

**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK – ELEKTRONİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TERMOELEKTRİK TABANLI PORTATİF BİR JENERATÖRÜN
GELİŞTİRİLMESİ**

Özgür ÇEVİK

**KIRIKKALE
NİSAN 2011**

Elektrik-Elektronik Anabilim Dalında Özgür ÇEVİK tarafından hazırlanan
TERMOELEKTRİK TABANLI PORTATİF BİR JENERATÖRÜN GELİŞTİRİLMESİ adlı
Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylıyorum.

Doç. Dr. Ediz POLAT

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini
onaylıyorum.

Prof. Dr. Şerafettin EREL

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan (Danışman) : Prof. Dr. Şerafettin EREL

Üye : Yrd.Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM

Üye : Yrd.Doç. Dr. Murat LÜY

21/04/2011

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans
derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. İhsan ULUER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÖZET

TERMOELEKTRİK TABANLI PORTATİF BİR JENERATÖRÜN
GELİŞTİRİLMESİ

ÇEVİK Özgür

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Prof. Dr. Şerafettin EREL

Nisan 2011, 64 sayfa

Elektrik enerjisi; ekonominin, sosyal hayatın, yaşamımızın en önemli girdisi ve vazgeçilmez bir unsurdur. Bundan dolayı mevcut enerji kaynaklarının geliştirilmesi yanında, yeni enerji kaynakları da aranmaktadır. Termoelektrik jeneratörler de güneş pilleri gibi yarı iletken teknolojiye dayanan ve hızla gelişen bir teknolojidir. Bir termoelektrik çeviricinin iki yüzeyine sıcaklık farkı uygulandığında elektrik enerjisi üretilir. Bu çalışmada; katı, sıvı ve gaz yakıtla çalışabilecek portatif bir termoelektrik jeneratör geliştirilmiş ve bu sistemle elektrik enerjisi elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler : Termoelektrik çevirici, termoelektrik jeneratör,elektrik üretimi

MASTER THESIS

ABSTRACT

**DEVELOPMENT OF A PORTABLE GENERATOR BASED ON
THERMOELECTRIC**

ÇEVİK Özgür

Kırıkkale University

Graduate School Of Natural and Applied Sciences

Department Of Electric-Electronics, M. Sc. Thesis

Counselor: Prof. Dr. Şerafettin EREL

April 2011, 64 pages

Electrical energy is the most important input and indispensable component of the economy, social life and our lives. New energy sources have also been searched beside improving the current energy sources. Thermoelectric converters based on rapidly developing technology and they are produced from semiconductor materials as solar cells. A thermoelectric converter produces electricity when the different temperature is applied to two surfaces of the converter. A portable thermoelectric generator worked by solid, liquid and also gas fuels was developed in this work and electrical energy was generated by the system.

Key words: Thermoelectric modules, thermoelectric generator, generation of electricity

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐması sűresince beni teknik ve teorik dűzeyde her aŐamada, bilgi ve deneyimleri ile yűnlendiren, hiçbir yardımı esirgemeyen, laboratuarlarda bilimsel deney imkanlarını sunan, sabır ve anlayıŐ gűsteren deęerli tez danıŐmanım sayın Prof. Dr. Őerafettin EREL'e, maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan aileme teŐekkűrlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
1.GİRİŞ	1
2.TERMoeLEKTRİK DÖNÜŞTÜRÜCÜLERE GENEL BAKIŞ	6
2.1.Termoelektrik Dönüştürücülerin Yapısı	7
2.2.Termoelektrik Dönüştürücülerde Kullanılan Malzemeler	10
2.2.1.n-Tipi Yarıiletken Malzemeler	10
2.2.2.p-Tipi Yarıiletken Malzemeler	11
3.TERMoeLEKTRİK OLAY	13
3.1.Termoelektrik Etkiler	14
3.1.1.Seebeck Etkisi	15
3.1.2.Peltier Etkisi	19
3.1.3.Thomson Etkisi	22
3.1.4.Kelvin İlişkileri	22
3.2. Termoelektrik Dönüştürücülerde Kullanılan Malzemeler, Termoelementlerin Enerji ve Isı Prosesleri	23
3.3.Termoelementlerde Oluşan Enerji Prosesleri	24
4.TERMoeLEKTRİK MODÜLLERİN ENDÜSTRİYELUYGULAMALARI	26
4.1.Termoelektrik Modülün Uygulamaları	27
4.2.Termoelektrik Modülün Avantajları	30
4.3.Termoelektrik Jeneratörler ve Soğutucular	31
4.3.1.Temel Çalışma Prensipleri	34
4.4.Termoelektrik Soğutucular	39
4.4.1.Termoelektrik Soğutmanın Teorisi	39
4.4.2.Termoelektrik Soğutucularda Kullanılan Malzemeler	41
4.4.3.Termoelektrik Soğutucuların Avantaj ve Dezavantajları	41
4.4.4.Termoelektrik Soğutucuların Kullanım Alanları	42

4.4.5. Termoelektrik Modüllerin Seçim ve Tasarımında Isıl ve Elektriksel Parametreler	45
4.5. Uygulama Alanları	50
5. GEREÇ VE YÖNTEM	52
6. ARAŞTIRMA BULGULARI	57
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	60
KAYNAKLAR	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Bir fotonun kristal yapı içindeki elektronu uyarması sonucu oluşan elektron-boşluk çifti	8
2.2 Elektron- boşluk çiftinin elektrik alan içindeki davranışı	8
2.3 Arsenik atomunun Si ile yaptığı bağ ve serbest elektronun yörüngedeki hareketi	10
2.4 Si yapıya 1 ppm As eklenmiş n tipi bir yarı iletkenin enerji bant diyagramı	11
2.5(a) Bor atomunun bağdaki bir atomu yutması sonucu oluşan boşluk	12
2.5(b) Boşluğun Bor atomu çevresindeki yörüngesi ve serbest hale geçişi	12
2.6 Si yapıya 1 ppm B eklenmiş p tipi bir yarı iletkenin enerji bant diyagramı	12
3.1 Basit termik çift devresi	15
3.2 Alüminyum çubuktaki sıcaklık değişimi ile oluşan elektron hareketleri- Elektron hareketi sonrası alüminyum çubuğun yük dağılımı	16
3.3 Seebeck etkisinin görüldüğü ısıl çift	18
3.4 Peltier etkisinin görüldüğü ısıl çift	19
3.5 Termoelementi oluşturan kısımlar	24
4.1 Termoelektrik modül şekilleri	26
4.2 Termoelektrik modül kesit görünüşü	27
4.3 Termomodülün yapısı ve genel görünüşü	29
4.4 Temel termal çift devresi	31
4.5 Hi - Z termoelektrik jeneratör	32
4.6 Beş peltier elemandan oluşan test düzeneği	33
4.7 Ticari bir kaskad bağlı peltier soğutucu	33
4.8(a) Konvaksiyonel güç üretimi	34
4.8(b) Termoelektrik güç çevrimi	34
4.9(a) Konvaksiyonel soğutma çevrimi	35
4.9(b) Termoelektrik soğutma çevrimi	35
4.10 Bir termoelektrik jeneratör modülünün bileşenleri	37
4.11(a) Termoelektrik jeneratör	38
4.11(b) Termoelektrik soğutucu	38
4.12 Bir termoelektrik soğutucu modülü	40
4.13 Piknik amaçlı bir piknik soğutucu	44
4.14 Lazerli ve medikal uygulamalar için sıvı soğutucu	44

4.15	Bir CPU soğutulması için	45
4.16(a)	Serbest taşınimli hava soğutmalı ısı kaynağı	46
4.16(b)	Zorlanmış taşınimli hava soğutmalı ısı kaynağı	46
4.16(c)	Zorlanmış taşınimli sıvı soğutmalı ısı kaynağı	46
4.17	Sudan havaya bir termoelektrik soğutucu	46
4.18	Soğuk plakalı termoelektrik soğutucu	46
4.19	$T_h=25^{\circ}\text{C}$ için $\Delta T - V$ performans diyagramı	48
4.20	$T_h=25^{\circ}\text{C}$ için $\Delta T - Q_c$ performans diyagramı	49
4.21(a)	Plutonium - 238 peleti	50
4.21(b)	Cassini uzay aracı ve üzerindeki RTG üniteleri	50
4.22	Güneş enerjisi ve termoelektriğin evsel bir uygulaması	51
5.1	Bakır su deposu	52
5.2	Termoelektik jeneratörün çalışır haldeki görüntüsü	53
5.3	Deneyde kullanılan TEC1-12708 termoelektrik modülü	54
6.1	Bütan gazıyla çalışan termoelektrik jeneratörün 3 boyutlu görüntüsü	56
6.2	Jeneratörden sağlanan gerilimle yakılan 90 ledli lamba	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Farklı metaller için Seebeck katsayıları	16
4.1 Termoelektrik soğutmanın kullanım alanları ve uygulamaları	43
5.1 TEC1-12708'e ait teknik özellikler	54
6.1 Termoelektrik jeneratörde yapılan anlık en yüksek ölçüm değerleri (24 Ω 'luk dış direnç bağılyken)	57
6.2 Termoelektrik jeneratörde yapılan anlık en yüksek ölçüm değerleri (Açık devre voltajı)	58
6.3 Termoelektrik jeneratörde modül başına düşen güç değerleri	58

1. GİRİŞ

İnsanlığın enerjiye olan gereksinimi var oluşumuzdan beri hiç tükenmemiştir ve gün geçtikçe artmaktadır. Mevcut enerji döngüsünün sonlu olan fosil yakıtlar kökenli olması ve çevreye verdiği olumsuz etkilerden dolayı bilim yeni nesil enerji teknolojilerini geliştirmeye çalışmakta ve var olan kaynakları verimli kullanmayı hedef edinmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynağını doğadan alır ve çevre üzerinde olumsuz etkileri olmayan kaynaklardır. Günümüzde en yaygın olarak güneş, rüzgâr, hidrolik, biokütle ve jeotermal enerji kaynakları kullanılmakta ve buna bağlı olarak yenilenebilir enerji teknolojileri geliştirilmektedir[1].

Yatırımı yapılacak olan sistemin her yatırımda olduğu gibi ekonomik avantaj ve dezavantajlarının çıkarılması gerekir. İlk başta, planlaması yapılacak bölgenin (kullanılması planlanan enerji tipine göre) güneş ışınımı ve rüzgar hızları gibi verilerinin ölçülmesi gerekir. Mevcut enerji kaynakları potansiyeline göre, kurulacak olan yenilenebilir enerji sisteminin birim enerji maliyetinin, yatırım maliyetinin ve sistemin ömür boyu maliyetinin tespit edilmesi gerekir. Bazı sistemlerin kurulum maliyeti yüksek olsa da, ömür boyu maliyet kıyaslandığı zaman daha uygun olabilmektedir.

Enerji ihtiyacıyla kullanılan fosil enerji kaynakları gün geçtikçe azalmaktadır. Petrolün keşfiyle birlikte, dünyanın her yerinde kömür ve petrol, enerji kaynağı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bunların yoğun olarak kullanılması geriye dönüşü zor bir çevre kirliliği yaratmıştır. Enerji üretmek amacıyla kullandığımız petrol ve kömür gibi yeraltı kaynaklarının, yakın zamanda tükenebileceği düşünülmektedir. Bu koşullar, bilim adamlarını, dünyanın giderek artan enerji ihtiyacını, çevreyi kirletmeden ve sürdürülebilir olarak karşılayabilecek farklı enerji kaynaklarını araştırmaya yöneltmiştir. Yenilenebilir enerji sistemi çok az çevre kirliliğine neden olmaktadır. Atıkları yok etmek için ve çevreyi temizlemek için masraf gerektirmemektedir [2].

Günümüzde enerji üretmek amacıyla kullanılan petrol ve kömür gibi yakıtlar, içinde bulunduğumuz yüzyıl sona ermeden tükenecektir. Bu yakıtlara alternatif olabilecek kaynaklar ise yenilenebilir enerji kaynakları olarak görülmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli avantajlarından biri de çevre dostu olmalarıdır. Fosil yakıtların çevreye ve insan sağlığına olumsuz etkileri her geçen gün artmaktadır. Fosil yakıtlar tüketildiğinde açığa çıkan sera gazları, küresel ısınmaya ve iklim bozulmalarına yol açmaktadır. Fosil kaynaklı yakıtların tüketilmesiyle CO₂, CO, SO₂ ve (NO)_x gibi gazlar açığa çıkmaktadır. Dünya çapında sera gazlarının azaltılmasına yönelik uluslararası anlaşmalar yapılmaktadır. Bu anlaşmalardan en önemlisi 1997 yılında imzalanan Kyoto Protokolüdür[3,4].

Çoğu ülke gelişmişlik düzeyini AR&GE yatırımlarına ayırdığı bütçeler sayesinde sürdürmekte ve değişen dünya düzeninde ayakta kalmaya çalışmaktadır. Enerjiye olan gereksinimin sürekli artmasıyla fosil yakıtların tüketimi artmış ve bu durum çevre sorunlarını ve sağlık problemlerini beraberinde getirmiştir. Özellikle küresel ısınma yerel sorunlar olmaktan çıkmış ülkeleri ve dünyayı etkileyecek boyutlara gelmiştir. Sera gazı emisyonlarını azaltmak üzere Kyoto Protokolü imzalanmış protokolle ülkelerin yenilenebilir enerji teknolojilerine yatırım yapması için kredi sağlanmaya çalışılmıştır [1].

Bu protokole göre, taraf ülkeler insan kaynaklı CO₂ ve öteki sera gazı salınımlarını 2008-2012 döneminde 1990 düzeylerinin en az %5 altına indirmek zorundadırlar. Avrupa Birliği, tek tek üye ülkeler açısından %8'lik azaltma yükümlülüğü almıştır. Protokolde, Amerika Birleşik Devletlerinin belirlenmiş salınım azaltma yükümlülüğü %7'dir. Ancak dönemin Amerika Başkan Yardımcısı Al Gore bu yükümlülüğü kabul etmenin mümkün olmadığını ve kendi halkının çıkarları doğrultusunda değiştirmek için elinden geleni yapacağını açıklamıştır. Daha sonraki süreçte, ABD Buenos Aires'te gerçekleştirilen Taraflar Konferansı'nın (COP-4) sonunda Kyoto 2 Protokolü'nü imzaladığını, ancak; Çin, Hindistan gibi gelişmekte olan anahtar ülkeler sera gazı salınımlarını sınırlandırma konusunda herhangi bir yükümlülük almadıkça protokole taraf olmayacağını ilan etmiştir. Yenilenebilir enerji sistemleri sera gazları oluşumu için yaptırımların artmasıyla birlikte daha cazip hale gelecektir. Yenilenebilir enerji kaynakları (rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi) sürekli olarak kendilerini yeniledikleri için tükenmezler. Yenilenebilir enerjilerin çoğu güneşten kaynaklıdır. Güneşin ısıtmasındaki farklılıklar sonucu rüzgarlar oluşur, rüzgardaki enerji rüzgar türbinleri vasıtasıyla kullanılır. Güneşin ısıtmasıyla okyanus ve akarsulardan su kütleleri buharlaşır. Bu su buharı, yağmur ya da kara dönüşüp tekrar ırmak ya da dere içlerine ulaştığı zaman, hidrolik enerji hidroelektrik santraller tarafından kullanılır. Okyanuslarda oluşan gelgit enerjisi, güneş ve ayın birbirlerini kütleli olarak çekmelerinden kaynaklanır. Gerçekte, okyanus enerjisi birçok kaynaktan

oluşur. Gelgit enerjisine ilave olarak okyanus dalgalarının, rüzgarlar ve gelgitlerle birlikte oluşturduğu okyanus enerjisi vardır. Güneş okyanusun yüzeyini okyanusun derinliklerinden daha fazla ısıttığı için arada bir sıcaklık farkı oluşur. Bu sıcaklık farkı, bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir [3,4].

Enerjinin kontrol edilebilmesi ve istediğimiz sistemlerde kullanılabilmesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerjilerde doğadan alınan enerji kayıpsız bir şekilde faydalı bir enerjiye dönüştürülebilmelidir. Bu dönüşüm oranları bazı sistemlerde termodinamik, bazı sistemlerde elektrokimyasal sınırlarla belirlenmiştir. Bunların yanında sistemler arasında dönüşümler ve dağıtım işlemleri sırasında empedans kaynaklarının da devreye girmesiyle enerjinin kullanılabilirliği azalmaktadır. Doğrudan enerji dönüşümü yapan teknolojilerle kayıplar azaltılmaya çalışılmaktadır. Doğrudan enerji dönüşüm sistemlerinde güneş panelleri çoğu kişi tarafında bilinmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Güneş pilleri ile termoelektrik yapılar dönüştürdükleri enerji formları birbirlerinden farklı olsalar da temelde iki sistem de yarı iletken malzemelerden üretilmektedir. Tarihsel olarak incelendiğinde ise iki teknoloji de ilk olarak uzay araçlarında kullanılmıştır. Güneş panelleri üzerine yapılan çalışmalar ve seri üretim ile güneş enerjisinden yararlanma yaygınlaşmış fakat termoelektrik yapılar bu gelişimin gerisinde kalmıştır. Şimdilerde termoelektrik tabanlı enerji sistemleri üzerine yapılan çalışmalar artmakta ve verim değerleri yükseltilmeye çalışılmaktadır [1].

Yeni materyaller yeni teknolojik buzdolaplarını eski moda buz kutuları gibi sessiz, güvenilir ve enerjiyi en iyi şekilde kullanır hale getirmiştir. Birçok uzman, sabit parçaların kullanıldığı, ozon tabakasına zarar veren gazların kullanılmadığı ve bugünün kompresörlerinin yerini alabilecek bir sistemle; hem sıcaklık farkından elektrik akımı oluşturacak hem de bu akımı materyaller arasından geçerken sistemin sıcaklığını değiştirebilecek daha uygun termoelektrik malzemelerin üretimi için yıllarca çalışmışlardır.

Bilim adamlarının uzun yıllar boyunca süren çalışmalarına rağmen bir türlü uygun malzemeler bulunamamıştır. Bu nedenle bu materyallerin bulunabileceği ihtimali gittikçe azalmış ve umutsuzluğa düşen bilim adamları eleştirmenlerce çeşitli eleştirilere maruz kalmışlardır. Son zamanlarda ilginin daha çok çevre dostu buzdolaplarının üzerine yoğunlaşması üzerine bu alana ilgi artmıştır. Bu da farklı alanlarda çalışan bilim adamlarının ilgisinin bu konuda yoğunlaşmasına neden olmuştur [5,6].

Günümüzde birçok ülkede enerji krizini önlemek için yeni elektrik üretim kaynakları üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Birçok uzman, sabit parçaların kullanıldığı, ozon tabakasına zarar veren gazların kullanılmadığı ve bugünün kompresörlerinin yerini alabilecek bir sistemle; hem elektrik akımını hem de bu akımı malzemeler arasından geçerken sistemin sıcaklığını değiştirebilecek daha uygun termoelektrik malzemelerin üretimi için çalışmalarını sürdürüyorlar.

Klasik buzdolaplarının çalışmasına benzer bir stratejiyi termoelektrik buzdolaplarının izlediğini ve ısının dışarıya verilmeyip bunun yerine termoelektrik cihazın genişleyip elektronlara basınç yaptığı ifade edilmiştir. Termoelektrik soğutucuların her bir birimi malzemenin iki formundan meydana gelmiştir ve iki bölümü kapsar.

Biri elektronca zenginken diğeri elektronca fakirdir. Bölümler arasında bağıntı yerleri vardır ve sonlarında bağlanırlar. Olay bağlantı noktalarında gerçekleşir. Sistemden akım geçirildiğinde elektronlar, farklı elektron konsantrasyonlarına sahip materyaller arasında hareket ederken genleşme ve basınç oluşur [5].

Bizmut tellür pratik olarak kullanılmasına rağmen yinede 1960'ların ortalarına kadar önemli gelişmeler kaydedilmemiştir. Bu sebepten dolayı laboratuvar çalışmaları azaltılmıştır. Birçoğu termoelektriğin boş umutlarla şişirildiğini söylemiştir. Uzunca bir süre araştırmacıları teşvik edici bir hamle yapılamamıştır ve termoelektrik ile ilgili araştırmalar da otuz yıl boyunca bir durgunluk yaşamıştır.

Yeni elektrik üretim kaynakları ile beraber termoelektrik jeneratörlerin dizaynı ile oluşan sorunlar üzerinde araştırmalar devam etmektedir. Ayrıca son zamanlarda termoelektrik soğutucular üzerindeki çalışmalar bilim araştırma merkezlerinde ve üniversitelerde genişleyerek artmaktadır.

Yeni elektrik üretim kaynaklarının bulunması ve termoelektrik soğutucular üretimi için gerekli olan yarı iletken termoelektrik jeneratörlerin özelliklerinin iyileştirme ve geliştirme çalışmaları hız kazanmıştır. Bu alandaki araştırmalar jeneratörlerin iş kapasitesi ve maliyet üzerine yoğunlaşmıştır. Bundan başka termoelektrik malzemeler birçok cihaz ve düzeneklerde kullanılmaktadır. Bu malzemeler arasında, basit yarı iletkenlerle beraber, karmaşık katı

Çözeltilerin üretiminde yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve özelliklerinin iyileştirilmesi önem kazanmaktadır.

Bu problemleri çözmek için katı çözeltilerden, termoelement olarak kullanılacak yüksek kaliteli yarı iletken alaşımlar üretilmektedir. Termoelementlerin üretimi ile termoelektrojeneratör ve soğutma teknolojilerinin gelişmesi için önemli bir adım atılmıştır [5].

2.TERMOELEKTRİK DÖNÜŞTÜRÜCÜLERE GENEL BAKIŞ

Yarı iletkenler elektriksel iletkenlik açısından iletkenlerle yalıtkanlar arasında bulunurlar. Yarı iletkenler periyodik cetvelde 3. ve 5. gruba girerler. Bu demektir ki son yörüngelerinde elektron alıcılığı veya vericiliği iletkenlerden az, yarı iletkenlerden fazla olmalıdır. İletkenler; Pt, Ni, Au, Cu, Al, Fe gibi elementlerdir. Yalıtkanlar; Ebonit, Cam, Tahta, Su , yarı iletkenler; S, Ge, Br, In ve benzerleridir.

Yeryüzündeki bütün maddeler, atomlardan oluşmuştur. Atom ise ortada bir çekirdek ve bunun etrafındaki değişik yörüngelerde hareket eden elektronlardan oluşmaktadır. Elektronlar, negatif elektrik yüküne sahiptirler. Bir etkiye yolu ile atomdan ayrılan elektronların bir devre içerisindeki hareketi, elektrik akımını oluşturur. Elektronların her madde içerisindeki hareketi aynı değildir. Elektron hareketine göre maddeler; iletkenler, yalıtkanlar ve yarı iletkenler olarak üçe ayrılır.

İletkenler; elektrik akımını iyi iletirler, atomların dış yörüngesindeki elektronlar çekirdeğe zayıf olarak bağlıdır. Isı, ışık ve elektriksel etki altında kolaylıkla çekirdekten ayrılırlar. Metaller, sıvılara ve gazlara göre daha iyi iletkenlerdir. Metaller de, iyi iletken ve kötü iletken olarak kendi aralarında gruplara ayrılırlar. Atomları 1 valans elektronlu olan metaller, iyi iletkenlerdir. Buna örnek olarak, altın, gümüş, bakır gösterilebilir. Bakır tam saf olarak elde edilmediğinden, altın ve gümüşe göre biraz daha kötü iletken olmasına rağmen, ucuz ve bol olduğundan, en çok kullanılan metaldir. Atomlarında 2 ve 3 valans elektronu olan demir (2 dış elektronlu) ve alüminyum (3 dış elektronlu) iyi birer iletken olmamasına rağmen, ucuz ve bol olduğu için geçmiş yıllar da kablo olarak kullanılmıştır.

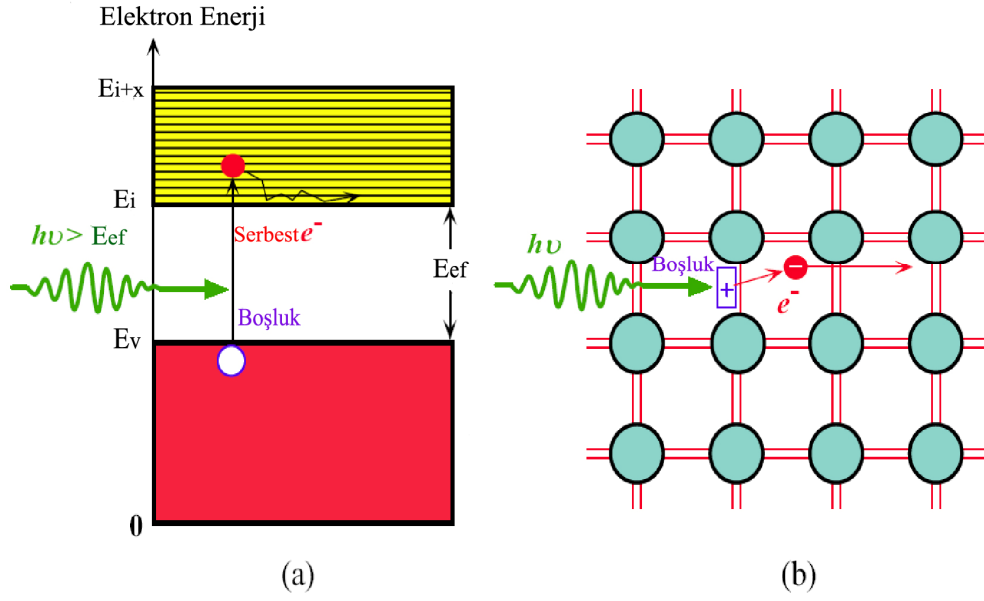
Yalıtkanlar; elektrik akımını iletmeyen maddelerdir. Bunlara örnek olarak cam, mika, kağıt, kauçuk, lastik ve plastik maddeler gösterilebilir. Elektronları atomlarına sıkı olarak bağlıdır. Bu maddelerin dış yörüngedeki elektron sayıları 8 ve 8 'e yakın sayıda olduğundan çekirdekten uzaklaştırılmaları zor olmaktadır.

Yarı iletkenler; iletkenlik bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasında yer alırlar, normal halde yalıtkanlardır, ancak ısı, ışık ve manyetik etki altında bırakıldığında veya gerilim uygulandığında bir miktar valans elektronu serbest hale geçer, yani iletkenlik özelliği kazanırlar. Bu şekilde iletkenlik özelliği kazanması geçici olup, dış etki kalkınca elektronlar

tekrar atomlarına dönerler. Tabiatta basit eleman halinde bulunduğu gibi laboratuarda 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, yukarıda belirtildiği üzere; ısı, ışık etkisi ve gerilim uygulanması ile belirli oranda iletken hale geçirilerek ve içlerine bazı özel maddeler katılarak ta iletkenlikleri arttırılmaktadır. Katkı maddeleriyle iletkenlikleri arttırılan yarı iletkenlerin elektronikte ayrı bir yeri vardır. Bunun nedeni elektronik devre elemanlarının üretiminde kullanılmalarıdır [7] .

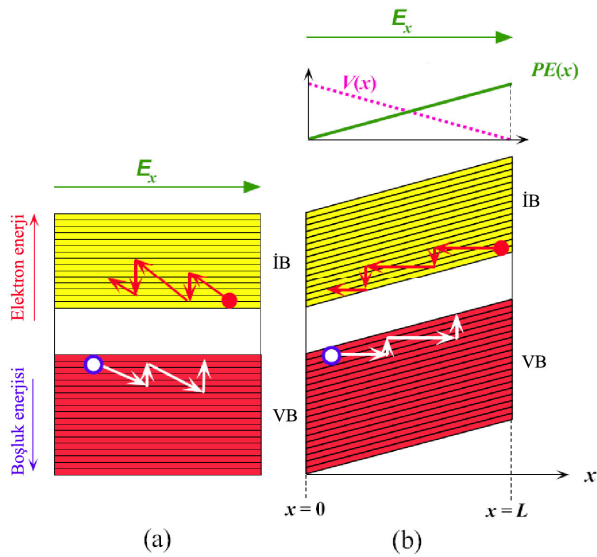
2.1 Termoelektrik Dönüştürücülerin Yapısı

Modern katılar teorisi kullanılarak yarı iletkenler; saf yapıda olduklarında ve mutlak sıfır derecesinde valans bandı valans elektronları ile dolu olup iletkenlik bantları boş olacak şekilde tanımlanmışlardır. Dış etmenler ile kristal yapıdaki kovalent bağların kırılması ile elektron boşluk çiftleri oluşturulur. Oluşan bu elektron boşluk çiftleri yarı iletkenler için iletimi sağlayan yapıları oluşturur. Bu iki farklı taşıyıcı birbirlerinden E_{ef} enerji farkı ile birbirlerinden ayrılmıştır. Elektronlar iletkenlik bandında iletimi sağlarken boşluklar valans bantlarında iletimi sağlarlar. Şekil 2.1 foton yarı iletken içinde bir bağı uyarılmış ve taşıdığı enerji E_{ef} den büyük olacak şekilde enerjiyi elektrona transfer ettiğinden elektron valans bandından iletkenlik bandına taşınmış ve geride pozitif yüklü bir boşluk bırakmıştır. Birbirlerinden bağımsız olarak hareket eden bu taşıyıcı yapılar bağlar arasındaki titreşmeyi azaltacak yönde bir dış etmene maruz bırakıldığında elektron boşluk çifti tekrar birleşecek ve bu birleşme sonucu ısı açığa çıkacaktır. Bu birleşme bazı yarı iletkenlerde dışarı foton salınımına da neden olabilir [1].



Şekil 2.1. Bir fotonun kristal yapı içindeki elektronu uyarması sonucu oluşan elektron-boşluk çifti [1,8].

Yarı iletkenin uçları arasında potansiyel fark uygulanması ile iletkenlik bandında elektronlar uygulanan alanın tersi yönde ilerlerken boşluklar aynı yönde ilerler. Şekil 2.2’de elektron ve boşlukların elektriksel potansiyel altında enerji bantlarında yaptıkları hareketler gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Elektron-boşluk çiftinin elektrik alan içindeki davranışı [1,8].

Elektronların ve boşlukların elektrik alan içerisinde oluşturduğu akım yoğunluğu ifade 2.1'de verilmiştir.

$$J = env de + epv db \quad (2.1)$$

Bu ifadede n iletkenlik bandındaki elektron konsantrasyonunu, p valans bandındaki boşluk konsantrasyonunu, vde ve vdb sırasıyla elektron ve boşluğun sürüklenme hızını göstermektedir. Elektronların ve boşlukların sürüklenme hızları ifade 2.2'de verilmiştir.

$$v de = \mu e Ex \text{ ve } v db = \mu b Ex \quad (2.2)$$

Sürüklenme mobilitesi olarak elektron ve boşluk için μe ve μb şeklinde tanımlanır. Kristal yapı içerisinde dolaşan elektronların yapı içindeki iyonlardan da etkileneceği düşünüldüğünde elektronun kütlesi $m e^*$ olarak belirlenir. Buradan elektronun iletkenlik bandındaki sürüklenme mobilitesi ifade 2.3'deki gibi tanımlanır.

$$\mu e = \frac{eTb}{m e^*} \quad (2.3)$$

Aynı düşünceyi boşluklar için uygulayabiliriz. Kütlelerin ivmelenmeyi zorlaştırıcı bir etmen olduğu düşünüldüğünde boşluğun da bir kütlelerinin olduğu yorumu yapılabilir. Boşluğun ivmelenmesi demek elektronun bağlar arasında tünelleme yapması demektir ve buradan boşluk için sürüklenme mobilitesi ifade 2.4 deki gibi tanımlanır.

$$\mu b = \frac{eTb}{m b^*} \quad (2.4)$$

Buradan yarı iletkenler için iletkenlik 2.5 deki gibi tanımlanır.

$$\sigma = en\mu e + ep\mu b \quad (2.5)$$

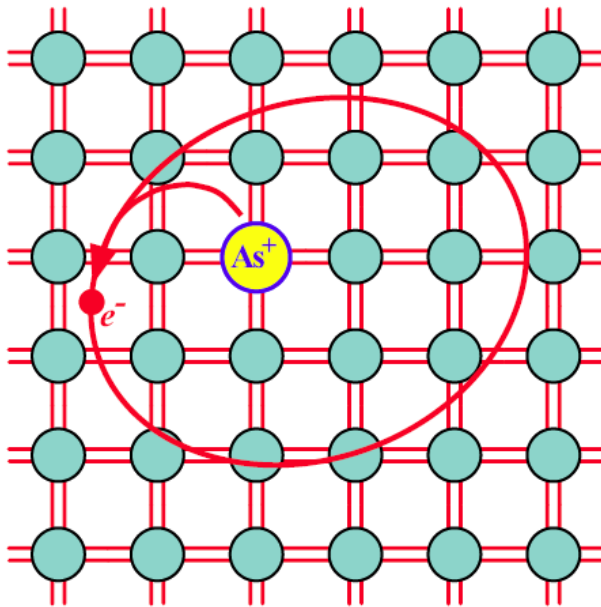
İfadedeki n ve p elektron ve boşluk konsantrasyonunu temsil etmektedir [1].

2.2 Termoelektrik Dönüştürücülerde Kullanılan Malzemeler

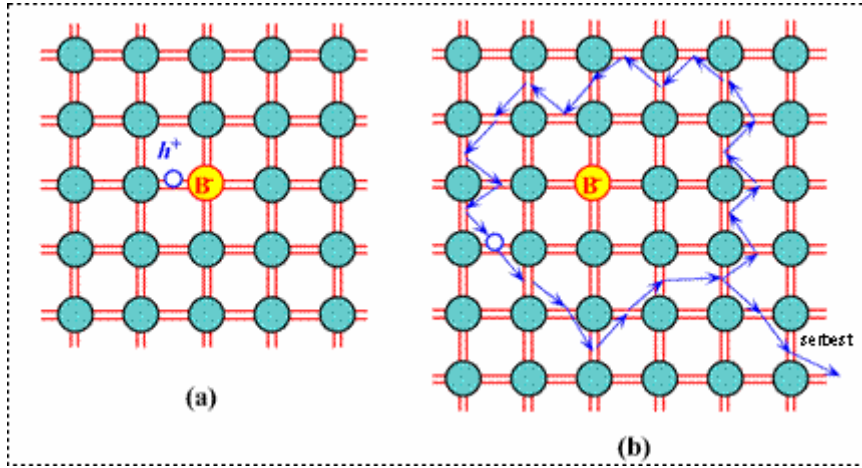
Yarı iletkenler yapılarına eklenen maddelerde tek bir polarite gösterecek şekilde imal edilebilirler. Bu yarı iletkenler n ve p tipi olmak üzere ikiye ayrılır ve yapıdaki elektron veya boşluk fazlalığı yarı iletkenin tipini belirler.

2.2.1 n-Tipi Yarı İletken Malzemeler

Periyodik cetvelin 5'inci grubunda bulunan As, P, Sb gibi metallerin Si yapıya eklenmesi ile oluşurlar. Silisli yapıya Arsenik eklemesi yapılacağını düşünürsek; Arsenik 5 valans elektrona sahiptir ve Silisyumun 4 valans elektronu vardır. Arsenik Silisyumun 4 elektronu ile bağ yaptıktan sonra bir valans elektronu dışarıda kalır. Bağ yapamayan bu valans elektronu As etrafındaki bir yörüngede dolaşır ve gerekli enerjinin verilmesi ile iletkenlik bandına geçiş yapar. Sistem bu fazlalık elektron nedeniyle n tipi yarı iletken olarak tanımlanır. Bu proses serbest dolaşan bir elektron fakat hareketsiz bir As^+ iyonu yaratır. Arseniğin iletkenlik bandına elektron vermesinden dolayı da Arsenik atomuna bağışlayıcı atom denilir. Şekil 2.3'de Arsenik atomunun latis yapı içerisindeki konumu gösterilmiştir.



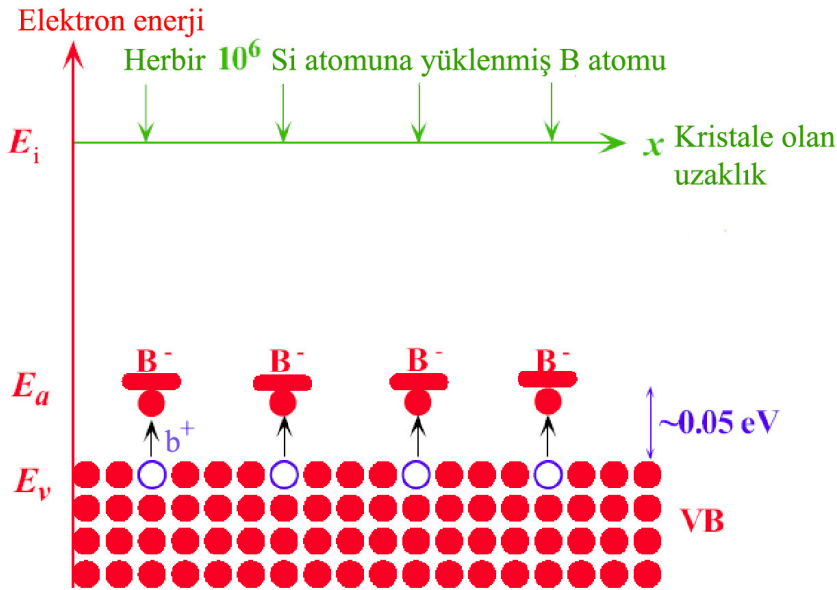
Şekil 2.3. Arsenik atomunun Si ile yaptığı bağ ve serbest elektronun yörüngedeki hareketi [8].



Şekil 2.5. (a) Bor atomunun bağdaki bir atomu yutması sonucu oluşan boşluk[1,8].

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

Şekil 2.6'da gösterildiği gibi B eklenmiş bir yarı iletkenin iyonizasyonu ile valans bandında boşluğun dolaşabilmesi için 0.05 eV kadar bir enerjiye gereksinim duyulmaktadır. Ortalama olarak oda koşulları atomların titreşmesini sağlayacak 0.07 eV termal enerjiyi sağlayabilmektedir[1].



Şekil 2.6 Si yapıya 1ppm B eklenmiş p tipi bir yarı iletkenin enerji bant diyagramı[1,8].

3.TERMoeLEKTRİK OLAY

Termoelektriğin tarihi ve termoelektrik yapıların temelleri 1821 yılında Alman fizikçi Thomas Johann Seebeck tarafından atılmıştır. Seebeck iki farklı metalin uçları arasında sıcaklık farkı oluşturulduğunda pusula iğnesinin saptığını keşfetmiştir. Seebeck etkisi olarak bilinen ve Seebeck'in ölümünden sonra gerçek anlamıyla tanımlanan bu etki sıcaklık farkı ile yaratılan elektriksel potansiyel sonucunda oluşan devreye bağlanan bir yük direncinden akım akmasıyla sonuçlanmaktadır [1].

Bu buluştan on üç yıl sonra Fransız fizikçi Jean Charles Athanase Peltier tarafından Peltier etkisi bulunmuştur. Peltier iki farklı iletkenin ara yüzeyinden akım geçirilmesi sırasında ısının ya absorblandığını veya dışarı verildiğini bulmuştur. Son olarak William Thomson (Lord Kelvin) tarafından bu iki etki termodinamik yasaları çerçevesinde incelenip bütünleştirilmiştir. Thomson kendi adıyla yayınladığı bu etkiyi şu şekilde tanımlamıştır; iki farklı iletken hem ısıtılıp hem de üzerlerinden akım akması sağlandığında, bütün yapı boyunca ısı ya absorblanır veya dışarı verilir[1,8].

Termoelektrik malzemelerin önemli teorik ifadeleri Edmund Altenkirch tarafından ortaya konmuştur. Altenkirch iyi bir termoelektrik malzemenin karakteristiğini belirlerken Seebeck katsayısı ve elektriksel iletkenliği yüksek, fakat termal iletkenliğin kötü olması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu yaklaşımlar termoelektrik yapıların daha iyi açıklanmasına imkan veren *figure of merit (Z)* parametresinin tanımlanmasını sağlamıştır. Yarı iletken malzemelerin gelişimleri ile verimleri %5-6 seviyesine çıkan termoelektrik yapıların gelişimi hızla devam etmektedir. Kuantum kuyu biçiminde yapılandırılmış malzemelerle verimler bugün laboratuvar ölçeğinde %20 değerlerine ulaşmıştır [1,8].

Termoelektrik materyallerde ısıyı materyalin bir tarafından diğer tarafına iletebilen taşıyıcı yük akışı mevcuttur. Termoelektrik materyaller üzerine ilk uygulamalar sıcaklığa duyarlılığı dolayısıyla ısıl çiftlerdir. Isıl çiftler iki farklı metalin basitçe bağlanmış şeklidir. İki farklı metalden oluşan kapalı bir devrede birleşme noktaları farklı sıcaklıklarda bulunursa, bu yüzeyler arasında Joule etkisi, Fourier etkisi, Seebeck etkisi, Peltier etkisi ve Thomson etkisi geçerli olur[9].

Bir materyalin termoelektrik uygulamalar için uygun materyal olabileceğini Z değişkeni belirler. Termoelektrik materyali karakterize eden Z parametresi; termoelektromotor kuvveti sabitine α (Seebeck katsayısına V/ °C), elektroiletkenliğine σ (ölçülebilir nicelik olan elektriksel iletkenliğe yani öziletkenliğine (1/ Ω) x cm)) ve ısı iletkenliğine λ (veya H, W x cm /°C) bağlıdır[5,10].

$$Z = \frac{\alpha^2 \times \sigma}{\lambda} \quad (3.1)$$

Üç parametre (α, σ ve λ) elektrik yük konsantrasyonu, pozitif kütle m^+ miktarı ve dağılım mekanizmasının bir fonksiyonu olarak termoelementlerin özelliklerini ortaya çıkarmaktadır[10]. Birimler yerine konduğunda Z parametresinin birimi 1/°C olarak bulunur. Her sıcaklıkta optimum elektrik yük konsantrasyonuna göre bir Z_{max} değeri bulunur. Kristal yapıya nötr karışımlar ilave edilerek λ değeri küçültülebilir. Böylece Z değeri büyütülebilir.

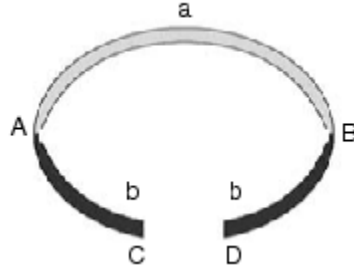
3.1 Termoelektrik Etkiler

Termoelektrik olay, ısı enerjisinin elektrik enerjisine veya elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümüdür. Termoelektrik jeneratörler katı haldeki güç kaynaklarıdır ve bu güç kaynaklarında Seebeck etkisinden yararlanılırken, termoelektrik soğutucular ise katı haldeki ısı pompalarıdır ve burada Peltier etkisinden yararlanılır.

Uygun malzemeyi seçmek ve termoelektrik jeneratör veya Peltier soğutucusunu yapmak için öncelikle genel anlamda termoelektrik etkilerin neler olduğunu anlamak gerekmektedir. İki farklı yarıiletken malzemenin kimyasal yöntemlerle birbirine birleştirilmesi ile oluşturulan bir devreden elektrik akımı geçirilmesiyle yarıiletkenler farklı sıcaklıklara sahip olurlar. Farklı sıcaklıklardaki yarıiletkenlerde, aynı anda çeşitli etkiler oluşmaktadır. Bu etkiler mucitlerin isimleri ile anılır. Bunlar Seebeck, Peltier, Thompson, Joule ve Fourier etkileridir. Bunun için aşağıdaki kesimlerde çeşitli termoelektrik etkiler anlatılmaktadır [5].

3.1.1 Seebeck Etkisi

Seebeck etkisi; iki farklı metalin uçları arasında oluşturulan sıcaklık farkının oluşturduğu elektriksel potansiyel fark olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.1’de gösterilen a ve b iletkenleri ile termal yönden paralel ve elektriksel yönden seri bir devre oluşturulur.



Şekil 3.1. Basit termik çift devresi

Oluşturulan bu devre üzerinde A ve B bağlantı noktalarında T1 ve T2 sıcaklık farkları yaratılırsa, C ve D açık uçlarında V elektriksel potansiyel farkı meydana gelecektir. Oluşan bu gerilimin değeri;

$$V_0 = \alpha_{ab} (T_1 - T_2) \quad (3.2)$$

şeklinde belirlenir ve bu ifadede;

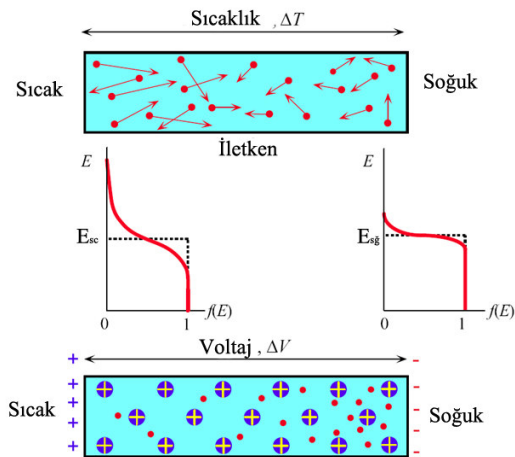
$$\alpha_{ab} = V_0 / \Delta T \quad (3.3)$$

Seebeck katsayısı olarak tanımlanır. Seebeck katsayısı termal emk şeklinde tanımlanabildiği gibi α yerine S şeklinde gösterimleri de bulunmaktadır. Birim olarak V/K veya daha yaygın olarak $\mu\text{V/K}$ olarak ifade edilebilir. Çizelge 3.1’de değişik metaller için Seebeck katsayısının nasıl değiştiği gösterilmektedir. Seebeck katsayılarını gösteren Çizelge 3.1 Platin metali referans alınarak oluşturulmuştur [1].

Çizelge 3.1. Farklı Metaller İçin Seebeck Katsayıları

Metaller	Seebeck Katsayıları ($\mu\text{V} / \text{K}$)
Antimon	47
Nikrom	25
Molibden	10
Kadmiyum	7,5
Tungsten	7,5
Altın	6,5
Gümüş	6,5
Bakır	6,5
Rodyum	6
Alüminyum	3,5
Karbon	3
Cıva	0,6
Platin	0
Sodyum	-2
Potasyum	-9
Nikel	-15

İletken bir çubuk olarak alüminyum ele alınıp bir ucundan ısıtılırsa Şekil 3.2’de gösterildiği gibi sıcak uçtaki elektronların kinetik enerjileri fazla olduğundan soğuk bölgedekine göre daha hızlı hareket edeceklerdir. Genelde net elektron difüzyonu sıcak taraftan soğuk tarafa olacak ve belirli bir süre sonunda geride pozitif iyonları bırakarak elektronlar soğuk tarafta kümeleneyecektir. Isı serbest elektronlar sayesinde sıcak bölgeden soğuk bölgeye taşınırken bir yandan da potansiyel fark oluşacaktır [1].



Şekil 3.2. Alüminyum çubuktaki sıcaklık değişimi ile oluşan elektron hareketleri- Elektron hareketi sonrası alüminyum çubuğun yük dağılımı

Şekil 3.2' de gösterildiği gibi alüminyum bir çubuğun ısıtıldığını diğer ucunun soğutulduğu varsayılırsa sıcak bölgedeki elektronlar daha hareketlidir ve soğuk bölgedeki elektronlara göre daha yüksek hıza sahiptirler. Bu nedenle elektronlar, arkasında pozitif metal iyonları açığa çıkararak sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru hareket ederler ve soğuk bölgede bir negatif yük yoğunluğu oluştururlar. Bu durum Şekil 3.2'de gösterilmiştir[11,12]. Elektron devinimi sıcak bölgedeki pozitif metal iyonları ve soğuk bölgedeki artık elektronlar arasında bir elektrik alan oluşturur. Oluşan elektrik alan yeterli büyüklüğe ulaştıkça elektron devinimini engeller. Böylece sıcak bölge ile soğuk bölge arasında bir potansiyel fark oluşur. ΔT sıcaklık farkına bağlı olarak metalin bir kısmında meydana gelen ΔV potansiyel farkına Seebeck etkisi denir. Bu etkinin büyüklüğünü ölçmek için her birim sıcaklık değişiminde oluşan potansiyel farka göre belirlenen özel bir sabit tanımlanıp [12,13].

$$S = \frac{dV}{dT} \quad (3.4)$$

bağıntısı elde edilir burada S 'nin işaretini sıcak bölgeye göre soğuk bölgenin potansiyel durumu belirler. Elektronlar sıcak bölgeden soğuk bölgeye difüze olursa soğuk bölge sıcak bölgeye göre negatif olacaktır. Böylece Seebeck katsayısı negatif olacaktır. Diğer taraftan p tipi bir yarıiletkende boşluklar sıcak bölgeden soğuk bölgeye difüze olabilir. Bu durum S 'yi pozitif bir nicelik yapacaktır[11,12].

Seebeck katsayısı S , genellikle α ile gösterilir. Bu katsayıya Seebeck adının verilmesinin sebebi 1821 yılında Thomas Johann Seebeck tarafından bulunmasıdır. Seebeck iki farklı metal kullanarak oluşturduğu elektrik devresinde, bu metallerin farklı sıcaklıklarda olması durumunda elektrik akımı ürettiğini gözlemlemiştir[5,13,14]. Seebeck önce farklı sıcaklıklardaki metallerin manyetik alan oluşturduğuna ve bu manyetik alanında bir akım ortaya çıkardığına inanmıştır. Ancak indükleme ile oluşan elektrik akımının magnetler tarafından Amper yasasına uygun bir şekilde oluşturulduğu düşünüldüğünde, sıcaklık farkı ile manyetik alan arasında Amper yasasına uygun bir bağıntı olmadığı açıktır [5,11]. Daha sonra metaller arasındaki sıcaklık farkının bu metaller arasında bir elektriksel gerilim farkı oluşturduğu ve bu elektriksel gerilim farkının da devrede akım oluşturduğu anlaşılmıştır.

Seebeck Şekil 3.3'teki gibi bir metalin iki ucuna farklı bir metalin parçalarını tutturarak birleşme noktalarından birinin sıcaklığını başlangıç noktasında tutarken diğer birleşme

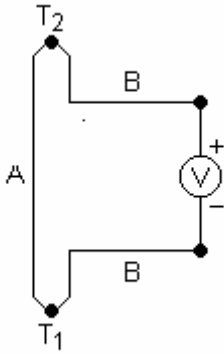
noktasının sıcaklığını arttırmıştır. Seebeck, açık devre gerilimini ölçülmüş ısı çifti sıcaklıkla yaklaşık doğru orantılı bir potansiyel farkının oluştuğunu tespit etmiştir. Birim sıcaklık artışına bağlı olan potansiyel fark oluşumunu α katsayısı ile tanımlamıştır [5,11,14,15].

$$\alpha_{AB} = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (3.5)$$

Bu ifadede ΔT iki nokta arası sıcaklık farkı yani $\Delta T = T_2 - T_1$ değerine eşittir. α_{AB} ise bağlı Seebeck katsayısıdır. Yani iki metalin Seebeck katsayıları farkıdır.

$$\alpha = \alpha_A - \alpha_B \quad [11].$$

Oluşum mekanizması Şekil 3.3'de görülmektedir.



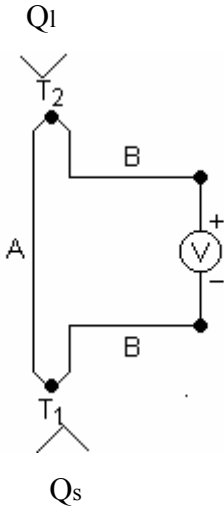
Şekil 3.3. Seebeck etkisinin görüldüğü ısı çifti

Seebeck etkisi, sıcaklık ölçmek için kullanılan ısı çiftlerinin yani termoçiftlerin ve termoelektrik güç jeneratörlerinin temelini oluşturur. Seebeck katsayısının büyüklüğü ve işareti bir termoelektrik düzeneğindeki tüm eklem bölgelerinin sıcaklık farklarına, kullanılan iletkenlerin ve yarıiletkenlerin türüne, yarıiletkenlerin yaptığı bileşiklerine ve saflık derecesine bağlıdır [11].

3.1.2 Peltier Etkisi

A ve B metallerinin iki ayrı uçtan Şekil 3.4'deki gibi birbirine tutturulması ile oluşturulmuş kapalı devreden geçen I akımı, devredeki eklem uçlarından birim zamanda bir miktar ısı soğutulmasına ya da açığa çıkmasına neden olur[5,11,14,15].

Eğer Şekil 3.4'deki gibi termoçift devresinden bir akım geçerse, bir eklem noktasından ötekine ısı transferi sağlayacak şekilde bir ucun sıcaklığı düşerken ötekisinin sıcaklığı yükselir. V gerilimi uygulanırsa devreden I akımı geçmeye başlar. Bu akımın akışı sonucunda, soğutma etkisi Q_s ısının soğrulduğu ısıl çift bağlantısı T_1 ' de oluşur ve ısıtma etkisi ise Q_1 ısının dışarıya atıldığı bağlantı T_2 ' de oluşur. Bu etki tersinirdir. Yani elektrik akım yönü değiştirildiğinde ısı akışının yönü de değişecektir. Karşılıklı olarak soğurulan, açığa çıkarılan bu ısı enerjisine Peltier ısısı, bu etkiye de Peltier etkisi denir[16,17].



Şekil 3.4. Peltier etkisinin görüldüğü ısıl çift

Birim zamanda üretilen Peltier ısısı devreden geçen I akımını ile doğru orantılıdır ve aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$Q_p = \pi_{XY} \times I \quad (3.6)$$

Bu ifadede Q_p (W) Peltier ısısını, π_{XY} (V) X ve Y metallerinin bağlı Peltier katsayısını, I (A) ise devreden geçen akımı göstermektedir. Ayrıca π_{XY} ifadesi iki metalin Peltier katsayıları farkıdır.

$$\pi_{XY} = \pi_X - \pi_Y \quad [11]$$

(3.7)

İletken malzemenin bir parçasında Seebeck etkisi oluşurken, Peltier etkisi iki farklı iletken iki eklem ile tutturulursa oluşur; çünkü iki malzemenin fermi seviyeleri arasında fark oluşur. Peltier etkisinin görülmesi için elektronik yük taşıyıcılarının farklı Fermi seviyelerinde dolaşarak, hem enerji boşalması hem de ilerlediği termoelektrik malzemenin örgü enerjisinden yararlanarak kaybettiği enerjiyi geri alması olayı gerçekleşmelidir. Ancak bu şekilde ısı enerjisi bir noktadan diğer bir noktaya elektronik yük taşıyıcıları ile taşınabilir. Bu olay aynen Seebeck etkisindeki gibi ısınan eklemden soğuyan ekle elektron akışını engelleyecek bir elektrik alan oluşana kadar devam eder[11].

1834 yılında Fransız fizikçi Jean Charles Athanasa Peltier tarafından bulunan Peltier etki, Seebeck etkisinin tam tersi olan bir etkidir. Farklı metallere oluşturulan bir elektrik devresinde bu metallere farklı gerilimlerde iseler biri sıcak diğeri soğuk olacaktır. 1838 de Lenz bu olayın akımın yönüne bağlı olduğunu gösterdi. Bu durum, yarıiletken içinde ısıyı taşıyacak olan parçacıkların dışarıdan uygulanan sıcaklıktan etkilenerek yer değiştirmeleri yerine dışarıdan yarıiletken uçlarına uygulanan gerilim farkı ile ısı taşıyıcı parçacıkların yer değiştirmesi sağlanır. Böylece ısı yarıiletkenin bir ucundan diğeri ucuna aktarılmış olur. Bu ısı aktarımının hızı kullanılan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Yani p ve n tipli yarı iletkenlerin seri olarak birleştirilmesi ve bu devre üzerinden doğru akım geçtiğinde, yarıiletkenin bir ucundan ısı soğururken, diğeri ucundan ısı açığa çıkar. Açığa çıkan ısı miktarı, devreden geçirilen doğru akımla doğru orantılı olup, aşağıda verilen denklem ile hesaplanır [5]:

$$Q_P = \Pi I$$

(3.8)

Q_P : Birim zamanda transfer edilen ısı miktarı (Watt),

I : Devre üzerinden geçen doğru akım (Amper),

Π : Peltier sabiti (Volt)

Yukarıdaki denklem;

$$Q_P = \alpha T I$$

(3.9)

şeklinde de yazılabilir.

$$\Pi = \alpha T$$

α : Seebeck katsayısı (Volt/°C)

T : Sıcaklık (Kelvin) şeklindedir.

Termoelektrik soğutucuda, ısıyı transfer edebilmek için elektronların enerji seviyelerindeki değişiminden yararlanır. Bu ısı transferi, sistemin bir ısı pompası gibi davrandığını göstermektedir. Elektronlar, farklı iki yarıiletken malzemenin birleşme noktasından birinden diğerine geçerken, yarıiletkenlerin bir tarafları ısı enerjisini soğurucu diğer tarafında ise ısı enerjisini yayıcı bir şekilde davranmaktadır. Akım, düşük enerji seviyesine sahip p-tipi yarıiletkenden yüksek enerji seviyesine sahip n-tipi yarı iletkene doğru akarken, akım taşıyıcısı elektronlar soğuk yüzeyden aldıkları ısı enerjisini sıcak yüzeyde terk etmektedir. Yarıiletkene dışarıdan verilen elektriksel güç ile elektronların sistem içinde yani yarıiletkenler arasında hareket etmeleri için gerekli enerji sağlanmış olur. Böylece hareketlenen elektronlar değişen enerji düzeyleri arasında ilerlerken ısı enerjisini de transfer etmekte, başka bir deyişle ısı taşımaktadır [5].

Peltier etkisi yeni nesil termoelektrik soğutma sistemlerinin temelini oluşturmaktadır. Peltier katsayısının büyüklüğü ve işareti bir termoelektrik düzeneğindeki tüm eklem bölgelerinin sıcaklık farklarına ve kullanılan iletkenlerin ve yarıiletkenlerin türüne yaptığı bileşiklerine ve saflık derecelerine bağlıdır[11].

3.1.3 Thomson Etkisi

Bir sıcaklık gradyeni olan bir akım, telin içinde bir taraftan öbür tarafa geçerken, sıcaklık orijinal sıcaklık dağılımını devam ettirmek için çevre ile birlikte değişmek zorundadır. Yani akım taşıyan bir iletkenin herhangi iki noktası arasında bir sıcaklık farkı varsa, akım yönüne göre iletkende Joule ısısına ek olarak Thomson ısısı açığa çıkmaktadır. Thomson ısısının matematiksel ifadesi Eşitlik (3.10)'daki gibidir[5].

$$Q_T = I \times \tau \times \Delta T \quad (3.10)$$

Burada Q_T birim zamanda ortaya çıkan Thomson ısısı, I iletkenin geçen akımı, τ Thomson katsayısı ve ΔT iletkenin uç noktaları arasındaki sıcaklık farkıdır.

William Thomson iki farklı iletkenle kurulmuş bir devrede her iletken için, birim alandaki ısı akısı değişiminin, birim alan sıcaklığı, iletkenlerden geçen akım ve Thomson katsayısı ile ilişkili olduğunu bulmuştur[13].

$$\frac{dQ}{dS} = \tau_{xy} \times I \times \frac{dT}{dS} \quad (3.11)$$

(3.11) eşitliğinin integralini alarak (3.10) eşitliği bulunur. William Thomson tarafından ortaya atılan bu hipotez daha sonra 1876 yılında Leru tarafından kanıtlanmıştır. Leru ve Thomson bu yayınımlarını 'iletkenin sıcaklık gradyeni ortadan kaldırma isteği' olarak tanımlamıştır. Isı hem elektrik akımına hem de sıcaklık gradyentine bağlıdır[11].

3.1.4 Kelvin İlişkileri

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

$$\alpha_{ab} = \frac{dT}{dx} \quad (3.12)$$

$$\frac{d\alpha_{ab}}{dT} = \frac{\beta_a - \beta_b}{T} \quad (3.13)$$

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

3.2 Termoelektrik Dönüştürücülerde Kullanılan Malzemeler, Termoelementlerin Enerji Ve Isı Prosesleri

Enerji ve ısıtma proseslerinde kullanılan termoelektrik malzemeler, soğutma proseslerinde de çalışma düzeneği Peltier yöntemi üzerine kurulmuştur. Seebeck ve Thompson termoelektrik soğutma yöntemleriyle benzerlik göstererek, elektrik ve ısı enerjisinin dönüşümü üzerine kurulmuştur.

$$Q_{\pi} = \pi \cdot I \cdot t \quad (3.14)$$

Q_{π} : Peltier ısısı (Volt)

I : Akım (Amper)

t : zaman (sn)

Peltier ısısı (Q_{π}), geçen akım miktarı ve zaman ile doğru orantılıdır, π - Peltier sabiti olup temasta olan malzemelerin özellikleri ve temas sıcaklığına bağlıdır.

Thompson yönteminde ise,

$$Q_T = \tau I (dT/dx) \quad (3.15)$$

$\frac{dT}{dx}$: Sıcaklık gradienti

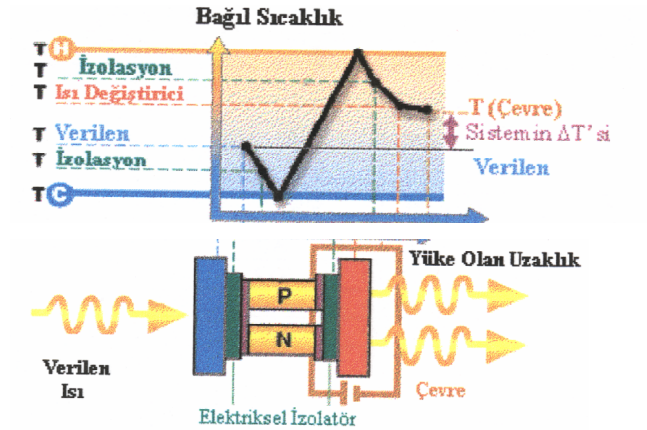
τ : Thompson katsayısı

I : Akım

İletken malzemenin Thompson ısısı Q_T , T sabiti elektrik akımının yönü ve sıcaklık gradienti ile doğru orantılıdır. Yukarıda sözü edilen üç termoelektrik yöntem (Seebeck, Peltier, Thompson) birbirine bağlı oldukları termodinamik kanunlarla da desteklenmektedir. Termoelektrik prosesleri genellikle geri döngülü olarak ortaya çıkar. Bazen ise ısı ileten ve ısı açığa çıkaran geri döngüsüz prosesler de oluşmaktadır. Son zamanlarda Peltier yöntemine göre, iletken metallerin yarıiletken n ve p tipi metallerin teması ile oluşan termoelektrik soğutmalı düzenekler kullanılmaktadır.

3.3 Termoelementlerde Oluşan Enerji Prosesleri

Elektrik enerjisinin soğutma enerjisine dönüşümünü sağlayan termoelementler **n** ve **p** iki yarıiletken plakadan oluşmaktadır.



Şekil 3.5. Termoelementi oluşturan kısımlar, [5]

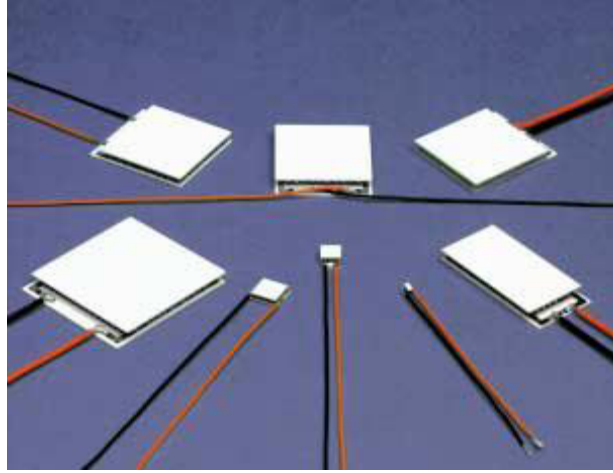
n ve **p** tipi yarıiletken plakaların iki ucu birleştirici iletken metal plakalarla bağlanarak termoelement oluşturulur. Bu termoelemente elektrik akımı verildiğinde (Şekil 3.5), birinci iletken plakadan çıkan elektronlar **n** tipi yarıiletken plakasına geçer, pozitif akım ise **p** tipi yarıiletken plakasına yönelir. Bunun sonucunda 1. iletken plaka soğur. Ters yönde bulunan 2. iletken plaka ise gelen elektron ve pozitif akımdan dolayı ısınır. Isınan 2. iletken plakanın sıcaklığı ortam sıcaklığına yakın, soğutulan 1. metal plakanın sıcaklığı ise oldukça düşük değerlere ulaşmaktadır. Termoelementlerin sıcaklık düşüşü, termoelektrik verim (Z) sabitine bağlı olarak değişmektedir. Kullanılan yarıiletken plakaların elektrik iletkenliği farklılık gösterir.

Sonuçta elektrik akımı ile iki iletken plakada oluşan sıcaklık değişimi Thompson kuralını oluşturur. Her iki elektrik akım taşıyıcıları soğuk uçtan sıcak uca doğru hareket ederek (Thompson) ısı bu plakalar tarafından tutulmaktadır. Termoelementlerin çalışmasında Peltier, Seebeck ve Thompson'ın termoelektrik kuralları yer almaktadır. Termoelektrik elementlerde geri dönüşümsüz proseslerin oluşumu, plakalardan ısı açığa çıkması ve ısının yönlendirilmesi

ayrışması sıcaklığın gradyentine bağlıdır. Bu kurallar termoelektrik plakalardaki sıcaklık dağılımını, soğutma kabiliyetini ve diğer özelliklerini belirlemektedir.

4. TERMOELEKTRİK MODÜLLERİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

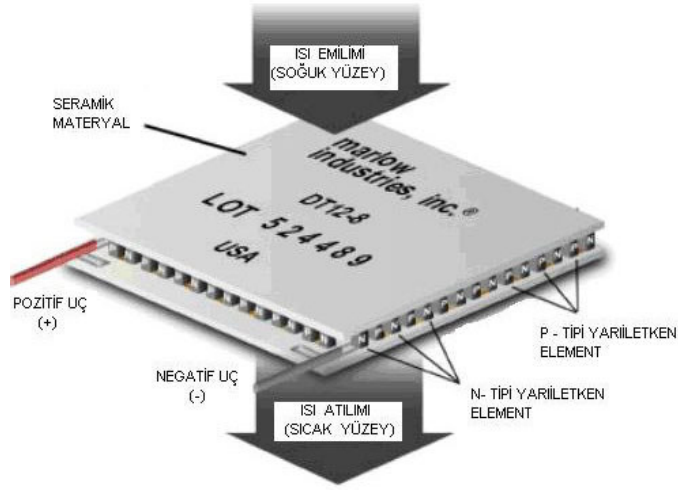
Termoelektrik modüller; TE soğutucu, TE jeneratör veya Peltier diye adlandırılabilir. TE soğutucular, küçük bir ısı pompası gibi çalışan yarıiletkenlerdir. Bir doğru akım kaynağından sağlanan küçük bir voltaj sayesinde, ısı modülü bir ucundan diğerine doğru hareket eder. Böylece modülün bir yüzü ısınırken, diğeri de eş zamanlı olarak soğumaya başlar. Bu olay, doğru akım kaynağının artı ve eksi kutuplarının yer değiştirmesiyle tersine çevrilebilir. Bir termoelektrik modülü, kullanım amacına göre ısıtıcı veya soğutucu olarak kullanılabilir, peltier modüller çeşitli şekillerde ve ölçülerde Şekil 4.1'deki gibi imal edilmektedirler. Çoğu termoelektrik soğutucu modül, yüzey alanı başına 3-6 W/cm²'lik bir pompalama yapabilir [15,18].



Şekil 4.1. Termoelektrik modül şekilleri

Modülün soğuk kısmı maksimum sıcaklık farkına ulaştığında, ısı pompalanması kesilir ve ısı pompası özelliğini kaybeder (verim sıfıra düşer). Bu yüzden -5 °C ile -15 °C arasında kullanımı en verimli olur. Sıcaklık bu noktada en yüksek değeri ΔT 'ye ulaşır. Bu noktada termoelektrik soğutucular, en yüksek ısı pompalama kapasitelerine ulaşırlar. Termoelektrik soğutucular, evlerde kullanılan buzdolaplarıyla aynı termodinamik yasalara göre çalışır, ama bazı farklılıklar taşır. Buzdolabında kullanılan dondurucu gazın yerini, bir yarıiletken alır. Yoğuşturucu da bir ısı transfer elemanıdır. Ayrıca kompresörün yerini de doğru akım kaynağı alır Termoelektrik modüle doğru akım kaynağının bağlanması, Şekil 4.2'de gösterilmiştir, elektronların yarıiletken nesneden geçmesini sağlar. Maddenin soğuk tarafında,

elektron hareketi sayesinde ısı soğurular ve sıcak uca gönderilir. Sıcak olan uca ısı transfer elemanı bağlandığı için, ısı, ısı transfer elemanından çevreye verilir[15,19].



Şekil 4.2 : Termoelektrik modül kesit görünüşü[19]

4.1 Termoelektrik Modülün Uygulamaları

Kullanıma Göre Sınıflanmış Laboratuar Araç ve Gereçleri

a) Ölçüm:

- 1) Çiğ noktası termometresi
- 2) Donma noktası termometresi
- 3) Siyah gövdelerde radyasyon standardı için
- 4) Fototüp (fotoçoğaltıcı) gövdesi
- 5) Yakıtların nemini alan ünite

b) Biyoteknoloji:

- 1) Biyoaktivite monitörlü-kalorimetre
- 2) DNA düzen reaktörü
- 3) Spektrometre hücre termoprogramcısı
- 4) Programlanabilir termal kontrolör

c) Medikal / Tıp:

- 1) Sıcak Soğuk stimülatörü
- 2) Mikroskop safhası soğutucusu
- 3) Portatif mini soğutma kutusu (insilün için)
- 4) Diş dolgusu için soğuk plaka

d) Endüstriyel:

- 1) Yarı iletken cihaz üretimi için Dopant soğutucu
- 2) Yarı iletken cihaz üretimi için silisyum katman soğutma plakası
- 3) Yarı iletken cihaz üretimi için kimyasal sirkülasyon sistemi
- 4) Termoenerjiler yardımıyla ısıdan enerji üretimi

e) Genel Kullanım

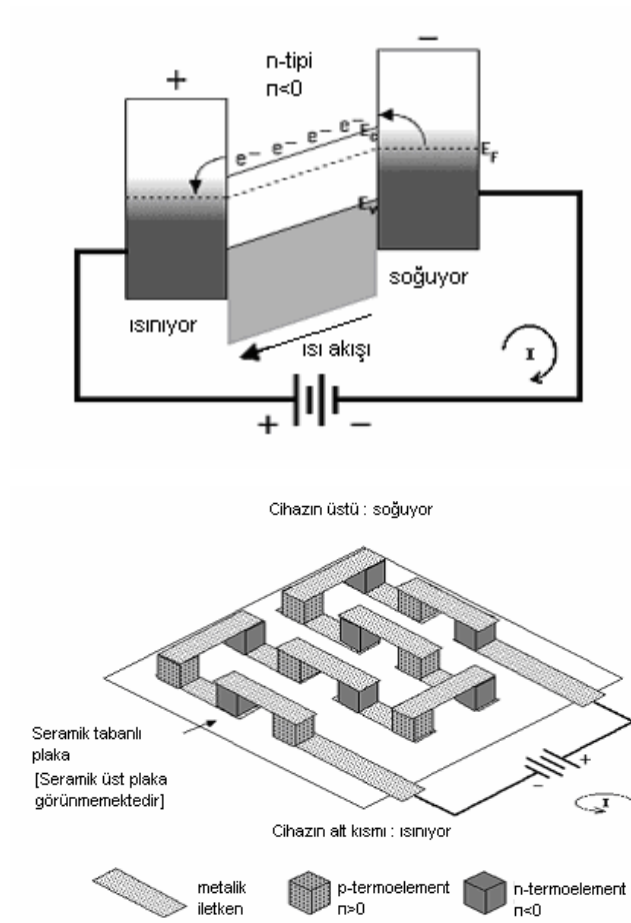
- 1) Vakum pompası akış düzenleyicisi
- 2) Daldırma soğutucusu
- 3) Soğuk plaka
- 4) Sıvı sirkülasyon cihazı

f) Soğutucular

Günümüzde hayatın her alanında ihtiyaç duyulan ve kullanılmakta olan soğutucular temelde bir çevrime göre çalışırlar. Bir soğutma çevriminde kullanılan akışkana soğutucu akışkan denir. En yaygın kullanılan soğutma çevrimi buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimidir ve ana olarak dört elemandan oluşur; kompresör, yoğuşturucu, kısılma vanası ve buharlaştırıcıdır.

Soğutucu akışkan kompresöre buhar olarak girer ve burada yoğuşturucu basıncına sıkıştırılır. Kompresör çıkışında kızgın buhar halinde olan akışkan, yoğuşturucuda çevre ortama ısı vererek soğur ve yoğuşur. Akışkan yoğuşturucudan sonra kılcal borulara girer ve kısılma etkisiyle basıncı ve sıcaklığı büyük ölçüde azalır. Soğutucu akışkan daha sonra buharlaştırıcıda soğutulan ortamdan ısı alarak buharlaşır. Çevrim, buharlaştırıcıdan çıkan akışkanın kompresöre girmesiyle tamamlanır. Evlerde kullanılan buzdolaplarında, soğutucu akışkana ısı geçişinin olduğu dondurucu bölümü buharlaştırıcı görevini görür, buzdolabının arkasındaki borular ise akışkanın mutfaktaki havaya ısı verdiği yoğuşturucudur.

Bunların dışında, özellikle son yıllarda hızlı gelişim gözlendi termoelektrik soğutucular da mevcuttur. Bu tip soğutucular Peltier etkisi esasında çalışırlar. Bu soğutma yönteminde soğutucu akışkan işlevini elektronlar görmektedir ve sistemde pompa, kompresör, yoğuşurucu vb. elemanlar yer almamaktadır. Termoelektrik soğutucular n- (fazla elektronu olan) ve p (eksik elektronu olan) tip yarıiletken malzemelerin bir modülde seri olarak bağlanmalarından oluşurlar[9].



Şekil 4.3. Termomodülün yapısı ve genel görünüşü, [9]

Termoelektrik soğutucuların ısıl verimlilikleri düşüktür ve oldukça pahalıdırlar. Bu nedenle güvenlik ve rahatın ön planda tutulduğu ortamlarda kullanılırlar. Verimlerinin artırılması daha iyi özelliklere sahip yarıiletken malzemelerin üretilmesine bağlıdır[5].

g) Termoeneratörler

Termoeneratörlerin çalışma prensibi ısı makinelerinin çalışma prensibine benzemektedir yalnız burada akışkanın yerini elektronlar almaktadır. Prensibin temeli ise Seebeck etkisine dayanır. Farklı metallere yapılmış iki tel alınıp uçlarından birleştirilirse kapalı bir devre oluşur. Başlangıçta devrede elektrik akımı gözlenmez ancak uçlardan biri ısıtıldığı zaman devrede elektrik akımı oluşur. Bu duruma 1821 yılında ilk kez gözlemlendiğinden dolayı Thomas Seebeck'in ismi verilmiş ve Seebeck etkisi denmiştir.

Bu birime sıcaklık farkı uygulandığında gerilim potansiyeli oluşur. İletkenin uçtaki soğuk kısmında bulunan elektronlar sıcak uçtakilerden daha az ısı enerjisiye sahip olacaklardır. Bu soğuk uçtaki net elektron kütlesi soğuk ucu negatif yükleyerek iletken boyunca potansiyel farkı oluşturur. Her 1°C lik sıcaklık farkı için yaklaşık olarak 1µV gerilim meydana gelir. Termoeneratörlerin normal jeneratörlere göre verimleri oldukça düşüktür. Bunların verimliliklerinin artırılması daha iyi yarıiletken malzemelerin üretilmesine bağlıdır[5].

4.2 Termoelektrik Modülün Avantajları

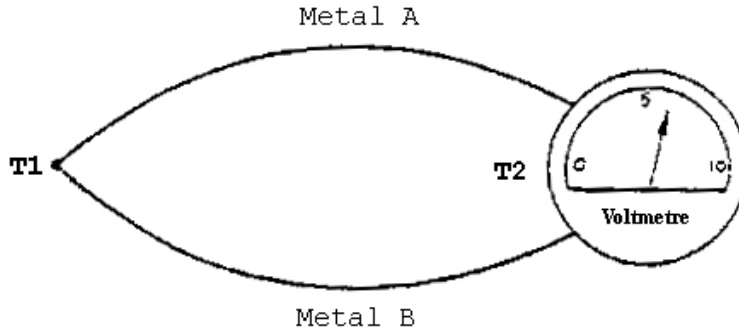
Termoelektrik modülün sağladığı avantajları maddeler halinde sıralayacak olursak;

- Boyutu küçük ve ağırlığı azdır,
- Yarıiletken olmasından dolayı güvenlidir,
- Hareketli parçası olmadığından sessiz çalışırlar,
- Ortalama ömürleri 200.000 saatten fazladır,
- Sıcaklık kontrolünü etkin bir şekilde yapabilmektedir,
- Elektriksel gürültüleri minimumdur,
- D.C. gerilim ile çalışırlar,
- Isıtma ve soğutma işlemi sadece akım yönü değiştirerek seçilebilir,
- Çevreye zararlı etkileri yoktur.

Termoelektrik soğutucular optoelektronik ve otomobillerde yeni kullanım alanları bulmaktadır. Termoelektrik jeneratörler ile otomobillerde motor içinde açığa çıkan ısı elektrik akımı olarak kullanılabilir. Yeni uygulama alanları ise yeni termoelektrik malzemelerin üretimine bağlıdır. Son zamanlarda nanometre boyutunda yeni bileşikler ve mühendislik yapıları başarılı bir şekilde oluşturulmuştur[5].

4.3 Termoelektrik Jeneratörler ve Soğutucular

Termoelektrik yapıların basit bir uygulaması olarak sıcaklık ölçümünde kullanılan termal çift örnek olarak gösterilebilir (Şekil 4.4). İki farklı metalin birleşmesinden oluşan bu yapının bir ısı kaynağına dokundurulması sonucunda sıcaklık farkı ve daha önce değinilmiş olan Seebeck etkisine bağlı olarak milivoltlar seviyesinde gerilim üretilecektir. Üretilen bu gerilim termometre cihazına yansıtılıp kaynağın sıcaklık bilgisi sayısal olarak gösterilecektir. Bu uygulamada termoelektrik yapı bir sensör görevi görmüş ve analog verilerin dış ortamdan alınmasını sağlamıştır[1].

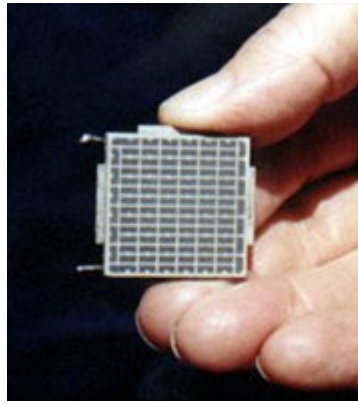


Şekil 4.4. Temel Termal çift devresi [20].

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

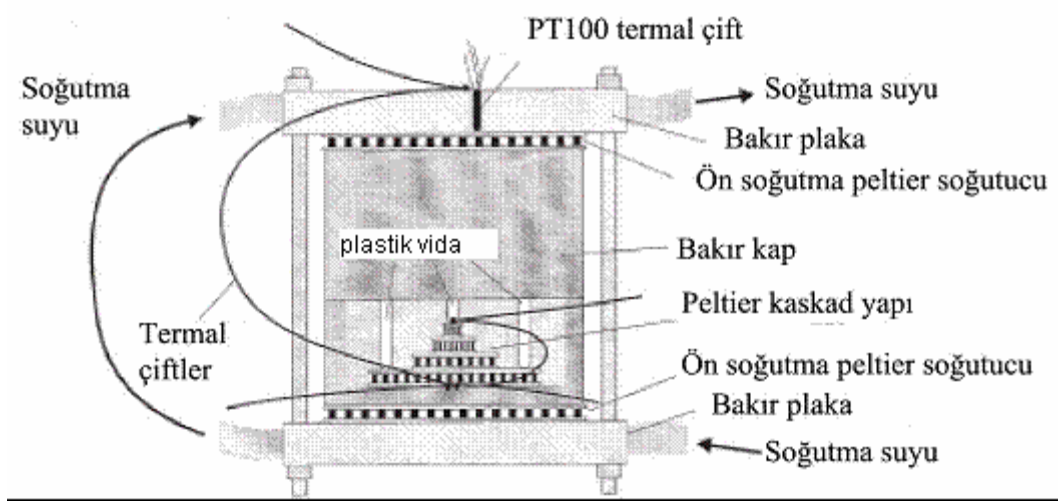
Termoelektrik modüller daha önce bahsedilen Seebeck ve Peltier temel prensiplerine göre jeneratör veya soğutucu olarak dizayn edilirler. Termoelektrik yapılar teoride tersinir çalışıyor olmalarına karşın pratikte seçilen yarı iletken malzemenin cinsi talep edilene göre değişiklik göstermektedir. Bu konuda Peltier elemanını yani bir termoelektrik soğutucuyu jeneratör

olarak kullanmak her koşul için istenilen performansı vermese de bu çeşit bir çalışma mümkündür. Jeneratör olarak dizayn edilen termoelektrik yapıların uzay ve havacılıkta güç üretimi, araçlarda atık ısı geri kazanımları ve daha birçok alanda uygulaması bulunmaktadır. Termoelektrik jeneratörlerin malzemeleri genelde yüksek sıcaklıkta çalışmaları için dizayn edilmiştir. Bu nedenle, literatürde yayınlanan makalelerin büyük bir çoğunluğu 300 K ile 1300 K arasında çalışan jeneratörlerin incelenmesine ayrılmıştır. Kriyojenik ortamı ısı kaynağı olarak kullanan jeneratörlerin karakteristikleri hakkında yapılan çalışmalar ise çok sınırlıdır. Şekil 4.5’ de ticari olarak piyasada bulunan bir termoelektrik jeneratör modülü görülmektedir.

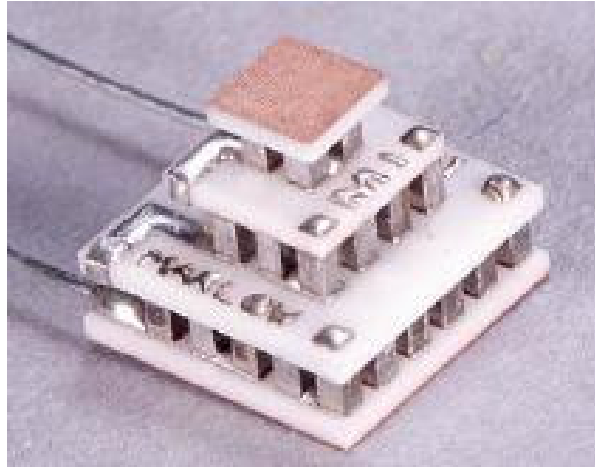


Şekil 4.5 : Hi-Z Termoelektrik Jeneratör[21].

Soğutucu olarak kullanılan termoelektrik modüller ısı pompası olarak da düşünülebilir. Termoelektrik soğutucuları mikroçipin soğutulma prosesinde kullanılırsa; mikroçipin yüzeyinden termoelektrik soğutucular ile ısı dış ortama pompalanır. Bu modüllerin kaskad bağlı bir şekilde dizayn edilmesi durumunda çok düşük sıcaklıklar elde edilebilmektedir. Beş Peltier elemanı kaskad bağlanarak Peltier elemanı üzerine yapılan bir çalışmada sıcak yüzey 286 K’de sabit tutulduğunda soğuk yüzeyin 158 K olması sağlanmış ve toplamda 128 K’lik bir sıcaklık düşüşü sağlanmıştır[22]. Bu çalışma için kurulan deney düzeneği Şekil 4.6’da görülmektedir. Şekil 4.7’de ise piyasada kaskad bağlı Peltier soğutucu olarak bulunabilen bir termoelektrik soğutucu modülü gösterilmiştir.



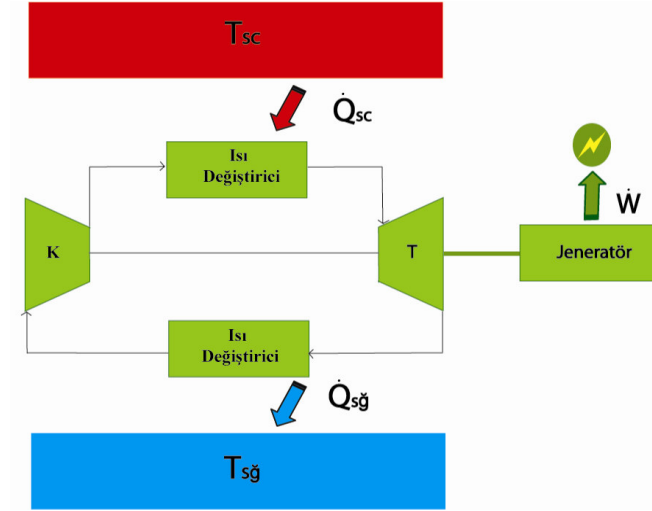
Şekil 4.6. Beş Peltier elemandan oluşan test düzenegi [9].



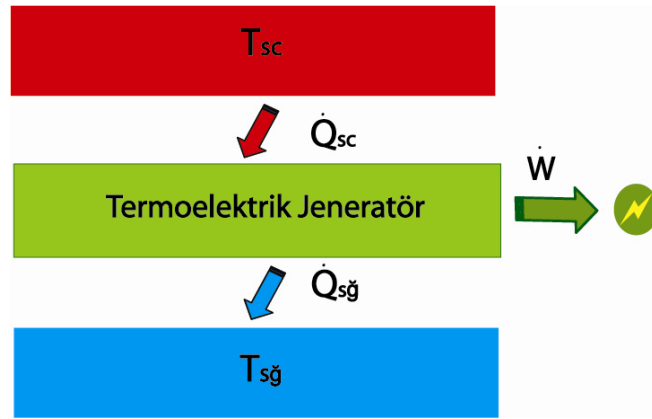
Şekil 4.7. Ticari olarak satılan kaskad bağlı bir Peltier soğutucu[15].

4.3.1 Temel Çalışma Prensipleri

Termoelektrik yapılar, termoelektrik jeneratörler ve soğutucular olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Termoelektrik jeneratörler ısı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren yapılardır. Şekil 4.8’de konvansiyonel bir güç sisteminde elektriğin üretimi ile termoelektrik jeneratörlerden elektriğin üretimi karşılaştırılmaktadır[1].



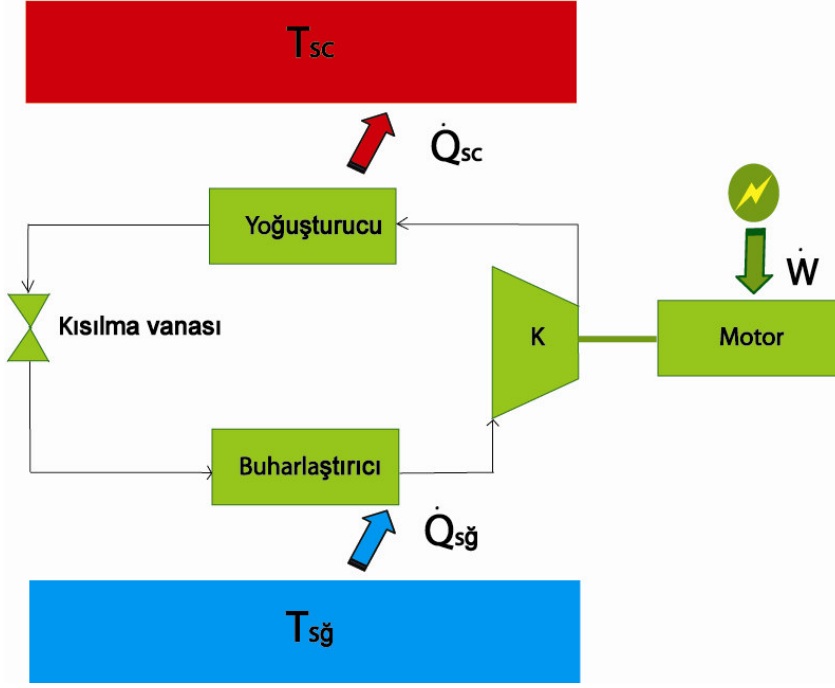
(a)



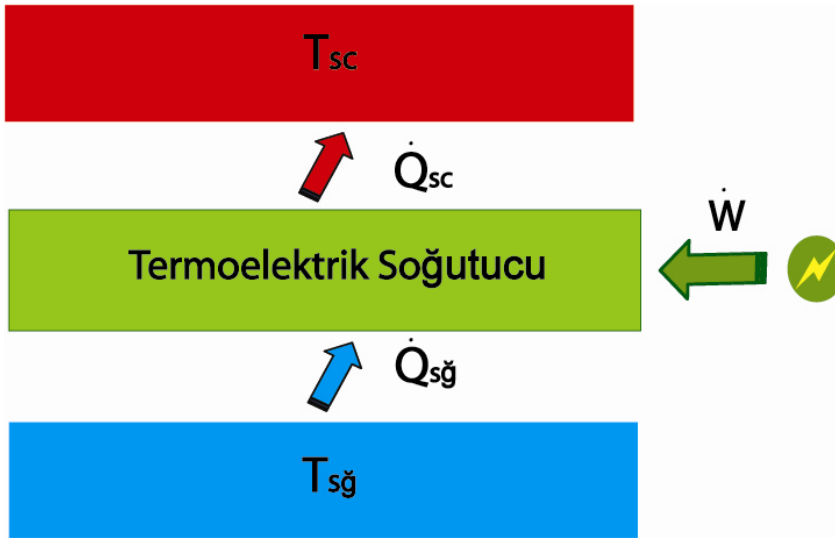
(b)

Şekil 4.8. (a) Konvansiyonel güç çevrimi (b) Termoelektrik güç çevrimi.

Termoelektrik soğutucular ise ısının soğuk bölgeden sıcak bölgeye elektrik enerjisini kullanarak taşınmasını sağlayan ısı pompalarıdır. Sekil 4.9’da konvansiyonel soğutma çevrimi ile termoelektrik soğutma çevrimi gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.9. (a) Konvansiyonel soğutma çevrimi (b) Termoelektrik soğutma çevrimi.

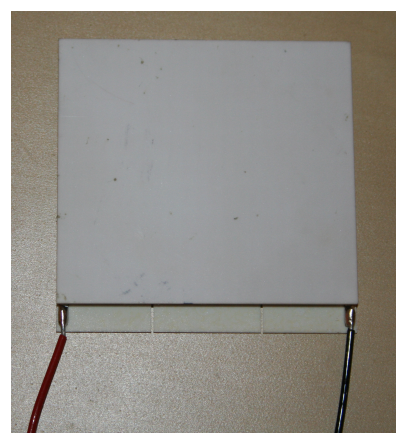
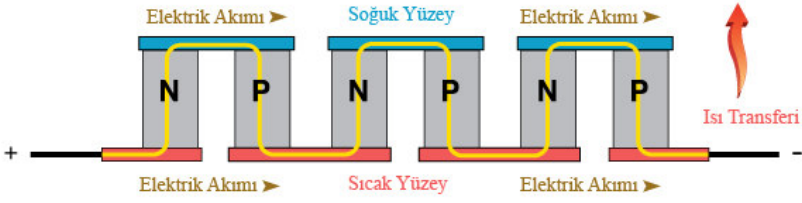
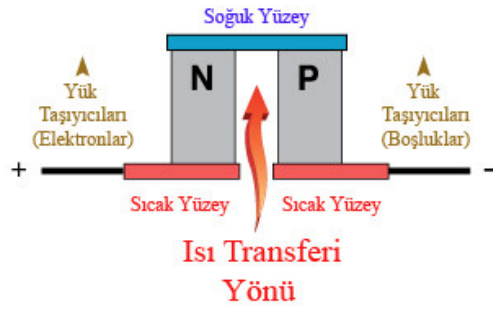
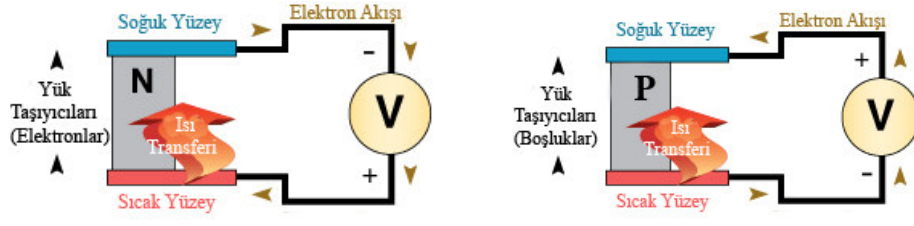
Buna ek olarak termoelektrik soğutucular için soğuk bölgeden sıcak bölgeye ısı transferinin gerçekleşmesi için dışarıdan bir iş uygulaması gerekliliği önemlidir. Bilgisayar mikroçiplerinde ısı pompası olarak görev yapan termoelektrik soğutucular DC gerilim uygulanarak sistemde biriken ısının dışarı pompalanmasında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

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

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

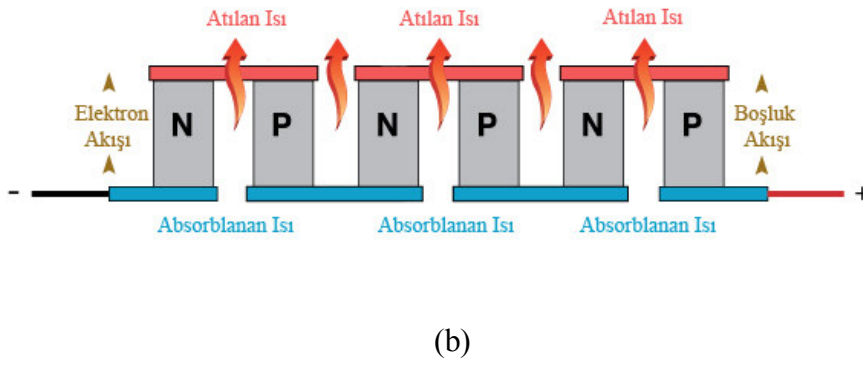
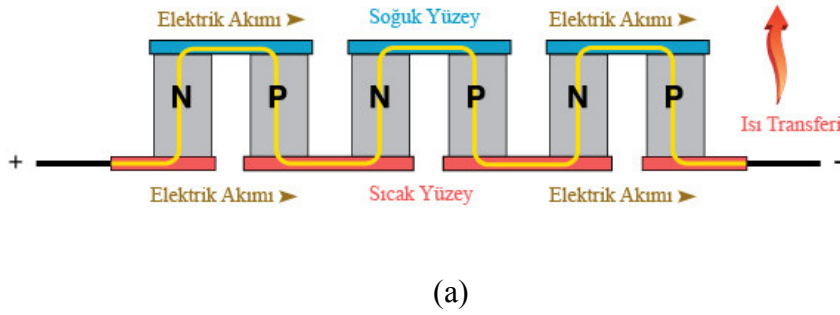
Seebeck termoelektrik etkisine göre çalışan termoelektrik jeneratörlerin yarı iletken malzemelerin gelişimlerine paralel olarak birim üretim maliyetleri, birim alanda ürettikleri güç değerleri, çalışma sıcaklık aralıkları, ekonomik ömürleri ve verimleri şekillenmektedir. Şekil 4.10'da bir termoelektrik modülün bileşenleri gösterilmektedir.

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



Şekil 4.10. Bir termoelektrik jeneratör modülünün bileşenleri[21,24].

Şekil 4.11'in (a) ve (b) figürlerinde termoelektrik modüllerin jeneratör ve soğutucu olarak çalıştırılma prensipleri gösterilmiştir.



Şekil 4.11. (a) Termoelektrik jeneratör. (b) Termoelektrik soğutucu[24].

Şekil 4.11 (a)'da gösterilen termoelektrik jeneratör, teorik olarak Seebeck termoelektrik etkisine göre çalışan, sıcak ve soğuk yüzeylerde sıcaklık farkından yararlanarak DC gerilim üreten yapılardır. Şekil 4.11 (b)'de gösterilen termoelektrik soğutucu, teorik olarak Peltier termoelektrik etkisine göre çalışan, termoelektrik modülün elektriksel uçlarına DC gerilim uygulayarak iletkenlerin ara yüzeylerinin birinde ısının absorblanması diğerinde ısı atılmasını sağlayan, ısı pompası olarak da düşünülebilecek yapılardır[1].

4.4 Termoelektrik Soğutucular

Günümüzde, sağlam, güvenilir, kompakt, ufak boyutlu, hafif, uzun ömürlü, düşük maliyete imal edilen, düşük enerjili ve bakım gerektirmeyen soğutuculara ihtiyaç duyulmaktadır. Yaygın olarak kullanılan mevcut kompresörlü soğutma sistemleri mekanik olarak hareket edebilen parçalara sahip olduğundan ve büyük oldukları için çok da ideal özelliklere sahip değildirler. Teknolojinin hızla geliştiği bir zamanda, soğutma ihtiyacının sadece konfor ve gıdaların korunması ve muhafazası amaçlı sınırlı kalmaması gerekmektedir. Yeni üretilmiş elektronik cihazların kendi içinde ürettiği ve dışına yaydığı ısının bertaraf edilmesinin ve ısı rahatlık sınırlarının üstünde olan özel şartların istendiği soğutma gereksinimleri, buhar sıkıştırımlı konvansiyonel soğutma sistemlerinin dışında alternatif soğutma cihazlarına yönelmeyi ortaya çıkarmıştır. Termoelektrik soğutucular, askeri, elektronik gibi alanlardan bireysel özel soğutma ihtiyacına kadar bir çok uygulama alanında kullanılabilen ısı pompası özelliğine sahip olan cihazlardır [25,26,27].

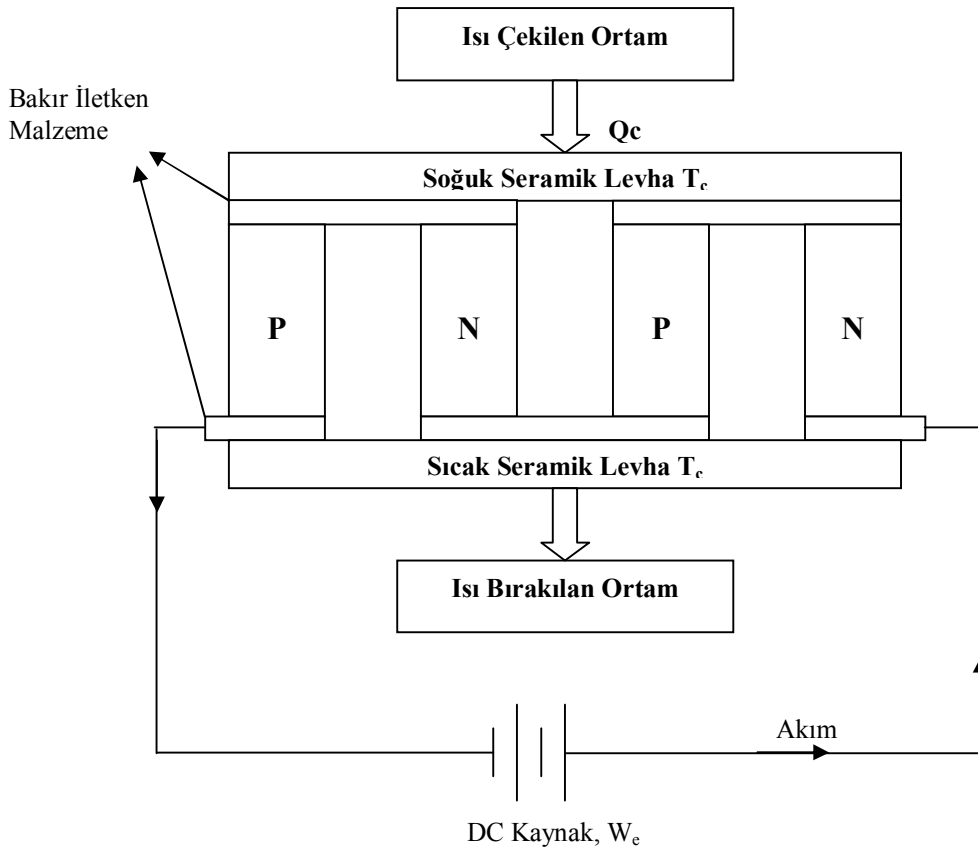
Hızla gelişen elektronik ve bilgisayar teknolojisinde, elektronik elemanların hassas biçimde çalışabilecekleri sıcaklık aralıkları bellidir. Elektronik aygıtların soğutulması günümüzde üzerinde çalışılan önemli konulardandır [28]. Termoelektrik soğutma sistemlerinin tasarımı, uygulamaları ile ilgili konularda son yıllarda araştırmalar artmaktadır.

4.4.1 Termoelektrik Soğutmanın Teorisi

Termoelektrik soğutma temelde termoelektrik etkilerden Peltier Etkisine dayanır. Peltier etkisi, iki farklı metal elemandan oluşan bir devreye doğru akım verildiğinde, akımın yönüne göre, aksi uçlarda sıcaklık artmanın veya azalmanın meydana gelmesidir. Bu olayda ilginç olan,devrede uçlar arasında bir sıcaklık farkı oluşması ve devre uçlarında bir ısınma veya soğumanın meydana gelmesidir. Isıl eleman çiftlerinin(termokupl) temelini oluşturan ve 1821 yılında keşfedilen Seebeck etkisinin tersi olan Peltier etkisi, Charles Athanese Peltier tarafından 1834 yılında keşfedilmiştir. Peltier etkisi 1950' li yıllarda yarıiletken teknolojisinde gelişmelerin hızlanması ile değişik uygulamalarda kendine kullanım alanları bulmuştur [26,27,29,30].

Termoelektrik soğutma N ve P tipi yarı iletken metal çiftlerinden oluşmuş bir veya daha çok modülden bir doğru akımın geçmesi ile elde edilir. Şekil 4.12' de bir N ve P yarı iletken

çiftinden meydana gelmiş bir termoelektrik soğutma modülü gösterilmiştir. P ve N tipi termoelemanlar elektriksel olarak seri, ısı olarak paralel şekilde seramikler arasında bağlanırlar. Akımın yönüne bağlı olarak ısıtma ve soğutma elde edilebilir. Şekil 4.12' den de görüleceği gibi soğutma durumunda, doğru akım N tipi yarı iletken P tipine geçmektedir. Akım, düşük enerji seviyesindeki P tipi yarıiletken malzemeden yüksek enerji seviyesine geçtiğinde soğutulacak ortamdan ısı çekerek soğutma meydana getirmektedir. Soğuk ortamdan çekilen bu ısı, yüksek sıcaklıktaki ortama elektronlar vasıtasıyla transfer edilir. Böylelikle ısı, bir ortamdan çekildiği gibi başka bir ortama da bırakılmaktadır. Dolayısıyla termoelektrik modül ısı pompası vazifesi de gösterir [27].



Şekil 4.12. Bir termoelektrik soğutucu modülü.

4.4.2 Termoelektrik Soğutucularda Kullanılan Malzemeler

Bir termoelektrik soğutucunun verimliliği bağıl olarak kullanılan malzeme ile ilgilidir. Termoelektrik malzemelerin performansı, aşağıdaki eşitlikte verilen değer katsayısı ile ifade edilmektedir.

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{kR} \quad (4.1)$$

Burada α Seebeck katsayısı, T termoelektrik modülünün yüzeylerinin ortalama sıcaklığı, k ısıl iletkenliği, R elektrik direncini göstermektedir. Metallerin ısı iletimi yüksek, fakat elektrik dirençleri düşük olduğundan, Z_T değerleri de düşük olmaktadır. Günümüzde termoelektrik modüllerde kullanılan yarı iletken malzemelerin değer katsayısı, Z_T , yaklaşık 0.4 ile 1.3 arasındadır.

Termoelektrik soğutucularda P ve N tipi termoelemanlarda kullanılan yarı iletken malzemeler, Bi_2Te_3 , PbTe, SiGe ve BiSb gibi alaşımlardır. Bizmut Teleryum, Bi_2Te_3 , yüksek termoelektrik verimi ve uygun sıcaklık aralığı nedeniyle yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Alt ve üst laklarda seramik malzeme kullanılır. Böylece ısıl iletkenlik, elektriksel yalıtkanlık ve mekanik mukavemet sağlanır. Termoelemanları birbirine bağlayan iletken malzeme olarak bakır veya alüminyum gibi ısıl iletkenliği yüksek malzemeler kullanılmaktadır [27].

4.4.3 Termoelektrik Soğutucuların Avantaj Ve Dezavantajları

Termoelektrik soğutucuların diğer soğutma sistemlerine göre üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

- 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 dostudurlar.
- Termoelektrik soğutucu, ısı pompası olarak tam tersinedir. 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 değildir. Dikey veya yatay her konumda çalışabilirler. Yerçekimsiz ortamlarda da çalışır.
- Çok hassas, sıkı ve küçük ortamlarda çalışabilirler.

Termoelektrik soğutucular çeşitli dezavantajlara sahiptirler. Bunlar;

- Soğutma ve ısıtma performans katsayıları (COP) çok düşük olup 0.3-0.7 arasındadır. Oysa klasik soğutma makinelerinde bu değer 2-4 arasındadır. Buhar sıkıştırımlı, absorpsiyonlu ve termoelektrikli üç farklı mini buzdolabı için yapılan karşılaştırmalı çalışmada, buhar sıkıştırımlı tipte olanın maliyet ve işletme açısından daha uygun olduğu fakat diğerlerine göre daha gürültülü olduğu tespit edilmiştir. Termoelektrikli mini buzdolaplarının COP'sinin absorpsiyonlu mini buzdolabına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Yüksek soğutma yükleri için uygun değildirler. Buhar sıkıştırımlı soğutma sistemleri ile rekabet etmesi mümkün görülmemektedir.
- Şuan için pahalıdırlar.
- DC beslenme gerektirir.

4.4.4 Termoelektrik Soğutucuların Kullanım Alanları

Termoelektrik soğutucular yukarıda belirtilen avantajlardan dolayı, tıbbi aygıtlardan günlük hayatta kullandığımız birçok aygıtlara kadar birçok uygulamada yer almaktadır. Çizelge 4.1'de termoelektrik soğutma ürünlerinin kullanım alanları ve uygulamaları verilmiştir.

Çizelge 4.1 Termoelektrik soğutmanın kullanım alanları ve uygulamaları [27].

Askeri/Uzay araştırmaları	Elektronik soğutma, soğutulan elbise, taşınabilir soğutucu, kızılötesi sensörlerin soğutulması, lazer diyotların soğutulması, telsiz istasyonları için kabin soğutma, uzay teleskoplarında.
Bireysel	Dinlenme taşıt soğutucuları, mobil ev soğutucuları, araba soğutucuları, taşınabilir piknik soğutucuları, meşrubat soğutucuları, motosiklet kasketi soğutucusu, taşınabilir insülin soğutucusu.
Laboratuar ve bilimsel cihazlar	Kızılötesi sensörlerin soğutulması, lazer diyot soğutucuları, CCD soğutucusu, entegre devrelerin soğutulması, vidicon tüpü soğutucusu, laboratuar soğuk plaka, karıştırıcı soğutucu, soğuk oda, donma noktası referans banyosu, mikrotome soğutması, elektroforesis hücre soğutucu.
Endüstriyel sıcaklık kontrol	NEMA (ABD elektrik cihazları üreticileri birliğı) ortamları, kritik elemanları sert çevre şartlarından korunması, PC mikroişlemcileri, mikroişlemcilerin ve bilgisayarların nümerik kontrollerinde ve robotiklerde, yazıcı ve fotokopilerde mürekkep sıcaklığının dengelenmesi, CCD kameralarda.
Restorant cihazları	Krema dağıtıcısı, çırpılmış krema dağıtıcısı, tereyağı dağıtıcısı.
Çeşitli amaçlar	İlaç soğutucular (taşınabilir veya sabit), otel odaları soğutucuları, otomobil mini soğutucuları, otomobil koltuk soğutucuları, uçak içme suyu soğutucuları, yolcu otobüsü soğutucuları, gemi soğutucuları, karavan soğutucuları, kamyon soğutucusu, DNA döngülerinde, tıbbi teşhis cihazları, masaj veya tedavi amaçlı sıcak/soğuk yataklarda.

Şekil 4.13 ve 4.15 arasında çeşitli uygulamalarda piyasada ticari olarak bulunan termoelektrik soğutma sistemleri gösterilmiştir[31,32].



Şekil 4.13. Piknik amaçlı bir piknik soğutucu



Şekil 4.14. Lazerli ve medikal uygulamalar için sıvı soğutucu



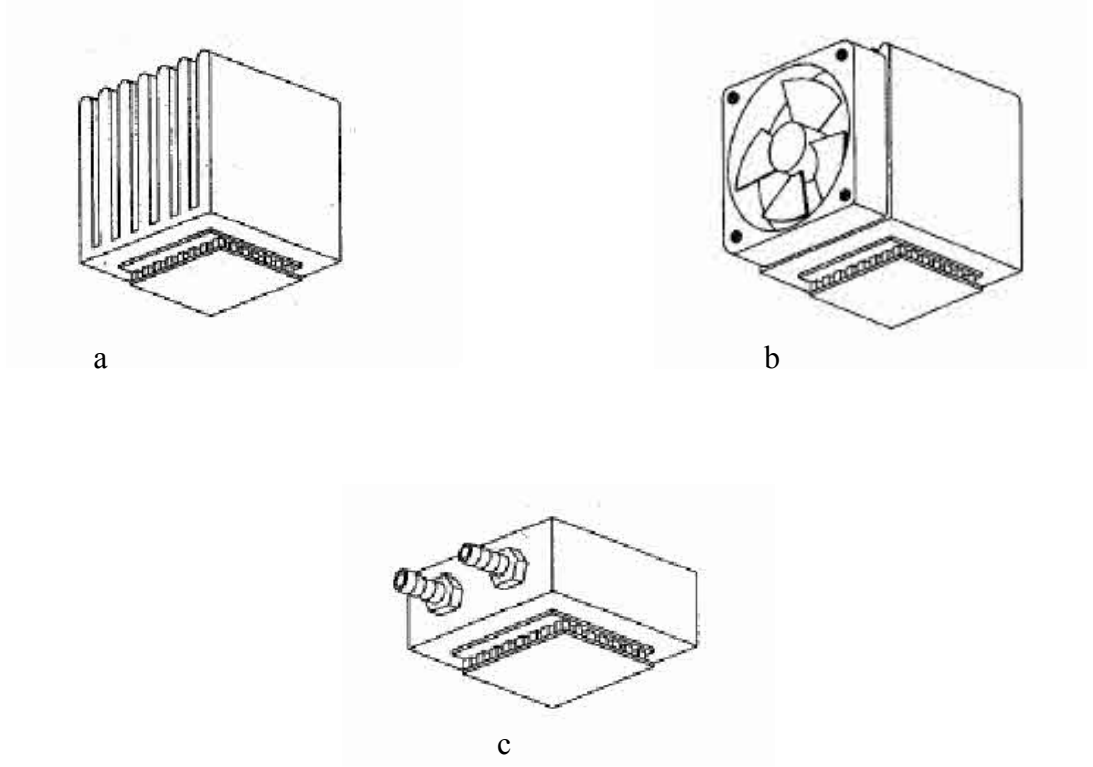
Şekil 4.15. Bir CPU soğutulması için

4.4.5 Termoelektrik Modüllerin Seçim Ve Tasarımında Isıl Ve Elektriksel Parametreler

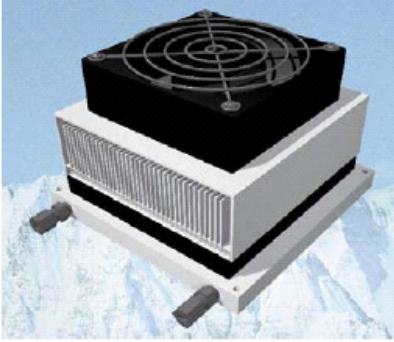
Bir soğutucunun tasarımı ve seçimi, genellikle üretici firma tarafından sağlanan termoelektrik modülün performans eğrilerine göre yapılmaktadır. Tasarım, termoelektrik soğutmanın sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) ve istenen soğutma kapasitesi ile başlar. Belirlenen soğutma kapasitesine göre ΔT -Akım eğrisinden modülün akım şiddeti belirlenir. Daha sonra Voltaj (V) – Akım(I) eğrisinde sıfır soğutma yükü ve sıfır sıcaklık farkında gerekli voltaj farkında üst ve alt limitleri belirlenir. Daha sonra ısı kaynağının ısıl direnci değerlendirilir.

Termoelektrik modüllerde, akımın yönüne bağlı olarak ısıtma ve soğutma gerçekleştirilir. Dolayısıyla ısıtma ve soğutma amaçlarının ikisinin de istendiği uygulamalarda, tasarım soğutma moduna göre yapılmalıdır [27].

Termoelektrik modüllerde, ısının çekildiği ve ısının atıldığı ortam son derece önemlidir. Isı aktarım türleri olarak modüller tasarım ve konstrüksiyon olarak farklılık gösterebilirler. Termoelektrik modüllerde, havadan havaya, sudan havaya, havadan suya, sudan suya ve soğuk plaka uygulamaları mevcuttur. Şekil 4.16’da ısı kaynağının soğutma türlerine göre çeşitli modüller gösterilmiştir. Şekil 4.17’de sudan havaya bir soğutucu modülü ve Şekil 4.18’de ise soğuk plakalı termoelektrik soğutucu modülü gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Genel ısı kaynağı türleri: a) Serbest taşınimli hava soğutmalı ısı kaynağı
b) Zorlanmış taşınimli hava soğutmalı ısı kaynağı
c) Zorlanmış taşınimli sıvı soğutmalı ısı kaynağı



Şekil 4.17. Sudan havaya bir termoelektrik soğutucu



Şekil 4.18. Soğuk plakalı termoelektrik soğutucu

Bir termoelektrik modülün sıcak yüzeyinden bulunduğu ortama ısı verilir. Bu yüzey ısı kaynağına bağlıdır. Isı kaynağı olarak su veya hava olabilir. Isı kaynağı doğal veya zorlanmış taşınım hava ile soğutulduğunda (Şekil 4.16a ve Şekil 4.16b), sıcak yüzeyin sıcaklığı (T_h) ve sıcak yüzeyden atılan ısı, Q_h aşağıdaki denklemden bulunabilir.

$$T_h = T_o + UQ_h \quad (4.2)$$

$$Q_h = Q_c + W_e \quad (4.3)$$

Burada, T_o ısının aktarıldığı ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$), U ısı değiştirgecinin toplam ısıl direnci ($^{\circ}C/Watt$) ve Q_c , termoelektrik modülün soğuk yüzeyinin çektiği ısı (W) ve W_e (W) termoelektrik modülün çektiği elektrik gücü olup, I (Amper) ve V (Volt) bağlıdır.

$$W_e = V.I \quad (4.4)$$

Isı değiştirgecinin ısıl direnci bilinmediğinde sıcak yüzeyin sıcaklığı, hava soğutmalı doğal taşınım ortam sıcaklığına $20 - 40^{\circ}C$, hava soğutmalı zorlanmış taşınım ortam sıcaklığına $10 - 15^{\circ}C$ ve su soğutmalı da ise $2 - 5^{\circ}C$ ortam sıcaklığına eklenerek bulunur. Örneğin $20^{\circ}C$ bir ortamda serbest taşınımlı hava soğutmanın yapıldığı bir termoelektrik modülün sıcak yüzeyinin sıcaklığı yaklaşık olarak $20+35=55^{\circ}C$ alınabilir.

Termoelektrik soğutucunun soğuk yüzeyinin sıcaklığı (T_c), eğer yüzey doğrudan soğutulacak cisim veya ortam ile temasta ise cismin sıcaklığı veya ortamın sıcaklığı alınabilir. Eğer bir ısı değiştirgeci arada varsa, ısıl dirençlerin göz önüne alınması gerekir.

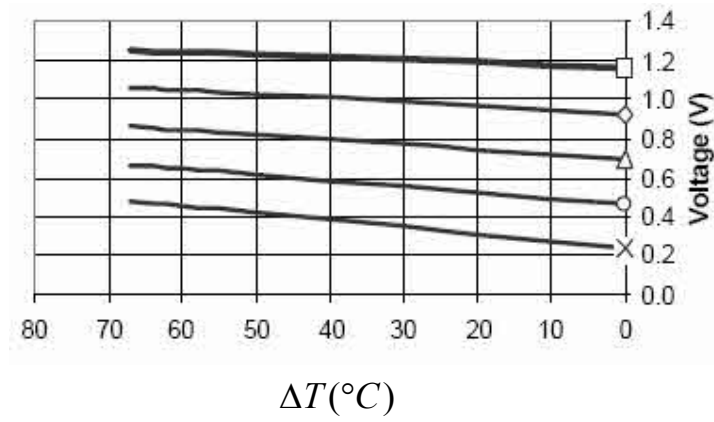
Bir termoelektrik soğutucunun iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı ($\Delta T = T_h - T_c$), son derece önemli bir parametre olup, sistem seçiminde diyagramlarda temel eksenlerden birini oluşturur. Eğer $\Delta T < 50^{\circ}C$ ise, tek kademeli termoelektrik modül yeterli olabilir. Tek kademeli bir modül için teorik maksimum sıcaklık farkı, $65^{\circ}C < \Delta T < 70^{\circ}C$ ' dir. Eğer $\Delta T > 55^{\circ}C$ ise, çok kademeli termoelektrik modüller üst üste konarak, yüksek ΔT 'ye sahip çok kademeli bir soğutma modülü oluşturulabilir[27,29] kademeli termoelektrik cihazlarda $\Delta T \cong 130^{\circ}C$ 'ye kadar sağlanabilir. Pratikte ulaşılan en düşük sıcaklık $-100^{\circ}C$ 'dir [25].

Termoelektrik soğutma modüllerin ısıtma ve soğutma tesir katsayıları (COP), konvansiyonel soğutma makinalarına ve ısı pompalarına benzer olarak aşağıdaki denklemlerde olduğu gibi tanımlanır.

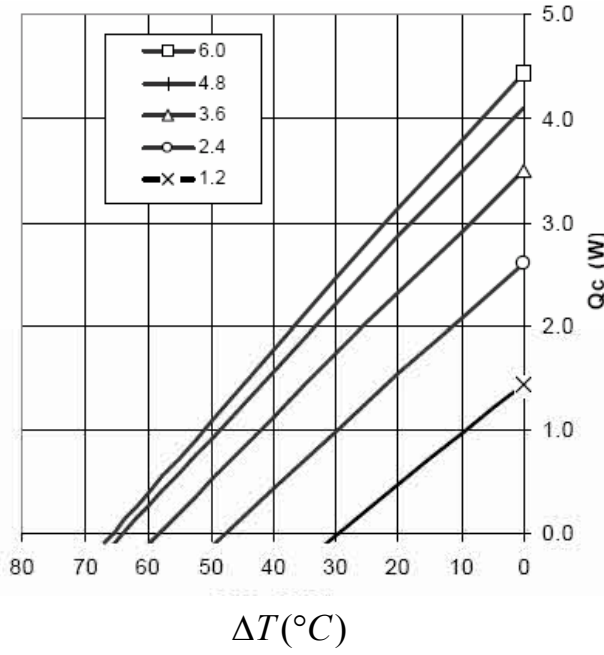
$$COP_h = \frac{Q_h}{W_e} \quad (4.5)$$

$$COP_c = \frac{Q_c}{W_e} \quad (4.6)$$

Termoelektrik soğutucular, belirlenen T_h 'da I_{max} , V_{max} , Q_{max} ve ΔT_{max} değerleri ile değerlendirilirler ve üreticiler her tip için bu değerleri kataloglarında verirler. Q_{max} soğutulan ortamdan çekilen maksimum ısıdır. I_{max} ve V_{max} ise $T=0$ olduğundadır. ΔT_{max} ise soğutucu yüzeyler arasında oluşabilecek en yüksek sıcaklık (I_{max} , V_{max} ve $Q_c=0$ olduğunda) farkıdır[27,29]. Tipik bir termoelektrik modüller için tipik diyagramlar Şekil 4.19'da ve Şekil 4.20'de gösterilmiştir[29].



Şekil 4.19. $T_h = 25^\circ C$ için $\Delta T - V$ performans diyagramı



Şekil 4.20. $T_h = 25^\circ\text{C}$ için $\Delta T - Q_c$ performans diyagramı

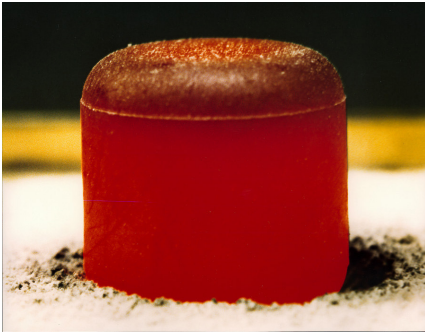
Termoelektrik aygıtlar güç üretimi ve soğutma uygulamalarında kullanılmaktadır. Termoelektrik soğutma uygulamalarına olan ilgi son zamanlarda artmıştır. Ancak, yakın gelecekte, evsel uygulamalar için ısı pompası ve iklimlendirme amaçlı termoelektrik soğutma sistemlerinin pazarda rekabete gireceği tahmin edilmektedir.

Termoelektrik sistemlerde kullanılan malzemelerin durumları göz önüne alındığında yarı iletken malzemelerindeki gelişmeler bu tür cihazların daha verimli olmalarını sağlayacağı ve maliyetleri düşüreceği düşünülmektedir. Ayrıca PV panellerden elde edilecek DC güç ile termoelektrik soğutmanın gerçekleştirilmesi üzerine de çalışmalar planlanmaktadır. Böylelikle termoelektrik cihazlar tamamen çevre dostu ve işletme maliyeti düşük sistemler olarak karşımıza çıkabileceklerdir.

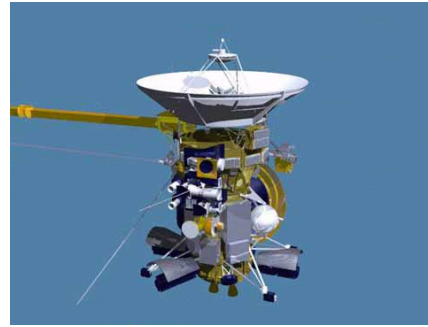
Termoelektrik soğutma sistemleri yapı ve kullanım amacına göre farklı tipleri mevcuttur. Dolayısıyla termoelektrik cihazların tasarım ve seçiminde ısıl ve elektriksel parametrelerin tümü göz önüne alınmalıdır [27].

4.5 Uygulama Alanları

Termoelektrik yapılar sensör uygulamalarından, uzay havacılık sistemlerine, güç üretiminden, araçlarda ve fabrikalarda atık ısı geri kazanımlarına, karmaşık soğutucu sistemlerden basit buzdolaplarına, bilgisayarlardaki mikroçiplerin soğutulmasından, MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) sistemlerine uzanan uygulamalarıyla günlük kullanıma entegre olmaya başlamışlardır. Termoelektrik uygulamaları ilk olarak uzay araçlarının enerji ihtiyaçlarının karşılamak için düşünülmüştür. Amerika 1961'den bu yana toplam 45 tane radyoizotop termoelektrik jeneratör ile çalışan sistemi uzaya yollamıştır. RTG üniteleri sıcak ısı kaynağı olarak Plütonyum -238, Küriyum-244 ve Stronsiyum-90 kullanmakta olup soğuk ısı kaynağı uzay boşluğunu kullanmaktadır. Soğuk ortama ısı RTG ünitesinin kanatları üzerinden radyasyonla uzaya verilmektedir. Şekil 4.21 (a)'da sıcak ısı kaynağı olarak kullanılan Plütonyum -238 peleti görülmektedir. Şekil 4.21 (b)'de ise 1997 yılında gönderilen Cassini uzay aracı ve üzerindeki RTG üniteleri görülmektedir[1].



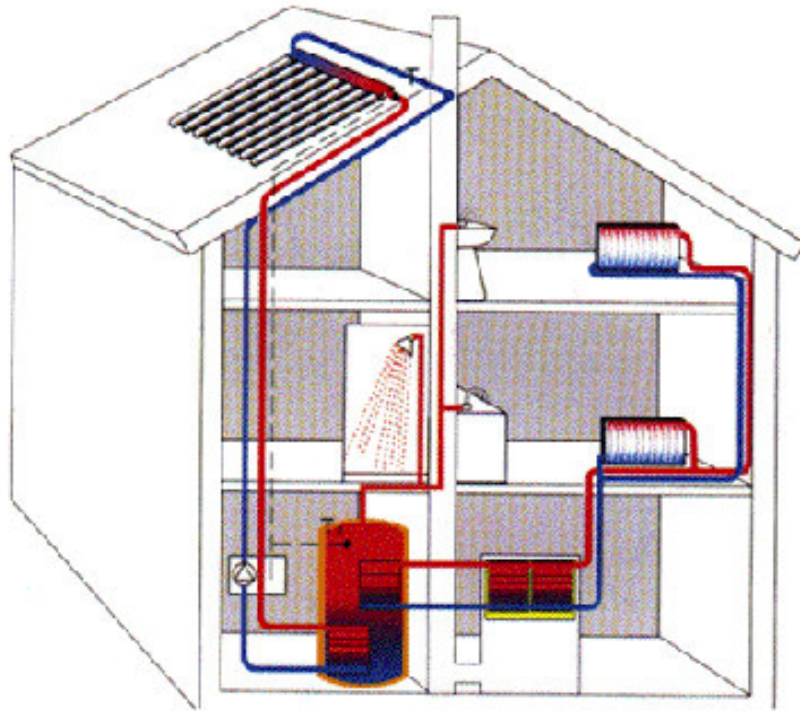
(a)



(b)

Şekil 4.21 : (a) Plutonium-238 peleti (b) Cassini uzay aracı ve üzerindeki RTG üniteleri [33].

Şekil 4.22'de yine termoelektriğin evsel bir uygulamasına örnek gösterilmiştir. Bu uygulamada evin çatısına yerleştirilen güneş kolektörleri ile ısıtılan su hem duşlarda sıcak su ihtiyacını karşılamakta hem termoelektrik modül üzerinde sıcak ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Soğuk su da termoelektrik modül üzerinde soğuk yüzeyi oluşturmakta ve elektrik elde edilmektedir. Bu sistem için dizayn edilen termoelektrik jeneratörler 50W ile 100W arasında güç üretebilmektedir.



Şekil 4.22: Güneş enerjisi ve termoelektriğin evsel bir uygulaması[33].

Evlerde güneş enerjisi ve termoelektrik jeneratörlerin kullanımı ile enerji ihtiyacı olan binaların gelişimi olumlu yönde etkilenecektir [1].

5. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu çalışmada; katı, sıvı ve gaz yakıtla çalışabilecek termoelektrik tabanlı portatif bir jeneratör tasarlanmıştır 12 adet TEC1-12708 kodlu termoelektrik modüller seri olarak bağlanıp bakır su depolarının arasına yerleştirilmiş, yüzeyler arasındaki sıcaklık farkının oluşmasıyla kullanım için gerekli olan gerilime ve güce ulaşılmaya çalışılmıştır. Sıcak su deposu ısıtılırken, diğer soğuk su deposundan soğutucu akışkan geçirilerek TE modülün elektrik üretmesi için gerekli olan sıcaklık farkı oluşturulmuştur. Gerekli deney düzeneği kurularak sistem çalışır hale getirilmiştir. Sistemin sıcaklık ölçümleri için k tipi termokupllu dijital termometre, gerilim ölçümleri için dijital multimetre kullanılmıştır.

Bu düzende sıcak ve soğuk suyun depolanmasının ve suyun devir daiminin sağlanması amacıyla 17 cm x 17 cm x 5 cm boyutlarında Şekil 5.1 de gösterilen iki adet bakırdan yapılmış su deposu kullanılmış olup depolar düzenek için özel olarak tasarlanmıştır.



Şekil 5.1. Bakır Su Deposu

Sıcak ve soğuk ısı kaynakları arasına yerleştirilecek olan termoelektrik modüllerin sıcaklık farklarını daha iyi algılayabilmesi için iki yüzeye ince bakır levhalar monte edilmiştir.

Soğuk su deposu sürekli olarak soğutucu akışkanla beslenerek deponun belli bir sıcaklıkta kalması sağlanmıştır. Bununla birlikte sıcak su deposundaki akışkanın sıcaklığı ise sürekli kontrollü olarak değiştirilmiştir. Deneyde kullanılan termoelektrik modüllerin çıkış uçları, belirli voltajda elektrik enerjisi elde edilecek şekilde bağlanmıştır. Şekil 5.2’de termoelektrik jeneratörün çalışır haldeki görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Termoelektrik jeneratörün çalışır haldeki görüntüsü

Sistem, 50cmx 30cmx 30cm boyutlarındaki demir profilden yapılmış olan özel düzenek üzerine yerleştirilmiştir.

Deneyde kullanılan termoelektrik modül jeneratör tasarımında kütlesi 27g, boyutları 40 mm x 40 mm x 3,5 mm, çalışma sıcaklık aralığı 0°C – 138°C ve azami sıcaklık farkı (ΔT_{max}) 67° C olan TEC1-12708 kodlu termoelektrik modül kullanılmıştır. Bu modül bünyesinde 127 adet termoelement barındırmaktadır. Şekil 5.3’de gösterilen modülün teknik özellikleri Çizelge 5.1’ de gösterilmiştir [34].



Şekil 5.3. Deneyde kullanılan TEC1-12708 termoelektrik modülü

Çizelge 5.1. TEC1-12708’e ait teknik özellikler [34].

Isınan yüzey sıcaklığı (° C)	25° C	50° C
Q_{max} (Watt)	71	79
ΔT_{max} (° C)	66	75
I_{max} (A)	8,5	8,4
V_{max} (V)	15,4	17,5
Modül Direnci (Ohm)	1,5	1,8

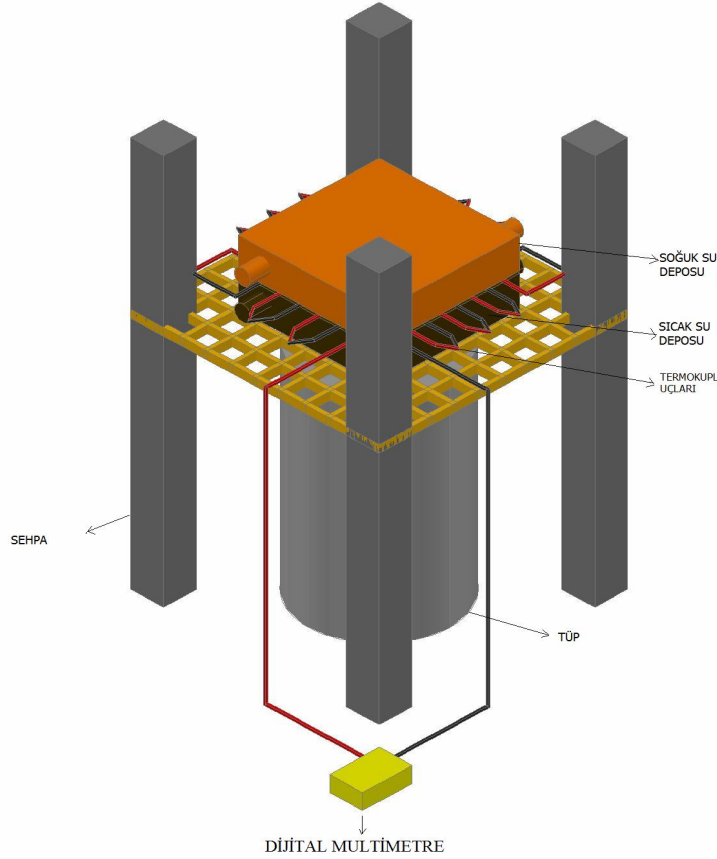
Katı, sıvı ve gaz yakıtla çalışabilecek termoelektrik jeneratörde 12 adet termoelektrik modül kullanılmıştır. Termoelektrik modüller bakır su depolarının yüzeylerine yerleştirilmeden önce, su depolarının yüzeyleri özel olarak hazırlanmış ve TEC elemanlarının yüzeyine, boşluk

kalmaması ve ısı geçişinin sağlıklı olması için yüksek sıcaklığa dayanıklı bir yapıştırıcı kullanılmış ve termoelektrik modüller farklı iki ısı kaynağı arasına sabitlenmiştir.

Geliştirilen termoelektrik jeneratörde on iki modül kullanılarak üretilen enerji 90 adet LED'ten oluşan aydınlatma devresinde kullanılmıştır.

6. ARAŞTIRMA BULGULARI

Geliştirilen termoelektrik jeneratör Şekil 6.1’ de görülmektedir.



Şekil 6.1. Bütan gazıyla çalışan termoelektrik jeneratör.

Yapımı tamamlanan termoelektrik jeneratör çalışır hale getirildikten sonra deneysel veriler elde edilmiştir. Sistem çalışma esnasında sıcak ve soğuk akışkanlarla desteklenmiştir. Sistemin sıcaklık ölçümlerinde dijital termometre, gerilim ve akım değerlerinin ölçülmesinde ise dijital multimetre kullanılmıştır. Şekil 6.2’de LED’li ışık kaynağı görülmektedir.



Şekil 6.2. Termoelektrik jeneratörden sağlanan gerilimle yakılan 90 LED’li lamba

Termoelektrik jeneratörden maksimum gücü alabilmek için iç dirence eşit 24Ω dış direnç bağlıken elde edilen sıcaklık ölçümleri, gerilim ve akım ölçümleri elde edilmiş ve sağlanan değerler Çizelge 6.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Termoelektrik jeneratörden elde edilen anlık ölçüm değerleri .

Isıtılan Su Deposundaki Suyun Sıcaklığı $T_1(^{\circ}\text{C})$	Soğuk Su Deposundaki Suyun Sıcaklığı $T_2(^{\circ}\text{C})$	Yüzeyler Arası Sıcaklık Farkı $\Delta T(^{\circ}\text{C})$	Jeneratörden Sağlanan Gerilim V(Volt)	Elde Edilen Akım I (mA)	Jeneratörden Sağlanan Güç P(Watt)
23	16	7	0,22	8,9	0,0017
35	16	19	0,82	31,9	0,025
40	16	24	1	39,5	0,039
45	16	29	1,15	47,8	0,054
55	16	39	1,25	52	0,065
65	16	49	1,62	68	0,11
75	16	59	2	84	0,168
80	16	64	2,22	97	0,215
85	16	69	2,78	125	0,34
90	16	74	4	200	0,8
95	16	79	8,73	440	3,84
100	16	84	9,85	470	4,62

Depolardaki akışkan sıcaklıkları arasındaki fark arttıkça jeneratörden sağlanan gerilim, akım ve güç artmış ve 9,85 V_{DC} değerinde çıkış gerilimi elde edilmiştir böylece 90 tane LED’li lambadan oluşan aydınlatma devresi yakılmıştır.

Çizelge 6.2. Termoelektrik jeneratörden sağlanan anlık değerler (açık devre voltajı).

Isıtılan Su Deposundaki Sıc.T1(°C)	Suyun Sıc.T2(°C)	Soğutulan Su Deposundaki Sıc.T2(°C)	Yüzeyler Arası Sıcaklık Farkı ΔT(°C)	Jeneratörden Sağlanan Gerilim V(Volt)
23	16	16	7	0,4
35	16	16	19	1
40	16	16	24	1,2
45	16	16	29	1,45
55	16	16	39	3,15
65	16	16	49	5,3
75	16	16	59	6,1
80	16	16	64	7,6
85	16	16	69	9
90	16	16	74	11
95	16	16	79	14
100	16	16	84	18,98

Termoelektrik jeneratöre iç dirence eşit bir dış direnç bağlanmadan deney düzeneği çalıştırılmış ve jeneratörden sağlanan gerilim 18,98 V_{DC} olarak ölçülmüştür.

Çizelge 6.3. Geliştirilen termoelektrik jeneratörde modül başına düşen güç değerleri

Sistemin Adı	Kullanılan Peltier Sayısı	Sağlanan Toplam Güç P(Watt)	1 Peltierin Sağladığı Güç P(Watt)
Bütan Gazı İle Çalışan Termoelektrik Jeneratör	12	4,62	0,385

Termoelektrik jeneratörde 12 adet termoelektrik modül kullanılmış ve dış direnç bağlıken sağlanan güç 4,62 Watt olarak hesaplanmıştır. 1 tane modülün sağladığı güç 0,385 Watt olarak hesaplanır. Termoelektrik modüllerin artmasıyla tasarlanan sistemlerde güç çıkışının daha fazla arttırılabilmesi mümkündür.

7.SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Termoelektrik jeneratörler hareketli parçalar içermezler, aşınmazlar ve sessiz çalışırlar. Küçük hafif ve portatiflerdir. Kolay ve ekonomik ısıtma, soğutma,elektrik üretimi özelliklerine sahiptirler.Uzun ömürlüdürler ve bakım gerektirmezler.Her pozisyonda ve yerçekimsiz ortamda çalışabilirler.Termoelektrik yapılar üzerinde yapılan araştırmalar arttıkça uygulama alanları çoğalmakta ve genişlemektedir

Yapılan çalışmada bütan gazı ile çalışabilen termoelektrik jeneratör tasarlanmış ve elektrik enerjisi elde edilmiştir. Bu düzenek katı, sıvı ve gaz yakıtla çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Verimleri düşük olarak bilinen termoelektrik modüller seri olarak bağlanıp ısı değiştirici arasına yerleştirilmiş ve yüzeyler arasına sıcaklık farkının oluşturulmasıyla kullanım için gerekli olan gerilime ulaşılmaya çalışılmıştır.

Gerçekleştirilen bu çalışmada açık devre gerilimi ve iç dirence değerine eşit bir dış direnç bağliken elde edilen gerilim değerleri ölçülmüş ve deney sonuçları incelenmiştir.

Deneyde 12 adet termoelektrik modül seri bağlanmış ve bütan gazıyla çalışan portatif özellikte termoelektrik bir jeneratör tasarlanmıştır. Deneyin birinci aşamasında termoelektrik jeneratörden maksimum gücü alabilmek için iç dirence eşit 24 Ω luk bir dış direnç bağlanmışır. Sıcaklık farkı 7 $^{\circ}\text{C}$ seviyelerindeyken jeneratörden sağlanan gerilim 0,22 V olarak ölçülmüştür. Sıcaklık farkı 29 $^{\circ}\text{C}$ seviyelerine ulaştığında sağlanan gerilim 1,15 V olmuştur. Sıcaklık farkı 49 $^{\circ}\text{C}$ seviyelerine ulaştığında sağlanan gerilim 1,62 V olmuştur. Sıcaklık farkı 75 $^{\circ}\text{C}$ ' ye ulaştığında gerilim 4 V olarak ölçülmüştür. Sıcak su deposundaki suyun kaynamasıyla birlikte sıcaklık farkı 84 $^{\circ}\text{C}$ ' ye ulaşmış sağlanan gerilim ise 9,85 V olarak ölçülmüştür. Daha fazla sıcaklık farkı sağlanan termoelektrik modüllerle daha yüksek değerlerde akım ve gerilim üretilirken, sıcaklık farkı daha az iken düşük değerde akım ve gerilim üretilmektedir.

Yapılan deneyin ikinci aşamasında termoelektrik jeneratörün çıkışına bir dış direnç bağlanmadan deney düzeneği çalıştırılmış ve sıcaklık farkı 7 $^{\circ}\text{C}$ seviyelerindeyken jeneratörden sağlanan gerilim 0,4 V olarak ölçülmüştür. Sıcaklık farkı 29 $^{\circ}\text{C}$ seviyelerine ulaştığında sağlanan gerilim 1,45 V olmuştur. Sıcaklık farkı 49 $^{\circ}\text{C}$ seviyelerine ulaştığında sağlanan gerilim 5,3 V olmuştur. Sıcaklık farkı 75 $^{\circ}\text{C}$ ' ye ulaştığında gerilim 11 V olarak

ölçülmüştür. Sıcak su deposundaki suyun kaynamasıyla birlikte sıcaklık farkı 84 °C' ye ulaşmış sağlanan gerilim ise 18,98 V olarak ölçülmüştür. Sistemdeki sıcak su deposundaki su sıcaklığı yükseldikçe soğuk su deposundaki su sıcaklığı arasındaki fark artmış böylece termoelektrik jeneratörden sağlanan gerilim değeri yükselmiştir.

Termoelektrik jeneratörler katı, sıvı ve gaz yakıtla çalışabildikleri gibi jeotermal enerji, motor bloklarındaki atık ısı, egzoz gazı atık ısı, soba ve kazan yüzeyleri ısı, merkezi ve bireysel ısıtma sistemleri suyu ısı ile çalışabilmektedir. Güneş enerjisinin odaklaması ile elde edilen enerji modüllerin sıcak yüzeyi için kullanılabilir. Soğuk yüzeyler için şebeke suyu ile soğutma, hava ile soğutma ve cebri soğutmalar kullanılabilir.

Ele alınan çalışmada termoelektrik jeneratör üzerinden sağlanan gerilimler ile hazırlanan LED lambalı sistemler enerjilendirilmiş ve aydınlatma sağlanmaya çalışılmıştır. Sistem 3 V ürettiğinde tek bir LED lamba, 6 V üretildiğinde 12 adet LED lamba, 9 V seviyelerine ulaştığında ise 90 tane LED lambadan oluşan armatür enerjilendirilerek aydınlatma sağlanmış ve lüksmetreyle yapılan ölçümlerde ise 85 lükslük bir aydınlatma şiddeti ölçülmüştür.

Termoelektrik sistemlerde kullanılan malzemelerde verim durumu önemli bir parametre olduğundan yarıiletken malzemelerdeki gelişmeler bu tür cihazların daha verimli olmalarını sağlayacak ve maliyetleri düşürecektir.

Daha yüksek verimli termoelektrik çeviricilerin geliştirilmesiyle daha güçlü portatif termoelektrik jeneratörlerin de geliştirilebilmesi yakın gelecekte olası gözükmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Haluk ÖZGÜN, Termoelektrik jeneratörlerin çok düşük sıcaklıklarda teorik ve deneysel karakterizasyonu. Yüksek lisans tezi. İTÜ, İstanbul 2009.
- [2] Bull, S. R. , 2001, Renewable energy today and tomorrow, Proceedings of IEEE, 89, 8, 1216-1226
- [3] <http://kuresel-isinma.org>
- [4] Uğur Yılmaz, Gökçeada'da yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul 2008.
- [5] M.B. Pişkin, Yarıiletken alaşımlarının elektrik, termoelektrik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi ve sanayi uygulamaları. Doktora tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 2006.
- [6] <http://kimyaevi.com>
- [7] R. Kayabaşı, Jeotermal enerji kullanılarak termoelektrik jeneratör ile elektrik üretimi. Yüksek lisans tezi. Karabük Üniversitesi, Karabük 2009.
- [8] Wagner, M., 2007, Simulation of Thermoelectric Devices. PhD Thesis. Technischen Universität Wien, Viyana, Avusturya.
- [9] Yılmaz S., Termoelektrik soğutucuda farklı soğutma uygulamalarının sistem performansına etkilerinin deneysel olarak incelenmesi. Teknoloji 11(1):39-44, 2008.
- [10] Ahuska R. Güler E., Acar S., Kasap M. N tipi (Bi_2Te_3) Se_3 Yarıiletken kristallerinin 11-373 ° K sıcaklık aralığında termoelektrik karakterizasyonu. G.U. Journal of Science 18 (3):481-487 2005.

- [11] M. Tugay Dinamik yapılı parabolik yansıtıcı kullanarak termoelektrik dönüştürücüler ile sağlanan elektrik enerjisinde optimum düzeyin elde edilmesi. Yüksek lisans tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale 2010.
- [12] Kasap S., Thermoelectric effects in metals:thermocouples. The University Of Saskatchewan, Canada, 1997-2001. [http://electronicsmaterials.usask.ca/samples/Thermoelectric – Seebeck.pdf](http://electronicsmaterials.usask.ca/samples/Thermoelectric-Seebeck.pdf)
- [13] H.Atiya, Review of solar thermoelectric energy conversion and analysis of a two cover flat-plate solar collector. Bachelor of science engineering. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts 2007.
- [14] E. Ökten, Mikrodenetleyici sıcaklık ve hız kontrollü termoelektrik yarıiletken üretim sistemi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara 2007.
- [15] H.Çakır, Güneş pili ile elde edilen elektrik enerjisinin termoelektrik soğutmada kullanımı. Bilim Uzmanlığı Tezi. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük 2006.
- [16] C.Aksu Canbay, Kompozit yarıiletkenlerin termal elektrik ve optik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi, Elazığ 2005
- [17] Erel Ş., Kuçuk B., Uluer I, The Use Of The Dynamic System To Get Optimum Power From The Photovoltaic Cells. ECOS 2001, ITU-ICAT, İstanbul, Turkey, Proceedings of ECOS 01, (I): 459-464,2001.
- [18] Goo, M., Rowe D.M. Experimental Evaluation of Prototype Thermoelectric Domestic Refrigerators, Applied Energy, Spain 2005.
- [19] Team Palio, Termoelektrik Soğutma Modülü, www.TeamPalio.com, 2005.
- [20] [http:// www.branom.com/ literature /thermocouple.html](http://www.branom.com/literature/thermocouple.html).02.06.2008.
- [21] <http://www.hi-z.com/hz2.php>>

[22] Metzger, T. AND thebener,R.P., 1999 Modeling and cooling behavior of peltier coscodes. Cryogenics,39.

[23] <http://www.marlow.com/Products/productlist.asp?ProductType=11>> ,

[24] <http://www.tellurex.com/>

[25] Riffat, S.B.Ma,X. 2003. Thermoelectrics a review of present and potential applications.Applied Thermal Engineering,23:913-935

[26] Chung, M., Miskovsky,N.M., Cutler,P.H.,Kumer, N., Patel,V.2003.Theoretical analysis of a field emission enhanced semiconductor thermoelectric cooler solid-state electronics,47:745-1751

[27] Doç.Dr. Hüsamettin Bulut, Termoelektrik soğutma sistemleri. Soğutma Dünyası, sayı 31,sayfa (9-16) 2005

[28] Kılıç, M.,Yiğit,A. Isı Transferi, 2.Baskı,Alfa Basım Yayım Dağıtım Ltd.Şti.,İstanbul,2004.

[29] Godfrey, S.1996. An introduction to thermoelectric coolers. Electronics Cooling,2(3). <http://www.electronics-cooling.com>

[30] Çengel,Y.A., Boles, M.A. Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik. Çeviren:Taner Derbentli,McGraw Hill-Literatür Yayıncılık,İstanbul,1996.

[31] <http://www.melcor.com>

[32] <http://www.fujitoko.com/pub/peltier/english/peltier-product.html>.

[33] Şişman,A. And Özgün H.,2008:Thermoelectric generators and their applications for energy fromspace.EFS 2008, International Workshop on Energy From Space for a Sustainable Environment, İstanbul, Turkey.

[34] Hebeild Company Thermoelectric Cooler TEC 1-12708
<http://www.hebeild.com.cn/peltierdatasheet/TEC1-12708.pdf>