



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



YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİR TERMOELEKTRİK MODÜLÜN MATEMATİKSEL MODELENMESİ

Mehmet Han İZGİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Sedat BALLIKAYA**

Haziran, 2018

İSTANBUL

Bu çalışma, 20.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Sedat BALLIKAYA (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Mukden UĞUR
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğretim Üyesi Hasan TIRYAKI
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğretim Üyesi Nevra BAYHAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğretim Üyesi Cihat BOYRAZ
Marmara Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi



20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 20611 ve 21890 numaralı projeleri ile desteklenmiştir.

Bu tez, 115F510 numaralı TÜBİTAK projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim süresince, tez çalışmalarım boyunca göstermiş olduğu bütün destek ve yardımlarından ötürü tez danışmanım Doç. Dr. Sedat BALLIKAYA'ya teşekkür ederim.

Ayrıca yine tez çalışmalarım boyunca yazılım ve kontrol konularında yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğretim Üyesi Hasan TİRYAKİ'ye teşekkür ederim.

Tez süresince olsun, geriye kalan tüm süreçlerde desteklerini esirgemeyen aileme şükranlarımı sunarım.

Tez çalışması boyunca yardım eden laboratuvar arkadaşlarım ve bana yardımcı olmuş diğer tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Haziran 2018

Mehmet Han İZGİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ.....	vii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
2.1. TERMOELEKTRİK OLAY	3
2.1.1. Seebeck Olayı	3
2.1.2. Peltier Olayı.....	4
2.1.3. Thomson Olayı	4
2.1.4. Değerlik Katsayısı (Figure Of Merit)	5
2.1.5. Termoelektrik Modülün Verimliliği	6
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	9
3.1. TERMOELEKTRİK MODÜLÜN TEORİK HESAPLAMALARI	9
3.2. KATALOG VERİLERİ ÜZERİNDEN HESAPLAMA	15
3.3. DENEYSEL VERİLER ÜZERİNDEN HESAPLAMA	17
3.4. DENEYSEL YÖNTEM	18
4. BULGULAR.....	22
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	34
KAYNAKLAR.....	37
EKLER	39
EK 1. Katalog verileri üzerinden yapılan hesaplamaların kodları	39
EK 2. Deneysel veriler üzerinden yapılan hesaplamaların kodları	41
ÖZGEÇMİŞ	48

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Z katsayısının yıllara göre değişimi.....	1
Şekil 2.1: Basit şematik termoelektrik çifti.....	3
Şekil 2.2: Yıllara göre ZT'nin değişimi	8
Şekil 3.1: Malzemenin dışında ve içinde ısı akışı	12
Şekil 3.2: Teorik hesaplamaların yazılım içerisindeki akış şeması.....	14
Şekil 3.3: Katalogdan alınan değerlerin yazılım içerisindeki akış şeması	16
Şekil 3.4: Deneysel veriler alındıktan sonra yazılım içerisindeki akış şeması	17
Şekil 3.5: Termoelektrik modül test cihazı	19
Şekil 3.6: Test cihazında sıcaklık değerlerinin girildiği bölüm	20
Şekil 3.7: Termoelektrik modülün konulduğu yer	20
Şekil 3.8: Modülden alınan akım ve gerilim değerleri.....	21
Şekil 4.1: 1. modülün deneysel bilgileri üzerinden karşılaştırma	24
Şekil 4.2: 2. modülün deneysel bilgileri üzerinden karşılaştırma	25
Şekil 4.3: 3. modülün deneysel bilgileri üzerinden karşılaştırma	26
Şekil 4.4: 4. modülün deneysel bilgileri üzerinden karşılaştırma	27
Şekil 4.5: 5. modülün deneysel bilgileri üzerinden karşılaştırma	28
Şekil 4.6: 6. modülün deneysel bilgileri üzerinden karşılaştırma	29
Şekil 4.7: 7. modülün deneysel bilgileri üzerinden karşılaştırma	30
Şekil 4.8: Katalogda verilen karakteristikler.....	32

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1: Teorik hesaplama için kullanılan değerler	22
Tablo 4.2: Teorik hesaplama sonucunda bir modül için elde edilen Z ve η değerleri	23
Tablo 4.3: 1. modülün deneysel verileri	24
Tablo 4.4: 2. modülün deneysel verileri	25
Tablo 4.5: 3. modülün deneysel verileri	26
Tablo 4.6: 4. modülün deneysel verileri	27
Tablo 4.7: 5. modülün deneysel verileri	28
Tablo 4.8: 6. modülün deneysel verileri	29
Tablo 4.9: 7. modülün deneysel verileri	30
Tablo 4.10: Modüllerin Z ve η değerleri-1.....	31
Tablo 4.11: Modüllerin Z ve η değerleri-2.....	31
Tablo 4.12: Katalogda verilen değerler	32
Tablo 4.13: Katalogda verilen değerler üzerinden bulunan Z ve η değerleri.....	33

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Termoelektrik modülün alanı
α	: Seebeck katsayısı
α_m	: Modülün Seebeck katsayısı
h	: Termoelektrik modülün uzunluğu
I	: Akım
J	: Akım yoğunluğu
κ	: Toplam termal iletkenlik
κ_e	: Termal iletkenlik elektron katkısı
κ_a	: Termal iletkenlik fonon katkısı
L	: Uzunluk
N	: Termoelektrik modüldeki bacak çifti sayısı
η	: Verimlilik
P	: Güç
ρ	: Özdirenç
R	: Direnç
R_m	: Termoelektrik modülün direnci
S	: İki farklı iletkenenden oluşan termoelementlerin Seebeck katsayısı
T	: Sıcaklık
T_a	: Termoelektrik modülün sıcak tarafının sıcaklığı
T_e	: Termoelektrik modülün soğuk tarafının sıcaklığı
τ	: Gevşeme
U	: Elektrik potansiyel farkı
V	: Potansiyel fark
V_{oc}	: Açık devre potansiyel fark
Z	: Termoelektrik Figure of Merit
σ	: Öziletkenlik
θ	: Termal direnç
q	: Isı
π	: İki farklı iletkenenden oluşan termoelementlerin Peltier katsayısı
ΔV	: Gerilim farkı

ΔT	: Sıcaklık farkı
q_a	: Emilen ısı miktarı (absorbing)
q_e	: Yayılan ısı miktarı (emitting)
π_a	: Termoelektrik modülün sıcak tarafının Peltier katsayısı
π_e	: Termoelektrik modülün soğuk tarafının Peltier katsayısı

Kısaltmalar	Açıklama
-------------	----------

TE	: Termoelektrik
----	-----------------



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİR TERMoeLEKTRİK MODÜLÜN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Mehmet Han İZGİ

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Sedat BALLIKAYA

Bir termoelektrik (TE) modülde Seebeck, Peltier ve Thomson etkileri gibi üç temel etki gözlenir. Thomson etkisi oldukça zayıf bir etki olması nedeniyle ihmal edilir. Bir termoelektrik modül yapıma biçimine göre soğutucu-ısıtıcı ya da elektrik jeneratörü olarak kullanılabilir. Bir modülün iç yapısında, birbirlerine elektriksel olarak seri termal olarak paralel bağlanmış belli sayıda n-tipi ve p-tipi yarı iletken çiftleri bulunur. TE modüller, alt ve üst yüzeyleri arasında sıcaklık farkı yaratıldığında elektrik üretirken, elektrik akımı verildiğinde ise akım yönüne bağlı olarak tersinir şekilde bir yüzeyi ısıtırken diğer yüzeyi soğumaya başlar. Termoelektrik malzeme esaslı bu modüller özelliklerinden dolayı günümüzde elektronik, uzay, tıp, otomotiv ve askeri gibi pek çok endüstride elektrik üretici (jeneratör) ya da soğutucu olarak kullanılmaktadırlar.

Termoelektrik modüllerin jeneratör özelliği, Seebeck etkisi prensibine göre çalışırken, ısıtma soğutma özelliği Peltier etkisi olarak bilinir. Atık ısıdan, örneğin araç egzoz gaz ısısından enerji üretilmesi başlıca uygulamalarından biridir. Elektronik devrelerin, sensörlerin soğutulması, TE soğutucuların güncel kullanım alanlarından biridir.

Klasik soğutucu ve elektrik üreteçlerine göre pek çok üstünlükleri vardır. Bunlar, sessiz çalışma, bakım gerektirmeme, herhangi toksik malzeme içermeme ve her türlü koşulda çalışabilmeleri gibi sıralanabilir. Bu önemli avantajlarına rağmen verimlilikleri henüz istenen

seviyede değildir. Dolayısıyla bu alanda yapılan çalışmaların birçoğu bu malzemelerin verimliliklerini artırmaya yöneliktir.

Ticari olarak satılan modüllerin başında Bi-Sb-Te esaslı yarıiletken malzemelerden oluşan modüller bulunmaktadır. Dünyada pek çok üretici tarafından geliştirilen bu modüller daha çok elektronik devre soğutucu (Peltier modüller) ya da küçük ölçekli enerji üretiminde kullanılmaktadır. Bu modüller farklı ya da aynı üretici tarafından aynı koşullarda, aynı malzemelerden üretilmiş olmalarına karşın gerçek zamanlı performans değerleri farklılık gösterebilmektedir.

Bu tez ile bu farklılığın anlaşılması ve nedenlerini ortaya koyacak MATLAB-GUIDE tabanlı bir Matematiksel model geliştirildikten sonra bu model ışığında gerçek zamanlı ölçülen modül parametreleri ile üreticiler tarafından verilen modül parametrelerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Tez çalışması dört aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, modülün iç yapısındaki bilinen değerleri kullanarak teorik hesaplamalar yapılmış ve bu hesaplar modele işlenmiştir. Bu hesaplar beş fiziksel işlem üzerinden yapılmıştır: Isı yayılımı, Joule ısısı, Peltier etkisi, Seebeck güç üretimi ve Thompson olayıdır. Tüm hesaplamalar modele işlendikten sonra varılmak istenen nokta bir modül için *verimlilik (η)*, *termoelektrik değerlik (Z) katsayısı ifadeleridir*. İkinci aşamada ise modülün üreticisi tarafından verilen katalogunda yazan değerler modelde işlenerek hesaplamalar yapılmıştır. Üretici tarafından yayımlanan katalogda verilen sıcak yüzeyin sıcaklık değerine göre oluşturabildiği azami sıcaklık farkı, azami akım değeri ve azami gerilim değeri yazmaktadır. Modelde kullanılan teorik hesaplamalar yardımıyla üretici tarafından sunulan parametreler modelde işlenerek o modül için *verimlilik (η)*, *termoelektrik değerlik katsayısı (Z)* parametreleri hesaplanmıştır. Üçüncü aşamada ise kendi oluşturmuş olduğumuz deney düzeneği ile ticari olarak satılan modüllerin sıcaklık farkına bağlı üretilen gerilim, akım ve güç gibi gerçek zamanlı testleri yapılmış, bu test sonuçları modelde işlenerek test modülü için *verimlilik (η)*, *termoelektrik değerlik katsayısı (Z)* hesaplanmıştır. Son aşamada ise gerçek zamanlı ölçümlerden elde edilen değerler, teorik hesaplamalardan bulunan değerler ve katalogda verilen parametrelerin modelde işlendikten sonra elde edilen verimlilik ve termoelektrik değerlik parametreleri karşılaştırılmıştır.

Haziran 2018, 61 sayfa.

Anahtar kelimeler: Termoelektrik modül, matematiksel modelleme, Seebeck etkisi, Matlab, simülasyon

SUMMARY

M.Sc. THESIS

THE MATHEMATICAL MODELLING OF A THERMOELECTRIC MODULE

Mehmet Han İZGİ

Istanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Sedat BALLIKAYA

A Thermoelectric module consist of three fundamental effects, Seebeck, Peltier and Thomson basically. Since Thomson effect is quite weak, it generally ignores. Thermoelectric modules are classified as cooler-heater or power generator according to the production goal. The inner structure of this module includes a number of n-type and p-type semiconductor pairs that connected electrically in serial and thermally in parallel. TE modules generate electric power in case of the temperature difference between the top and bottom surfaces, while it generates temperature gradient when an electric current is passed through it. Because of their unique properties, TE materials based these modules are currently using in many industries such as in electronic, space, medical, automotive, and military as power generator or cooler.

The power generation is working in principle of Seebeck effect while cooling-heating properties is also known as Peltier effect. Waste heat recovery such as converting wasted exhaust heat into the electric power is one of the main current applicaiton for power generation. Cooling electronic devices, sensors are one of the current popular application of modules for cooling.

The thermoelectric modules have several advantages in compare to classical cooler or power generator. These are, no vibration, no maintenance, not inclusion any toxic material, working in difficult conditions respectively. In spite of their many advantages, they still have limited efficiency. The improvement of efficiency is the main topic for researchers who work on this area.

Bi-Sb-Te based TE modules are currently commercial available state art modules. They are using as cooling-heating or generate power for different application. Even though, these TE modules fabricate by same producer at same conditions or include same composition, they may still show a different performance of characteristic.

In this thesis, we aim for developing a mathematical model based on MATLAB-GUIDE to further understand and analyze this discrepancy. In this model, catalog and actual performance of modules will compare by using created model. Our thesis consist of four steps. The first step is including the theoretical calculation in which known values of the inner structure of the module and all formula related TE module is embedded. These calculations were made via five physical processes: Heat diffusion, Joule heat, Peltier effect, Seebeck power generation and Thompson phenomenon. In the calculation result, the point to be reached is such as *efficiency (η)* and *thermoelectric figure of merit (Z)*. In the second step (calculation), all data from data sheet (from TE producer) were used in program and calculated *efficiency (η)* and *thermoelectric figure of merit (Z)*. The maximum temperature difference, maximum current value and maximum voltage and temperature difference parameters were used from data sheet of producer for calculation. In third step, the values TE modules data that was obtained by using the handmade thermoelectric module test system were used for calculation. Then the actual *efficiency (η)* and *thermoelectric figure of merit (Z)* were calculated by created program. In the last step, all calculated efficiency and thermoelectric figure of merit parameters were compared to interpret the discrepancy.

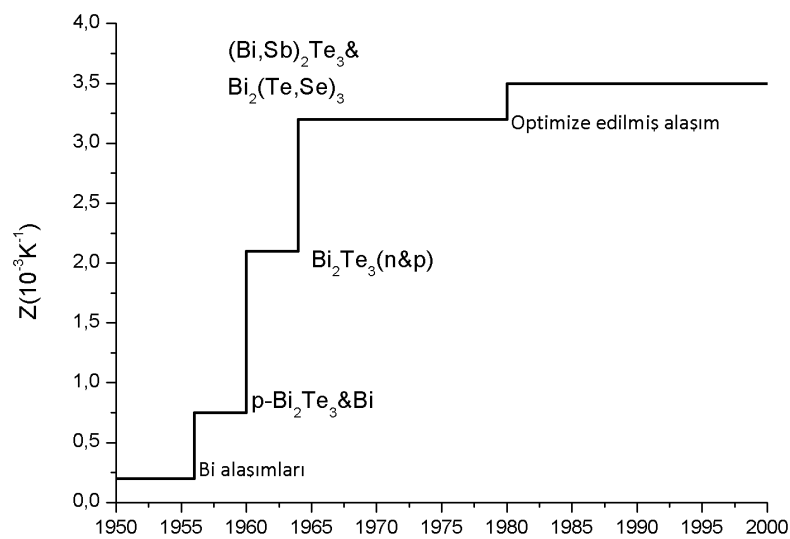
June 2018, 61 pages.

Keywords: Thermoelectric modules, efficiency, Seebeck effect, Peltier effect, Matlab, Guide

1. GİRİŞ

Her geçen gün soğutucu akışkanlara ve soğutma elektroniğine olan ilgi artmaktadır. Bu ilgiden ötürü de bilim ve teknolojiye alternatif yollar açılmıştır. Alternatif soğutma teknolojilerinden biri de termoelektrik sistemlerdir. Genel olarak birleştirilmiş parçaların elektriksel ve termal akımlarının kullanılması mantığına dayanır. Böyle sistemlerle sıcaklık farkından elektrik veya potansiyel farktan sıcaklık farkı üretmek mümkün hale gelir. Burada bu temel mekanizmalar ve uygulamasının modellenmesi konuyu oluşturmaktadır.

Termoelektrik malzemelerin fizik ve iç yapı bilimi iki dönemde derinlemesine araştırılmıştır. 1821'den 1851'e kadar olan yıllarda temel etkiler keşfedildi ve makroskobik olarak anlaşıldı. Bunların da güç üretimine ve soğutmaya uygulanabilirlikleri fark edildi. Bunlardan sonraki 80 yıl içerisindeki tek mühim katkı ise Altenkirch'in 1911 yılındaki ürettiği termoelektrik verimliliğidir. (Altenkirsch, 1909) Daha sonra 1930'ların sonuna doğru termoelektriğin mikroskobik bir anlayışına ve günümüzün materyallerinin gelişimine yol açan 20 yıllık bir ilerleme başladı. Bu ilerleme günümüzde malzeme ve modül üretimindeki iyileşmeler ile devam etmektedir. Aşağıda Şekil 1.1'de en yaygın TE bileşiklerden biri olan Bi-Sb-Te esaslı bileşikte değerlik katsayılarındaki (Z) iyileşmenin yıllara göre değişimi görülmektedir.



Şekil 1.1: Z katsayısının yıllara göre değişimi

Günümüzdeki araştırmaların elektronik soğutma uygulamalarını önemli ölçüde değiştirecek bir atılım yapıp yapmayacağını zamanın göstereceğini bilmekle beraber bu çalışmalarla bu ivmenin kazandırılması beklenmektedir. Elektrikle manyetizma arasındaki bağlantıyı Seebeck keşfetmiş olmakla beraber bu bağlantının içine manyetizmayı dâhil etti. Carnot ve Clausius'un çalışmalarından, Kelvin Peltier tarafından keşfedilen tersinir ısı akışının onunla ilişkili bir "entropi" ye sahip olması gerektiği sonucuna vardı. Seebeck tarafından keşfedilen katsayı, elektrik akımıyla ilişkili entropinin bir ölçütü olduğunu gösterdi. (Goldsmid, 2009) Termoelektrik malzemelerin daha iyi anlaşılması için kuantum teorisinin gelişmesi ve yarıiletken elektroniği teknolojisine uyarlanması beklenmektedir. Bu temellerden yararlanan termoelektrik araştırma ekipleri haklı olarak o zaman bilinen yarı iletkenlerin fizik ve malzeme bilimlerine yöneldi. Lakin mevcut çalışmalarda yeni ve daha fazla kimyasal karmaşıklığa sahip malzemelerin keşfi, mikron altı formatlarda bilinen materyallerin üretilmesiyle yine o zamandaki gibi araştırmacıları fizik ve malzeme bilimlerinde birleştirmektedir.

Modern dünyanın ciddi problemlerinden biri olması hasebiyle bu alternatif yollara başvurulmuştur. Özellikle dünya üzerinde kullanılan enerjinin yaklaşık yüzde sekseni fosil tabanlı yakıt kaynaklarından karşılandığı dikkate alındığında ve bu kaynakların gerek çevreye verdiği zararlar gerek yakın gelecekte tükenecek olması gerekse çıkarılmalarının maliyetli olması alternatif çevreci yenilenebilir enerji kaynaklarının bulunmasını kaçınılmaz kılmaktadır.

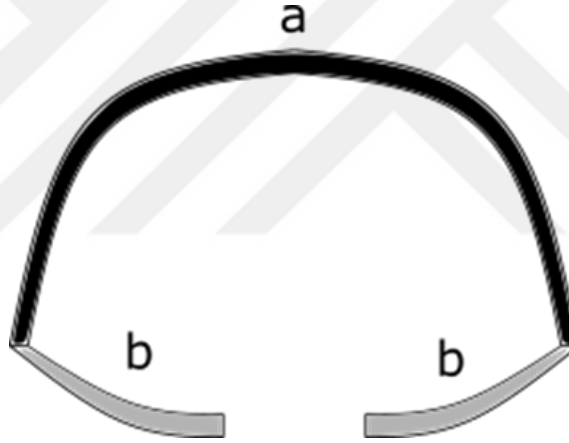
Teknolojinin gelişimiyle de beraber dünyanın enerji ihtiyacı da artmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın verilerine göre 50 yıl sonrası için enerji ihtiyacının iki katına çıkması beklenmektedir. Bu enerji ihtiyacını da tabii olarak büyük çoğunluğunu petrol, kömür ve doğal gaz karşılamaktadır. Lakin bu enerji türlerinin dünya üzerinde kısıtlı olmasından ötürü uzun vadede artık yeni enerji kaynakları bulunması veya olanın daha verimli hale getirilmesi çalışmaları devam etmektedir. Bu çalışmalar içerisinde termoelektrik malzemelerin enerji sağlama konusunda büyük bir rol oynayabileceği de son yıllarda ortaya çıkmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. TERMoeLEKTRİK OLAY

2.1.1. Seebeck Olayı

Termoelektrik etkilerin ilkinin Thomas Johann Seebeck, 1821 yılında keşfetmiştir. İki elektriksel iletkenin birleşim noktalarını farklı sıcaklıklarda tutarak bir elektrik akımını elde etmiştir. İki farklı iletken birleştirildikten sonra açıkta kalan diğer iki ucunu hassas bir voltmetreye bağlayıp birleşim noktalarından biri ısıtıldığında voltmetre küçük bir gerilim ölçmektedir. Kısacası sıcaklık farkından elektrik enerjisi elde etmeye Seebeck etkisi denmektedir. Bunun bir görseli Şekil 2.1’de görülmektedir (Goldsmid, 2009).



Şekil 2.1: Basit şematik termoelektrik çifti

$$\Delta V = V_a - V_b = \int_{T_2}^{T_1} S_{AB} dT = \int_{T_2}^{T_1} (S_A - S_B) dT \quad (2.1)$$

Seebeck olayında temel fiziksel olay şu şekilde gerçekleşmektedir: Sıcaklık farkına maruz bırakılan iletken yapıda sıcak bölgedeki serbest yüklü taşıyıcılar sahip oldukları kinetik enerji nedeniyle soğuk bölgeye geçerler ve geride net pozitif yüke sahip çekirdekleri bırakırlar. Bunun sonucunda bir elektriksel potansiyel artışı meydana gelir. Oluşan bu potansiyel artışı yük ayrışmasından doğan elektriksel alan ile dengelenir. (Rowe, 2005) Diğer bir deyişle, başlangıçta sıcak bölgeden soğuk bölgeye geçen taşıyıcılar yük ayrışması sonucu oluşan elektrik alanın katkısıyla soğuk bölgeden sıcak bölgeye de bir geçiş meydana getirirler. Belli

bir süre sonra o sıcaklık aralığı için elektriksel potansiyeldeki artış dengelenir. Soğuk bölgeye geçen taşıyıcı yoğunluğu sıcaklıkla orantılıdır (Holman, 1989).

2.1.2. Peltier Olayı

Seebeck'ten sonra Fransız Jean Christian Peltier ise ikinci termoelektrik etkiyi bulmuştur. Bunda ise termoelektrik çiftin üzerinden elektrik akımı geçirdikten sonra birleşim noktalarında akımın yönüne göre bir sıcaklık farkı (ısınma veya soğuma) oluşur. Bu etki de bir termometre ile birleşim noktası üzerinden prensip olarak ölçülebilir (Rowe, 1995).

2.1.3. Thomson Olayı

Seebeck ve Peltier etkisinden sonra William Thomson (Lord Kelvin) bu iki etkinin birbirine olan bağımlılığını 1855 yılında göstermiştir. Seebeck ve Peltier etkilerinin birbiri arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur. Thomson'un ortaya koymuş olduğu teori üçüncü bir termoelektrik etkinin olması gerektiğini söylemiştir. Thomson etkisi olarak geçen bu etki, bir iletken telden elektrik akımı geçirilmesi sonucu üretilen tersinir ısının oluşumu ile ilişkilidir ve bir sıcaklık gradyanı altında olması gerekmektedir. Bu etki, termoelektrik modüller için ciddi bir öneme sahip olmamakla beraber, ayrıntılı hesaplamalarda gözden çıkarılmamalıdır (Nolas et al., 2001).

William Thomson tarafından keşfedilen bu termoelektrik etki prensibine göre; bir iletkenden akım geçirildiğinde ve bu iletken sıcaklık gradyentine sahipse, iletkende ısı salınımı ile ısı soğurulması aynı anda meydana gelir. Çinko veya bakır gibi metallerde soğuk uç düşük potansiyelde bulunurken sıcak uç yüksek potansiyelde bulunur. Eğer ki akım sıcak uçtan soğuk uca doğru verilirse bu iletkende ısı yayılımı meydana gelir. Buna Pozitif Thomson Olayı denmektedir. Metaller demir, nikel türünden bir metal olursa çinko veya bakırda oluşan olayın aksi gerçekleşir. Yani demir, nikel gibi maddelerde sıcak uç düşük potansiyeldekken soğuk uç yüksek potansiyelde bulunur. Yine aynı şekilde akım sıcak uçtan soğuk uca doğru verildiğinde akım düşük potansiyelden yüksek potansiyele doğru akar. Burada da ısı emilimi söz konusu olur. Bu etkiye de Negatif Thomson Olayı adı verilmiştir (Nolas et al., 2001, Rowe, 2005).

Eğer ki akım yoğunluğu J olan bir homojen iletkenin geçerse, birim hacim başına ısı üretimi şu şekilde tanımlanır:

$$q = \rho J^2 - \mu j \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

Burada ρ materyalin öz direncini, μ ise Thomson katsayısını, $\frac{dT}{dx}$ ise kablo boyunca olan sıcaklık gradiyentini göstermektedir. Denklem (2.1.2) ifadesinde birim hacim başına üretilen Joule ısı $\rho J^2 = \frac{I^2 R}{V}$ vardır. $\mu j \frac{dT}{dx}$ ifadesiyse Thomson ısıdır ve akım yoğunluğunun yönüne göre değişkenlik göstermektedir. Bu olay tersinir bir durumdur.

2.1.4. Değerlik Katsayısı (Figure Of Merit)

Termoelektrik malzemelerden elektrik enerjisi üretimi konusundaki ilk çalışmalar 19. yüzyılın sonlarında gerçekleşmiştir. Bu çalışmalar Rayleigh tarafından yapılmış olsa da bu elektrik enerjisini üreten mekanizmaların verimlilikleri VE performansları hakkındaki çalışmalar 20. yüzyılın başlarında E. Altenkirsch tarafından yapılmıştır (Altenkirsch, 1909). E. Altenkirsch'in yapmış olduğu çalışmalardan bu bahsi geçen termoelektrik malzemelerden azami oranda elektrik enerjisi elde edebilmek için termoelektrik malzemenin iç yapısının mümkün olduğunca kadar iyi olması gerekmektedir. Azami oranda ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşebilmesi için gerekli bir durumdur. Böyle olması beklenen iyi bir termoelektrik malzemede elektriksel iletkenliğin, termal gradiyentin ve bu gradiyente bağlı olan Seebeck katsayısının yüksek olması beklenmektedir. Diğer taraftan ise Joule ısının ve termal iletkenliğin mümkün olduğunca düşük olması beklenmektedir. Bu verilere dayanarak Altenkirsch bir formül geliştirmiştir:

$$Z = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} \quad (2.3)$$

Bu formülde Seebeck katsayısını $S(\mu V/K)$, termal iletkenliği $\kappa(W/mK)$ göstermektedir. Bu verilerden yararlanarak bulunan $Z(K^{-1})$ ise termoelektrik terminolojisindeki “figure of merit”i yani değerlik katsayısını tanımlamaktadır. Bahsedilen termoelektrik ifade genel anlamda çoğu zaman boyutsuz ifade edilen şekliyle de gösterilebilir. Bu da ZT diye geçmektedir. T ise mutlak sıcaklığı göstermektedir. ZT , termoelektrik modüllerin verimliliğini belirleyen en mühim kıstaslardan biridir ve termoelektrik malzemenin niteliği hakkında bilgi verir. Altenkirsch'in deneysel verilerle bulduğu sonuçta geçen termal iletkenlik, κ , kendi içinde de iki kısma ayrılmaktadır. Bunlar elektronik katkı ve örgü katkısıdır (Altenkirsch, 1909).

2.1.5. Termoelektrik Modülün Verimliliği

İstatistiki sonuçlar atık ısı enerjisinin % 60'ından fazlasının boşa harcandığını göstermektedir. Doğrudan ve geri dönüşlü olarak enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen yüksek performanslı termoelektrik malzemeler araştırma enstitülerinin ilgisini arttırmaktadır (Zhang and Zhao, 2015). Termoelektrik sistem; geniş sıcaklık aralığında çalışabilmesi, küçük boyutları, yüksek güvenilirliği, kirlenici olmaması ve fizibilite avantajları ile çevre dostu enerji dönüştürme teknolojisidir. Bununla birlikte, termoelektrik cihazların verimliliği Carnot verimliliğine rakip olacak kadar yüksek değildir (He et al., 2013, Kanatzidis, 2010). Boyutsuz bir Figure of Merit (ZT), termoelektrik performansın bir sembolü olarak tanımlanır. Teorik olarak, yüksek bir ZT elde etmek için Seebeck katsayısı (α) ve elektriksel iletkenlik (σ) büyük olmalı, termal iletkenlik (κ) minimuma indirilmelidir (Sootsman et al., 2009).

Tarihsel olarak, 1821 yılında Seebeck, sıcaklık farkı ile elektrik enerjisi üretilebileceğini keşfetti. Bu olay, basitçe şematize edilebilen Seebeck etkisi olarak adlandırılır, burada uygulanan bir sıcaklık farkı, malzemedeki (elektronlar ve/veya delikler) yük taşıyıcılarını sıcak taraftan soğuk tarafa yaymak için yönlendirir. Devredeki bir akım akışı, ortalama ZT'nin bir fonksiyonu olarak güç üretim verimliliğini gösterir (Kanatzidis, 2010).

$$\eta_p = \frac{T_h - T_c}{T_h} \left[\frac{\sqrt{1 + ZT_{ave}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{ave}} + T_c/T_h} \right] \quad (2.4)$$

Burada η verimlilik, ZT, boyutsuz termoelektrik değerlik sayısı, T_h ve T_c sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıklarını göstermektedir. ZT'nin hem n-tipi hem de p-tipi iki bacağın ortalama değeri olduğu durumda (ZT_{avg}), T_h ve T_c arasındaki sıcaklığa bağlı ZT eğrisi üzerinde, bacak başına ZT'nin ortalaması alınır, T_h ve T_c sırasıyla sıcak ve soğuk uçlar sıcaklığıdır (Li et al., 2010).

$$ZT_{ave} = \frac{1}{T_h - T_c} \int_{T_c}^{T_h} ZT dT \quad (2.5)$$

Buradan daha yüksek bir ZT ve daha büyük bir sıcaklık farkının daha yüksek verim üretilebileceği anlaşılmaktadır. $ZT_{ave} = 3.0$ ve $\Delta T = 400K$ ise, enerji üretim verimliliği η_p 'nin geleneksel ısı motorlarına benzer şekilde % 25'e ulaşabileceğini görmekteyiz. Seebeck etkisi, termoelektrik enerji üretim modelidir ve bazı aşırı durumlarda veya özel durumlarda,

termoelektrik teknolojisi vazgeçilmez bir rol oynar. Bu prensiple çalışan Radyoizotop termoelektrik jeneratörler (RTG'ler) uzun zamandır uydular ve Apollo 12, Voyager 1 ve Voyager 2 gibi uzay problemlerinde kullanılmıştır. Günümüzde, termoelektrik enerji üretimi, ileri bilimsel alanlarda artan bir uygulama haline gelmektedir ve bu termal kaynaklar, yakıt, atık ısı, jeotermal enerji, güneş enerjisi ve radyoizotop olabilir (Zhang and Zhao, 2015).

Seebeck etkisinin aksine, Peltier etkisi, elektrik enerjisinden ısı farkı üretmektir. Bir Peltier soğutucunun verimliliği ise aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$\eta_c = \frac{T_h}{T_h - T_c} \left[\frac{\sqrt{1 + ZT_{ave}} - T_h/T_c}{\sqrt{1 + ZT_{ave}} + 1} \right] \quad (2.6)$$

Termoelektrik enerji üretimi ile benzer şekilde, daha yüksek bir ZT değeri daha büyük bir termoelektrik soğutma verimi η_c üretecektir. Örneğin, $ZT_{ave} = 3.0$ ve $\Delta T = 20K$ olduğunda η_c % 6'ya ulaşabilir. Peltier etkisi, askeri kullanıma yönelik bazı elektronik cihazlarda (termal kameralar, hassas optik cihazlar ve lazerler) hassas soğutucular olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Termoelektrik soğutucular ayrıca bilgisayar bileşenlerinin sıcaklıklarını tasarım sınırları içinde tutabilmek için veya yoğun kullanım sırasında kararlı çalışmayı sürdürmek için de kullanılabilir. Bir lazer veya bir bileşenin dalga boyunun yüksek bir sıcaklığa bağlı olduğu optik fiber iletişim uygulamaları için Peltier soğutucuları, sabit bir sıcaklığı muhafaza etmek ve böylece cihazın dalga boyunu stabilize etmek için kullanılır.

Bu ifadelerden yola çıkarak soğutucu ya da elektrik üretici olarak kullanılan bir termoelektrik modül için genel verimlilik ifadesi kısaca şöyle gösterilir:

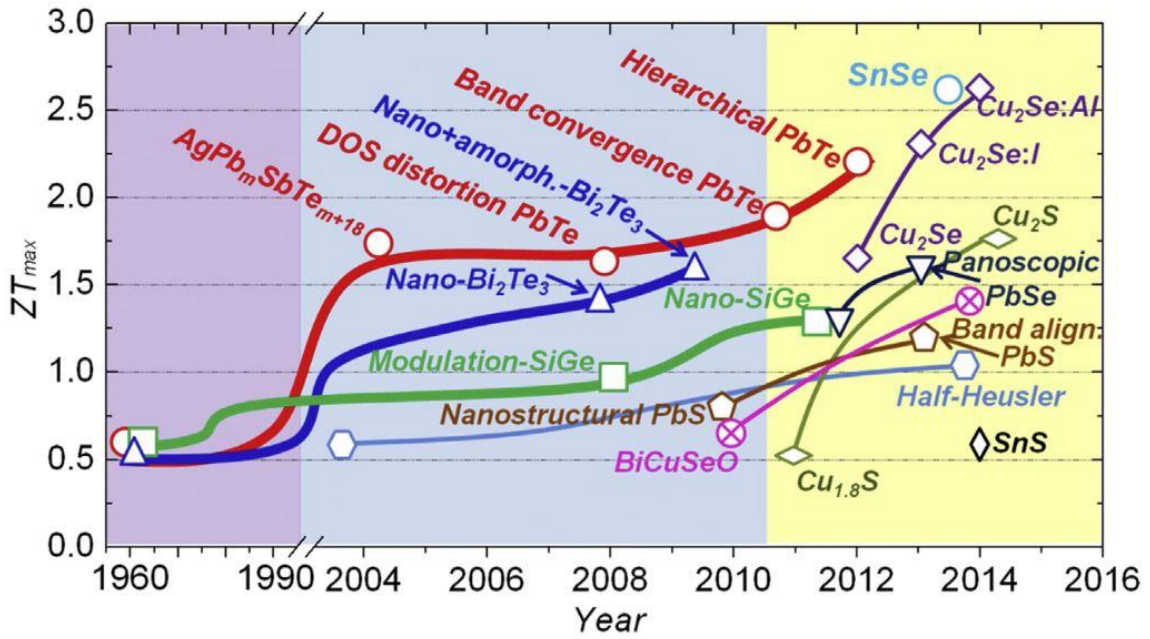
$$\eta = \frac{\text{bataryaya aktarılan enerji}}{\text{soğurulan ısı enerjisi}} = \frac{w}{q} \quad (2.7)$$

Sıcak ve soğuk noktalar arasındaki sıcaklık farkı $T_h - T_c$ ile gösterilirse bu farktan oluşan uçlar arasındaki potansiyel fark $\Delta V = S_{AB}(T_H - T_C)$ olur. Bu gerilimi ortaya çıkardığı akımı dirençle çarparak elde edebiliriz. Bu da $I = S_{AB}(T_H - T_C)/(R + R_B)$ olur. Bu formülde R termoelementlerin direncini, R_B ise batarya direncini göstermektedir. Bir diğer bilinmesi gereken durum ise soğurulan enerjidir. Bu da $q = \kappa(T_H - T_C) + S_{AB}IT_H$ ile gösterilir. Buradan verimlilik şu hali alır:

$$\eta = \frac{I^2 R_B}{\kappa(T_H - T_C) - S_{AB} I T_H} \quad (2.8)$$

İdeal bir termoelektrik makine için bilinen Carnot ifadesi bu denklemle birleştirilirse ve batarya direnci de buna göre seçilirse maksimum verimlilik şöyle gösterilir:

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



Şekil 2.2: Yıllara göre ZT'nin değişimi

Kompleks parametre ilişkileri, ZT'yi arttırmayı zorlaştırmaktadır. Ancak, geçtiğimiz birkaç on yıl boyunca, termoelektrik alanında güç faktörünü geliştirmek ve termal iletkenliği azaltmak için çeşitli stratejiler içeren ve termoelektriklerin Rönesans dönemine dönüşmesini sağlayan büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Şekil 2.2, yayınlama yılı başına bildirilen ZT değerlerini özetlemektedir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, olağanüstü fiziksel ve kimyasal özellikler nedeniyle, PbTe, termoelektriklerin tarihi boyunca incelenen en çekici materyallerden biridir.

TE malzeme teknolojisinde hızlı ilerlemelere karşın TE modül teknolojisinde halen aynı oranda hız kazanılamamıştır. Şöyle ki, aynı üretici ve aynı hammaddeden üretilen TE modüller farklı performans değerleri gösterebilmektedir. Bu tezin amacı bu farklılığın oluşmasına neden olan faktörleri ortaya koymaktır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. TERMoeLEKTRİK MODÜLÜN TEORİK HESAPLAMALARI

Termoelektrik modülde yer alan beş ana fiziksel süreç vardır. Bunlardan biri **Termal konveksiyon** olup fiziksel parametre olan termal iletkenlik katsayısı - k (W/Km) – ile tanımlanır. Termal iletkenlik katsayısı her bir bacağın termal iletkenliği ve geometrisi ile ilişkilidir (Lineykin and Ben-Yaakov, 2005). θ (K/W) bacak çiftin termal direnci:

$$\theta = \frac{1}{k} \frac{h}{A} \quad (3.1)$$

$$T = \theta q \quad (3.2)$$

olup burada h/A geometri faktörü, h - çiftin yüksekliği (m), A - kesit alanı (m^2), T - sıcaklık (K) ve q - ısı (W) olarak tanımlıdır. Bir diğer termoelektrik fiziksel işlem ise **Joule ısısı** olup rezistif elemanların içerisinde bir akım geçmesiyle oluşan ısı yayılımıdır. Bir çiftin elektrik direnci R :

$$R = \rho \frac{h}{A} \quad (3.3)$$

$$q_j = I^2 R \quad (3.4)$$

olup burada ρ - malzemenin (Ωm) direnci, q_j - Joule ısısı (W), I - elektrik akımı (A) olarak tanımlıdır. Modül içerisinde gerçekleşen bir diğer fiziksel olay ise Peltier etkisi (akım ile ısıtma/soğutma) olup, iki farklı iletken malzemeden oluşan bir yapıdan bir elektrik akımı geçirildiğinde iletkenlerin birleşim noktalarında oluşan ısı absorpsiyonu veya yayılımı olayına denir. Birleşim noktası tarafından emilen / dağıtılan ısı şu şekilde ifade edilir:

$$q_p = \pi I \quad (3.5)$$

Burada π (V), belirli bir malzeme çiftine karşılık gelen sıcaklığa bağlı bir Peltier katsayısıdır. Modül içerisinde gerçekleşen bir başka fiziksel olay ise Seebeck etkisidir (Lineykin and Ben-Yaakov, 2007). Burada ise iki farklı iletkenin birleşim noktaları farklı sıcaklıklarda tutulduğunda iletkenin uçları arasında bir potansiyel farkının gözlemlenmesi olayıdır. Diğer bir deyişle Peltier olayının tersidir. Seebeck olayı,

$$\pi = aT \quad (3.6)$$

ile ifade edilir. Burada a (V/K) Seebeck katsayısıdır.

İki bacağın birleşim noktaları arasındaki potansiyel fark şöyle olur:

$$U = \pi_a - \pi_e = a(T_a - T_e) = a\Delta T \quad (3.7)$$

Burada ise $\pi_{a/e}$ emilen/yayılan jonksiyonların potansiyeli, $T_{a/e}$ ise o jonksiyonların sıcaklığı olarak tanımlıdır.

Son olarak modül içerisinde gerçekleşen termoelektrik olay ise Thomson olayıdır. Thomson katsayısı, $\tau = da/dT$ (V/K²) ile ifade edilir. Bu etki çok küçük olduğu için hesaplamalarda ihmal edilir.

Termodinamiğin birinci kanununu takiben termoelektrik modülün her iki tarafı için de enerji dengesi ifade edilebilir. Isı emen taraf için şöyle yazılabilir:

$$q_a = \frac{\Delta T}{\theta_m} + a_m T_a I - \frac{I^2 R_m}{2} \quad (3.8)$$

Isı yayan taraf için aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$q_e = \frac{\Delta T}{\theta_m} + a_m T_e I + \frac{I^2 R_m}{2} \quad (3.9)$$

$$a_m = aN \quad (3.10)$$

$$R_m = RN \quad (3.11)$$

$$\theta_m = \theta N \quad (3.12)$$

Burada q_a absorblanan ısı enerjisini, q_e yayımlanan ısı enerjisi miktarını, N çift sayısını, T_a ve T_e ise ısı yayan ve emen taraftaki sıcaklık değerlerini göstermektedir. Ayrıca a_m modül Seebeck katsayısını, R_m modül elektriksel direncini ve θ_m ise modül termal direncini göstermektedir. ΔT ise $T_e - T_a$ olarak tanımlıdır. Modülün ürettiği elektrik potansiyel farkı U olarak tanımlanmıştır:

$$U = a_m T_e - a_m T_a = a_m \Delta T \quad (3.13)$$

Termoelektrik elemanın bir tarafına sabit bir ısı akısı uygulamakla çıkış gücü için bir denklem türetilir. (Maciá, 2015) Bu denklem termoelektrik eleman geometrisine ve malzeme parametrelerine bağlıdır. Modül boyunca termal direnci hesaplamak için kompozit duvar yaklaşımı kullanılmıştır. (Meydbray et al., 2005) Modülün toplam termal direnci aşağıdaki şekildedir;

$$R_{toplamlam} = \frac{L}{K_\epsilon A + K_A(S - A)} \quad (3.14)$$

Modüldeki termal transferden ötürü iletkenlik aşağıdaki gibidir;

$$q_{iletkenlik} = \frac{T_H - T_C}{R_{toplamlam}} = \frac{[K_\epsilon A + K_A(S - A)](T_H - T_C)}{L} \quad (3.15)$$

Modül üzerindeki mevcut etkiler dâhil toplam ısı transferi aşağıdaki gibi verilir:

$$q = q_{iletkenlik} + q_{Peltier} + q_{direnc} + q_{Thomson} \quad (3.16)$$

Thomson ısı akısı sıcaklığa bağlı olan Seebeck katsayısına bağlıdır ve şöyle ifade edilir:

$$q_{Thomson} = \pm \int_{T_C}^{T_H} T \frac{d\alpha}{dT} IdT \quad (3.17)$$

Burada K_ϵ termal iletkenlik elektron katkısı, K_A termal iletkenlik fonon katkısı, S Seebeck katsayısı, A alanı ifade etmektedir. Bu etki göz ardı edilebilir çünkü sıcaklık gradyenleri TEG'ler tarafından sadece birkaç derece olarak algılanır. Seebeck katsayısı analizi etkileyecek kadar değişmeyecektir. (Lee, 2016) Modül üzerinden dirençli ısı transferi aşağıdaki gibi verilir:

$$q_{direnc} = \frac{1}{2} I^2 r \quad (3.18)$$

Bu etki de ihmal edilebilir çünkü modüller üzerinde çok küçük akımlar oluşur. Düşünülen etkili ısı transferi de şöyle gösterilmiştir:

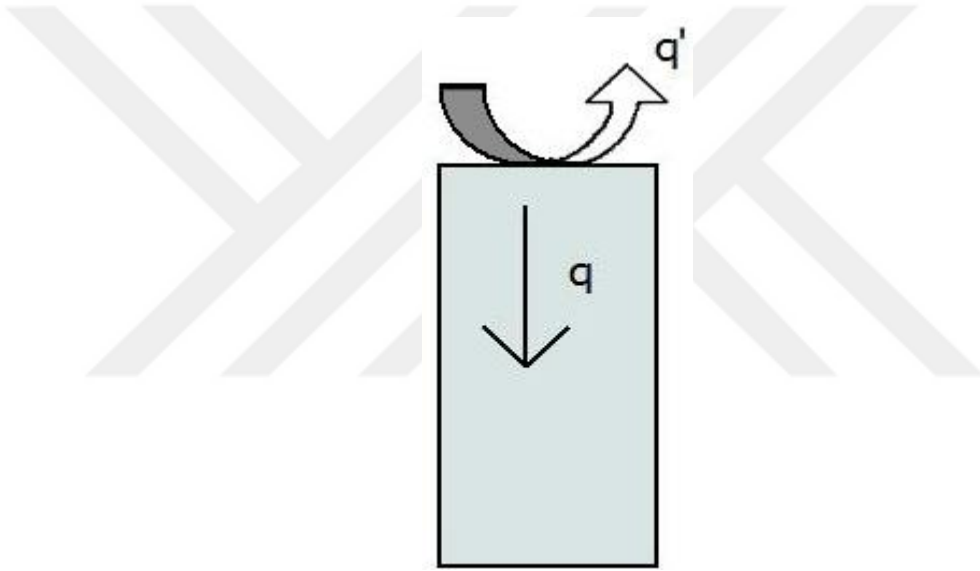
$$q = q_{iletkenlik} + q_{Peltier} = \frac{[K_\epsilon A + K_A(S - A)](T_H - T_C)}{L} + a T_C I \quad (3.19)$$

Kararlı durumda, bir katıdan geçen ısı akışı, Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, katı tarafından yayılan ısı akışı ile aynıdır. Termal aktarımın (q') tamamen konvektif olduğu kabul edilir. Verilen formülleri kullanarak:

$$\frac{V}{R_{el}} = I, \quad a\Delta T = V, \quad \frac{a(T_H - T_C)}{R_{el}} = I, \quad \frac{\rho L}{A} N^2 = R_{el} \quad (3.20, 3.21, 3.22, 3.23)$$

q ve q' hesaplamalarıyla şunlar elde edilir:

$$US(T_C - T_A) = \frac{[K_\varepsilon A + K_A(S - A)](T_H - T_C)}{L} + \frac{Aa^2 T_C (T_H - T_C)}{LN^2 \rho} \quad (3.24)$$



Şekil 3.1: Malzemenin dışında ve içinde ısı akışı

Eşleşen yük ile çıkış gücü aşağıdaki gibi verilir:

$$P = \frac{V_{oc}^2}{4R_{el}} = \frac{a^2(T_H - T_C)^2 A}{4\rho L N^2} \quad (3.25)$$

3.24 ve 3.25 denklemlerini kullanarak:

$$L_{opt} = \frac{N^2 \rho (K_\varepsilon A + K_A(S - A)) + Aa^2 T_H}{USN^2 \rho} \quad (3.26)$$

bulunur. Bu denklem, termoelektrik modül parametreleri ile ilgili son denklemdir. Bu TE bacak için en uygun uzunluk ifadesinin diğer parametreler (ısı transfer katsayısı ve modülün elektriksel direnci gibi) ile ilişkisini ortaya koymaktadır. Bu denklemden yola çıkarak, ısı iletimi açısından incelendiğinde uzun bacakların kullanılması iki yüzey arasındaki sıcaklık düşüş farkını artıracak için modülde uzun bacak kullanmak avantajlıdır. Ancak elektriksel açısından incelendiğinde ise bacak boyu ne kadar kısa olursa elektriksel direnci o kadar düşük olacağından kısa bacakların kullanılması avantajlı olabilmektedir. Dolayısıyla bu denklemler kullanılarak bir TE modülden optimum performans elde etmek için ideal bacak boyutunun ne olabileceği belirlenebilir. (Mitrani et al., 2005, Reddy et al., 2013)

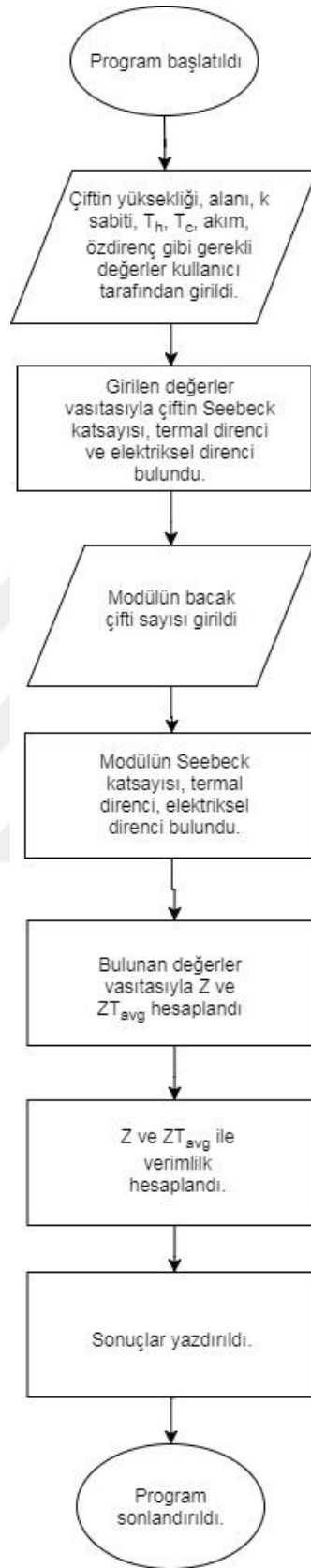
Termoelektrik modül üretici firmaların yayınladığı kataloglarda belli başlı bilgiler bulunmaktadır. ΔT_{max} ; seramik plakalar arasında oluşturulan azami sıcaklık farkıdır. I_{max} , azami sıcaklık farkında oluşan azami akımdır. U_{max} , azami sıcaklık farkıyla oluşturulan azami akımın oluşturduğu gerilimdir. T_h ise modülün sıcak tarafının sıcaklığıdır. Bu bilgilerle bir modülün gerekli hesaplamaları yapılabilir. (Lineykin and Ben-Yaakov, 2005)

$$Z = \frac{\alpha_M^2 \theta_M}{R_M} \quad (3.27)$$

$$\alpha_M = \frac{U_{max}}{T_h} \quad (3.28)$$

$$R_M = \frac{U_{max}}{I_{max}} \frac{(T_h - \Delta T_{max})}{T_h} \quad (3.29)$$

$$\theta_M = \frac{\Delta T_{max}}{I_{max} U_{max}} \frac{2T_h}{(T_h - \Delta T_{max})} \quad (3.30)$$

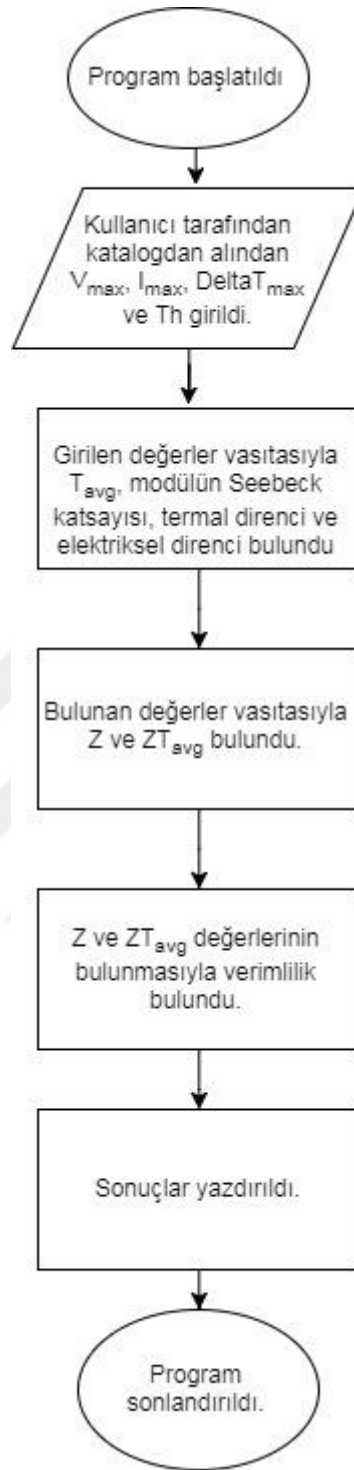


Şekil 3.2: Teorik hesaplamaların yazılım içerisindeki akış şeması

3.2. KATALOG VERİLERİ ÜZERİNDEN HESAPLAMA

Yukarıdaki temel olaylar kullanılarak ticari olarak satılan termoelektrik modüllerin katsayıları aşağıdaki MATLAB’da işlenerek Ek 1’deki kodlamalar yazılmıştır (Tsai and Lin, 2010).

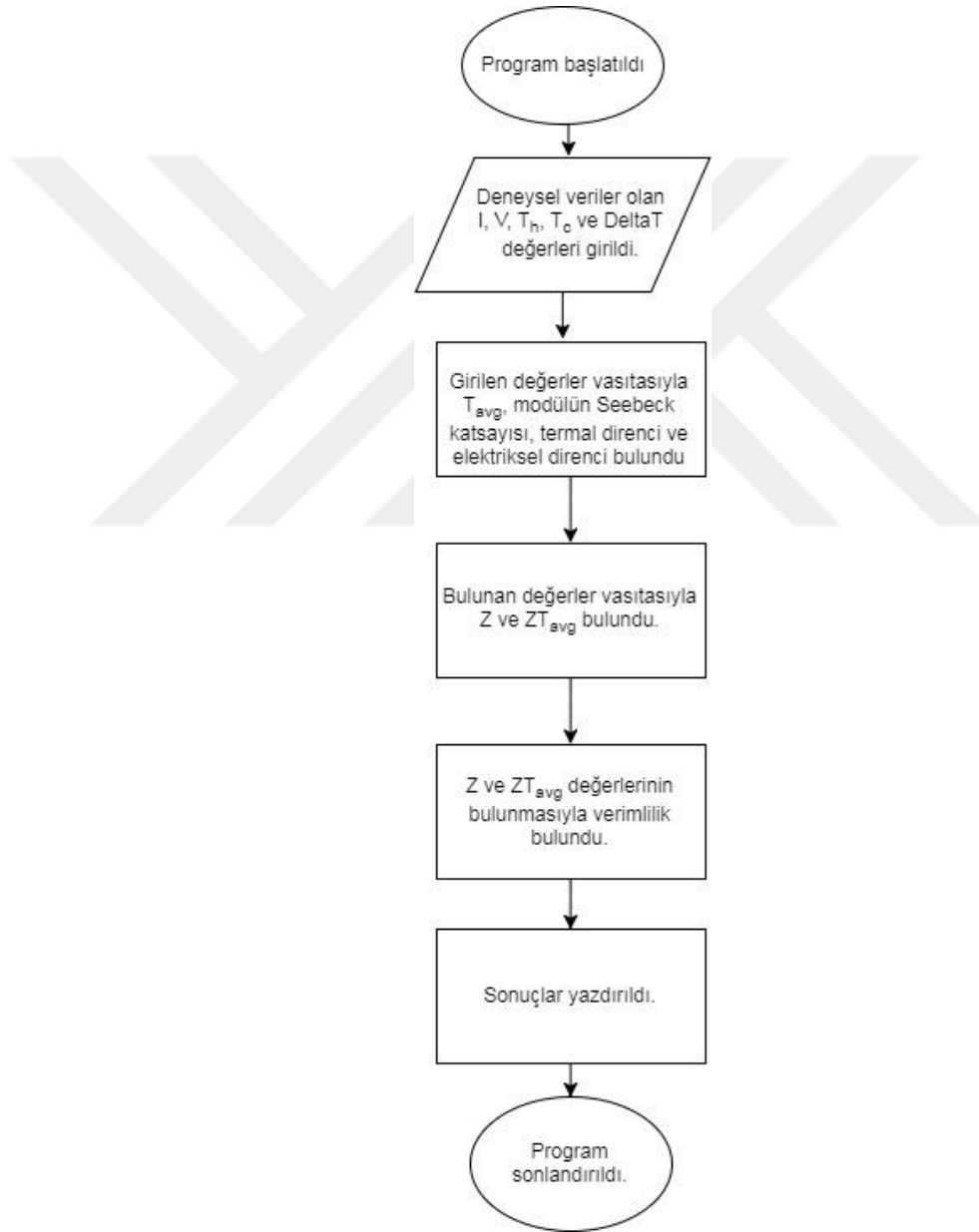
Bu girişlerle beraber MATLAB üzerinde m file üzerinde hesaplamalar yapılmıştır. İstenen verileri aldıktan sonra önceden tanımlanan teorik hesaplamalar yazılımda işlenerek program haline getirilmiştir. Program haline geldikten sonra tek tek hesaplamak yerine yazılıma hesaplatma yolu tercih edilmiştir. Bu bölümde hesaplanan kısım ise teorik bölümdür. Elde edilmesi istenen verilerin ilk aşamasıdır. MATLAB uygulamasının GUIDE kısmında ise yine bu formüller kullanılmıştır. Bu formülleri kullanarak bir program yazılması amaçlanmıştır. MATLAB programının m file üzerinden yazılmasında eksiklikler görüldüğü için GUIDE kısmına geçmek icap etmiştir. MATLAB uygulamasının m file ile yazılım kısmında istenen girişlerin çok sayıda olmasından ötürü girilmiş olan değerlerin değiştirilebilmesi mümkün değildir. Arzu edilen ise herhangi bir değişkenin diğerlerini katsayıları değiştirmeden üstünde gerekli ayarlamalar yapılmasıyla nasıl bir değişim yaptığını gözlemlemektir. Maalesef m file üzerinde bu değişimler zor olduğu için m file üzerinde çok durulmamıştır. Ancak hataların görülebilmesi için başta atılması gereken bir adım olduğundan ötürü yapılmıştır. MATLAB’ın GUIDE kısmının yazılım kısmında ise başta programın arayüzü tanımlanmalıdır. Bunun için ihtiyaç olabilecek bütün ekipmanlar GUI kısmında bulunmaktadır. Bu arayüze buton, yazı yazma kısmı, sonuç kısmı, sınırlar, arka plan rengi gibi bütün şeyler arzu edildiği miktarda, şekilde konulmuştur.



Şekil 3.3: Katalogdan alınan değerlerin yazılım içerisindeki akış şeması

3.3. DENEYSEL VERİLER ÜZERİDEN HESAPLAMA

Bu bölümde MATLAB-Guide kısmında yazılan programı daha da geliştirme ve ayrıntısını arttırma çabasına girilmiştir. Burada önceki yazılımdan farklı olarak bulunması istenen sonuçların deneysel veriler üzerinden elde edilmesi yoluyla yapılmasıdır. Bu deneysel verilerin girişleri, çıkışları ve formülizasyonları değişkenlik göstermekle beraber yapılan yazılım Ek 2’de verilmiştir.



Şekil 3.4: Deneysel veriler alındıktan sonra yazılım içerisindeki akış şeması

3.4. DENEYSEL YÖNTEM

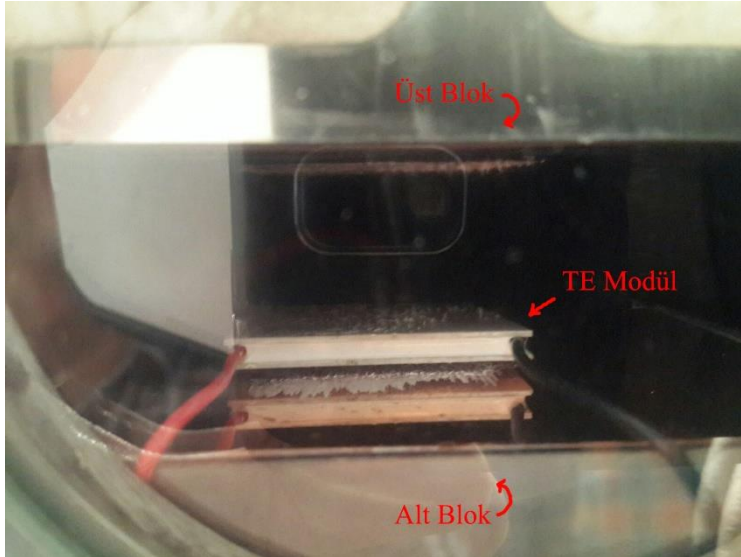
Deney düzeneği Şekil 3.2’de gösterildiği gibi kapalı bir hazne içerisinde basınç ve sıcaklıkla kontrol edilebilen 10x10 cm şeklinde iki adet bakır bloktan oluşmaktadır. Üst blok içerisinde sıcaklık artışını sağlayan üç adet direnç teli ve sıcaklığı düşürmek için 2 adet giriş ve çıkışı olan su boruları bulunmaktadır. Ayrıca üst blokta biri direnç tellerine yakın diğeri de modüle temas edecek yüzeye yakın olmak üzere iki adet termoçift bulunmaktadır. Direnç tellerine yakın olan termoçift, üst blok sıcaklık değerini ayarlamak için, yüzeye yakın olan kısımdaki ise modül üst yüzey sıcaklığını (T_h) okumak için kullanılmaktadır. Alt blokta ise yüzeye yakın kısımda yerleştirilmiş bir adet termoçift ve bloku sabit sıcaklıkta tutmak için 2 adet giriş ve çıkışı olan su kanalları bulunmaktadır. Alt blok sabit konumda tutulurken üst blok pünomatik bir desteğe bağlı olarak aşağı yukarı ayarlanabilmektedir. TE modüller bu iki blok arasına yerleştirilerek ölçümler alınmaktadır. Bu çiftlerin sıcaklık göstergeleri ise üstteki termoçift için üstteki gösterge, sol alttaki gösterge yüzeye yakın olan üst termoçift sıcaklığını sağ alt gösterge ise alt blok sıcaklık değerini göstermektedir. Alt ve üst blokun temas etmesiyle modülün sıcaklık farkından dolayı ürettiği potansiyel fark ve akım değerleri için bir adet dijital multimetre kullanılmıştır. TE modülün her iki yüzeye maksimum temasını sağlamak için modül bloklara temas ettikten sonra 0.2-0.3 bar basınç uygulanmıştır. Burada 1 bar = 35 kiloya karşılık gelmektedir. Sistemde üstteki bakır blok basınçla hareket ettirilmektedir. Cihazın üstündeki manometre ise vakum işlemi için gereklidir. Hava çıkışı yaptırılarak deney setinde havasız ortam için de ölçüm yapılabilmektedir. Tuşlardan birincisi kompresörden gelen basıncı ayarlamaktadır. İkincisi presin aktifliğini kontrol etmektedir. Sıcaklık ayarları ise göstergelerin altında bulunan tuşlarla yapılmaktadır. El yapımı deney düzeneğinin iç ve dış yapısına ait farklı görseller aşağıda verilmiştir.



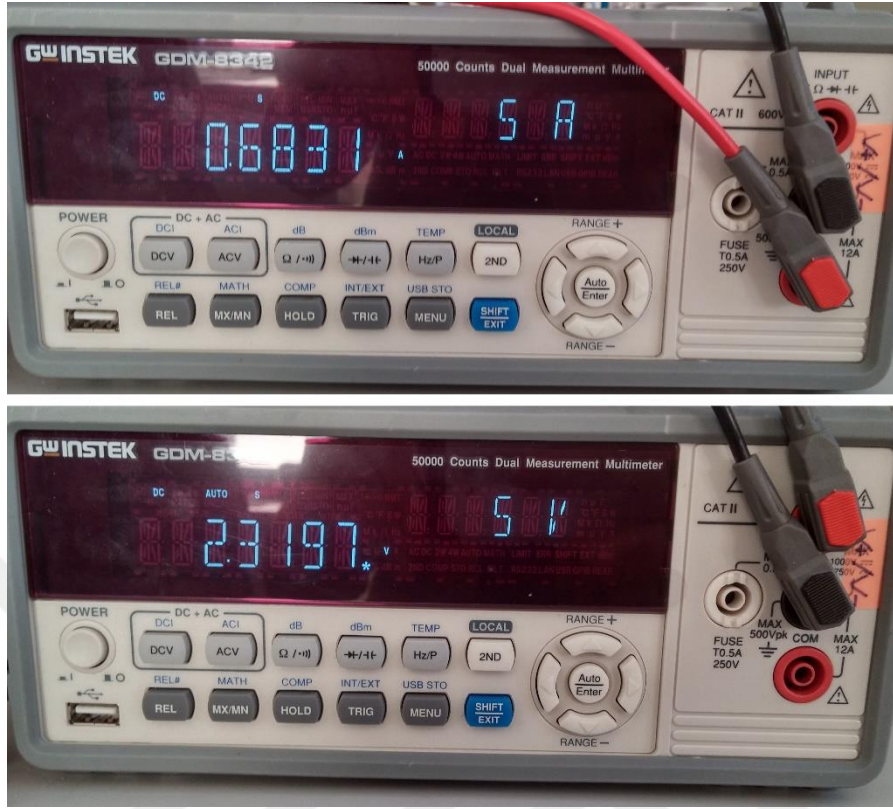
Şekil 3.5: Termoelektrik modül test cihazı



Şekil 3.6: Test cihazında sıcaklık değerlerinin girildiği bölüm



Şekil 3.7: Termoelektrik modülün konulduğu yer



Şekil 3.8: Modülden alınan akım ve gerilim değerleri

4. BULGULAR

Teorik hesaplama için gerekli olan değerler Seebeck katsayısı, elektriksel ve termal iletkenlik katsayıları Tablo 4.1’de verilmiştir. Bu tablolara göre modüllerin teorik olarak verimlilik ve değerlik hesabı yapılmıştır. Tablo 4.1’de verilen değerler kendi laboratuvar ortamımızda test edilen ve ticari olarak kullanılan p tipi Sb_2Te_3 esaslı bileşiğine ait değerleridir. Bu değerler sıcaklığa bağlı olarak ölçülmüştür. N tipi Bi_2Te_3 yaklaşık olarak aynı değerleri göstermekte olup sadece Seebeck katsayısının işareti negatif olmaktadır.

Tablo 4.1: Teorik hesaplama için kullanılan değerler

T SICAKLIK (C)	T SICAKLIK (K)	σ ELEKTRİKSEL İLETKENLİK KATSAYISI (S/cm)	α SEEBECK KATSAYISI ($\mu\text{V}/\Delta T$)	κ TERMAL İLETKENLİK KATSAYISI (W/mK)
25	298	1139,2581	207,0516	1,71982
50	323	959,19188	218,7726	1,77745
75	348	810,5881	226,3436	1,8366
100	373	693,4468	229,7646	2,01201
125	398	607,7681	229,0356	2,15606
150	423	553,5518	224,1566	2,34815
175	448	530,7981	215,1276	2,59487
200	473	539,50688	201,9486	2,83589
225	498	579,6781	184,6196	3,06516
250	523	651,3118	163,1406	3,30492

Bu değerleri kullanarak ve gerekli formüller üzerinden program aracılığıyla modüllerin hesaplanan Z (değerlik katsayısı) ve η (verimlilik) değerleri Tablo 4.2’de gösterilmiştir. Bu hesaplamalarda modüllerin Tablo 4.1’deki sıcaklık değişiminin aynısı kullanılmıştır. Modüllerin 127 bacaklı olduğu, 1,2 mm modül kalınlığının olduğu, $4*4\text{ cm}^2$ modül alanı olduğu bilinerek bu hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 4.2: Teorik hesaplama sonucunda bir modül için elde edilen Z ve η değerleri

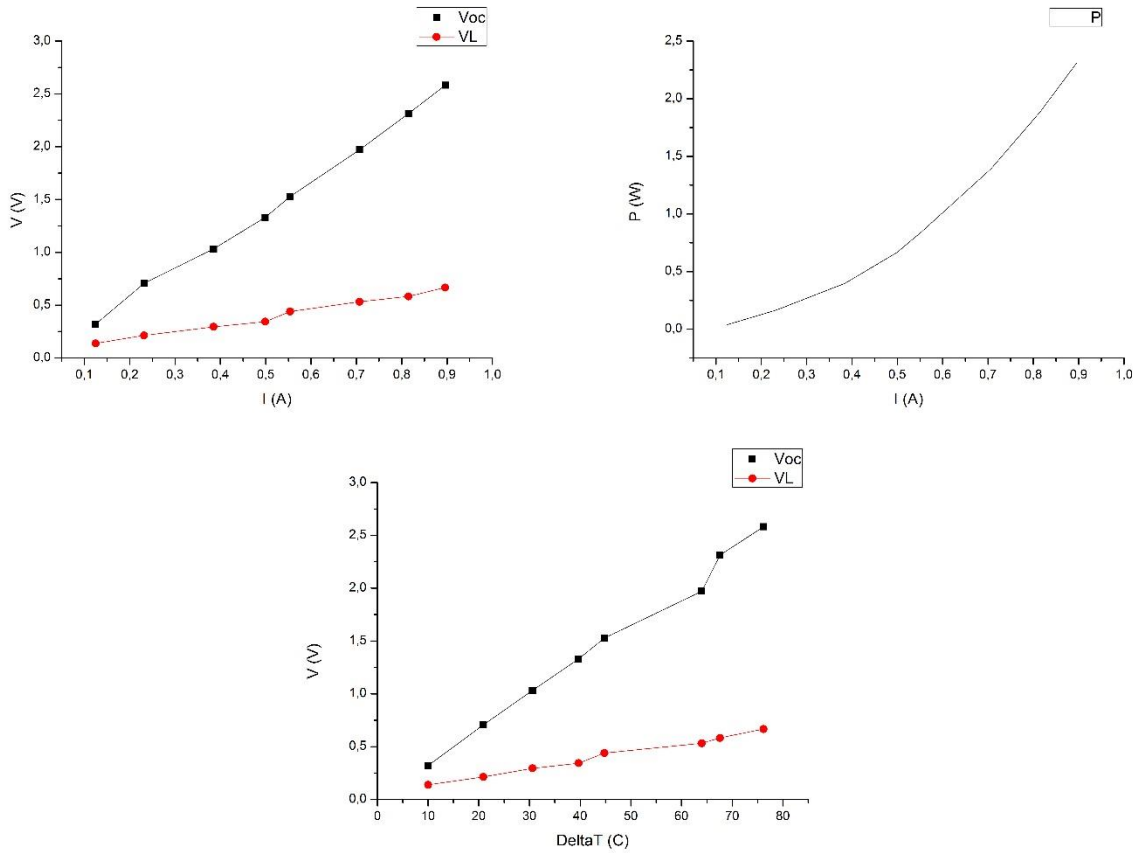
Z (FIGURE OF MERIT)	η (VERİMLİLİK)
2,83986577	3,950726191
2,58281734	3,365175886
2,26112069	2,921615822
1,81949062	2,809109938
1,47871859	2,556131163
1,18449173	2,376615439
0,94669643	2,190788151
0,77587738	1,82698845
0,64459839	1,539112597
0,52451243	1,271548895

Burada modüllerin iç yapısındaki malzemenin değerleri kullanılmıştır. Bu değerler ise α Seebeck katsayısı, κ termal iletkenlik katsayısı, ve σ elektriksel iletkenlik katsayılarıdır. Bu değerler üzerinden yine önceki bölümlerde bahsedilen hesaplamalarla bir modülün Z katsayısı (figure of merit) ve η (verimlilik) değerleri bulunmuştur.

Elde bulunan modüllerin tabi tutulduğu deney sonucunda alınan çıktılar aşağıda tablolarda verilmiştir. Her modül için ayrı ayrı deney yapılmış olup, sonuçlar tablolardadır. Verilerde açık uçlu devre olarak gerilim değeri (V_{OC}) ile akım (I_{OC}) ve direnç bağlandıktan sonra gerilim değeri (V_L) alınmıştır.

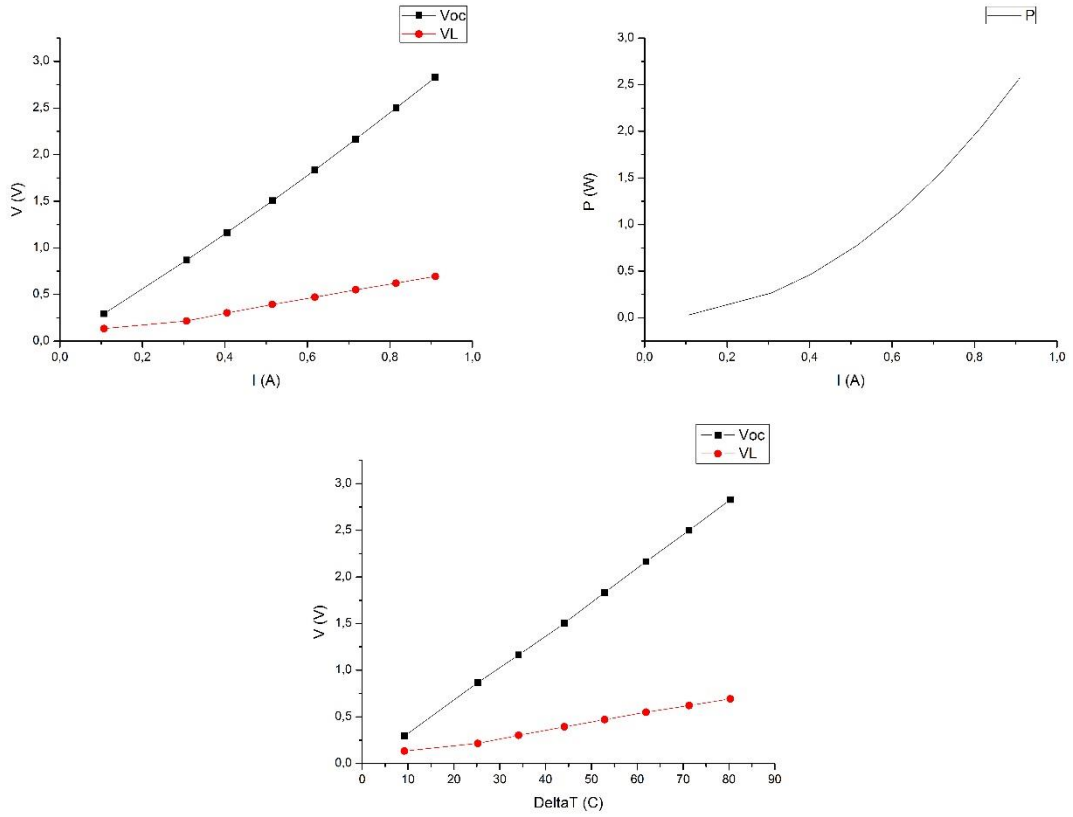
Tablo 4.3: 1. modülün deneysel verileri

ΔT	T_H	T_C	I_{oc}	V_{oc}		ΔT	T_H	T_C	V_L
C	C	C	A	V		C	C	C	V
9,2	30,7	21,5	0,107	0,295		13,1	34,4	21,3	0,134
25,2	46,6	21,4	0,307	0,868		21,6	42,9	21,3	0,216
34,1	55,4	21,3	0,405	1,164		32,5	53,8	21,3	0,302
44,1	65,8	21,7	0,515	1,505		40,9	62,4	21,5	0,394
52,9	75,1	22,2	0,618	1,834		50,3	71,9	21,6	0,471
61,9	84,7	22,8	0,717	2,165		59,5	81,3	21,8	0,551
71,3	94,7	23,4	0,815	2,501		69,1	91,1	22	0,622
80,3	104,4	24,1	0,91	2,828		79,3	101,5	22,2	0,693

**Şekil 4.1:** 1. modülün deneysel bilgileri üzerinden karşılaştırma

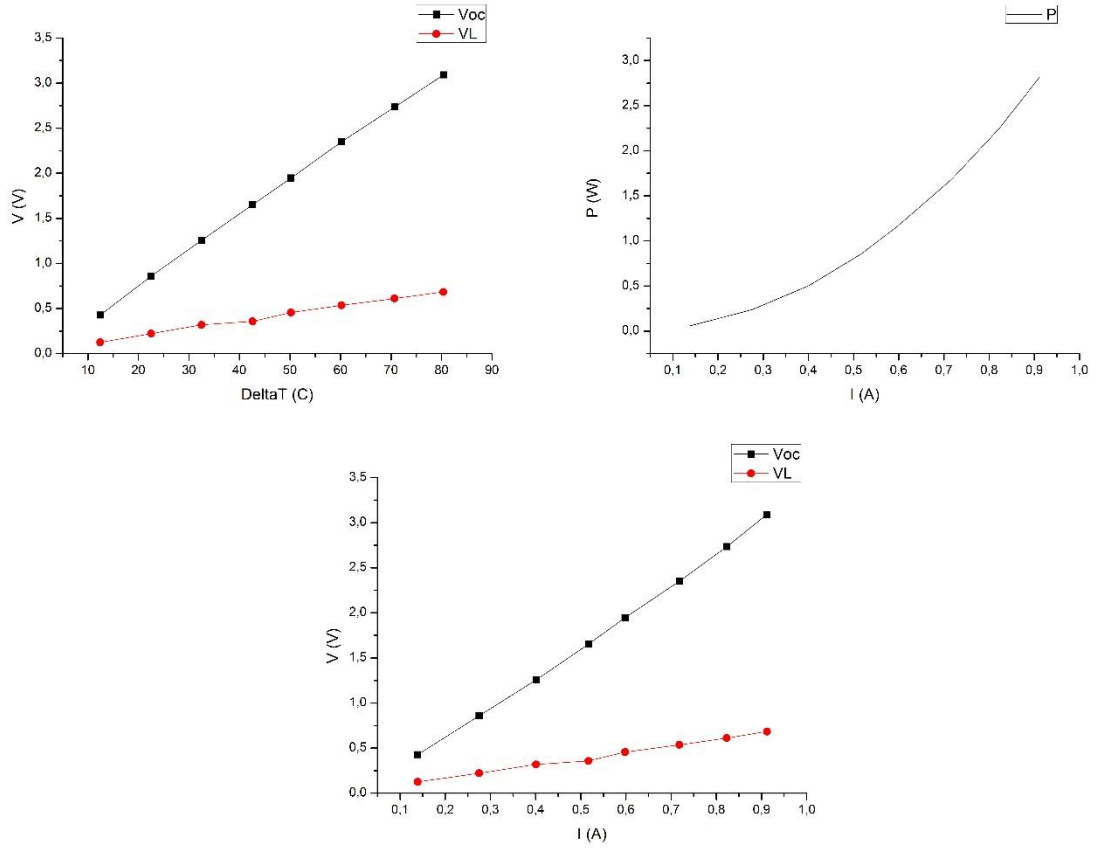
Tablo 4.4: 2. modülün deneysel verileri

ΔT	T_H	T_C	I_{oc}	V_{oc}		ΔT	T_H	T_C	V_L
C	C	C	A	V		C	C	C	V
10	33,3	23,3	0,125	0,321		14,3	34,8	20,5	0,138
20,9	44,2	23,3	0,232	0,708		22,5	43,5	21	0,213
30,6	54,1	23,5	0,385	1,033		31,5	52,8	21,3	0,295
39,7	63,6	23,9	0,499	1,331		38,5	60,4	21,9	0,344
44,8	69,2	24,4	0,554	1,528		48,8	70,8	22	0,44
64	89,1	25,1	0,707	1,971		58,1	80,4	22,3	0,532
67,6	93,5	25,9	0,815	2,313		66,8	89,5	22,7	0,583
76,2	102,9	26,7	0,896	2,581		76,2	99,4	23,2	0,666

**Şekil 4.2:** 2. modülün deneysel bilgileri üzerinden karşılaştırma

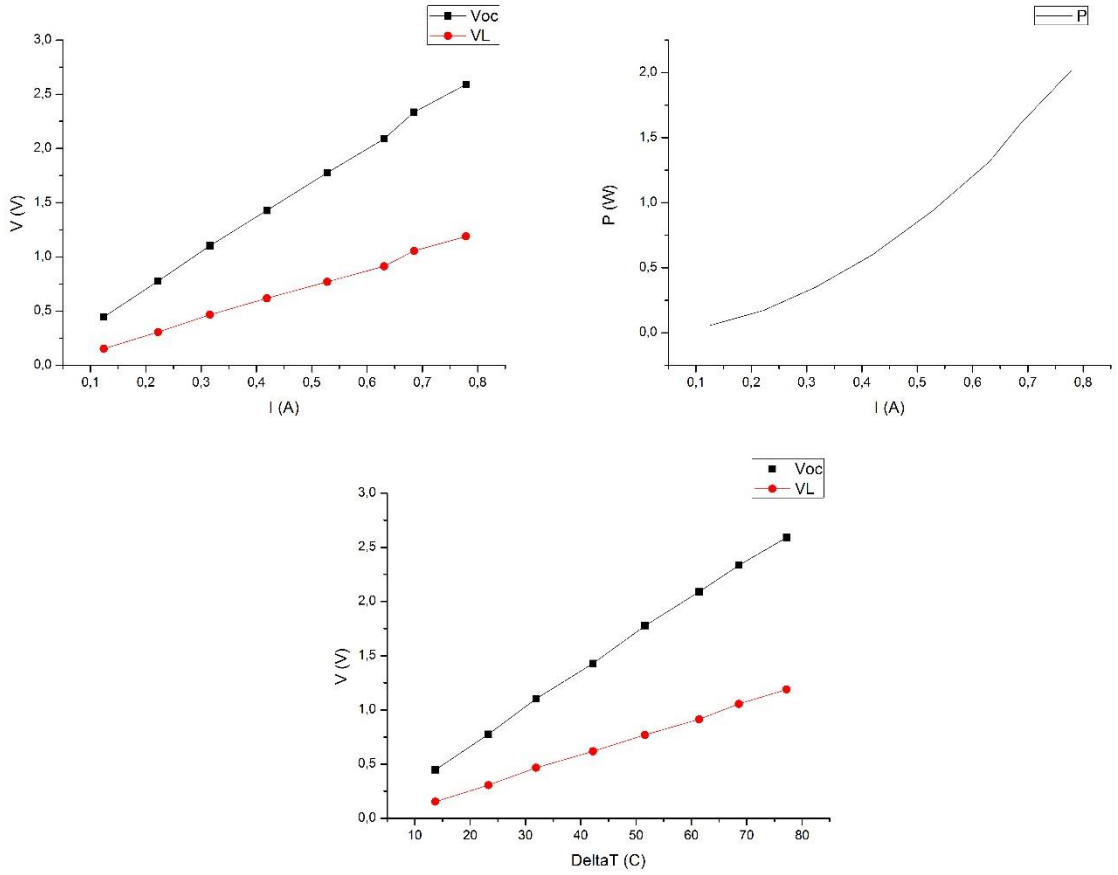
Tablo 4.5: 3. modülün deneysel verileri

ΔT	T_H	T_C	I_{oc}	V_{oc}		ΔT	T_H	T_C	V_L
C	C	C	A	V		C	C	C	V
12,4	34,3	21,9	0,139	0,427		13	34,9	21,9	0,125
22,5	44,4	21,9	0,275	0,858		22,9	44,9	22	0,221
32,5	54,5	22	0,401	1,257		32,5	54,9	22,4	0,319
42,6	64,7	22,1	0,517	1,652		39,1	61,6	22,5	0,357
50,2	72,4	22,2	0,598	1,947		48,6	71,2	22,6	0,456
60,2	82,6	22,4	0,718	2,351		58,5	81,1	22,6	0,536
70,7	93,5	22,8	0,823	2,735		67,9	90,8	22,9	0,611
80,4	103,7	23,3	0,912	3,091		77,3	100,7	23,4	0,684

**Şekil 4.3:** 3. modülün deneysel bilgileri üzerinden karşılaştırma

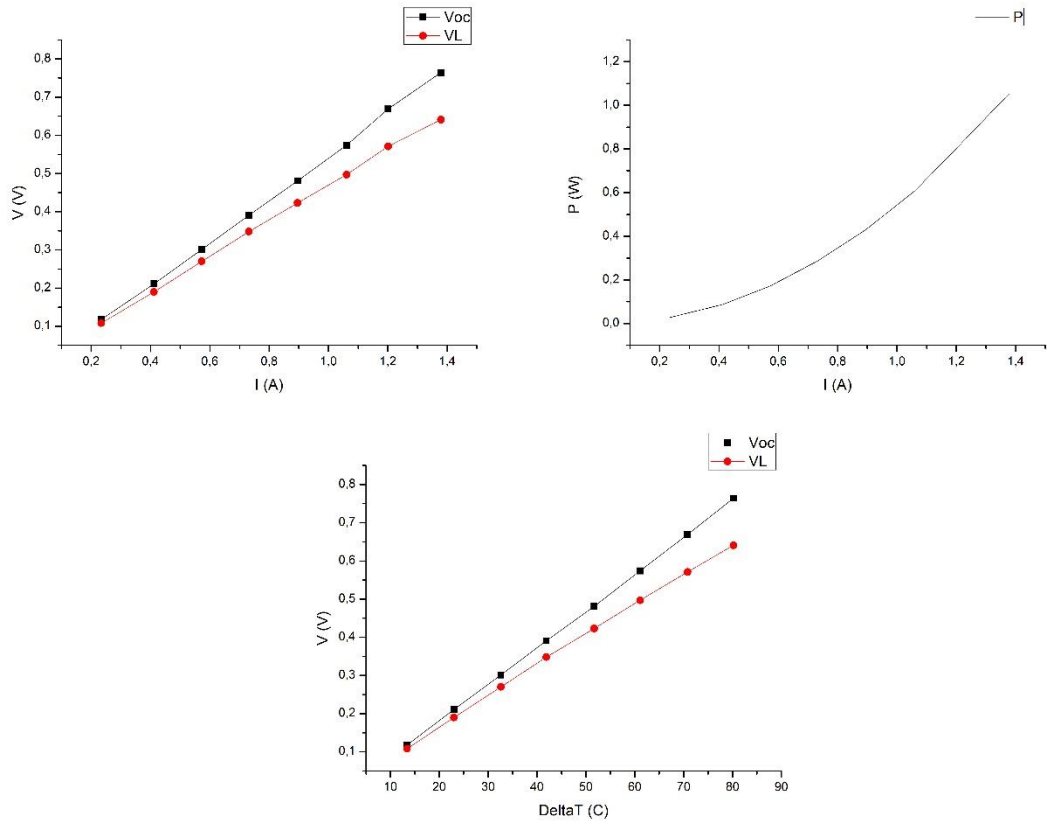
Tablo 4.6: 4. modülün deneysel verileri

ΔT	T_H	T_C	I_{oc}	V_{oc}		ΔT	T_H	T_C	V_L
C	C	C	A	V		C	C	C	V
13,7	35,6	21,9	0,124	0,447		12	34,6	22,6	0,153
23,3	45,2	21,9	0,222	0,775		22,3	44,9	22,6	0,306
31,9	54,1	22,2	0,316	1,104		32,2	55,1	22,9	0,466
42,2	64,6	22,4	0,419	1,428		41,3	64,7	23,4	0,618
51,6	74,4	22,8	0,528	1,777		50,8	74,5	23,7	0,77
61,4	84,6	23,2	0,631	2,09		61,3	85,1	23,8	0,913
68,6	92,1	23,5	0,685	2,335		70,6	94,5	23,9	1,055
77,2	101,1	23,9	0,779	2,591		80	104,1	24,1	1,189

**Şekil 4.4:** 4. modülün deneysel bilgileri üzerinden karşılaştırma

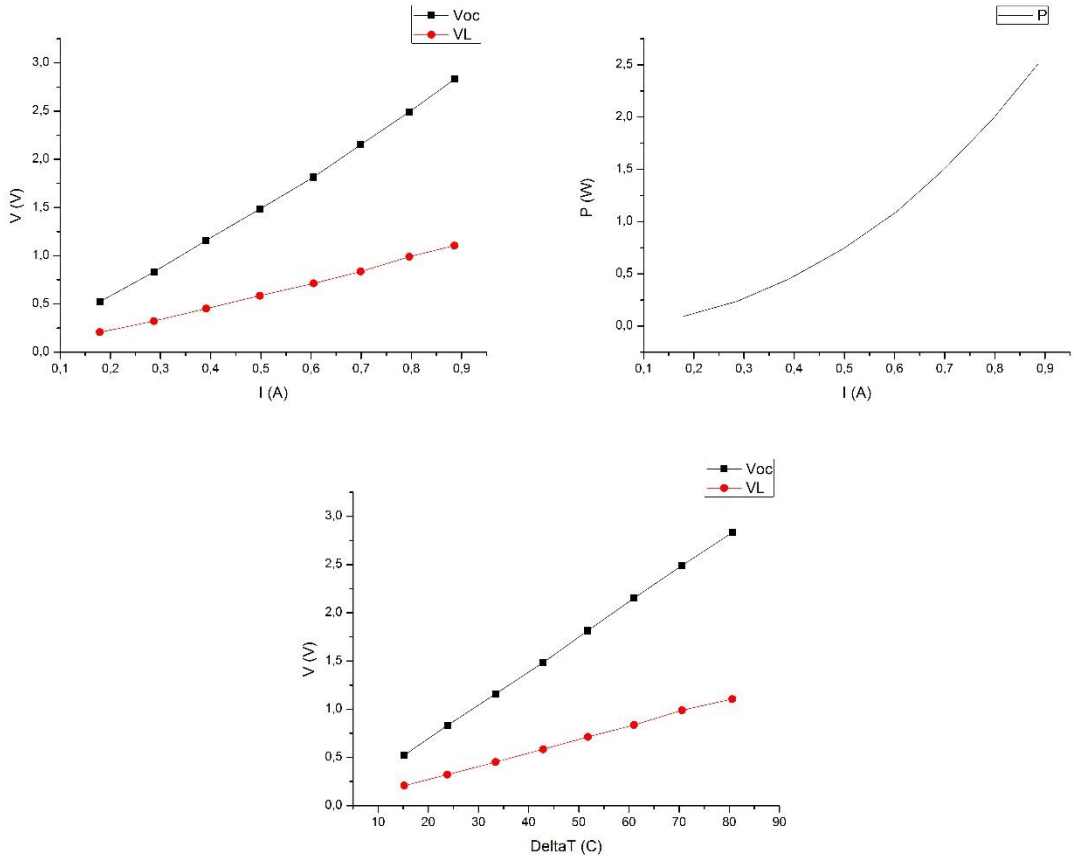
Tablo 4.7: 5. modülün deneysel verileri

ΔT	T_H	T_C	I_{oc}	V_{oc}		ΔT	T_H	T_C	V_L
$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	A	V		$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	V
13,4	34,6	21,2	0,234	0,118		13,7	35	21,3	0,108
23	44,3	21,3	0,412	0,211		23,8	45,1	21,3	0,19
32,6	54,1	21,5	0,573	0,301		33,9	55,3	21,4	0,27
41,9	63,6	21,7	0,732	0,391		43,6	65,1	21,5	0,348
51,7	73,6	21,9	0,896	0,481		53,3	75,2	21,9	0,423
61,1	83,2	22,1	1,061	0,574		63	85,2	22,2	0,497
70,8	93,1	22,3	1,201	0,669		72,5	95,1	22,6	0,571
80,2	102,8	22,6	1,379	0,764		81,5	104,3	22,8	0,641

**Şekil 4.5:** 5. modülün deneysel bilgileri üzerinden karşılaştırma

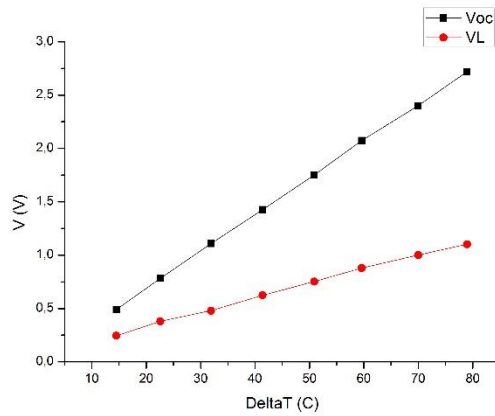
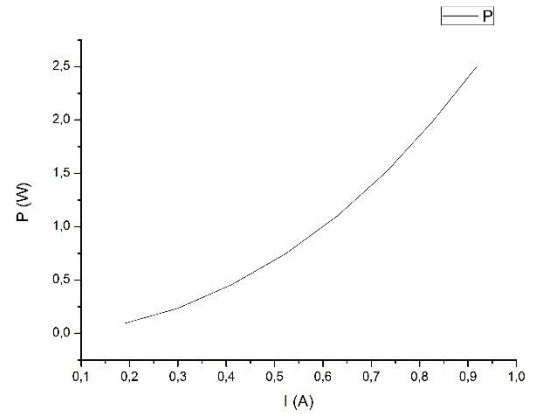
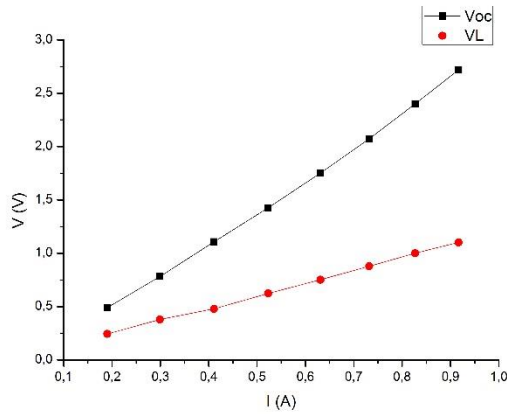
Tablo 4.8: 6. modülün deneysel verileri

ΔT	T_H	T_C	I_{oc}	V_{oc}		ΔT	T_H	T_C	V_L
C	C	C	A	V		C	C	C	V
15,2	35	19,8	0,179	0,523		13,7	34,3	20,6	0,207
23,8	43,7	19,9	0,287	0,833		21,3	42,1	20,8	0,322
33,4	53,6	20,2	0,391	1,159		30,8	52	21,2	0,452
42,9	63,3	20,4	0,498	1,486		39,8	61,1	21,3	0,586
51,8	72,6	20,8	0,605	1,814		68,14	70,3	2,16	0,713
61	82,2	21,2	0,699	2,151		58	80	22	0,837
70,6	92,5	21,9	0,796	2,491		68	90,5	22,5	0,989
80,6	102,9	22,3	0,886	2,831		77	100,1	23,1	1,105

**Şekil 4.6:** 6. modülün deneysel bilgileri üzerinden karşılaştırma

Tablo 4.9: 7. modülün deneysel verileri

ΔT	T_H	T_C	I_{oc}	V_{oc}		ΔT	T_H	T_C	V_L
C	C	C	A	V		C	C	C	V
14,5	35	20,5	0,19	0,491		15,2	35,9	20,7	0,244
22,6	43,4	20,8	0,299	0,782		23,3	44,4	21,1	0,379
31,9	53,1	21,2	0,411	1,108		30,4	51,7	21,3	0,479
41,4	63	21,6	0,523	1,426		39,7	61,2	21,5	0,624
50,9	73	22,1	0,631	1,752		49,2	70,9	21,7	0,752
59,6	82,2	22,6	0,732	2,074		58,9	80,8	21,9	0,879
70	93,2	23,2	0,827	2,402		68,4	90,5	22,1	1,001
79	102,9	23,9	0,917	2,719		78	100,3	22,3	1,103

**Şekil 4.7:** 7. modülün deneysel bilgileri üzerinden karşılaştırma

Buraya kadar olan kısımda eldeki modüllerin akım, gerilim gibi gerekli değerleri deneysel olarak elde edildi. Bundan sonra Tablo 4.10'da ve Tablo 4.11'de bu modüllerin bulunan bu deneysel değerler üzerinden Z (figure of merit) ve η (verimlilik) hesabı yapıp çizilmiştir.

Tablo 4.10: Modüllerin Z ve η değerleri-1

1. Modülün Değerleri		2. Modülün Değerleri		3. Modülün Değerleri		4. Modülün Değerleri	
Z	η	Z	η	Z	η	Z	η
0,227807	0,039871	0,212152	0,033956	0,285169	0,061579	0,315066	0,075153
0,476116	0,173853	0,581507	0,254115	0,517444	0,20237	0,535842	0,216976
0,696149	0,371498	0,787415	0,464241	0,746912	0,420927	0,73213	0,405333
0,900741	0,622572	1,015566	0,772534	0,978366	0,720349	0,967212	0,706291
1,013039	0,78992	1,214096	1,10548	1,152129	0,996751	1,17946	1,050366
1,44041	1,593914	1,414895	1,503902	1,379766	1,425556	1,399678	1,478157
1,513299	1,770239	1,623167	1,981153	1,616044	1,952414	1,560647	1,836177
1,696725	2,232558	1,81945	2,493714	1,831567	2,506183	1,751568	2,310765

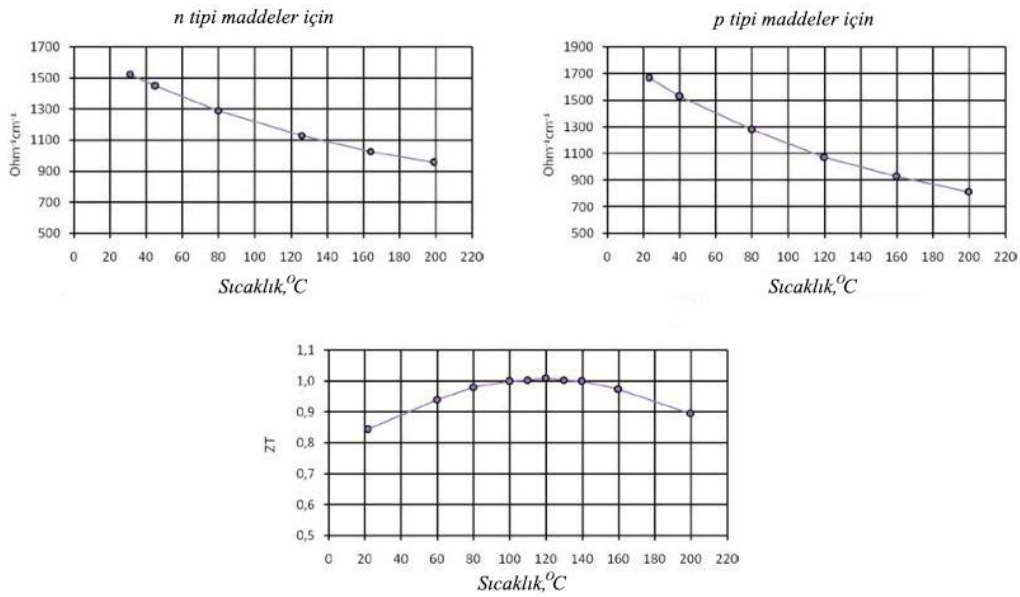
Tablo 4.11: Modüllerin Z ve η değerleri-2

5. Modülün Değerleri		6. Modülün Değerleri		7. Modülün Değerleri	
Z	η	Z	η	Z	η
0,309635	0,072072	0,354594	0,093151	0,336652	0,084577
0,531101	0,211869	0,554841	0,227898	0,523642	0,204929
0,751756	0,424219	0,777049	0,447133	0,737115	0,406697
0,964903	0,697993	0,996706	0,734603	0,954036	0,681795
1,18897	1,057534	1,200207	1,065459	1,168986	1,024757
1,403243	1,469259	1,409531	1,468867	1,364167	1,396796
1,623814	1,961008	1,623623	1,952707	1,595725	1,912231
1,835674	2,499651	1,84858	2,526448	1,792407	2,417115

Burada elde bulunan modüllerin deneysel veriler üzerinden Z ve η hesapları gösterildi. Bu işlemden sonra bize gerekli olan bir diğer durum ise modüllerin bilgi kağıtları (katalog) üzerindeki değerlerdir. Bu gerekli olan bilgiler alındıktan sonra yine önceki hesapların benzerleri yapılacaktır. Tablo 4.12 ticari olarak kullanılan termoelektrik modüllerin bilgi kağıtlarında yer alan maksimum akım-gerilim, sıcaklık farkı ve verimlilik bilgileri yer almaktadır.

Tablo 4.12: Katalogda verilen değerler

I (A)	V (V)	T _H (C)	T _C (C)	AT (C)	T _{AVG} (C)	η
1,42	2,87	423	323	100	373	4,2
0,92	0,7	423	323	100	373	4,2
0,92	1,6	423	323	100	373	4,2
0,92	2,87	423	323	100	373	4,2
0,56	1,6	423	323	100	373	4,2
0,56	2,87	423	323	100	373	4,2
1,28	0,7	423	323	100	373	4,2
1,27	1,6	423	323	100	373	4,2



Şekil 4.8: Katalogda verilen karakteristikler

Tablo 4.13: Katalogda verilen değerler üzerinden bulunan Z ve η değerleri.

S_M	K_M	R_M	Z	η
0,006785	0,01556	1,543319	1,917013	3,53035
0,001655	0,002459	0,580995	1,917013	3,53035
0,003783	0,00562	1,327988	1,917013	3,53035
0,006785	0,010081	2,382079	1,917013	3,53035
0,003783	0,003421	2,181695	1,917013	3,53035
0,006785	0,006136	3,913416	1,917013	3,53035
0,001655	0,003421	0,41759	1,917013	3,53035
0,003783	0,007758	0,962007	1,917013	3,53035

Bu çalışmalardan anlaşıldığı üzere teorik testler sonucunda yapılan hesaplar, katalogdan okundan değerler zeriden yapılan hesaplarla ve deneysel sonuçlara bağlı olarak yapılan hesaplarla karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda katalogda verilen bilgilerin verildiği gibi doğru olmadığı gözlenmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında MATLAB-GUIDE esaslı bir program yazılarak TE modüllerin verimlilik ve değerlik katsayıları hesaplanmıştır. Program, tanımlanan TE teori ile ilgili tüm formüller işlenerek çalıştırılmıştır. Çalışma temel olarak 4 aşamadan oluşmuştur. Birinci aşamada, Bölüm 2 de detaylı olarak verilen bir modülün iç yapısında gerçekleşen fiziksel olayların, örneğin ısı yayılımı, Joule ısısı, Peltier etkisi, Seebeck güç üretimi ve Thompson olayları gibi teorik yaklaşımları MATLAB-GUIDE ile işlenerek *verimlilik (η)*, *termoelektrik değerlik sayısı (Z) katsayısı için* ifadeler bulunmuştur. İkinci aşamada ise farklı modül üreticileri tarafından verilen kataloglarda yazan değerler modelde işlenerek hesaplamalar yapılmış ve verimlilik ve değerlik katsayıları hesaplanmıştır. Üretici tarafından yayımlanan bilgi kağıdında verilen sıcak yüzeyin sıcaklık değerine göre oluşturabildiği azami sıcaklık farkı, azami akım değeri ve azami gerilim değeri işlenmiştir. Üçüncü aşamada ise laboratuvarında mevcut TE karakterizasyon cihazları ve ticari olarak satılan modüllerin iç yapısında kullanılan BiSbTe esaslı malzemelerin sıcaklığa bağlı Seebeck katsayısı, Elektriksel iletkenlik ve termal iletkenlik parametreleri ölçülerek 127 çift bacaklı modül için Z ve η değerleri hesaplanmıştır. Bu aşamada ayrıca, bu değerler ile beraber yine tarafımızdan geliştirilen TE modül test sistemi ile sıcaklık farkına bağlı üretilen gerilim, akım ve güç parametreleri gerçek zamanlı olarak ölçülmüştür. Daha sonra, transport parametreleri ve modül test sonuçları modelde işlenerek test modülü için *verimlilik (η)*, *termoelektrik değerlik sayısı (Z)* hesaplanmıştır. Son aşamada ise gerçek zamanlı ölçümlerden elde edilen değerler, katalogta verilen parametrelerden yola çıkarak hesaplanan verimlilik ve termoelektrik değerlik parametreleri karşılaştırılmıştır.

Bölüm 3. de bulgular bölümünde açıkça görüleceği üzere, katalogta verilen sıcaklığa bağlı akım-gerilim değerleri ile tarafımızdan gerçek zamanlı ölçülen değerler arasında bir farklılık bulunmaktadır. Bu farklılık doğal olarak modül verimlilik ve değerlik katsayılarına da yansımıştır. Gerçek zamanlı ölçülen açık uç gerilim ve akım değerlerinin katalogta sunulandan daha küçük olduğu görülmüştür. Benzer olarak gerçek zamanlı ölçümlerden yola çıkarak hesaplanan modül verimlilik ve değerlik katsayıları katalogta verilen değerlerden yola çıkılarak hesaplanan değerlerden küçük çıkmıştır.

Aynı tip malzemedan (BiSbTe tabanlı) yapılmış olmalarına karşın gerek farklı modül üreticileri tarafından sunulan modüller arasında oluşan *verimlilik (η)*, *termoelektrik değerlik sayısı*

(Z)farklılık (Tablo 4.12 - 4.13) gerekse de gerçek zamanlı olarak ölçülen modüllerden hesaplanan verimlilik (η), termoelektrik değerlik sayısı (Z) (Tablo 4.10-4.11) arasındaki farklılıklar birkaç sebepten kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Bu farklılıkların;

- Her bir modülde kullanılan BiSbTe malzemelerindeki kompozisyon farklılığı diğer bir deyişle elementlerin stokiyometrik oranlarındaki farklılık,
- Malzemelerin ZT değerlerindeki farklılık,
- Bağlantı tellerindeki kayıplar,
- TE bacakların birbirine bağlanmasını sağlayan metal iletken şerit ile ısı yayılımını sağlayan Al_2O_3 seramik plakalardaki elektriksel ve termal direnç farklılığı,
- TE modüllerin uygulanan sıcaklık farkından dolayı bileşiklerde zaman içerisinde stokiyometrinin bozulması,
- TE bacaklardaki mekaniksel bozulmalar (çatlak ve boşluklar),
- Kullanılan TE bacaklardaki sayı ve boyutsal farklılık,
- Farklı hazırlama koşullarında malzemenin hazırlanması veya ölçümlerin alınması,
- Ölçüm cihazlarındaki hata ve kayıplar,

gibi faktörlerden kaynaklanmış olduğu düşünülmektedir. Bu farklılıkların giderilmesi için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır.

- Bilinen BiSbTe esaslı bileşiklerin maksimum değeri 300 K de $ZT=1$ 'dir ve literatürde bu değerleri veren iyi p tipi ve n tipi BiSbTe tabanlı bileşikler ise $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ ve $\text{Bi}_2\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{2.5}$ 'dir. Dolayısıyla modül yapısında kullanılacak TE bacakların kompozisyonu bu bileşikler olmalıdır.
- TE bacaklarda sıcaklık farkından dolayı oluşabilecek stokiyometrik (kompozisyonadaki bozulmaları) önlemek adına bacakların her iki yüzeyine iyonik bariyerler oluşturulmalıdır. Bunun için bacakların her iki yüzeyi Platinyum (Pt) ya da Nikel (Ni) metaller ile kaplanmalıdır.

- İletim kabloları, lehim, seramik plaka ya da elektrotlardan kaynaklı termal ve elektriksel kayıpları minimize etmek için yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe sahip lehim, kablo ve seramik plakalar kullanılmalıdır. Tercihen Bakır (Cu) teller kullanılmalıdır.
- Modülde standart sayıda ve boyutta TE bacak kullanılmalıdır.
- Ölçüm cihazlarında oluşabilecek hata ve kayıplar için kalibrasyonu yapılmış cihazların kullanılması tercih edilmelidir.

Özetle, bu tez çalışması ile MATLAB programında yazılmış program ile ticari olarak satılan modüllerin gerçek zamanlı verimlilik ve değerlik katsayıları ve katalog verileri kullanılarak hesaplanan değerler karşılaştırılmış ve kendi aralarında farklı değerler gösterdiği görülmüştür. Bundan sonraki aşamada, yukarıda bahsedilen öneriler ışığında her bir bacak boyu 0.6x0.6x1.2 mm olan 127 adet çiftten oluşan bir modül geliştirilecektir. Bu modülde p ve n tipi TE bacaklar $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ ve $\text{Bi}_2\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{2.5}$ olacak, yüzeyleri Pt kaplı, yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahip bağlantı telleri kullanılacak ve modül boyutu $4 \times 4 \text{ cm}^2$ boyutlarında olacaktır. Geliştirilen bu modülle 100 K sıcaklık farkında yaklaşık %5-6 civarında bir verimlilik değerine ulaşılması hedeflenmektedir. Ayrıca elde edilen deney düzeneğinin, matematiksel modelin ve yazılımın yeni TE modüllerin tasarımında kullanılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Altenkirsch, E. 1909. *Physikalische Zeitschrift*. 10, 560.
- Goldsmid, H. J. 2009. *Introduction to Thermoelectricity*, Springer Berlin Heidelberg.
- He, J., Kanatzidis, M. G. & Dravid, V. P. 2013. High performance bulk thermoelectrics via a panoscopic approach. *Materials Today*, 16, 166-176.
- Holman, J. P. 1989. *Heat transfer*, McGraw-Hill.
- Kanatzidis, M. G. 2010. Nanostructured Thermoelectrics: The New Paradigm? *Chemistry of Materials*, 22, 648-659.
- Lee, H. 2016. Modeling of Thermoelectric Generators and Coolers With Heat Sinks. *Thermoelectrics: Design and Materials*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Li, J.-F., Liu, W.-S., Zhao, L.-D. & Zhou, M. 2010. High-performance nanostructured thermoelectric materials. *Npg Asia Materials*, 2, 152.
- Lineykin, S. & Ben-Yaakov, S. 2005. Modeling and analysis of thermoelectric modules. *Apec 2005: Twentieth Annual Ieee Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vols 1-3*, 2019-2023.
- Lineykin, S. & Ben-Yaakov, S. 2007. Modeling and analysis of thermoelectric modules. *Ieee Transactions on Industry Applications*, 43, 505-512.
- Maciá, E. 2015. *Thermoelectric Materials: Advances and Applications*, Pan Stanford Publishing.
- Meydbray, Y., Singh, R. & Shakouri, A. 2005. Thermoelectric module construction for low temperature gradient power generation. *ICT: 2005 24th International Conference on Thermoelectrics*, 348-351.
- Mitrani, D., Tome, J. A., Salazar, J., Turo, A., Garcia, M. J. & Chavez, J. A. 2005. Methodology for extracting thermoelectric module parameters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 54, 1548-1552.
- Nolas, G. S., Sharp, J. & Goldsmid, J. 2001. *Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments*, Springer Berlin Heidelberg.
- Reddy, B. V. K., Barry, M., Li, J. & Chyu, M. K. 2013. Mathematical modeling and numerical characterization of composite thermoelectric devices. *International Journal of Thermal Sciences*, 67, 53-63.
- Rowe, D. M. 1995. *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC-Press.
- Rowe, D. M. 2005. *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*, CRC Press.

- Sootsman, J. R., Chung, D. Y. & Kanatzidis, M. G. 2009. New and Old Concepts in Thermoelectric Materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 48, 8616-8639.
- Tsai, H.-L. & Lin, J.-M. 2010. Model Building and Simulation of Thermoelectric Module Using Matlab/Simulink. *Journal of Electronic Materials*, 39, 2105-2111.
- Zhang, X. & Zhao, L.-D. 2015. Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity. *Journal of Materiomics*, 1, 92-105.



EKLER

EK 1. Katalog verileri üzerinden yapılan hesaplamaların kodları

MATLAB yazılımı içerisinde de bu formüllerin analiz edilmesi ve Θ_M , R_M ve α_M bulunması şöyle olmuştur:

```
R = Ro*yukseklık/alan;

% Direncin hesaplanması formülü girildi.

RM = R*N;

% Modülün direnci hesaplandı.

Theta = yukseklık/(k*alan);

% Termal direnç hesaplandı.

ThetaM = Theta*N;

% Modülün termal direnci hesaplandı.

SeebeckM = Seebeck*N;

% Girilmiş olan Seebeck katsayısının modüldeki karşılığı bulundu.

DeltaT = Th - Te;

% qe ve qa formüllerindeki gerekli olan sıcak tarafın ve soğuk tarafın sıcaklık
% farkı bulundu.

qj = I*I*RM;

% Joule ısısı bulundu.

sicaklık = ThetaM*q;

% Termal direnç üzerinden sıcaklık bulundu.

Peltier = SeebeckM*sicaklık;

% Seebeck katsayısı ve sıcaklıktan yararlanarak Peltier katsayısı bulundu.

qp = Peltier*I;

% Birleşim noktası tarafından emilen/yayılan ısı bulundu.

U_1 = Seebeck*DeltaT;

% Yazılım içerisinde hesaplama için gerekli olan bir kod girildi.

U_2 = SeebeckM*DeltaT;
```

% Yazılım içerisinde hesaplama için gerekli olan bir kod girildi.

$q_h = \Delta T / \theta_M + S_e M \cdot T_h \cdot I - I^2 \cdot R_M / 2;$

% Sıcak taraf için ısı dengesi bulundu.

$q_e = \Delta T / \theta_M + S_e M \cdot T_e \cdot I + I^2 \cdot R_M / 2;$

% Soğuk taraf için ısı dengesi bulundu.

Yazılımın baş tarafında gerekli girişler alındıktan sonra istenen sonuç elde edilmektedir. Bu girişler ise şöyle tanımlanmıştır:

$N = \text{input}(' ');$

% Kullanıcıdan çift sayısı alındı.

$S_e = \text{input}(' ');$

% Kullanıcıdan Seebeck katsayısı alındı.

$r_o = \text{input}(' ');$

% Malzemenin iç direnci alındı.

$y_{\text{seklik}} = \text{input}(' ');$

% Modülün yüksekliği alındı.

$a_{\text{alan}} = \text{input}(' ');$

% Modülün kapladığı alan alındı.

$k = \text{input}(' ');$

% Termal iletkenlik katsayısı alındı.

$I = \text{input}(' ');$

% Modülün içerisinde geçen akım alındı.

$T_h = \text{input}(' ');$

% Modülün sıcak tarafının sıcaklığı alındı.

$T_e = \text{input}(' ');$

% Modülün soğuk tarafının sıcaklığı alındı.

$q = \text{input}(' ');$

% Modülün ısısı alındı.

EK 2. Deneysel veriler üzerinden yapılan hesaplamaların kodları

```
function UMax_Callback(hObject, eventdata, handles)

% Bu açıklamalar diğer tüm Callback'lerin altında yazıyor.

% hObject    handle to UMax (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of UMax as text

%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of UMax as a double
double

UMax = str2double(get(hObject,'String'));

if isnan(UMax)
    set(hObject,'String',0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end

handles.metricdata.UMax = UMax;

guidata(hObject,handles)

function DeltaTMax_Callback(hObject, eventdata, handles)

DeltaTMax = str2double(get(hObject,'String'));

if isnan(DeltaTMax)
    set(hObject,'String',0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end

handles.metricdata.DeltaTMax = DeltaTMax;

guidata(hObject,handles)

function IMax_Callback(hObject, eventdata, handles)

IMax = str2double(get(hObject,'String'));
if isnan(IMax)
    set(hObject,'String',0);
```

```

        errordlg('Input must be a number','Error');
    end

handles.metricdata.IMax = IMax;

guidata(hObject,handles)

function THot_Callback(hObject, eventdata, handles)

THot = str2double(get(hObject,'String'));

if isnan(THot)

    set(hObject,'String',0);

    errordlg('Input must be a number','Error');

end

handles.metricdata.THOT = THot;

guidata(hObject,handles)

function couple_Callback(hObject, eventdata, handles)

couple = str2double(get(hObject,'String'));

if isnan(couple)

    set(hObject,'String',0);

    errordlg('Input must be a number','Error');

end

handles.metricdata.couple = couple;

guidata(hObject,handles)

function seebeck_Callback(hObject, eventdata, handles)

seebeck = str2double(get(hObject,'String'));

if isnan(seebeck)

    set(hObject,'String',0);

    errordlg('Input must be a number','Error');

end

handles.metricdata.seebeck = seebeck;

```

```

guidata(hObject,handles)

function rho_Callback(hObject, eventdata, handles)

rho = str2double(get(hObject,'String'));

if isnan(rho)

    set(hObject,'String',0);

    errordlg('Input must be a number','Error');

end

handles.metricdata.rho = rho;

guidata(hObject,handles)

function height_Callback(hObject, eventdata, handles)

height = str2double(get(hObject,'String'));

if isnan(height)

    set(hObject,'String',0);

    errordlg('Input must be a number','Error');

end

handles.metricdata.height = height;

guidata(hObject,handles)

function area_Callback(hObject, eventdata, handles)

area = str2double(get(hObject,'String'));

if isnan(area)

    set(hObject,'String',0);

    errordlg('Input must be a number','Error');

end

handles.metricdata.area = area;

guidata(hObject,handles)

function k_Callback(hObject, eventdata, handles)

k = str2double(get(hObject,'String'));

if isnan(k)

```

```

set(hObject,'String',0);

errorldlg('Input must be a number','Error');

end

handles.metricdata.k = k;

guidata(hObject,handles)

% --- Executes on button press in calculate1.

function calculate1_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to calculate1 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

seebeckM = handles.metricdata.seebeck * handles.metricdata.couple;

set(handles.seebeckM,'String',seebeckM);

R=handles.metricdata.rho*handles.metricdata.height/handles.metricdata.area;

rM = R*handles.metricdata.couple;

set(handles.rM,'String',rM);

Theta=

    handles.metricdata.height/(handles.metricdata.k*handles.metricdata.area);

thetaM = Theta*handles.metricdata.couple;

set(handles.thetaM,'String',thetaM);

% --- Executes on button press in reset1.

function reset1_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to reset1 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

initialize_gui(gcbof, handles, true);

function initialize_gui(fig_handle, handles, isreset)

if isfield(handles, 'metricdata') && ~isreset

```

```

    return;

end

handles.metricdata.couple = 0;

handles.metricdata.seebeck = 0;

handles.metricdata.rho = 0;

handles.metricdata.height = 0;

handles.metricdata.area = 0;

handles.metricdata.k = 0;

handles.metricdata.seebeckM = 0;

handles.metricdata.rM = 0;

handles.metricdata.thetaM = 0;

set(handles.couple, 'String', handles.metricdata.couple);

set(handles.seebeck, 'String', handles.metricdata.seebeck);

set(handles.rho, 'String', handles.metricdata.rho);

set(handles.height, 'String', handles.metricdata.height);

set(handles.area, 'String', handles.metricdata.area);

set(handles.k, 'String', handles.metricdata.k);

set(handles.seebeckM, 'String', 0);

set(handles.rM, 'String', 0);

set(handles.thetaM, 'String', 0);

guidata(handles.figure1, handles);

% --- Executes on button press in calculate2.

function calculate2_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to calculate2 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

seebeckM2 = handles.metricdata.UMax / handles.metricdata.THot;

```

```

set(handles.seebeckM2, 'String', seebeckM2);

rM2 = (handles.metricdata.UMax * (handles.metricdata.THot -
handles.metricdata.DeltaTMax)) / (handles.metricdata.IMax *
handles.metricdata.THot);
set(handles.rM2, 'String', rM2);

thetaM2 = (handles.metricdata.DeltaTMax * 2 * handles.metricdata.THot) /
(handles.metricdata.IMax * handles.metricdata.UMax *
(handles.metricdata.THot - handles.metricdata.DeltaTMax));
set(handles.thetaM2, 'String', thetaM2);

% --- Executes on button press in reset2.
function reset2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to reset2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
initialize_gui2(gcbof, handles, true);

function initialize_gui2(fig_handle, handles, isreset)

if isfield(handles, 'metricdata') && ~isreset
    return;
end

handles.metricdata.UMax = 0;

handles.metricdata.DeltaTMax = 0;

handles.metricdata.THot = 0;

handles.metricdata.IMax = 0;

handles.metricdata.seebeckM2 = 0;

handles.metricdata.rM2 = 0;

handles.metricdata.thetaM2 = 0;

set(handles.UMax, 'String', handles.metricdata.UMax);

set(handles.DeltaTMax, 'String', handles.metricdata.DeltaTMax);

```

```
set(handles.THot, 'String', handles.metricdata.THot);  
set(handles.IMax, 'String', handles.metricdata.IMax);  
set(handles.seebeckM2, 'String', 0);  
set(handles.rM2, 'String', 0);  
set(handles.thetaM2, 'String', 0);  
guidata(handles.figure1,handles);
```



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Mehmet Han İZGİ
Doğum Yeri	Artvin
Doğum Tarihi	20.05.1993
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	+90 536 917 42 87
E-Posta Adresi	mehmethanizgi@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Sakarya Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	17.08.2015

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı
Mezuniyet Tarihi	20.06.2018

Makale ve Bildiriler	
Ballıkaya, S. İzgi, M. H. 2018. <i>The Mathematical Modelling Of A Thermoelectric Module.</i>	