "+" yönü negatif yön alınır [3].



Şekil 1.1. N tipi yarı iletken[3].



Şekil 1.2. P tipi yarı iletken[3].

P Tipi kristalde "Pozitif elektrik yükü" (oyuk) bir elektron gibi hareket etmemektedir. Ancak anlatım kolaylığı bakımından, hareket ettiği kabul edilmiştir. Katkı maddesi yokken, Ge ve Si atomlarının kovalent bağlarını kırarak bir elektronunu

almak çok zor olduğu halde, katkı maddesi bu işlemi kolaylaştırmaktadır ve bir gerilim uygulandığında akım iletimi sağlanmaktadır. P tipi bir kristale Şekil 1.2 'deki gibi bir gerilim kaynağı bağlanırsa şu gelişmeler olmaktadır [3]:

1. Durum: Kaynağın pozitif kutbuna yakın bulunan ve bir elektronunu katkı maddesine vererek "+" elektrik yüklü hale gelmiş olan Ge ve Si atomu, kaynağında çekme kuvveti yardımıyla, bir sonraki atomun kovalent bağını kırarak, 1 elektronunu alır. Ancak, dengesi bozulmuş olan atom bu elektronu sıkı tutamayacağından, kaynağın pozitif kutbunun çekme kuvveti etkisine kapılan elektron atomdan ayrılarak kaynağa doğru hareket eder.

2. Durum: Bir elektronunu kaybeden ikinci atom da ondan sonraki atomun elektronunu alır.

3. Durum: Böylece, elektron bir atomdan diğerine geçecek ve son atom da kaybettiği elektronu kaynağın negatif kutbundan alacaktır.

4. Durum: Tekrar birinci duruma dönülmekte ve olay devam etmektedir. Sıra ile bir elektronu kaybeden her bir atom, pozitif elektrik yüklü hale geldiğinden pozitif elektron yükü (oyuk) hareket ediyormuş gibi olmaktadır. Her ne kadar pozitif elektrik yükü, yani bu yükü taşıyan atom, elektron gibi bir noktadan kalkıp, diğerine doğru hareket edemese de, ardarda oluşan "+" elektrik yüklü atomlar, "+" elektrik yükünün (oyuğun) hareket ettiği görüntüsünü vermektedir. Böyle bir açıklama şekli, diyotların ve transistörlerin çalışma prensibini daha kısa yoldan anlatımını sağlamaktadır. Elektronların atomdan atoma geçişi, hareket hızını düşürdüğünden P tipi kristaldeki akım hızı N tipine göre daha yavaştır [3].

P tipi kristale bir gerilim kaynağı bağlansın. P tipi kristaldeki akım iletimi de N tipi kristale benzer şekilde açıklanır. Gerilim kaynağı, N tipi kristaldeki elektronları nasıl etkiliyorsa, P tipi kristalde de pozitif elektrik yüklerini benzer şekilde etkilediği düşünülür. Şöyle ki: Gerilim kaynağının "+" kutbu, kristaldeki "+" elektrik yüklerini iter ve "-" kutbu da çeker. Böylece, "+" elektrik yükleri, şekilde oklar ile gösterilmiş olduğu gibi, kaynağın negatif kutbuna doğru hareket eder. Bu hareket devreden bir

akımın akışını sağlar. Devredeki akımın oluşumu, bu şekilde kısa yoldan açıklanmış olmaktadır. Ancak pozitif elektrik yüklerinin hareketi yalnızca kristal içerisinde kalmaktadır. Dış devrede hareket eden yine elektronlardır.

Dış devrede elektronların hareket yönü, yine kurallara uygun olarak kristalden kaynağın "+" kutbuna ve kaynağın "-" kutbundan kristale doğrudur. Dış devre akım yönü de yine kurallar gereğince, kaynağın "+" kutbundan çıkıp, "-" kutbuna doğru olan yöndür [3].

1.1.2. Yarı İletken Elemanların Isı Kontrolü

Teorik olarak bir yarı iletken elemanın, temel ısı (T_i) olarak adlandırılan iç ısısının üst limiti, yani yarı iletken elemanın hafifçe macunlanmış bölgesindeki ısı yoğunluğu, iç ısı yoğunluğunun büyük bir bölümünü taşır. Örneğin verici yoğunluğunun 1014 cm^3 olduğu yerdeki silikon diyotun hafifçe macunlanmış bölgesinde temel ısı 280°C civarındadır. Eğer bu ısı aşılsa jonksiyon noktasının karakteristiği bozulur. Çünkü temel taşıyıcı yoğunluğu, macunlanmış bölgedeki yoğunluğu büyük ölçüde aşar ve termal bölge potansiyel farkı kaybolur, yarı iletkenlik bozulur ve kısa devre olur. Bununla beraber, veri tabakaları üzerinde tanımlanmış maksimum iç ısı bu limitten daha azdır. Güç yarı iletkenlerinde güç kaybı normalde iç ısıyla yükselir ve bu kayıplar 200°C sıcaklıkta bile oldukça yüksektir. Yarı iletken üreticileri bir elemandan diğerine değişiklik gösterebilen ve genellikle 125°C olan, sabit iletim voltajı, anahtarlama süresi, tanımlanmış maksimum ısıda anahtarlama kayıpları gibi maksimum değerdeki eleman parametrelerini garantilerler. Dizayn süresince, birincil dizayn girdimiz jonksiyon sıcaklığının en kötü durumudur. Yüksek güvenilirliğe ulaşması hedeflenen bir sistem 125°C 'nin altındaki $20\text{-}40^\circ\text{C}$ 'de yarı iletken elemanların en kötü jonksiyon sıcaklığı için dizayn edilmektedir. Aksi takdirde, 125°C 'deki değeri genellikle dizayn yapılırken en kötü koşul girdisi olarak kullanılır. Bu durumda bir istisna olarak, 125°C 'nin altında tutulmak istenen maksimum transistör jonksiyon sıcaklığıdır. Maksimum izin verilebilir dv/dt elemana uygulanırken aynı zamanda jonksiyon sıcaklığı 125°C 'nin üzerine çıkarsa, tristörler yeniden harekete geçebilir ya da yanabilirler [4].

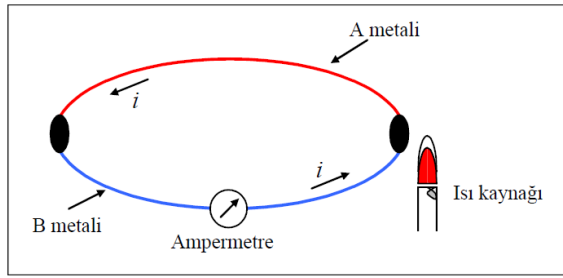
Bazı güç yarı iletken elemanları, sinyal seviye transistörleri ve IC'ler 200°C'nin biraz üzerinde çalışabilirler. Bununla birlikte güvenilirlikleri (beklenen çalışma ömürleri) düşüktür ve performans özellikleri 125°C'deki çalışmaya kıyaslandığında yetersiz olabilir. Ayrıca üretici veri bilgisi olarak verilmiş maksimum ısı üzerindeki parametreleri garantilemeyecektir. Eğer bir güç elektroniği devresinde yarı iletken elemanı yüksek ısılarda kullanılmak isteniyorsa bunun için ayrı bir dizayn yapılmalı ve eleman üzerinde biriken ısının atılması hedeflenmelidir ki aksi takdirde kullanılan yarı iletken eleman yanar. Güç elektroniği donanımını dizaynlarken, özellikle yüksek sıcaklıktaki ortamlar için, termal evre hesaba katılmalıdır. Soğutucu (heat sink) boyu, ağırlığı, elemanların konulacağı yerler ve çevre sıcaklığı ile ilgili bilgiler hesaplanmalıdır. Soğutucu ile soğutucu kanatlarının montajı, geniş odalı dikey pozisyonda olması fansız doğal konveksiyon hava geçişi için çok önemlidir. Güneş tarafından ısınma olasılığı en kötü durum olarak dizayn yapılırken hesaba katılmalıdır. Kötü tasarlanmış termal dizayn ekipmanların güvenilirliğini azaltır. Unutulmaması gereken bir husus da yarı iletken eleman çiftleri her 10-15 °C sıcaklıkta 50 °C üzerine çıkar ve bunun oranı yetersiz kalabilir. Doğru seçim (en ekonomik veya en ucuz üretim için) soğutucu güç elektroniği sistemi için sadece termal dizayn sürecinin bir bölümüdür. Dizayn yapılmadan önce büyük veya küçük soğutucu ile doğal konveksiyonla, fan yardımıyla (AC motor fan kontrol küçük güç elektroniği inverterleri ile DC motor fanlarından daha güvenilirdir) veya gaz soğutma ile sistemi tasarlamak daha uygun olabilmektedir [4].

Çizelge 1.1. Yarı iletkenler ve kullanımları [4].

Adı	Kullanım Yeri
Germanyum (Ge) (Basit Eleman)	Diyot, Transistör, Entegre, Devre
Silikon (Si) (Basit Element)	Diyot, Transistör, Entegre, Devre
Selenyum (Se) (Basit Element)	Diyot
Bakır Oksit (Kuproksit) (CuO)(Bileşik Element)	Diyot
Galiyum Arsenid (GaAs) (Bileşik Element)	Tünel Diyot, Lazer, Fotodiyot, LED
İndiyum Fosfor (InP) (Bileşik Element)	Diyot, Transistör
Kurşun Sülfür (PbS) (Bileşik Element)	Güneş Pili (Fotosel)

1.2. TERMOELEKTRİK ETKİLER

Elektriksel ve ısı etkilerin bir arada bulunduğu, yarıiletkenlerden oluşan devreye termoelektrik devre adı verilir. Bu devre ile çalışan sisteme de termoelektrik sistem adı verilir. Isı enerjisinin elektrik enerjisine, elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümlerinin temelini oluşturan termoelektrik etkiler, 150 yıldan daha fazla zamandır bilinmektedir. Farklı metallere yapılmış iki tel, uçlarından birleştirilmesiyle kapalı bir devre sistemi oluşur. Bu devreden elektrik akımı geçmez, fakat uçlardan biri ısıtıldığı zaman, devreden Şekil 1.3'te gösterildiği gibi bir elektrik akımı geçtiği, 1823'te Thomas Seebeck tarafından keşfedilmiştir. Yaptığı deneyler sonucunda devreye bağlı gerilim ölçen (voltmetre) cihazın ibresinin hareket ettiğini görmüştür. Bu olaya Seebeck etkisi adı verilmiştir [5].



Şekil 1.3. Farklı metallere yapılmış bir devrede akım oluşumu [5].

Bu kapalı devreden de anlaşıldığı gibi ısı kaynağı sayesinde güç üretilebilmektedir. Fakat bu etki tespit edildiğinde, hâlâ buharlı güç üretme üniteleri kullanılmakta olduğu için Seebeck'in yaptığı araştırmalar hızlı bir gelişme göstermemiştir. Enerji krizlerinin artması, dolayısıyla alternatif enerji kaynaklarına yönelmeler sayesinde, bu konu üzerindeki çalışmalar artmıştır. Seebeck etkisinin iki önemli uygulama alanı vardır. Bunlar sıcaklık ölçümleri ve güç üretimidir. Seebeck etkisinin tespit edilmesi ve enerjideki problemler sonucunda bu konu üzerinde çalışmalar yapılmış, Peltier ve Thomson etkileri belirlenmiştir [5].

1.2.1. Seebeck Etkisi

İki farkı yarıiletken malzemelerin birbirine seri olarak birleştirilerek oluşturulan devrede, farkı sıcaklıklarda elektrik gerilimi ölçülür. Bu gerilim “ Seebeck Voltajı ” olarak da isimlendirilir. Devreden ölçülen gerilim, malzemelerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılıdır [5].

İki farkı yarıiletken malzemedan oluşturulan devrede ölçülen potansiyel fark;

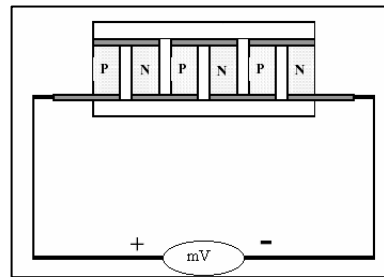
$$V = \alpha \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

V: Devreden ölçülen potansiyel fark (Volt)

$\Delta T = T_2 - T_1$ Yarıiletken malzemelerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (°C)

$\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ Seebeck katsayısı veya termo emk (V / °C) dir.

α 'nın değeri; devreyi oluşturan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Örneğin bakır konstantandan yapılan bir termokupl için $\alpha = 40 \mu V / ^\circ C$ 'dır. Yani her 1 °C sıcaklık farkı için 40 μV 'luk voltaj üretir. α 'nın değeri 100 $\mu V / ^\circ C$ 'dan büyük olan yarıiletkenlere, termoelektrik yarıiletkenler denir. N tipi yarıiletken için α değeri negatif, P tipi yarıiletken için α değeri ise pozitifdir. Meydana gelen seebeck etkisi yarıiletkenlerde jeneratör gibi, metallerde ise termokupl veya ısı sensörü gibi kullanılır [5].



Şekil 1.4. Seebeck voltajının ölçümü [6].

1.2.2. Peltier Etkisi

İki farklı materyalden oluşmuş bir kapalı devreden I akımı geçirilirse, birim zamanda absorbe edilen veya açığa çıkarılan ısı miktarı, I akımını ile doğru orantılıdır [7].

$$Q_p = \pi \cdot I \quad (1.2)$$

Q_p : Birim zamanda transfer edilen ısı miktarı (W),

I: Devre üzerinden geçen doğru akım (A),

π : Peltier sabiti (V) dir.

Bu iki etkinin birbirine tam ters olması dolayısıyla (1.1) eşitliğindeki α ile (1.2) eşitliğindeki π arasında bir ilişki olduğu düşünülebilir. Beklenen bu ilişki Kelvin tarafından;

$$\pi = \alpha \cdot T \quad (1.3)$$

α : Seebeck katsayısı (V / °C),

T: Mutlak sıcaklık (K)

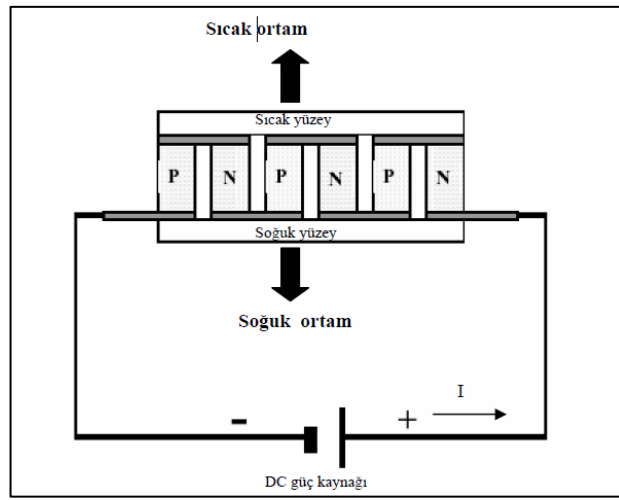
Eşitliği ile ifade edildiği için, Q eşitliği;

$$Q_p = \alpha \cdot T \cdot I \quad (1.4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Soğuk ve sıcak yüzeyler tamamen Peltier etkisi ile oluşan ısı transferinin doğal sonucudur, yani Peltier etkisiyle ısı, soğuk yüzeyden sıcak yüzeye transfer edilmekte, ayrıca bir ısı üretilmemektedir [7].

Yarıiletkenler üzerine yapılan fiziksel incelemeler, termoelektrik soğutucunun ısıyı transfer etmek için elektronların enerji seviyelerindeki değişimi kullanan bir ısı pompası olduğunu göstermektedir. Elektronlar iki farklı termoelektrik materyalin oluşturduğu iletken malzemelerden geçerken, bir enerji soğurucu (absorber) veya yayıcı (evolve) değişime uğramaktadırlar. Akım, düşük enerji seviyesine sahip p-tipi yarıiletken, yüksek enerji seviyesine sahip n-tipi yarıiletkene akarken, elektronlar

soğuk yüzeyden aldıkları enerjiyi sıcak yüzeyde terk etmektedirler. Dışarıdan verilen elektriksel güç, elektronların sistem içinde hareket etmeleri için gerekli enerjiyi sağlamakta ve böylece hareketlenen elektronlar değişen enerji düzeyleri arasında ilerlerken ısı transfer etmekte, başka bir deyişle ısı taşımaktadırlar. Dışarıdan verilen elektriksel güç arttırılırsa, hareketli elektron sayısı da artacağından soğuk yüzey ile sıcak yüzey arasındaki ısı transfer miktarı da artacaktır. Eğer akım yönü ters çevrilirse, bu işlem tersine işleyecek ve dolayısıyla sıcak ve soğuk yüzeyler kendi arasında yer değiştireceklerdir [8].



Şekil 1.5. Peltier Etkisi Devresi [7].

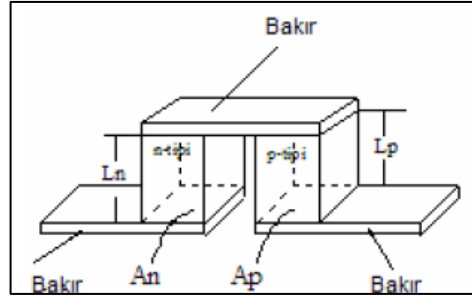
Şekil 1.5'teki iki farklı materyalden oluşan eleman "çift" (couple) olarak isimlendirilir. N tipi termoelektrik materyal negatif Seebeck katsayılıdır ve elektron fazlalığı vardır. P tipi termoelektrik materyal ise pozitif Seebeck katsayılıdır ve elektron eksikliği vardır. Akım yönü bilinen yönde olup, elektronların akış yönünün tersinedir. Termoelektrik materyallerle bakır levhalar arasında dört adet bağlantı noktası olmasına karşın, biri üstte diğeri altta olmak üzere sadece iki termoelektrik iletken malzeme vardır. Alt (soğuk) yüzeyden ısı absorbe edilirken, bu ısı üst (sıcak) yüzeyden açığa çıkar [7].

Bahsedilen bu ideal termoelektrik devrede iki etki daha vardır ki; bunlar performansı önemli ölçüde sınırlamaktadır. Birincisi joule ısıtma etkisi, ikincisi ise sıcaklık farkından dolayı kaçınılmaz olan, iki iletken malzeme arasındaki kondüksiyon ile ısı

transferidir. Joule ısıtma etkisinden dolayı soğuk yüzey ile sıcak yüzey arasındaki sıcaklık değişimi lineer olmamaktadır.

Eğer ilgili kabuller yapılırsa; α : seebeck katsayısı, ρ :özdirenç ve λ : ısı iletkenlik sıcaklıktan bağımsızdır. "Çift" ile ortam arasındaki ısı alışverişi sadece sıcak ve soğuk yüzeylerden olmaktadır. Kontak dirençleri, bakır ile yarı iletken arasındaki elektriksel direnç ihmal edilebilir.

Soğuk yüzeyde ve giriş gücünde kararlı durum olduğu zaman Peltier elemanın soğuk yüzeyden soğurabileceği ısı miktarı; Q , buna ters yöndeki istenmeyen ısı kazançlarının ifadesini elde etmeye yardımcı olur. Böylece transfer edilecek ısının (Q) akım arttıkça artacağı ve sıcaklık farkı arttığında ise azalacağı gözükmemektedir [5].



Şekil 1.6. Bir termoelektrik çiftin fiziksel gösterimi [5].

Giriş ve çıkış gücü belli olduğunda peltier elemanın verim katsayısı başka değişle performans katsayısı (COP) bulunabilir [3].

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (1.5)$$

Görüldüğü üzere sabit bir akımda verim, $\Delta T: T_H - T_C$ sıcaklık farkına bağlıdır. Akım için ise optimum bir değer vardır. Bu optimum akımda en yüksek verim elde edilebilir.

Termoelektrik materyalin performansı açısından Z parametresi çok önemlidir. Eğer Z büyükse verim yüksek olacaktır. Dolayısıyla, büyük seebeck katsayısı, düşük öz-

direnç ve kötü ısı iletkenliği istenmektedir. Z parametresi materyal parametrelerine bağımlı olduğundan termoelektrik materyallerin karşılaştırılmasında kullanılmaktadır [9].

$$Z=\alpha^2/\rho\lambda \quad (1.6)$$

1.2.3. Thomson Etkisi

İskoç bilim adamı William Thomson 1856 yılında Seebeck katsayısı (α) ile Peltier katsayısı (π) arasındaki bağlantıyı keşfetmiştir [5].

$$\alpha = \frac{\pi}{T(K)} \quad (1.7)$$

Bu eşitliğe ek olarak Thomson kendi adını taşıyacak yeni bir hipotez öne sürmüştür. Bu hipotez, 1867 yılında Leru tarafından ispatlanmış olup şöyle açıklanabilir. Akım taşıyan bir iletkenin uçları arasında sıcak farkı varsa akım yönüne göre jolue ısısına ek olarak Thomson ısısı açığa çıkmaktadır. Thomson ısısı akım şiddeti, sıcaklık farkı ve zamanla doğru orantılıdır [5]. Ortaya çıkan Thomson ısısı;

$$Q_T = \tau \cdot \Delta T \cdot I \quad (1.8)$$

Q_T : Thomson ısısı (W),

ΔT : İletkenin uçları arasındaki sıcaklık farkı ($^{\circ}C$),

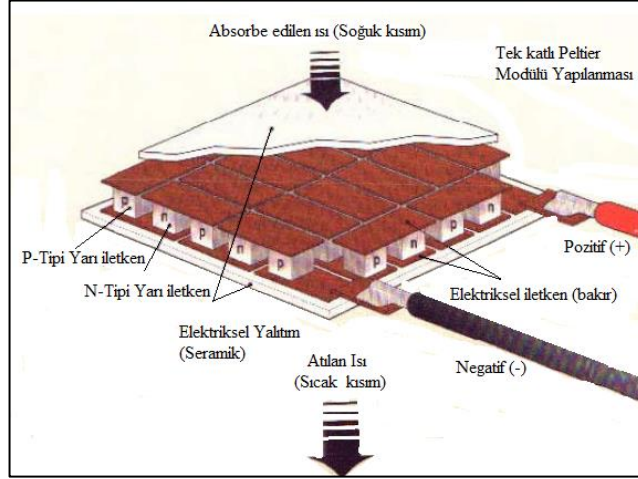
I : İletken üzerinden geçen akım şiddeti (A),

τ : Thomson katsayısı (V / $^{\circ}C$) dır.

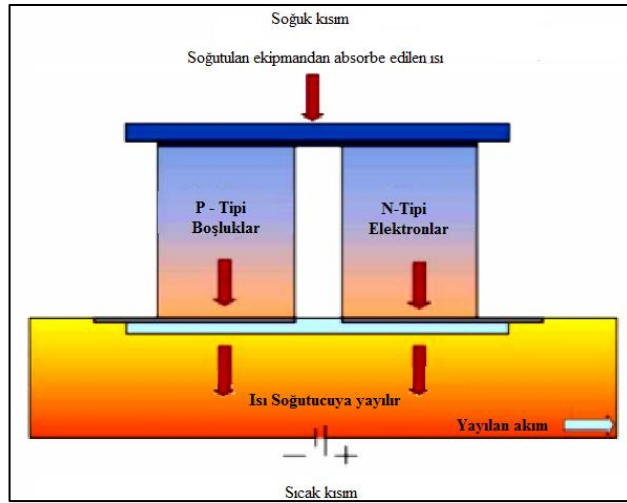
1.3. TERMOELEKTRİK MADDELERİN AKSİYON PRENSİPLERİ

Sıradan termoelektrik materyaller Şekil 1.7’de de belirtildiği gibi P ve N kutuplu bizmut-tellür yarı iletken materyal çiftinin iki seramik tabaka arasına yerleştirilmesi ile üretilir. Seramik materyal termoelektrik maddenin iki tarafına da sertlik ve gerekli elektriksel yalıtım sağlar. P tipi materyal daha az elektrona sahipken, tam tersi, N tipi

materyal de daha fazla elektrona sahiptir. P ve N jonksiyon çiftinin şematize edilmiş hali Şekil 1.8’de belirtilmiştir [6].



Şekil 1.7. Termoelektrik modüllerin yapısı [6].



Şekil 1.8. Termoelektrik materyalin iç kesiti [6].

Elektriksel bir iletken boyunca P-tipi materyalden N-tipi materyale doğru elektronlar hareket ettiği gibi, elektronlar termal enerji absorpsiyonu olan daha yüksek enerji seviyesine sıçrar (soğuk kısım). Materyal kafesi boyunca devam ederken, elektronlar alçak enerji seviyesine düşen elektriksel iletken boyunca N tipi materyalden P-tipi materyale doğru akar (sıcak kısım) [10].

Termoelektrik sistem, akımın yönüne bağı olarak ısıtmak için de soğutmak için de kullanılabilir. Hem soğutma hem de ısıtma gerektiren uygulamalarda tasarım soğutma moduna odaklanmalıdır. Termoelektriklerin ısıtma modunda kullanımı da oldukça verimlidir çünkü bütün dahili ısıtma (Joule ısısı) ve soğuk tarafından gelen yükleme sıcak tarafa pompalanır. Bu durum hedeflenen ısıya ulaşmayı başarmak için gerekli gücü azaltır [10].

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Völklein vd., termoelektrik soğutmanın mikro elektromekanik alanda kullanımı amaçlamıştır. Yapılan uygulamanın termoelektrik üretim teknolojisinde uygunluğu araştırılmıştır. Mikro elektrik akım etkisinde bulunan modüller önemli soğutma gücü göstermiştir. Maksimum sıcaklık farkı ve optimum akım hesaplanmıştır. Termoelektrik modüllerde ince SiC/Si₃N₄ mebranlar çok az miliwatt güçte maksimum 30-50 K sıcaklık farkı elde edilmiştir [11].

Sato vd., tarafından Peltier akım yönü tasarımı için sayısal hesaplamalar yapılmıştır. Peltier akım taşıyıcıları (PCLs), sayısal olarak analiz edilmiştir. Deney düzenleri, oda sıcaklığı ve oda sıcaklığının altında -77 K'nin altında ve üstündeki sıcaklıklarda tutulan bir saf bakır içinde bir termoelektrik elementten (TE) ibarettir. Burada kendi kendini soğutma şartı altında termal davranışı incelemek için bir boyutlu ısı iletimi denklemi çözülmüştür. Akım taşıyıcılarının her bir bölümü, soğutma veriminin çeşitli dereceleri altında helyum gazı ile soğutulur. Peltier etkisine bağlı olarak Peltier akım taşıyıcıları, sıradan akımlardan daha düşük sıcaklıklarda umulandan daha az ısı akımı sergilemiştir. Tüm hesaplamalar, en iyi şekilde yapıldığında Peltier akım taşıyıcılarının ısı iletiminin, sıradan akım taşıyıcılarına göre, %30 daha az olduğu görülmüştür. Hesaplanan ısı grafikleri ve ilgilenilen diğer fiziksel nicelikler, termoelektrik ve Peltier akım taşıyıcılarının tasarımı için çok önemli bir gelişme olmuştur [12].

Dikmen, "Termoelektrik soğutucuların çalışma kriterlerine etki eden faktörlerin ve endüstrideki kullanım alanlarının tespiti" isimli yüksek lisans tez çalışmasında, termoelektrik devrede meydana gelen olaylara ve termoelektrik sisteme etki eden kriterlere yer vermiştir. Çalışmada termoelektrik sistemi, termodinamik açıdan incelenmiş ve termoelektrik soğutucuların endüstrideki kullanım alanları

belirlenmiştir. Ayrıca iki tip termoelektrik soğutucu ile soğutucuların performans değerlerinin tespiti için deney yapılmıştır. Deneyde hava-hava soğutmalı sistemde 24 Volt 57 Watt gücünde modül ve sıvı hava soğutmalı sistemde ise 24 Volt 67 Wattlık modüller kullanılmıştır. Soğutucuları kullanmak üzere 50 litrelik yalıtımlı bir dolap yapılmıştır. Soğutulan hacim 20 mm kalınlığında strafor ve 3mm kalınlığında PVC ile kaplanmıştır. Deneyler sonucunda hava- hava soğutmalı sistemin COP değeri en iyi soğutma olduğu anda hesaplanmış ve COP değeri 0,37 bulunmuştur. Sıvı hava soğutmalı sistemde ise 67 Wattlık modül kullanılmış ve COP değeri 0,40 olarak hesaplanmıştır [5].

Weinberg, Rowe ve Min, yanmalı sistemlerin rejenere edilerek yüksek performans düşük skalalı termoelektrik güç üretimini araştırmışlardır. Çalışma adyabatik durumlar için teorik limitleri içermiştir. Ayrıca sistemdeki ısı kaybı ihmal edilmiş, özgül ısı kapasitesi ve yığın akış oranı sabit kalmış ve sıcaklığa bağlı $ZT = 1$ kapsamı araştırılmıştır. Sonuçlar, rejeneratif yanma sistem etkilerinden küçük ölçütlü termoelektrik güç üretimini pratikte de yapabilecek dönüşüm sistemlerinin toplam veriminin oldukça artırabileceği yeni tasarımları desteklemektedir [8].

Dişlitaş ve Ahıska, yenilenebilir enerji kaynaklarından jeotermal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren mikro denetleyici kontrollü termoelektrik jeneratör yapmış ve sistemi test etmişlerdir. Sistemde enerji dönüşümü termoelektrik modüllerde Seebeck olayının gerçekleştirilmesiyle sağlanmıştır. Termoelektrik modüllerden bu sıcaklık farkına bağlı olarak değişken DC gerilim elde edildiğinden elektrik enerjisinin istenen 5V DC, 12V DC ve 220 V AC değerlerinde alınabilmesi amacıyla sistemde akü, regüle devresi ve DC/AC çevirimi kullanılmıştır. Tasarımda PIC16F877 mikro denetleyici kullanılarak sistemin kontrol sinyalleri düzenlenmiştir. Bu sistem elektrik enerjisinin temiz, kolay ve ucuz bir şekilde karşılanması yönünden oldukça kullanışlıdır [9].

Luo vd. tarafından yapılan çalışmada termoelektrik sistemlerinin elektrikli ısıtma sistemlerinde etkinliği incelenmiştir. Sistemin sıcaklık etkinliği 1,6'dan büyüktür ve deneyde kullanılan sıcak su kısa sürede hazırlanmıştır. Termoelektrik sıcak ve soğuk yüzey arasındaki sıcaklık farkı artmıştır. Bu yüzden performans gelişmiştir.

Günümüzdeki yaygın su ısıtıcılarıyla karşılaştırıldığında güç tüketimi %38 den daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu enerjinin geri kazanılmasıyla ilgilidir. Sistem, nakliyeciler, gemiler ve diğer taşımacılıkta sıcak suyun karşılanmasında kullanılmaktadır [4].

Lertsatitthanakorn, “Kombine biokütle fırını termoelektrik jeneratörü (BİTE)’ nün elektriksel performans analizi ve ekonomik değerlendirilmesi” isimli çalışmasına göre, biokütle pişirme fırını, gelişmekte olan ülkelerdeki kullanımı oldukça yaygın olmakla birlikte, fırınlar yeterince verimli değildir. Pişirme fırınının daha kullanışlı olmasını sağlamak adına, fırın duvarlarından yayılan atık ısıyı değerlendiren bir termoelektrik jeneratör sisteminin bizmut-tellür tabanlı maddelerden yapılmış ticari termoelektrik modüllerin fırına eklenmesinin yapılabilirliği araştırılmıştır. Sistem (biokütle pişirme fırını termoelektrik jeneratörü BİTE), ticari bir termoelektrik modül (Taihnaxing model TEP1-1264-3.4), bir metal saç duvar ve termoelektrik modülün soğuk tarafını oluşturmak üzere dörtgen kanatlı bir soğutucudan oluşmuştur. Deneysel bir düzenek hazırlanarak çeşitli sıcaklık aralıklarında sistemin dönüşüm etkinliği değerlendirilmiştir. Deneysel düzen, elektriksel güç çıkışının ve dönüşüm verimliliğinin, termoelektrik modülün sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkına bağlı olduğunu göstermiştir. Yaklaşık 150°C’lik bir sıcaklık farkında modülün elektriksel çıkışı 2,4 Watt’a ulaşmıştır. %3,2’lik bir dönüşüm verimliliği küçük bir flamalı ampulü yakmak veya bir radyoyu çalıştırmak için yeterli olmuştur. Teorik bir model, düşük sıcaklık aralıklarında güç çıkışını tahminde kullanılmıştır. Ekonomik bir analiz, aynı gücün piller tarafından karşılanması durumunda geri dönüş periyodunun çok kısa olacağını göstermiştir. Bu nedenle, burada formüle edilen, jeneratör tasarımı evlerde kullanılabilir. Sistem, birincil güç kaynaklarıyla rekabet etmek üzere tasarlanmamıştır. Fakat acil durumlarda veya yedek güç kaynağı olarak kullanılmaya müsaittir [13].

Ciylan ve Yılmaz, yaptıkları çalışmada termoelektrik modülün dinamik parametrelerini hesaplamayı amaçlayan universal mikro işlemcili test sistemi dizayn etmiş ve bu sistemle testler gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada mevcut formül dizisinin daha basit formuna göre test sistemi tasarlanması amaç edinmiştir. Minimum giriş değişkeni ile daha kesin sonuç bulunabilmektedir. Sonuç olarak termoelektrik modülün dinamik

parametreleri universal olarak ölçülebilen ve yalnızca sıcak yüzey sıcaklığını, modül çalışma gerilimini, modülün akımını ve termoemk değerlerini kullanan bir test sistemi üretilmiştir. Aynı zamanda gerçekleştirilen yeni test sistemi, performansının değerlendirilebilmesi için standart termoelektrik modülün ölçümünde kullanılmıştır [3].

Xiao, Yang, Li, Zhai ve Zang, solar termoelektrik jeneratör performansı optimizasyonunun termal tasarımı ve uygulama analizini yapmışlardır. Bu amaçla düşük sıcaklıklı termoelektrik materyallerden bizmut-tellur ve orta sıcaklıklı termoelektrik materyallerin 3 boyutta sınırlı element modeline dayanan termoelektrik modüller incelenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki termoelektrik modüllerin durumsal dizaynları her bir termoelektrik materyale tam avantaj sağlamıştır ve güç jeneratörünün performans verimliliği artmıştır. Solar termoelektrik jeneratörün solar enerjisindeki toplam verimlilik değişimi %10,52’de çalışabilen 3 kısımlı termoelektrik modüle bağlıdır. Yeni termoelektrik materyallere olan yeni ihtiyaçlar doğrultusunda çok katmanlı termoelektrik modül kullanımının iyi örneklerinin görülebileceği tahmin edilmiştir [7].

Kılıç, termoelektrik jeneratörler kullanılarak yapılardaki atık enerjinin geri kazanılması üzerine bir çalışma hazırlamıştır. Çalışmada yapılan bir deney düzeniyle, bacadan atık olarak çıkan baca gazının oluşturduğu hava kirliliğinin olumsuz etkisini, oluşan baca ısısından hibrit enerji elde ederek olumlu yöne çevirmek amaçlanmıştır. Termoelektrik jeneratörün bir yüzeyinde bacadan gelen atık ısı, diğer tarafında ise çevre havası ve soğutma suyu döngüsü kullanılarak herhangi bir ısı kaybı olmaksızın yapının sıcak su ve elektrik enerjisi ihtiyacı verimli bir şekilde karşılanmıştır. Sonuçta yapılan hesaplamalar neticesinde %12,2’lik bir fayda sağlanmıştır. Deneylerin basınçlı brülör veya baca aspiratörü kullanmakla daha iyi neticeler vereceği tavsiye edilmiştir. Benzer şekilde tezimize konu çalışmada da baca gazı ve soğutma suyu ile elektrik enerjisi üretimi sağlanmış, bunun yanında üretilen elektrik enerjisi soğutma suyunun akış hızı vasıtasıyla kontrol edilmiştir [14].

Lossec, Multon, Ahmed ve Goupil, “İnsan vücuduna yerleştirilen termoelektrik jeneratör için sistem modelleme ve enerji dönüşümü ilerlemeleri” isimli

çalışmalarında, termoelektrik jeneratörün insan derisinin ısı kazanımını geri dönüştürebilmek için belirli bir alandan bakış açısını analiz etmişlerdir. Termoelektrik jeneratörün çalışma şartları düşük sıcaklık farkları için oldukça düşük olmuş, sonuçlar sadece 22 °C ve 37 °C gibi çok düşük sıcaklık farkından kaynaklı olmadığı aynı zamanda kötü termal eşleştirmeden de kaynaklandığını göstermiştir. Deneysel kayıtlarla düzenlenen termoelektrik modelleme sonuçları, termoelektrik jeneratörün verimliliği olmasa bile elde edilen elektrik gücünü maksimize eden yeni bir etkeni tanımlamaya olanak sağlamıştır. Öyle ki, atmosferle elde edilen kötü termal çiftlemeye sebebiyet veren (soğutucu ile birlikte bile), termoelektrik malzemenin bacak uzunluklarını optimize etmenin imkânsız olduğu yerde, termoelektrik materyalin fiziksel karakteristiğine bağlı olan, elektriksel güç maksimizasyonu yeni faktör, $Z_E = \alpha_0^2 / (4\rho\lambda^2)$ formülünün maksimizasyona öncülük etmiştir. Bu ölçüt kriteri insan vücudu tarafından yayılan ısıyı geri kazanma tanımıyla daha uygun olduğunu kanıtlamıştır. Sonuç olarak termoelektrik jeneratörün terminallerindeki artan voltajı anlamına gelen çıkış gücünü optimize etmek, dolayısıyla dc-dc çevirici kayıplarını minimize ederek böylece sistemin toplam verimliliği artırmak tercih edilmiştir [15].

Martins, Brito, Goncalves ve Antunes, “Isı pompaları boyunca sıcaklık kontrolü ile termoelektrik atık gaz enerjisinin geri kazanımı” isimli çalışmada, başta uzun mesafeli elektrikli ve hibrit araçlar olmak üzere alternatörün çalışma zamanını azaltabilecek küçük bir miktar elektrik üretimi faydası alabilecek bütün araçlar için termoelektrik jeneratörler kullanarak atık termal enerjinin geri kazanımını hedeflemişlerdir. Isının sıcak atık gazından verimli bir şekilde termoelektrik jeneratöre taşınması ve sıcaklık limiti olan termoelektrik jeneratörün hasar görmeyeceği seviyede tutulması için ısı pompaları kullanılmıştır. Bazen 1,4 kW’a çıkan ısı pompasındaki ısının taşınma oranını, ilgili sıcaklığı ve basıncı kontrol etmek mümkün olmuştur. Sıcaklık ve basınç kontrolü için tasarlanan değişken iletimli ısı pompası, bu kontrolün başarılmasına katkı sağlamıştır. Sonrasında tasarıma elektrik üretebilmesi için termoelektrik modül dahil edilerek ısı pompası ile kombinasyonu sağlanmıştır. Soğutma sistemi ile ısı pompası arasında 130°C’lik sıcaklık farkı sağlandığında sistemin verimliliği %3 olarak kaydedilmiştir. Voltajda ve verimlilikte sıcaklıkla beraber lineer bir artış gözlenirken, sonrasında elektriksel güç artışı da kaydedilmiştir. Geliştirilmeye hâlâ açık olan bu örnek uygulama ile termoelektrik

jeneratörün atık gazı kullanarak, standart araçlarda, hibritlerde ve uzun mesafeli elektrikli araçlarda bir miktar ısı kazanç sağlayabileceği araştırmalar için bir kapı açmıştır [16].

Lesage ve Page-Potvin, artan elektriksel yük direnci altında sıvıdan sıvıya termoelektrik jeneratörün güç çıkışındaki tepe noktasının deneysel analizini yapmışlardır. Değişen ısı şartlar göstermiştir ki güç çıkışı sıcaklıkla ve temel bir fonksiyonel etki gibi sıvı akışıyla oldukça ilişkili bir davranış sergilemektedir. Akış hızının ve sıcaklığın düzensiz ortamda birleştiği durulardaki termal giriş büyüklüğü hesaplanmıştır. Optimum elektriksel direnç yüklemesi bütün termal giriş şartlarında test edilen minimum %99,0 kazanç sağlayan ölçülebilir tepe gücü için $15,8\Omega$ 'da %15'te kalmıştır. Dolayısıyla, bu durum termoelektrik güç üretiminin, yüklemenin optimumdan daha yüksek olduğu durumlarda optimumdan daha düşük olduğu durumlara nazaran daha az duyarlı olduğunu göstermiştir [17].

Şahin ve Yılbaş, termodinamik tersinirlik ve termoelektrik güç jeneratörünün performans karakteristiğini araştırmışlardır. Harici yük parametre etkileri, termal iletkenlik oranları, cihazın çıkış gücü oranı ve verimliliği tahmin edilmiştir. Artan harici değişken yüklemelerin cihazdaki entropi oranı düştüğündeki çıkış gücünü ve verimliliği doğrudan etkilediği görülmüştür [1].

Imayat, Hussain, yeşil bina teknolojisi için plastik cama yerleştirilmiş termoelektrik sistemlerden güç üretimini araştırmışlardır. Araştırmada oda içi ve oda dışı sıcaklık farkı oluşturularak sıcaklığın enerji olarak kazanımı amaçlanmıştır. Pleksiglass malzemenin pencere olarak kullanılabilmesi düşünülerek termoelektrik malzemenin 5 mm'lik alanda 10nW'lık güç üretebileceği görülmüştür. Bu güç üreten pleksiglas panel, termoelektrik pencerenin bireysel şeritler dışında, tedavi, cam, enerji tasarruflu yeşil binalar için, çok iyi bir başlangıç olarak hizmet verebileceği tespit edilmiştir. Bu sistem temel güç kaynağı olarak düşünülmesi bile klima sisteminin sürekli ve yüksek enerjide çalışmasını önlemek için yardımcı doğal bir güç ünitesi olarak kullanılabilir. Sistem sadece, yeterli sıcaklık farkı oluşturulduğunda çalışmaktadır ve küçük uygulamalı elektrikli cihazları da şarj edebilir. Çalışmanın gelecekteki ter-

moelektrik malzemeye dayanan cam pencereler için daha pratik bir seçenek olarak kullanılmasına ışık tutacağı beklenmektedir [2].

Wang, Gionca, Wang, Hayes, O’Flynn ve O’Mathuna, “Binalardaki kablosuz sensor networkleri için termoelektrik enerji kazanımı” isimli çalışmalarında, kablosuz sensörlü network sistemlerinde kullanılmak üzere düşük sıcaklıktaki termoelektrik enerji kazanımını araştırmışlardır. Çalışmada sıcak kısmı 50°C ve 100°C olan Bi₂Te₃ termoelektrik jeneratör karakterize edilmiştir. Jeneratörün düşük sıcaklıklardaki ısı enerji kazanımı performansı için çıkış gücü simultane edilmiş ve simülasyon örneği deneyler sonucundan maksimum hatanın %5’ten az olduğunu ve yüksek bir tutarlılık sağladığını göstermiştir. Düzenli bir çıkış voltajı elde edebilmek için 0,5 Volt’tan daha düşük bir giriş voltajı kullanılarak çok aşamalı voltaj düzenlemesi sağlanmıştır. Güç yönetimi, şarj pompasını / regülatör anahtarlamasını her bir aşamada daha düşük bir dönüşüm oranı kazanmak amacıyla iki aşamalı tasarıma uyumlu hâle getirmiştir. Şarj pompası, yedek dönüştürücü 0,95 V’de çalışmaya başlarken termoelektrik jeneratörün voltajı 250 mV’den daha yüksek olduğu durumlarda çalışmaktadır. Termoelektrik jeneratörün konfigürasyonu ayarlanarak, devrenin giriş empedansı güç yönetimini karşılaştırmak için kaynak direncin ve çıkış voltajının ayarlanabileceği fark edilmiştir. Bu yöntemle dayanarak, güç yönetimi devresi giriş direnci %10’dan daha düşük hatayla (0,25V-0,38V giriş voltajı) kaynak direnci ile karşılaştırılırken, termoelektrik jeneratör 9,9 Ω kaynak dirençli analitik simülasyon modeline bağlı olarak yeniden konfigüre edilmiştir. Aygıt uygulaması birbirine paralel bağlı termoelektrik jeneratörleri olan 160 termokupl çifti içermiştir. 60 °C’de termoelektrik jeneratörün çıkış gerilimi 0,25 V’den 0,235 V’ye yaklaşmıştır (açık devre voltajı olan 0,47V’un yarısı). Şarj pompasının %28-30 ile düşük verimlilikte çalıştığı varsayılmasına rağmen ikinci kısımda voltaj regülatörleriyle %93’e varan yüksek verimlilik sağlanması devre güç yönetiminin ortalama verimlilik olan %25’de çalışmasına olanak sağlamıştır. Termoelektrik jeneratörün farklı sıcaklıklardaki davranışını ölçmek için birkaç deney daha yapılmıştır. Testlere göre 60 °C’den yüksek sıcaklarda ve ısı oda koşullarında güç üretilmiş, düzeltilmiş ve prototip aygıttan düşük görev saykalları modunda çalışan ağdan performans elde edilmiştir. Böylece termoelektrik enerji kazanımı sağlanarak güç otomasyonunun harekete geçirilmesi sağlanmıştır [18].

Oplustil ve Zalesak, termal enerji jeneratörü kullanarak iletim sistemleri için güç seçeneği oluşturulmasını araştırmışlardır. Çalışmada kablosuz iletim sistemleri için elektrik jeneratörünün olması gereken yapısı tanımlanmıştır. Bu elektrik jeneratörlerini kullanmaktaki ana hedef, insanın avuç içindeki sıcaklık ve duvar yüzü sıcaklığı arasındaki farka bağlı olarak küçük bir ısı fark, ΔT , sağlanarak bu sıcaklık farkını kullanabilmektedir. Ölçülen bir bilgi göstermiştir ki, çok küçük sıcaklık farkları bile binalardaki kablosuz iletim sistemleri için yeterli enerji elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Çalışmada kullanılan termal jeneratör 1ms'lik sürede 40mA'lik akım sağlayabilmektedir. Bu zamanlama basit bir telegramı iletmek için yeterli verimliliktedir. Böylelikle çalışma gelecekteki kablosuz iletim sistemlerinin termoelektrik jeneratör kullanarak tasarlanabileceğine ve telegramların iletilebileceğine kapı açmaktadır [19].

Bu çalışmada ise termoelektrik modüllerin uygulama alanlarına göre çalışma prensibi ve karakteristik özelliklerine yönelik araştırmalar yapılmış, termoelektrik jeneratör sistemi ile elektrik üretimi için prototip deney sistemi oluşturulmuş, oluşturulan bu deney sisteminde termoelektrik jeneratörün sıcak olması gereken kısmının atık gaz tarafından ısıtılması ve soğutulan kısım ise farklı su debilerinde soğutulması sağlanmıştır. Sıcak tarafın ısıtılması için özellikle evlerde kullanılan soba borusundan çıkan sıcak gaz kullanılarak, herhangi bir sanayi kuruluşunda kullanılacak atık gazlardan enerji üretimine ve bu enerjinin soğutma suyu debisi ile kontrol edilebilmesine de bu düzenek ile ışık tutulması hedeflenmiştir.

BÖLÜM 3

TERMOELEKTRİK MODÜLLER

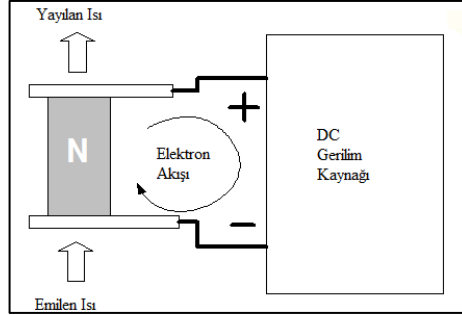
1974 yılında yaşanan enerji krizi nedeniyle birçok ülke enerji politikalarında değişiklikler yapmışlardır. Enerji politikalarında, enerji tasarrufunu artırma, yeni enerji kaynakları bulma (alternatif enerji kaynakları) mevcut sistemlerin performansını artırma vb. değişikliklere de yer vermeye başlamışlardır. Hatta birçok ülke bu çalışmalarını desteklemek amaçlı fonlar kurmuşlar ve bu çalışmalara önemli miktarlarda bütçe ayırmışlardır. Dünyanın enerji kaynaklarının sınırlı olması bilim adamlarını enerji dönüşüm araçlarını yeniden değerlendirmeye ve var olan sınırlı enerji kaynaklarından daha çok yararlanabilmek için yeni yöntemler geliştirmeye yönlendirmiştir. Isıtma, soğutma ve enerji üretim sitemlerinde de enerjinin verimli kullanılması önemlidir. Bu alanda yapılan termodinamik analizler ve testler sonucunda termoelektrik modüllerin önemini ortaya koymuşlardır [20].

Termoelektrik modüller elektrik enerjisi kullanarak ısıyı düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa pompalarlar. Bu sistemin tersinir çalışması, yani bir kısmının sıcak diğer kısmının ise soğuk tutulması durumunda ise elektrik enerjisi üretir. Termoelektrik modüllerin avantajları; hareketli parçalarının olmaması, titreşim ve ses yapmamları, aynı modülle hem ısıtma hem soğutma yapabilmeleri, çevreye zararsız olmaları, kontrol edebilme kolaylığı vb. dir. En önemli sakıncaları ise verimlerinin düşük olması ve pahalı olmalarıdır. Askeri ve uzay çalışmalarında, fiber optik ve lazer uygulamalarında, bilgisayarlarda, laboratuvar ve bilimsel deneylerde, düşük güçlü ticari soğutma uygulamalarında ve tıp alanlarında kullanılmaktadırlar [20].

3.1. TERMOELEKTRİK MODÜLLERİN YAPISI

Termoelektrik modüler, termoelektrik yarı iletkenler kullanılarak imal edilmektedir. Şekil 3.1'de DC güç kaynağına bağlı N tipi yarı iletkenlerden oluşan devre

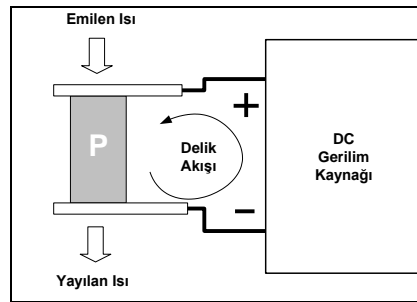
görülmektedir. Burada elektronlar (bir negatif yük) Peltier etkisinin büyüklüğünün oluşturulmasını sağlayan yük taşıyıcılarıdır.



Şekil 3.1. N-tipi yarıiletkende elektron akışını gösteren devre [20].

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi elektronlar, kaynağın pozitif kutbuna çekilip, negatif kutbu ile geri itilecek, saat yönünde elektron akışı olacaktır. N-tipi yarıiletken boyunca alttan yukarıya doğru elektron akışıyla alt bağlantı noktasında ısı emilmekte ve üst bağlantı noktasına transfer edilmektedir. Bu ısı, yarı iletken madde boyunca yük taşıyıcılarıyla etkin olarak pompalanmaktadır.

Termoelektrik denemelerinde P-tipi yarı iletkenler de kullanılmaktadır. Bu yarı iletkenlerde pozitif yük taşıyıcıları mevcuttur ve delik olarak da bilinmektedir. Bu delikler P-tipi kristal yapının elektrik iletkenliği artırmakta, materyal boyunca daha fazla serbest elektron akışına izin vermektedir. Şekil 3.2’de DC kaynağına bağlantı boyunca delik akışı görülmektedir. Pozitif yük taşıyıcıları, DC kaynağın pozitif kutbuyla geri iletmekte ve negatif kutbu ile çekilmektedir. Böylece delik akımı akışları, elektron akışına zıt yönde olacaktır [6].



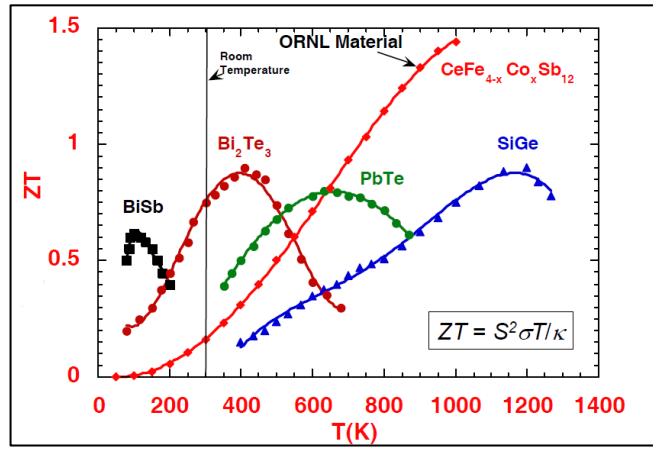
Şekil 3.2. P-tipi yarı iletkenlerde delik akışını gösteren devre [20].

3.1.1. Materyal Türüne Göre Termoelektrik Modüller

Termoelektrik modüllerin özellikleri yapımında kullanılan materyal türüne göre değişiklik gösterir. Aygıtların her bir bacağı için termoelektrik nitelikler şu formül vasıtası ile hesaplanabilir:

$$ZT=S^2.\sigma.T.I \quad (3.1)$$

En iyi ve modern termoelektrik materyaller ZT oranının 1'e yakın olduğu değerlere sahiptir. Bu kapsamda Şekil 3.3'te ZT oranına ve materyal çiftlerine göre simülasyon yapılmıştır. Buna göre sıcaklık değerleri değiştikçe malzemeye göre verimlilik de değişebilmektedir. Bu durumda sıcaklığa göre malzeme seçiminin önemi ortaya çıkmaktadır. Yüksek değerlere nazaran düşük sıcaklıklarda bizmut tellür çiftinin kullanımı uygunken yüksek sıcaklıklarda ise germanyum silisyum çiftleri tercih edilebilir [20].



Şekil 3.3. Malzeme türüne göre termoelektrik davranış [22].

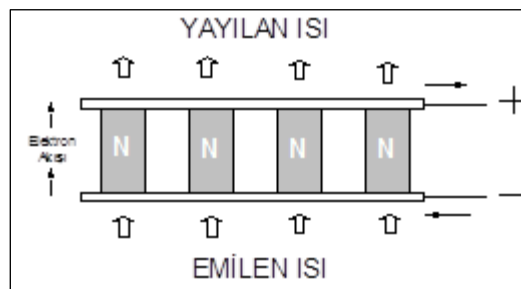
3.1.2. Termoelektrik Modülde Isının Taşınması

Termoelektrik modülde Peltier olayı ile oluşan ısı transferi sonucunda yüzeylerden biri soğumakta diğeri ısınmaktadır. Yani Peltier olayında ısı, soğuk yüzeyden sıcak yüzeye transfer edilmekte, ayrıca bir ısı üretilmemektedir [19].

Termoelektrik modül ısıyı transfer etmek için elektronların enerji seviyelerindeki değişimi kullanan bir ısı pompasıdır. Elektronlar iki farklı termoelektrik materyalin oluşturduğu jonksiyondan geçerken, bir enerji soğurucu veya yayıcı değişime uğramaktadırlar. Akım, düşük enerji seviyesine sahip P tipi yarıiletkenlerden, yüksek enerji seviyesine sahip N tipi yarıiletkene akarken, elektronlar soğuk yüzeyden aldıkları enerjiyi sıcak yüzeye taşımaktadır. Dışarıdan verilen elektriksel güç, elektronların sistem içinde hareket etmeleri için gerekli enerjiyi sağlamakta ve böylece hareketlenen elektronlar değişen enerji düzeyleri arasında ilerlerken ısı transfer etmekte, başka bir deyişle ısı taşımaktadırlar. Dışarıdan verilen elektriksel güç arttırılırsa, hareketli elektron sayısı da artacağından soğuk yüzey ile sıcak yüzey arasındaki ısı transfer miktarı da artacaktır. Eğer akım yönü ters çevrilirse, bu işlem tersine işleyecek ve dolayısıyla sıcak ve soğuk yüzeyler kendi arasında yer değiştireceklerdir [19].

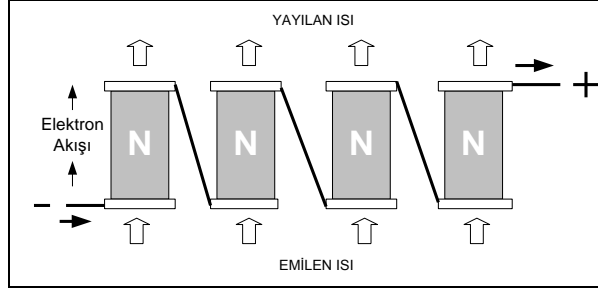
3.1.3. Termoelektrik Mikromodüllerin Birbirleriyle Bağlantısı

Bir tek yarıiletken parçadan oluşan bir termoelektrik aygıt yapılırsa, yeterli miktarda ısı pompalanamayacaktır. Termoelektrik aygıttan büyük ısı pompalama kapasitesi elde etmek için çok sayıda yarıiletken parça birlikte kullanılır. Bu yarıiletken parçaların elektriksel ve termal olarak paralel bağlantısı Şekil 3.4'te görülmektedir [23].



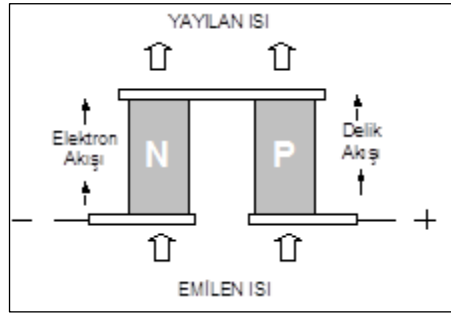
Şekil 3.4. N-tipi yarıiletkenlerin paralel bağlantısı [23].

Termoelektrik mikro modüllerin paralel olarak bağlantıları mümkünken, aygıt tasarımında pratik olarak kullanılmaz. Tipik termoelektrik yarıiletkenler sabit akımda çok küçük voltaj aralığındadırlar [23].



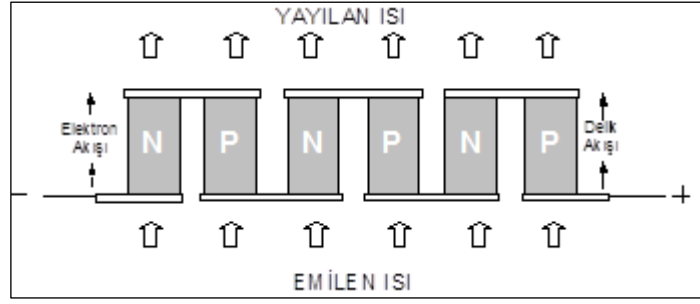
Şekil 3.5. N-tipi yarıiletkenlerin seri bağlantısı [23].

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi yarıiletkenler seri olarak bağlanarak termal yönden paralellik sağlanabilir. Bu teorik olarak işlenebilir ancak iç bağlantılar nedeni ile aygıt performansında termal azalma oluşur. Termoelektrik etki daha iyi optimize edildiğinde, istenen elektrik ve termal konfigürasyonun elde edilmesinde başka seçimler vardır [23].



Şekil 3.6. Termoelektrik mikro modüllerin seri bağlantısı [23].

Şekil 3.6'da P-tipi ve N-tipi yarıiletkenden bir yapı görülmektedir. Bu yapı mikro-modül (termoçift) olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi, mikro modüller ve onlar arasında bakır kaplı jonksiyon formlardan oluşan diziler ile ısı akışının hepsinin aynı yönde tutulduğu seri devre konfigürasyonu mümkündür. Çok sayıda termoelektrik mikromodül kullanılması durumunda ısı pompalama kapasitesi artmaktadır [23].



Şekil 3.7. Çoklu termoelektrik mikromodüllerin seri bağlantısı [23].

P-N mikromodüllerden oluşan yarıiletken serisinde bir uçtaki P-tipi yarıiletken DC kaynağın pozitif kutbu, diğer uçtaki N-tipi yarıiletken ise DC kaynağın negatif kutbu bağlanır. P yarıiletkenlerdeki pozitif yük taşıyıcıları(delikler), pozitif gerilim potansiyeli ile iletirken, negatif kutup tarafından çekilir. Aynı şekilde, N yarıiletkenlerdeki negatif yük taşıyıcıları(elektron), negatif gerilim potansiyeli ile iletirken, DC güç kaynağının pozitif kutbu tarafından çekilir. Bu elektronlar, P yarıiletkenine eriştiğinde P-tipi yarıiletkenin kristal yapısındaki delikler boyunca rahatça akarlar [24].

Böylece elektronlar sürekli olarak DC kaynağın negatif kutbundan N yarıiletken boyunca, bakır plaka boyunca ve P yarıiletken boyunca akarak kaynağın pozitif kutbuna geri gelir. Yük taşıyıcıları ve ısı akışı aşağıdan yukarıya doğru aynı yönde yarıiletkenler boyunca akar.

Termoelektrik mikromodül özellikleri kullanılarak, birçoğu ile dikdörtgen biçiminde termoelektrik modül oluşturulabilir. Uygulamalarda tek bir modül veya birkaç modül kaskat veya paralel bağlanarak kullanılabilir. Kaskat bağlantıda modüller üst üste yerleştirilerek aynı güçte daha fazla ΔT elde edilmektedir. Paralel bağlantıda yan yana yerleştirilmiş elemanlardan aynı ΔT ile daha fazla soğutma gücü elde edilmektedir [24].

Termoelektrik yarıiletken dizileriyle imal edilen aygıtlarda, mekanik olarak her şeyi birlikte tutmak gerekmektedir. İnce seramiğe iletken askı monte edilerek seramiğin dış yüzeyleri, dış dünya ve termoelektrik modül arasında termal ara birim olarak kul-

lanılır. Mekanik gerilim, elektriksel direnç ve termal ısı arasında en iyi uzlaşmayı temsil ettiğinden, seramik materyaller, bu amaç için endüstri standardı olmuştur [24].

3.2. TERMOELEKTRİK MODÜLLERİN EKONOMİK YÖNDEN İNCELENMESİ

Termoekonomik analiz ısı sistemlerinin termodinamik ve ekonomik açıdan analiz edilmesidir. Üretim maliyetinin minimize edilmesi amacıyla kullanılır. Toplam maliyet; yatırım ve işletme maliyeti olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır [25].

$$C_t = C_{inv} + C_{op} \quad (3.2)$$

Burada C_{inv} sermaye maliyeti, C_{op} işletme maliyetidir. Birim soğutma maliyetindeki sermaye maliyeti hesaplayabilmek için, toplam yatırım maliyetinin yıllık sermaye maliyetine dönüştürülmesi gerekir [25].

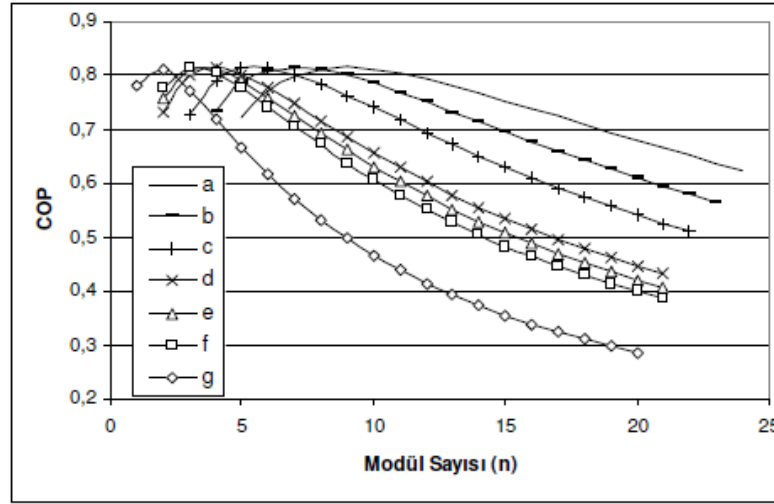
$$C_{inv} = \frac{CRF \cdot C}{Q_C \cdot 8760} \quad (3.3)$$

Burada C sistem kurulum maliyeti, Q_C soğutma gücü ve (CRF) sermaye geri ödeme faktörüdür.

Çizelge 3.1’de bir dizi termoelektrik modülün bazı özelliklerine yer verilmiştir. Bu özelliklere göre elde edilen sonuçlar ışığında Şekil 3.8’deki verimlilik durumu ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 3.1. Kullanılan termoelektrik modüllerin özellikleri [25].

Tip	Qmax (W)	I _{max} (A)	V _{max} (V)	N adet	A mm	B mm	G cm
A	33,4	3,9	15,4	127	40	40	0,077
B	38,5	8,5	8,6	71	30	30	0,171
C	51,4	6,0	15,4	127	40	40	0,118
D	67	14	8,6	71	44	44	0,282
E	72,0	8,5	15,4	127	40	40	0,171
F	77,1	9,0	15,4	127	62	62	0,184
G	120	14,0	15,4	127	62	62	0,282



Şekil 3.8. Farklı modüller için modül sayısına bağlı olarak COP un değişimi.

Isıl sistemlerde termodinamik analizlerinin yapılmasının yanında ekonomiklik analizinin de yapılması gereklidir. Şekil 3.8'de görüldüğü üzere modül sayısı artmakta ama COP katsayısı düşmektedir. Bu durumda sayı artışıyla sistemden fazla verim alınabileceği fikriyle yapılan bir harekette, fazla ödeme yapılarak maliyette gereksiz bir artışa sebebiyet verilebilir. Termodinamik açıdan verimli olan bir çalışma noktasının ekonomik olarak iyi olmayabileceği de böylece görülmektedir.

3.3. TERMOELEKTRİK SOĞUTUCULAR

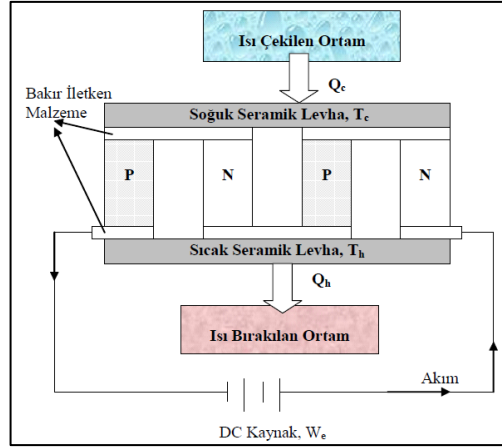
Günümüzde sağlam, güvenilir, kompakt, ufak boyutlu, hafif, uzun ömürlü, düşük maliyette, düşük enerji tüketimine sahip ve bakım gerektirmeyen soğutuculara artan bir ihtiyaç vardır. Yaygın olarak kullanılan mevcut kompresörlü soğutma sistemleri mekanik olarak hareket eden parçaları olduğundan ve boyut olarak büyük olduklarından arzulanan ideal özelliklere sahip değildirler. Teknolojinin hızlı bir şekilde arttığı zamanımızda soğutma ihtiyacının sadece konfor ve gıdaların muhafazası için sınırlı kalmayacağı görülmektedir. Özellikle yeni ve daha sıkı imal edilmiş elektronik cihazların kendi içinde ürettiği ve dışına yaydığı ısının bertaraf edilmesinin ve ısı konfor sınırlarını aşan özel şartların istendiği soğutma gereksinimleri, buhar sıkıştırmalı konvansiyonel soğutma sistemlerinin dışında alternatif soğutma cihazlarına yönelme ihtiyacını ortaya koymuştur. Termoelektrik soğutucular başlıca elektronik

alanlardan bireysel, özel soğutma ihtiyacına kadar birçok uygulamada kullanılan ısı pompası özelliği olan cihazlardır [26].

Hızla gelişen elektronik teknolojisinde, elektronik elemanların hassas biçimde çalışabilecekleri sıcaklık aralıkları bellidir. Elektronik malzemelerin soğutulması günümüzde mühendislerin en önemli problemlerinden biridir. Son yıllarda bu konuda giderek artan çalışmalar yapılmaktadır. Termoelektrik soğutma sistemlerinin tasarımı, analizi ve uygulamaları ile ilgili konularda son zamanlarda önemli araştırmalar yapılmış ve araştırmacıların konuya ilgisi artmıştır[26]. Bu bölümde son zamanlarda ticari olarak çeşitli ürünlerde rastlanan termoelektrik soğutmanın teorisi ve uygulama alanları ile ilgili temel bilgiler ele alınacaktır.

3.3.1. Termoelektrik Soğutmanın Teorisi

Termoelektrik soğutma, N ve P tipi yarı iletken metal çiftlerinden oluşmuş bir veya daha çok modülden bir doğru akımın geçmesi ile elde edilir. Şekil 3.9'da bir N ve P yarı iletken çiftinden meydana gelmiş bir termoelektrik soğutma modülü gösterilmiştir. P ve N tipi termoelemanlar elektriksel olarak seri, ısıl olarak paralel şekilde seramikler arasına bağlanırlar. Akımın yönüne bağlı olarak ısıtma ve soğutma elde edilebilir. Şekil 3.9'da da görülebileceği gibi soğutma durumunda, doğru akım N tipi yarı iletken P tipine geçmektedir. Akım, düşük enerji seviyesindeki P tipi yarı iletken malzemedan yüksek enerji seviyesine geçtiğinde soğutulacak ortamdaki ısı çekerek soğutma meydana getirmektedir. Soğuk ortamdaki ısı, yüksek sıcaklıktaki ortama elektronlar vasıtasıyla transfer edilir. Böylelikle ısı, bir ortamdaki çekildiği gibi başka bir ortama da transfer edilmektedir. Dolayısıyla, termoelektrik modül ısı pompası olarak da işlev görür [26].

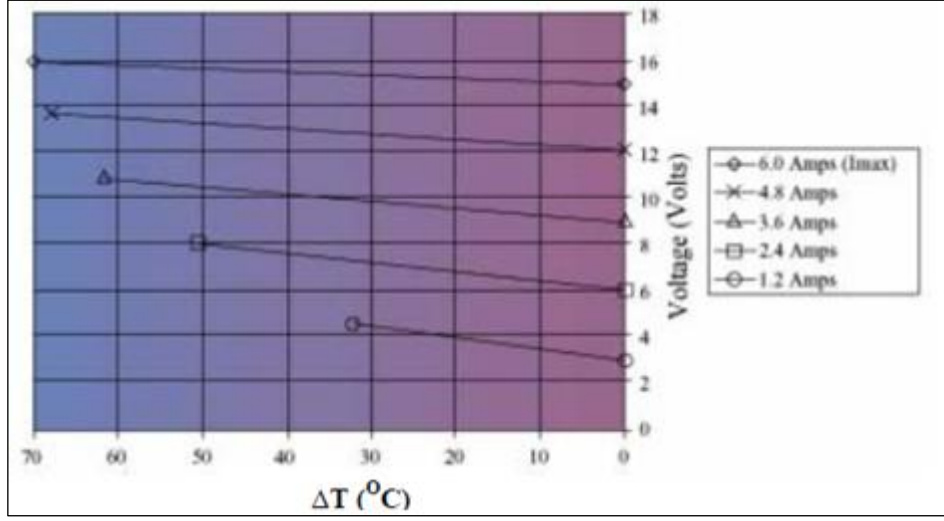


Şekil 3.9. Bir termoelektrik soğutucu modülü [26].

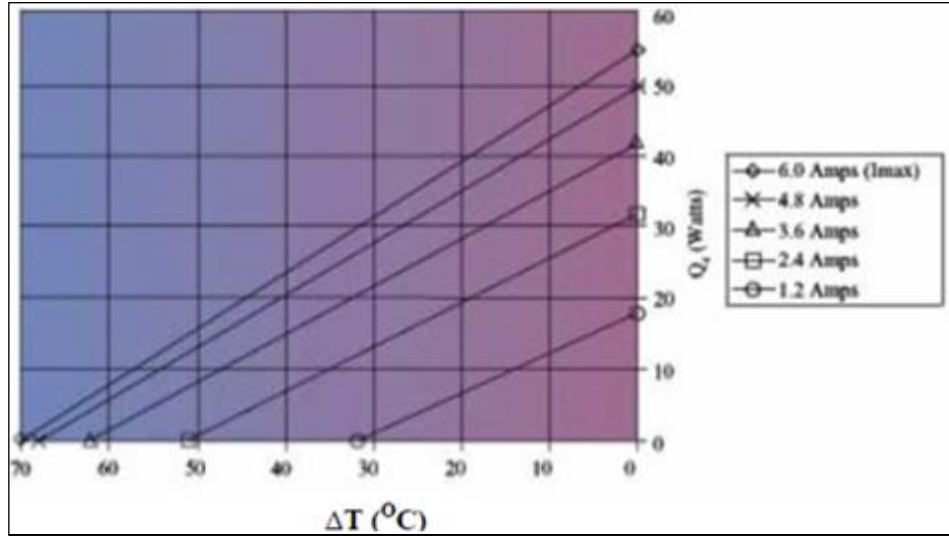
Bir termoelektrik uygulama en az üç parametreye bağlı olarak yapılabilir. Bu parametreler, sıcak yüzey sıcaklığı (T_h), soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ve soğuk yüzeyde absorbe edilen ısıl yüklemidir (Q_c). Termoelektrik malzemenin sıcak tarafı DC güç uygulandığında ısının sağlandığı taraf olacaktır.

Termoelektrik malzemenin soğuk tarafı, DC güç devreye verildiğinde soğumaya başlar. Bu kısım soğutulacak nesne için talep edilen soğukluktan daha soğuk değerlere bile ulaşabilir. Bu durum özellikle de çevirerek soğutma veya hareketli cisimlerin soğutulması gibi objenin soğuk tarafla direk temas ettirilmediği durumlarda olur [26].

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de ΔT sıcaklık farkı ve diğer parametreler arasındaki ilişki ve termoelektrik performans çizgileri verilmiştir.



Şekil 3.10. Performans grafiği (ΔT ve Gerilim) [26].



Şekil 3.11. Performans grafiği (ΔT ve Q_c) [26].

3.3.2. Termoelektrik Soğutucularda Kullanılan Malzemeler

Termoelektrik soğutucularda P ve N tipi termoelemanlarda kullanılan yarı iletken malzemeler, Bi_2Te_3 , PbTe, SiGe ve BiSb gibi alaşımlar kullanılmaktadır. Bizmut Teleryum, Bi_2Te_3 , yüksek termoelektrik verimi ve uygun sıcaklık aralığı nedeniyle yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Alt ve üst plakalarda seramik malzeme kullanılır. Böylece ısıl iletkenlik, elektriksel yalıtkanlık ve mekanik mukavemet sağlanır. Termoelemanları birbirine bağlayan iletken malzeme olarak bakır veya

alüminyum gibi ısı iletkenliği yüksek malzemeler kullanılmaktadır. “Materyal Türüne Göre Termoelektrik Modüller” başlığı altında incelediğimiz ve Şekil 3.3’te belirttiğimiz modül türleri, termoelektrik soğutucular için de geçerliliğini sürdürmektedir [26].

3.3.3. Termoelektrik Soğutucuların Avantajları ve Dezavantajları

Termoelektrik soğutucuların diğer soğutma sistemlerine göre avantajları ve dezavantajları Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Termoelektrik soğutucuların avantajları [26].

Avantajlar	Hareketli herhangi bir parçası yoktur. Dolayısıyla az bakıma ihtiyaç vardır.
	Uzun ömürlüdürler. Ömür testlerinde sürekli rejimde 100.000 saat çalışabildikleri görülmüştür.
	Termoelektrik soğutucu, CFC’ler gibi herhangi bir soğutucu akışkanı içermez. Dolayısıyla çevre ve doğa dostudur.
	Termoelektrik soğutucu, ısı pompası olarak tam tersinirdir. Isının yönü DC akımın yönü değiştirilerek kolayca değiştirilebilir.
	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında çok hassas sıcaklık kontrolü sağlanabilir.
	Termoelektrik soğutucular, pozisyona bağımlı cihazlar değildirler. Dikey veya yatay her konumda çalışabilirler. Yer çekimsiz ortamlarda da çalışırlar.
	Çok hassas, sıkı ve küçük ortamlarda çalışabilirler.

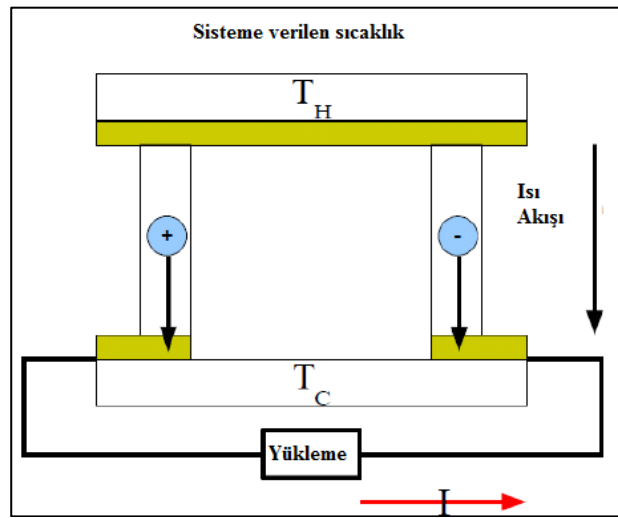
Çizelge 3.3. Termoelektrik soğutucuların dezavantajları [26].

Dezavantajlar	Soğutma ve ısıtma performans katsayıları (COP) çok düşüktür. 0,3-0,7 arasındadır. Oysa klasik soğutma makinalarında bu değer 2-4 arasındadır. Buhar sıkıştırımlı, absorpsiyonlu ve termoelektrikli üç farklı mini buzdolabı için yapılan karşılaştırmalı çalışmalarda buhar sıkıştırımlı tipte olanın maliyet ve işletme açısından daha uygun olduğu fakat diğerlerine göre daha gürültülü olduğu tespit edilmiştir. Termoelektrikli mini buzdolabının COP katsayısının absorpsiyonlu mini buzdolabına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
	Yüksek soğutma yükleri için uygun değildirler. Buhar sıkıştırımlı soğutma sistemleri ile rekabet etmesi mümkün görülmemektedir.
	Mevcut durumda pahalıdırlar.
	DC besleme gerektirir.

3.4. TERMOELEKTRİK JENERATÖRLER

Termoelektrik jeneratörler iki yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluşturulduğunda doğru akım üreten elemanlardır [30]. Bulunduğu her yerde sıcaklık farkı yoluyla temiz ve kolay elektrik enerjisi eldesi sağlayan bu termoelemanların, kullanılan modül sayısı artırılmak suretiyle daha etkin kullanımı sağlanabilir. İki farklı metalden oluşan kapalı bir devrede birleşme noktaları farklı sıcaklıklarda bulunursa, bu yüzeyler arasında Joule etkisi, Fourier etkisi, Peltier etkisi ve Seebeck etkisi geçerli olur. Seebeck etkisi; farklı iki malzemeden oluşan bir devrede, iki jonksiyon (birleşme) farklı sıcaklıklarda olduğunda malzeme uçlarında ölçülen gerilimin sıcaklık farkıyla orantılı olduğunu ifade eder. Seebeck etkisine göre devreden ölçülen voltaj $V=\alpha\Delta T$ olup, α 'nın değeri; devreyi oluşturan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. $\alpha=\alpha_2-\alpha_1$ 'dir. Burada α_2 ve α_1 kullanılan malzemelerin özellikleridir [27].

Örneğin bakır konstantandan yapılan bir termokupl için $\alpha = 40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 'dir. Yani her 1°C sıcaklık farkı için $40 \mu\text{V}$ 'luk voltaj üretir. α 'nın değeri $100 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 'dan büyük olan yarı iletkenlere, termoelektrik yarı iletkenler denir. N tipi yarıiletken için α değeri negatif, P tipi yarı iletken için α değeri ise pozitifdir. Termoelektrik jeneratörlerin özellikleri, hareketli parçalar içermemeleri, sessiz olmaları, uzun ömürlü olmaları, bakım gerektirmemeleri ve her pozisyonda çalışabilmeleridir [28].



Şekil 3.12. Termoelektrik jeneratörün prensip şematizesi [28].

3.4.1. Termoelektrik Jeneratör Denklemleri

Ticari olarak üretimde bulunan firmalar üretilen termoelektrik jeneratörlerde soğuk yüzey sıcaklığı T_c , sıcak yüzey sıcaklığı T_h , maksimum güç P_{max} gibi parametrelerini belirtirler. Maksimum gücün elde edilmesinde termoelektrik jeneratör iç direnci R , yük karşılaşmasındaki ($R_L=R$) yük gerilimi V_{max} ($=VR$) ve maksimum verimlilik η_{max} öne çıkar. Bu verilen değerlerle devrenin elektriksel parametreleri hesaplanabilir. Kullanılacak bir termoelektrik modül için verimliliğin yüksek olmasında; büyük Seebeck sabiti α , düşük elektriksel direnç R ve düşük termal iletkenlik κ_{th} değerleri etkindir. Termoelektrik jeneratörlerde kalite faktörü aşağıdaki gibi tanımlanır [29].

$$Z=\alpha^2/R.K_{th} \quad (3.4)$$

Termoelektrik jeneratörün elektrik direnci R şu şekildedir:

$$R=R_L=V_{max}^2/P_{max} \quad (3.5)$$

Termoelektrik jeneratörün verimliliği yüke bağlı olarak değişir. Yük direnci $R_L=mR$ olarak tanımlandığı varsayılır. Burada m yük direncinin iç dirence oranıdır. Akım denklemi ise şöyle belirtilir.

$$I=\alpha.\Delta T/[(1+m).R] \quad (3.6)$$

Termoelektrik jeneratörün verimliliği elektrik güç çıkışının sıcak yüzeye uygulanan termal güç girişine oranıdır ve aşağıdaki eşitlikle bulunabilir.

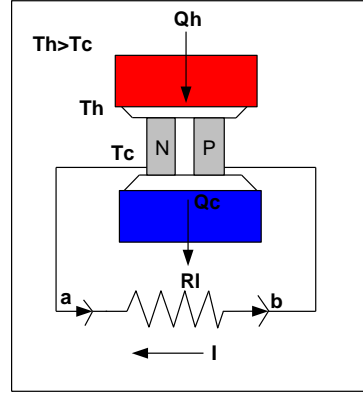
$$\eta=I^2.R_L/Q_H \quad (3.7)$$

Termoelektrik jeneratörün termal iletkenliği aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\kappa_{th}=\alpha^2/R.Z \quad (3.8)$$

Sonuç olarak da eşitlik (3.8)'den termoelektrik jeneratörün termal iletkenliği belirlenir [29].

Güç üretimi için kullanılan bir termoelektrik modülün temelini mikro modül – termo çift oluşturmaktadır. Şekil 3.13'te mikro modülün ayrı yüzeylerine birbirinden farklı T_h ve T_c sıcaklıklarının uygulandığı görülmektedir.



Şekil 3.13. Tek bir termoelektrik mikro modül.

Mikro modülde, R_L yükü olmadan a ve b noktaları arasındaki ölçülen açık devre gerilimi; $V = \alpha \cdot \Delta T$ ' dir. Termoelektrik mikro modüle bir yük bağlandığında yükten geçen akım;

$$I = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{(R_C + R_L)} \quad (3.9)$$

I = Jeneratör çıkış akımı (amper)

R_c = Termoelektrik mikro modülün ortalama iç direnci (ohm)

R_L =Yük direnci (ohm)

Termoelektrik mikro modüle toplam ısı (Q_h) girişi :

$$Q_h = \alpha \cdot T_h \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_c + K_c \cdot \Delta T \quad (3.10)$$

Q_h = Isı girişi (watt)

K_c = Termoelektrik mikromodülün ısı iletkenliği (Watt / K)

T_h = Termoelektrik mikromodülün sıcak tarafı(K)

Jeneratörün verimi(E_g);

$$E_g = \frac{V \cdot I}{Q_h} \quad (3.11)$$

Tam bir modül bir sıra termoelektrik mikro modülden meydana geldiğinden, gerçek bir modülle ilgili formül aşağıdaki gibidir;

$$V_o = \alpha_M \cdot \Delta T = I \cdot (R_M + R_L) \quad (3.12)$$

Formülde;

V_o : Jeneratör çıkışı (V)

α_M : Modülün ortalama Seebeck katsayısı (V/K)

R_M : Modülün ortalama direnci (Ω)

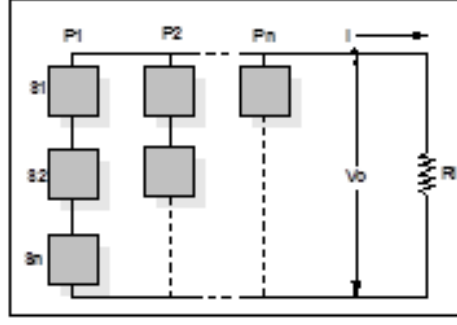
Ortalama modül sıcaklığı :

$$T_{avg} = (T_h + T_c) / 2 \quad (3.13)$$

Modülün güç çıkışı (P_o) (W)

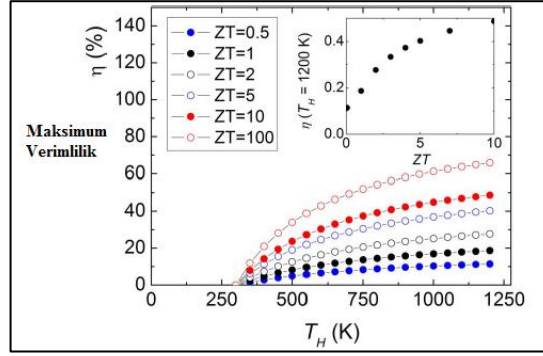
$$P_o = R_L \cdot [(\alpha_M \cdot \Delta T) / (R_M + R_L)]^2 \quad (3.14)$$

Sonuçta, termoelektrik jeneratörlerin büyük bir kısmı elektriksel olarak seri, paralel veya seri/paralel düzende bağlı olabilecek bir sıra bireysel modülü içermektedir. Tipik bir jeneratör düzeni Şekil 3.14'te görüldüğü gibi P_n adet paralel ve her paralel kolda S_n adet seri modülden oluşmaktadır [28].



Şekil 3.14. Modüllerin seri – paralel düzenlenmesiyle tipik termoelektrik jeneratör.

Güç üretiminde verimliliğin $\eta = (T_h - T_c) \cdot (\gamma - 1) / (T_c + \gamma T_h)$ olduğunu varsayarak ve $ZT = T \cdot S^2 \cdot \sigma / \kappa$ olduğunu hatırlarsak, $\gamma = (1 + ZT)^{1/2}$ olduğu yerde ZT'nin de T değeri ile sabit olduğunu farz edersek Şekil 3.15'teki verimlilik – sıcaklık grafiğine ulaşabiliriz [22].



Şekil 3.15. Maksimum verimliliğin sıcaklığa göre değişimi [22].

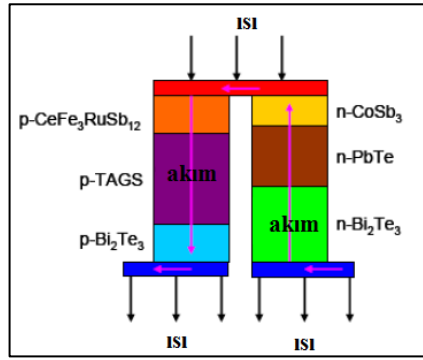
Şekil 3.15 bize ZT değerinin güç üretimi için neden 1'den büyük olması gerektiğini anlatmaktadır. Verimliliğin daha da artırılabilmesi için daha yüksek ZT materyalleri, ısı rezistans materyalleri, ZT değerinin sıcaklıkla geliştirmelidir [22].

3.4.2. Termoelektrik Jeneratörün Mimarisi

İlk termoelektrik jeneratör Şekil 3.16'da belirtilen yapıya benzer mimaride üretilmiştir. Bu mimari birbirine zıt yapıda ve her bir bacakta tek materyal içerecek şekilde tasarlanmıştır. Sonrasında araştırmacılar termoelektrik malzeme özelliklerinin sıcaklıkla oldukça ilişkili olduğunu ve bu yüzden sıcaklık değişiminin termo-

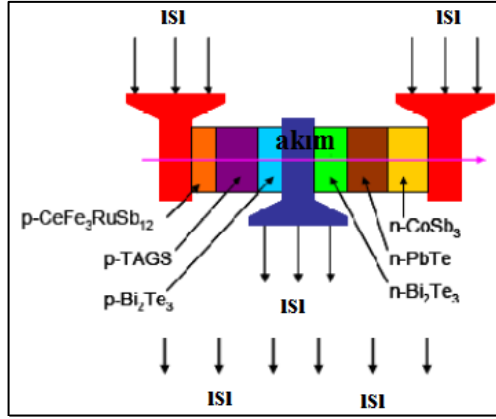
elektrik jeneratörün de performansını fark edilecek seviyede etkileyeceğini anlamışlardır. Böylece ısısal bağımlı noktalar için adresleme kavramları yeniliği keşfedilerek geliştirilmiştir [6].

Termoelektrik jeneratör mimarisindeki ilk geliştirme termoçiftlerin segmentasyonu ile gelir. Bu kavramda, termoçiftler her bir materyalin konumsal sıcaklık kapsamında optimize edildiği birkaç materyalle inşa edilmiştir. Bu tasarımın felsefesiyle termoelektrik jeneratör her bir bacak için tek materyal içeren sisteme göre daha yüksek toplam verimliliğe ulaşabilmektedir. Buradaki ana fikir, materyallerin uyumu ve termoçift elemanlarının boyutlandırılmasıdır [6].



Şekil 3.16. Dilimli (segmente) bacaklı termo çiftin yapısı [6].

Crane ve Bell isimli araştırmalar gelişmeleri bir adım daha öte taşıyarak dikey termoçift yapısı kavramını öne sürmüşlerdir. Yeni yapı p ve n tipi elementlerin farklı en boy oranlarına (kalınlığa göre bölünmüş çapraz kısımlar) sahip olmasına izin vermektedir. Böylece her bir elementin materyal tabakası mümkün olabilecek en yüksek ZT sıcaklık genişliğine sahip olabilmektedir. Dahası, bu yapı, p ve n bacaklarının farklı kalınlığa sahip olmalarına izin vererek, tasarımın esnekliğini de artırmaktadır [6].



Şekil 3.17. Farklı kalınlıklardaki dilimli bacaklara sahip dikey termoelektrik çiftin yapısı [6].

3.4.2.1. Termoelektrik Jeneratör Materyalleri

Metallerin termal iletkenlik için yüksek elektriksel katsayı değerlerine rağmen termoelektrik materyaller genellikle yarı iletkenler olmaktadır. Termoelektrik jeneratörün performansı, kullanılan materyalin özelliklerinden oldukça etkilenmektedir. Bu yüzden, iyi bir termoelektrik jeneratör tasarımı yapabilmek için termoelektrik materyallerin seçimi ve koordinesi oldukça önemlidir. Daha iyi anlayabilmek için termoelektrik materyallerin var olan kökenlerini karşılaştırmak ve denemek gerekmektedir.

Kalkojenit materyal ailesi, bizmut tellürit (Bi_2Te_3) ve alaşımları oda sıcaklığında termoelektrik malzeme için oldukça iyi olmasına karşın, termoelektrik jeneratörlerin temel destekleyicisidir. Bi_2Te_3 , termal iletkenliğini fark edilebilir derecede azaltmak için Sb_2Te_3 ve Bi_2Se_3 ile kolayca alaşım sağlayabilir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklarda tellüritin nadir bulunması, zehirli ve uçucu bir madde olması sebebiyle kullanımını oldukça kısıtlıdır. 300-700 K sıcaklıklarında iyi termoelektrik özelliklere sahip olması için kurşun tellür (PbTe) bulunmuştur. Kalkojenit sistemde PbS ve PbSe gibi benzer termoelektrik materyaller de mevcuttur [6].

Gümüş antimon tellürit AgSbTe_2 ile germanyum tellürit alaşımları başlangıç olarak daha yüksek sıcaklıklarda uzay güç kaynakları için termoelektrik jeneratörün radyon izotopu olması gibi uygulamalarda p tipi PbTe 'nin yerini alması için düşünülmüştür.

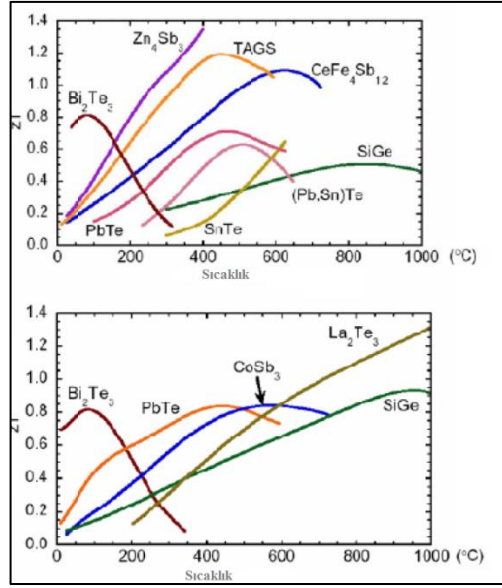
Bu alaşım (TAGS) uzun ömürlü termoelektrik jeneratörlerde başarıyla kullanılmıştır [6].

SiGe alaşımları da termoelektrik jeneratör için oldukça uygun bir materyaldir ve genellikle hem n tipi hem t tipi bacaklarda 900 K'in üstündeki sıcaklıklardaki termoelektrik jeneratör uygulamalarında kullanılır. Bununla beraber, bu materyallerin ZT oranı, kısmen p tipi materyaller için oldukça düşüktür [6].

Skutteruditler ($\text{ReTm}_4\text{M}_{12}$), nadir dünya elementlerini (Re), geçiş metalleri (Tm) ve metaloitleri (M) barındıran kompleks materyallerdir. Gevşek bağlı kafesteki nadir bulunan ağır dünya elementlerinin tıktırtılarına bağlı olarak, termal iletkenliğini düşürürler. Skutteruditlerin ZT oranı 700 K'den daha yüksek ünitelerde bulunmaktadır [6].

2007'de Ohta tarafından sunulan metal oksitler, termoelektrik materyallerin yeni bir çalışma konusudur. Belirtilen metal oksit, SrTiO_3 içerisindeki iki boyutlu bir elektron gazıdır (2DEG). 2DEG, optimize edilmiş ve 2,4'e kadar ulaşan ZT katsayısı (ki sıradan termoelektrik malzemelerinin iki katıdır) ve yk ile karşılaştırıldığında, 5 kadar bir faktörle geliştirilen Seebeck katsayısını vurgular. Oksit termoelektrik materyaller, kimyasal olarak yüksek derecelerde stabil oldukları ve zehirli olmadıkları için oldukça güvenilir görünmektedir. Bununla beraber, bunların genel problemleri oksit ve elektrotların ara yüzündeki yüksek iletim dirençleri gibi mekanik dayanıklılıklarıdır [6].

şekil 3.18'de birkaç materyalin 0-1000C arasındaki katsayı değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 3.18. P ve N tipi için ZT katsayısının 0-1000°C arasında sıcaklıklardaki değişimi [6].

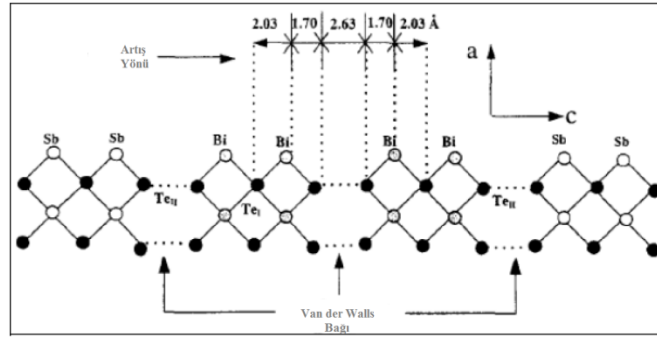
3.4.2.2. Nanoteknolojili Termoelektrik Materyaller

Nanoteknolojinin avantajları ile, termal iletkenliği azaltıp, elektriksel iletkenliği artırıp ve benzeri işlemlerle termoelektrik materyallerin verimliliğini geliştiren termoelektrik materyal yapısının tahrihi nano düzeyde mümkündür. Bu kısımda başlıca nanoteknoloji kavramları olan süper kafes, nano kablo ve quantum kuyusu ele alınacaktır [6].

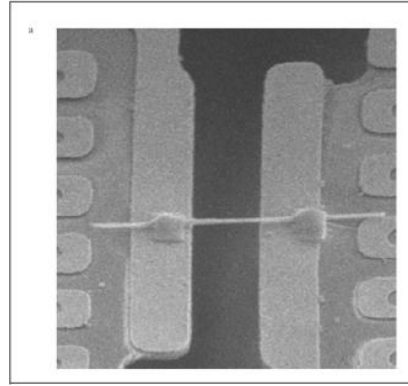
Süper kafes, şekil 3.19’da belirtilen her biri beş nanometre kalınlıktan daha az olan birkaç dalgalı nano teknolojik katmanları içerir. Bu katmanlar, ısı akışı üreten ve buna rağmen elektronların akım olarak geçişine izin veren atomik sarsıntı yolculuğunu engeller. Saçılan bölge ara yüzey fononu ekleyerek termal iletkenlik düşürülebilir. Süper kafes yapısı daha önceki termoelektrik materyal yığınının 2 kat daha verimli olarak ortaya çıkar [6].

Nano kablo yapısı, termoelektrik malzemenin özelliklerini, fononların serbest dolaşımını engelleyerek geliştirir. Si’deki nano kablo oluşumu durumunda önemli bir gelişme kaydedilmiştir. Si yığını zayıf bir termoelektrik malzemedir. Bununla birlikte, Si ile oluşturulan nano kablo alaşımları, Seebeck katsayısını ve elektriksel

dirençliliği çok fazla etkilemeden termal iletkenliği azaltmaktadır. Araştırmacılar elektrokimyasal olarak geniş alanlar, çapı 200-300 nm olan tırtıklı ölçekli katı Si nano kablolar üretmişlerdir (Şekil 3.20). Seebeck katsayısı ve elektriksel dirençlilik değerleri bu katkılı Si yığınları ile aynıdır. Ama yapılan deneylerde 50 nm'lik Si nano kabloları ile termoelektrik iletkenlikte 100 kat düşme, oda sıcaklığında $ZT=0,6$ 'lı bir kazanç gözlemlenmiştir [6].



Şekil 3.19. Katmanlı Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 malzemelerinin artan yöne doğru kristal yapısı. C yönü doğrultusunda Van der Walls bağı oluşumu [6].



Şekil 3.20. Pt bağlı katı Si nano kablosunun elektron mikrografisi [6].

Quantum tünelleri, bir akım içerisinde, akımın çevresindeki harici faktörlerden etkilenmediği sürece parçacık kaçıışı için imkânsız hâle getiren bir potansiyel enerji içerisindeki bölgelerdir. Bu yolla, Quantum tünelleri parçacıkları termoelektrik malzemenin oldukça ince yüzeylerini (o kadar ince ki birkaç atom büyüklüğünde) büyütmeyi mümkün kılan 2D düzlemde hareket etmeye zorlar. Azalan kalınlık, laboratuvar gözlemlerine göre 3-4 kat yüksek olabilen ZT değerlerinin önemli ölçüdeki gelişimi olasılığı anlamına gelir [6].

BÖLÜM 4

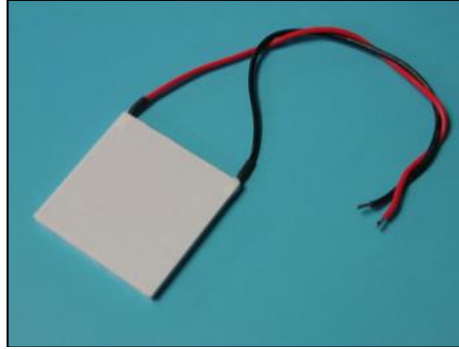
YÖNTEM, ÖLÇÜM VE HESAPLAMALAR

4.1. HAZIRLIK AŞAMASI

Termoelektrik jeneratörlerden elektrik enerjisi elde edebilmek için öncelikle ilgili termoelektrik modülün çalışma prensibi ve teknik özelliklerinin bilinmesi gerekir. Yüksek verim elde edebilmek için ise en yüksek sıcaklık farklarında denenmesi gerekmektedir. Modüllerin verimi, birlikte çalışacakları çevresel etkilere ve yardımcı malzemelere çok bağlıdır. Yüksek direnç gösteren veya yanlış malzemeden temin edilen bağlantı kablosu bile çıkış değerlerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

4.1.1. Deney Seti İçin Gerekli Malzemeler

Deneyin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için gerekli malzemeler, termoelektrik jeneratör olarak görev yapacak modül, modülün sıcak yüzü için gerekli ısı geçirgenliğine sahip tercihen alüminyum plaka, soğuk yüzeyi ısıyan yüzeyden etkilenmeksizin soğuk tutabilecek soğutucu, termal macun, elektriksel üretimi ve ısı değerleri ölçmek için test cihazı ve elektrik çıkışını görsel olarak takibe alabilmemizi sağlayacak elektronik cihaz veya lambalar yeterli olacaktır.



Şekil 4.1. Termoelektrik Jeneratör Modülü.

Şekil 4.1’de belirtilen ekipman sistemin en önemli parçası olan termoelektrik modül görüntüsüdür. Bu ekipmanlar iki yüzeyinde oluşturulan ısı farkına bağlı olarak elektrik enerjisi üretebilmektedir. Piyasada farklı karakteristik özellik gösteren, özelliklerine göre fiyatı da değişen çeşitleri mevcuttur.

Termoelektrik jeneratör çeşitleri elektronikte; güç üretici, lazer diyot, CPU soğutucu ve elektronik ekipmanlarında, elektro-optikte; CCD kameralar ve kızılötesi algılayıcılarda kullanılmaktadır. Bunun dışında biyomedikalde, fizik ve kimyada da sıklıkla kullanılan uygulamaları mevcuttur.



Şekil 4.2. Diğer malzemeler.

Deney esnasında kullanılacak diğer önemli malzemeler de Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Termoelektrik modüle yüksek sıcaklıkları iyi bir ısı iletkenlikle geçirebilecek alüminyum plaka üzerine, termoelektrik modüller termal macunla yapıştırılabilir. Soğuk tutulacak bölüme ise yine ısı geçirgenliği yüksek metal parça kullanılmıştır. Soğutucu dikdörtgen prizma şeklinde, içerisinde su dolaşımı sağlanacak şekilde hazırlanmış ve bu işlem için hortumlar monte edilmiştir. Sistem kurulduğunda sistemin bütün değerlerini ölçebilmek için test cihazına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun dışında elektrik çıkışını fiziksel olarak gözlemleyebilmek için eski bir cep telefonu, LED lamba ve buna benzer elektronik cihazlar kullanılabilir.

4.1.1.1. Kullanılacak Termoelektrik Jeneratörün Genel Özellikleri

Deneyde Şekil 4.1’de de belirtilen TEG 12710 model numaralı termoelektrik jeneratör kullanılmıştır. TEG 12710 termoelektrik jeneratöre ait başlıca bilgiler Çizelge 4.1’de belirtilmiştir. Bu değerler maksimum ısı farkı sağlandığı takdirde her bir

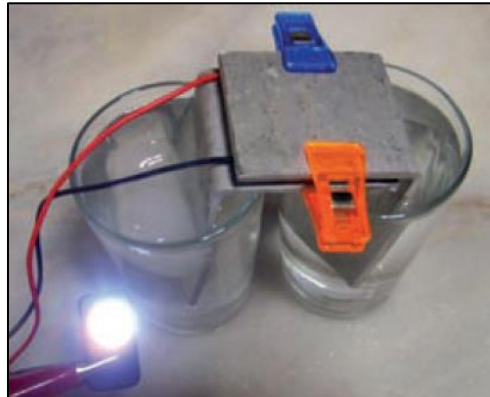
termoelektrik modülün sağlayabileceği değerler olup, verimlilik analizi bölümünde kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. TEG 12710 termoelektrik modülün genel özellikleri [21].

Ölçüler	40mm x 40 mm x 3,8 mm
Çıkış voltajı	4,5 V
Çıkış akım şiddeti	1,6 A
Çıkış gücü	7,2 W
ΔT	125°C
Sıcak yüzeyin maksimum çalışma sıcaklığı	150°C
Nem koruması için kapalı çevre	
6 inçlik yalıtımlı kurşun tel donatımı	

4.1.1.2. Termoelektrik Jeneratörün Kullanımı ve Basit Uygulama Örnekleri

Daha önce de belirtildiği gibi termoelektrik modüller elektriksel olarak seri, ısı olarak ise paralel bağlı P ve N tipi yarı iletken malzemelerden oluşur. Modülün alt ve üst yüzeyi seramik kaplıdır. Seramik, ısı olarak iletken, elektriksel olarak yalıtkan özellik sağlar. Elektriksel bir gerilime maruz kaldığında gayet iyi verimli ısıtma ve soğutma sağladığı gibi, iki yüzeyinde sıcaklık farkı oluşturulduğu takdirde elektriksel gerilimi üretir. Sessiz çalışmaları da bir başka avantajıdır.



Şekil 4.3. Sıcak-soğuk su sıcaklık farkıyla elektrik üretimi [31].

Şekil 4.3'te basit bir yöntemle termoelektrik modül yardımıyla elektrik enerjisi elde edilmiştir. Buradaki deneyde bir bardağa 80°C'nin üzerinde sıcaklığı olan su, diğer bardağa ise 2°C civarında buzlu su kullanılmıştır. "L" şeklinde alüminyum levhaların tam ortasında termoelektrik jeneratör bulunmaktadır. Bu şekilde termoelektrik jeneratörün bir yüzü ısıtılıp bir yüzü soğutulmuş ve 1,5 Volt civarında bir gerilim elde edilmiştir. Bu gerilim LED lambayı yakabilmek için yeterli olmuştur. Termoelektrik modül çeşidi üretilen elektrik enerjisi miktarını etkilemektedir. Bu deneyde TEC1-12706T125 kullanılmıştır [31].



Şekil 4.4. Resistans ve buzun oluşturduğu sıcaklık farkıyla elektrik üretimi.

Şekil 4.4'te ise termoelektrik jeneratörün başka bir evsel uygulama örneği görülmektedir. Bir yüzü alüminyum diğer yüzü ise yine iletken bir metal vasıtasıyla sandviç şeklinde çevrelenen termoelektrik jeneratörün metal eklentilerinden bir yüzü buz üzerine oturtulmuş, diğer yüzü ise ütü vasıtasıyla ısıtılmıştır. Bu sistemde modern ütülerin kendini kapatma özelliklerinden dolayı ütü kaldırılıp indirilerek ısı fark korunmaya çalışılmıştır. Sıcak ve soğuk yüzeyler arasında sağlanan 30 °C'lik fark yaklaşık 1,5 Volt'un üretilmesinde yeterli olmuştur. Bu deneyde ise TEG 12710 kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Mum ve soğutma suyunun oluşturduğu sıcaklık farkıyla elektrik üretimi.

Şekil 4.5'te belirtilen deney, tez konusu olan deneyle de benzerlik göstermektedir. Burada yine ısı iletkenler arasında yer alan termoelektrik jeneratörün sıcak kısmı mum ile ısıtılırken, soğuk kısmı ise banyo musluğu vasıtasıyla şebeke suyu geçirilerek soğutulmuştur. Bir müddet sonra şekilde de görüldüğü gibi 1,16 Volt gerilim elde edilmiştir. Zamanla sıcak yüzey 64°C , soğuk yüzey de 19°C 'de muhafaza edildiğinde gerilim 3,4 Volt'a kadar çıkmıştır. Bu deneyde de yine TEG 12710 kullanılmıştır.

Evsel uygulama örnekleri benzer şekilde artırılabilir. Deney çeşitliliklerinin bu denli geniş kapsamlı olması termoelektrik modüllerin olası kullanım yelpazesinin de oldukça geniş olabileceği anlamına gelmektedir.

4.1.2. Düzenek Temin Edilirken Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Deney seti malzemeleri temin edilmesi ve test düzeneğinin oluşturulması aşamasındaki bazı konular deney sonuçları açısından oldukça önemlidir. Öncelikle piyasada bulunan çok çeşitli termoelektrik malzemelerden, elde edilebilecek maksimum sıcaklık farkı ve uygulama bölgesi için en uygun modülün seçilmesi önerilir. Örneğin maksimum 150°C 'lik sıcaklığa ulaşılacak evsel uygulamalar için 300°C maruz kalma yeteneğine sahip termoelektrik modülün satın alınması zorunlu değildir. Bunun dışında termoelektrik jeneratörün iki yüzeyinde sıcaklık farkı uygulanacak termal malzemelerin en iyi ısı iletkenliğe sahip olmaları en üst düzey verim ala-bilmek amacıyla önemlidir.

Ayrıca, termoelektrik jeneratörün katalog bilgileri sürekli göz önünde bulundurulmalı, en yüksek çalışma sıcaklığının üzerine çıkıldığında veya soğuk bölgenin yeterli soğutma değerlerine ulaşamadığında jeneratörün yanabileceği unutulmamalıdır. Termoelektrik jeneratörden gerilim alınacak kabloların sıcak bölge ile teması engellenerek kablo plastiğinin eriyip, açık kablo ucunun iletken metal ile teması da böylece engellenecektir.

4.2. YÖNTEM

Çalışmada, termoelektrik jeneratör kullanılarak oluşturulan deney kiti soba bacasına monte edilmiş, diğer yüzeyinden ise soğutma suyu geçirilmiştir. Böylece termoelektrik jeneratörün yüzeyleri arasında oluşacak sıcaklık farkından elektrik enerjisi elde edilerek test cihazı ile ölçülmüştür. Burada teze konu en önemli etken soğuk su çevrimi olmuştur. Soğuk suyun sağlandığı musluğa ait su debisinin az olduğu durumlarda ve yüksek su debilerinde sıcaklık değişikliklerinin etkileri gözlemlenmiş, voltajdaki değişimler incelenmiştir.

4.2.1. Deney Setinin Oluşturulması

Deney seti için temin edilen malzemelerle deneysel sistem kurulmuştur. Öncelikle daha yüksek gerilim elde edebilmek için 3 adet TEG 12710 tipi termoelektrik jeneratör birbirine seri olarak bağlanmıştır. Böylece çıkış değerleri 3 katına çıkabilecektir. Birbirine seri bağlanan jeneratörler, sıcak yüzeylerini ısıtacak alüminyum levhanın üzerine termal macun vasıtasıyla yapıştırılmıştır. Malzemelerin yapıştırılmasındaki asıl amaç termal macunun ısı iletkenliği artırmasından faydalanarak, termoelektrik jeneratör, alüminyum plaka ve sulu soğutma bloğu arasındaki ısı direnci en aza indirmektir. Jeneratörün soğuk yüzeyi olan metal soğutucu, kapalı dikdörtgen prizmanın kenarına yerleştirilen plastik borular vasıtasıyla oluşturulmuştur. Bu borulardan birine su pompası veya benzeri düşük basınçlı su sağla-yabilecek yardımcı malzeme ile su dolaştırıldığında prizma su ile dolarak diğer hortumdan su çıkışı gerçekleşmektedir. Böylece termoelektrik jeneratör alüminyum levha ile soğutucunun tam ortasına yerleşecek şekilde sistem

hazırlanmıştır (Şekil 4.6). Sistemin sabitliğini daha da artırabilmek için ince metal teller de kullanılabilir.

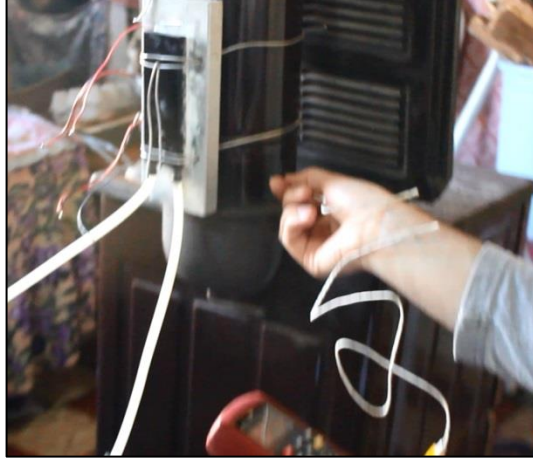


Şekil 4.6. Deney setinin hazırlanışı.

4.2.2. Test Ortamının Hazırlanması ve Deney Setinin Montajı

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi evsel ortamda termoelektrik jeneratörün çalıştırılacağı sistem kurulmuştur. Termoelektrik jeneratörün ısıtılacak kısmına ait alüminyum levha atık gazın çıkacağı soba borusuna teller vasıtasıyla monte edilmiştir. Soba borusunun yüksek ısı değerlerine rağmen alüminyumun daha düşük seviyelerde seyretmesi sebebiyle sonradan alüminyum levha boru içerisine yerleştirilmiştir. Soğuk kısımdaki soğutucu üzerindeki plastik boruların şebeke suyu ile dolaşımı sağlanabilmesi için musluk bataryası ile bağlantısı sağlanmıştır. Böylece hazır hale getirilen test düzeneğinde, soğutma suyunun serbest bırakılıp, sobanın yakılması ile deney süreci başlatılmıştır.

Deneye başlamadan önce üretilen elektrik enerjisini gözlemleyebilmek için LED devresi ve cep telefonu hazır bulundurulmuştur. Ölçümlerin yapılabilmesi için kullanılan test cihazları olan dijital ve termal multimetreler temin edilmiştir. Soğutma suyunun debi kontrolünü yapabilmek için debimetre kullanılmıştır.



Şekil 4.7. Test sisteminin hazır hâle getirilmesi.

4.3. ÖLÇÜM

Test sisteminin hazır hâle getirilmesini müteakip sistem çalıştırılmış, elektriksel değerlendirmeler ve termal kablo vasıtasıyla multimetreden yararlanılarak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. İlk aşamada birbirine seri bağlı aynı tip üç adet termoelektrik malzemeden ne kadarlık elektriksel değer elde edilebileceği araştırılmıştır. Bu aşamada soğutma suyunun debisi sabit tutulmuştur. Debi 0,037 lt/s iken, sistemden zamanla elde edilen ölçüm sonuçları kaydedilmiştir. Sobanın yakılmasından hemen sonra dijital multimetrede gerilim değerlerinde hareketlenme yaşanmıştır.



Şekil 4.8. Ölçümlerin gerçekleştirilmesi.

Çizelge 4.2’de deneye başlanan zamana bağlı olarak elde edilen sıcaklık farkına göre gözlemlenen elektriksel değerler belirtilmiştir. Zamanla ısınan soba ile atık gaz

sıcaklığında artış meydana gelmiş, böylece termoelektrik jeneratörün yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının 116°C'ye kadar ulaşması sağlanmıştır. Sıcaklık farkındaki artışın gerilim ve akım değerlerini de doğrudan etkilediği görülmüştür.

Çizelge 4.2. Sabit debili soğutma suyu kullanımında oluşan sıcaklık farkı ile alınan elektriksel değerler.

Zaman	Gerilim (V)	Akım (A)	ΔT (°C)
11:50	0,5	0,08	3
11:55	0,75	0,13	6
12:18	1,92	0,33	19
12:30	3,19	0,54	33
12:55	3,95	0,68	46
13:25	5,22	0,96	65
13:42	7,55	1,28	86
14:02	9,49	1,58	101
14:15	11,07	1,86	116
14:30	9,35	1,55	101

Çizelge 4.3'te ise aynı süre içerisinde yüzeylerdeki sıcaklık miktarları belirtilmiştir. Belirtilen değerlere göre atık gaz sıcaklığı ile sıcak yüzey arasında yaklaşık iki katlık bir sıcaklık farkı olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun kullandığımız alüminyum levhada bulunan termal boşluklarla, levhanın kalınlığıyla ve iletkenlik katsayısıyla alakalı olduğu söylenebilir. Saat 14:15'te sıcak yüzeyin 141°C'ye kadar çıktığını ve kullandığımız termoelektrik jeneratörün çalışabileceği maksimum sıcak yüzey sıcaklığının 180°C olduğunu göz önünde bulundurarak, jeneratörün yanma riskini ortadan kaldırmak için sobaya ilave ısı takviyesi yapılmamıştır.

Çizelge 4.3. Sabit debili soğutma suyu kullanımında oluşan yüzey sıcaklıkları.

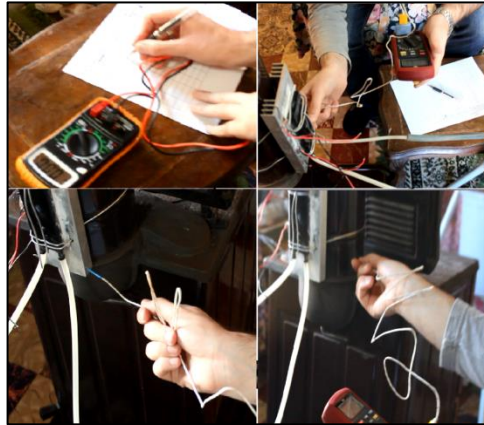
Zaman	Sıcak Yüzey Sıcaklığı (°C)	Soğuk Yüzey Sıcaklığı (°C)	Atık Gaz Sıcaklığı (°C)
11:50	13	10	20
11:55	18	12	50
12:18	32	13	82
12:30	47	14	103
12:55	62	16	122
13:25	84	19	170
13:42	106	20	203
14:02	123	22	220
14:15	141	25	240
14:30	128	27	215

Bu deneyde kullanılan Şebeke suyunun sıcaklığı 9°C olarak llmŐr (Şekil 4.9). 14:15 – 14:30 arasında soğutucudan çıkan suyun yaklaşık 30°C'ye kadar ısındığı grlmŐr. Bu ısınmanın sebebi ısıl iletkenliğe sahip metal soğutucunun da sıcak yzeyden veya sıcaklık kaynağından etkilenmesidir.



Şekil 4.9. Şebeke suyu sıcaklığı.

İlk aŐamadan alınan değerler tabloya kaydedildikten sonra ikinci aŐamaya geilmiŐr. İkinci aşamada soğutma suyunun debisi değiştirilerek çıkan akım değerleri ve dolaŐım suyunun belirli bölgelerdeki sıcak değişimleri llerek değerler kaydedilmiŐr (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Çeşitli yzeylerdeki sıcaklık lmleri.

Suyun debisine göre elde edilen elektriksel veriler izelge 4.4'te belirtilmiŐr. lm sonuçlarına göre debi hızı arttığa gerilim değerleri de doğru orantılı olarak artmaktadır. Sobanın sıcaklığı birinci aŐamanın sonundan itibaren sabit tutulmaya

çalışılmıştır. Başlangıçta soğutma suyu olmadan yapılan denemede termoelektrik jeneratörün yanma ihtimali bulunduğu için süre kısa tutulmuştur.

Çizelge 4.4. Soğutma suyu debisi değişimine göre elektriksel değerler.

Zaman	Soğutma Suyu Debisi (lt/s)	Gerilim (V)	Akım (A)	Sıcaklık farkı (°C)
14:41	0	5,11	0,92	77
15:10	0,004	5,27	1,00	79
15:25	0,021	5,5	1,03	81
15:45	0,043	6,41	1,16	91
16:00	0,083	8,69	1,45	102

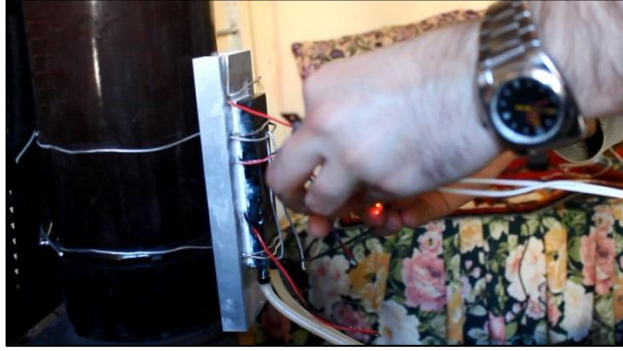
Soğutma suyu debisindeki değişime göre yüzeyler ve su arasındaki sıcaklık farkı Çizelge 4.5'te belirtilmiştir. Özellikle su akış hızının yavaş olduğu durumlarda 32°C'lik bir çıkış su sıcaklığı gözlenmiştir. Soba sıcaklığı tek bir sıcaklık değerinde sabit tutulmasında yaşanan zorluklar ve alüminyum levhanın ısınmasının biraz zaman alması sebebiyle sıcak yüzeyin zamana göre ısınması da farklılıklar göstermiştir. Ancak debideki değişim ile sıcaklık farkı ve elektriksel değerlerin doğru orantılı değişimi söz konudur.

Çizelge 4.5. Soğutma suyu debisi değişimine göre termal değerler.

Zaman	Soğutma Suyu Debisi (lt/s)	Sıcak Yüzey Sıcaklığı (°C)	Atık Gaz Sıcaklığı (°C)	Soğuk Yüzey Sıcaklığı (°C)	Giren Su Sıcaklığı (°C)	Çıkan Su Sıcaklığı (°C)
14:41	0	118	195	41	-	-
15:10	0,004	115	192	36	9	32
15:25	0,021	108	200	27	9	24
15:45	0,043	116	203	25	9	15
16:00	0,083	121	195	19	9	13

4.4. DENEY SONUCU ANALİZLERİ

İki yüzeyindeki sıcaklık farkına bağlı olarak elektrik enerjisi üretebilen termoelektrik jeneratörlere yönelik olarak yapılan deney sonuçlarına göre üretilen elektriğin faydalı amaçlar için kullanılabilceği gözlemlenmiştir. Üretilen enerjinin 3 Volt'u geçmesinden itibaren Şekil 4.11'de belirtilen LED lamba çalıştırılabilmektedir.



Şekil 4.11. LED lambanın çalıştırılması.

Aynı şekilde termoelektrik jeneratörün sıcak yüzeyinin uzun süre ısıtılması ve soğuk yüzeyinin soğutma işlemine tabi tutulmasının ardından ulaşılan maksimum çıkış gerilimi esnasında cep telefonunun bir müddet şarj edildiği görülmüştür (Şekil 4.12). Ancak üretilen enerjinin sabit kalamaması sebebiyle şarj süresi oldukça kısa sürmüştür, istenilen düzeye ulaşamamıştır. Yine de sabit sıcaklık farkının ve daha yüksek voltajın sağlanabileceği düzeneklerde, elektriksel işareti sabit seviyede tutabilecek elektronik malzemeler kullanılarak cep telefonunun şarj edilebileceği görülmüştür.



Şekil 4.12. Cep telefonunun şarj edilmesi.

Bunun dışında üretilen enerjinin diğer doğru akımla çalışan elektronik malzemelerin çalıştırılmasında, bir rezistans vasıtasıyla suyun daha da ısıtılmasında ve buna benzer birçok faydalı uygulamada kullanılabilmesi görülmüştür.

4.4.1. Termoelektrik Jeneratörün Performansı ve Verimliliği

Termoelektrik jeneratörden üretilen güç göstergesine göre Çizelge 4.1’de belirtilen genel özellikler için kıyaslama yapılabilmekte, eşitlik 3.7’den faydalanarak verimliliği hesaplanabilmektedir. Deney sonuçlarına göre elde edilen maksimum güç şu şekilde hesaplanmıştır.

$$P = 11,07 \times 1,86 = 20,59 \text{ W} \quad (4.1)$$

Buna göre verim, termoelektrik jeneratörün genel özelliklerdeki çıkış gücüne bakılarak şu şekilde elde edilmiştir.

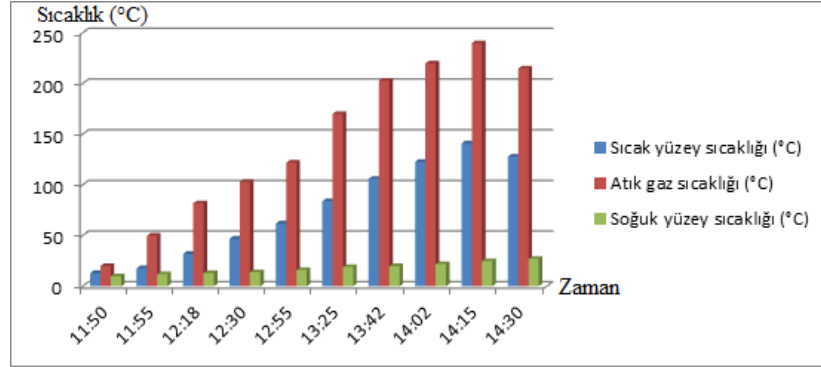
$$\eta_{\max} = 20,59 / (7,2 \times 3) = 0,95 \quad (4.2)$$

$$\eta_{\text{ort}} = 3,91 / (7,2 \times 3) = 0,18 \quad (4.3)$$

Elde edilen değerlere göre termoelektrik jeneratörler deneydeki en yüksek verilere göre kabul edilebilir bir verimlilik sağlamıştır. Eşitlik 4.3’te ise tüm deney süresince ortalama değerler kullanılarak, deneyin başlangıcından bitişine kadar olan toplam verimlilik değeri elde edilmiştir. Başlangıçta sıcaklık farkının çok düşük olması göz önünde bulundurulursa belirli bir sıcaklıktan sonra sistemin oldukça yüksek verimlilikte çalıştığı görülmektedir.

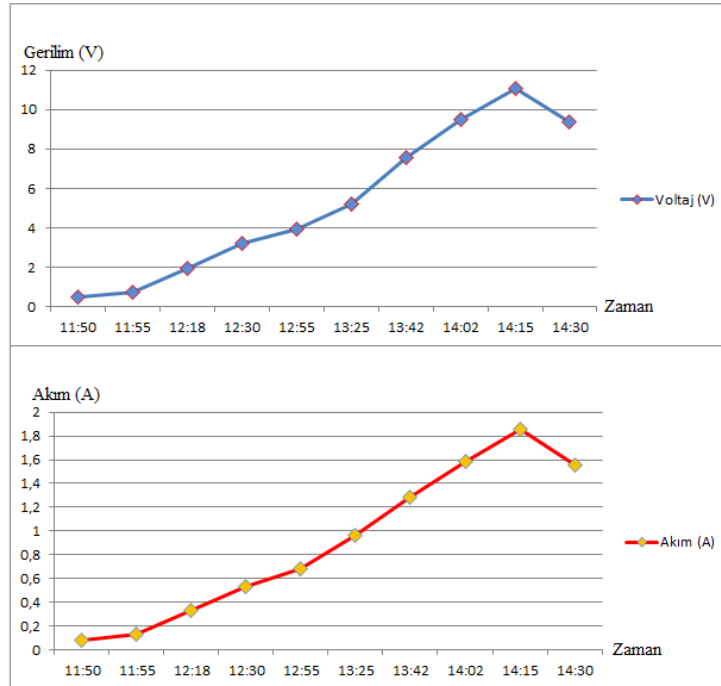
Şekil 4.13’te soğutma suyunun giriş sıcaklığının 9°C’de ve debinin 0,037 lt/s’de sabit tutulması durumunda meydana gelen ısı değişimleri görülmektedir. Bu değişimlere göre atık sıcaklığın sıcak yüzeye iletilen sıcaklık miktarından çok daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Bunun sebebi sıcak yüzeyde kullanılan malzemenin yeterli iletimi sağlayamamış olması olabileceği gibi soğutulan yüzeyden etkilenmesi ve oda sıcaklığının baca gazı sıcaklığına göre çok düşük olması da

diğer etkenler olarak sıralanabilir. Zamanla ısınan atık gazın en yüksek değerini 14:15'te aldığı ve bu durumun soğuk ve sıcak yüzeyler arasındaki farkı da en yüksek düzeye getirdiği görülmektedir.



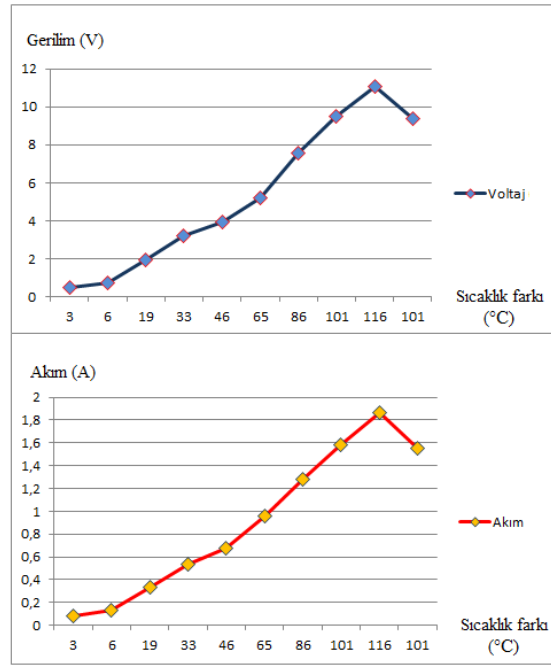
Şekil 4.13. Zamana bağlı sıcaklık değişimleri.

Yine aynı süre değişimi içerisinde elde edilen gerilim-akım grafiği Şekil 4.14'te verilmiştir. Gerilim ve akım değerlerinin de 14:15'te en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir. Çizelge 4.3'te aynı zaman içerisinde en yüksek atık gaz sıcaklığının elde edildiği belirtilmişti.



Şekil 4.14. Zamana bağlı elektriksel değişim.

Sıcak yüzey ile soğuk yüzey arasında sıcaklık değişimine bağlı olarak değişen gerilim ve akım değerleri ise Şekil 4.15'te belirtilmiştir. Böylece en yüksek sıcaklık farkının oluşturulduğu anda en yüksek elektriksel değerlere ulaşıldığı net bir biçimde görülmektedir. En yüksek değerlerin elde edilmesinden sonra sobanın soğuması sebebiyle baca gazı sıcaklığında düşüş yaşanmaya başlamış, soğuk yüzeyden etkilenen sıcak yüzeyin sıcaklık kaybetmesiyle aradaki sıcaklık farkı doğru orantılı olarak azalmıştır. Bu durum üretilen elektriksel değerlerde azalmaya sebep olmuştur.



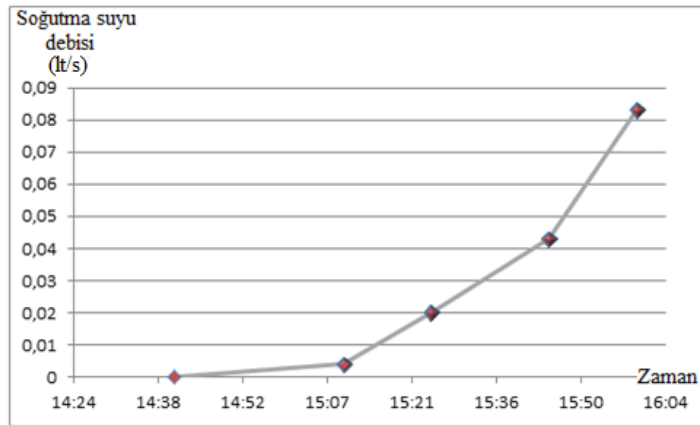
Şekil 4.15. ΔT 'ye bağlı olarak elektriksel değişim.

Bütün bu analizlerden termoelektrik jeneratörün enerji üretiminin sıcaklık değişimine bağlı olarak stabil kalmadığı görülmektedir. Bu durumun ortaya çıkmasındaki ana neden yakıt ihtiyacına bağlı olarak ısıtılabilen sobanın sabit bir sıcaklık değeri verememesidir. Elektriksel değerlerdeki bu değişmeye rağmen deney sonucunda üretilen enerjinin faydalı kullanılabilmesi ve elektronik malzemeleri çalıştırabileceği test edilmiştir. Ancak elektriksel değerlerdeki mevcut değişim ilgili elektronik cihaza zarar verebilecektir. Bu durumun ortadan kaldırılması için sıcaklığı sabit tutabilecek termoelemanlar kullanılabilmesi gibi zener diyot ve gerilim sabitleyici elektronik malzemelerin kullanılması etkili olabilir. Sonuç olarak yüksek sıcaklık farklarının

elde edilmesi durumunda termoelektrik jeneratörlerin verimli çalışarak istenilen elektriksel değere ulaşılacağı gözlemlenmiştir.

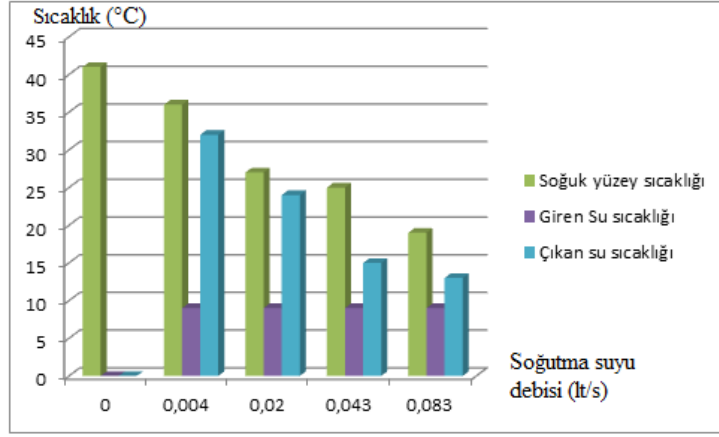
4.4.2. Soğutma Suyu Akış Hızının Enerji Üretimine Etkisi

İkinci aşamada yapılan ölçüm sırasında atık gaz sıcaklığı mümkün olduğunca sabit tutularak soğutma suyunun akış hızındaki değişimin enerji kazanımına etkisi incelenmiştir. Şekil 4.16'da soğutma suyunun debisinin test süresine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Soğutma suyunun sağlandığı musluğun debisi zamanla artırılarak, bu hıza bağlı olarak sıcaklık ve elektriksel değişim takip edilmiştir. Suyun debisi ise bir debimetre ile test edilerek her değişimde suyun akış hızı ölçülmüştür. Atık gaz sıcaklığı 195-200 °C arasında sabit tutulmaya çalışılmış, buna bağlı olarak sıcak yüzey sıcaklığı 100-110 °C'de kalmıştır.



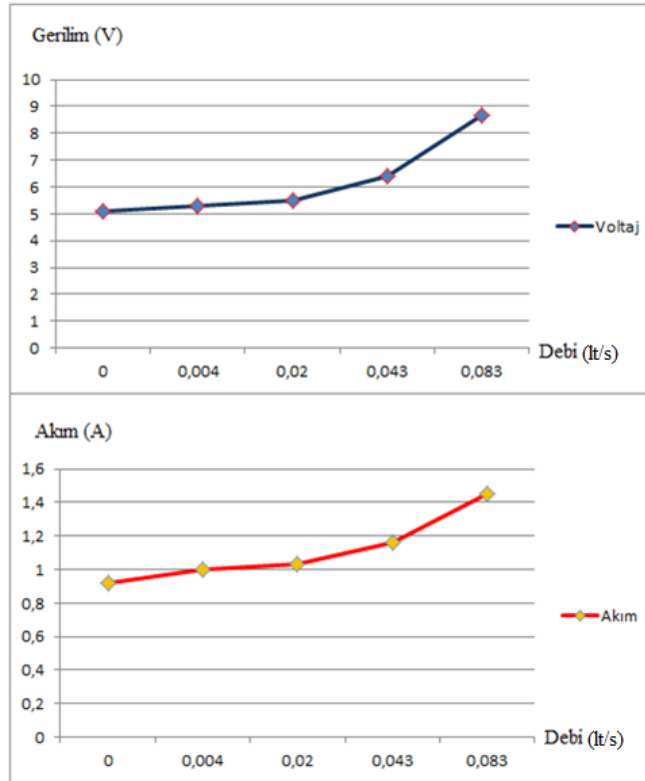
Şekil 4.16. Soğutma suyu akış hızının zamana göre değişimi.

Deneyin başlangıcında soğutma suyu kullanılmamıştır. Bu durumda soğuk kalması gereken kısım hızla ısınmış, aradaki sıcaklık farkının azalmasına sebebiyet vermiştir. Daha sonra soğuk suyun debisi yavaş yavaş artırılmıştır. Suyun giriş sıcaklığı 9°C'de sabit kalmıştır. Suyun döndürülmediği anda soğuk yüzey oldukça ısındığı için yavaş akan suyun soğuk yüzeyi kısa sürede soğutması mümkün olmamıştır. Bu aşamada soğuk yüzeyden çıkan su en yüksek sıcaklığı olan 32 °C'ye ulaşmıştır. Zamana göre artırılan su akış hızına bağlı olarak yüzeyler arasındaki sıcaklık değişimi Şekil 4.17'de belirtilmiştir. Şekilde başlangıçta su girişi olmadığı için sıcaklık değeri görülmemektedir. Suyun serbest bırakılmasıyla soğuk yüzey soğumaktadır.



Şekil 4.17. Soğutma suyunun akış hızının sıcaklığa etkisi.

Akış hızına bağlı olarak elektriksel değişimler Şekil 4.18’de verilmiştir. Soğutma suyunun kullanılmadığı aşamada sıcak ve soğuk yüzeydeki sıcaklık değişimi azaldığından akım ve voltaj değerlerinin düşük olduğu, zamanla verilen soğutma suyu ile aradaki fark tekrar artarak doğru orantılı olarak elektriksel değerlerde de artış olduğu gözlenmektedir.

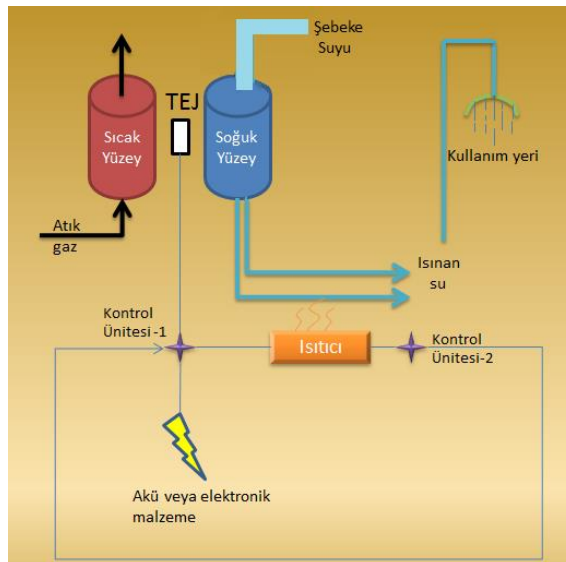


Şekil 4.18. Soğutma suyunun akış hızının elektriksel değişime etkisi.

Suyun akış hızı, soğutulan yüzeye giren suyun ne kadar ısınacağını belirlemekle beraber, termoelektrik jeneratörün ürettiği elektrik enerjisine de doğrudan etki etmektedir. Sıcak yüzey sıcaklığının sabit tutulması durumunda soğutma suyu debisi vasıtasıyla istenilen elektriksel değerlerin elde edilebileceği sonucu ortaya çıkmaktadır.

4.5. SOĞUTMA SUYU KONTROLÜYLE ENERJİ ÜRETİMİ

Deneyin ikinci aşamasında atık gaz sıcaklığı sabit tutularak soğutma suyu kontrolü sağlanmaya çalışılmıştır. Yüzeyler arasında sıcaklık farkının oluşturulmasıyla birlikte elektrik üretimi gözlenmiştir. Soğutucu yüzeyden su geçmemesi sebebiyle hızla ısınan sıcak yüzey, sıcaklık farkını azaltarak düşük elektrik üretimine sebebiyet vermiştir. Burada gerilim değerlerinin 5,11V ile 8,69 V arasında değiştiği görülmüştür. Gerçekleştirmiş olduğumuz testler sonucunda termoelektrik jeneratörlerin ürettiği gerilim ve akım değerlerinin soğutma suyu ile kontrol edilebileceği sonucuna ulaşılmaktadır. Böylece üretilmesi gereken elektrik miktarının belirli bir seviyede kalması istenen durumlarda gelişmiş sistemler kullanılarak termoelektrik jeneratörden sağlanan elektriğin faydalı kullanımı sağlanabilir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Su kontrollü termoelektrik jeneratörlerin uygulama örneği.

Şekil 4.19’da termoelektrik jeneratörlerin oteller, yurtlar gibi konaklama hizmeti veren binalarda kullanılabileceği bir örnekleme şematize edilmiştir. Tercihen kat kaloriferi kullanılan binalar yüksek sıcaklıkta atık gaz sergilemektedir. Bu atık gazdan sağlanan ısı enerjisi ile termoelektrik jeneratörün sıcak yüzeyinin ısıtılması, şebeke suyu ile de soğuk yüzeyin soğutulabilmesi mümkündür. Kullanım yerindeki su talebinin fazla olmadığı durumlarda soğuk yüzeyden geçen su ısınacağından, tekrar kullanım yerine sıcak su olarak gönderilebilir. Bu durumda üretilen elektriğin, düşük enerji ihtiyacı duyan elektronik eşyaların çalıştırılması veya aküde depolanması sağlanabilir.

Kullanım yerindeki su talebinin fazla olması durumunda ise şekilde “Kontrol Ünitesi -2” olarak tabir edilen kontrol mekanizması suyun sıcaklığını ölçerek, suyun sıcaklığının talep edilen seviyede olmaması durumunda “Kontrol Ünitesi -1” e sinyal göndermektedir. Birinci kontrol ünitesi, üretilen elektrik enerjisini bir ısıtıcıya yönlendirerek, suyun daha da ısınmasını sağlamaktadır. Su istenilen sıcaklığa ulaştığı takdirde ikinci kontrol ünitesi, ısıtıcının yavaşlatılması veya durdurulması yönünde birinci kontrol ünitesine mesaj göndermektedir. Böylece hem atık ısının geri dönüşümü hem de şebeke suyunun kullanımını mümkün hâle gelmektedir.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sıcaklık farklarından yararlanarak elektrik üretebilen termoelektrik jeneratörlerin yapısı ve performansı incelenmiş, soğutucu olarak kullanılan suyun akış hızı değiştirilerek üretilen elektriksel değerlerin kontrol altına alınıp alınamayacağı hazırlanan deney prototipi üzerindeki pratik uygulamalar vasıtası ile test edilmiştir. Deney sonucunda elde edilen veriler vasıtasıyla yapılan hesaplamalarda yeterli verimliliğe ulaşılmış ve su debisindeki değişimin, elektriksel değerlere doğru orantılı olarak etki ettiği görülmüştür.

Termoelektrik jeneratörden elektrik üretimi iki aşamalı test ile sağlanmıştır. Testlerin yapılabilmesi için sıcak yüzeyi alüminyum levhayla, soğuk yüzeyi ise içerisinden soğuk su geçebilecek şekilde tasarlanan dikdörtgen prizma biçimindeki iletken metal ile teması sağlanan birbirlerine seri bağlı üç adet termoelektrik jeneratör, sıcak kısmı soba borusuyla temas edecek şekilde sobaya monte edilmiştir. Soğuk kısmı için ise şebekeden gelen ve 9°C olarak ölçülen şebeke suyu ile hortumlar vasıtasıyla ilişkilendirilmiştir.

İlk aşamada su debisi 0,037 lt/s'de sabit tutularak termoelektrik jeneratörün verimliliği test edilmiştir. Jeneratörün iç direnci deney süresince 5 ile 6 ohm arasında sabit kalmıştır. Bu durumda sobanın yakılmasıyla oluşan atık baca gazı sıcaklığı soba borusundan düzeneğin sıcak kısmına aktarılmıştır. Burada, maksimum çalışma sıcaklığı 180°C olan termoelektrik jeneratörün sıcak kısmı 141°'ye kadar ısıtılabilmiştir. Soğuk yüzey ise sabit debide en fazla 27°C'ye ulaşmıştır. Bu şartlar altında elde edilen verilere göre 0,95 değerinde bir verim hesaplanmıştır. Ortalama verim ise 0,18'de kalmıştır ki bu durum sobanın yanması ve yüzeyin ısıyı iletmesi nedenleriyle kaybedilen zamandan kaynaklanmaktadır. Yapılan grafik ve analiz çalışması ile ΔT sıcaklık farkının termoelektrik jeneratörden üretilen enerjiyle

doğrudan etkili olduğu görülmüştür. Böylece atık gazla ve şebeke suyu ile basit ortamda termoelektrik jeneratörden elektrik üretilmiş, üretilen elektriğin telefon şarjı ve LED lambaların çalıştırılması gibi faydalı olarak kullanılabilceği tespit edilmiştir.

İkinci kısımda ise sobanın, dolayısıyla sıcak yüzeyin sıcaklığı mümkün oldukça sabit tutulmaya çalışılmıştır. Suyun akış hızı sıfırdan itibaren artırılarak, ısınma ve elektriksel etkiler gözlenmiştir. Suyun hiç akmadığı durumda soğuk taraf, sıcak taraftan da etkilenererek hızla ısınmaya başlamıştır. Bu durumun termoelektrik jeneratörün yanmasına sebebiyet verebileceğinden uygulama süresi oldukça kısa tutulmuştur. Çıkan suyun sıcaklığının maksimum olduğu 32°C'ye ulaştığı gözlemlenmiştir. Çıkan su sıcaklığı ile ters orantılı olarak üretilen gerilim ve akım değerleri düşmektedir. Bunun sebebi sabit olan sıcak yüzeyin etkisiyle sıcaklık farkının azalmasıdır. Debinin sıfır olduğu durumda 5,11 Volt ve 0,92 Amper üreten termoelektrik jeneratörün performansı, debinin artırılmasıyla artmış ve debi 0,083 lt/s olduğu anda 8,69 Volt ve 1,45 Amper'lik elektriksel değer elde edilmiştir.

Aynı sistem daha fazla enerji sağlayabilecek daha yüksek kapasiteli termoelektrik jeneratörler kullanılarak ısı kapasitesi daha yüksek olan endüstriyel uygulamalarda da denenebilir. Termoelektrik jeneratörlerin maksimum maruz kalma sıcaklıkları, piyasada yer alan birçok çeşide göre değişebilmektedir. Soğuk tarafın sıfır derecenin altına indirilebileceği ve sıcak yüzeyin 300°C'de muhafaza edilebileceği uygulama alanları da mevcuttur.

Termoelektrik çiftlerin hâlâ araştırma konusu olduğu göz önünde bulundurulursa yakın bir gelecekte daha yüksek potansiyelli uygulamalara da rastlanabilecektir. Elde edilecek elektrik enerjisinin artması, termoelektrik elemanların kullanım alanlarının önemini daha da artıracaktır. Bundan sonra uygulanacak denemelerde daha yüksek sıcaklık farklarının oluşturulmasıyla daha yüksek toplam verim elde edilebilecek, termoelektrik malzemelerden elde edilen enerjinin gündelik hayatta kullanımını daha da kolaylaştıracaktır.

KAYNAKLAR

1. Şahin, A. Z. ve Yılbaş, B. S., “Thermodynamic irreversibility and performance characteristics of thermoelectric power generator”, *Energy*, 55: 899-904 (2013).
2. Inayat, S. B. and Hussain, M. M., “Power generation from thermoelectric system-embedded plexiglas for green building technology”, *Appl Nanosci*, 10: 32-39 (2012).
3. Ciylan, B. ve Yılmaz, S., “Design of a thermoelectric module test system using a novel test method”, *International Journal of Thermal Sciences*, 46: 717-725 (2002).
4. Luo, Q. H., Tang, G. F., Liu, Z. and Wang, J., “A novel water heater integrating thermoelectric heat pump with separating thermosiphon”, *Applied Thermal Engineering*, 12: 408-419 (2005).
5. Dikmen, E., “Fixing of factors what affects thermoelectric coolers’ working criteria and fields of use in industry”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 1-19 (2002).
6. Li, M., “Thermoelectric generator based DC-DC conversion network for automotive applications”, Master of Science Thesis, *KTH Information and Communication Technology*, Stockholm-Sweden, 25-30 (2011).
7. Xiao, J., Yang, T., Li, P., Zhai, P. and Zhang, Q., “Thermal design and management for performance optimization of solar thermoelectric generator”, *Applied Energy*, 93: 33-38 (2010).
8. Weinberg, F. J., Rowe, D. M. and Min, G., “Novel high performance small-scale thermoelectric power generation employing regenerative combustion systems”, *Rapid Communication*, 35: 61-63 (2002).
9. Dişlitaş, S. ve Ahıska, R., “Microprocessor controlled thermoelectric generator that directly convert geothermal energy from renewable energy source to electric power”, *International Advanced Technologies Symposium*, Ankara, 18-20 (2003).
10. Usta, H. ve Kırmacı, V., “Thermoelectric affects and applying of cooling activity”, *Teknoloji*, 3 (4): 65-71 (2002).
11. Völklein, F., Gao, M. and Rowe, D. M., “Modelling of a microelectromechanical thermoelectric cooler”, *Sensor and Actuators*, 75: 95-101 (1999).

12. Sato, B. and Ma, X., "Thermoelectrics: A review of present and potential applications", *Thermal Engineering*, 23: 913-935 (2001).
13. Lertsatitthanakorn, C., "Electrical performance analysis and economic evaluation of biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator", *Bioresource Technology*, 98 (8): 1670-1674 (2006).
14. Kılıç, T., "A study about recycling waste energy in buildings by using thermoelectric generators", Yüksek Lisans Tezi, *Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 55-80 (2010).
15. Lossec, M., Multon, B., Ahmed, H. B. and Goupil, C., "Thermoelectric generator placed on the human body: system modeling and energy conversion improvements", *Applied Physics*, 52: 1-10 (2010).
16. Martins, J., Brito, P. F., Goncalves, L. M. and Antunes, J., "Thermoelectric exhaust energy recovery with temperature control through heat pipes", *SAE International*, 315: 1-19 (2011).
17. Lesage, F. J. and Page-Potvin, N., "Experimental analysis of peak power output of thermoelectric liquid to liquid generator under an increasing electrical load resistance", *Energy Conversion and Management*, 66: 98-105 (2013).
18. Wang, W., Cionca, V., Wang, N., Hayes, M., O'Flynn, B. and O'Mathuana, C., "Thermoelectric energy harvesting for building energy management wireless sensor networks", *International Journal of Distributed Sensor Networks-Hindawi*, 23: 1-14 (2013).
19. Oplustil, M. and Zalesak, M., "The power options for transmitting systems using thermal energy generator", *International Conference on Environment, Energy, Ecosystems and Development*, Czech Republic, 212-215 (2013).
20. Gür, S. ve Atik, K., "Power generation using concentration solar collectors and thermoelectric generators", *5th International Advanced Tehcnologies Symposium*, Karabük, 13-17 (2009).
21. Jensen, K., Messick, D. and Verzosa, J., "Thermoelectric generators", *Harding University Report*, Arkansas, US, 18-25 (2010).
22. Baumbach, R. E. and Maple, M. B., "Correlated electron materials for thermoelectric applications", *Advanced Research Workshop*, Hvar, Croatia, 1-35 (2010).
23. Ahiska, R., Güler, N. F. ve Savaş, T., "Investigation of thermoelectric cooler's properties", *Politeknik Dergisi*, 3 (2): 89-94 (1999).
24. Yılmaz, S., "Experimental investigation of the effects of different cooling applications in thermoelectric cooler on the system performance", *Teknoloji*, 11 (1): 39-44 (2008).

25. Atik, K., “Thermoeconomic optimization in the design of thermoelectric cooler”, *5th International Advanced Tehcnologies Symposium*, Karabük, 1-5 (2009).
26. Bulut, H., “Thermoelectric cooling systems”, *Soğutma Dünyası*, 31: 9-16 (2005).
27. Ciylan, B., “Microprocessor controlled a new test system design and performing for thermoelectric modules”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü*, Ankara, 10-25 (2009).
28. Atik, K. ve Kayabaşı, R., “Producing electricity with thermoelectric generator by using geothermal energy”, *Teknoloji Araştırmalar*, 3 (6): 59-64 (2009).
29. Ahiska, R., Mamur, H. ve Uliş, M., “Modelling thermoelectric module as generator and experimental study”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Derneği*, 4 (26): 889-896 (2011).
30. Dişlitaş, S. ve Ahiska, R., “Geothermal thermoelectric generators”, *New and Renewable Energy Supplies Symposium and Exhibition*, Kayseri, 305-360 (2003).
31. İnternet: Türkiye Bilimsel ve Teknoloji Araştırma Kurumu, “Termoelektrik jeneratör”, <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/gelisim/elektronik/26.htm> (2007).

ÖZGEÇMİŞ

Şahin BAŞ, 1987 yılında Karabük'te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini aynı şehrin Safranbolu ilçesinde tamamladıktan sonra 2005 yılında Kayseri Erciyes Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2007 – 2008 yılları arasında ERASMUS Öğrenci Değişim Programı'na dahil olarak Litvanya'daki Vilnius Gediminas Teknik Üniversitesi'nde eğitim gördü. 2009 yılında üniversiteden mezun olduktan sonra askerlik görevine asteğmen olarak başladı. 2010 yılında askerlik görevini tamamladı. 2010 – 2011 yılları arasında Türk Telekom A.Ş.'de İletim Sistemleri Uzman Yardımcısı olarak görev yaptı. 2011 yılında Batı Karadeniz Kalkınma Ajansı'nda Uzman olarak görev aldı ve halen devam etmektedir. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Şahin BAŞ, evli ve bir çocuk babasıdır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Barış Mah. Göztepe Cad. Ermersa Sitesi, D. Blok, No:16
Safranbolu/KARABÜK

Tel : 0535 870 00 98

E-mail : sahinbas78@gmail.com