

**TERMOELEKTRİK MODÜLLER İÇİN MİKRODENETLEYİCİ  
KONTROLLÜ YENİ BİR TEST SİSTEMİNİN TASARIMI VE  
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**Bünyamin CİYLAN**

**DOKTORA TEZİ  
ELEKTRONİK-BİLGİSAYAR EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ**

**Aralık 2009  
ANKARA**

Bünyamin CİYLAN tarafından hazırlanan TERMOELEKTRİK MODÜLLER İÇİN MİKRODENETLEYİCİ KONTROLLÜ YENİ BİR TEST SİSTEMİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ adlı bu tezin doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. M. Rahmi CANAL  
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Abdullah ÇAVUŞOĞLU

Üye : Doç. Dr. Ramazan BAYINDIR

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Rahmi CANAL

Üye : Yrd. Doç. Dr. H. Haldun GÖKTAŞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nurettin TOPALOĞLU

Tarih : ...../...../.....

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

## **TEZ BİLDİRİMİ**

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

Bünyamin CİYLAN

**TERMOELEKTRİK MODÜLLER İÇİN MİKRODENETLEYİCİ KONTROLLÜ  
YENİ BİR TEST SİSTEMİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ  
(Doktora Tezi)**

**Bünyamin CİYLAN**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ  
Aralık 2009**

**ÖZET**

Bu çalışmada, günümüzde hızla yaygınlaşan termoelektrik modüllerin, basit, güvenilir ve evrensel manada, dinamik parametrelerinin belirlenmesine yönelik mikrodeneleyici kontrollü taşınabilir bir test sistemi tasarlanmış, gerçekleştirilmiş ve denenmiştir. Bu amaçla, öncelikle mevcut matematiksel analiz modeli basitleştirilerek, minimum sayıda parametreyle en doğru sonuçların elde edilmesine imkan sağlayacak şekilde değiştirilmiştir. Sonuçta modülün dinamik parametrelerini çok daha doğru ölçülebilen ve bunu sadece modülün ısınan yüzey sıcaklığı, modül çalışma gerilimi ve akımı ile modülün termoemk değerlerine dayalı olarak çıkartmaya yarayan yeni bir model elde edilmiştir. Bu modele dayanarak tasarlanan test sisteminin güvenilir olduğu bir dizi deneyle test edilmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

**Bilim Kodu : 704.3.013**  
**Anahtar Kelimeler : Ölçüm, test sistemi, Termoelektrik modül,  
Termoelektrik performans analizi.**  
**Sayfa Adedi : 94**  
**Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. M. Rahmi CANAL**

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A NOVEL MICROCONTROLLER  
BASED TEST SYSTEM FOR THERMOELECTRIC MODULES**

**(Ph. D. Thesis)**

**Bünyamin CİYLAN**

**GAZİ UNIVERSITY  
INFORMATICS INSTITUTE**

**December 2009**

**ABSTRACT**

In this study, a universal microcontroller test system, which is aimed to determine the dynamic parameters of widely used thermoelectric modules in a simple, efficient and reliable manner, has been designed and realized. For the purpose of this work, the test system has been designed according to a more simplified form of the present formula set which has been made to accept minimum variables as input to obtain more precise results. As a result, a test system, which can measure the dynamic parameters of a thermoelectric module universally by measuring only the hot side temperature, module operation voltage, module current and thermoemf values of the module, has been obtained. Then, the realized new test system has been used to measure some standard thermoelectric module and systems. According to the results of these tests, the efficiency and reliability of the proposed new method has been proven.

**Science Code : 704.3.013**

**Key Words : Measurement, Test system, Thermoelectric module,  
Thermoelectric performance analysis.**

**Page Number : 94**

**Adviser : Asist. Prof. M. Rahmi CANAL**

## TEŞEKKÜR

Karşılaştığım zorluklarda bana her zaman destek olan öncelikle danışmanım Yrd. Doç. Dr. M. Rahmi CANAL olmak üzere hocalarım, arkadaşlarıma ve aileme teşekkür ederim.

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi BAP tarafından, 07/2002-31 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

|  | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| ÖZET .....   | iv           |
| ABSTRACT .....   | v            |
| TEŞEKKÜR .....   | vi           |
| İÇİNDEKİLER .....  | vii          |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....  | x            |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....  | xi           |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....   | xiii         |
| 1. GİRİŞ .....   | 1            |
| 2. TERMoeLEKTRİK OLAYLAR, TERMoeLEKTRİK ELEMANLAR,<br>PARAMETRELERİ ve ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ..... | 4            |
| 2.1. Termoelektrik Tepkiler.....   | 4            |
| 2.1.1. Joule kanunu.....   | 4            |
| 2.1.2. Seebeck etkisi.....   | 5            |
| 2.1.3. Peltier etkisi.....   | 6            |
| 2.1.4. Thomson etkisi.....   | 6            |
| 2.2. Termoelement ve Termoelektrik Modül .....   | 7            |
| 2.2.1. Termoelement.....   | 8            |
| 2.2.2. Termoelektrik modül .....   | 10           |
| 2.3. Yarıiletkenlerin Termoelektrik Parametreleri ve Ölçüm Yöntemleri ...                    | 11           |
| 2.3.1. Elektriksel iletkenlik ( $\sigma$ ) parametresinin ölçülmesi .....                    | 12           |
| 2.3.2. Seebeck katsayısı ( $\alpha$ ) parametresinin ölçülmesi .....                         | 14           |
| 2.3.3. Termal iletkenlik ( $\lambda$ ) parametresinin ölçülmesi .....                        | 17           |
| 2.3.4. Kalite katsayısı ( $Z$ ) .....  | 21           |
| 2.4. Termoelement Parametrelerinin Ölçüm Yöntemleri.....                                     | 24           |

|   | <b>Sayfa</b> |
|---|--------------|
| 2.4.1. Klasik ölçüm yöntemi .....                                 | 24           |
| 2.4.2. Geliştirilmiş klasik ölçüm yöntemleri.....                 | 26           |
| 2.5. Yeni Test Yöntemi .....                                      | 37           |
| 2.5.1. Teori.....   | 38           |
| 3. SICAKLIK ve AKIM ÖLÇÜM SİSTEMLERİ .....                        | 44           |
| 3.1. Sıcaklık Algılayıcıları .....                                | 44           |
| 3.1.1. Termistörler.....  | 45           |
| 3.1.2. Direnç sıcaklık algılayıcıları .....                       | 46           |
| 3.1.3. Entegre devre sıcaklık algılayıcıları .....                | 47           |
| 3.1.4. Termokupllar .....   | 47           |
| 3.2. Akım Ölçme Sistemleri .....                                  | 50           |
| 3.2.1. Seri direnç yöntemi .....                                  | 51           |
| 3.2.2. Akım transformatörü yöntemi .....                          | 51           |
| 3.2.3. Hall-etkisi yöntemi.....                                   | 51           |
| 4. MİKRODENETLEYİCİ KONTROLLÜ TERMOELEKTRİK TEST<br>SİSTEMİ ..... | 55           |
| 4.1. Soğutma Sistemi ve Güç Kaynağı.....                          | 56           |
| 4.2. Elektronik Ölçüm ve Kontrol Sistemi .....                    | 57           |
| 4.2.1. Yükselteç devresi.....                                     | 59           |
| 4.2.2. Gerilim ve akım algılayıcıları .....                       | 61           |
| 4.2.3. Termokupl yükselteci .....                                 | 62           |
| 4.2.4. A/D dönüştürücü .....                                      | 63           |
| 4.2.5. Kontrol devresi .....                                      | 64           |
| 4.3. TE Test Sisteminin Çalışması .....                           | 71           |



**Sayfa**

|  |    |
|--|----|
| 5. GERÇEKLEŞTİRİLEN MİKRODENETLEYİCİ KONTROLLÜ TE TEST SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ ve UYGULAMASI ..... | 78 |
| 5.1. Termoelektrik Test Sisteminin Performansının Belirlenmesi .....                                     | 78 |
| 5.2. TE Test Sistemi Uygulamaları .....  | 79 |
| 5.2.1. Yeni test sistemiyle standart modülün araştırılması .....   | 79 |
| 5.2.2. Yeni test sistemiyle Rat termohipoterm cihazının incelenmesi .                                    | 84 |
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....  | 86 |
| KAYNAKLAR .....  | 88 |
| ÖZGEÇMİŞ .....   | 94 |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge   | Sayfa |
|---|-------|
| Çizelge 3.1. Sıcaklık ölçme cihazlarının kullandıkları yöntemler ve sıcaklık aralıkları .....                           | 45    |
| Çizelge 3.2. Termokupl modelleri ve özellikleri .....   | 48    |
| Çizelge 3.3. Ucuz ve en sık kullanılan akım ölçme teknikleri .....  | 52    |
| Çizelge 5.1. TE test sistemiyle ölçülen değerlerin standart ölçüm sisteminin ölçtüğü değerlerle karşılaştırılması ..... | 78    |
| Çizelge 5.2. Test sistemiyle ölçülen, Rat termohipoterm cihazı parametreleri.....                                       | 85    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil   | Sayfa |
|---|-------|
| Şekil 2.1. Seebeck olayını açıklayan devre.....                               | 5     |
| Şekil 2.2. Peltier olayını açıklayan devre .....                              | 6     |
| Şekil 2.3. Thomson olayını açıklayan devre.....                               | 7     |
| Şekil 2.4. Termoelementin yapısı.....   | 8     |
| Şekil 2.5. Termoelektrik termoelement üzerinde oluşan ısı yükler .....        | 9     |
| Şekil 2.6. Termoelektrik modülün yapısı .....                                 | 11    |
| Şekil 2.7. Termoelektrik modülün jeneratör olarak çalışması.....              | 11    |
| Şekil 2.8. Kıyaslama yöntemi için kullanılan devre.....                       | 13    |
| Şekil 2.9. TE elemana uygulanan akım darbesi .....                            | 17    |
| Şekil 2.10. TE eleman uçlarında görülen transient voltajı .....               | 17    |
| Şekil 2.11. Eksensel ısı akış aparatının yapısı.....                          | 18    |
| Şekil 2.12. Düşük ısı için termal iletkenlik ölçümleri deneyi montaj şeması . | 20    |
| Şekil 2.13. İdeal termoelement.....   | 22    |
| Şekil 2.14. Tek bir termoelementten oluşan gerçek bir TE modül.....           | 31    |
| Şekil 2.15. Gerçek bir termoelektrik modül .....                              | 34    |
| Şekil 2.16. Termoelementin elektrotermal modeli .....                         | 38    |
| Şekil 3.1. Sıcaklık algılama yöntemlerinin karşılaştırılması.....             | 45    |
| Şekil 3.2. Entegre devre sıcaklık algılayıcısının devreye bağlantısı.....     | 47    |
| Şekil 3.3. Basitleştirilmiş termokupl devresi .....                           | 49    |
| Şekil 3.4. Karşılaştırma yöntemiyle sıcaklık ölçen termokupl devresi .....    | 49    |
| Şekil 3.5. İzotermal jonksiyonların bağlanması .....                          | 50    |
| Şekil 3.6. Manyetik alan etkisinin sıfır olduğu durum .....                   | 53    |
| Şekil 3.7. Manyetik alan etkisinin sıfırdan farklı olduğu durum.....          | 53    |

**Sayfa**

|   |    |
|---|----|
| Şekil 3.8. Doğrusal Hall algılayıcı transfer eğrisi .....                     | 54 |
| Şekil 4.1. Termoelektrik test sisteminin ana parçaları .....                  | 55 |
| Şekil 4.2. Termoelektrik test sisteminin genel görüntüsü .....                | 55 |
| Şekil 4.3. Termoelektrik test sisteminin soğutma bloğunun yapısı .....        | 57 |
| Şekil 4.4. İzole edilmiş TE modül ve soğutma bloğu .....                      | 57 |
| Şekil 4.5. Ölçüm ve kontrol sistemi blok şeması .....                         | 58 |
| Şekil 4.6. Termoelektrik test sistemi, kontrol ünitesi.....                   | 59 |
| Şekil 4.7. Yükselteç devresi .....  | 59 |
| Şekil 4.8. Gerilim ve akım algılayıcıları bağlantı şeması .....               | 61 |
| Şekil 4.9. Termokupl yükselteci.....  | 63 |
| Şekil 4.10. A/D dönüştürücü devresi .....                                     | 64 |
| Şekil 4.11. Mikrodenetleyici devresi .....                                    | 66 |
| Şekil 4.12. Mikrodenetleyici programı akış diyagramı .....                    | 67 |
| Şekil 4.13. TE test sistemi ana menüsü .....                                  | 71 |
| Şekil 4.14. Kalibrasyon menüsü.....   | 72 |
| Şekil 4.15. Ayarlar menüsü .....  | 73 |
| Şekil 4.16. Değer ölçümü menüsü .....   | 74 |
| Şekil 4.17. Kayıt göster menüsü .....   | 75 |
| Şekil 5.1. Modül yükünün iki farklı sistemle ölçüm sonuçları.....             | 81 |
| Şekil 5.2. Farklı ısı yükleri için sıcaklık ölçüm kalibrasyon sonuçları ..... | 82 |
| Şekil 5.3. TE test sistemiyle modül parametreleri ölçüm sonuçları .....       | 83 |
| Şekil 5.4. Çalışan TE modül parametrelerinin emk'ya göre değişimi .....       | 83 |
| Şekil 5.5. Modüle uygulanan akıma göre soğuyan yüzey sıcaklık değerleri       | 85 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| <b>Simgeler</b> | <b>Açıklama</b>                              |
|-----------------|--|
| $\alpha$        | Yarıiletkenin Seebeck katsayısı              |
| $\rho$          | Yarıiletkenin öz direnci                     |
| $\lambda$       | Yarıiletkenin ısı iletkenlik katsayısı       |
| $\sigma$        | Elektriksel iletkenlik                       |
| $Q_j$           | Joule etkisi kaynaklı ısı yük                |
| $Q_{rad}$       | Radyasyon kaynaklı ısı yük                   |
| $Q_{kon}$       | Konveksiyon kaynaklı ısı yük                 |
| $Q_{so}$        | Soğuyan yüzeyden emilen ısı yük miktarı      |
| $Q_{s1}$        | Isınan yüzeye aktarılan ısı yük miktarı      |
| $Q_p$           | Peltier ısı                                  |
| $\pi$           | Peltier katsayısı                            |
| $\Omega$        | Ohm  |
| $a$             | Yarıiletkenin kesit alanı                    |
| $A$             | Amper  |
| $E$             | Elektromotor kuvveti (emk)                   |
| $h$             | Yarıiletkenin uzunluğu                       |
| $K$             | Modülün termal iletkenliği                   |
| $Z$             | Termoelektrik yarıiletkenin kalite katsayısı |
| $T_{s1}$        | Isınan yüzey sıcaklığı                       |
| $T_{so}$        | Soğuk yüzey sıcaklığı                        |

| <b>Kısaltmalar</b> | <b>Açıklama</b>                                  |
|--------------------|--|
| <b>ADC</b>         | Analog sayısal dönüştürücü                       |
| <b>COP</b>         | Coefficient of performance (Soğutma performansı) |
| <b>LCM</b>         | Sıvı kristal gösterge                            |
| <b>SMPS</b>        | Anahtarlama modlu güç kaynağı                    |
| <b>TE</b>          | Termoelektrik                                    |
| <b>TEM</b>         | Termoelektrik modül                              |

## 1. GİRİŞ

Isı enerjisi ile elektrik enerjisinin birbirlerine doğrudan dönüşümünü tanımlayan termoelektrik kavramının tarihi 1820'lere dayanmaktadır. Termoelektrik kavramının tarihi 1820'lere dayanmasına karşın termoelektrik elemanlar ancak 1960'lı yıllardan sonra yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Termoelektrik elemanlar; küçük boyutlu olmaları, sarsıntı yapmamaları, sessiz olmaları, 200000 saati aşan ömürleri, etkin sıcaklık kontrolüne izin vermeleri, DC gerilim ile çalışıyor olmaları vb. birçok avantajlara sahiptir. Bu avantajlarından dolayı, askeri alanlarda, uzay çalışmalarında, hibrit araçlarda, bilimsel deneylerde, tıp ve daha birçok alanda, soğutma veya ısıtma amaçlı veya termoelektrik jeneratör olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1-4]. Geçtiğimiz yıllarda kompresörlü soğutucularda kullanılan CFC gazlarının çevre kirliliğine sebep olduğunun anlaşılmasıyla birlikte ev ve işyeri soğutma uygulamalarında da Termoelektrik modüllerle çalışan cihazlara olan ilgi artmıştır. Termoelektrik modüller, sessiz, güvenilir ve çevre dostu aygıtlardır.

Termoelektrik modüllerin bu kadar geniş uygulama alanına sahip olması, ticari firmaların ve bilim adamlarının termoelektrik konusunda çalışmaya sevk etmiştir. Termoelektrik soğutucular konusunda yapılan çalışmaların çoğu, termoelektrik malzemeler ve üretim teknikleri konusundadır. Ancak termoelektrik malzemeler kadar termoelektrik modüllerin analizi de önemlidir [5-7]. Termoelektrik modüllerin ısı parametrelerinin elde edilebilmesi için üretici firmalar ve bilim adamları birçok yöntem geliştirmişlerdir. Isıl parametrelerin ölçülmesine yönelik yapılan çalışmalarda, termoelektrik modülü oluşturan termoelementlerin üretiminde kullanılan yarıiletkenlere ait olan ve ölçülmesi oldukça zor mikroparametreler ( $\alpha$ ; yarıiletkenin Seebeck katsayısı,  $\rho$ ; yarıiletkenin öz direnci,  $\lambda$ ; yarıiletkenin ısı iletkenlik katsayısı ve  $Z$ ; yarıiletkenin kalite katsayısı) ölçülmekte ve bu mikroparametreler kullanılarak termoelektrik modüllerin ısı parametreleri çıkartılmaya çalışılmaktadır. Yarıiletkenlerin  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$ ,  $Z$  gibi parametrelerinin

ölçülebilmesi için çeşitli yöntemler ve cihazlar geliştirilmiştir [8-14]. Benzer şekilde termoelektrik modüllerin özellikleri ve bunları etkileyen faktörlerin araştırılması için de çeşitli yöntem ve cihazlar geliştirilmiştir [15-17]. Buna ek olarak aynı teorik temele dayalı olarak çalışan özel simülasyon test yazılımları da geliştirilmiştir [18].

Ancak termoelektrik modülü oluşturan termoelementlere ait mikroparametrelerin ölçülebilmesi laboratuvar şartlarında mümkün olabilmektedir. Dahası mikroparametrelerin ölçülmesine dayanan bu klasik metotlarla ısı parametrelerinin doğru hesaplanabilmesi için mikroparametrelerin sıcaklığa ve termoelementin yüksekliğine göre değişimlerinin de hesaba katılması gerekmektedir. Termoelektrik modüllerin kullanım amaçlarına ve modellerine göre termoelektrik modülü oluşturan termoelementlerin boyutları farklılık göstermektedir. Bir termoelektrik modülün ısı parametrelerinin hesaplanabilmesi için o termoelektrik modülü oluşturan onlarca veya yüzlerce termoelementin mikroparametrelerinin tek tek ölçülmesi gerekir ki bu oldukça zor bir işlemdir veya bu parametrelerin üretici firmalar tarafından verilmiş olması gerekir. Termoelektrik modüllerin çoğunun üzerinde model numarası yazmadığı için menşei bilinmeyen bir modülün mikroparametrelerinin elde edilmesi imkânsız bir hâl almaktadır.

Termoelektrik teknolojisindeki hızlı gelişmeyle beraber termoelektrik modül ile çalışan cihazların sayısı da hızla artmaktadır. Buna göre üretilen modülün kalite kontrolü için termoelektrik modül üreticileri, termoelektrik konusunda araştırma yapan bilim adamları, termoelektrik modül ile çalışan cihaz üreticileri ve bu cihazların bakım ve onarımını yapan servis görevlileri için, modülün üreticisine, kullanım süresine, mikroparametre değerlerine ihtiyaç duymadan, bir termoelektrik modülün dinamik ısı parametrelerinin belirlenebilmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, çalışan bir termoelektrik modülün, ürettiği emk, sıcaklık, gerilim ve akım gibi kolayca ölçülebilecek dinamik parametrelerini



mikrodenetleyici kontrollü devreler yardımıyla otomatik olarak ölçülebilen ve ölçtüğü dinamik giriş parametrelerini, bilim adamları tarafından kabul edilmiş eşitliklere uygulayarak termoelektrik modülün dinamik ısı çıkış parametrelerini 10 dakika gibi kısa bir sürede ve kolayca çıkartabilen otomatik bir test sistemi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir [19 - 22].

Gerçekleştirilen termoelektrik test sistemi; mikrodenetleyicili, termokupllu, LCD göstergeli, hafızalı, bilgisayar bağlantılı, taşınabilir, pratik ve güvenilir bir sistem olup her çeşit modül ve termoelektrik cihazları test edebilen bir sistemdir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen “Mikrodenetleyici Kontrollü Termoelektrik Test Sistemi” nde kullanılan metot ve yöntemler ile termoelektrik modüllerin yapısı, çalışması, termoelektrik modül parametreleri, bu parametrelerin ölçüm teknikleri bölüm ikide, ölçüm sistemleri, sıcaklık algılayıcıları ve akım ölçme sistemleri hakkında bilgi bölüm üçte verilmiştir. Dördüncü bölümde sistemin gerçekleştirilmesinde kullanılan, akış diyagramları, blok şemalar, açık devre şemaları, kullanılan mikrodenetleyici ayrıntılı bir biçimde ele alınmış ve termoelektrik test sisteminin çalışması anlatılmıştır. Beşinci bölümde gerçekleştirilen sistemin, Melkor firması tarafından üretilen, standart bir termoelektrik modül ve rat termohipoterm cihazı üzerinde uygulamaları ele alınmıştır. Altıncı ve son bölüm sonuç ve önerilere ayrılmıştır.

## 2. TERMOELEKTRİK OLAYLAR, TERMOELEKTRİK ELEMANLAR, PARAMETRELERİ ve ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Elektrik-Elektronik uygulamalar açısından herhangi bir maddeyi karakterize eden ve dikkate alınması gereken maddenin elektriksel özellikleridir. Maddenin elektriksel özellikleri, maddeye elektrik enerjisi uygulandığında gösterdiği termoelektrik tepkilerle açıklanabilir.

### 2.1. Termoelektrik Tepkiler

Termoelektrik tepkiler, ısı enerjisi ile elektrik enerjisinin birbirlerine doğrudan dönüşümü olarak tanımlanır. Bu tanım, İngiliz fizikçi James P. Joule'ün tanımladığı geri dönüşümü olmayan elektrik-ısı dönüşümü ile Seebeck, Peltier ve Thomson tarafından keşfedilen ve kendi adlarıyla anılan üç tersine çevrilebilir etkiyi kapsar.

#### 2.1.1. Joule kanunu

James Prescott Joule'un elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümünü ifade eden ve kendi adı ile isimlendirilen kanuna göre, akım taşıyan bir iletken, direnci ve içinden geçen akımın karesiyle orantılı olarak ısını artırır.

Bir elektrik devresinde birim zamanda ortaya çıkan, Joule etkisi kaynaklı ısı miktarı Eş. 2.1 ile ifade edilir.

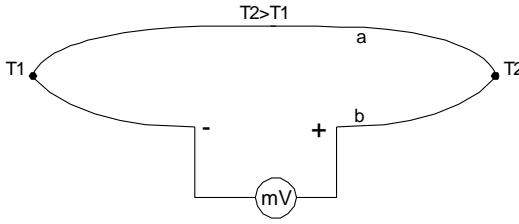
$$Q_j = I^2 R \text{ (W)} \quad (2.1)$$

Burada  $Q_j$ , devreden geçen  $I$  akımının etkisi ile ortaya çıkan toplam, Joule etkisi kaynaklı ısı yükünü,  $I$  devreden geçen akım miktarını,  $R$  ise devrenin elektrik akımına gösterdiği toplam direnç miktarını ifade etmektedir.

### 2.1.2. Seebeck etkisi

Alman fizikçi Thomas J. Seebeck 1820'de, farklı metallere yapılmış iki tel parçasının uçlarının birleştirilerek bir kapalı devre meydana getirildiğinde ve metallere birleşim noktaları arasında bir sıcaklık farkı oluşturulduğunda, iletken uçlarında sıcaklık farkıyla doğru orantılı bir gerilim meydana geldiğini bulmuştur. Böyle bir devre "termokupl" olarak adlandırılır.

Şekil 2.1' de gösterildiği üzere a ve b gibi farklı maddelerden oluşan ve temas uçları arasında sıcaklık farkı ( $\Delta T = T_2 - T_1$ ) meydana getirildiğinde bu uçlar arasında potansiyel farkı ( $\Delta V$ ) meydana gelir.



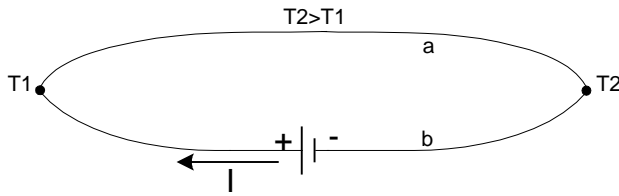
Şekil 2.1. Seebeck olayını açıklayan devre

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

Burada  $\alpha$ , Seebeck katsayısını veya termo emk'yı ifade eder. Birimi  $V / ^\circ C$  dır.  $\alpha$ 'nın değeri, devreyi oluşturan maddelerin özelliklerine bağlıdır. Örneğin bakır ve konstantan'dan yapılan bir termokupl için  $\alpha = 40 \mu V / ^\circ C$ 'dir. Yani bu termokupl her  $1 ^\circ C$  sıcaklık farkı için  $40 \mu V$ 'luk bir emk üretir. Yarıiletkenlerde bu değerler çok daha yüksektir.  $\alpha$ 'nın değeri  $100 \mu V / ^\circ C$ 'dan büyük olan yarıiletkenlere *termoelektrik yarıiletkenler* denir. Yarıiletkenlerin tipine göre  $\alpha$ 'nın işareti değişmektedir. n tipi yarıiletkenler için  $\alpha$  negatif, p tipi yarıiletkenler için ise pozitiftir. Metallerde Seebeck olayı, termokupl veya ısı algılayıcısı gibi, termoelektrik yarıiletkenlerde ise jeneratör gibi kullanılır.

### 2.1.3. Peltier etkisi

1834'de Fransız fizikçi Jean C. A. Peltier (1785–1845), Seebeck etkisinin tersi bir durum keşfetti. Eğer termokupl içerisinde bir akım geçerse, Joule ısı ile birlikte bir eklem noktasından ötekisine ısı transferi sağlayacak şekilde bir ucun sıcaklığı düşerken ötekisinin sıcaklığı yükselir. Joule ısısından farklı olarak ortaya çıkan bu ısıya *Peltier ısı* denir. Açığa çıkan ısı miktarı, uygulanan akım şiddetiyle orantılıdır ve yönü akım yönünün değiştirilmesi ile değişir. Peltier olayını açıklayan devre Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Peltier olayını açıklayan devre

Birim zamanda üretilen Peltier Isısı (Watt olarak) Eş. 2.3 ile ifade edilmiştir.

$$Q_p = \pi I \quad (2.3)$$

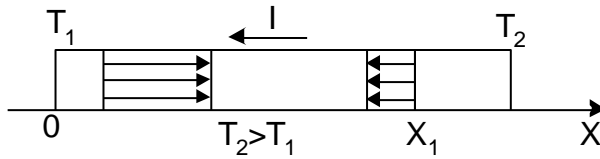
Burada  $\pi$ , Peltier katsayısını ifade eder.

### 2.1.4. Thomson etkisi

İskoç bilim adamı William Thomson (daha sonraları Lord Kelvin olarak anılacaktır), 1856'da termoemk ( $\alpha$ ) ile Peltier katsayısı ( $\pi$ ) arasındaki bağıntıyı kaydetmiştir.

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

Buna ek olarak kendi ismini taşıyacak olan yeni bir olayın hipotezini ortaya atmıştır. Bu olay 1867'de Leru tarafından deneysel olarak kanıtlanmıştır. Thomson olayı şöyle açıklanabilir. Şekil 2.3.'de görüldüğü gibi, akım taşıyan bir iletkenin herhangi iki noktası arasında bir sıcaklık farkı varsa akım yönüne göre iletkende Joule ısısına ek olarak Thomson ısısı ( $Q_T$ ) açığa çıkmaktadır.



Şekil 2.3. Thomson olayını açıklayan devre

Birim zamanda ortaya çıkan Thomson ısısı, akım şiddeti ( $I$ ) ve sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) ile doğru orantılıdır.

$$Q_T = I\alpha_r\Delta T = \alpha_r(T_2 - T_1) \quad (2.5)$$

İki farklı metalden oluşan bir devre için Thomson termoemk'ları arasındaki ilişki Eş. 2.6 ile ifade edilmiştir.

$$\alpha_r = (\alpha_{ra} - \alpha_{rb}) \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (2.6)$$

Buradaki  $\alpha_r$ , Thomson olayında meydana gelen termoemk'dır. Formüldeki  $\alpha_{ra}$  ve  $\alpha_{rb}$  sayıları farklı malzemelerden oluşan devreyi ifade etmek için kullanılmaktadır. Termoelektrik olaylar oluşan devrelerde Thomson olayını yok etmek için  $\alpha_r$  değerleri eşit olan malzemeler seçilmelidir.

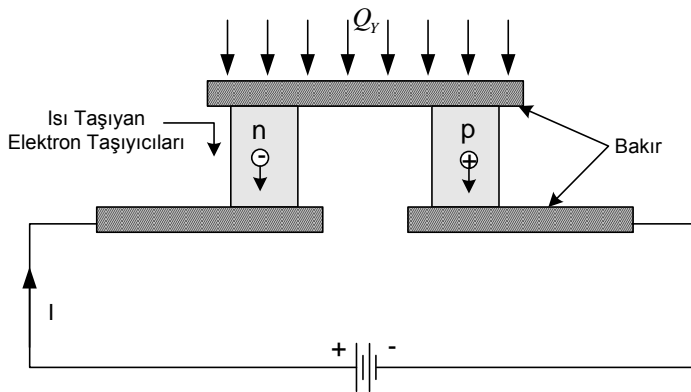
## 2.2. Termoelement ve Termoelektrik Modül

Herhangi bir termoelektrik cihaz veya sistemin temelinde termoelementlerden oluşan termoelektrik modül bulunmaktadır. Bir termoelektrik modül,

termoelementlerin elektriksel olarak seri ve termal olarak paralel bağlanmasıyla meydana gelir.

### 2.2.1. Termoelement

Bir termoelement, n ve p tipi yarıiletkenlerin, Şekil 2.4.'de gösterildiği gibi, bir iletkenle (Bakır) elektriksel olarak seri bağlanmasıyla oluşur. Burada n tipi yarıiletken termoelementin negatif, p tipi yarıiletken termoelementin pozitif kolları olarak tanımlanır. Bir termoelementin çalışma prensibine bakılırsa, eğer termoelemente Şekil 2.4.'deki gibi DC bir gerilim uygulanırsa, yük taşıyıcıları, enerji seviyesi düşük olan üstteki bakırdan yarıiletkene geçerler. Bakır ile yarıiletken arasında mevcut olan enerji duvarını aşmak için elektron ve delikler bakırın örgüsünden enerji sağlarlar. Böylece üstteki bakırın sıcaklığı düşecektir. Altındaki bakırda ise yüksek enerji seviyesinden düşük enerji seviyesine geçen yük taşıyıcıları sahip oldukları fazla enerjiyi alttaki iletkene aktararak ısınmasına neden olacaktır. Bu geçiş sırasında soğuyan yüzeyden ısı emilirken soğuk yüzeyin sıcaklığı düşecek, ısının pompalandığı sıcak yüzeyin sıcaklığı ise artacaktır. Devreye uygulanan akımın yönü değiştirildiğinde ise pompalanan ısının yönü de değişecektir ve soğuyan yüzey ısınırken ısınan yüzey de soğuyacaktır [23].

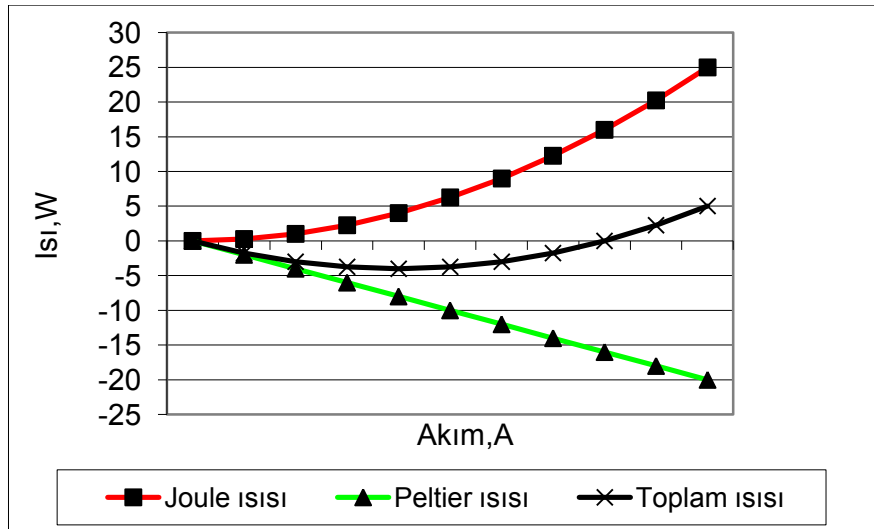


Şekil 2.4. Termoelementin yapısı

Eğer çalışan bir termoelementin sıcak yüzeyinde açığa çıkan ısıyı herhangi bir ısı transfer sistemiyle çevreye yayarak  $T_1$  sıcaklığı sabit tutulursa

devreden geçen  $I$  akım şiddetine bağlı olarak soğuk yüzey sıcaklığı belli bir  $T_2$  değerine kadar düşer. Bir termoelement üzerinden geçen akım şiddeti sabit tutulduğunda  $T_2$  sıcaklığının değeri soğuk yüzeye gelen ve emilen  $Q_Y$  ısı yüküne bağlıdır. Bu ısı yükü çevreden ve sıcak levhadan soğuk levhaya ısı iletiminden dolayı gelen ve termoelement devresinden geçen akım şiddeti etkisi ile açığa çıkan Joule ısısından oluşur.

Şekil 2.5.'de bir termoelementin soğuyan levhasına düşen Joule ( $Q_J$ ) ve Peltier ( $Q_P$ ) ısılarını ve bu ısıların toplamının ( $Q = Q_J + Q_P$ ) akım şiddetine ( $I$ ) göre değişim grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Termoelektrik termoelement üzerinde oluşan ısı yükleri

Peltier ve Joule olayları aynı elektrik devrede gerçekleştiğinden dolayı uygulanan herhangi bir akım şiddeti için bir termoelementin ısısal dengesi  $Q_P$  ve  $Q_J$ 'nin cebirsel toplamı olan  $Q = Q(I)$  fonksiyonu ile karakterize edilmektedir. Şekil 2.5.'deki  $Q = Q(I)$  grafiği bir minimumdan geçmektedir. Toplam ısının minimuma ulaştığı akım şiddetine maksimum akım ( $I_{max}$ ) denir. Bir termoelemente maksimum akım uygulandığında soğuyan levha üzerindeki sıcaklık düşümü maksimum olur. Bir termoelementin veya termoelementlerden oluşan bir modülün maksimum akım şiddetinin değeri

termoelementin üretiminde kullanılan termoelektrik yarıiletkenlerin kalitesine, boyutlarına ve yapısal özelliklerine göre değişir. Bir termoelemente uygulanan akım şiddeti,  $I_{max}$ 'dan büyük olduğunda Joule ısı Peltier ısısından fazla olur. Bu nedenle soğuma etkisi azalır ve akımı maksimum akımın iki katına ( $I=2I_{max}$ ) ulaştığında soğutma gerçekleşmez. Bu durumda Peltier ısı Joule ısını dengeler. Akım değeri daha da arttığında, yani  $I > I_{max}$  olduğunda ısıl denge bozulur. Joule ısı Peltier ısısından daha fazla olur ve termoelement soğutma özelliğini kaybeder. Bu durumda termoelement bir rezistans gibi davranır ve ısınır [24].

Bir termoelementin çalışmasını en çok etkileyen Joule ısıdır. Peltier ısı akım şiddeti ile doğru orantılı iken Joule ısı akım şiddetinin karesi ile doğru orantılıdır. Bir yaklaşım olarak, termoelementin üzerinde açığa çıkan Joule ısının levhalar arasında eşit paylaşıldığı kabul edilirse soğuyan levhaya düşen ısı miktarı Joule ısının yarısıdır.

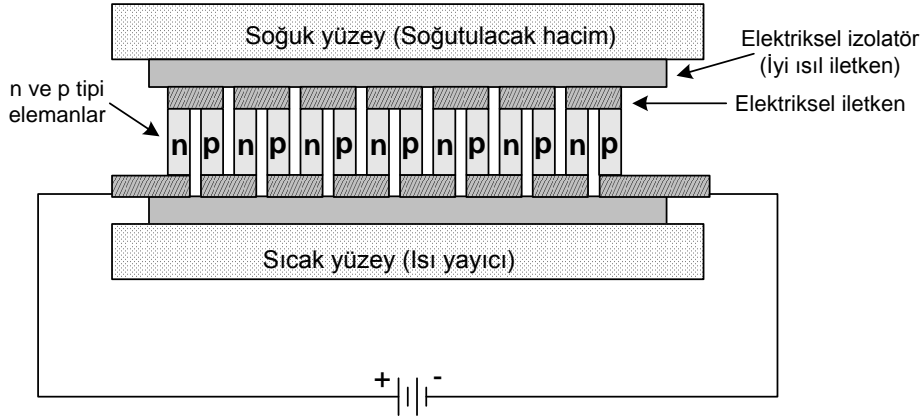
### 2.2.2. Termoelektrik modül

Onlarca termoelement elektriksel olarak seri, termal olarak paralel bağlanarak kullanım amacına göre çeşitli büyüklüklerde termoelektrik modüller elde edilmektedir. Termoelektrik modüller, hareketli parçası olmayan küçük birer ısı pompasıdır. Termoelektrik modüller genelde alan sınırlamasının olduğu, güvenilirliğin önemli olduğu ve zararlı soğutucu gazların kullanılmasının istenmediği ortamlarda tercih edilirler. Termoelektrik soğutucu, DC gerilimle çalışmakla beraber akım yönünün değiştirilmesiyle soğutma veya ısıtma rejimine kolayca geçebilmektedir. Soğutma, termoelektrik modülün bir yüzeyindeki ısının diğer yüzeye taşınmasıyla gerçekleşmektedir. Şekil 2.6.'da bir termoelektrik modülün yapısı görülmektedir.

Termoelektrik modüller sadece soğutma veya ısıtma amaçlı değil aynı zamanda enerji üretiminde de kullanılmaktadır. Eğer termoelektrik modülün

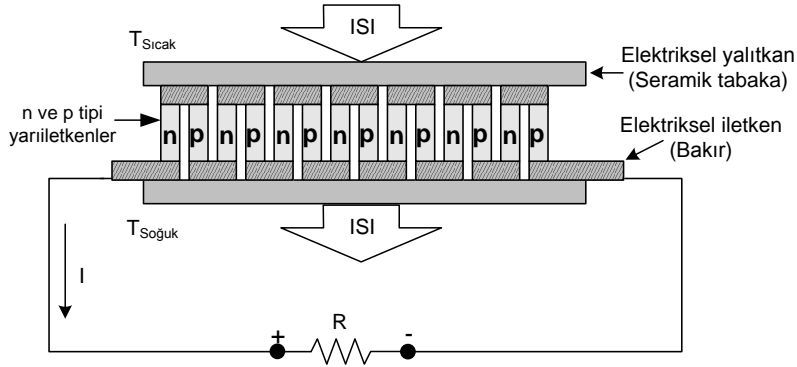


iki yüzeyi arasında sıcaklık farkı meydana getirilirse, modülde meydana gelen Seebeck olayından dolayı, modül bir DC güç kaynağı gibi davranır. Mevcut olan güneş pillerinden farklı olarak termoelektrik jeneratörler yüksek derecede akım ve orta derecede gerilim üretebilmektedir [25, 26].



Şekil 2.6. Termoelektrik modülün yapısı

Termoelektrik modülün jeneratör olarak çalışması Şekil 2.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Termoelektrik modülün jeneratör olarak çalışması

### 2.3. Yarıiletkenlerin Termoelektrik Parametreleri ve Ölçüm Yöntemleri

Termoelektrik özellikler sadece yarıiletkenlerde değil metallerde de görülen bir özelliktir. Ancak metallerde termoelektrik  $\alpha$ 'nın (Seebeck katsayısı) küçük olmasından dolayı soğutma ve enerji üretim sistemlerinde kullanılmamaktadır. Yarıiletkenler ise  $\alpha$  parametreleri çok yüksek olduğu için

soğutma-ısıtma ve enerji üretim sistemlerinde termoelektrik madde olarak kullanılmaktadırlar.

Termoelektrik yarıiletkenler grubunu termoemk'ları çok yüksek olan ( $\alpha > 100 \mu\text{VK}^{-1}$ ) yarıiletkenler oluşturmaktadır. Örnek olarak; Bizmut (Bi), Antimon (Sb), Selenyum (Se), Telleryum (Te) gibi yarıiletkenlerin yanı sıra  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  vb. bileşimler ile  $\text{Bi}_2\text{Te}_3+\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{Te}_3+\text{Bi}_2\text{Te}_3$  gibi alaşımlar gösterilebilir. Bunlardan  $\alpha$ 'sı çok yüksek olan ve dünyada soğutucuların ve jeneratörlerin üretiminde en çok kullanılan  $\text{Bi}_2\text{Te}_3+\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{Te}_3+\text{Bi}_2\text{Te}_3$  alaşımlarıdır. Bu alaşımların  $\alpha$  katsayısı  $200 \mu\text{VK}^{-1}$  ile  $240 \mu\text{VK}^{-1}$  arasında değişmektedir. Termoelektrik yarıiletkenlerin parametreleri,  $\alpha$  parametresinin yanı sıra herhangi bir yarıiletkenin temel parametreleri olan elektrik iletkenliği ( $\sigma$ ) ve ısı iletkenliğinden ( $\lambda$ ) oluşmaktadır. Termoelektrik yarıiletkenler termoelektrik modül veya termoelektrik jeneratör gibi kullanılabilirdiği için bunların kalitesini karakterize eden kalite katsayısı (figure of merit –  $Z$ ) parametresi de önem taşımaktadır.

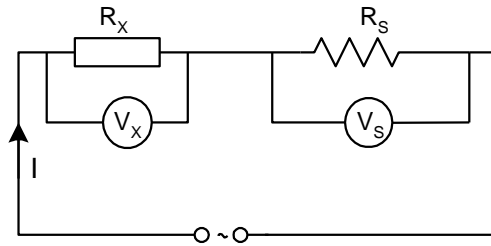
Termoelektrik yarıiletkenlerin  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\lambda$  ve  $Z$  parametrelerinin ölçülmesi hem teorik araştırmalar açısından hem de deneysel araştırmalar açısından önemlidir. Bu parametrelerin ölçülmesinin diğer bir önemi de yarıiletkenlerden yapılan modüllerin ve modüllerden üretilen ürünlerin kalitesini belirlemesidir.

Termoelektrik mikroparametrelerin ölçülmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin başında, sonradan geliştirilen yöntemlere temel teşkil eden, T.C. Harman tarafından geliştirilen ve Harman metodu olarak bilinen yöntem gelmektedir [27, 28].

### 2.3.1. Elektriksel iletkenlik ( $\sigma$ ) parametresinin ölçülmesi

Yarıiletken maddelerde direnç, metallerde olduğu gibi, sıcaklığa göre lineer olarak değil karmaşık bir biçimde değişmektedir. Termoelektrik yarıiletkenlerden DC akım geçtiğinde termoemk meydana gelmekte ve

iletkenlik değişmektedir. Buna göre alternatif akım uygulanarak ölçümler yapılmalıdır. Joule ısısından dolayı alternatif akımda bile termoelektrik yarıiletkenlerin iç dirençleri değişir. Bu durumda numunenin direncini ölçmek için doğrudan Ohm kanunu kullanılamaz. Bu sorunu çözmek için T.C. Harman'ın önerdiği kıyaslama yöntemi kullanılır [15]. Bunun için Şekil 2.8.'de olduğu gibi, birbiri ile seri bağlı numune ( $R_x$ ) ve standart ( $R_s$ ) dirençlerinden sabit akım geçirilerek üzerlerinde düşen voltaj değerleri ( $V_x$  ve  $V_s$ ) ölçülür.



Şekil 2.8. Kıyaslama yöntemi için kullanılan devre

Devreden geçen akım sabit tutulduğundan  $I$  akımı Eş.2.7 ile ifade olunur.

$$I = \frac{V_x}{R_x} = \frac{V_s}{R_s} = \text{sabit} \quad (2.7)$$

Buradan  $R_x$ , Eş. 2.8'den bulunabilir:

$$R_x = \frac{V_x \cdot R_s}{V_s} \quad (2.8)$$

Diğer taraftan  $R_x$ , Eş. 2.9'daki gibi yazılabilir.

$$R_x = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{h}{a} \quad (2.9)$$

Burada  $h$  numunenin uzunluğu,  $a$  kesit alanıdır. Bu iki formülden Eş. 2.10 ve Eş. 2.11 ifadeleri elde edilebilir.

$$R_x = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{h}{a} = \frac{V_x \cdot R_s}{V_s} \quad (2.10)$$

$$\sigma = \frac{V_s h}{V_x R_s a} \quad (2.11)$$

Böylece numunenin iletkenliğini ( $\sigma$ ) ölçmek için  $h$  uzunluğu,  $a$  kesit alanı, üzerinde düşen  $V_x$  voltajı ve standart direncin ( $R_s$ ) üzerindeki  $V_s$ 'nin ölçülmesi gerekmektedir. Ölçümleri daha hassas kılmak için  $R_s$  değeri  $R_x$  değerine yakın seçilmelidir. Ayrıca, yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği  $\sigma$  ile öz direnci  $\rho$  arasındaki bağıntı Eş. 2.12 deki gibi olduğundan,  $\sigma$  nın ölçülmesinde kullanılan yöntemle  $\rho$  da kolayca ölçülebilmektedir [29].

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.12)$$

### 2.3.2. Seeback katsayısı ( $\alpha$ ) parametresinin ölçülmesi

Yarıiletkenlerin  $\alpha$  parametresini bulmak için ısıtıcıyı kullanarak termoelektrik numunenin üst ( $T_{si}$ ) ve alt ( $T_{so}$ ) uçları arasında sıcaklık farkı oluşturulduğunda ( $\Delta T = T_{si} - T_{so}$ ) bu uçlar arasındaki termoemk ( $E$ ) ölçülür. Bu değerler kullanılarak Eş. 2.13'den  $\alpha$  hesaplanabilir:

$$\alpha = \frac{E}{\Delta T} \quad (2.13)$$

Harman, 1960 yılında geliştirdiği yöntemle, kullanılan ölçüm cihazlarının yetersizliğinden dolayı, tekrarlanabilirlikte ve doğrulukta istediği sonuçları elde edememiştir [15]. 1992'de Buist, termoelektrik materyal ve elementlerin kinetik özelliklerinin test edilmesi için, T. C. Harman tarafından geliştirilen metodla aynı temele dayanan ancak tekrarlanabilirlikte ve doğrulukta iyileşmeler yaparak yeni bir yöntem geliştirmiştir. Transient test metodu adı verilen bu yöntemin özelliği; yüksek çözünürlüklü, yüksek hızlı analog-dijital (ADC) dönüştürücüye sahip bir bilgisayar kartının kullanılıyor olmasıdır. Bu yöntemde, bilgisayar yuvalarından birine takılacak kartla bilgisayar özel bir

dijital voltmetreye dönüştürülmüştür. Böylece voltmetrenin kademe kontrolü, elektronik filtreleme, ani darbe voltajı ölçümü gibi değişik fonksiyonlarının tamamı PC tarafından kontrol edilebilmiştir. Bu özelliklerin hepsi doğruluk, hızlı transient voltaj ölçümü, yüksek çözünürlüklü darbe voltajı ölçümü, kararlılık ve tekrarlanabilirlik sağlamıştır [10, 15].

Transient test metodolojisinin detayını ve mahiyetini tam olarak anlamak için bir termoelektrik elemanın temel etkilerinin gözden geçirilmesi uygun olacaktır. Bir ( $I$ ) akımı, bir termoelektrik elemana uygulandığında termoelektrik modül uçlarında bir ( $V$ ) gerilim düşümü meydana gelir. Eğer Ohm kanunu tek olgu olarak kabul edilseydi ortaya çıkan gerilim, uygulanan akımla doğru orantılı olacaktı. Orantının sabitesi elektrik direnci ( $R$ ) olacaktı. Ancak bir termoelektrik eleman Ohm kanununa uygun hareket etmez. Bir termoelektrik elemana karşılık gelen gerilim için çıkarılan ifade Eş. 2.14 denkleminde verilmektedir:

$$V_i = V_o + V_r \quad (2.14)$$

Burada  $V_o$  ve  $V_r$  Eş. 2.15 ve Eş. 2.16 ile ifade edildiği gibidir.

$$V_o = \alpha \Delta T \quad (2.15)$$

$$V_r = IR \quad (2.16)$$

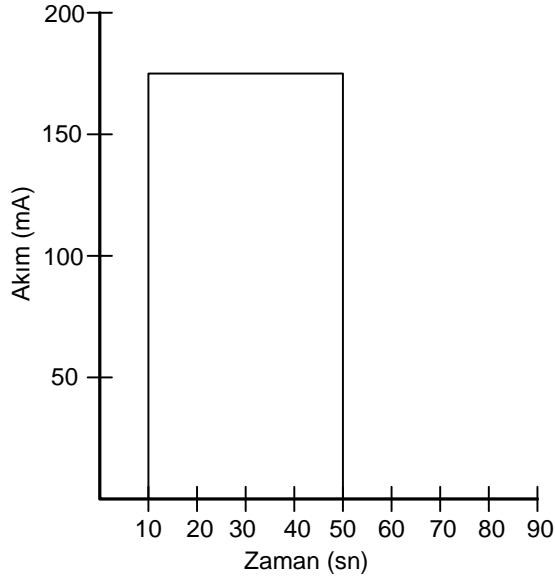
İlk bakışta, akım çok düşük tutulduğunda muhtemelen yüzeyler arasında bir sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) meydana gelmeyeceği ve ilk terimin ihmal edilebileceği düşünülebilir. Bu kesinlikle söz konusu değildir. Gerçekte  $V_o$  terimi küçük akımlarda bile büyük olacaktır. Akım ve  $V_r$  sıfır olduğunda bile  $V_o$  kolay kolay sıfır olamayacaktır.

Mevcut yöntemlerle  $V_i$ ,  $I$  ve  $\Delta T$  ölçülebilir. Ancak  $V_o$  ve  $V_r$ 'nin birbirinden ayrılması kolay değildir. Harman metodu [27], bu iki voltaj elemanını bir

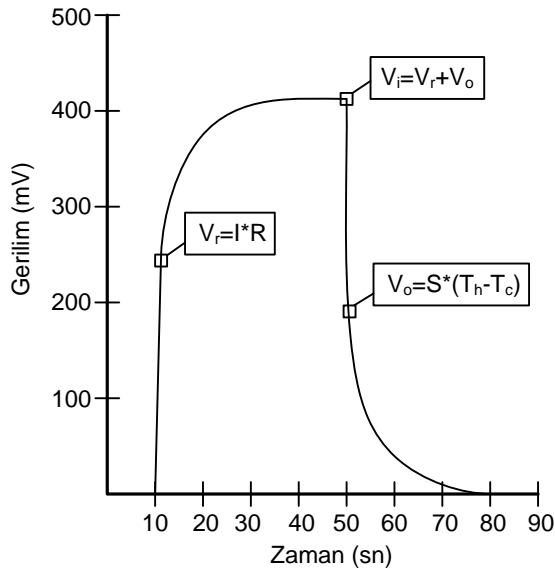
mekanik kesici kullanan çift kutuplu bir kare dalga AC akım yaratarak ayırmaktadır. Her bir yarım periyot süresince meydana gelen anlık ölü bant ve elektrik kontaklarının kapanıp açılması esnasında ortaya çıkan gürültüyü de barındıran bu deneysel düzenele ilgili birtakım problemler mevcuttur. Daha karmaşık elektronik anahtarlamalar kullanılarak yıllardır bir takım iyileştirmeler yapılmasına rağmen kesin ölçümlerle ilgili hâlâ temel problemler mevcuttur.

Bu problemin çözümü  $V_r$ 'yi ölçmek değil  $V_o$ 'yu ölçmektir. Eğer akım kaldırılır ve artık gerilim aniden ölçülürse, ölçülen gerilim  $V_o$  olacaktır. Ancak, akım kesildikten sonra  $V_o$ 'nun son derece hızlı ölçülmesi gereklidir. Bu süreyi uzatmak termoelektrik eleman yüzeyleri arasında meydana getirilen sıcaklık farkının sabit tutulmasıyla mümkündür. Ancak bunun gerçekleştirilebilmesi için kullanılan mevcut yöntemler yetersiz kalmaktadır. Buist tarafından geliştirilen transient test metodu,  $V_o$ 'nun kesin bir şekilde belirlenmesini sağlamıştır.

Transient test metodu Şekil 2.9. ve Şekil 2.10.'da grafiksel olarak gösterilmektedir. Şekil 2.9.'a uygun bir akım uygulandığında, TEM uçlarında görülecek gerilim Şekil 2.10.'da gösterildiği gibi olacaktır. Gerilim aniden  $V_r$  değerine ve sabit durumda asimptotik olarak  $V_i = V_o + V_r$  değerine yükselir. Akım kesildiğinde ise voltaj aniden  $V_o$ 'ya düşer ve üstel olarak sifıra iner [15].



Şekil 2.9. TE elemana uygulanan akım darbesi



Şekil 2.10. TE eleman uçlarında görülen transient voltajı

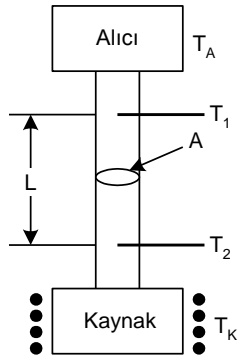
### 2.3.3. Termal iletkenlik ( $\lambda$ ) parametresinin ölçülmesi

Termal iletkenlik ölçümleri zor olmamakla birlikte ölçümler uzun zaman almakta ve sabit ortam şartlarını gerektirmektedir. Termal iletkenlik parametresi, oda sıcaklığının altında, hem mutlak hem de karşılaştırmalı metotlarla, neredeyse sabit olarak ölçülebilmektedir. Oda sıcaklığının üzerinde sıcaklık kayıpları daha önemli hale gelir ve sıcaklık artışı

belirlemek daha zor hale gelir. Oda sıcaklığının altında ölçüm yapabilen, temel termal iletkenlik ölçüm metotları çok yaygın biçimde kullanılır ve termoelektrik maddelerde kullanılan başlıca metotlar aşağıda anlatılmaktadır [30].

### Mutlak aksenal ısı akışı yada termal potansiyometre

Bu metot, çoğunlukla düşük sıcaklıklarda ölçümler yapmak için kullanılmıştır ve prensipte modern gereçlerden biraz farklı biçimde Lees tarafından 80 yıl önce kullanılmıştır [31]. Ölçüm sisteminin deneysel düzeneği Şekil 2.11.'de görülmektedir.



Şekil 2.11. Eksensel ısı akışı aparatının yapısı

Eğer kaynak tarafından sağlanan ısı,  $Q(=\partial q/\partial T)$ , homojen  $A$  çubuğu üzerine bağlanırsa ve sıcaklık farkını ölçmek için kullanılacak olan termometreler arası mesafe  $L$  ise bu durumda çubuk üzerindeki herhangi bir noktada termal iletkenlik Eş. 2.17 ile ifade edilir.

$$\lambda(T) = \frac{\dot{Q}}{A} \frac{\partial L}{\partial T} \quad (2.17)$$

$L$  mesafesi uzunluğundaki, 1 ile 2 noktaları arasındaki, ortalama termal iletkenlik,

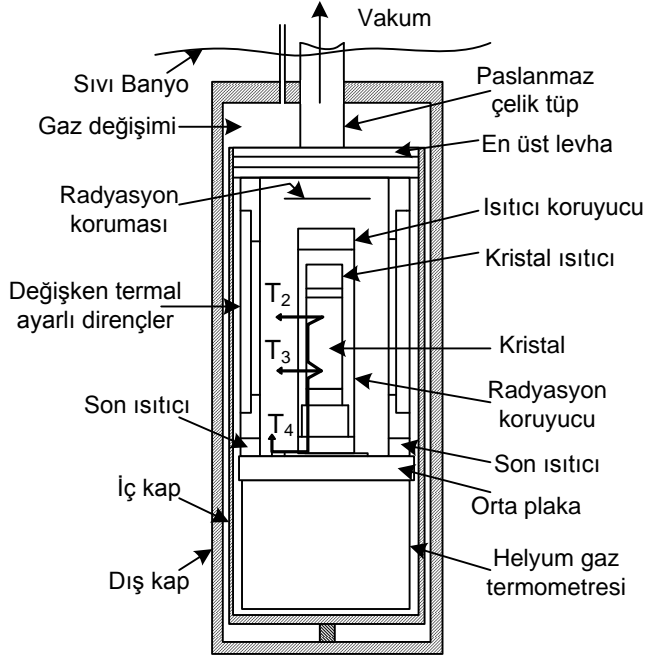


$$\lambda(T) = \frac{\dot{Q} L}{A \Delta T} \quad (2.18)$$

İle verilir. Burada  $\Delta T = T_2 - T_1$  dir. Bu varsayımda sıcaklığın  $L$  mesafesi boyunca düzgün olarak dağıldığı kabul edilmektedir. Ayrıca,  $T_1$  ve  $T_2$  sıcaklığını ölçmek için kullanılan termokupulların lehimlenmesinden, konveksiyon ve radyasyondan kaynaklanan ısı kayıpları ihmal edilmektedir.

Pratikte, çubuğun  $L$  uzunluğu  $A$  çapından daha büyük olmalıdır. Düşük iletkenlikli materyaller için,  $L/A$  küçük seçilmediği sürece, dengelenme süresi çok uzun olmaktadır. Termoelektrik materyal için tipik olarak 3-4 mm ve  $L/A \leq 10$  tercih edilir.

Sistemin, mümkün olduğunca geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmesi için, soğutucu bloğa bağlanan ısı alıcısının bir elektrikli ısıtıcıya bağlanması mümkündür. Sıcaklık, direnç termometre veya termokupla ölçülebilir. Bu cihazın çeşitli versiyonları 300°K'da termoelektrik materyal ve yarı iletkenlerde kullanılmak amacıyla yapılmıştır. Bunlardan bir tanesi olan ve Slack tarafından gerçekleştirilen cihaz Şekil 2.12.'de görülmektedir. Sistem, harici çeşitli sıvılar içerisine konulabilir. Ön ısıtıcı, sıcaklığı 3-300°K aralığında bir sıcaklığa getirir. Yaklaşık  $10^{-6}$  Torr'luk bir vakum yapılmıştır. Radyasyon koruyucu, 200°K'nın üzerindeki radyasyon kayıplarını önlemek için yerleştirilmiştir [31].



Şekil 2.12. Düşük ısı için termal iletkenlik ölçümleri deneyi montaj şeması

### Karşılaştırmalı metotlar

Karşılaştırmalı metot; termal iletkenliği bilinen, uygun bir referans materyal ile termal iletkenliği bilinmeyen bir materyalin termal iletkenliğinin tespit edilmesidir. Termal iletkenliği ölçülecek parça, termal iletkenliği bilinen iki referans silindir arasına yerleştirilir. Termal iletkenliği bilinmeyen maddenin ve standart maddenin sıcaklık değişimi ölçülür. Eğer kesitler eşit ise,  $\lambda$  değeri Eş. 2.19 ile ifade edilebilir.

$$\lambda = \frac{\lambda_{ST}(\Delta T / \Delta x)_{ST}}{(\Delta T / \Delta x)} \quad (2.19)$$

Burada  $\lambda_{ST}$ , bilinen standart termal iletkenliktir ve  $(\Delta T / \Delta x)_{ST}$ ,  $(\Delta T / \Delta x)$  standart ve test örneğinin sıcaklık değişimleridir.

Bu metot mutlak metot kadar yüksek doğruluğa sahip değildir. Doğruluğu %3'tür [31].

### Diğer Termal İletkenlik Ölçüm Metotları

Termoelektrik materyaller için iki mutlak metot kullanılabilir. Bunlar Kohlrausch metodu ve ışınsal ısı akış metodudur. Kohlrausch metodu, elektriksel iletken parçalar için geçerlidir ve ısının kaynağı, örnek içerisinde geçen akımdır. Termal iletkenlik, gerçekleşen ısı yayılımından hesaplanabilmektedir. Prensip olarak metot termoelektrik materyallerde uygulanabilir ancak fazlada kullanışlı değildir. Işıksal ısı akış cihazları, termoelektrik maddelerin ısı iletkenliğinin belirlenmesinde daha uygundur. Işıksal ısı akış metodu, termal iletkenlik ölçüm teknikleri içerisinde en geniş çalışma sıcaklığı aralığına sahip olan tekniktir. Çalışma sıcaklığı 2000°K üzerine kadar çıkarılabilir. Gerekli büyüklükte ve homojen yapıya sahip bir termoelektrik materyal elde etmenin çok zor olması, tekniğin termoelektrik madde uygulamasında karşılaşılan en büyük zorluktur [32].

#### **2.3.4. Kalite katsayısı (Z)**

Bir termoelektrik yarıiletkenin veya bir termoelementin veya bir termoelektrik modülün en önemli parametresi Z (kalite katsayısı – figure of merit) parametresidir. Çünkü bir termoelektrik modül soğutucu olarak çalıştırıldığında bunu karakterize eden soğutma performansı (Coefficient of Performance - COP), kalite katsayısı Z değerine bağlıdır.

$$COP = \frac{T}{\Delta T} \left( \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + 1} \right) - \frac{1}{2} \quad (2.20)$$

Burada  $T = (T_{Si} + T_{So}) / 2$  dir.

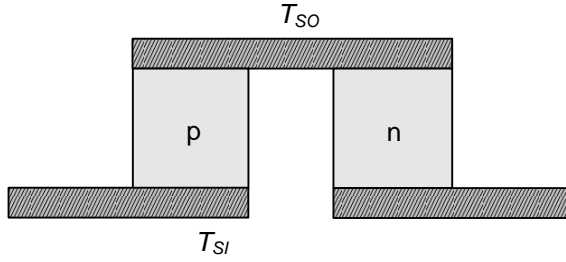
Termoelektrik modülün soğuk yüzeyi ile ısınan yüzeyi arasındaki maksimum sıcaklık farkı olan  $\Delta T_{max}$  değeri de Z parametresine doğrudan bağlıdır [33].

$$\Delta T_{\max} = T_{Sl} - \frac{\sqrt{1 + 2ZT_{Sl}} - 1}{Z} \quad (2.21)$$

Bir modül jeneratör olarak çalıştırıldığında jeneratörün verimi yine Z değeri ile belirlenir:

$$\eta = \frac{T_{So}}{T_{Sl} - T_{So}} \left( \frac{\sqrt{1 + ZT} - T_{Sl} / T_{So}}{\sqrt{1 + ZT} + 1} \right) \quad (2.22)$$

Eğer Şekil 2.13. de gösterilen, idealize edilmiş (yarıiletkenlerin dışındaki elemanların direnci sıfır kabul edilmiş) termoelementi ele alırsak bu termoelementin Z parametresi Eş. 2.23'teki formülle ifade edilecektir.



Şekil 2.13. İdeal termoelement

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{\left[ (\lambda_p \rho_p)^{1/2} + (\lambda_n \rho_n)^{1/2} \right]^2} \quad (2.23)$$

Burada,  $\alpha_n$ ,  $\rho_n$ ,  $\lambda_n$ , sırasıyla n tipi yarıiletkenin Seebeck, özdirenç, ısı iletkenlik katsayısı ve  $\alpha_p$ ,  $\rho_p$ ,  $\lambda_p$ , sırasıyla p tipi yarıiletkenin Seebeck, özdirenç ve ısı iletkenlik katsayısıdır. Termoelementin her iki kolunun uzunluk-kesit oranlarını değiştirerek belirli bir soğutma gücü ve akım değeri için modüller tasarlanabilir. Her iki maddede, Seebeck ve Peltier katsayılarının, büyük ve zıt işaretli olmaları gerekmektedir. Buna ek olarak, termal iletkenlik ve elektriksel direnç düşük olmalıdır. Başka bir deyişle, geri

dönüşümlü termoelektrik etkiler, ısı iletimi ve Joule ısınmasının geri dönüşümsüz etkilerine baskın olmalıdır [34].

n tipi yada p tipi kaliteli termoelektrik madde elde etmek için Eş. 2.23, her iki termoelementin özelliklerini de barındırdığından dolayı kullanışlı değildir. Bu durumda tek bir maddenin kalite katsayısının belirlenmesinde Eş. 2.24 kullanılabilir.

$$z_{p,n} = \frac{\alpha_{p,n}^2}{\rho_{p,n} \lambda_{p,n}} \quad (2.24)$$

Sadece özel durumlarda, z kalite katsayısı gerçek Z kalite katsayısı ile ilişkilendirilebilir. Böyle bir durum, p tipi ve n tipi maddelerin her ikisinin, Seebeck katsayılarının işaretleri dışındaki bütün özelliklerinin eşdeğer olması durumudur. Yani,  $\alpha_p = -\alpha_n$  ve  $\lambda_p \rho_p = \lambda_n \rho_n$ . Böylece  $Z = z_p = z_n$  olur. Bu durum, düşük sıcaklıklarda çalışan termoelektrik soğutucularda kullanılan maddelerde geçerlidir.

Her iki kolun z değerlerinin ortalaması alınarak elde edilen termoelement için kalite katsayısı eşitliğinin alışlagelmiş şekilde uygulaması önemli hatalara yol açmasına rağmen bu yöntemin literatürde geniş çapta kullanıldığı bilinmektedir [35].

### Z'nin ölçülmesi (Z-metre)

Bir Z-metre, bir termoelektrik maddenin Z değerinin hesaplanmasında kullanılan üç termoelektrik parametrenin sıcaklığın fonksiyonu olarak aynı anda ölçülebilen bir cihazdır. Putley, örnek bir termoelektrik maddeden küçük bir akım geçirildiğinde oluşan Peltier ısısını veya soğumasını ölçmek için kullandığı bir cihazı tanımlamaktadır [36-38]. Ortaya çıkan küçük sıcaklık farkı bir Seebeck voltajı oluşmasına neden olur ve termal iletkenlik sabit çalışma koşullarından hesaplanabilir. Harman, aynı düşünce üzerine,

çalışması yukarıda anlatılan, Z-metre cihazını geliştirmiştir. Bu cihaz yardımıyla Z değeri deneysel olarak Eş. 2.24 denklemi kullanılarak belirlenebilmektedir. Ancak ölçüm sistemlerinden kaynaklanan hatalar, hesaplanan Z değerinin de hatalı olmasına neden olmaktadır.

## 2.4. Termoelement Parametrelerinin Ölçüm Yöntemleri

Bilinen birçok yöntemle bir yarıiletkenin mikroparametreleri ve bir modülün öz direnci, Seebeck katsayısı, ısı iletkenliği ve kalite katsayısı değerleri ölçülebilmektedir [1-11, 39]. Bu parametreler kullanılarak gerektiği takdirde bir termoelement veya termoelektrik modülün ısı parametreleri hesaplanabilmektedir.

### 2.4.1. Klasik ölçüm yöntemi

Klasik yöntemlerle bir termoelektrik modülün ısı parametrelerinin ölçülmesi yarıiletkenlerin mikroparametrelerinin belirlenmesine bağlıdır. Klasik yöntemleri açıklayan denklemler aşağıda verilmiştir.

Bir termoelektrik modülün soğuyan ve ısınan yüzeyindeki ısı denge denklemleri genel olarak Eş. 2.25 ve Eş. 2.26'daki gibidir [12, 15, 40].

$$Q_{SO} = \alpha I T_{SO} - 0,5 I^2 R - K(T_{SI} - T_{SO}) - Q_Y \quad (2.25)$$

$$Q_{SI} = \alpha I T_{SI} + 0,5 I^2 R - K(T_{SI} - T_{SO}) \quad (2.26)$$

Burada,  $Q_{SO}$ , Watt olarak modülün soğuk yüzeyine gelen toplam ısı yükü,  $Q_{SI}$ , Watt olarak modülün ısınan yüzeyinde açığa çıkan toplam ısı miktarı,  $I$  modüle uygulanan akım şiddeti,  $R = (1/\sigma_n + 1/\sigma_p)(h/a)$  termoelementin direnci,  $K = (\lambda_n + \lambda_p)a/h$  termoelementin ısı iletkenlik katsayısı,  $\sigma_n$ , n tipi yarıiletkenin iletkenlik katsayısı,  $\sigma_p$ , p tipi yarıiletkenin iletkenlik katsayısı,  $h$

ve  $a$  yarıiletkenin yüksekliği ve kesit alanı,  $\alpha = (|\alpha_p| + |\alpha_n|)$  ise termoelementin toplam Seebeck katsayısıdır. Ayrıca  $(T_{Sl} - T_{So}) = \Delta T$  iken  $T_{So}$  ve  $T_{Sl}$  soğuyan ve ısınan yüzeylerin sıcaklığı,  $Q_Y = Q_{Rad} + Q_{Kon}$ , Watt olarak alınan toplam dış ısı yükü iken  $Q_{Rad}$ , Watt olarak toplam radyasyon dış ısı yükü,  $Q_{Kon}$  Watt olarak alınan toplam konveksiyon dış ısı yüküdür.

Bir modülün tükettiği güç,  $P$ ,

$$P = I^2 R + \alpha (T_{Sl} - T_{So}) I \quad (2.27)$$

şeklinde ifade edilir. Bir modülün  $COP$ 'u (verim)  $Q_{So}$ 'nun  $P$ 'ye oranına denir.

$$COP = \frac{Q_{So}}{P} \quad (2.28)$$

Ayrıca bir modülün kalite katsayısı,

$$Z = \frac{\alpha^2}{RK} \quad (2.29)$$

ile verilir [12]

Elde edilen bu denklemler bir termoelektrik modülün veya bu termoelektrik modülden yapılan soğutucuların ve cihazların ısıl parametrelerinin hesaplanmasının temelini teşkil etmektedir. Bu formülleri kullanarak yapılan hesaplamalar hatalara yol açabilmektedir [16, 18]. Çünkü elde edilen parametreler bir modülün gerçek şartlardaki dinamik parametreleri değildir. Çalışan bir modülün çıkış parametrelerinin bu yöntemle göre değerlendirilmesi gerçek değerlerden farklıdır. Bunun nedeni,  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\lambda$ ,  $Z$  gibi mikroparametrelerin sadece sıcaklığa göre değil yarıiletkenin yüksekliğine göre de değişmesidir. Buna ilaveten bu formüllerde gerçek bir

modülün yapısal ve teknolojik faktörlerinin hesaba katılmamış olması kullanılan yöntemi yetersiz kılmaktadır [16, 29].

#### 2.4.2. Geliştirilmiş klasik ölçüm yöntemleri

Gerçek bir termoelektrik modül ele alındığında, modülün ısı parametreleri klasik yöntemlere göre mikroparametrelerinin hesaplanmasıyla elde edilebilmektedir. Klasik yöntemlerde mikroparametreler sabit kabul edilmektedir. Sabit kabul edilen mikroparametreler kullanılarak yapılan hesaplamalar doğal olarak hatalara yol açmaktadır. Gerçekten mikroparametreler; sıcaklığa göre, termoelektrik kolların boyutuna göre ve modülün oluşturulmasında kullanılan lehim gibi ara maddelerin özelliğine göre değişmektedir. Bu üç faktörün her birini öne çıkaran geliştirilmiş klasik ölçüm yöntemleri mevcuttur.

#### Sıcaklık faktörünü hesaba katan geliştirilmiş klasik yöntem

Mikroparametrelerin sıcaklığa göre değişimini hesaba katan klasik yöntemin temelleri aşağıdaki formüllerle ifade edilmektedir [18]:

$$Q_{so} = 2N \left( \alpha I T_{so} - \frac{I^2 \rho}{2G} - \lambda \Delta T G \right) \quad (2.30)$$

$$V_{max} = 2N \left( \frac{\alpha I \rho}{G} + \alpha \Delta T \right) \quad (2.31)$$

$$I_{max} = \frac{\lambda G \left( \sqrt{1 + 2zT_{st}} - 1 \right)}{\alpha} \quad (2.32)$$

$$I_{opt} = \frac{\lambda \Delta T G \left( 1 + \sqrt{1 + ZT} \right)}{\alpha T} \quad (2.33)$$



$$\Delta T_{\max} = T_{st} - \frac{(\sqrt{(1+2ZT_{st})} - 1)}{Z} \quad (2.34)$$

$$COP_{opt} = \frac{T}{\Delta T} \left( \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + 1} \right) - \frac{1}{2} \quad (2.35)$$

Burada  $G = a/h$  yarıiletkenin geometrik faktörüdür.  $N$  modülü oluşturan termoelementlerin sayısı,  $K = 2\lambda NG$  termoelektrik modülün toplam termal iletkenliğidir.  $R = (2\rho N)/G$  modülün toplam elektrik direnci,  $\rho$  ise tek termoelementin toplam öz direncidir.

Modüllerde kullanılan yarıiletkenlerin  $\alpha$ ,  $\rho$ , ve  $k$  parametrelerinin sıcaklığa göre değişimini hesaba katmak için kullanılan bağıntılar şunlardır:

$$\alpha = \left[ \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 (T)^2 \right] 10^{-9} \quad \frac{V}{K} \quad (2.36)$$

$$\alpha_0 = 22224 \quad ; \quad \alpha_1 = 930.6 \quad ; \quad \alpha_2 = -0.9905$$

$$\rho = \left[ \rho_0 + \rho_1 T + \rho_2 (T)^2 \right] 10^{-8} \quad \Omega \text{ cm} \quad (2.37)$$

$$\rho_0 = 5112 \quad ; \quad \rho_1 = 163.4 \quad ; \quad \rho_2 = 0.6279$$

$$\lambda = \left[ \lambda_0 + \lambda_1 T + \lambda_2 (T)^2 \right] 10^{-6} \quad \frac{W}{\text{cm K}} \quad (2.38)$$

$$\lambda_0 = 62605 \quad ; \quad \lambda_1 = -277.7 \quad ; \quad \lambda_2 = 04131$$

Bu eşitliklerin kullanımına dayanan yöntem şöyle açıklanabilir: Bir modülün üretilmesinden önce kullanılan termoelektrik yarıiletkenlerin  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$ ,  $Z$  gibi mikroparametrelerinin ve bu parametrelerin sıcaklığa göre değişim katsayıları bulunur. Modülün, hedeflenen çalışma rejimine göre, yarıiletkenlerin

geometrik faktörünü seçerek, çeşitli akımlarda çalışan ve çeşitli güce sahip modüller üretilir. Bu modüllerin çıkış termal parametreleri sadece teorik denklemlerden elde edilir [6]. Önerilen yöntemin kullanılabilirliğine baktığımızda bir modülün çıkış parametrelerinin değerlendirilmesi için her bir termoelementin  $T_{s1}$  ve  $T_{s0}$  sıcaklıklarının ayrı ayrı ölçülmesi gerekir. Bu durumda her bir termoelement için 2 adet termokupl kullanılması gerekecektir. Eğer bir modülün onlarca veya yüzlerce termoelementlerden oluştuğu düşünülürse önerilen yöntemin çok büyük maliyet gerektirdiği ve uygulamasının zor olduğu anlaşılmaktadır.

#### Yarıiletkenin yükseklik faktörüne göre geliştirilmiş klasik yöntem

Bir termoelektrik modül tasarlanırken termoelementlerin boyu, elektriksel ve termal temas dirençlerinin etkisi en az olacak şekilde uzun, ısı pompalama kapasitesini artırmak ve materyal maliyetini düşük tutmak için kısa olacak şekilde ayarlanır. Klasik yöntemler, uzun termoelementlerden oluşan bir termoelektrik modülün COP değerini tahmin etmek için uygundur. Ancak, kısa termoelementlerden oluşmuş bir modülü araştırmak için uygun değildir. Daha da ötesi, optimum termoelement uzunluğunun araştırılması için de uygun değildir, çünkü temas dirençlerini ihmal eden klasik ölçüm yöntemleri termoelement uzunluğuna bağımlı değildir. Bir termoelementin COP değerinin termoelement uzunluğundan bağımsız olması temas dirençlerinin ihmal edilmiş olmasından kaynaklanmaktadır [5].

Termoelektrik modülün tüm çıkış parametreleri modülün yüksekliğine göre değişmektedir. Modül uzunluğu kısaldıkça bu etki hesaba katılmak zorundadır. Modülün yüksekliğinin çıkış parametreleri üzerindeki etkisini hesaba katan geliştirilmiş klasik modeli açıklamak için gerçek termoelementi ele alalım (Bkz. Şekil 2.4.). Eğer termoelementi oluşturan kolların bütün mikroparametreleri aynı kabul edilirse, o zaman kullanılan yarıiletkenlerin  $z$  değeri,

$$z = \frac{\alpha_{n(p)}^2}{\rho\lambda} \quad (2.39)$$

ile verilir. Termoelementin Z değeri ise Eş. 2.40 ile gösterilir.

$$Z = \frac{\alpha^2}{RK} \quad (2.40)$$

Bu durumda, termoelementin COP'u Eş. 2.41 ile ifade edilir.

$$\eta = \frac{T_{SO}}{T_{SI} - T_{SO}} \left( \frac{\sqrt{1 + ZT} - T_{SI} / T_{SO}}{\sqrt{1 + ZT} + 1} \right) \quad (2.41)$$

Termoelektrik materyalin performans katsayısı Eş. 2.42 ile ifade olunur.

$$\eta_0 = \frac{T_{SO}}{T_{SI} - T_{SO}} \left( \frac{\sqrt{1 + zT} - T_{SI} / T_{SO}}{\sqrt{1 + zT} + 1} \right) \quad (2.42)$$

Bir termoelementin toplam direnci, elektriksel temas direncini de hesaba katarak, Eş. 2.43 gibi yazılabilir.

$$R = 2\rho \frac{h}{a} \left( 1 + \frac{n}{h} \right) \quad (2.43)$$

Burada,  $h$ , yarıiletken uzunluğunu,  $a$ , yarıiletken kesit alanını ve  $n = 2\rho_B / \rho$  ifadesinde  $\rho$  ve  $\rho_B$  yarıiletkenlerin ve yarıiletkenler ile bakır iletkenler arasındaki elektriksel temas direncini göstermektedir (gerçek termoelementin toplam öz direnci). Termal temas dirençlerini ihmal ederek, modülün kalite katsayısı Eş. 2.44'teki gibi yazılabilir.

$$Z = \frac{zh}{h+n} \quad (2.44)$$

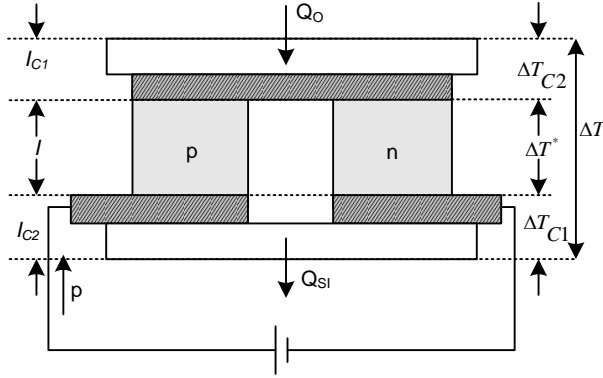
Burada  $z$  tek bir termoelementin kalite katsayısıdır.

Sonuç olarak, bir termoelektrik modülün veriminin değeri, sadece elektriksel temas dirençleri hesaba katılarak Eş. 2.45'teki gibi yazılır.

$$\eta_1 = \frac{T_{SO}}{T_{SI} - T_{SO}} \frac{\left(1 + \frac{zTh}{h+n}\right)^{1/2} - \frac{T_{SI}}{T_{SO}}}{\left(1 + \frac{zTh}{l+n}\right)^{1/2} + 1} \quad (2.45)$$

Açıkça görüldüğü gibi COP, termoelement uzunluğuna bağlıdır.

Gerçek bir termoelementin  $Q_{SO}$ , COP ve  $\Delta T$  gibi çıkış parametreleri sadece termoelementin uzunluğunun dirence olan etkisine göre değil termoelementin ısı iletkenliğinin de yüksekliğe göre değişimine bağlıdır. Dolayısıyla, termoelement uzunluğu hem direnç üzerindeki etkisiyle hem de ısı iletkenliği üzerindeki etkisiyle bir termoelementin çıkış parametrelerini etkiler. Başka bir deyişle termoelementin uzunluğu hem direnç kanalıyla hem de ısı iletkenliğiyle çıkış parametrelerini etkiler. Modülün COP'u üzerindeki etkisi Eş. 2.45 formülüyle ifade edilmektedir. Yüksekliğin ısı iletkenlik kanalıyla modülün çıkış parametreleri üzerindeki etkisini araştırmak için Şekil 2.14.'te gösterilen gerçek termoelektrik modülü ele alalım. Şekil 2.14.'de gösterilen termoelektrik modül yapısına göre, termoelementler termal açıdan iletken fakat elektriksel açıdan yalıtkan iki adet seramik plaka arasına sıkıştırılmıştır. Yarıiletkenlerin uzunluğu ve termal ara bağlantı, seramik plakalar üzerinde, modülün hem COP'unu hem de ısı pompalama kapasitesini azaltacak şekilde istenmeyen sıcaklık düşümlerine neden olur.



Şekil 2.14. Tek bir termoelementten oluşan gerçek bir TE modül

Belli bir giriş gücü,  $P$ , için ısı pompalama kapasitesi iki durumda (termal temas dirençleri varken ve yokken)  $Q$  ve  $Q_0$ , şu şekilde ifade edilir:

$$Q_0 = K(\Delta T_{\max} - \Delta T_0) \quad (2.46)$$

$$Q = K(\Delta T_{\max} - \Delta T^*) \quad (2.47)$$

Burada  $\Delta T_{\max}$ , ısı pompalama kapasitesi sıfır olduğunda görülen maksimum sıcaklık farkıdır,  $\Delta T_0$  ve  $\Delta T^*$  sırasıyla  $Q_0$  ve  $Q$  ısı pompalama kapasiteleri için modül üstünde görülen sıcaklık farklarıdır. Gerçek bir modülde, bir termoelementle eşit miktarda bir sıcaklık farkı elde edebilmek için,  $\Delta T^* = \Delta T_0 + \Delta T_{K1} + \Delta T_{K2}$  olmalıdır (burada  $\Delta T_{K1}$  ve  $\Delta T_{K2}$ , sırasıyla soğuk ve sıcak taraflardaki temas katmanlarındaki sıcaklık düşümlerini temsil etmektedirler). Sonuç olarak basitleştirilmiş bir modülün COP değeri  $\eta$  ile gerçek bir modülün  $\eta_2$  değeri arasındaki bağıntı sırasıyla Eş. 2.48 ve Eş. 2.49'da verilmiştir.

$$\eta_2 = \eta \left( 1 - \frac{\Delta T_{K1} + \Delta T_{K2}}{\Delta T_{\max} - \Delta T_0} \right) \quad (2.48)$$

$$\eta_2 = \frac{\eta - K / K_{K2}}{1 + K / K_{K1} + K / K_{K2}} \quad (2.49)$$

Burada  $K_{K1}$  ve  $K_{K2}$  sırasıyla soğuk ve sıcak yüzeylerdeki termal temas iletkenlikleridir. Şu yaklaşımlar yapılacak olursa  $K_{K1} \approx K_{K2} = \lambda_K A_K / l_K$  ve  $2A \approx A_K$  (burada  $A_K$  ve  $l_K$  kesit alan ve temas katmanlarının kalınlığı olup  $\lambda_K$  ise termal iletkenliktir) Eş. 2.49,

$$\eta_2 = \frac{\eta - r l_K / l}{1 + 2r l_K / l} \quad (2.50)$$

halini alır. Burada  $r = \lambda / \lambda_K$ , termoelementlerin termal iletkenliklerinin temas katmanlarının iletkenliklerine olan oranıdır.

Eş. 2.45 kullanılarak,  $\eta$  yerine  $\eta_1$  konulursa, TE modülün hem elektriksel hem de termal temas dirençlerini hesaba katan COP değeri bulunabilir:

$$\eta_2 = \frac{l}{l + 2r l_K} \left( \frac{T_{SO}}{T_{SI} - T_{SO}} \frac{\beta - T_{SI} / T_{SO}}{1 + \beta} \frac{r l_K}{l} \right) \quad (2.51)$$

Burada  $\beta$  değeri için Eş. 2.52 yazılabilir.

$$\beta = \left( 1 + \frac{lzT}{n+1} \right)^{1/2} \quad (2.52)$$

Benzer şekilde birim alan başına düşen ısı pompalama kapasitesi,  $q$ , Eş. 2.53 ile ifade edilebilir.

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{\lambda(\Delta T_{\max} - \Delta T)}{l + 2r_l + r_k / \eta_2} \quad (2.53)$$

Yukarıdaki eşitlikler tek bir termoelementten oluşan bir modül için yazılmıştır. Pratikte bir modül, elektriksel açıdan seri bağlanmış onlarca termoelementten oluşur. Bu eşitlikler aynı zamanda modüller için de geçerlidir.

Gerçek bir termoelektrik modülde, COP ve ısı pompalama kapasitesi değerlerinin termoelement boyuna bağlı olduğu görülmektedir. Yüksek bir COP değeri elde edebilmek için uzun termoelementler gerekirken, maksimum ısı pompalama kapasitesine ulaşabilmek için kısa termoelementlere ihtiyaç vardır. Optimum modül tasarımında COP ile ısı pompalama kapasitesi ihtiyacı arasında bir seçim yapma zorunluluğu vardır.

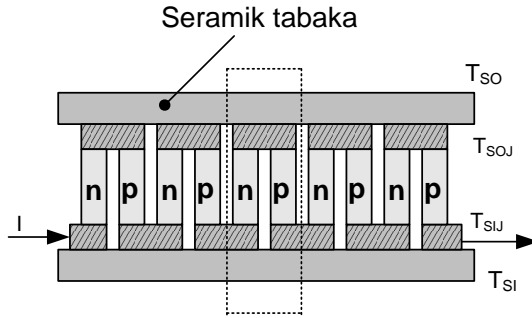
Piyasada bulunan ve termoelement uzunluğu 1,5 mm olan modüller için COP ve ısı pompalama kapasiteleri ideal değerlerin sırasıyla %70 ve %30'u olmaktadır. Temas dirençlerinin azaltılması, özellikle de termal temas dirençlerinin azaltılması, hem COP hem de ısı pompalama kapasitelerinde artış sağlamak bakımından önemli bir gereksinimdir [5].

#### Termoelementin ara bağlantı katmanlarına göre geliştirilmiş klasik yöntem

Geliştirilmiş klasik yöntemlerden bir tanesi de gerçek termoelement ve modüllerde yarıiletkenlerle bakır ve bakır ile seramik levhalar arasındaki katmanların etkisini hesaba katan modeldir.

TE modül Şekil 2.15.'de görüldüğü üzere birkaç termoelementten oluşmaktadır. Bunlar termal açıdan iletken fakat elektriksel açıdan yalıtkan seramik plakalar arasına sıkıştırılmıştır. Klasik tasarım teorisinde, termal ve kontak dirençlerinin seramik plakalardaki etkisi (ideal termoelektrik modüller için) genellikle ihmal edilmektedir. Ancak bu durum sadece uzun termoelementler için geçerlidir.

Termoelementlerin boyu kısaldıkça termal temas etkisi artacaktır. Bu temas etkisini hesaba katan (gerçek termoelektrik modüller için) geliştirilmiş test yöntemleri mevcuttur. Ancak bu yöntemlerde yapılan basitleştirmeler gerçek termoelementlerin ve modüllerin araştırılmasında gerçekçi değildir [6].



Şekil 2.15. Gerçek bir termoelektrik modül

Gerçek bir termoelement veya termoelektrik modülün araştırılmasında ara katmanların etkisini içeren en gelişmiş modelde klasik mikroparametrelerin yerine eşdeğer parametreler kullanılarak farklı çalışma rejimleri için modülün çıkış parametreleri elde edilmiştir.

#### Katmanları hesaba katan modelin temel denklemleri

Katmanların etkisini hesaba katan geliştirilmiş klasik modelin temel denklemlerini oluşturmak için gerçek bir TE modülde analitik bir nesne olarak tek bir termoelement (Bkz. Şekil 2.15.'de noktalı çizgiler içerisinde alınmış olan kısım) ele alınmıştır. Bu termoelement, simetrik bir yapıya ve özelliklere sahip olup n ve p tipi yarıiletkenlerinin birbirine eşit olduğu kabul edilir. Ayrıca bu modelde yarıiletken materyal özellikleri sıcaklıktan bağımsız ve ticari yarıiletken materyallerin normal değerlerine uygun kabul edilmiştir.

Şekil 2.15.'de kesikli çizgilerle işaretlenen tek bir termoelementin soğuk ve sıcak yüzeyler için ısı denge formülleri Eş. 2.54 – Eş. 2.57 formülleriyle ifade edilebilir [6].



$$Q_{SO} = K_C(T_{SO} - T_{SOJ}) \quad (2.54)$$

$$Q_{SO} = I\alpha T_{SOJ} - \frac{1}{2}I^2R - K(T_{SIJ} - T_{SOJ}) \quad (2.55)$$

$$Q_{SI} = I\alpha T_{SIJ} + \frac{1}{2}I^2R - K(T_{SIJ} - T_{SOJ}) \quad (2.56)$$

$$Q_{SI} = K_C(T_{SIJ} - T_{SIJ}) \quad (2.57)$$

Burada  $T_{SOJ}$  ve  $T_{SIJ}$  soğuk ve sıcak taraftaki bakır levhaların (metal) sıcaklıklarıdır. Ayrıca daha önce tanımlanan  $\alpha$ 'dan farklı olarak burada  $\alpha$ ,  $R$  ve  $K$ , sırasıyla şöyledir:

$$\alpha = 2\alpha_{p(n)} \quad (2.58)$$

$$R = 2\rho \frac{h}{a} \quad (2.59)$$

$$K = 2k \frac{a}{h} \quad (2.60)$$

Seramik plakaların termal ve temas iletkenliklerinin toplamı ise  $K_C$  ile ifade edilir.

$$K_C = k_c \frac{2a}{g} \quad (2.61)$$

Burada  $k_c$  seramik plakaların bileşik termal ve temas iletkenlikleridir,  $g$  ise tek termoelementin yüzey alanının seramik plakanın yüzey alanına oranı olup termoelementlerin paketleme yoğunluğudur ( $g < 1$ ).

Elde edilen Eş. 2.54 – Eş. 2.57 eşitlikleri çözülerek  $Q_{SO}$  hesaplanabilir (pratikte buradaki TE çifti için geçerli olmakla birlikte TE soğutuculara genellenebilir) [6, 16].

$$Q_{SO} = I\alpha_{eş}T_{SO} - \frac{1}{2}I^2R_{eş} - K_{eş}(T_{SI} - T_{SO}) \quad (2.62)$$

Burada  $\alpha_{eş}$ , eşdeğer Seebeck katsayısı,  $R_{eş}$ , eşdeğer direnci ve  $K_{eş}$ , de eşdeğer ısı iletkenliği olup aşağıdaki formüllerle ifade olunur [16]:

$$\alpha_{eş} = \alpha \frac{1 - I\alpha / K_C}{1 + 2K / K_C - (I\alpha / K_C)^2} \quad (2.63)$$

$$R_{eş} = R \frac{1 + 2K / K_C - I\alpha / K_C}{1 + 2K / K_C - (I\alpha / K_C)^2} \quad (2.64)$$

$$K_{eş} = K \frac{1}{1 + 2K / K_C - (I\alpha / K_C)^2} \quad (2.65)$$

Elde edilen Eş. 2.62'deki  $Q_{SO}$  ifadesi ideal TE modül için elde edilen eşitlik ile aynıdır. Sadece mikroparametrelerin yerine eşdeğer parametreler

konulmuştur. Benzer şekilde gerçek TE modülün COP'u Eş. 2.66 ile ifade edilebilir.

$$COP = \frac{Q_{SO}}{Q_{SI} - Q_{SO}} = \frac{I\alpha_{eş}T_{SO} - \frac{1}{2}I^2R_{eş} - K_{eş}(T_{SI} - T_{SO})}{I\alpha_{eş}(T_{SI} - T_{SO}) + I^2R_{eş}} \quad (2.66)$$

Yukarıda geliştirilen model kullanılarak gerçek termoelektrik modülün farklı çalışma rejimlerindeki çıkış parametreleri hesaplanabilir. Ancak bunun doğrudan yapılması çok zor veya imkânsız olabilir. X. C. Xuan ve arkadaşları tarafından önerilen bu yöntemin tümü ele alındığında, burada mikroparametrelerin sıcaklığa göre değişimi hesaba katılmazken modülün çıkış parametrelerini etkileyen, elementlerin yüksekliği, ara katmanları ve modülün yapısal faktörlerinin hesaba katılması öngörülmüştür [6]. Ancak sıcaklık faktörü bir kenara konulduğunda bile bu model çerçevesinde hesaba katılması gereken tüm faktörlerin aynı anda hesaba katılmasının mümkün olmadığı yöntem sahibi tarafından da kabul edilmektedir. Buna göre yöntemin uygulanabilmesi için mutlaka bazı basitleştirmeler öngörülmektedir ki bunlar önceki modellere göre daha iyi sonuçlar vermekle birlikte yinede hatalara yol açmaktadır.

## 2.5. Yeni Test Yöntemi

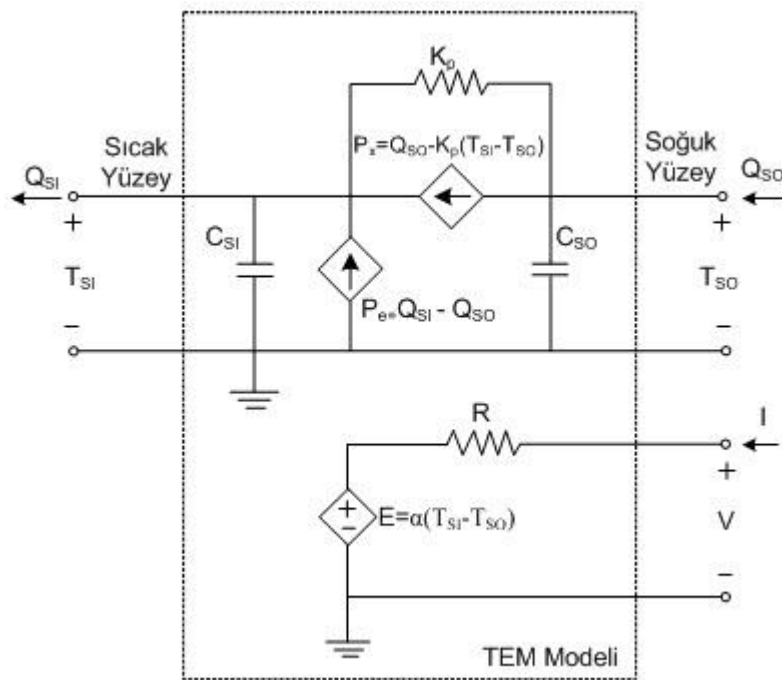
Bunların ışığında, herhangi bir termoelektrik modülün sahip olduğu gerçek dinamik ısı özelliklerini araştırmak için maliyeti daha düşük ve pratik bir yöntemin ortaya çıkarılması ister teori isterse uygulama açısından önem taşımaktadır.

Bu tezde, yukarıda bahsedilen klasik yöntemlere alternatif teşkil eden yeni yöntem geliştirilmiş ve elektronik donanımlı bir test sistemi gerçekleştirilmiştir [19-22]. Geliştirilen yeni yöntemin temelini Eş. 2.25 – Eş.2.28 denklemleri oluşturur. Fakat bu denklemler amaca ulaşmak için eşdeğer değişikliklere

uğratılmaktadırlar. Bunun sonucunda çalışan bir termoelektrik modülün tüm ısıl parametreleri uygulanan akım ( $I$ ), ısınan yüzey sıcaklığı ( $T_{SI}$ ) ve üretilen termoemk'nin ( $E$ ) ölçülmesiyle hesaplanabilmektedir. Burada akım, sıcaklık ve termoemk çok büyük bir hassasiyetle ve kolaylıkla ölçülebilecek değerlerdir.

### 2.5.1. Teori

Bu tez çalışmasında geliştirilen yöntem, esas olarak çalışan bir termoelektrik modülün temel giriş parametrelerinin çok hızlı bir şekilde anlık olarak ölçülmesine dayanmaktadır. Yeni yöntemde kullanılan temel parametreler, Şekil 2.16.'da, termoelektrik elemanın elektrotermal modeli üzerinde ifade edilmiştir [41].



Şekil 2.16. Termoelementin elektrotermal modeli

Yüksüz çalışan ideal bir termoelektrik modül için ısıl yük  $Q_Y = 0$  iken  $Q_{SO} = 0$  olur. Sıcaklık farkı  $\Delta T_{max}$  'a ve soğuk yüzeyin sıcaklığı da  $T_{SOmin}$  'e eşit

olacaktır. Bu durumda modülün çektiği akım  $I_{max}$  ve modülün üzerindeki voltaj  $V_{max}$ 'tır. Burada  $V_{max}$  şöyle ifade edilebilir [42-44].

$$V_{max} = \alpha T_{Sl} \quad (2.67)$$

Diğer taraftan maksimum gerilim Eş. 2.68'deki gibidir [15, 42].

$$V_{max} = I_{max}R + \alpha \Delta T_{max} = I_{max}R + E_{max} \quad (2.68)$$

Burada  $\alpha \Delta T_{max}$  Eş. 2.69'daki gibi ifade edilir.

$$\alpha \Delta T_{max} = \alpha (T_{Sl} - T_{SOmin}) = E_{max} \quad (2.69)$$

Böylece  $R$ , Eş. 2.70'teki gibi olacaktır.

$$R = \frac{V_{max} - E_{max}}{I_{max}} \quad (2.70)$$

Bu şartlar için ısı denge denklemi Eş. 2.71'deki gibi olur.

$$\alpha I_{max} T_{SOmin} - 0,5 I_{max}^2 R - K \Delta T_{max} = 0 \quad (2.71)$$

Ayrıca Eş. 2.69'dan  $T_{SOmin}$  eşitliği elde edilebilir.

$$T_{SOmin} = T_{Sl} - \frac{E_{max}}{\alpha} \quad (2.72)$$

Elde edilen Eş. 2.70 ve Eş. 2.72 ifadeleri Eş. 2.71'de yerine konulursa Eş. 2.73 denklemi elde edilir.

$$(V_{max} - E_{max}) I_{max} - 0,5 (V_{max} - E_{max}) I_{max} = \left( \frac{KE_{max}}{\alpha} \right) \quad (2.73)$$

Eş. 2.73'ten  $K$  çekilirse,

$$K = \frac{0,5\alpha(V_{\max} - E_{\max})I_{\max}}{E_{\max}} = \frac{0,5V_{\max}(V_{\max} - E_{\max})I_{\max}}{T_{SI}E_{\max}} \quad (2.74)$$

elde edilir. Elde edilen Eş. 2.70 ve Eş. 2.74 eşitlikleri, Eş. 2.25'te yerine yazılırsa ve  $Q_y = 0$  kabul edilirse modülün  $Q_{SO}$  değeri,

$$Q_{SO} = \alpha T_{SO}I - \frac{0,5I^2(V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} - \frac{0,5\alpha\Delta T(V_{\max} - E_{\max})I_{\max}}{E_{\max}} \quad (2.75)$$

olur ve modülün termoemk'sı;

$$E = \alpha \Delta T = \alpha(T_{SI} - T_{SO}) \quad (2.76)$$

olduğundan soğuk yüzeyin sıcaklığı,

$$T_{SO} = T_{SI} - \frac{E}{\alpha} \quad (2.77)$$

olarak bulunur. Eş. 2.75 ve Eş. 2.77'den  $Q_{SO}$  bulunur,

$$Q_{SO} = \alpha(T_{SI} - \frac{E}{\alpha})I - \frac{0,5I^2(V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} - \frac{0,5E(V_{\max} - E_{\max})I_{\max}}{E_{\max}} \quad (2.78)$$

Bilindiği gibi modülün ısınan yüzeyinin sıcaklığı  $T_{SI}$  bu yüzeyden ısı atmak için kullanılan ısı transfer sistemine bağlı olup genelde sabit tutulmaktadır. Çalışan gerçek bir modülün ısınan yüzeyinin sıcaklığı, ısı transfer sisteminde kullanılan maddenin sıcaklığına yaklaşık olarak eşittir. Modüle uygulanan akım şiddeti  $I$  ve ısı yük  $Q_{SO}$ 'nun değerlerindeki değişimler  $T_{SI}$ 'nin değerini çok az etkilediği için ilk yaklaşım olarak  $I_{\max}$  için kullanılan Eş. 2.67 denklemini Eş. 2.78'de kullanılabilir.

$$Q_{SO} = V_{\max} I - \frac{0,5 I^2 (V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} - \left[ I + \frac{0,5 (V_{\max} - E_{\max}) I_{\max}}{E_{\max}} \right] E \quad (2.79)$$

$$Q_{SI} = V_{\max} I + \frac{0,5 I^2 (V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} - \frac{0,5 (V_{\max} - E_{\max}) I_{\max} E}{E_{\max}} \quad (2.80)$$

Aynı şekilde modülün tükettiği güç,

$$P = \frac{I^2 (V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} + E I \quad (2.81)$$

ifadesi ile bulunur. Buradan modülün verimi Eş. 2.82 ile ifade edilir.

$$COP = \frac{Q_{SO}}{P} = \frac{V_{\max} I - \frac{0,5 I^2 (V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} - \left[ I + \frac{0,5 (V_{\max} - E_{\max}) I_{\max}}{E_{\max}} \right] E}{\frac{I^2 (V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} + IE} \quad (2.82)$$

Bunlara ek olarak modülün Z parametresi Eş. 2.67, Eş. 2.70 ve Eş. 2.74 denklemlerine göre Eş. 2.83'teki gibi yazılabilir.

$$Z = \frac{V_{\max} E_{\max}}{0,5 (V_{\max} - E_{\max})^2 T_{SI}} \quad (2.83)$$

Bir modülün herhangi bir yüzeyindeki sıcaklığın ölçülmesi, özellikle modül bir cihazın parçası olup kapalı bir konumda bulunuyorsa çok zordur. Bunun için her bir yüzeyin üzerine termokupl konulması ve uçlarının dışarıya çıkarılması gerekmektedir. Fakat modülün ısınan yüzeyi dışarıda olduğu için bu yüzeyin  $T_{SI}$  sıcaklığı kolayca ölçülebilir.

Eğer modülün yüzeylerindeki sıcaklıklar  $T_{SO}$  ve  $T_{SI}$  ise soğuk ve sıcak yüzeylerin sıcaklıkları için Eş. 2.67 ve Eş. 2.72 denklemlerine göre Eş. 2.84 yazılabilir.

$$T_{SO} = T_{SI} \left( 1 - \frac{E}{V_{\max}} \right) \quad (2.84)$$

Bu ifadeye göre  $T_{SO}$  sıcaklığını doğrudan ölçmeden, herhangi bir an için sadece  $T_{SI}$  ve  $E$ 'yi ölçerek hesaplanabilir.

Aynı denklemden  $T_{SO}$  ve  $E$  değerlerini kullanarak  $T_{SI}$  hesaplanabilir.

$$T_{SI} = \frac{T_{SO}}{\left( 1 - \frac{E}{V_{\max}} \right)} \quad (2.85)$$

Termoemk  $E$ 'nin farklı akımlardaki  $Q_{SO}$ 'ya göre değişimi ise

$$E = \frac{V_{\max} I - \frac{0,5 I^2 (V_{\max} - E_{\max})}{I_{\max}} - Q_{SO}}{I + \frac{0,5 (V_{\max} - E_{\max}) I_{\max}}{E_{\max}}} \quad (2.86)$$

ile ifade edilir.

Eş. 2.25 – Eş. 2.29 denklemleri, çalışır haldeki gerçek bir termoelementin parametrelerini etkileyen geometrik, yapısal vb. faktörleri ihtiva etmemektedir. Bu problemi çözmek için yeni bir yaklaşımla yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Yeni yaklaşım olarak yarıiletkenlerin statik parametrelerinin yerine bunları yansıtan ve deneysel olarak kolayca ölçülebilen termoelementin  $V_{\max}$ ,  $E_{\max}$ ,  $I_{\max}$  gibi çıkış parametrelerinin kullanılması oluşturmuştur. Böylece gerçek bir



modülün tüm elektriksel ve ısıl parametrelerinin hesaplanmasını sağlayan bir dizi formüller elde edilmiştir. Elde edilen Eş. 2.70, Eş. 2.74, Eş. 2.75, Eş. 2.79 – Eş. 2.86 denklemleri, TE modülün, çalıştığı herhangi bir andaki, tüm parametrelerini vermektedir. Bu denklemleri kullanmak için  $I_{max}$ ,  $V_{max}$  ve  $E_{max}$  değerlerinin bulunması gerekmektedir. Bu değerler her bir modül için farklı olup modülün deneysel parametreleri olarak adlandırılabilirler. Ayrıca bu denklemleri kullanmak için  $T_{SO}$  veya  $T_{SI}$  sıcaklıklarından birini doğrudan ölçmek gerekir. Burada  $V_{max}$  ve  $E_{max}$  modülü oluşturan termoelektrik yarıiletkenleri karakterize ettiği için bu parametreler yarıiletkenlerin geometrik özelliklerine bağlı değildir ve modülün makro büyüklüklerini oluştururlar. Bu nicelikler çok büyük hassasiyetle ve kolayca ölçülebilirler.

Sonuç olarak bir modülün dinamik ısıl ve elektriksel özelliklerini araştırmak için çalışan modülün çektiği  $I$  akımı, uçlarında düşen  $V$  gerilimi, ürettiği  $E$  nin ve herhangi bir yüzeyindeki sıcaklığının ölçülmesi yeterlidir. Bu ölçümler çok basit olup çok hassas yapılabilirler. Maliyet bakımından bu yöntemin çok uygun olduğu tartışılmazdır. Ayrıca elde edilen bu formüller çalışan bir modülün dinamik parametrelerini karakterize etmekle birlikte modüllerin ve bu modüllerden yapılan cihazların üretiminde kullanılan yapısal yöntemlerin ve malzemelerin kalitesinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

### 3. SICAKLIK ve AKIM ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

Mikrodenetleyici kontrollü Termoelektrik test sisteminin çalışmasının temeli, modül uçlarında düşen gerilim değeri ( $V_{max}$ ), modüle uygulanan akım değeri ( $I$ ), modülün ısınan yüzey sıcaklık değeri ( $T_{Si}$ ) ve emk (elektromotor kuvveti  $E$ ) değerinin ölçülmesine dayanmaktadır. Bu büyüklükleri ölçmek için çeşitli ölçüm sistemleri ve algılayıcılar (sensörler) kullanılmaktadır.

#### 3.1. Sıcaklık Algılayıcıları

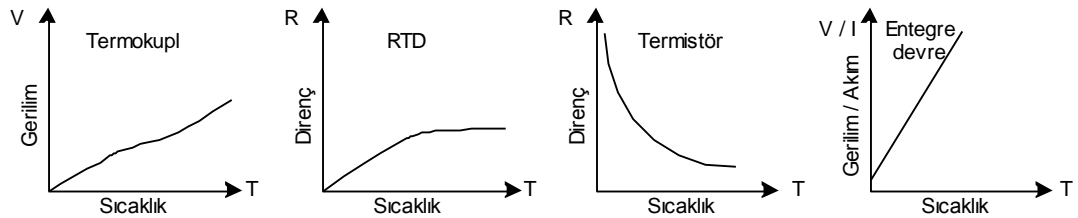
Sıcaklık ölçümü için birçok yöntem ve algılayıcı tipi kullanılmasına rağmen sıcaklık ölçme yöntemleri genel olarak Termometre ve Pirometreler olmak üzere iki grupta toplanır. Eğer cihaz, sıcaklığı ölçülecek sisteme veya prosese yerleştirilmişse, böyle cihazlara termometre denir. Bu tip cihazlar sıcaklığı iletim veya konveksiyon prensibi ile ölçerler. Cihaz, sıcaklığı ölçülecek prostesten uzak bir yerden ölçme yapıyor ise bu cihazlara pirometre denir.

Pirometreler, ısı kaynağından yayılan çeşitli özelliklerdeki radyasyonlardan faydalanarak sıcaklık ölçerler. Sıcaklık, genellikle sıvı, gaz ve katı cisimler üzerinde meydana getirdiği değişikliklerle ölçülür. Çizelge 3.1.'de sıcaklık ölçme cihazlarının kullandıkları yöntemler ve sıcaklık aralıkları verilmiştir. Şekil 3.1.'de sıcaklık algılayıcılarının birbiri ile karşılaştırılması verilmiştir. Entegre devre sıcaklık algılayıcıları doğrusal olup termokupl'lar ise parçalı doğrusal olarak değerlendirilebilir [11].

TE test sisteminde, termoelektrik modülün sıcaklığını algılayacak sıcaklık algılayıcısının seçimi büyük önem taşımaktadır. Kullanılan algılayıcının ölçme aralığı doğrusal olmalıdır. Algılayıcı iki modül arasına yerleştirileceği için boyutlarının da oldukça küçük olması gerekmektedir.

Çizelge 3.1. Sıcaklık ölçme cihazlarının kullandıkları yöntemler ve sıcaklık aralıkları

|  |   |               |
|--|---|---------------|
| Sıvı cam termometreler                         | Yoğunluk değişimi                                       | -200, 620 °C  |
| Bimetal termometreler ve doldurulmuş sistemler | Uzunluk veya hacimdeki değişme                          | -130, 530 °C  |
| Isıl çiftler ( Termokupllar)                   | İki farklı metalin birleşme noktasında üretilen gerilim | -185, 1620 °C |
| Quartz termometreler                           | Kristallerin rezonans frekansı                          | -50, 300 °C   |
| Dirençli termometreler ve termistörler         | Elektriksel direnç değişikliği                          | -270, 650 °C  |
| Pirometreler                                   | Sıcak cisimlerin yaydığı elektromanyetik radyasyon      | 1100, 1760 °C |
| Entegre devre algılayıcılar                    | Gerilim veya akım değişikliği                           | -135, 150 °C  |



Şekil 3.1. Sıcaklık algılama yöntemlerinin karşılaştırılması

### 3.1.1. Termistörler

Termistör kelimesi sıcaklıkla algılayıcı dirençten türemiştir. Daha doğru bir tanım seramik kaplı yarıiletkenlerdir. Negatif ve pozitif sıcaklık katsayısı anlamına gelen NTC ve PTC gibi algılayıcılar olarak 2 tipi vardır. NTC termistörlerinin artan sıcaklıkla elektrik rezistansı azalır. PTC, NTC' nin tam tersidir.

Bir NTC termistörü için sıcaklık aralığı  $-50$  °C ve  $+150$  °C arasında değişmektedir. Sıcaklık karakteristiğine bağlı olan direnç nonlineer, negatif

exponansiyel fonksiyondur. Direnç değerinden uygun sıcaklık değeri elde etmek için uygun bir ara değer bulma veya mikrodenetleyici ile çizelgeye bakma işbirliğini kullanmak gereklidir. Termistörler küçük boyutta olduklarından dolayı çabuk bir geri besleme ve ona bağlı olarak daha hızlı bir sıcaklık ölçme sistemi için kullanışlıdır. NTC termistörlerinin çoğu manganez, nikel, kobalt, bakır ve demirin metal oksitlerinin değişik bileşimlerinden yapılır.

Termistörlerin avantajları, küçük ebatlı olmaları, ucuz olmaları ve çalışma sıcaklık aralığıdır. Doğrusal çıkış vermemeleri ise en büyük dezavantajlarıdır. Bir mikrodenetleyici ve bir doğruluk çizelgesi kullanılarak, doğrusal olmayan çıkış sıcaklık bilgisi, doğrusallaştırılabilir. Bununla birlikte tüm sistem için istenen doğruluğu elde etmek zordur. Bu zorluk bu algılayıcı tipinin doğrusal olmaması ile ilgilidir. Bu da sıcaklığa bağlı olarak doğruluğun üstel fonksiyonla daha kötüye gittiği anlamına gelir.

### **3.1.2. Direnç sıcaklık algılayıcıları**

Rezistif algılayıcılar, direnci sıcaklıkla değişebilen bir element kullanırlar. Örneğin bir platin RTD, bir alt tabaka üzerine tortulanmış bir platin filmi veya bir bobin etrafında çevrelenen platin tel halkasından oluşur. Bundan başka, bir RTD üretmek için kullanılabilen diğer metal materyallerde vardır. Örneğin böyle bir nikel algılayıcının sıcaklık aralığı  $-250^{\circ}\text{C}$  ve  $+750^{\circ}\text{C}$  arasında değişir. Bir dezavantajı platinin ucuz olmamasıdır. Bu da algılayıcının diğer algılayıcı tipleriyle karşılaştırıldığında yüksek bir fiyata geldiği anlamına gelir.

Yukarıda anlatılan yaklaşık-lineer fonksiyon ve yüksek doğruluk, uygulamaya ilişkin en büyük avantajdır. Ayrıca elemanın sıcaklık aralığı istenen aralıkta değişmektedir. Bununla birlikte önemli bir dezavantajı algılayıcının pahalı olmasıdır.

### 3.1.3. Entegre devre sıcaklık algılayıcıları

Entegre devre teknolojisinde son yıllardaki gelişmeler, sıcaklık algılayan ve kontrol eden entegre devrelerin geliştirilmesine yol açmıştır. Piyasaya sürülen (The National Semiconductor firmasının ürettiği) LM135, LM235 ve LM335 entegre devreleri buna tipik bir örnektir, devreye bir zener diyot gibi bağlanırlar (Şekil 3.2.), çıkış gerilim-sıcaklık katsayısı  $10 \text{ mV}/^\circ\text{K}$  dir, ölçme aralığı ( $-135, 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ) arasında olup, son derece doğrusaldır.



Şekil 3.2. Entegre devre sıcaklık algılayıcısının devreye bağlantısı

### 3.1.4. Termokupllar

Sıcaklık ölçümleri için yaygın olarak kullanılan algılayıcılardan bir tanesi de termokupl'lardır. Endüstride ve bilimsel çalışmalarda, ucuz olmasından ve geniş çalışma aralığından dolayı, tercih edilmektedir.

Termokupl'un temel prensibi 1821 yılında Thomas Seebeck tarafından geliştirilen kurama dayanmaktadır. Farklı iki metal iletkenin her iki uçları birleştirildiğinde ve bu birleşme noktalarından bir tanesi ısıtıldığında oluşan kapalı elektrik devresinden bir akım akacaktır. Eğer devre tam orta noktasından ayrılırsa, iletkenler uçlarında, birleşme noktalarındaki sıcaklık farkıyla orantılı bir açık devre gerilimi (Seebeck gerilimi) oluşur. Ölçme noktasının sıcaklık değerinin belirlenebilmesi için referans noktasının sıcaklık değerinin biliniyor olması gerekmektedir.

Termokupl, temelde mutlak değil de farksal olarak sıcaklık ölçümü yaptığından, bir ucundaki sıcaklık değerinin belirlenebilmesi için öteki uç

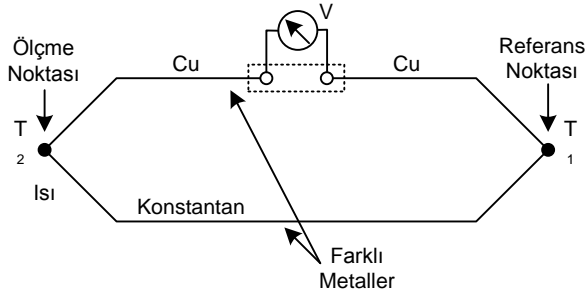
bilinen bir referans sıcaklığında sabit tutularak elde edilen gerilime bakılması gerekir. Özellikle seçilmiş materyallerden yapılmış termokupllar, primer (birincil) sıcaklık standartlarıyla karşılaştırılarak elde edilen gerilime karşı sıcaklık karakteristikleriyle sınıflandırılırlar. Standart termokupl performansını gösteren çizelgelerin çoğu suyun donma sıcaklığı olan 0 °C seviyesi referans alınarak belirlenir. Ezilmiş buzdan oluşan bir buz banyosu, referans noktası için, 0 °C 'lik iyi bilinen bir sıcaklık değeri oluşturabilir. Buz banyosu referans alınarak değişik metal kombinasyonlarının ürettiği gerilim değerleri American National Institute of Standards and Technology (ANSI) normlarına uygun olarak Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Termokupl modelleri ve özellikleri

| ANSI kod | Kombinasyon            | Sıcaklık ölçüm aralığı (°C) | Çıkış (mV)   | Termoemk (mV/°C) |
|----------|------------------------|-----------------------------|--------------|------------------|
| B        | Platin / Radyum        | 0 +1700                     | 0 +12,42     | 0,007            |
| E        | Kromel / Konstantan    | -200 +900                   | -8,82 +68,78 | 0,071            |
| J        | Demir / Konstantan     | 0 +750                      | 0 +42,28     | 0,056            |
| K        | Kromel / Alumel        | -200 +1250                  | -5,97 +50,63 | 0,039            |
| N        | Nikrosil / Nisil       | -270 +1300                  | -4,34 +47,50 | 0,033            |
| R        | Platin / Radyum Platin | 0 +1450                     | 0 +16,74     | 0,012            |
| S        | Platin / Radyum Platin | 0 +1450                     | 0 +14,97     | 0,010            |
| T        | Bakır / Konstantan     | -200 +350                   | -5,60 +17,81 | 0,043            |

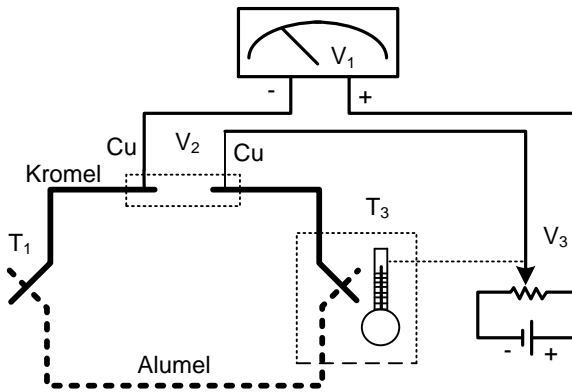
Termokupllar ekonomik ve sağlamdırlar; oldukça iyi, uzun vadeli kararlılığa sahiptirler. Küçük yapıları sayesinde çabuk tepki verirler ve hızlı tepkinin önemli olduğu yerlerde kullanılırlar. Boyutlarının da oldukça küçük olmalarından dolayı TE test sisteminde sıcaklık ölçüm algılayıcısı olarak termokupl kullanılmıştır.

Bir parça metalde bulunan serbest elektronların sayısı o metalin yapısı ve sıcaklığı ile ilişkili olduğundan, iki farklı metalden yapılmış parça, izotermal bir ortamda birbirine temas ederse, sıcaklık farkının tekrarlanabilir bir fonksiyonu dahilinde bir gerilim üretirler. Bu durum Şekil 3.3.'de görülmektedir. Sonuçta elde edilen gerilim  $T_1$  ve  $T_2$  sıcaklıklarına tekrarlanabilir bir şekilde bağlıdır.



Şekil 3.3. Basitleştirilmiş termokupl devresi

Termokupl ile gerçekleştirilen başka bir ölçüm devresi Şekil 3.4.'de verilmiştir. Bu metot primer standartlarla karşılaştırmanın ve kalibrasyonun gerekli olmadığı çoğu pratik uygulamada kullanılır. Referans noktasının sıcaklığı ortam sıcaklığıyla serbestçe değişmeye bırakılır fakat ortam sıcaklığı herhangi bir mutlak sıcaklık ölçümü yapan bir termometre ile ölçülür. Termokupl gerilimini ölçerek, referans noktasının sıcaklığını da bilerek ölçüm noktasındaki sıcaklık değeri hesaplanabilir. Bu gerilim termokupl gerilimine eklenir ve böylece buz sıcaklığına endekslenmiş standart bir termokupl'dan elde edilen gerilimin benzeri elde edilir.

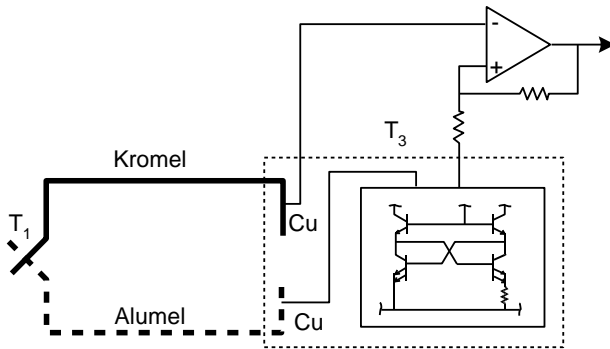


Şekil 3.4. Karşılaştırma yöntemiyle sıcaklık ölçen termokupl devresi

Bir elektronik sistemde termokupl ile sıcaklık ölçülmesinde ortaya çıkan temel problem, termokupl ile termokupl yükseltecinin bağlantı noktaları arasında oluşan parazit gerilimin ortadan kaldırılmasıdır. Sıcaklık ölçümü esnasında meydana gelen parazit gerilimler hesaba katılmadığı takdirde sıcaklık ölçümlerinde hatalar oluşacaktır. Parazit gerilimleri hesaba katan, soğuk

eklem kompanzasyonu (Cold junction compensation) olarak bilinen, çeşitli kompanzasyon yöntemleri mevcuttur. Kompanzasyon işlemiyle birlikte termokupl çıkış geriliminin yükseltmesini yapabilen entegre devre elemanlarını kullanan sistemler de vardır [11]. Bu çalışmada geliştirilen test sisteminde, Analog Device firması tarafından üretilen AD 595 entegre devre elemanı kullanılmıştır.

Silikon entegre devrelerde bulunan transistörlerin sıcaklığa karşı olan hassasiyetleri oldukça tahmin edilebilir ve tekrarlanabilir. Bu hassasiyet AD595'te bir termokuplun soğuk referans noktasının gerilimini düzeltmek için kullanılacak bir gerilim üretmek amacıyla kullanılmıştır. Bu sistem Şekil 3.5.'de görülmektedir.



Şekil 3.5. İzotermal jonksiyonların bağlanması

Kompanzasyon referans noktası sıcaklığında yapıldığından, doğrudan devreye bağlantı yaparak referans noktasının oluşturulması genellikle en uygun durumdur. Kompanzasyon devresi ve referans noktası aynı sıcaklıkta olduğu sürece herhangi bir hata söz konusu olmayacaktır [45, 46].

### 3.2. Akım Ölçme Sistemleri

Akım ölçmek için geliştirilen birçok yöntem olmasına karşın, ucuz olmalarından dolayı, bunlardan sadece üç tanesi seri üretimde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Diğerleri pahalı laboratuvar sistemleri, yeni çıkan teknolojiler (örneğin manyetorezistanslar) veya az kullanılan sistemlerdir. En



çok kullanılan sistemler ise seri direnç yöntemi, akım transformatörleri ve Hall-etkili algılayıcıların kullanıldığı sistemlerdir.

### **3.2.1. Seri direnç yöntemi**

Seri direnç yöntemi, maliyetinin düşük olması ve temel çalışma prensibinin çok basit olmasından dolayı çok geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemde üzerinden geçen akım miktarı ölçülmek istenen iletkene seri olarak değeri bilinen bir direnç eklenmektedir. Direnç üzerinde düşen gerilim miktarı bir voltmetre yardımıyla ölçülerek  $I=V/R$  (temel ohm kanunu) denklemine göre direnç üzerinden geçen akım miktarı hesaplanır. Ancak, devreye seri bir direnç bağlanmak zorunda olması, bu direnç üzerinde ısı şeklinde atık güç oluşması, sıcaklığa göre direnç değerinin değişebilmesi ve elektriksel izolasyon olmaması bu ölçüm sisteminin en büyük dezavantajlarıdır.

### **3.2.2. Akım transformatörü yöntemi**

Akım transformatörlü ölçüm sistemleri, adından da anlaşılacağı üzere devreden geçen akımı algılamak için bir transformatör kullanırlar. Bu nedendir ki sadece dalgalı akım ölçebilirler. Çoğu ucuz akım transformatörleri dar bir frekans aralığında çalışacak şekilde dizayn edilmiştir ve doğru akım ölçmek için kullanılamazlar. Buna karşın akım transformatörleri yüklemeye etkisi yapmazlar, elektriksel izolasyon sağlarlar, harici bir güç kaynağına da ihtiyaç duymazlar ve ofset gerilim değerleri sıfırdır.

### **3.2.3. Hall-etkisi yöntemi**

Hall-etkili algılayıcıların kullanıldığı ölçüm sistemleri ise yüklemeye etkisi olmaması, elektriksel izolasyon sağlaması, hem doğru hem de dalgalı akım ölçebilme yeteneklerine karşın diğer sistemlere göre biraz daha pahalı olması ve çalışması için harici bir güç kaynağına ihtiyaç duyuyor olması gibi

dezavantajları vardır. Çizelge 3.3.'de bu üç akım ölçme yönteminin karşılaştırılması görülmektedir.

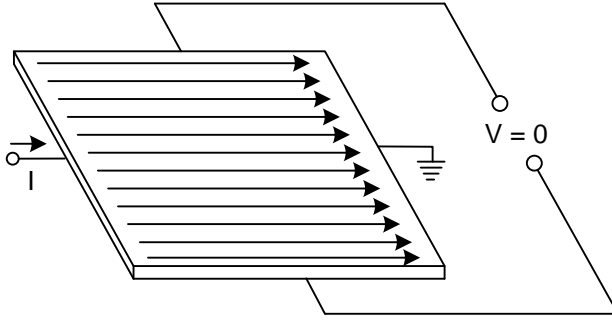
Çizelge 3.3. Ucuz ve en sık kullanılan akım ölçme teknikleri

| Sık kullanılan algılayıcılar | Yükleme etkisi | Elektriksel izolasyon | Harici güç kaynağı | Frekans aralığı | Offset | Doğruluk | Fiyatı    |
|------------------------------|----------------|-----------------------|--------------------|-----------------|--------|----------|-----------|
| Direnç (dc)                  | Var            | Yok                   | Yok                | <100 kHz        | Yok    | > %99    | En ucuzu  |
| Direnç (ac)                  | Var            | Yok                   | Yok                | >500 kHz        | Yok    | > %99    | Ucuz      |
| Hall-etkili                  | Yok            | Var                   | Var                | $\geq 150$ kHz  | Yok    | > %95    | Orta      |
| Akım transfor.               | Var (ac)       | Var                   | Yok                | Sabit           | Yok    | > %95    | En pahalı |

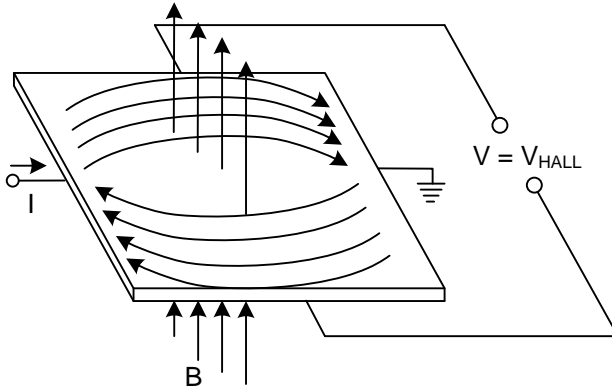
TE test sisteminde, TE modül içerisinde geçen ve ölçülecek olan akım doğru akım olduğu için seri direnç veya Hall-etkili akım ölçme sistemlerinden birini tercih etme zorunluluğu vardır. Seri direnç sisteminde görülen elektriksel izolasyon, yüklemeye etkisi ve ısı değişimiyle oluşabilecek hatalar nedeniyle, elektriksel izolasyon sağlayan, yüklemeye etkisi olmayan ve yüksek doğruluk sağlayan Hall-etkili akım ölçme sistemi tercih edilmiştir.

#### Hall-etkili algılayıcılar

Eğer akım taşıyan bir iletken bir manyetik alan içerisine yerleştirilirse, akım ve manyetik alan yönüne dik bir gerilim oluşur. Şekil 3.6.'da üzerinden, soldan sağa doğru, akım geçecek şekilde yerleştirilmiş ince bir yarıiletken madde görülmektedir. Manyetik alanın sıfır olduğu durumda yarıiletken madde üzerinden geçen akım dağılımı düzenli olacak ve çıkış kontakları arasında herhangi bir gerilim görülmeyecektir. Şekil 3.7.'deki gibi bir manyetik alan uygulandığında ise yarıiletken madde üzerinden geçen akım, dağılımı bozulacaktır. Yük taşıyıcılarının yoğunluğunun ( n tipi yarıiletkenler için elektron yoğunluğu, p tipi için delik yoğunluğu) düzgün dağılmaması, çıkış uçlarında bir potansiyel farkı meydana getirecektir.



Şekil 3.6. Manyetik alan etkisinin sıfır olduğu durum



Şekil 3.7. Manyetik alan etkisinin sıfırdan farklı olduğu durum

Bu gerilim Hall gerilimi olarak adlandırılır. Manyetik alan, akım ve Hall gerilimi arasındaki ilişki Eş. 3.1 ile verilir:

$$V_H = kIB\sin\theta \quad (3.1)$$

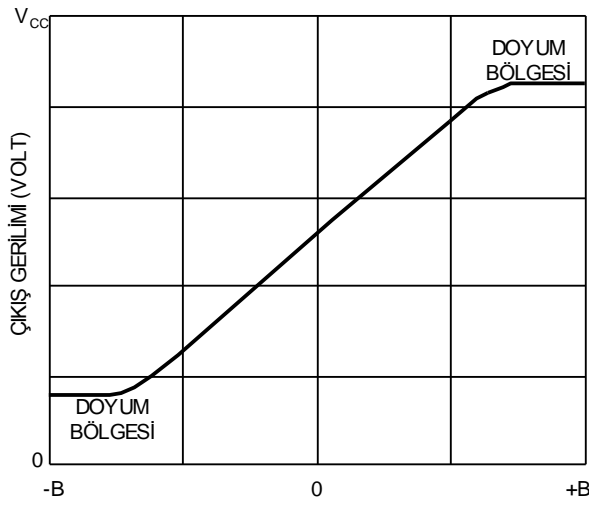
Burada  $k$  yarıiletkenin tipine göre değişen bir sabit ve Hall elemanının geometrik fonksiyonu,  $B\sin\theta$ , manyetik eleman bileşeni,  $I$  ise devreden geçen akım miktarını göstermektedir. Eğer giriş akımı sabit tutulursa Hall voltajı doğrudan manyetik alanın büyüklüğüne bağlı olacaktır.

Birçok yarıiletken için, bir Gauss'luk manyetik alanda meydana gelen Hall voltajı 20 - 30  $\mu\text{V}$  gibi çok küçük bir değer olacaktır. Bu değerdeki bir sinyal

yükseltilebilmesi için düşük gürültü ve yüksek giriş empedansına sahip bir yükseltece ihtiyaç vardır.

Hall elemanı tarafından algılanan manyetik alan negatif veya pozitif olabilir. Eğer simetrik bir besleme kaynağı kullanılırsa Hall etkili algılayıcı çıkışları da pozitif veya negatif olacaktır.

Hall algılayıcıları, uygulanan akımla orantılı çıkış sinyali oluştururlar. Normalde herhangi bir akım ölçme uygulamasında iletken içerisinde geçen akımın iletken etrafında oluşturduğu manyetik alanı Hall elemanına odaklamak için ince bir toroid nüve kullanılır. Radyometrik lineer bir Hall-etkili akım algılayıcısının transfer eğrisi Şekil 3.8.'de görülmektedir.

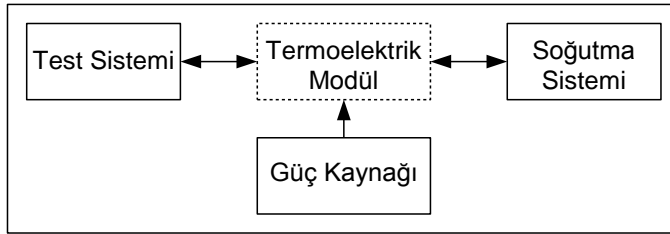


Şekil 3.8. Doğrusal Hall algılayıcı transfer eğrisi

Şekil 3.8.'den de anlaşılacağı gibi, oluşan manyetik alana göre çıkış geriliminin doğrusal olarak değiştiği bir bölge vardır. Ancak pozitif ve negatif yönde uygulanan yüksek manyetik alanda çıkış doyuma gitmektedir. Algılayıcıyı doyuma götürecek manyetik alan miktarı her algılayıcı için farklıdır ve bu manyetik alan miktarı algılayıcının ölçebileceği maksimum akım miktarıyla orantılıdır [45].

#### 4. MİKRODENETLEYİCİ KONTROLLÜ TERMoeLEKTRİK TEST SİSTEMİ

Bu tez çalışmasında tasarlanan ve gerçekleştirilen Termoelektrik test sistemi, teste tabi tutulacak modül, modülün çalışması için gerekli güç kaynağı ve soğutma sistemi ile testleri yapacak elektronik kontrol sistemi olmak üzere dört ana parçadan oluşmaktadır (Şekil 4.1.). Güç kaynağı olarak anahtarlama mod güç kaynağı (Switching Mode Power Supply – SMPS) kullanılmıştır. Soğutma için su devir daimli ısı transfer sistemi kullanılmıştır. Ölçüm sisteminde, akım ölçümü için Hall-etkili akım algılayıcı, sıcaklık ölçümü için ise K tipi termokupl kullanılmıştır. Ancak istenirse T tipi termokupl da kullanılabilir. Bütün test sistemini kontrol etmek ve hesaplamaları yapmak için Atmel firması tarafından üretilen ATMEGA128 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Mikrodenetleyici için C dilinde özel bir program yazılmıştır. Ölçüm ve hesaplama sonuçlarını gösterebilmek için LCM (Liquid Crystal Module-Sıvı Kristal Modül) kullanılmıştır. Termoelektrik modül test sistemi son şekliyle Şekil 4.2. de görülmektedir.



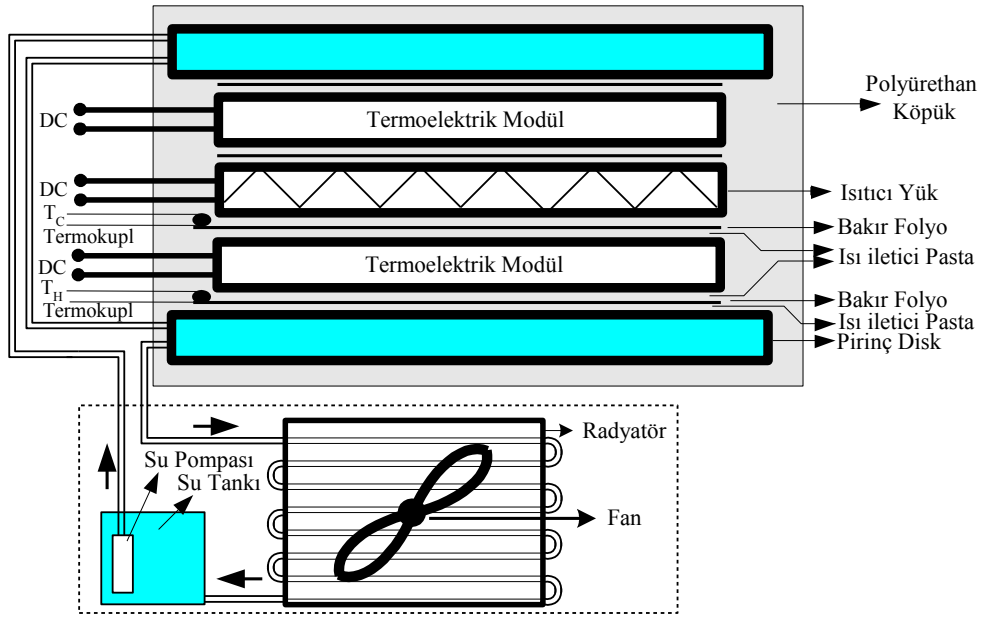
Şekil 4.1. Termoelektrik test sisteminin ana parçaları



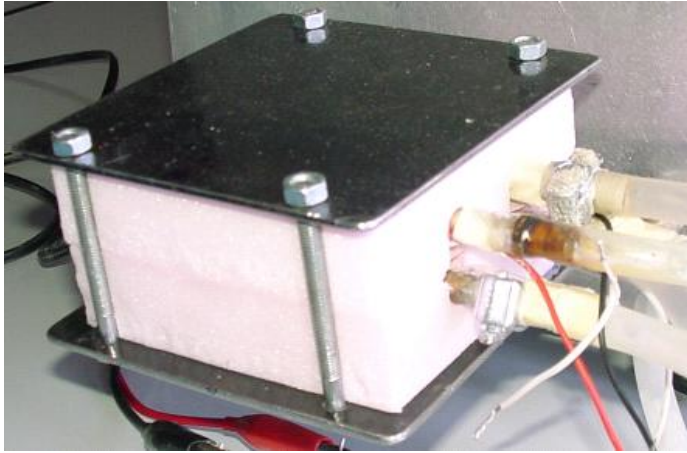
Şekil 4.2. Termoelektrik test sisteminin genel görüntüsü

#### 4.1. Soğutma Sistemi ve Güç Kaynağı

Termoelektrik modülün ısınan yüzeyini soğutmak için sulu soğutma sistemi kullanılmıştır (Şekil 4.3.). Termoelektrik modülün yüzeylerinde tam bir ısı dağılımı sağlanması amacıyla soğuk ve sıcak yüzeylerle pirinç disk arasına ince bakır folyo yerleştirilmiştir. Bu bakır folyonun bir diğer kullanım amacı da bu yüzeylerdeki sıcaklık bilgisini ölçmek için kullanılacak olan termokupl'u tutturaktır. Bu folyoların uç kısmına lehimlenen termokupllar sayesinde soğuyan ve ısınan yüzeye ait sıcaklık bilgileri kolayca ölçülebilmektedir. Termoelektrik modüllerin soğuk yüzeyleri arasına yük olarak bir ısıtıcı bağlanmıştır. Birbirine eşit iki termoelektrik modülün bu şekilde sırt sırta bağlanmasının nedeni, ısıtıcıdan gelen ısı yükünün tamamının, eşit iki parçaya bölünerek, TE modüllere dağılmasını sağlamaktır. Dış ortamdan gelecek kaçak ısı yükü,  $Q_y$ 'nin değerini en aza indirmek için, termoelektrik modül düzeneği, 5 cm kalınlıkta poliüretan köpükle kaplanmıştır. Termoelektrik modüller ve ısıtıcıya akım sağlamak üzere yine bu sistem içerisinde 3 adet 40 Volt, 10 Amper, ayarlı, anahtarlama mod güç kaynakları kullanılmıştır. TE modül, modülü soğutmak için kullanılan sistem ve izolasyon sisteminin resmi Şekil 4.4.'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Termoelektrik test sisteminin soğutma bloğunun yapısı

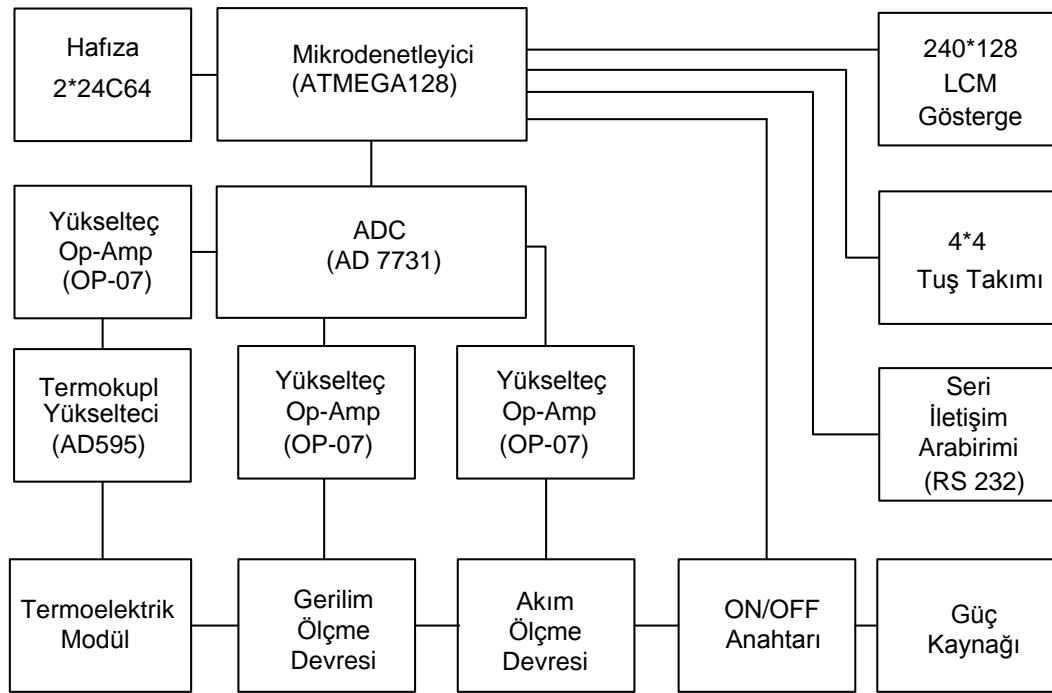


Şekil 4.4. İzole edilmiş TE modül ve soğutma bloğu

## 4.2. Elektronik Ölçüm ve Kontrol Sistemi

Tezin ikinci bölümünde geliştirilen yeni yöntemi kullanarak termoelektrik modülün tüm ısıl parametrelerinin ölçülmesini sağlayan, ölçüm ve kontrol sistemi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştiren Elektronik ölçüm ve kontrol sistemi, test sisteminin en önemli bölümünü oluşturmaktadır ve Şekil 4.5.'deki blok şemada gösterilen bölümlerden oluşmaktadır. Blok şemanın en üstünde bütün bir sistemi kontrol eden mikrodenetleyici görülmektedir. Ölçümü

yapılacak olan TE modül ile modüle akım sağlayan güç kaynağı arasında, mikrodenetleyici tarafından kontrol edilen bir on/off anahtarı ile akım ve gerilim ölçme algılayıcıları mevcuttur. Akım ve gerilim algılayıcıları ile termokupldan elde edilen sinyaller birer yükselteç devresinde yükseltildikten sonra Analog/Dijital dönüştürücü yardımıyla mikrodenetleyiciye aktarılmaktadır. Mikrodenetleyici gerek doğrudan ölçülen verileri gerekse hesaplama sonuçları ve/veya uyarı mesajlarını LCM ekranda gösterebilmekte ve sonrasında kullanılmak üzere hafızaya kaydedebilmektedir. Hafızaya kaydedilen bilgiler bir seri iletişim arabirimi sayesinde bilgisayar ortamına aktarılabilir.



Şekil 4.5. Ölçüm ve kontrol sistemi blok şeması

Kontrol sisteminin kutulanmış hali Şekil 4.6.'da görülmektedir.

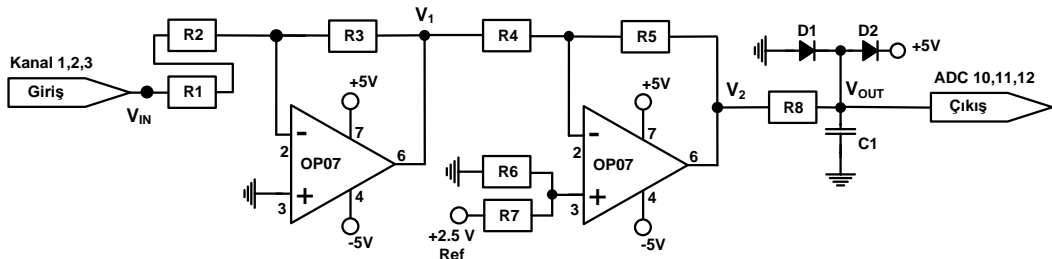




Şekil 4.6. Termoelektrik test sistemi, kontrol ünitesi

#### 4.2.1. Yükselteç devresi

Şekil 4.7.'de açık devre şeması görülen yükselteç devresi, OP-07 op-ampları üzerine kurulmuştur. OP-07 op-amp'ı çok düşük ofset gerilimine ( $75 \mu\text{V max}$ ) sahiptir. Harici bir sınırlama ile düşük ofset gerilimi yok edilebilir, düşük giriş akımı ( $\pm 4\text{nA}$ ) ve yüksek açık-çevrim kazancı ( $200\text{V / mV}$ ) sağlar,  $\pm 13\text{V}$  (min) geniş giriş gerilim oranı,  $106 \text{ dB}$ 'lik yüksek CMRR oranı,  $0,6 \mu\text{V}_{\text{p-p(max)}}$  düşük gürültü oranına sahiptir. Zamana göre veya sıcaklık değişimlerine karşı ofset değerleri ve kazancı kararlıdır [47]. Bütün bu üstünlüklerinden dolayı yükselteç devresinde OP-07 yükselteç entegre devre elemanı kullanılmıştır.



Şekil 4.7. Yükselteç devresi

Yükselteç devresi  $\pm 1,28V$  aralığında değişen girişleri A/D dönüştürücünün 1,22-3,78 V 'luk giriş aralığına uyduran bir devredir. İlk kat eviren tarzda çalışan bir zayıflatıcıdır ve güçlü giriş sinyallerini zayıflatır. Termokupl yükseltecinden gelen sinyaller, gerilim ve akım algılayıcılardan gelen sinyallerden daha zayıf olduğundan dolayı zayıflatma oranı 0,5 olarak belirlenmiştir. Gerilim ve akım algılayıcılardan gelen sinyaller için ise zayıflatma oranı 0,05 olarak ayarlanmıştır. İlk katın çıkışında görülen  $V_1$  gerilimi Eş. 4.1'den bulunur.

$$V_1 = -V_{IN} \frac{R_3}{R_1 + R_2} \quad (4.1)$$

Burada gerilim ve akım algılayıcıları için  $R_1=R_2=47K$ ,  $R_3=4,7K$  seçilmiştir. Termokupl yükselteci için ise  $R_1=R_2=R_3=47K$  seçilmiştir. İkinci kat birim kazançlı çıkarıcı devresidir ve pozitif girişine uygulanan  $V_{ref} = 2,5V$  geriliminden  $V_1$  gerilimini çıkartır. Elde edilen  $V_2$  geriliminin değeri Eş. 4.2'den bulunabilir.

$$V_2 = 2,5V \left( 1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \left( \frac{R_6}{R_6 + R_7} \right) - V_1 \left( \frac{R_5}{R_4} \right) \quad (4.2)$$

$$V_2 = 2,5V + V_{IN} \frac{R_3}{R_1 + R_2}$$

Formüllerden de anlaşılacağı üzere, bu devrenin amacı, zayıflatıcı çıkışında görülen ve  $\pm 1,28V$  aralığında değişen  $V_1$  gerilimini, A/D dönüştürücünün ihtiyaç duyduğu  $2,5V \pm 1,28V$ 'luk giriş aralığına uydurmaktır. Böylece A/D dönüştürücünden elde edilen veriler işaretli ikili sayılar halinde olmaktadır.  $R_4=R_5=R_6=R_7= 4,7K$  olarak seçilmiştir.

$V_2$  gerilimi A/D dönüştürücüye uygulanmadan önce bir alçak geçiren filtreden geçirilir. Bu filtre A/D dönüştürücüye sadece ilgilenilen frekans bandında

bulunan (0 - 33 Hz) sinyallerin gönderilmesine izin verirken, gürültünün filtre edilmesini sağlamaktadır. Filtre devresi ayrıca çıkışında yer alan kenetleyici devre ile birlikte statik elektrik deşarjından kaynaklanabilecek zararları önleyici ek bir tedbir olmaktadır. Filtrenin kesim frekansı Eş. 4.3'teki formülden bulunur.

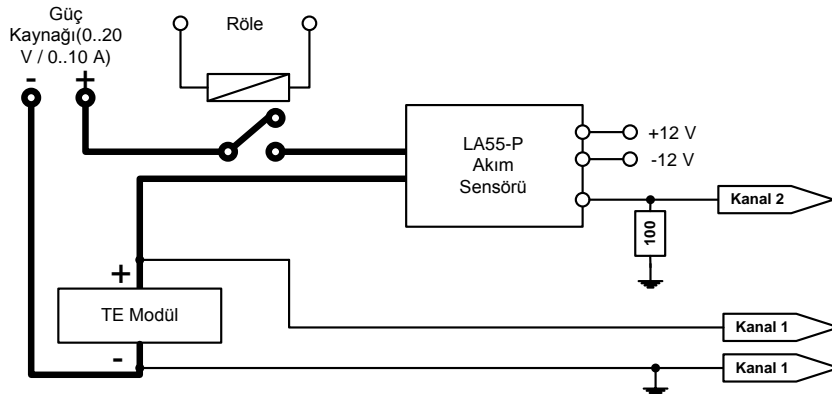
$$f_{üst} = \frac{1}{2\pi R_8 C_1} \quad (4.3)$$

A/D dönüştürücünün yüksek giriş empedansı sayesinde  $R_8$  direncini oldukça yüksek tutmak mümkün olmaktadır. Burada  $R_8 = 47K$  ve  $C_1 = 100$  nF değerleri kullanarak  $f_{üst} = 33Hz$  olarak ayarlanmıştır.

Filtrelenmiş gerilim, A/D dönüştürücünün girişine statik gerilimi önleyen ve iki adet silisyum diyottan oluşan kenetleyici devresi üzerinden verilir. Böylece A/D dönüştürücü girişlerine gelebilecek gerilim değeri -0,7 - +5,7 V aralığında sınırlandırılarak A/D dönüştürücü girişleri korunmuş olur.

#### 4.2.2. Gerilim ve akım algılayıcıları

Gerilim ve akım algılayıcıları ile termoelektrik modülün sisteme olan elektriksel bağlantıları Şekil 4.8.'de görülmektedir.



Şekil 4.8. Gerilim ve akım algılayıcıları bağlantı şeması

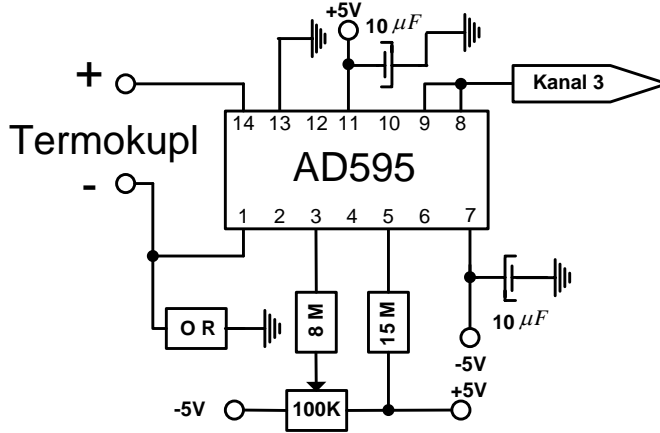
Devrede gerilim algılayıcı olarak ek bir düzenek kullanılmamıştır. Modüle en yakın bağlantı noktasına bağlanan ve tamamıyla müstakil ekranlı bir kablo üzerinden gerilim sinyali kanal 1 yükselteç girişine verilmiştir.

Akım algılayıcı, Hall etkisi ile çalışan ve ölçümde seri yükleme etkisi olmayan bir algılayıcıdır. Kullanılan, LEM LA55-P, akım algılayıcı ile çıkış hassasiyeti 100 mV/A olmaktadır. Yani 5A'lık bir akıma karşılık algılayıcı çıkışında 0,5V gerilim elde edilmektedir [48]. Akım sinyali kanal yükselteci üzerinden A/D dönüştürücünün ikinci kanalına verilmektedir.

Devredeki röle, modüle uygulanan akıma, açık/kapalı kontrolü sağlamak için kullanılmıştır. Güç kaynağı, devre beslemesinden izole edilmiş ayrı bir kaynaktır. Modülün özelliklerine ve test şartlarına bağlı olarak 0-20V, 0-10A arasında akım ve gerilimi ayarlanabilen bir SMPS güç kaynağıdır. Güç kaynağının ripple oranı %1'den küçüktür.

#### **4.2.3. Termokupl yükselteci**

Sıcaklık ölçüm devresiyle, termoelektrik elemanın sıcak yüzeyine bağlanan bir K tipi Kromel-Alumel termokupl ile sıcaklık bilgisi elde edilmektedir. Termokupl giriş yükselteci olarak soğuk eklem kompanzasyonu da yapabilen, Analog Devices firması tarafından üretilen, AD595 entegre devre elemanı kullanılmıştır. Termokupl yükselteç katının açık devre şeması Şekil 4.9.'da görülmektedir.

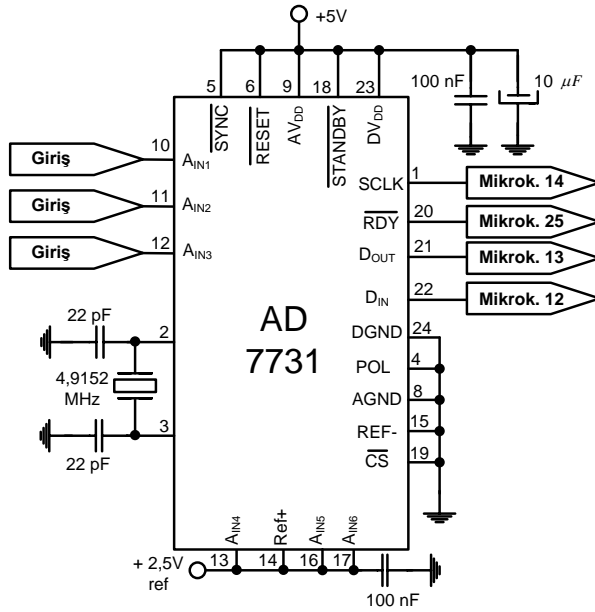


Şekil 4.9. Termokupl yükseltici

+25 °C'lik ortam sıcaklığını ölçmek için kullanılan K-tipi termokupla elde edilen çıkış gerilimi 10 mV / °C olmaktadır. 0-50 °C'lik ortam sıcaklığı aralığında sistemin ölçüm hatası  $\pm 0,6$  °C'dir [46]. Termokupla beraber sistemin toplam ölçüm hatası, en fazla,  $\pm 1,2$  °C olmaktadır. Çıkış gerilimi yükselteç devresi üzerinden A/D dönüştürücünün üçüncü kanalına uygulanmaktadır.

#### 4.2.4. A/D dönüştürücü

TE test sisteminde kullanılan A/D dönüştürücü, 24-bitlik bir Sigma-Delta dönüştürücüdür. İçinde programlanabilir kazançlı bir farksal yükselteç, 5-kanal katlama görevini üstlenen bir katlayıcı, Sigma-Delta modülatörü, filtreleme yapan dahili FIR filtreleri, dc kaymayı azaltmak maksadıyla devreye alınabilen kıyıcılar ve dönüştürme işlemlerinin kontrolünden sorumlu bir yerel mikroişlemci ünitesi bulunmaktadır [49]. Yapılan örneklemeler bir 3 telli seri iletişim hattı üzerinden kaydedildikleri kaydedicilerden alınarak sistemin mikrodenetleyicisine aktarılmaktadır. A/D dönüştürücü olarak, açık devre şeması Şekil 4.10.'da verilen ve Analog Devices firması tarafından üretilen AD7731 entegresi etrafında kurulu bir devre kullanılmıştır.



Şekil 4.10. A/D dönüştürücü devresi

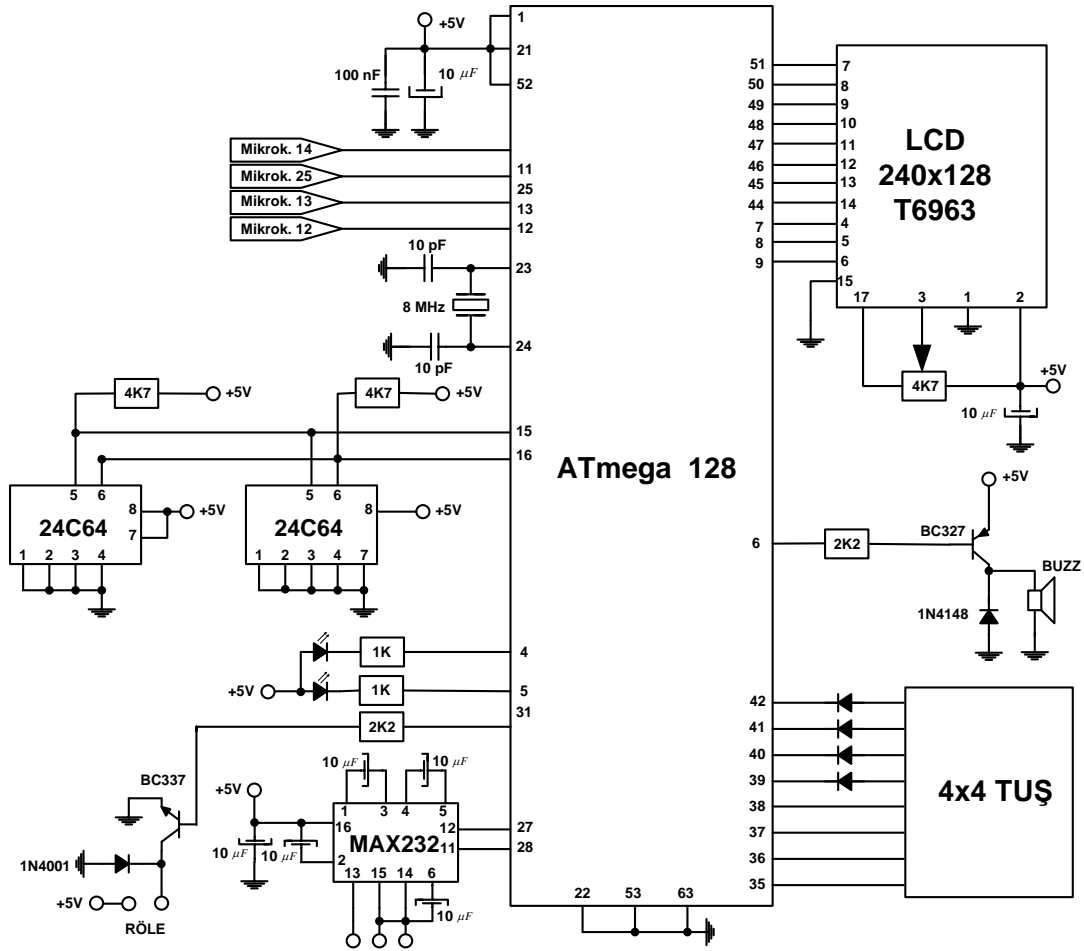
A/D dönüştürücü, 24-bit çözünürlükte 600 Hz hızında örnekleme yapacak şekilde programlanmış olup, girişler  $\pm 1,28V$  aralığında bipolar sinyalleri kabul edecek şekilde ayarlanmışlardır. Kanallardan sadece üçü kullanılmış olup diğer ikisi referans gerilim seviyesine verilerek katlama işleminden hariç tutulmaları sağlanmıştır. Böylece örnekleme hızındaki gereksiz kayıp önlenmeye çalışılmıştır. 5-kanal yalancı farksal giriş operasyonunu sağlamak üzere diğer farksal ortak ucu oluşturan  $A_{IN6}$  ucu referans gerilimine verilmiştir. Böylece  $\pm 1,28V$  aralığına karşılık gelen sinyallerin girişlerden  $+1,22V - +3,78V$  şeklinde alınması sağlanmıştır. Sonuçta  $-1,28V - 0V - +1,28V$  giriş sinyal aralığı çıkıştaki ikili örnek kelimesinde sırasıyla  $00\dots00 - 10\dots00 - 11\dots11$  ikili rakamlarına karşılık gelmektedir. Bu durum aynı zamanda A/D dönüştürücünün tek bir  $+5V$  gerilim kaynağından beslenmesi kolaylığını da sağlamaktadır.

#### 4.2.5. Kontrol devresi

TE test sistemi bir mikrodenetleyici tarafından kontrol edilir. Mikrodenetleyici, termoelektrik modül akımını bir röle üzerinden açık/kapalı kontrolünü sağlar, akım, gerilim, sıcaklık algılayıcılarından gelen verileri A/D dönüştürücü

üzerinden alır, bunları E2PROM hafıza entegre devre elemanlarına kaydeder, gerekli olduğu takdirde LCM ekranda gösterebilir veya bir seri arabirim üzerinden harici bir bilgisayar ünitesine gönderebilir, işlem esnasında verileri ve uyarıları sesli ve görüntülü olarak kullanıcıya iletir ve kullanıcıdan gelen komutları yerel bir tuş takımı üzerinden kabul eder. Ölçülen değerleri formüllerdeki yerlerine koyarak TE modülün dinamik çıkış değerlerini hesaplar ve ekranda gösterir.

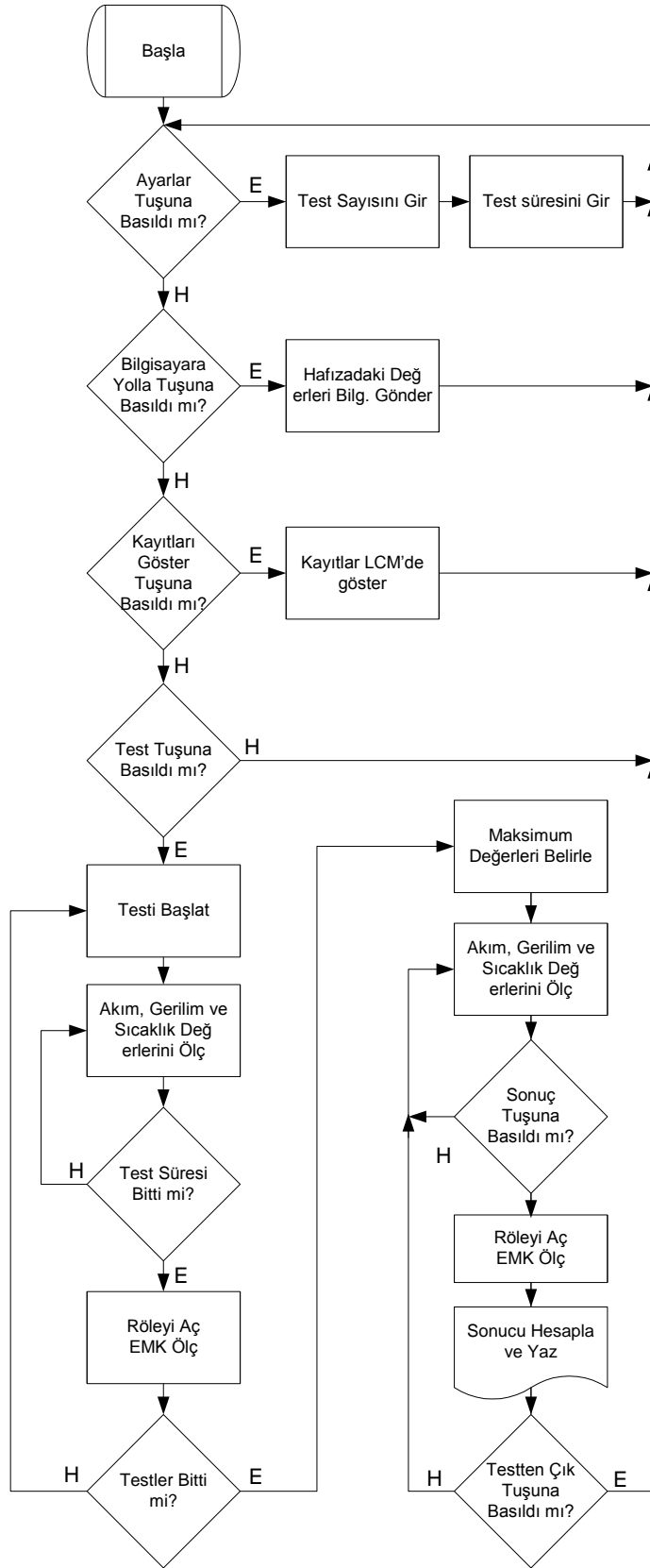
Bu yoğun işlem yükünde çalışabilecek RISC mimarisine dayalı olarak geliştirilmiş 8-bitlik Atmel ATmega128 işlemcisi seçilmiştir. Bu işlemci 8 MHz saat hızında 8MIPS komut işleme kapasitesine sahiptir. İşlemci, 128KB program hafızasına, 4KB E2PROM dahili veri hafızasına, 4KB dahili SRAM hafızasına sahiptir. Ayrıca 64KB genişliğinde harici bir E2PROM hafıza alanını yönetme kabiliyetine sahiptir. 53 programlanabilir I/O hattı vardır. İşlemci üzerinde dahili çevre birimleri olarak 8-bit ve 16-bitlik zamanlayıcılar, bir gerçek zaman saati, 8-bit ve 16-bitlik PWM kanalları, 10-bit 8 kanal bir A/D dönüştürücü, 2 ve 3 telli seri arabirimler ve çift kanallı bir USART bulunmaktadır. Kontrol devresi ve ATmega128 mikrodenetleyici elemanının devre bağlantı şeması Şekil 4.11.'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Mikrodenetleyici devresi

TE test sistemi  $T_{SI}$ ,  $I$ ,  $V$  ve termoemk parametrelerini ölçerek birim zamanda üretilen soğuk enerji miktarı, modülün verimi, modülün tükettiği güç ve soğuk yüzeyin sıcaklık değerlerini hesaplayabilmektedir. Bu parametreleri ölçmek ve ölçülen parametreleri formüllerde yerine koyarak makro parametreleri hesaplayabilmek için bir mikrodenetleyici devresine ihtiyaç duyulmuştur. Emk değerini ölçebilmek için modüle uygulanan akımın, soğuyan yüzey sıcaklığının minimum değerinde ( $T_{SOmin}$ ) kesilmesi gerekmektedir. Bu işlemde yine mikrodenetleyici elemanı tarafından kontrol edilmektedir. Kısaca mikrodenetleyici elemanı devrenin kontrolünü sağlayan bir beyin niteliğindedir. Kontrol devresindeki mikrodenetleyici için C dilinde bir program yazılmıştır. Programa ait akış şeması Şekil 4.12.'de verilmiştir.





Şekil 4.12. Mikrodenetleyici programı akış diyagramı

Bütün bu işlemleri yapabilmek amacıyla, dahili flash belleğe sahip ve hızlı bir mikrodenetleyici olan 8051 serisi mikrodenetleyici ailesinden ATMEGA128 tercih edilmiştir. Bu mikrodenetleyiciye ait özellikler kısaca şöyle özetlenebilir [50]:

- Gelişmiş RISC mimarisine sahiptir
- Çoğu tek saat palsinde işletilebilen 133 güçlendirilmiş komut
- 32 x 8 Genel amaçlı kaydedicisi + çevresel birim kontrol kaydedicisi
- 16 MHz'de 16 MIPS işleme kapasitesi
- Dahili 2 çevrimde çalışabilen çarpıcı
- 128KB sistem-içi programlanabilir Flash bellek
- 4 KB EEPROM, 4 KB SRAM
- 64 KB'a kadar isteğe bağlı harici bellek alanı
- Yazılım güvenliği için programlama kilidi
- Sistem-içi programlama için SPI arabirimi
- İki 8 bitlik zamanlayıcı / sayıcı
- İki genişletilmiş 16 bit zamanlayıcı / sayıcı
- Ayrı osilatöre sahip gerçek zaman saati
- İki adet 8 bit PWM kanalı
- 2 – 16 bit arası programlanabilir çözünürlüğe sahip 6 PWM kanalı
- Çıkış karşılaştırma modülatörü
- 8 kanal 10 bit ADC
- Seri arabirim
- Çift programlanabilir seri USART
- Dahili analog karşılaştırıcı
- 53 programlanabilir I / O hattı
- ATmega128L'de 2,7V – 5,5V arası
- ATmega128L'de 0-8 MHz arası

Ölçülen değerlerin ve yapılan hesaplamaların sonucunu göstermek amacıyla 240x128 nokta çözünürlüklü LCM (Liquid Crystal Module-Sıvı Kristal Modül) kullanılmıştır. Yapılan işlemler sonucunda soğuk yüzeyde üretilen enerji

miktarı ( $Q_{SO}$ ), sıcak yüzey sıcaklık değeri ( $T_{SI}$ ), verim (Coefficient of Performance -  $COP$ ), modülün tükettiği güç ( $P$ ) ve modülün kalite katsayısı (figure of merit -  $Z$ ) değerleri bu ekranda görülebilmektedir.

TE test sisteminde sıcaklık, akım ve gerilim değerlerinin örnekleme aralığının mikrodenetleyiciye girilebilmesi, akım ve gerilim değerlerini ölçen sistemin dijital olarak kalibrasyonu için, 4x4 matris taramalı bir tuş takımı kullanılmıştır.

Test sistemi tarafından ölçülen sıcaklık, akım ve gerilim değerleri 64 KB'lık harici belleğe kaydedilip istenirse daha sonradan bilgisayar ortamına aktarılabilir. Ölçüm sistemindeki bilgileri bilgisayar ortamına aktarabilmek amacıyla Maxim MAX232 entegre devresiyle gerçekleştirilen bir seri iletişim arabirimi bulunmaktadır.

Test sisteminde kullanılan eşitliklerde kullanılmak üzere, termoelektrik modülden geçen akım ve uçlarında görülen gerilimin değeri ile akım kesildikten sonra termoelektrik modül uçlarında meydana gelen emk değerinin ölçülmesi gerekir. Bu veriler algılayıcı-veri toplama sistemi üzerinden mikrodenetleyiciye aktarılmaktadır.

Bir modülün test edilmesi iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada modüle katalog değerlerine uygun bir gerilim ayarlı güç kaynağı üzerinden ayarlanarak verilir. Modül birinci aşamada termal açıdan yüksüz çalıştırılarak  $V_{max}$ ,  $I_{max}$  ve  $E_{max}$  değerleri elde edilmeye çalışılır. Sistem birinci aşama test moduna geçirildiği anda röle kontaklarını çekerek modüle akım verir. Aynı zamanda daha önceden ayarlanan aralıklarla modülün akım, gerilim ve ısınan yüzey sıcaklığı örneklenir. Mikrodenetleyici, daha önceden ayarlanmış örnek sayısınınca sıcaklık değerini yine daha önceden ayarlanmış bir tolerans faktörünü göz önünde bulundurarak karşılaştırır. Eğer belli sayıda örnek tolerans sınırları içinde eşitlik göstermiş ise mikrodenetleyici tarafından röle kontakları açılarak modül akımı kesilir. Kontakların tam olarak açılması için ve sistemdeki anahtarlama gürültüsünün kesilmesi için mikrodenetleyici kısa

bir süre bekler. Bu süre, yapılan ölçümü etkilemeyecek kadar küçüktür ( $t=500\text{ms}$ ). Mikrodenetleyici bu süre sonunda modül uçlarındaki gerilim değerini örnekler. Bu değeri  $E_{max}$  değeri olarak hafızaya alır. Modül akımını kesmeden hemen önce aldığı gerilim ve akım değerlerini de sırasıyla  $V_{max}$  ve  $I_{max}$  değerleri olarak kaydeder.

Birinci aşama testin gerçekleştirilmesi için modülün sökülüp Şekil 4.3.'deki düzeneğe bağlanması gerekmektedir. Ancak modüle ait bu değerler katalogdan bakılarak doğrudan klavyeden de girilebilir. Bu durumda modülün takılı olduğu cihazdan sökülmesine gerek yoktur. Eğer modülün cihaz üzerindeki dinamik performansının belirlenmesi isteniyorsa ikinci aşama testi cihaz üzerinde de gerçekleştirilebilir, düzeneğe bağlanmasına gerek yoktur. Z ve soğuyan yüzeyin sıcaklığı hariç diğer tüm parametrelerin hesabı için ısınan yüzeyin sıcaklığına ihtiyaç olmadığından dolayı cihaz üzerindeki modülde sıcaklık ölçümü yapılmadan da ikinci aşama gerçekleştirilebilir. Soğuyan yüzey sıcaklığını bilmek şart ise ısınan yüzeyin sıcaklığının ölçülmesi gerekir veya soğuyan yüzeyin sıcaklığını doğrudan ölçmek için farklı bir yöntem kullanılmalıdır.

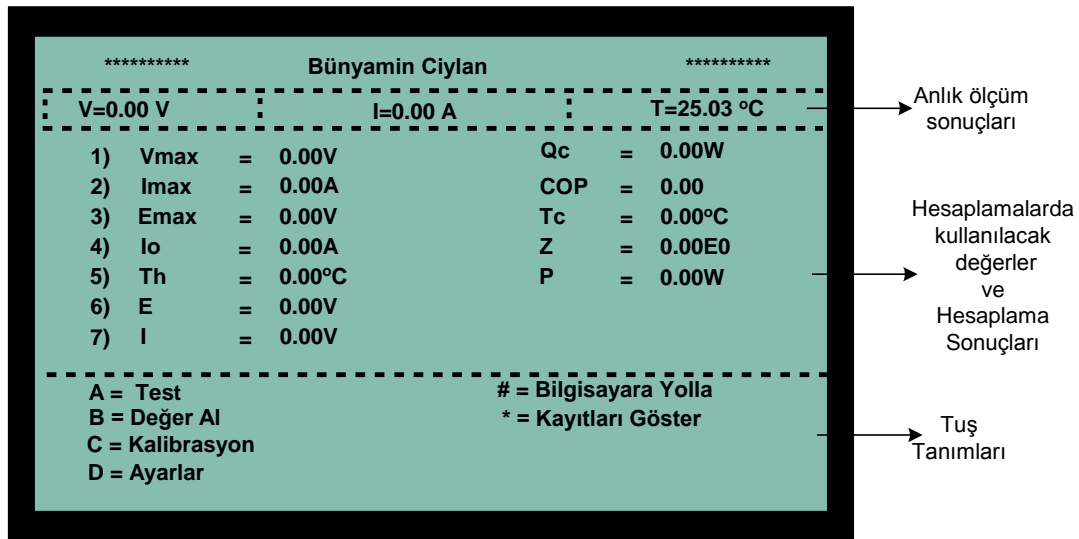
İkinci aşamada, mikrodenetleyici yine modüle akım verir. Bu aşamada modül katalog değerlerine uygun termal bir yükü yüklenir. Bu yük, modülün test düzeneğine bağlanması ile sağlanabileceği gibi, doğrudan modülün çalıştığı sistem üzerinde modülün soğuk yüzeyine düşen termal yük de olabilir. Kullanıcı uygun gördüğü anda bir tuşa basarak sisteme, modüle ait akım, gerilim ve ısınan yüzey sıcaklığının örneklenmesi komutunu verir. Hemen ardından mikrodenetleyici, röle yardımıyla modül akımını keserek, modül emk'sı  $E$  değerini de örnekler. Birinci aşamanın tersine  $E$  değeri örneklendikten sonra röle kontakları kapatılarak modül çalıştırılmaya devam edilir. Eğer kullanıcı yeni bir örnek almak isterse yukarıdaki işlemler tekrarlanır. Böylece, her örnekleme çevriminin ardından elde edilen değerler, birinci aşamada elde edilen değerler de kullanılarak mikrodenetleyici

tarafından formüllerde yerlerine konular ve elde edilen sonuçlar ekrana yansıtılır.

Ölçülen  $V_{max}$ ,  $I_{max}$ ,  $E_{max}$ ,  $T_{Sl}$ ,  $I$ ,  $V$  ve  $E$  değerleri Eş. 2.79'da yerlerine konularak üretilen soğutma enerjisi miktarı ( $Q_{SO}$ ), Eş. 2.81 ile modülün tükettiği güç ( $P$ ), Eş. 2.82 kullanılarak modülün verimi ( $COP$ ), Eş. 2.83 ile kalite katsayısı ( $Z$ ) ve Eş. 2.84 ile de soğuk yüzeyin sıcaklığı ( $T_{SO}$ ) mikrodenetleyici tarafından otomatik hesaplanır ve ekrana yansıtılır.

### 4.3. TE Test Sisteminin Çalışması

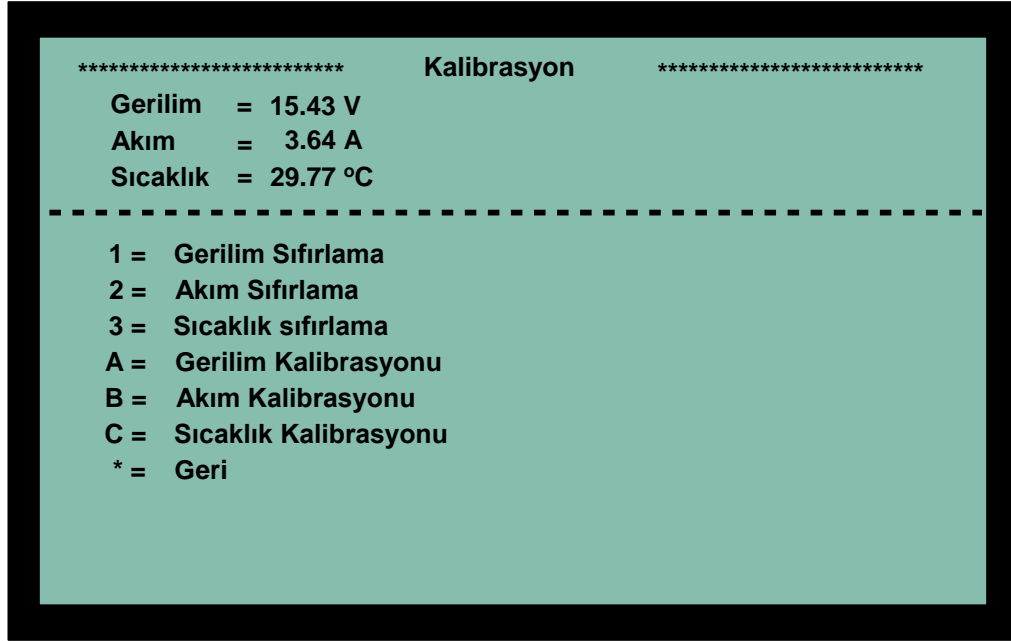
Termoelektrik test sistemi kontrol ünitesinin çalışması bir ana menü ve altı adet alt menüden oluşmaktadır. TE test sistemi çalıştırıldığında sistem Şekil 4.13.'de görülen ana menü ile başlar.



Şekil 4.13. TE test sistemi ana menüsü

Ekranın üstünde TE test sistemi tarafından, o anda, ölçülen gerilim, akım ve sıcaklık değerleri anlık olarak gösterilmektedir. Ortada kalan bölümde ise hesaplamalarda kullanılacak değerler sol tarafta, yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen sonuçlar ise sağ tarafta gösterilmektedir. Ekranın alt bölümünde ise tuş tanımlama bilgi ekranı yer almaktadır.

TE test sistemi ilk defa çalıştırıldığında, bir defaya mahsus olmak üzere akım, gerilim ve sıcaklık ölçüm sistemlerinin kalibrasyonunun yapılması gerekir. Bunun için ana menüde “C” tuşuna basarak Şekil 4.14.’de görülen kalibrasyon menüsüne girilir.



Şekil 4.14. Kalibrasyon menüsü

Ekranın üst bölümünde TE test sistemi tarafından o anda ölçülen gerilim, akım ve sıcaklık değerleri anlık olarak görülmektedir. Gerilim kalibrasyonu için, gerilim ölçüm proplarının uçları kısa devre edilerek prop uçlarındaki gerilim değerinin sıfır olması sağlanır. Tuş takımından 1 tuşuna basılarak mikrodenetleyici girişine, gerilim ölçüm algılayıcı-kanal yükselteci ve ADC çıkışından gelen dijital gerilim bilgisi sıfır değeri için seçilmiş olur. İkinci adım olarak gerilim ölçüm propları, değeri aynı anda ve aynı noktadan, kalibrasyonu doğru bilinen başka bir ölçü aletiyle ölçülen gerilim kaynağına bağlanır. Ölçü aletinin gösterdiği değer, tuş takımı kullanılarak, ölçüm cihazına girilir. Böylece gerilim kalibrasyonu işlemi tamamlanmış olur. Benzer bir işlem akım kalibrasyonu ve sıcaklık kalibrasyonu için de gerçekleştirilir. Sıcaklık kalibrasyonunda sıfır noktası için çevre ısısından bağımsız hale getirilmiş bir su kabı içerisine doldurulmuş buzlu su karışımı kullanılmıştır.

Ölçümler iki adet civalı ve iki adette dijital olmak üzere toplam dört termometreyle teyit edilmiştir.

İkinci işlem basamağında ise ölçümlerde kullanılacak ayarlamaların yapılacağı ayarlar menüsüne, ana menüden “D” tuşu kullanılarak, girilir. Şekil 4.15.’de görülen ayarlar menüsü içerisinde, ölçüm sisteminin yapacağı ölçümler için hangi sıklıkta örnekleme alacağı, sıcaklıkta oluşacak sabitliğin tolerans değeri ve yeteri kadar sabit kaldığının belirlenmesi için kaç örnek boyunca tolerans değerleri içerisinde kalması gerektiği, değerler alınıp modüle uygulanan akım kesildikten sonra ne kadar daha emk değerinin ölçülüp kaydedilmesi gerektiği, değer alma işleminin kaç defa tekrarlanacağı ve hangi test işleminin sonuçlarının kaydedileceği bu bölümde belirlenir.

| *****    |                   | Ayarlar |            | ***** |  |
|----------|-------------------|---------|------------|-------|--|
| 1)       | Örnekleme aralığı | =       | 0.3 saniye |       |  |
| 2)       | Durgunluk         | =       | 50 örnek   |       |  |
| 3)       | Tolerans          | =       | 00.5 °C    |       |  |
| 4)       | Emk süresi        | =       | 01 dakika  |       |  |
| 5)       | Test Sayısı       | =       | 01 defa    |       |  |
| 6)       | Kayıt Test No     | =       | 01         |       |  |
| -----    |                   |         |            |       |  |
| * = Geri |                   |         |            |       |  |

Şekil 4.15. Ayarlar menüsü

TE modüller test düzeneği içerisine yerleştirilip izolasyon sağlandıktan ve gerekli bütün elektriksel bağlantılar yapıldıktan sonra öncelikle modüle ait standart parametrelerin elde edilmesi için, ana menüde B tuşuna basılarak Şekil 4.16.’da görülen “Değer al” menüsü seçilir. Değer al menüsüyle yapılan işlemin amacı modülün standart parametreleri olan  $V_{max}$ ,  $I_{max}$  ve  $E_{max}$

değerlerinin belirlenmesidir. Bu değerler ikinci aşamada ölçülecek anlık değerlerle birlikte kullanılarak modül dinamik parametrelerinin hesaplanmasında kullanılacaktır.

| ***** Değer Ölçümü ***** |   |            |                      |
|--------------------------|---|------------|----------------------|
| V=15.43 V                |   | I=3.64 A   |                      |
|                          |   | T=29.73 °C |                      |
| 1) Vmax                  | = | 15.43V     | Qc = 0.00W           |
| 2) Imax                  | = | 3.64A      | COP = 0.00           |
| 3) Emax                  | = | 3.60V      | Tc = 29.73°C         |
| 4) Io                    | = | 3.64A      | Z = 2.65E-3          |
| 5) Th                    | = | 29.73°C    | P = 0.00W            |
| 6) E                     | = | 0.00V      |                      |
| 7) I                     | = | 0.00V      |                      |
| Ölçüm No                 | = | 01         | Ölçüm süre = 03 : 05 |
| Örnek Zamanı             | = | 03         |                      |
| Örnek No                 | = | 0065       |                      |
| Emk Zamanı               | = | 00 : 55    | * = iptal            |

Şekil 4.16. Değer ölçümü menüsü

Değer alma menüsü seçildiğinde mikrodenetleyici röleye çekme komutu gönderir ve modüle akım uygular. Ayarlar menüsünde belirtilen zaman aralıklarıyla akım, gerilim ve sıcaklık değerleri ölçülür ve hafıza entegre devre elemanlarına kaydedilir. Aynı zamanda modülün ısınan yüzeyinin sıcaklık değerinde meydana gelen değişim, mikrodenetleyici tarafından, izlenmeye başlanır. Alınan her bir örnek kendinden önceki örnekle karşılaştırılır. Ayarlar menüsünde belirtilen tolerans sınır değerleri içerisinde kalan sıcaklık değerlerinin sayısı art arda, yine ayarlar menüsünde belirtilen durgunluk sayısında olursa bu durumda ısınan yüzeyin sıcaklık değeri kabul edilebilir tolerans değerleri içerisinde sabitlenmiş demektir ve soğuyan yüzeyin sıcaklık değeri alabileceği minimum değere ulaşmış demektir. Sıcaklığın sabitlenmesi durumunda mikrodenetleyici, en son ölçülen gerilim değerini  $V_{max}$  ve akım değerini de  $I_{max}$  ve  $I_o$  olarak hafızaya kaydeder. Röleye bırakma komutu gönderilir ve röle modüle uygulanan akımı kestikten kısa bir süre



(500 ms) sonra modül uçlarında termoelektrik modül tarafından oluşturulan emk değerini ölçer ve  $E_{max}$  olarak daha sonraki hesaplamalarda kullanılmak üzere hafızaya kaydeder. Ayarlar menüsünde belirtilen süre boyunca emk ölçümüne devam eder ve bu süre boyunca sıcaklık ve emk değerlerini ölçüp hafıza entegre devre elemanına kaydeder.

Hafıza entegre devre elemanlarına değer alma işlemi süresince kaydedilen bu veriler istenirse sonradan incelenebilir. Bu verileri görebilmek için ana menüden \* tuşuna basılarak Şekil 4.17.'de görülen kayıt göster menüsü çalıştırılır. Bu menüde, kayıt no, kayıt zamanı, gerilim, akım ve ısınan yüzey sıcaklık değerleri sütunlar halinde görülebilmektedir. Her bir ekranda toplam 10 kayıt görülebilmektedir. Ekranın alt bölümünde görülen tuşlar kullanılarak diğer kayıtlar da görülebilir.

Kaydedilen bu değerler ana menüde # tuşu kullanılarak RS232 arabirimi üzerinden istendiği zaman bilgisayar ortamına aktarılabilir.

| ***** Kayıt Göster ***** |       |         |      |          |
|--------------------------|-------|---------|------|----------|
| No                       | Zaman | Gerilim | Akım | Sıcaklık |
| 0000                     | 00:00 | 15.30   | 3.84 | 25.40    |
| 0001                     | 00:01 | 15.34   | 3.80 | 27.71    |
| 0002                     | 00:02 | 15.35   | 3.78 | 29.83    |
| 0003                     | 00:03 | 15.36   | 3.75 | 30.41    |
| 0004                     | 00:04 | 15.37   | 3.72 | 31.10    |
| 0005                     | 00:05 | 15.37   | 3.69 | 32.03    |
| 0006                     | 00:06 | 15.38   | 3.67 | 32.97    |
| 0007                     | 00:07 | 15.39   | 3.66 | 33.55    |
| 0008                     | 00:08 | 15.40   | 3.66 | 34.24    |
| 0009                     | 00:09 | 15.40   | 3.64 | 34.71    |

-----

A = Aşağı B = Yukarı C = İleri D = Geri \* = Vazgeç

Şekil 4.17. Kayıt göster menüsü

TE modül testinin ikinci aşamasında, TE modüle ait anlık değer ölçümleri yapılır. Bunun için, ana menüde A tuşuna basılarak Şekil 4.18.'de görülen Test Menüsü çalıştırılır. Mikrodenetleyici, röleye çekme komutu gönderir ve modüle akım uygular. İstenilen bir anda B tuşuna basılarak, o andaki  $I$  akımı, modülün ısınan yüzey sıcaklık değeri  $T_{SI}$  ve röle yardımıyla modüle uygulanan akım kesilerek modül uçlarında oluşan emk değeri  $E$  ölçülür. Ölçülen bu değerler daha önceden ölçülen  $V_{max}$ ,  $I_{max}$  ve  $E_{max}$  değerleriyle birlikte, mikrodenetleyici tarafından eşitliklerde yerlerine konularak, TE modülün, B tuşuna basıldığı anda soğuk yüzeyinde oluşturduğu soğukluk enerjisi miktarı ( $Q_{SO}$ ), güç kaynağından tükettiği güç miktarı ( $P$ ), verimi (Coefficient of Performance -  $COP$ ), soğuk yüzeyin sıcaklık değeri ( $T_{SO}$ ) ve kalite faktörü (figure of merit -  $Z$ ) değerleri hesaplanır ve ekranın sağ tarafında gösterilir. Bu işlem \* tuşuna basıp ana menüye dönene kadar istenilen sayıda tekrarlanabilir.

| *****                               |   | Test Menüsü |                 | *****      |           |
|-------------------------------------|---|-------------|-----------------|------------|-----------|
| V=15.43 V                           | : | I=3.64 A    | :               | T=29.73 °C | :         |
| 1) Vmax                             | = | 15.43V      | Qc              | =          | 3.88W     |
| 2) Imax                             | = | 3.64A       | COP             | =          | 0.07      |
| 3) Emax                             | = | 3.60V       | Tc              | =          | - 33.20°C |
| 4) Io                               | = | 3.64A       | Z               | =          | 2.63E-3   |
| 5) Th                               | = | 29.73°C     | P               | =          | 54.00W    |
| 6) E                                | = | 3.20V       |                 |            |           |
| 7) I                                | = | 3.62V       |                 |            |           |
| -----                               |   |             |                 |            |           |
| Test süresi = 03 : 05               |   |             |                 |            |           |
| B = E, I, T <sub>SI</sub> değeri al |   |             | * = Testten çık |            |           |

Şekil 4.18. Test menüsü

Ölçülen değerlerin sabit olabilmesi için TE test sistemi tarafından sürekli olarak ölçülen modülün ısınan yüzey sıcaklığının sabitlenmesini (TE modülün kararlı

Çalışma durumu) beklemek gerekmektedir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre, TE modülün kararlı çalışma durumuna gelmesi yaklaşık 3 dakikalık zaman almaktadır.

## 5. GERÇEKLEŞTİRİLEN MİKRODENETLEYİCİ KONTROLLÜ TE TEST SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ ve UYGULAMASI

Termoelektrik test sisteminin performansının belirlenmesi için iki farklı sistem üzerinde performans ve doğruluk analiz çalışmaları yapılmış, sonuçları sunulmuştur.

### 5.1. Termoelektrik Test Sisteminin Performansının Belirlenmesi

Bu çalışmada geliştirilen mikrodeneleyici kontrollü yeni test sisteminin performansını belirlemek amacıyla, yeni test sisteminin akım, gerilim, emk ve sıcaklık ölçebilme yeteneği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. TE test sistemiyle ölçülen değerlerin standart ölçüm sisteminin ölçtüğü değerlerle karşılaştırılması ( $V_{max}=15,4V - E_{max}=3,6V$ )

| No | $Q_{SO}$ (W) | $I$ (A) | $I^*$ (A) | $E$ (V) | $E^*$ (V) | $T_{SI}$ (°C) | $T_{SI}^*$ (°C) | $T_{SO}$ (°C) | $T_{SO}^*$ (°C) |
|----|--------------|---------|-----------|---------|-----------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 1  | 3,88         | 3,68    | 3,65      | 3,20    | 3,23      | 29,73         | 30,40           | -33,20        | -31,70          |
| 2  | 5,82         | 3,67    | 3,64      | 3,00    | 3,03      | 31,18         | 31,24           | -28,24        | -26,90          |
| 3  | 6,78         | 3,66    | 3,62      | 2,90    | 2,91      | 31,50         | 31,71           | -25,74        | -24,40          |
| 4  | 8,70         | 3,64    | 3,61      | 2,70    | 2,70      | 31,94         | 32,30           | -21,26        | -19,98          |
| 5  | 10,64        | 3,64    | 3,61      | 2,50    | 2,51      | 32,32         | 32,80           | -17,26        | -16,10          |
| 6  | 11,58        | 3,62    | 3,60      | 2,40    | 2,40      | 33,00         | 33,30           | -14,09        | -12,96          |
| 7  | 12,54        | 3,62    | 3,60      | 2,30    | 2,30      | 33,20         | 33,93           | -12,53        | -11,47          |
| 8  | 15,42        | 3,61    | 3,59      | 2,00    | 2,01      | 34,00         | 34,40           | -5,87         | -4,59           |
| 9  | 16,34        | 3,59    | 3,58      | 1,90    | 1,90      | 35,20         | 34,89           | -2,42         | -1,26           |
| 10 | 17,31        | 3,59    | 3,58      | 1,80    | 1,80      | 35,80         | 35,28           | -0,29         | 0,80            |
| 11 | 19,23        | 3,59    | 3,58      | 1,60    | 1,60      | 35,80         | 35,66           | 3,72          | 4,85            |
| 12 | 21,13        | 3,58    | 3,57      | 1,40    | 1,40      | 36,00         | 35,86           | 7,91          | 8,20            |
| 13 | 22,09        | 3,58    | 3,57      | 1,30    | 1,30      | 35,80         | 36,00           | 9,73          | 10,12           |
| 14 | 23,95        | 3,56    | 3,55      | 1,10    | 1,10      | 35,90         | 36,10           | 13,84         | 14,00           |
| 15 | 25,87        | 3,56    | 3,55      | 0,90    | 0,91      | 36,20         | 36,24           | 18,13         | 18,35           |
| 16 | 26,83        | 3,56    | 3,55      | 0,80    | 0,81      | 36,80         | 36,63           | 20,71         | 20,80           |
| 17 | 28,68        | 3,54    | 3,53      | 0,60    | 0,60      | 37,00         | 36,72           | 24,92         | 24,94           |
| 18 | 30,60        | 3,54    | 3,53      | 0,40    | 0,40      | 37,10         | 36,80           | 29,05         | 29,10           |
| 19 | 32,51        | 3,54    | 3,53      | 0,20    | 0,20      | 37,30         | 37,11           | 33,27         | 33,30           |
| 20 | 33,43        | 3,53    | 3,52      | 0,10    | 0,11      | 37,50         | 37,11           | 35,48         | 35,60           |
| 21 | 34,38        | 3,53    | 3,52      | 0,00    | 0,01      | 37,70         | 37,49           | 37,70         | 37,70           |

$Q_{SO}$  : Modüle uygulanan ısı yük miktarı

$I$  : Modülün kaynaktan çektiği akımın test sistemi tarafından ölçülen değeri

$I^*$  : Modülün kaynaktan çektiği akımın Multimetre ile ölçülen değeri

$T_{SO}$  : Test sistemi tarafından hesaplanan soğuk yüzey sıcaklığı

$T_{SO}^*$  : Dijital termometre ile ölçülen soğuk yüzey sıcaklığı

$T_{SI}$  : Test sistemi tarafından ölçülen sıcak yüzey sıcaklığı

$T_{SI}^*$  : Dijital termometre ile ölçülen sıcak yüzey sıcaklığı

Testler, 25°C'lik laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Sistem çalıştırıldıktan sonra parametrelerin dengelenmesi için 20 dakika beklenmiş daha sonra akım, emk, sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Bütün bu parametrelerin doğruluğunu kontrol etmek için ölçümler bağımsız cihazlarla da yapılmıştır. Akım ve gerilim ölçümleri için Fluke-45 model multimetreler kullanılırken sıcaklık ölçümü için ise, CIE-307 model dijital termometre kullanılmıştır. Ayrıca sıcaklık ve gerilim ölçümleri aynı zamanda ve aynı noktalardan Hewlett Packard Model Agilent 34970A veri toplama sistemiyle de ölçülmüştür.

Çizelge 5.1.'deki verilere göre, akım ölçümünde test sistemi ve Fluke-45 multimetre ile yapılan akım ölçüm sonuçlarının farklarının ortalaması 0,05 A olmuştur. Test sistemiyle ölçülen emk değeri ile soğuk ve sıcak yüzey sıcaklık değerleri ile Agilent 34970A cihazıyla ölçülen değerlerin farklarının ortalamasına bakıldığında emk için bu değer 0,2 V, sıcak yüzey sıcaklığı için 0,3 °C iken soğuk yüzey sıcaklık değeri için 0,70 °C olmuştur.

TE test sisteminin akım, gerilim ve sıcaklık ölçümündeki hassasiyeti sırasıyla 0,01 A, 0,01 V ve 0,01 °C'dır.

## **5.2. TE Test Sistemi Uygulamaları**

Bu çalışmada gerçekleştirilen mikrodenetleyici kontrollü TE test sistemini kullanarak standart bir termoelektrik modül ve rat termohipoterm cihazının tüm ısıl parametreleri araştırılmıştır.

### **5.2.1. Yeni test sistemiyle standart modülün araştırılması**

Bu çalışmada geliştirilen mikrodenetleyici kontrollü yeni test sisteminin performansını belirlemek üzere bir dizi deney yapılmıştır. Deneyde Melcor firması tarafından üretilen ve katalog değerleri bilinen iki adet termoelektrik modül (CP 1.4-127-10L) kullanılmıştır [18]. Test işlemine başlanabilmesi için modüller test düzeneğine bağlanmıştır (Bkz. Şekil 4.3.). TE modüllerden bir

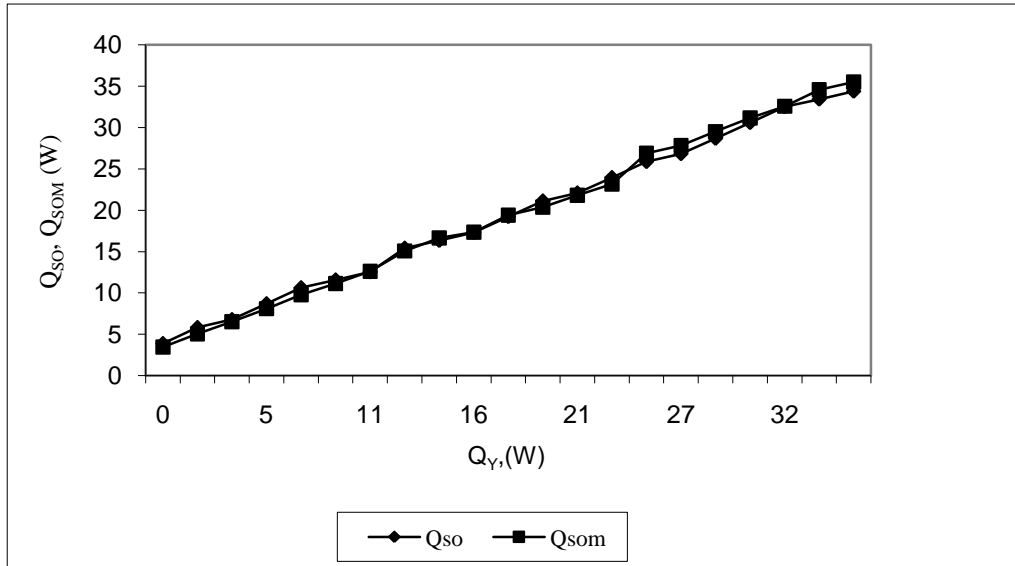
tanesi, termal yükü sağlayan ısıtıcının ürettiği ısının, her iki TE modül üzerine eşit miktarda dağılmasını sağlayacak şekilde soğutucu olarak bağlanmıştır. Diğer TE modül ise akım, gerilim ve sıcaklık değerleri sürekli olarak sistem tarafından izlenen asıl test elemanı olarak bağlanmıştır. Her iki modüle de aynı akım ve gerilimler uygulanmıştır.

Isıtıcıya ayarlı bir DC güç kaynağı üzerinden gerilim uygulanmıştır. Isıtıcı gücünün belirlenebilmesi için gerilim ve akım değerleri iki adet Philips model Fluke 45 ölçü aleti ile sürekli olarak ölçülmüştür. Her iki modüle uygulanan gerilim ve akım değerleri de, test cihazının yanı sıra, aynı model ölçü aletleriyle ayrı ayrı ve sürekli olarak ölçülmüştür. Test edilen TE modülün ısınan yüzey sıcaklığı, test cihazının yanı sıra, soğuyan yüzey sıcaklığıyla beraber Hewlett Packard Model Agilent 34970A veri toplama sistemiyle ölçülmüştür. Bu değerler test cihazının yaptığı ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Yüksüz durum da dahil olmak üzere 21 farklı ölçüm yapılmıştır. Her bir ölçüm en az 5 defa tekrarlanmış ve bunların ortalaması alınmıştır.

Gerçekleştirilen mikrodenetleyici kontrollü test sisteminin ölçme yeteneğini test edebilmek için Melcor tarafından üretilen (CP 1.4-127-10L) modüle ait dinamik çıkış parametreleri ölçülmüş ve Melcor firması tarafından verilen değerlerle kıyaslanmıştır. Modüle uygulanan ısı yük sıfır tutularak  $T_{SO}=T_{SOmin}$  şartına karşı gelen  $V_{max}$ ,  $E_{max}$  ve  $I_{max}$  parametreleri tespit edilmiştir. Bu değerler, mikrodenetleyici tarafından, TE modülün giriş parametreleri olarak hafızaya kaydedilmiştir. Modül çalışmasına devam ederken modüle uygulanan ısı yük artırılarak ölçümlere devam edilmiştir. Her bir uygulanan yük için  $T_{SOmin}$  şartı sağlandıktan sonra modülün emk,  $I$  ve  $T_{SI}$  değerleri otomatik olarak ölçülüp modülün dinamik çıkış parametreleri olan  $Q_{SO}$ ,  $T_{SO}$ ,  $P$ ,  $COP$  ve  $Z$  değerleri yine mikrodenetleyici tarafından otomatik olarak hesaplanmış ve kaydedilmiştir. Ayrıca, Melcor firmasının sağlanan eşitlikler kullanılarak modüle uygulanan her bir ısı yük değeri için termoelektrik modülün katalog parametreleri kullanılarak tüm çıkış parametreleri

hesaplanmış ve cihazla elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Bu hesaplamalarda Eş. 2.25 – Eş. 2.39 denklemleri kullanılmıştır.

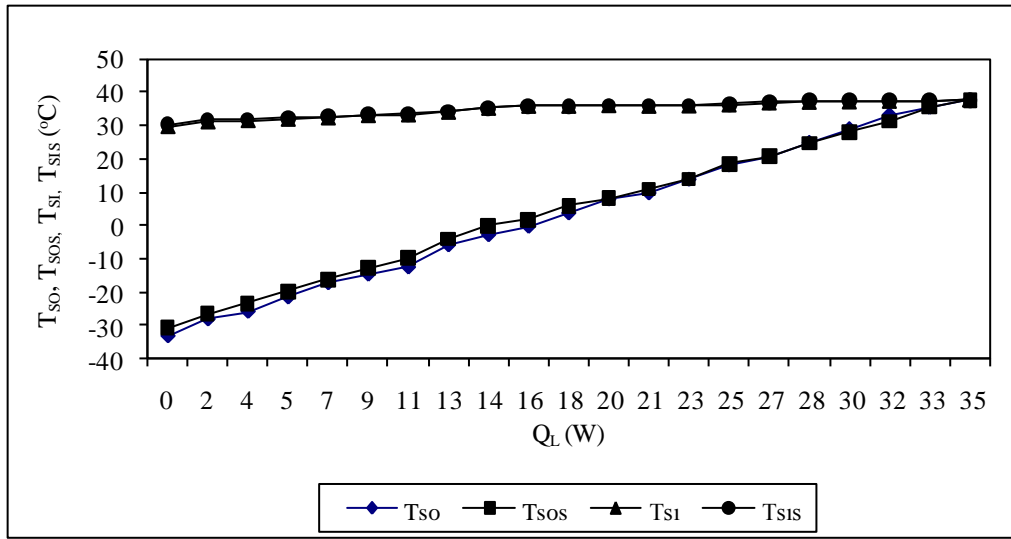
Şekil 5.1.'de cihazla ölçülen  $Q_{SO}$  ve katalog bilgilerine dayanarak hesaplanan  $Q_{SOM}$ 'nin modüle uygulanan  $Q_Y$  ısı yüküne göre değişimleri bir grafik olarak verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi bu üç parametre birbirine oldukça yakın olmuştur ve aralarındaki farkların ortalaması 0.7 Watt'ı geçmemiştir.



Şekil 5.1. Modül yükünün iki farklı sistemle ölçüm sonuçları

Grafikten de görüldüğü gibi modüle uygulanan ısı yükün sıfır olmasına karşın ölçülen ve hesaplanan yük değerleri sıfırdan farklıdır. Bunun nedeni, tam ideal bir ısı yalıtım yapılamamış olmasıdır. Geliştirilen test sistemi için bu rakam 3,46 Watt civarında olmuştur dolayısıyla modüle gelen kontrolsüz ısı yük miktarının 3,46 Watt olduğu anlaşılmaktadır. Sistem bir vakum ortamına konulup yalıtım iyileştirilerek, kontrolsüz ısı yük miktarı daha da düşürülebilir ancak hiçbir zaman sıfır olmayacaktır. Diğer taraftan geliştirilen ölçüm sistemi yalıtım kusurlarından kaynaklanan kontrolsüz ısı yük miktarını da ölçebilmektedir.

Mikrodenetleyici kontrollü test sistemiyle ölçülen sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları Hewlett Packard Model Agilent 34970A veri toplama cihazıyla ölçülmüş ve ölçüm sonuçları Şekil 5.2. de gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi yeni test sistemiyle yapılan ölçüm değerleriyle veri toplama cihazının ölçtüğü değerler birbirine yakın olmuştur.

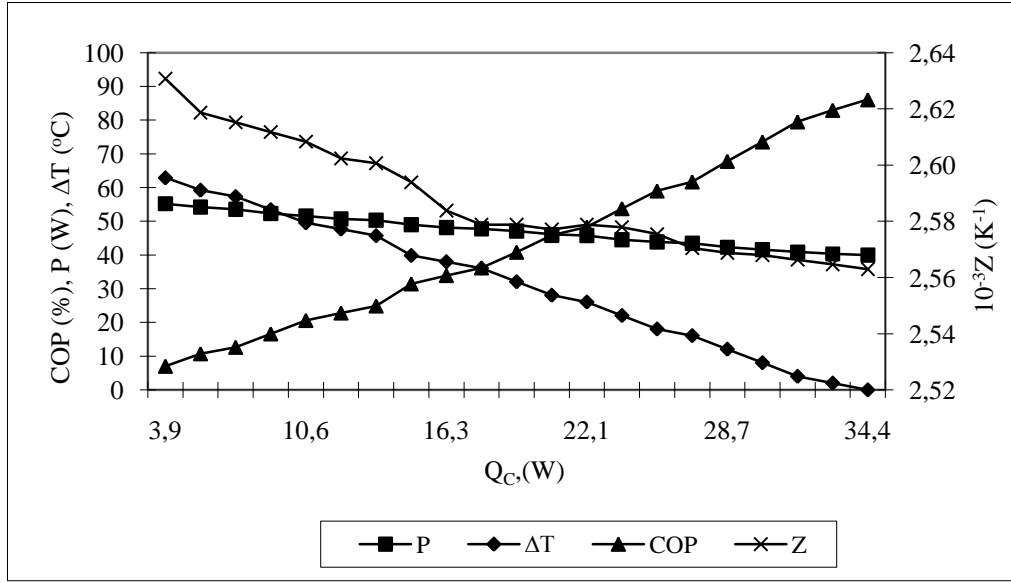


Şekil 5.2. Farklı ısı yükleri için sıcaklık ölçüm kalibrasyon sonuçları

Şekil 5.3.'de mikrodenetleyici kontrollü test sistemini kullanarak, çalışan modülün tüm parametrelerinin ölçüm sonuçları verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi geliştirilen mikrodenetleyicili test sistemi farklı yükler için modülün tüm parametrelerinin doğrudan ölçülmesini sağlamaktadır.

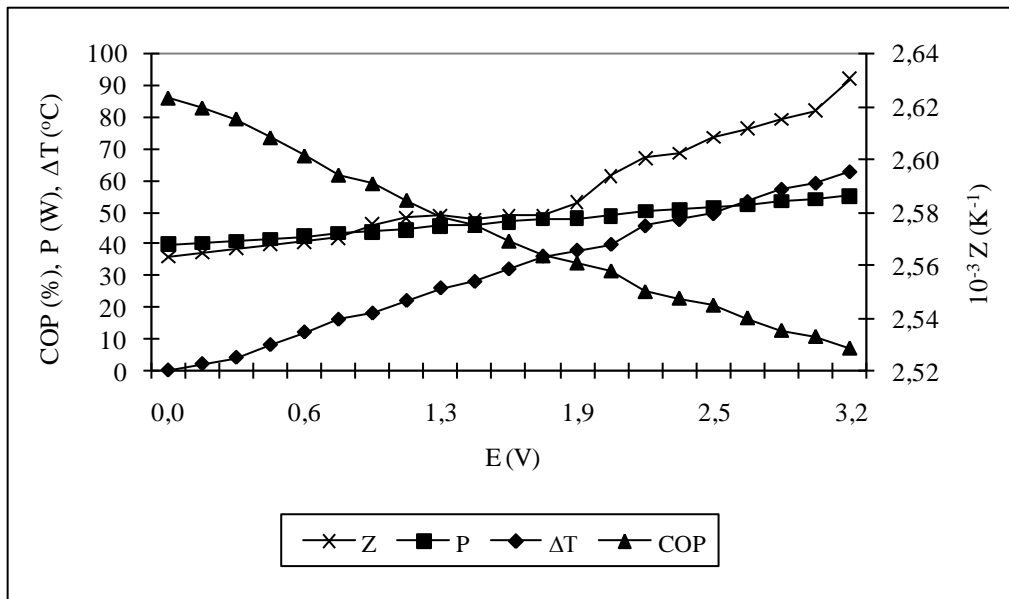
Uygulanan ısı yük miktarı arttıkça  $\Delta T$  değeri 62,9, °C den 0 °C ye düşmüştür. Bununla birlikte  $E$  değeri  $E_{max}$  (3,6 V) değerinden 0 V'a kadar düşmüştür. TE modülün tükettiği güç miktarı çok az miktarda azalmışsa da, Modülün performansını gösteren COP değeri ise uygulanan yük miktarıyla orantılı olarak artış göstermiş ve %86'lara ulaşmıştır. Modülün kalite katsayısı Z değerinde ise ihmal edilebilecek kadar küçük bir değişim gözlemlenmiştir.





Şekil 5.3. TE test sistemiyle modül parametreleri ölçüm sonuçları

Şekil 5.4.'de mikrodenetleyicili TE test sisteminin çalışmasının temel prensibini oluşturan emk'nin modül parametreleri üzerindeki etkisi grafiksel olarak görülmektedir. Grafikten de anlaşıldığı üzere TE modül parametrelerinin tamamı modülün  $E$  değeri ile doğrudan ilişkilidir.



Şekil 5.4. Çalışan TE modül parametrelerinin emk'ya göre değişimi

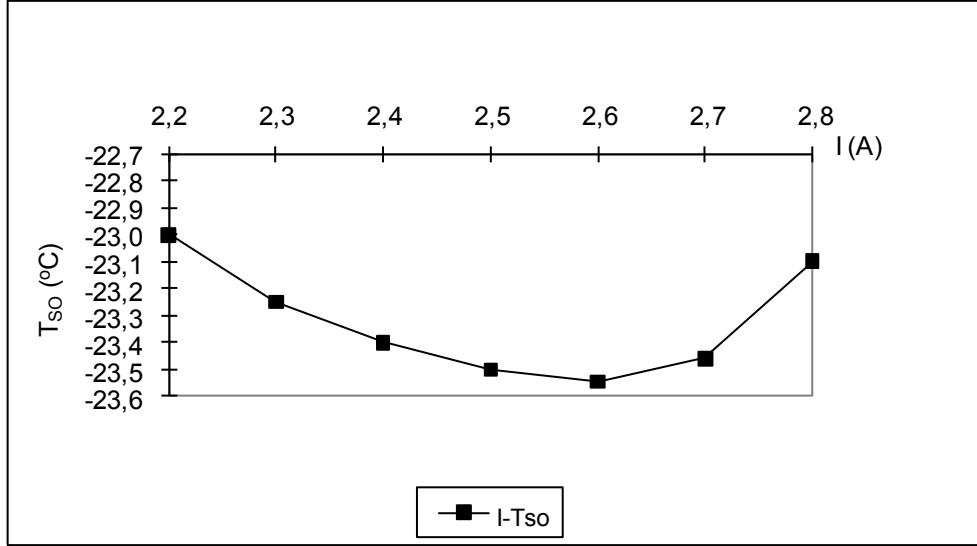
### 5.2.2. Yeni test sistemiyle Rat termohipoterm cihazının incelenmesi

Dünyada trafik kazaları ve kaza sonucunda insanların ölmesi ve sakatlanması büyük bir sorun oluşturmaktadır. Trafik kazalarında en çok beyin travmaları ve bu travmalar sonrası sakatlıklar yer almaktadır. Bunun içindir ki, dünya nörolojisinde travma sonrası beyin tedavi ve korunma yöntemleri üzerinde geniş çapta araştırmalar yapılmaktadır. Son yıllarda tüm dünyada ve kısıtlı olarak da ülkemizde travma sonrası tedavide serebral hipotermiya kullanılmaktadır. Hipotermiya ve özellikle lokal serebral hipotermiya ile beynin korunabilmesi, beynin sıcaklığı 20°C ve 30°C kadar düşürüldüğünde hiç bir komplikasyon oluşmaması ve beynin bir alt fonksiyonel rejime geçerek travma sonrası ikinci darbe denilen ölümcül etkilerden korunması ile mümkün olmaktadır.

Rat'lar üzerinde hipotermiya deneyleri yapmak üzere tasarlanan Rat Termohipoterm cihazı [51-53] içerisinde bir adet termoelektrik modül bulunmaktadır. Rat termohipoterm cihazı içerisindeki, üretici firması ve modeli bilinmeyen termoelektrik modüle ait parametrelerin tespit edilebilmesi için bir dizi deneyler yapılmıştır.

Rat termohipoterm sistemi içerisindeki modülün ısınan yüzeyinin soğutulması için termoelektrik test sisteminde olduğu gibi su devir daimli bir soğutucu kullanılmaktadır. Termoelektrik modülün temel parametrelerini belirlemek üzere, termoelektrik modül sistem içerisinde sabit tutularak dış ortam ısı yükünden tamamen yalıtılabilmesi için 5 cm kalınlığında poliüretan köpükle kaplanmıştır. Termoelektrik modülün soğuyan yüzeyinin alabileceği minimum sıcaklık değerini tespit edebilmek için modül uçlarına uygulanan akım değeri 2,2 Amperden başlayarak 0,1 Amperlik aralıklarla 2,8 Ampere kadar arttırılmıştır. Şekil 5.5.'te görüldüğü gibi sıcaklık, 2,6 Amperde minimum değerini almakta ve daha sonrasında tekrar yükselmektedir. Geliştirilen yöntemin temel prensipleri gereği  $T_{so}$ 'nun minimum değerini alması için termoelektrik modüle uygulanan gerilim değeri  $V_{max}$  olarak, modül tarafından

güç kaynağından çekilen akım değeri  $I_{max}$  olarak ve modüle uygulanan akım kesildiği anda oluşan emk değeri de  $E_{max}$  olarak tespit edilmiştir [21, 22].



Şekil 5.5. Modüle uygulanan akıma göre soğuyan yüzey sıcaklık değerleri

Termoelektrik modüle ait temel parametreler belirlendikten sonra modül etrafındaki poliüretan köpük çıkartılmıştır. Test sistemi çalıştırılmış ve Çizelge 5.2.'deki değerler ölçülmüştür. Elde edilen veriler ışığında bu sistemde bulunan TE modülün 14 V, 2,6 A'lik akım ile ısınan yüzey sıcaklığı 34,7 °C'de sabit tutulmak kaydı ile -7,05 °C sıcaklık ve 9,43 W ısı enerjisi oluşturabilmektedir. Güç kaynağından 34,29 W enerji çekmekte ve %28 verimle çalışmaktadır. Modülün kalite katsayısı  $2,50 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  olarak ölçülmüştür.

Çizelge 5.2. Test sistemiyle ölçülen, Rat termohipoterm cihazı parametreleri

| $V_{max}$<br>(Volt) | $I$<br>(Amp.) | $T_{so}$<br>(°C) | $T_{si}$<br>(°C) | $E_{max}$<br>(Volt) | $E$<br>(Volt) | $Q_c$<br>(W) | $P$<br>(W) | $COP$<br>(%) | $Z$<br>(* $10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ) |
|---------------------|---------------|------------------|------------------|---------------------|---------------|--------------|------------|--------------|--------------------------------------|
| 14,00               | 2,6           | -7,05            | 34,70            | 3,20                | 1,90          | 9,43         | 34,29      | 28           | 2,50                                 |

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Termoelektrik sistemler, uzay çalışmalarından tıp bilimine kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Termoelektrik modüllerin diğer sistemlere olan üstünlükleri düşünülecek olursa önümüzdeki yıllarda kullanım alanlarının daha da artacağı açıktır. Bu kadar yaygın kullanım alanına sahip termoelektrik modüllerin kolayca test edilebilmeleri için gerçekleştirilen termoelektrik test sistemi; mikrodenetleyici kontrollü, termokupllu, LCD göstergeli, hafızalı, bilgisayar bağlantılı, taşınabilir, pratik ve güvenilir bir sistem olup, her çeşit termoelektrik modülün testini 5-10 dakikalık bir süre içerisinde kolayca yapabilen bir sistemdir. Melcor firması tarafında üretilen ve bütün parametreleri bilinen standart termoelektrik modül üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre termoelektrik test sisteminin güvenilir bir sistem olduğu tespit edilmiştir.

Mikrodenetleyici kontrollü termoelektrik test sisteminin çalışma prensibi, çalışan bir termoelektrik modülün emk'sının ölçülmesine dayalı bir sistemdir. Buna göre bir modülün ölçülen parametreleri gerçek bir modülün sahip olduğu parametrelerdir. Mevcut olan termoelektrik modüllerin test sistemlerinden farklı olarak bu sistemle elde edilen sonuçlar daha gerçekçidir. Diğer taraftan bir modülün test edilmesi problemi kullanılan yöntem ve gerçekleştirilen cihaz sayesinde daha pratik bir hâl almıştır.

Melcor firmasının ürettiği standart termoelektrik modülün parametrelerinin araştırılması ile elde edilen sonuçlar, Şekil 5.1.- Şekil 5.4.'de görüldüğü gibi klasik yöntemlerle elde edilen sonuçlara yakın olmuştur. Örneğin, mikrodenetleyici kontrollü sistemle ölçülen ısı yükü ile Melcor firmasının formülleri ile hesaplanan değer arasındaki fark  $0,7W$ 'ı aşmamaktadır. Yeni test sistemiyle ölçülen sıcaklıklara gelince, bu sıcaklık değerleriyle kalibrasyon cihazıyla yapılan ölçümler arasındaki fark  $0,5^{\circ}C$ 'yi aşmamaktadır.

Şekil 5.4.'de de görüldüğü üzere, standart modülün parametrelerinin üretilen emk'ya göre lineer değiştiği yapılan ölçümlerle teyit edilmiştir.

Piyasada satılan birçok termoelektrik modül üzerinde üretici firma adı yada modülün model numarası yazmamaktadır. Geliştirilen test sistemi, üretici firması, markası ve modeli bilinmeyen modüllerin test edilmesi için de kullanılabilir bir cihazdır. Model numarası belli olmayan bir modülün kullanıldığı Rat termohipoterm cihazı içerisinde kullanılan termoelektrik modül, geliştirilen termoelektrik test cihazıyla test edilmiş ve sonuçlar Bölüm beşte verilmiştir. Buna göre emk'nın ölçülmesine dayalı sistemlerin mevcut sistemlere bir alternatif teşkil ettiği anlaşılmıştır.

Test edilecek modülün bir vakum ortamına yerleştirilmesi ve/veya modülün ısınan yüzeyinde ortaya çıkan ısıyı dışarı atmak için kullanılan devir daim sistemindeki suyun kontrollü olarak ek bir sistemle soğutulması alınacak sonuçlarda daha da iyileşmeler sağlayacaktır. Ayrıca Termoelektrik test sistemine ve/veya bu sistemle elde edilen ölçüm sonuçlarına Yapay Sinir Ağları (YSA) uygulanmasıyla sistem daha da geliştirilebilir ve kullanımı pratik hale getirilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Andersen, J. R., "Thermoelectric air conditioner for submarines", ***Adv Energy Conv.***, 2: 241-244 (1962).
2. Mei, V. C., Chen, F. C., Mathiprakasam, B., "Comparison of thermoelectric and vapor cycle technologies for groundwater heat pump application", ***ASME J Solar Energy Eng.***, 111: 353-357 (1989).
3. McNaughton, A. G., "Commercially available generators", CRC Handbook of Thermoelectrics, D. M. Rowe, ***CRC Pres. Inc.***, Florida, 459-469 (1995).
4. Sloman, A. W., Buggs, P., Molley, J., Stewart, D., "A microcontroller-based driver to stabilize the temperature of an optical stage to within 1 mK in the range 4-38 °C, using a peltier heat pump and a thermistor sensor", ***Measurement Science and Technology***, 7: 1653-1664 (1996).
5. Min, G., Rowe, D. M., "Improved model for calculating the coefficient of performance of a peltier module", ***Energy Conversion and Management***, 41: 163-171 (2000).
6. Xuan, X. C., Ng, K. C., Yap, C., Chua, H. T., "A general model for studying effects of interface layers on thermoelectric devices performance", ***International Journal of Heat and Mass Transfer***, 45: 5159-5170 (2002).
7. Huang, B. J., Chin, C. J., Duang, C. L., "A design method of thermoelectric cooler", ***International Journal of Refrigeration***, 23: 208-218 (2000).
8. Crueq, A. and Degols, L., "A new method for the measurement of the thermoelectric power of sintered semiconductors", ***Journal of Physics E: Scientific Instruments***, 5: 81-83 (1972).
9. Waclawek, W., Zabkowska, M., "Apparatus for the measurement of thermoelectrical properties", ***Journal of Physics E: Scientific Instruments***, 14: 618-620 (1981).

10. Goldsmid, H. J., "A simple technique for determining the Seebeck coefficient of thermoelectric materials", ***Journal of Physics E: Scientific Instruments***, 19: 921-922 (1986).
11. Summasekera, G. U., Grigorian, L., Eklund, P. C., "Low-temperature thermoelectrical power measurement using analogue subtraction", ***Measurement Science and Technology***, 11: 273-277 (2000).
12. Min, G., Rowe, D. M., "A novel principle allowing rapid and accurate measurement of a dimensionless thermoelectric figure of merit", ***Measurement Science and Technology***, 12: 1261-1262 (2001).
13. Wu, Y., Wang, Z., He, Y., "A new method for calculating the thermoelectric efficiency", ***Chin. Phys. Lett.***, 21: 1848-1850 (2004).
14. Ritzer, T. M., Lau, P. G., Bogard, A. D., "A critical evaluation of today's thermoelectric modules", ***XVI. International Conference on Thermoelectrics***, Dresden, 619-623 (1997).
15. Buist, R. J., "Methodology for testing thermoelectric materials and devices", CRC Handbook of Thermoelectrics, D. M. Rowe, ***CRC Pres. Inc.***, Florida, 189-209 (1995).
16. Xuan, X. C., "Investigation of thermal contact effect on thermoelectric coolers", ***Energy Conversion and Management***, 44: 399-410 (2003).
17. Taylor, P. J., Jesser, W. A., Rosi, F. D., Derzko, Z., "A model for the non-steady-state temperature behaviour of thermoelectric cooling semiconductor device", ***Semiconductor Sci. Technol.***, 12: 443 - 447 (1997).
18. İnternet: "MELCOR firmasına ait internet sayfası"  
<http://www.melcor.com/formula.html>, (2009).
19. Ciylan, B., Savaş, Y., Ahıska, R., "Termoelektrik modüller için mikrodenetleyici kontrollü test sistemi", ***III. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu***, Ankara, 155-164 (2003).

20. Ahıska, R., Ciylan, B., Savaş, Y., Güler, İ., "Standart termoelektrik modülün Z parametresinin ölçülmesi için yeni yöntem ve yeni sistem", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 19(4): 467 - 473 (2004).
21. B. Ciylan, S. Yılmaz, "Design of a thermoelectric module test system using a novel test method" **International Journal of Thermal Sciences**, 46, 717–725, (2007).
22. H. Demirel, B. Ciylan, B. Erkal, S. Yılmaz "Design of a universal thermoelectric module test system and its use in the testing of rat brain thermoelectric hypothermia apparatus" **IEE Proc. Science, Measurement & Technology**, 1(3): 160–165, (2007).
23. Bhandari, C. M., "Thermoelectric transport theory", CRC Handbook of Thermoelectrics, D. M. Rowe, **CRC Pres. Inc.**, Florida, 27-40 (1995).
24. Ahıska, R., Güler, N. F., Savaş, Y., "Termoelektrik soğutucusunun özelliklerinin araştırılması", **Politeknik dergisi**, 2(3): 89-94 (1999).
25. Dişlitaş, S., Ahıska, R., "Mikrodenetleyici kontrollü jeotermal termoelektrik jeneratör", **III. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu**, Ankara, 142-154 (2003).
26. Dişlitaş, S., Ahıska, R., "Jeotermal termoelektrik jeneratör", **Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu**, Kayseri, 305-312, 2003.
27. Harman, T. C., "Special techniques for measurement of thermoelectric properties", **J. Appl. Phys.**, 29: 1373-1379 (1958).
28. Pollock, D. D., "Thermoelectric phenomena", CRC Handbook of Thermoelectrics, D. M. Rowe, **CRC Pres. Inc.**, Florida, 7-17 (1995).
29. Nishida, I. A., "Measurement of electrical properties", CRC Handbook of Thermoelectrics, D. M. Rowe, **CRC Pres. Inc.**, Florida, 157-164 (1995).
30. Mirkovich, V. V., "Comparative method and choice of standards for thermal conductivity determination", **J. Am. Ceramic Soc.**, 48: 387-392 (1965).



31. Taylor, R., "Measurement of thermal properties", CRC Handbook of Thermoelectrics, D. M. Rowe, **CRC Pres. Inc.**, Florida, 165-180 (1995).
32. Savvides, N., Goldsmid, H. J., "Measurement of thermal conductivity by a parallel flow sandwich technique using the peltier effect", **Journal of Physics E: Science Instruments**, 5: 553–554 (1972).
33. Delves, R. T., "The prospects for ettingshousen and peltier cooling at low temperatures", **British Journal of Applied Physics**, 13: 440–445 (1962).
34. Goldsmid, H. J., "Principles of thermoelectric devices", **British Journal of Applied Physics**, 11: 209–216 (1960).
35. Goldsmid, H. J., "Conversion efficiency and figure of merit", CRC Handbook of Thermoelectrics, D. M. Rowe, **CRC Pres. Inc.**, Florida, 19-25 (1995).
36. Woodbury, H. H., Levinson, L. M. and Lewandowski, R. S., "Z - meter", CRC Handbook of Thermoelectrics, D. M. Rowe, **CRC Pres. Inc.**, Florida, 181-188 (1995).
37. Heylen, A. E. D., "Figure of Merit determination of thermo-electric modules", **Energy Conversion**, 15: 65-70 (1975).
38. Bowley, A. E., Inst, A., Cowles, L. E. J., Williams, G. J., Goldsmid, H. J. and Inst, F., "Measurement of the figure of merit of a thermoelectric material", **Journal of Scientific Instruments**, 38: 433-435 (1961)
39. Cvahte, M., Strnad, J., "A thermoelectric experiment in support of the second law", **Eur. J. Phys.**, 9: 11–17 (1988).
40. Xuan, X. C., "Optimum design of a thermoelectric device", **Semiconductor Science and Technology**, 17: 114–119 (2002).
41. Mitrani D., Tome A., Salazar J., "Methodology for extracting thermoelectric module parameters", **IEEE Transactions on Instrumentation and measurement**, 54: 1548-1552 (2005).

42. Kin-ichi U, "Commercial peltier modules" CRC Handbook of Thermoelectrics, D. M. Rowe, **CRC Pres. Inc.**, Florida, 621-631(1995).
43. Lineykin, S., Ben-Yaakov, S., "Modeling and analysis of thermoelectric modules", **IEEE Transactions on Industry Application**, 43(2), 505-512 (2007)
44. Lineykin, S., Ben-Yaakov, S., "Spice compatible equivalent circuit of the energy conversion processes in thermoelectric modules", 23rd. **IEEE Israel Convention**, 346-349 (2004)
45. Grdal, O., "Algılayıcılar ve dntrcler 2. baskı", **Nobel Yayınevi**, Ankara, 415 – 454, (2000).
46. İnternet: "Analog Device firmasına ait internet sayfası"  
[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD594\\_595.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD594_595.pdf), (2009).
47. İnternet: "Analog Device firmasına ait internet sayfası"  
[http://www.analog.com/static/imported-files/Data\\_Sheets/OP07.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/Data_Sheets/OP07.pdf), (2009).
48. İnternet: "LEM Components firmasına ait internet sayfası"  
<http://www.lem.com/docs/products/la%2055-p%20sp23%20e.pdf>, (2009).
49. İnternet: "Analog Device firmasına ait internet sayfası"  
[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD7731.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7731.pdf), (2009).
50. İnternet: "Atmel firmasına ait internet sayfası"  
[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2467.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf), (2009).
51. Demirel, H., Ahıska, R., "Mikrodenetleyiciyle sıcaklık kontroll RAT termohipoterm sistemi", **III. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu**, Ankara, 165-173 (2003).

52. Ahıska, R., Demirel, H., Erkal, B., "Post traumatic protection of brain in rats using rat termohypotherm device", **Journal Of Science**, 17(4) : 29-38 (2004).
53. Ahıska, R., Demirel, H., Güler, İ., "Beynin deneysel travma sonrasında rat termohipotermiya cihazı ile korunması", **Sağlık Bilimleri Araştırma Dergisi (SBAD)**, 13–26 (2004).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : CİYLAN, Bünyamin  
 Uyuşu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 1971 Karaisalı-Adana  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (505) 319 21 11  
 Faks :  
 e-mail : [bciylan@gazi.edu.tr](mailto:bciylan@gazi.edu.tr).



### Eğitim

| Derece        | Eğitim Birimi                                   | Mezuniyet tarihi |
|---------------|---|------------------|
| Yüksek lisans | Gazi Üniversitesi /Elektronik-Bilg. Eğt. Bölümü | 1999             |
| Lisans        | Gazi Üniversitesi/ Elektronik-Bilg. Eğt. Bölümü | 1996             |
| Lise          | Karşıyaka End. Mes. Lisesi Elektronik Böl.      | 1989             |

### İş Deneyimi

| Yıl       | Yer                            | Görev    |
|-----------|--------------------------------|----------|
| 1998- --- | Gazi Üniversitesi              | Uzman    |
| 1996-1998 | MEB. Karşıyaka End. Mes Lisesi | Öğretmen |

### Yabancı Dil

İngilizce

## Yayınlar

### SCI İndekste Taranan Dergilerde Yayınlanmış Makaleler

1 - **B. Ciylan**, S. Yılmaz, "Design of a thermoelectric module test system using a novel test method" International Journal of Thermal Sciences, 46, pp. 717–725, (2007).

2- H. Demirel, **B. Ciylan**, B. Erkal, S. Yılmaz "Design of a Universal Thermoelectric Module Test System and Its Use In The Testing of Rat Brain Thermoelectric hypothermia Apparatus" IEE Proc. Science, Measurement & Technology, 1(3): 160–165, (2007).

### Ulusal Dergilerde Yayınlanmış Makaleler

1- SAVAŞ, Y., **CİYLAN, B.** ," Mikrodenetleyici Kontrollü Uzaktan Sıvı Seviye Kontrol Sistemi ", Politeknik Dergisi, Cilt:2, Sayı:3, S.49-58, (1999).

2- Ahıska, R., **CİYLAN, B.**, Savaş, Y., Güler, İ., "Standart termoelektrik modülün Z parametresinin ölçülmesi için yeni yöntem ve yeni sistem ", Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. , 19(4): 467 - 473 (2004).

### Uluslararası sempozyumda sunulan bildiriler

1- **CİYLAN, B.**, Savaş, Y., Ahıska, R., "Termoelektrik modüller için mikrodenetleyici kontrollü test sistemi", III. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu , Ankara, 155-164 (2003).

## Projeler

1- SAVAŞ, Y, **CİYLAN, B.**, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP 07/2002-31), Termoelektrik Modüllerin için Mikrodenetleyici Kontrollü Yeni Bir Test Sistemi (Araştırmacı).

2- LDV Projesi, TR/04/A/F/EX1-025 nolu, "Elektronik / Bilgisayar Teknolojilerindeki En Son Gelişmeler" isimli LdV projesinde yararlanıcı olarak 1 Şubat – 21 Şubat 2005 Tarihleri arası 3 hafta süreyle ALMANYA'nın Leipzig şehrinde bulunmuştur.

**Kitaplar**

- 1- TÜRK, M. S., KANSU, N, **CİYLAN, B.** , Masaüstü Yayıncılıkta Baskı Öncesi Hazırlık ve Photoshop Uygulamaları , Ankara, 2007.
- 2- Bay, Ö.F., Erdem, A.E., Demirel H., **CİYLAN B.** , Erkal, B., Temel Bilgi Teknolojileri Kullanımı, Ankara, 2002
- 3- SAVAŞ Y., DEMİREL H., **CİYLAN B.**, Lineer Tümlleşik Devreler ve Devre Deneyleri, Ankara, 2002.
- 4- GÜLER, İ, SAVAŞ, Y., CANAL, R., DEMİREL, H., **CİYLAN B.** , Elektronik Devre Elemanları ve Devre Deneyleri I, Ankara, 2001.

**Hobiler**

Bilgisayar teknolojileri, Futbol, Satranç, Yüzme.