

**TERMOELEKTRİK MODÜLLERİN FİZİKSEL
BOYUTLARININ SOĞUTMA KAPASİTESİ ÜZERİNE
ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
MODELLENMESİ**

Fikret GÜLDİKEN



T.C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TERMOELEKTRİK MODÜLLERİN FİZİKSEL BOYUTLARININ
SOĞUTMA KAPASİTESİ ÜZERİNE ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ**

Fikret GÜLDİKEN

Prof. Dr. Naim DEREBAŞI
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA 2011

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Fikret GÜLDİKEN tarafından hazırlanan “Termoelektrik Modüllerin Fiziksel Boyutlarının Soğutma Kapasitesi Üzerine Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi” adlı çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü FİZİK Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Naim DEREBAŞI

Başkan: Prof. Dr. Naim DEREBAŞI
Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU
Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Cengizhan MURATHAN
Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,
Matematik Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Kadri ARSLAN
Enstitü Müdürü

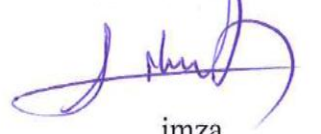
.../.../.....

U. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

30/06/2011



imza

Fikret GÜLDİKEN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TERMoeLEKTRİK MODÜLLERİN FİZİKSEL BOYUTLARININ SOĞUTMA KAPASİTESİ ÜZERİNE ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

Fikret GÜLDİKEN

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Naim DEREBAŞI

Bu tezde, termoelektrik soğutma sistemlerini oluşturan termoelementlerin fiziksel boyutlarının soğutma kapasitesi üzerine etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada dört farklı termoelektrik soğutucu model üzerinde durulmuştur. Solidworks programında çizilen modeller Ansys Workbench benzeşim programına aktarılarak burada termoelektrik analizleri yapılmıştır. Modelleri oluşturan termoelementlerin boyutları (x,y,z) sırasıyla (1cm,1cm,1cm), (1mm,1mm,1mm), (100µm, 100µm, 100µm) ve (1µm, 1µm, 1µm) dir. Analizler sonucunda, sıcak bölge ile soğuk bölge arasındaki sıcaklık farklarına ve uygulanan elektriksel akım değerlerine bağlı olarak, soğutma gücü (Q_c), harcanan elektriksel güç (W) ve performans katsayıları hesaplatılmıştır. Her bir model 15 adet termoçiftten meydana gelmiştir ve dolayısıyla etki ettikleri yüzey alanları farklıdır. Modeller arasında sağlıklı kıyaslamalar yapabilmek için analizler sonunda elde edilen tüm sonuçlar, etki yüzeyi 1cm^2 olacak şekilde normalize edilmiştir. Sonuç olarak, termoelement boyutları $1\mu\text{m}$ olan soğutucu modelinde diğerlerine kıyasla oldukça yüksek soğutma gücü gözlenirken, en düşük soğutma gücü ise boyutları 1cm olan modelde elde edilmiştir. Bu sonucun başlıca sebebi birim hacimdeki termoçift sayısıdır.

Anahtar Kelimeler: Termoelektrik, termoelektrik soğutucu, sonlu elemanlar yöntemi ile termoelektrik analiz, termoçift boyutları

2011, x+83 sayfa.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

MODELING OF THE EFFECT OF PHYSICAL DIMENSIONS OF THERMOELECTRIC MODULS ON THERMOELECTRIC COOLING CAPACITY USING FINITE ELEMENT METHOD

Fikret GULDIKEN

Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Naim DEREBASI

In this thesis, physical dimensions of thermoelements which create thermoelectric cooling systems, were investigated by using the finite element method. Four different thermoelectric cooling models were investigated in this work. The models, which were drawn in the Solidworks programme, were imported to the Ansys Workbench simulation programme and thermoelectric analysis was done here. Thermoelements' dimensions: (x,y,z) were chosen as: (1cm,1cm,1cm), (1mm,1mm,1mm), (100 μ m, 100 μ m, 100 μ m) and (1 μ m, 1 μ m, 1 μ m) respectively. As the outcomes of the analysis, cooling power (Q_c), electrical power consumption (W) and coefficient of performance (COP) values were computed depending on the temperature difference between the hot and the cold sides, and the electrical current values. Each model was composed of fifteen thermocouples and therefore, they affected different surface areas. All of the results were normalized to 1cm² surface area for a proper comparison between the models. In the end we conclude that, while the highest cooling power was observed in the model whose physical dimension was 1 μ m, the least cooling power was observed in the model whose physical dimension was 1cm. The main reason of this result is the number of thermocouples per volume.

Key words: Thermoelectric, thermoelectric cooler, thermoelectric analysis in finite element method, dimensions of thermocouples

2011, x + 83 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda, yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Naim DEREBAŞI'na çok teşekkür ederim. Aynı zamanda hiçbir konuda desteklerini esirgemeyen dostlarım Arş. Gör. M. Cüneyt HACIİSMAİLOĞLU'na, ve Osman ÇAYLAK'a çok teşekkür ederim

Son olarak, bugüne kadar maddi manevi desteğini esirgemeyen ve bu başarıyı elde etmemde en büyük katkı sahibi olan Aileme, Öğr. Gör. İ. Baran USLU'ya ve Eşim Aslı Nilay GÜLDİKEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Fikret GÜLDİKEN

30/06/2011

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1.GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	8
2.1. Termoelektrik Prensipler.....	8
2.1.1. Termoelektrik etkiler.....	8
2.1.2. Termoelektrik elemanlar	10
2.1.2.1. N-tipi eleman.....	11
2.1.2.2. P-tipi eleman	11
2.1.3. Elemanların termoelektrik modül oluşturması.....	12
2.2. Termoelektrik Soğutmanın Kuramı	13
2.2.1. İdeal model.....	14
2.2.2. Soğutma gücü.....	15
2.2.3. Materyal faktörü (figure-of-merit=Z)	16
2.2.4. Performans katsayısı	18
2.2.5. Çok katlı soğutucular (Kaskat sistem)	19
2.2.6. Termoelektrik soğutucuların avantaj ve dezavantajları	19
2.2.7. Termoelektrik soğutucuların kullanım alanları	20
2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method, FEM)	22
2.3.1. Sonlu elemanlar yöntemine giriş.....	22
2.3.2. Termoelektrik analiz	23
2.3.3. Termoelektrik analizin uygulanması.....	23
2.3.4. Termoelektrik sisteminin matematiksel eşitliklerinin yönetilmesi	24
2.3.5. Sonlu eleman formülasyonu.....	26
2.3.6. Termoelektrik analizde kullanılan element tipleri	28
2.3.7. Statik termoelektrik analizin adımları.....	28
2.3.7.1. Fiziksel Çevreyi Oluşturmak.....	28
2.3.7.2. Modeli yapmak, ağ oluşturmak, ve modeldeki her bir bölgenin fiziksel niteliklerini atamak.....	29

2.3.7.3. Sınır şartlarını ve yüklemeleri uygulamak	29
2.3.7.4. Çözümleri oluşturmak	29
2.3.7.5. Sonuçların yeniden incelenmesi.....	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM	30
3.1. Termoelektrik Soğutma Sistemlerinde Kullanılan Malzemelerin Termoelektrik Parametreleri	30
3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) İle Termoelektrik Soğutma Sistemlerinin Modellenmesi	31
3.2.1. TEC-01'in modellenmesi	31
3.2.2. TEC-02'nin modellenmesi	33
3.2.3. TEC-03'ün modellenmesi	33
3.2.4. TEC-04'ün modellenmesi	34
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	35
4.1. TEC-01 Modelinin Analiz Verileri	35
4.2. TEC-02 Modelinin Analiz Verileri	44
4.3. TEC-03 Modelinin Analiz Verileri	52
4.4. TEC-04 Modelinin Analiz Verileri	60
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	68
5.1.Oluşturulan Tüm TEC Modellerin Analiz Sonuçlarının Tartışılması.....	68
5.2.Tartışmalardan Elde edilen Sonuçlar	72
KAYNAKLAR	75
EKLER.....	77
ÖZGEÇMİŞ	83

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
β	Performans katsayısı
α	Seebeck katsayısı
σ	Elektriksel iletkenlik
λ_p	P tipi yarı iletken malzemenin ısı iletkenliği
λ_n	N tipi yarı iletken malzemenin ısı iletkenliği
Z	Materyal faktörü
T_1	Soğuk taraf sıcaklığı
T_2	Sıcak taraf sıcaklığı
T_m	Ortalama sıcaklık ($T_1+T_2/2$)
ΔT	Sıcak ve soğuk uç arasındaki sıcaklık farkı
π	Peltier katsayısı
V	Voltaj
I	Akım
t	Thomson katsayısı
L_p	P tipi yarı iletken malzemenin uzunluğu
L_n	N tipi yarı iletken malzemenin uzunluğu
A_p	P tipi yarı iletken malzemenin kesit alanı
A_n	N tipi yarı iletken malzemenin kesit alanı
ρ_p	P tipi yarı iletken malzemenin elektriksel özdirenci
ρ_n	N tipi yarı iletken malzemenin elektriksel özdirenci
Q_c	Elde edilen soğutma gücü
W	Sisteme uygulanan elektriksel güç
N	Termokupl sayısı
\vec{D}	Elektriksel akı yoğunluğu vektörü
\vec{J}	Elektriksel akım yoğunluğu vektörü
\vec{E}	Elektrik alan yoğunluğu vektörü
C	Özgöl ısı kapasitesi
\vec{q}	Isı akısı vektörü
$[\lambda]$	Termal iletkenlik matrisi
$[\sigma]$	Elektriksel iletkenlik matrisi
$[\alpha]$	Seebeck katsayısı matrisi
$[\Pi]$	Peltier katsayısı matrisi
$[\epsilon]$	Dielektrik geçirgenlik matrisi

Kısaltmalar Açıklama

FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
COP	Coefficient of Performance (Performans katsayısı)
CFC	Kloroflorokarbon
DC	Doğru akım
TE	Termoelektrik
TEC	Termoelectric Cooling

KXX	ANSYS’de x-yönünde ısıl iletkenlik değeri
KYY	ANSYS’de y-yönünde ısıl iletkenlik değeri
KZZ	ANSYS’de z-yönünde ısıl iletkenlik değeri
RSVX	ANSYS’de x-yönünde elektriksel özdirenç değeri
RSVY	ANSYS’de y-yönünde elektriksel özdirenç değeri
RSVZ	ANSYS’de z-yönünde elektriksel özdirenç değeri

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Farklı metallere oluşan bir devrede akım oluşumu	2
Şekil 1.2. Farklı metallere oluşan bir devrede voltaj oluşumu	2
Şekil 1.3. Basit bir termoelektrik güç üreticisinin genel çizimi	3
Şekil 1.4. Farklı metallere oluşan devrede soğutma olayının oluşumu.....	4
Şekil 1.5. İletken bir telde oluşan Thomson etkisi	5
Şekil 1.6. Termoelektrik soğutucu ve meydana gelen sıcaklık değişimleri	6
Şekil 2.1. Seebeck voltajının ölçümü	9
Şekil 2.2. Yarı iletken maddelerin termoelektrik veriminin kıyaslanması.....	10
Şekil 2.3. N-tipi elemanda elektrik ve ısı akışı.....	11
Şekil 2.4. P-tipi elemanda elektrik ve ısı akışı	11
Şekil 2.5. Elemanların ardışık bağlanması sonucunda elektrik ve ısı akışı.....	12
Şekil 2.6. Termoelektrik soğutma modülü	12
Şekil 2.7. Termoelektrik soğutucu modülü	13
Şekil 2.8. Bir çift termokupul modeli.....	14
Şekil 2.9. CPU soğutucusu	21
Şekil 2.10. Lazer ve medikal uygulamalar için sıvı soğutucu.....	21
Şekil 3.1. TEC-01'in sonlu elemanlar yöntemi için yapılan modellemesi.....	31
Şekil 3.2. TEC-01 modelinde oluşturulan ağ	32
Şekil 4.1. TEC-01'in modellenmesi	35
Şekil 4.2. TEC-01 modelinde $T_c=260K-325K$ aralığında yapılan her bir analiz için maksimum soğutma gücünün elde edildiği analiz raporları.....	41
Şekil 4.3. TEC-01 modelinde $T_c=260K-325K$ aralığında yapılan ve maksimum soğutma gücüne karşılık iki uç arasında elde edilen voltaj verilerinin analiz raporları.....	43
Şekil 4.4. TEC-02'nin modellenmesi	44
Şekil 4.5. TEC-02 modelinde $T_c=260K-325K$ aralığında yapılan her bir analiz için maksimum soğutma gücünün elde edildiği analiz raporları.....	49
Şekil 4.6. TEC-02 modelinde $T_c=260K-325K$ aralığında yapılan ve maksimum soğutma gücüne karşılık iki uç arasında elde edilen voltaj verilerinin analiz raporları.....	51
Şekil 4.7. TEC-03'ün modellenmesi	52
Şekil 4.8. TEC-03 modelinde $T_c=260K-325K$ aralığında yapılan her bir analiz için maksimum soğutma gücünün elde edildiği analiz raporları.....	57
Şekil 4.9. TEC-03 modelinde $T_c=260K-325K$ aralığında yapılan ve maksimum soğutma gücüne karşılık iki uç arasında elde edilen voltaj verilerinin analiz raporları.....	59
Şekil 4.10. TEC-04'ün modellenmesi	60
Şekil 4.11. TEC-04 modelinde $T_c=260K-325K$ aralığında yapılan her bir analiz için maksimum soğutma gücünün elde edildiği analiz raporları.....	65
Şekil 4.12. TEC-04 modelinde $T_c=260K-325K$ aralığında yapılan ve maksimum soğutma gücüne karşılık iki uç arasında elde edilen voltaj verilerinin analiz raporları.....	67
Şekil 5.1. $L=W=1cm$ olan TEC-01 modelinde $260K-325K$ sıcaklıkları arasında, akım(I) ile soğutma gücü(Q_c) değişimi	68

Şekil 5.2.	L=W=1mm olan TEC-02 modelinde 260K-325K sıcaklıkları arasında akım(I) ile soğutma gücü(Q_c) değişimi	69
Şekil 5.3.	L=W=100 μ m olan TEC-03 modelinde 260K-325K sıcaklıkları arasında akım(I) ile soğutma gücü(Q_c) değişimi	70
Şekil 5.4.	L=W=1 μ m olan TEC-04 modelinde 260K-325K sıcaklıkları arasında akım(I) ile soğutma gücü(Q_c) değişimi	71
Şekil 5.5.	Tüm modeller için 1cm ² başına elde edilen soğutma güçlerinin soğuk taraf sıcaklığı ile değişimi.....	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Termoelektrik soğutucuların kullanım ve uygulama alanları.....	20
Çizelge 3.1. Kullanılan malzemelerin termoelektrik parametreleri.....	30
Çizelge 4.1. TEC-01 modelinde $T_c=260K$ için analiz verileri.....	36
Çizelge 4.2. TEC-01 modelinde $T_c=270K$ için analiz verileri.....	37
Çizelge 4.3. TEC-01 modelinde $T_c=280K$ için analiz verileri.....	37
Çizelge 4.4. TEC-01 modelinde $T_c=290K$ için analiz verileri.....	38
Çizelge 4.5. TEC-01 modelinde $T_c=300K$ için analiz verileri.....	38
Çizelge 4.6. TEC-01 modelinde $T_c=310K$ için analiz verileri.....	39
Çizelge 4.7. TEC-01 modelinde $T_c=320K$ için analiz verileri.....	39
Çizelge 4.8. TEC-01 modelinde $T_c=325K$ için analiz verileri.....	40
Çizelge 4.9. TEC-02 modelinde $T_c=260K$ için analiz verileri.....	45
Çizelge 4.10. TEC-02 modelinde $T_c=270K$ için analiz verileri.....	45
Çizelge 4.11. TEC-02 modelinde $T_c=280K$ için analiz verileri.....	46
Çizelge 4.12. TEC-02 modelinde $T_c=290K$ için analiz verileri.....	46
Çizelge 4.13. TEC-02 modelinde $T_c=300K$ için analiz verileri.....	47
Çizelge 4.14. TEC-02 modelinde $T_c=310K$ için analiz verileri.....	47
Çizelge 4.15. TEC-02 modelinde $T_c=320K$ için analiz verileri.....	48
Çizelge 4.16. TEC-02 modelinde $T_c=325K$ için analiz verileri.....	48
Çizelge 4.17. TEC-03 modelinde $T_c=260K$ için analiz verileri.....	53
Çizelge 4.18. TEC-03 modelinde $T_c=270K$ için analiz verileri.....	53
Çizelge 4.19. TEC-03 modelinde $T_c=280K$ için analiz verileri.....	54
Çizelge 4.20. TEC-03 modelinde $T_c=290K$ için analiz verileri.....	54
Çizelge 4.21. TEC-03 modelinde $T_c=300K$ için analiz verileri.....	55
Çizelge 4.22. TEC-03 modelinde $T_c=310K$ için analiz verileri.....	55
Çizelge 4.23. TEC-03 modelinde $T_c=320K$ için analiz verileri.....	56
Çizelge 4.24. TEC-03 modelinde $T_c=325K$ için analiz verileri.....	56
Çizelge 4.25. TEC-04 modelinde $T_c=260K$ için analiz verileri.....	61
Çizelge 4.26. TEC-04 modelinde $T_c=270K$ için analiz verileri.....	61
Çizelge 4.27. TEC-04 modelinde $T_c=280K$ için analiz verileri.....	62
Çizelge 4.28. TEC-04 modelinde $T_c=290K$ için analiz verileri.....	62
Çizelge 4.29. TEC-04 modelinde $T_c=300K$ için analiz verileri.....	63
Çizelge 4.30. TEC-04 modelinde $T_c=310K$ için analiz verileri.....	63
Çizelge 4.31. TEC-04 modelinde $T_c=320K$ için analiz verileri.....	64
Çizelge 4.32. TEC-04 modelinde $T_c=325K$ için analiz verileri.....	64

1.GİRİŞ

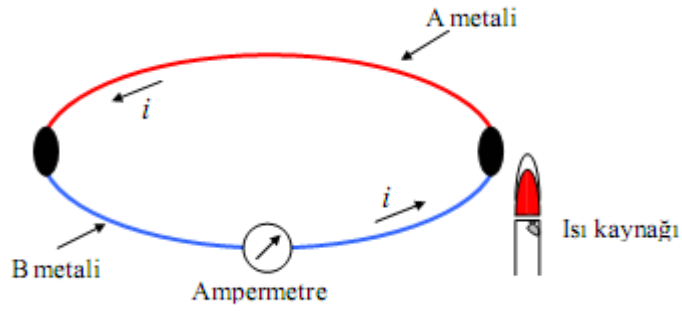
Günümüzde, sağlam, güvenilir, kompakt, ufak boyutlu, hafif, uzun ömürlü, düşük maliyette, düşük enerji tüketimine sahip ve uzun süre bakım gerektirmeyen soğutuculara artan bir ihtiyaç vardır. Yaygın olarak kullanılan mevcut kompresörlü soğutma sistemleri mekanik olarak hareket eden parçaları olduğundan ve boyut olarak büyük olduklarından arzulanan ideal özelliklere sahip değildir. Fakat termoelektrik soğutma sistemleri oldukça güvenilir bir yapıya sahiptir ve ömrü 200.000 (≥ 22 yıl) saatten fazladır. Aynı zamanda termoelektrik soğutma sistemleri kullanılarak çevre dostu soğutma elde edilebilir çünkü bu sistemlerde kloroflorokarbon (CFC) yoktur.

Teknolojinin hızlı bir şekilde arttığı bir zamanda soğutma ihtiyacının sadece konfor ve gıdaların muhafazası amaçlı sınırlı kalmayacağı açıktır. Özellikle yeni ve daha sıkı imal edilmiş elektronik cihazların kendi içinde ürettiği ve dışarıya yaydığı ısının bertaraf edilmesinin ve ısı konfor sınırlarını aşan özel şartların istendiği soğutma gereksinimleri, buhar sıkıştırımlı konvansiyonel soğutma sistemlerinin dışında alternatif soğutma cihazlarına yönelmeyi ortaya koymuştur.

Termoelektrik soğutucular, askeri, elektronik gibi alanlardan, bireysel özel soğutma ihtiyacına kadar birçok uygulamada kullanılan ısı pompası özelliği olan cihazlardır. (Riffat,2003)(Chung,2003)

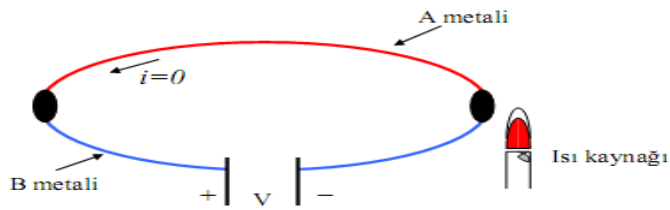
Hem ısı hem de elektriksel etkilerin bir arada bulunduğu devreye termoelektrik devre, bu devreyle çalışan sisteme de termoelektrik sistem adı verilir. Isı enerjisinin elektrik enerjisine, elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümlerinin temelini oluşturan termoelektrik etkiler 150 yıldan daha fazla zamandır bilinmektedir. Farklı metallere yapılmış iki tel, uçlarından birleştirildiği takdirde, kapalı bir devre oluşur. Başlangıçta bu devreden elektrik akımı geçmez, fakat uçlardan biri ısıtıldığı zaman devreden Şekil 1.1'de gösterildiği gibi bir elektrik akımı geçer. İlk olarak 1823'de Thomas Seebeck tarafından yapılan deneyler sonucunda devreye bağlı gerilim ölçen cihazın ibresinin hareket ettiği tespit edilmiştir. Bu olaya Seebeck etkisi adı verilir.

Buna bağı olarak bazı yarı iletkenler sınıflandırılırken $\alpha.\sigma$ şeklinde düzenlenmiştir. Burada α Seebeck katsayısını ve σ elektriksel iletkenliği göstermektedir. Seebeck katsayısı Volt başına derece veya genelde mikro Volt başına derece (μVK^{-1}) ile ölçülür (Seebeck 1823).



Şekil 1.1. Farklı metallerden oluşan bir devrede akım oluşumu (Çengel 2000)

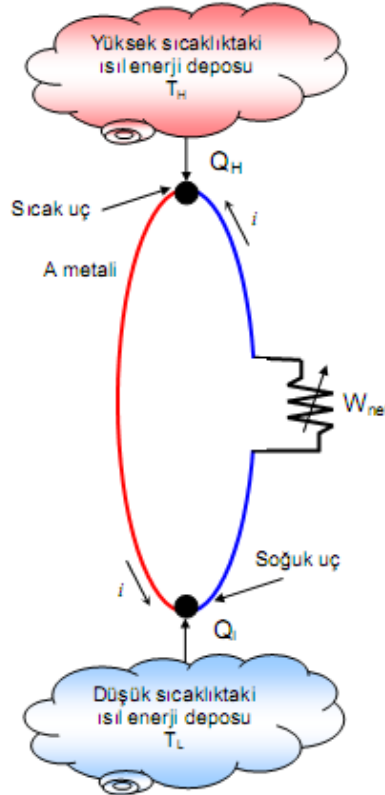
Bu çevrim 1981’li yıllarda bilinmesi ve kullanılmasına rağmen buhar makineleri çevrimleri bu yıllarda daha çok kullanılmaktaydı. Bu yüzden Seebeck’in yaptığı araştırmalar fazla ilerlememiştir. Seebeck etkisinin iki önemli uygulama alanı vardır. Bunlar sıcaklık ölçümleri ve güç üretimidir. Şekil 1.2’de gösterildiği gibi termoelektrik devre açıldığında, devrede bir akım oluşmamaktadır fakat devrenin ürettiği elektromotor kuvveti veya voltaj, voltmetrede okunabilmektedir. Devrede üretilen voltaj iki uç arasındaki sıcaklık farkına ve tellerin yapıldığı malzemelere bağlıdır. Bu nedenle sıcaklık, voltaj ölçülerek belirlenir. Sıcaklığı bu yöntemle ölçmek için kullanılan iki yarı iletken ısı çifti veya termokupul adı verilir. Isıl çiftler, hemen hemen her sıcaklık ölçümüne uygun olduklarından çok yaygın bir biçimde kullanılmaktadırlar. (Çengel 2000)



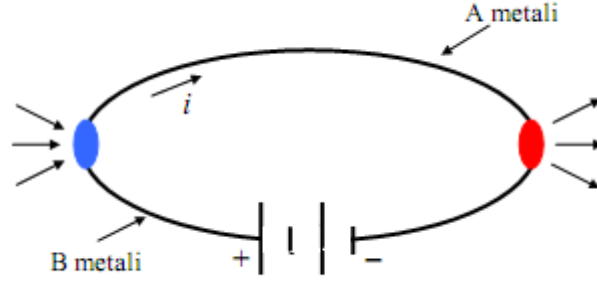
Şekil 1.2. Farklı metallerden oluşan bir devrede voltaj oluşumu (Çengel 2000)

Seebeck etkisinden yararlanılan ikinci önemli uygulama güç üretimi yapılmasıdır. Şekil 1.3'de bir termoelektrik güç üreticisinin genel şeması gösterilmektedir. Q_H miktarında ısı, yüksek sıcaklıktaki kaynaktan sıcak uca geçmekte, Q_L miktarındaki ısı da soğuk uçtan çevreye verilmektedir. Bu iki değer arasındaki fark, yapılan net işi gösterir. Başka bir deyişle, $W_e = Q_H - Q_L$ olmaktadır. Termoelektrik güç çevrimi, ısı makinesi çevrimine benzemektedir, sadece burada akışkanın yerini elektronlar almaktadır (Çengel 2000).

Seebeck keşfinden 12 yıl sonra Jean Charles Athanese Peltier, termoelektrik sisteme dışarıdan bir potansiyel fark uygulayarak, termoelektrik devrede elektronların akış yönünü değiştirmeyi ve böylece soğutma etkisini gözlemleyerek termoelektrik olayının tamamlayıcı etkisini keşfetti. Yaptığı deneyler sonucunda farklı malzemelerden yapılmış iki telin oluşturduğu uçtan, zayıf bir akım geçirildiği zaman, bir ucun soğuduğunu gördü (Şekil 1.4). Bu olguya Peltier etkisi adı verilir ve termoelektrik soğutmanın temelini oluşturur (Çengel 2000).



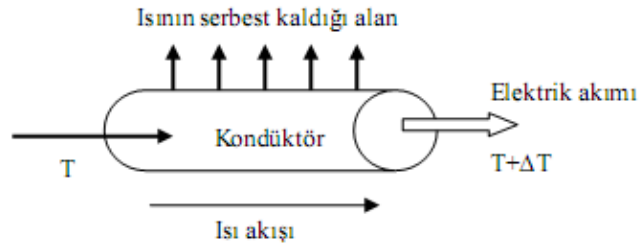
Şekil 1.3. Basit bir termoelektrik güç üreticisinin genel çizimi (Çengel 2000)



Şekil 1.4. Farklı metallerden oluşan devrede soğutma olayının oluşumu (Çengel 2000)

1834’de, Peltier’in zayıf akım kullanarak yaptığı deneysel gözlemlerden elde ettiği sonuçlar tam olarak anlaşılmamıştır. Esasında Peltier’in elde ettiği bulguların temeli Seebeck etkisiyle ilgilidir. Lenz 1838’de Peltier’in yapmış olduğu deneylerden çıkardığı sonuçla; plakalar arasındaki iki iletkenin birleşmesi ve üzerinden doğru akım geçirilmesiyle plakanın bir yüzeyinden ısı emildiğini, akım yönünün tersine çevrilmesi durumunda ise ısı emilen yüzeyde, ısı üretildiğini açıklamıştır (Ioffe 1957).

1850’den itibaren tüm enerji çevrim şekilleri üzerine bilim adamları birçok çalışmalar yapmış ve bunun sonucunda da termodinamik gelişmelerle birlikte termoelektrik olayında da yeni sonuçlar meydana çıkmıştır. 1851’de W. Thomson (Lord Kelvin) önceden bildirmiş olduğu üçüncü termoelektrik etkisi olan Thomson etkisini, deneysel metotlarla yaptığı incelemeler ve bağıntılarla kanıtlamıştır.



Şekil 1.5. İletken bir telde oluşan Thomson etkisi (Thomson 1851)

Şekil 1.5.’de görülen Thomson etkisi; ısıtma veya soğutmada tek homojen kondüktör üzerinden akım geçtiği müddetçe sıcaklık değişiminin meydana geldiğini anlatmaktadır.

Isı, akım ve sıcaklık değişiminin yönüne bağlı olarak absorplanır veya serbest bırakılır. Aynı yönde elektrik akımı varsa ısı aktığı için özellikle daha çok serbest bırakılır. Aksi takdirde ısı absorplanır. Birim uzunlukta absorbe edilen güç q , sıcaklık farkıyla dT/dx ve elektrik akımı I ile doğru orantılıdır (Thomson 1851).

Termoelektrik olayının elektrik üretici olarak kullanılma olasılığını dikkate alan Rayleigh 1885’de termoelektrik jeneratörünün ilk verimini hesaplamıştır. Fakat bu düşüncesinin yanlış olduğu sonradan ispatlanmıştır. 1909 ve 1911’de Altenkirch, termoelektrik cihazların elektrik üretiminde ve soğutmada uygulanmasında mükemmel termoelektrik malzemeler kullanılması teorisini ortaya koymuştur. Yüksek performans verebilecek termoelektrik malzemeler yüksek Seebeck katsayısı ile düşük ısıl iletkenliğe (λ) sahip olmalı ve ısı bağlantısında düşük elektrik direnciyle minimum ısı (enerji) tutmalıdır. İstenen malzemelerin özelliklerinde belirtilen Z katsayısı materyal faktörü olarak adlandırılır. $Z=\alpha^2\sigma/\lambda$ olup ve Z nin birimi $1/K$ ’dir. Verilen mutlak sıcaklık T , değişken Z ile kullanıldığında boyutsuzdur ve ZT ile gösterilir (Altenkirch 1911).

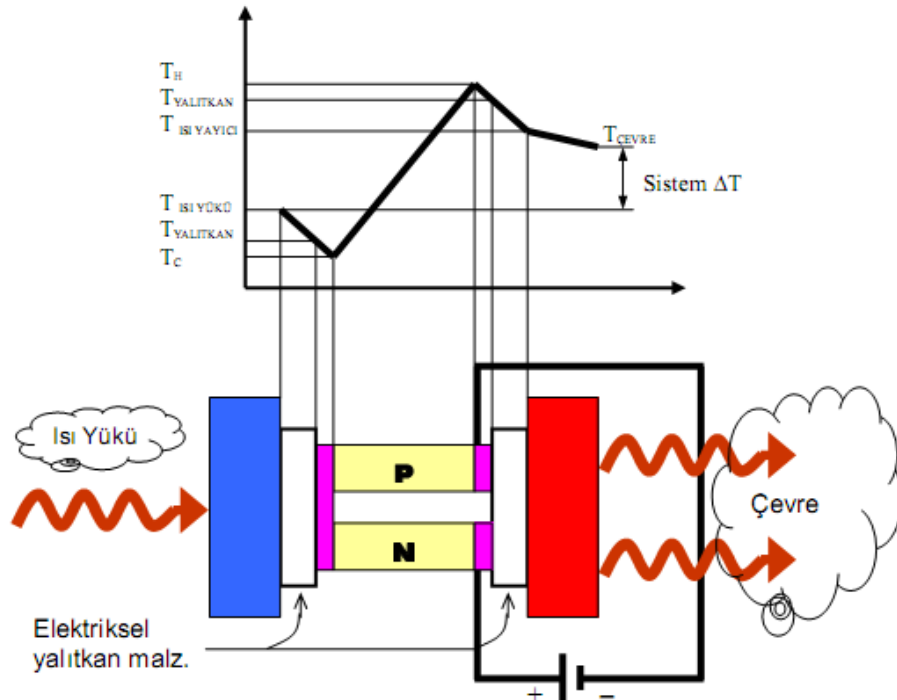
1900’lü yıllarda termoelektrik cihazların daha verimli bir şekilde elektrik üretiminde veya soğutmada kullanılabilmesi için bilim adamları mükemmel termoelektrik malzemeler üzerine çalışmalarını arttırmıştır. Mükemmel termoelektrik malzemesinin Seebeck katsayısının yüksek olması gerekmektedir. O zamanlarda metallerin Seebeck katsayısı $10 \mu VK^{-1}$ ’di. Böyle bir malzemedenden oluşturulan termoelektrik cihazın verimi de %1 civarındaydı. Bundan dolayı da termoelektrik cihazların elektriksel güç kaynağı ve soğutmada kullanılması ekonomik değildi. Termoelektrik alanındaki gelişmeler sonucunda 1930’da sentetik yarı iletkenler imal edildi. Sentetik yarı iletkenlerin sahip oldukları Seebeck katsayıları $100 \mu VK^{-1}$ ’den fazladır. 1947’de Telkes bu sentetik yarı iletkenlerden yaptığı jeneratörü %5 verimle işletmiştir. 1949’da Ioffe, termoelementler teorisini geliştirmiştir. Bu teoriyle olağan çevre şartlarından düşük sıcaklıklarda yani $0^\circ C$ ’nin altında soğutma yapılabilir.

Bu teoriyi 1954’de Goldsmid ve Douglas ispatlamıştır. 1950’de elde edilen yeni malzemeler ile de termoelektrik özelliklerin önemli ölçüde düzeltildiği görülmüştür.

Daha önceden elde edilen [ısıl iletkenlik/elektriksel iletkenlik] oranı oldukça düşüktü. Şu anki termoelektrik malzemeler ise eş yapılı veya bileşik (aynı tip) alaşımlar olup bu oran hayli yükseltilmiştir.

Bu malzemenin askeri uygulamalarda kullanılabilmesi için teşvik edilmiş ve özellikle USA'daki RCA Laboratuvarlarında elde edilen yarı iletkenler ile yapılan deneylerde yarı iletkenlerin ZT'si yaklaşık 1,5 bulunmuştur (Ioffe 1957, Telks 1947, Goldsmid ve Douglas 1954; Ioffe ve ark. 1956).

Modern termoelektrik çevriminde; gerekli miktarlarda p ve n tipi yarı iletkenler birbirini takip edecek şekilde metal bağlantı şeritlerin üzerine yerleştirilmiştir. Bu şeritler elektriksel olarak seri şekilde bağlanır. Elektriği iletmeyen (yalıtkan) fakat ısıyı iyi ileten seramik kaplı iki modül arasında birbirine bağlı yarı iletkenler yerleştirilerek sıkıştırılır. Modüllerin sıcaklık farkının boydan boya korunması şartıyla elektriksel güç üreticisi olarak kullanılması mümkündür. Bunun tersine, modülün içinden elektrik akımı geçtiği zaman modülün bir yüzünden ısı emilir ve diğer yüzünden ısı atılarak bu cihaz soğutucu olarak da çalıştırılabilmektedir. Peltier etkili iki yarı iletkenli termoelektrik soğutucunun genel şekli ve bu termoelektrik modülünün ısıyı transfer ederken gövdesinde oluşan sıcaklık değişimleri Şekil 1.6'da gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Termoelektrik soğutucu ve meydana gelen sıcaklık değişimleri (TECA Corp.)

Dünyada, 1960'larda uzay araştırmalarının ve medikal fiziğin gelişmesiyle, bağımsız elektriksel güç kaynaklarına gereksinim duyuldu. Bu çalışma alanlarında termoelektrik üreteçler uygun ve tatmin ediciydi. Termoelektrik üreteçler güvenilir, hareketli kısmı bulunmayan ve diğer sistemlere nazaran daha sessiz çalışan cihazlardır. Fakat diğer üreteçlere göre nispeten maliyeti yüksek ve verimi düşüktür. Termomekanik cihazlarıyla termoelektrik üreteçler karşılaştırıldığında, termoelektrik üreteçler sağlamlık ve basitlik gibi avantajlara sahiptirler (Yarborough 1975).

Fosil yakıtların, oksijenle yakılması sonucu elde edilen enerji, ısı kaynağı durumundadır. Hidrokarbon yakıtlardan sağlanan enerji 1950'lerde oldukça çok kullanılmaktaydı. Hidrokarbon yakıt sistemi pillerden daha küçük boyutlarda ve uzun süreli ısı enerjisiyle elektrik enerjisi sağlayabilmektedir. Yıllık yakıt ikmalinin mümkün olmadığı veya oksijenin mevcut olmadığı durumlarda, ısı kaynağındaki radyoaktif izotoplar, ısı etkisiyle radyoizotop termoelektrik jeneratörlere fırsat vermektedir. Radyoizotop termoelektrik jeneratörler uzun müddet çalışabilmektedirler. Örneğin, Voyegar uzay aracı 1977'de fırlatılmış ve o günden beri hala çalışmasını sürdürmektedir (Rowe 1989).

1974'de petrol fiyatlarındaki artışla birlikte termoelektrik etkiyle elektrik üretme metodu da önem kazanmaya başlamıştır. Bu yöntemle bol ve kolay bir şekilde elektrik üretimi yapılabilmektedir. Z değeri yüksek yarı iletken malzemelerin geliştirilmesiyle bu yöntemle elde edilen enerjinin maliyeti azaltılabilir. Ayrıca termoelektrik sistemin ozon tabakasına zararlı etkilerinin olmaması da ileride bu sistemi daha da avantajlı bir konuma getirecektir (Rowe 1993, Matsuura 1992).

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Termoelektrik Prensipler

2.1.1. Termoelektrik etkiler

İki farklı yarı iletken malzemenin kimyasal yöntemlerle birbirine yerleştirilmesiyle oluşturulan devre üzerinden, elektrik akımı geçirilmesiyle meydana gelen sıcaklık farklılıklarında, devrede aynı anda üç çeşit termoelektrik etki oluşur. Bu etkiler mucitlerinin adı ile anılır. Bunlar:

- Seebeck
- Peltier
- Thomson

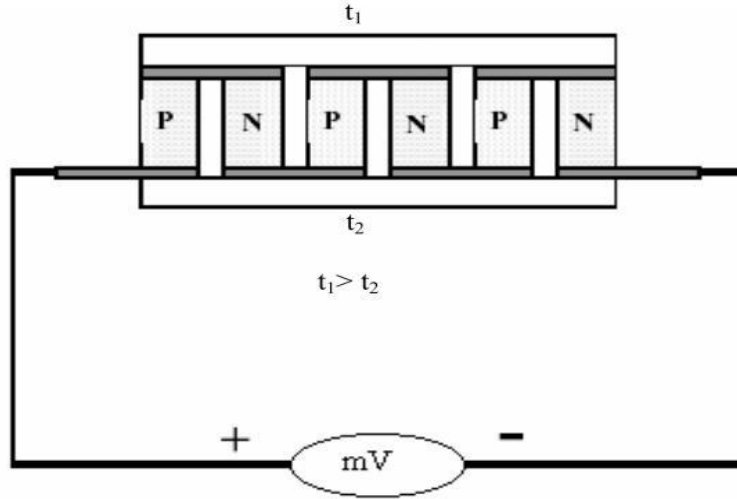
Etkileridir.

İki farklı yarı iletken malzemenin birbirine seri olarak birleştirilmesiyle oluşturulan devrede, farklı sıcaklıklarda elektrik gerilimi ölçülür. Bu gerileme 'Seebeck Voltajı' adı verilir. Devreden ölçülen gerilim, malzemelerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılıdır. Şekil 2.1'deki iki farklı yarı iletken malzemedan oluşturulan devrede ölçülen voltaj;

$$V = \alpha \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

ile hesaplanabilir. Burada V devrede ölçülen voltaj, $\Delta T = T_1 - T_2$ malzemelerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı, $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ Seebeck katsayısı olarak adlandırılır ve birimi $V/^\circ C$ 'dir. α 'nın değeri devreyi oluşturan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Örneğin bakır konstantan'dan yapılan bir termokupl için $\alpha = 40 \mu V/^\circ C$ 'dir. Yani her $1^\circ C$ sıcaklık farkı için $40 \mu V$ 'luk voltaj üretir. α 'nın değeri $100 \mu V/^\circ C$ 'den büyük olan yarı iletkenlere, termoelektrik yarı iletkenler denir.

N tipi yarı iletken için α değeri negatif, P tipi yarıiletken için α değeri ise pozitiftir. Meydana gelen Seebeck etkisi yarı iletkenlerde jeneratör gibi, metallerde ise termokupl veya ısı sensörü gibi kullanılır.



Şekil 2.1. Seebeck voltajının ölçümü (Usta 2002)

1834 yılında Fransız Fizikçi Jean Charles Athanasa Peltier tarafından iki farklı yarı iletken malzeme üzerinden DC akım geçirilmesi ile akımın hareket ettiği yönde ısı hareketi oluşmasıyla keşfedilmiştir. Bu olaya Peltier etkisi denilmektedir (Çengel 1996). Birleştirilen iki farklı yarıiletken malzemedan oluşturulan devre üzerinden doğru akım geçtiğinde, Joule ısı ile birlikte birleşme noktasından ısı emilirken, diğer birleşme noktasından ısı açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan ısı miktarı devreden geçirilen doğru akımla doğru orantılıdır.

$$Q_p = \pi \cdot I \quad (2.2)$$

Burada Q birim zamanda transfer edilen ısı miktarı (Watt), π Peltier sabiti (Volt), I Devre üzerinden geçen doğru akımdır (Amper). Dışarıdan verilen elektriksel güç, elektronların sistem içerisinde hareket etmeleri için gerekli enerjiyi sağlamak ve böylece hareketlenen elektronlar değişen enerji düzeyleri arasında ilerlerken ısı transfer etmekte, başka bir deyişle ısı taşımaktadır (J.Buist 1997). Dışarıdan verilen elektriksel güç arttırılırsa, hareketli elektron sayısı da artacağından soğuk yüzey ile sıcak yüzey arasındaki ısı transfer miktarı da artacaktır. Eğer akım yönü ters çevrilirse, bu işlem

tersine işleyecek sıcak yüzeyle, soğuk yüzey kendi arasında yer değiştirecektir (Fidan 2000).

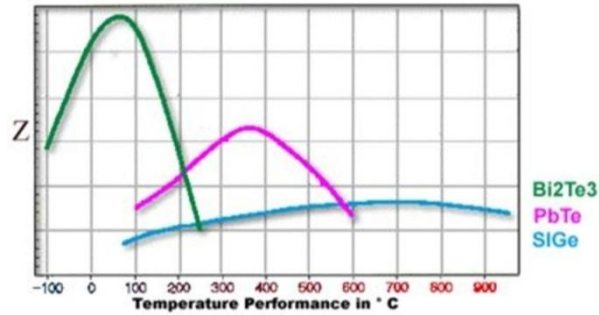
1856 yılında bulunan Thomson etkisi şöyle açıklanabilir; akım taşıyan bir iletkenin uçları arasında sıcaklık farkı varsa akım yönüne göre Joule ısısına ek olarak Thomson ısısı açığa çıkmaktadır. Thomson ısısı akım şiddeti, sıcaklık farkı ve Thomson katsayısı ile doğru orantılıdır.

$$Q_T = t \cdot \Delta T \cdot I \quad (2.3)$$

Burada Q_T Thomson ısısı (Watt), ΔT iletkenin uçları arasındaki sıcaklık farkı ($^{\circ}\text{C}$), t Thomson katsayısı ($\text{V}/^{\circ}\text{C}$) ve I iletken üzerinden geçen akım (Amper) şiddetidir.

2.1.2. Termoelektrik elemanlar

- Yüksek katkılı yarı iletken malzeme, iki metal tabaka arasına preslenir.
- Plakalar, sıcak ve soğuk yüzeyleri meydana getirir.
- DC kaynaktan beslenen bir termoelektrik soğutma elemanı, en küçük soğutucuyu oluşturur.
- Yarı iletken olarak Bi_2Te_3 , PbTe , SiGe ya da BiSb kullanılır.
- Bi_2Te_3 , yüksek termoelektrik verimi ve uygun sıcaklık aralığı nedeniyle tercih edilmektedir.

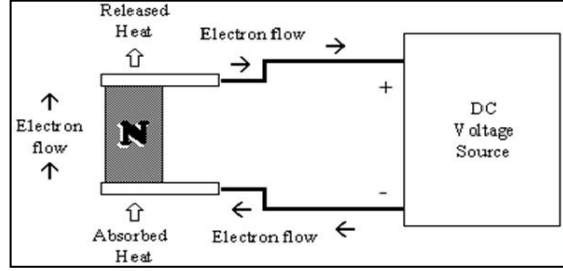


Şekil 2.2. Yarı iletken maddelerin termoelektrik veriminin kıyaslanması

Termoelektrik elemanlar iletkenliği sağlayan yük taşıyıcılarının türüne göre sınıflandırılırlar. Madde içinde iletkenliği sağlayanlar elektronlar ise bu tür yarı iletkenler n-tipi eleman, eğer iletkenlik boşluklar tarafından sağlanıyorsa p-tipi eleman olarak adlandırılmaktadır.

2.1.2.1. N-tipi eleman

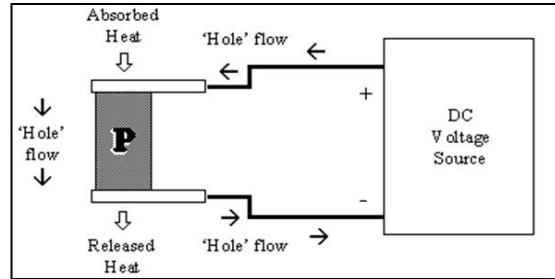
- N-tipi elemanda çok sayıda bulunan serbest elektronlar ısıyı da beraberinde taşırlar.
- Isının akış yönü, elektrik akımıyla aynı yöndedir.



şekil 2.3. N-tipi elemanda elektrik ve ısı akışı

2.1.2.2. P-tipi eleman

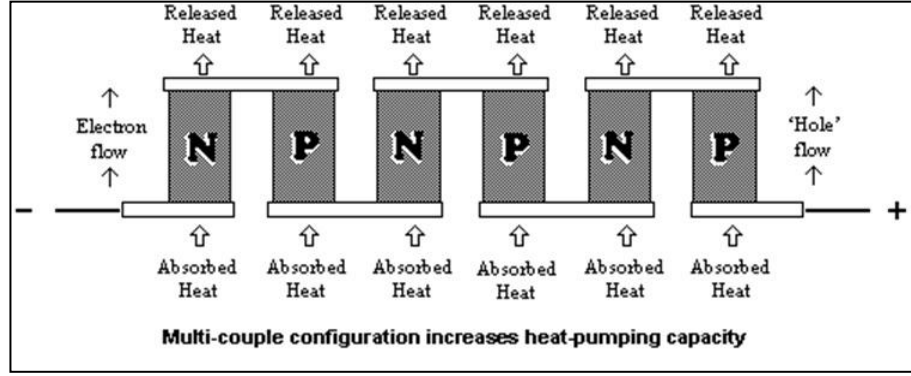
- Elektrik akımı serbest boşluklar tarafından taşınır.
- Isı akışının yönü, boşlukların hareketiyle aynı yöndedir.
- N-tipi elemanla seri bağlandığında ısıyı ters yönde iletir.



şekil 2.4. P-tipi elemanda elektrik ve ısı akışı

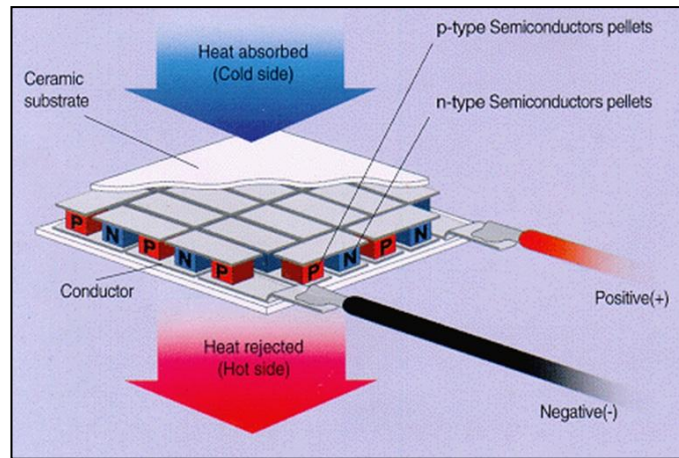
2.1.3. Elemanların termoelektrik modül oluşturması

- Hem ısı akımını, hem de gerilimi arttırmak için birden fazla eleman birbirine seri bağlanır.
- Bağlantı kolaylığı için P ve N tipi elemanlar ardışık olarak kullanılır.
- Elektrik akımı zikzak çizerken ısı akış yönü aynı kalır.



Şekil 2.5. Elemanların ardışık bağlanması sonucunda elektrik ve ısı akışı

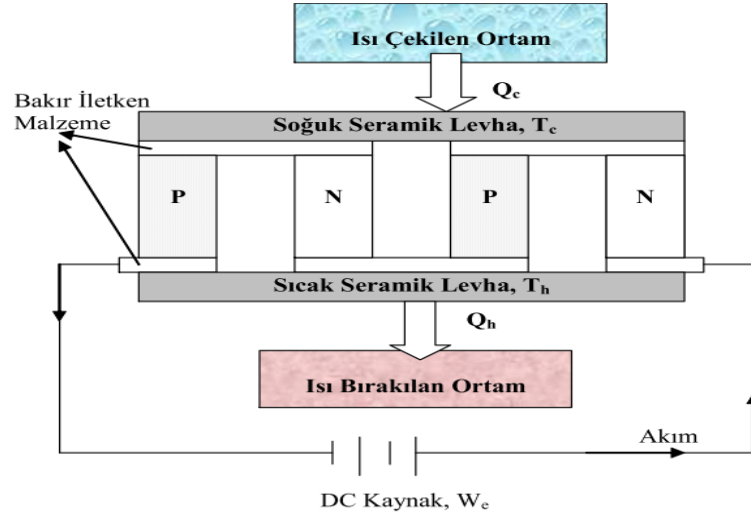
N-tipi ve P-tipi elemanlar seri bağlanıp sayıları çoğaltıldıktan sonra metal plakalar arasına preslenip her iki yüzeyine de seramik gibi ısı iletkenliği yüksek, elektriksel olarak yalıtkan olan malzeme ile kaplanarak istenilen boyutlarda termoelektrik soğutma modülleri oluşturulabilir. Şekil 2.6'da termoelektrik soğutma modülü gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Termoelektrik soğutma modülü

2.2. Termoelektrik Soğutmanın Kuramı

Termoelektrik (TE) soğutma N ve P tipi yarı iletken metal çiftlerinden oluşmuş bir veya daha çok modülden doğru akımın geçmesi ile elde edilir. Şekil 2.7’de N ve P tipi yarı iletken çiftlerinden meydana gelmiş bir termoelektrik soğutma modülü gösterilmiştir. N ve P tipi termoelektrik elemanlar elektriksel olarak seri, ısıl olarak paralel şekilde seramikler arasında bağlanırlar. Akımın yönüne bağlı olarak ısıtma ve soğutma elde edilebilir. Şekil 2.7’den de görüleceği gibi soğutma durumunda, doğru akım N tipi yarıiletkenlerden P tipine geçmektedir.



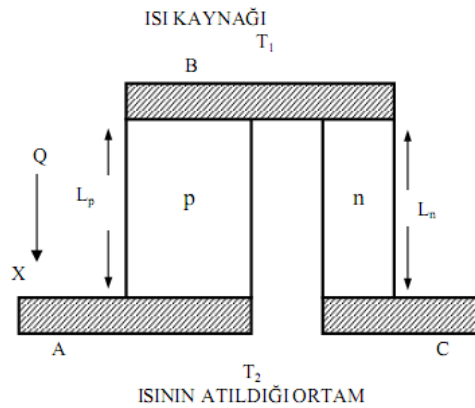
Şekil 2.7. Termoelektrik soğutucu modülü (Bulut 2005)

Elektronlar bakır iletkenlerinin içerisinde serbest olarak hareket edebilirler fakat yarı iletken içinde çok rahat hareket edemezler. Elektronlar iletkenlerden çıkıp p-tipi yarı iletkenin sıcak tarafına girerler ve p-tipi boyunca hareketlerini devam ettirebilmeleri için buradaki boşlukları doldurmak zorundadırlar. Elektronlar boşlukları doldurduklarında daha düşük enerji seviyesine geçerler ve bu işlem esnasında ortama ısı bırakırlar. Temel olarak; p-tipi yarı iletkendeki boşluklar soğuk taraftan sıcak tarafa doğru hareket ederler. Elektronlar p-tipi yarı iletkeninden çıkıp iletkenine geçtiklerinde tekrar yüksek enerji seviyesine geçerler ve bu esnada ortamdan ısı emerler (Bulut 2005).

İletkene geçen elektronlar, n-tipi yarı iletkenin soğuk tarafına ulaşınca kadar burada serbestçe hareket ederler n-tipi yarı iletkene geçen elektronlar burada hareketlerini devam ettirebilmeleri için ortamdan ısı emerler ve daha sonra n-tipi yarı iletkenin sıcak tarafından iletkene geçer ve rahatça hareket edebilirler. Elektronlar burada daha düşük enerji seviyesine geçerek ortama ısı verirler. Böylelikle ısı, bir ortamdan çekildiği gibi başka bir ortama da transfer edilmektedir Dolayısıyla termoelektrik modül ısı pompası vazifesi de gösterir.

2.2.1. İdeal model

Bir termoelektrik cihazının çevrim verimliliğini göstermek için Şekil 2.8'deki modelden faydalanılacaktır. Burada pozitif (p) ve negatif (n) termoelementleri birbirine bağlanmıştır. A, B, ve C sıfır elektrik dirençli metal iletkenlerdir. Termoelementlerin uzunluğu L_p ve L_n 'dir. Kesit alanı ise; A_p ve A_n 'dir. Genelde L_p/A_p ve L_n/A_n oranları birbirinden farklıdır. Kolaylık olması için birbirine eşit kesit alanlarla gösterilirler. Isı, ısı kaynağı olan B'den termoelektrik çiftinin iletkenliği sayesinde ısının bırakıldığı alan olan A-C ye geçtiği kabul edilir. Birden çok sayı da termoelektrik çiftlerin, elektriksel açıdan seri ve ısıl açıdan paralel bağlanması elektriksel gücün idaresini etkiler fakat verimliliği etkilemez.



Şekil 2.8. Bir çift termokupl modeli (Lendecker 1976)

Termoelektrik çifti iki şekilde kullanılabilir. Birincisi; güç kaynağının, A'ya negatif ve C'ye pozitif uçları bağlanır. Elektrik verildiğinde ısı pompası gibi ısı kaynağından ısı

emerek o ortamı soğutmaya çalışır. Bir başka deyişle, ısı kaynağından yani T_1 sıcaklığında oluşan ısı, Peltier etkisiyle T_2 mutlak sıcaklığında olan ve ısının atıldığı ortama pompalanır. İkinci kullanımı; A ve C arasına elektriksel dirençli bir yük konulursa, B'de ısı üretimi ve A ve C'de de ısı atılması meydana gelir yani T_1 ve T_2 sıcaklıkları arasında bir fark oluşur. Dolayısıyla bu devrede Seebeck etkisinden dolayı bir elektrik akımı meydana gelir. Diğer bir deyişle termoelektrik çift jeneratör vazifesi görür. Çiftin performans katsayısı, soğutucu ya da jeneratör olarak kullanıldığında önemli bir parametreyle ilişkilidir. Bu parametre termoelementin materyal faktör (figure-of-merit= Z) değeridir. Bir termokuplda bulunan iki termoelementin özelliklerini birleştirir (Lendecker 1976).

2.2.2. Soğutma gücü

Peltier ve Seebeck etkileri, termoelementlerin uçlarında olmasına rağmen, termoelementlerin kesit alanlarından daha fazla, hacimleriyle ilgilidir. Bir elektrik akımı iletkenin üzerinden geçerken ısı yayar. Akımın farklı ısıdaki bir iletkenine geçişinde, ortamdaki ısı emilimi ya da serbest bırakılması Peltier etkisiyle açıklanır. Böylece iki termoelementten geçen ısı (Şekil 2.8'e göre);

$$Q_c = (\alpha_p - \alpha_n)IT_1 - K(T_2 - T_1) - I^2R/2 \quad (2.4)$$

İki termoelementin paralel bağlanması sonucunda ısı iletkenlik;

$$K = \lambda_p A_p / L_p + \lambda_n A_n / L_n \quad (2.5)$$

ve elektriksel direnci;

$$R = \rho_p L_p / A_p + \rho_n L_n / A_n \quad (2.6)$$

Denklem 2.4'den elde edilen sonuç ispatlanamamıştır fakat kabul edilir. Joule ısının yarısı ($I^2R/2$) ısı kaynağına diğer yarısı ise ısının serbest bırakıldığı ortama geri döner (Lendecker 1976).

2.2.3. Materyal faktörü (figure-of-merit=Z)

Denklem 2.4'de görüldüğü üzere, Peltier'in soğutma terimi $[(\alpha_p - \alpha_n) I T_1]$, elektrik akımı I ile doğru orantılıdır. Bunun yanında Joule'nin ısı terimi " $I^2R/2$ " akımın karesi ile orantılıdır. Buna göre soğutma gücü maksimuma ulaştığında, akım I_q olmalıdır. Bu akım $dQ_c/dI = 0$ olduğunda bulunabilir. Buna göre;

$$I_q = (\alpha_p - \alpha_n) T_1 / R \quad (2.7)$$

ve maksimum soğutma gücü;

$$(Q_c)_{\max} = [(\alpha_p - \alpha_n)^2 T_1^2 / 2R] - K(T_2 - T_1) \quad (2.8)$$

Bu denkleme göre eğer termoelement çiftlerinin uçları arasında ısı farkı çok yüksekse pozitif soğutma gücü elde edilemez. Gerçekte aradaki maksimum sıcaklık farkı $(T_2 - T_1)_{\max}$ $(Q_c)_{\max} = 0$ ile bulunabilir. Buna göre;

$$(T_2 - T_1)_{\max} = (\alpha_p - \alpha_n)^2 T_1^2 / 2KR \quad (2.9)$$

Termoelektrik çiftinin materyal faktörü (Z) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Z = (\alpha_p - \alpha_n)^2 / KR \quad (2.10)$$

Böylece denklem 2.9 yeniden yazılırsa;

$$(T_2 - T_1)_{\max} = \frac{1}{2} Z T_1^2 \quad (2.11)$$

Olur. Normal koşullarda, gerekli olan sıcaklık farkı $(T_1 - T_2)$ elde edilebilen maksimum sıcaklık farkından az olmalıdır. (Ioffe, 1957) Denklem 2.11'deki Z değeri sistemde kullanılan termokupl çiftininidir. Termoelementin R ve K değerleri azaltıldığında, Z en büyük değerine ulaşır.

P ve n termoelementlerinin kesit alanı arttırıldığında R değeri artar ve K değeri azalır. Böylece termoelementlerin fiziksel özellikleri değiştirilerek, soğutma gücüne ve elektrik akımına göre termoelektrik çifti imal edilebilir. Önemli olan iki termoelement arasında L/A ilişkisini iyi kurmaktır.

$$\frac{L_n A_p}{L_p A_n} = \left(\frac{\rho_p \lambda_n}{\rho_n \lambda_p} \right)^{1/2} \quad (2.12)$$

Denklem 2.12 daha açık yazılırsa, bir çift termoelementin Z değerine etki eden faktörler belli olmaktadır.

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{\left[(\rho_p \lambda_p)^{1/2} + (\rho_n \lambda_n)^{1/2} \right]^2} \quad (2.13)$$

Denklem 2.13'e göre Z değerinin, termoelektrik çiftindeki termoelementlerin özelliklerini temsil ettiğini göstermektedir. Seebeck ve Peltier denklemlerinde, termoelementlerin özellikleri hem büyük, hem zıt işaretli olmalıdır. Bununla beraber ısı iletkenlik ve elektriksel direnç düşük olmalıdır. Denklem 2.13, her iki termoelementin özelliklerini içerdiğinden bulunan sonuçlar gerçeği tam yansıtmamaktadır. Bu yüzden tek termoelement hesaplar gibi Z değeri hesaplanmıştır. Buna göre Z;

$$Z_{p,n} = \frac{\alpha_{p,n}^2}{\rho_{p,n} \lambda_{p,n}} \quad (2.14)$$

Denklem 2.14'te p ve n termoelementlerinin değerleri birbirine eşit alınabilir. Bir başka deyişle $\alpha_p = -\alpha_n$, $\lambda_p \rho_p = \lambda_n \rho_n$ ve $Z = Z_p = Z_n$ olur. Bu durum sadece termoelektrik soğutmada kullanılan ve normal sıcaklıktaki termoelementler için geçerlidir (Rowe 1995).

2.2.4. Performans katsayısı

Sistemin performans katsayısı, elde edilen enerjinin verilen enerjiye oranıdır. Ve $\beta=Q_c/W$ olarak ifade edilir. W gerekli elektrik enerjisinin değeridir. Termokupl çiftinde termoelementler ayrı ayrı incelendiğinde;

$$W_p = \alpha_p I(T_2 - T_1) + I^2 \rho_p L_p / A_p \quad (2.15)$$

$$W_n = -\alpha_n I(T_2 - T_1) + I^2 \rho_n L_n / A_n$$

olarak yazılabilir. Elektrik gücü, hem Joule ısısından hem de Seebeck etkisinden etkilenmektedir. Toplam enerji;

$$W = (\alpha_p - \alpha_n) I(T_2 - T_1) + I^2 R \quad (2.16)$$

olur. Performans katsayısı (COP) denklemleri;

$$COP_{\text{teorik}} = \frac{Q_c}{W} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n) I T_1 - 1/2 I^2 R - K(T_2 - T_1)}{(\alpha_p - \alpha_n) I(T_2 - T_1) + I^2 R} \quad (2.17)$$

$$COP_{\text{gerçek}} = \frac{\frac{Z T_1^2}{2} - (T_2 - T_1)}{Z T_1 T_2} \quad (2.18)$$

En uygun akım, maksimum performans katsayısı denklemini $d\beta/dI$ 'yı sıfıra eşitleyerek bulunur. Bu akım;

$$I_{\text{max}} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_2 - T_1)}{R[(1 + Z T_m)^{1/2} - 1]} \quad (2.19)$$

Burada $T_m = (T_1 + T_2)/2$ 'ye eşittir ve ortalama sıcaklığı gösterir. Maksimum performans katsayısı denklemi;

$$\text{COP}_{\max} = \frac{T_1[(1+ZT_m)^{1/2} - (T_2/T_1)]}{(T_2 - T_1)[(1+ZT_m)^{1/2} + 1]} \quad (2.20)$$

Olarak ifade edilir.

2.2.5. Çok katlı soğutucular (Kaskat sistem)

Tek safhalı soğutucu kullanarak ısı belirli bir noktaya düşürüle biliniz. Çok düşük sıcaklıklar elde etmek için, termoelektrik soğutucular arka arkaya bağlanarak oluşturulan kaskat sistemlerle gerekli olan soğutma elde edilir. N katlı bir kaskat sistemde N'inci safha en düşük sıcaklıkta çalışan kısımdır. Böyle bir sistemin performans katsayısı;

$$\text{COP} = [(1 + 1/(\text{COP})^{-1})^N - 1]^{-1} \quad (2.21)$$

ile ifade edilir. Çok aşamalı soğutucular, altı ya da daha fazla aşamalı olabilirler ve özel uygulamalar için tasarlanırlar. kaskat sisteminin tipik özelliği piramitsel şekilde olmasıdır.

2.2.6. Termoelektrik soğutucuların avantaj ve dezavantajları

Termoelektrik soğutucuların diğer soğutma sistemlerine göre üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

- Hareketli herhangi parçası yoktur. Çok sık bakım yapılması gerekmez.
- Uzun ömürlüdürler. Ömür testlerinde sürekli olarak 100.000 saat çalışabildikleri görülmüştür.
- Termoelektrik soğutucu, CFC'ler gibi herhangi bir soğutucu akışkanı içermez. Dolayısıyla çevre ve doğa dostudurlar.
- Termoelektrik soğutucu, ısı pompası olarak tam tersinirdir. Isının yönü DC akımın yönü değiştirilerek kolayca değiştirilebilir.
- $\pm 0.1^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında çok hassas sıcaklık kontrolü sağlanabilir.
- Çok hassas ve küçük ortamlarda çalışabilirler.

Termoelektrik soğutucular çeşitli dezavantajlara sahiptirler. Bunlar:

- Soğutma ve ısıtma katsayıları (COP) çok küçüktür. 0.3-0.7 arasındadır. Oysa klasik soğutma makinelerinde bu değer 2-4 arasındadır.
- Yüksek soğutma yükleri için uygun değildir.
- Şu an için pahalı bir teknolojidir fakat son yıllarda bu konu üzerinde oldukça fazla çalışma yapılmaktadır.
- DC besleme gerektirir (Bulut 2005).

2.2.7. Termoelektrik soğutucuların kullanım alanları

Termoelektrik soğutucular yukarıda belirtilen avantajlarından dolayı, tıbbi cihazlardan, günlük hayatta kullandığımız birçok cihaza kadar birçok uygulamada yer bulmuştur. Çizelge 2.1’de termoelektrik soğutma ürünlerinin kullanım alanları ve uygulamaları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Termoelektrik soğutucuların kullanım ve uygulama alanları

Askeri/Uzay araştırmaları	Elektronik soğutma, soğutulan elbise, taşınabilir soğutucu, kızılötesi sensörlerin soğutulması, lazer diyotların soğutulması ve uzay teleskoplarında vb.
Bireysel	Mobil ve ev soğutucuları, araba soğutucuları, taşınabilir piknik soğutucuları, motorsiklet kasketi soğutucusu, taşınabilir insulin soğutucusu.
Laboratuvar ve bilimsel cihazlar	Kızılötesi sensörlerin soğutulması, lazer diyot soğutucuları, CCD soğutucusu, entegre devrelerin soğutulması, laboratuvar soğuk plaka, karıştırıcı soğutucu, soğuk oda, donma noktası referans banyosu, elektroforesis hücre soğutucusu.
Endüstriyel sıcaklık kontrolü	NEMA (ABD elektrik cihazları üreticileri birliği) ortamları, kritik elemanları sert çevre şartlarından koruması, PC mikroişlemcileri, mikroişlemcilerin ve bilgisayarların numerik kontrollerinde ve robotiklerde, yazıcı ve fotokopilerde mürekkep sıcaklığının dengelenmesi, CCD kameralarda.

Çeşitli diğer amaçlar	İlaç soğutucular (taşınabilir veya sabit), otel odaları soğutucuları, otomobil mini soğutucuları, otomobil koltuk soğutucuları, uçak içme suyu soğutucuları, yolcu otobüsü soğutucuları, gemi soğutucuları, karavan soğutucuları, kamyon soğutucusu, birçok tıbbi teşhis cihazları.
-----------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Aşağıda termoelektrik soğutma sisteminin uygulandığı bazı örnekler gösterilmektedir.



Şekil 2.9. CPU soğutucusu



Şekil 2.10. Lazer ve medikal uygulamalar için sıvı soğutucu

2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method, FEM)

2.3.1. Sonlu elemanlar yöntemine giriş

Sonlu elemanlar yöntemi, sonlu elemanlar diye adlandırılan küçük alanlar (üç-boyutlu durumlarda hacimler) içerisinde ilgilenilen bölgelerin alt bölümlerini içerir. Bu yöntemin çözümleri, analitik yöntemlerin ötesinde problemlerin geniş bir alanı için elde edilebilir. Düzgünlük, doğrusallık ve durağan koşulların kısıtlanması gibi analitik yöntemlerin zorlaştığı sınırlamaların üstesinden gelebilir. (Moses ve ark. 2003)

Ansys sonlu elemanlar programı büyük bir element arşivine sahiptir ve bu elementler; yapısal, termal, akışkan, akustik, elektromanyetik analizleri ve bu analiz tiplerinin birbirleriyle etkileşmesi şeklinde olan çiftlenmiş alan analizlerin yapılmasını mümkün kılar. Ansys çiftlenmiş alan, termal-yapısal, akışkan-yapısal, elektromanyetik-yapısal, termal-elektrik, yapısal-termal-elektrik, piezoelektrik, manyetik-yapısal ve elektrostatik-yapısal analizlerini içermektedir. Dolayısıyla, Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik ve fizik konularının birçok alanında başlıca çözüm tekniği haline gelmiştir.

Bölgenin ayrımı, sonlu eleman çözümlenmesinde ilk ve belki de en önemli basamaktır. Çünkü bölgeyi ayırma yolu bilgisayarın bellek gereksinimini, hesaplama zamanını ve sayısal sonuçların doğruluğunu etkileyecektir. Tüm bölge, alt bölgeler olarak belirtilen çok sayıda küçük bölgelere bölünür. Bu alt bölgeler genellikle elemanlar olarak belirtilir. Gerçekte düz veya eğri çizgi olan bir-boyutlu bir bölge için elemanlar orijinal çizgiyi oluştururken iç içe bağlanmış kısa çizgiler halindeki parçaları kullanmaktadır. İki-boyutlu bir bölge için, elemanlar genellikle küçük üçgen veya dikdörtgen şekindedirler. Tabi ki dikdörtgen elemanlar, dikdörtgen bölgeleri ayırmak için en uygundur. Üçgen olanlar da düzensiz bölgeler için kullanılabilirler. Üç-boyutlu bir çözümde ise; bölge tetrahedral, üçgen prizma veya dikdörtgenler prizmasına bölünebilir. Bunlar arasında tetrahedral olanlar en basit olanlarıdır ve keyfi hacim bölgelerine en iyi şekilde uyarlar (Jin 1993).

2.3.2. Termoelektrik analiz

Termoelektrik analizi Ansys Multifizik'te yapmak mümkündür ve çiftlenmiş alan menüsüne yeni eklenmiş element tipleri kullanıcılara daha yeterli ve daha kesin sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

Son zamanlara kadar Ansys termoelektrik analizi sadece Joule ısısı hesaplamaları için kullanılıyordu. Ancak son birkaç yıldır eklenen yeniliklerle artık Seebeck ve Peltier etkilerini hesaplamada da kullanılabilir.

Joule Isısı; Elektrik akımı taşıyan iletken üzerinde meydana gelen ısınmadır. Joule ısısı akımın karesiyle orantılıdır ve akım yönünden bağımsızdır.

Seebeck Etkisi; Termoelektrik malzemelerin uçları arasına sıcaklık farkı uygulandığında malzemelerin içinde Voltaj (Seebeck EMF) indüklenir. Bu indüklenen voltaj uygulanan sıcaklık farkıyla orantılıdır. Bu orantı katsayısı Seebeck katsayısı (α) olarak adlandırılır.

Thomson Etkisi; Düzgün ısıtılmamış termoelektrik malzeme içerisinden akım geçirildiğinde malzemedeki ısı emilir ya da malzeme içerisine ısı salınır. Thomson ısısı akım ile orantılıdır ve akımın yönü ters çevrildiğinde olay tersine döner.

2.3.3. Termoelektrik analizin uygulanması

Termoelektrik analiz statik hal (static) yada zamanla değişken (transient) olmak üzere iki farklı türde yapılabilir.

Termoelektrik analizi uygulamak için, element tiplerini ve malzeme özelliklerini belirlemek gerekir. Örneğin Joule ısısı için; elektriksel direnci (RSVX, RSVY, RSVZ) ve termal iletkenliği (KXX, KYY, KZZ) tanımlamak gerekmektedir. Eğer zamana bağlı analiz yapılacaksa bu özelliklere ilave olarak kütle yoğunluğu, özgül ısı ve entalpi değerlerinin de tanımlanması gerekmektedir. Bu özelliklerin hepsi sabit veya sıcaklığa bağlı olabilirler.

Zamana bağılı analizde PLANE 223, SOLID 226, yada SOLID 227 element tipleri kullanılır. Elektriksel etkinin zamana bağılı olarak değişimi isteniyorsa malzeme özelliği olarak elektriksel geçirgenlik de (PERX, PERY, PERZ) tanımlanmalıdır. Sadece termal etkinin zamana bağılı olarak değişimi isteniyorsa LINK 68, PLANE 67, SOLID 69, SOLID 5, SOLID 98 yada SHELL 157 element tipleri kullanılır. Yapılan termoelektrik analizin Seebeck-Peltier termoelektrik etkilerini de içermesi isteniliyorsa PLANE 223, SOLID 226, SOLID 227 element tiplerini kullanılmalıdır. Ve malzeme özelliklerine Seebeck katsayısı da eklenmelidir.

Analizde Thomson etkisi de hesaplanacaksa Seebeck katsayısının sıcaklığa bağılı olarak tanımlanması gerekir. Ve tüm girilen verilerin boyutları uyumlu olmalıdır. Örneğin akımı amper, voltajı volt giriyorsak, termal iletkenlik için birim W/mK olmalıdır. Sonuçta açığa çıkacak olan Joule ısısının birimi Watt.s olacaktır.

2.3.4. Termoelektrik sisteminin matematiksel eşitliklerinin yönetilmesi

Termoelektrik analizde ısı akışı;

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q} = \dot{q} \quad (2.22)$$

Eşitliği ile ifade edilir. Ve elektrik yükü süreklilik denklemi;

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.23)$$

İle verilir. Bu denklem termoelektrik süreklilik denklemleri ile birleştirilirse;

$$\vec{q} = [\Pi] \vec{j} - [\lambda] \vec{\nabla} T \quad (2.24)$$

$$\vec{j} = [\sigma] \cdot (\vec{E} - [\alpha] \vec{\nabla} T) \quad (2.25)$$

Eşitlikleri elde edilir.

Dielektrik madde için süreklilik denklemi;

$$\vec{D} = [\epsilon]\vec{E} \quad (2.26)$$

İle ifade edilir. Burada ρ yoğunluk (kg/m^3), C özgül ısı kapasitesi (J/kg.K), T mutlak sıcaklık (K), \dot{q} birim hacimdeki ısı üretimi (W/m^3), \vec{q} ısı akısı vektörü, \vec{J} elektriksel akım yoğunluğu vektörü (A/m^2), \vec{E} elektrik alan yoğunluğu vektörü (V/m), \vec{D} elektriksel akı yoğunluğu vektörü (C/m^2), $[\lambda]$ termal iletkenlik matrisi (W/mK), $[\sigma]$ elektriksel iletkenlik matrisi (S/m), $[\alpha]$ Seebeck katsayısı matrisi (V/K), $[\Pi]=T[\alpha]$ Peltier katsayısı matrisi (V), $[\epsilon]$ dielektrik geçirgenlik matrisidir (F/m).

Manyetik alanlar zamanla değişmediğinde $\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0$ olur. Ve elektrik skaler potansiyel φ 'den türetilebilir.

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi \quad (2.27)$$

Eşitlik 2.12 ve 2.15, Eşitlik 2.10 ve 2.11'de yerine konulduğunda termoelektrik sisteminin çiftlenmiş ifadeleri elde edilmiş olur.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla}([\Pi]\vec{J}) - \vec{\nabla}([\lambda]\vec{\nabla}T) = \dot{q} \quad (2.28)$$

$$\vec{\nabla}([\epsilon]\vec{\nabla} \frac{\partial \varphi}{\partial t}) + \vec{\nabla}([\sigma][\alpha]\vec{\nabla}T) + \vec{\nabla}([\sigma]\vec{\nabla}\varphi) = 0 \quad (2.29)$$

Eşitlik 2.16'da ısı üretim terimi \dot{q} , $\vec{J} \cdot \vec{E}$ elektriksel gücü içermektedir. Ve bu elektriksel güç Joule ısıısının oluşmasında ve Seebeck alanına karşı iş yapmada harcanır. ($[\alpha]\vec{\nabla}T$) (Antonova 2005).

2.3.5. Sonlu eleman formülasyonu

Termoelektrik sonlu eleman eşitliklerinin sistemi Galerkin tarafından uygulanan FEM ile elde edilebilir. Bu teknik ile sıcaklık ve elektriksel skaler potansiyel sonlu elemanlar üzerinden hesaplanabilir (Silvester 1996).

$$T = \vec{N} \vec{T}_e \quad (2.30)$$

$$\varphi = \vec{N} \vec{\varphi}_e \quad (2.31)$$

Eşitlik 2.18'de sıcaklık, Eşitlik 2.19 ise elektriksel skaler potansiyelin sonlu elemanlar üzerinden hesaplanması ifade edilmektedir.

Burada; N elemanların biçim fonksiyon vektörü, \vec{T}_e noktasal sıcaklık vektörü, $\vec{\varphi}_e$ noktasal elektriksel potansiyel vektörüdür. Sonuç olarak, termoelektrik sonlu eleman denklemlerinin çözüm sistemi;

$$\begin{bmatrix} C^{TT} & 0 \\ 0 & C^{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_e \\ \varphi_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K^{TT} & 0 \\ K^{\varphi T} & K^{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_e \\ \varphi_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varphi + \varphi^P + \varphi^e \\ I \end{Bmatrix} \quad (2.32)$$

Burada, eleman matrisleri ve yüklenen vektörler, eleman hacmi V üzerinden sayısal integrasyon yapılarak elde edilir.

$$K^{TT} = \int_V \nabla \vec{N} \cdot [\lambda] \cdot \nabla \vec{N} \cdot dV \quad : \text{Isıl katılık matrisi} \quad (2.33)$$

$$K^{\varphi\varphi} = \int_V \nabla \vec{N} \cdot [\sigma] \cdot \nabla \vec{N} \cdot dV \quad : \text{elektrik katılık matrisi} \quad (2.34)$$

$$K^{\varphi T} = \int_V \nabla \vec{N} \cdot [\sigma] \cdot [\alpha] \cdot \nabla \vec{N} \cdot dV \quad : \text{Seebeck katılık matrisi} \quad (2.35)$$

$$C^{TT} = \rho \int_V C \cdot \vec{N} \cdot \vec{N} \cdot dV \quad : \text{Isıl sönüm matrisi} \quad (2.36)$$

$$C^{\varphi\varphi} = \int_V \nabla \vec{N} \cdot [\varepsilon] \cdot \nabla \vec{N} dV \quad : \text{dielektrik sönüm matrisi} \quad (2.37)$$

$$Q^P = \int_V \nabla \vec{N} \cdot [\Pi] \cdot \vec{J} dV \quad : \text{Peltier ısı yüklemeye vektörü} \quad (2.38)$$

$$Q^e = \int_V \vec{N} \vec{E} \cdot \vec{J} dV \quad : \text{Elektrik gücü yüklemeye vektörü} \quad (2.39)$$

Q kombine edilmiş ısı üretim yüklemeleri vektörü, I Elektrik akımı yüklemeye vektörüdür.

Termal yüklemeler (Q) sıcaklık, ısı akış oranı, yüzey ısı akısı, konveksiyon ya da ısı yayılımı şeklinde olurken elektriksel yüklemeler (I), elektriksel potansiyel ve nokta elektrik akımı şeklinde olabilir. Malzeme matrislerinin ([λ], [σ], [α], [ε]) girişi diyagonal şekilde olur. Elektriksel özellikler, elektriksel direnç olarak girilir ve program bunu elektriksel iletkenliğe çevirir. İletkenlik [σ], sıcaklık değişiminin sıfır olduğu durumda değerlendirilir. ($\vec{\nabla} \cdot T = 0$) Yüklenen ısı iletkenliği de $\vec{J}=0$ olduğu durumda değerlendirilir. Bütün malzeme özellikleri sıcaklığa bağlı olabilir. Özellikle Thomson etkisini hesaplamak için Seebeck katsayılarının sıcaklığa bağlı değerleri yüklenmelidir.

Termal yüklemeye vektörü elektriksel çözüme bağlı olduğu için analiz doğrusal olmayan (non-linear) şekilde olur. Ve programın çözüme ulaşabilmesi için en az iki iterasyon yapması gerekir. Sıcaklık birimi eğer Kelvin dışında bir birim ise, sıcaklık sıfırdan mutlak sıfıra ayarlanmalıdır. Sıcaklık değişimi ve elektrik alan;

$$\nabla T = \nabla \vec{N} \cdot T_e \quad (2.40)$$

$$\vec{E} = -\nabla \vec{N} \cdot \varphi_e \quad (2.41)$$


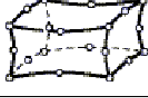

Eşitlikleri ile bulunur.

Bu Eşitlikler 2.12 ve 2.14'de yerine konulursa, \vec{J} , q ve \vec{D} alanlarının değerleri elde edilir Aynı zamanda her bir eleman başına Joule ısı üretim yoğunluğu da hesaplanabilir.

2.3.6. Termoelektrik analizde kullanılan element tipleri

Termoelektrik analiz; yapısal, termal ve elektriksel serbestlik derecelerine sahip üç farklı eleman tipi ile desteklenir. Bunlar Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Termoelektrik analizde kullanılan eleman tipleri

PLANE223		2-D 8-node quadrilateral
SOLID226		3-D 20-node hexahedron
SOLID227		3-D 10-node tetrahedron

2.3.7. Statik termoelektrik analizin adımları

Beş ana adımdan oluşan bir statik termoelektrik analiz yapmak için süreç aşağıdaki gibidir:

- Fiziksel çevreyi oluşturmak
- Modeli yapmak, ağ oluşturmak ve modeldeki her bir bölgenin fiziksel niteliklerini atamak
- Sınır şartlarını ve yüklemelerini uygulamak
- Çözümleri oluşturmak
- Sonuçları yeniden incelemek

2.3.7.1. Fiziksel Çevreyi Oluşturmak

Bir çözümlenme için fiziksel çevreyi tanımlamada fiziksel problemin matematiksel benzetişim modeli kurulur. Bu aşamada analiz başlığı, eleman tipleri ve seçenekleri, eleman koordinat sistemi, gerçek sabitler, birim sistemi ve madde özellikleri (iletken, yarı iletken, yalıtkan gibi) tanımlanır.

2.3.7.2. Modeli yapmak, ağ oluşturmak, ve modeldeki her bir bölgenin fiziksel niteliklerini atamak

Model yapıldıktan sonra daha önce tanımlanan eleman tipleri ve seçenekleri, eleman koordinat sistemi, gerçek sabitler, ve madde özellikleri her bir bölge için ayrı ayrı atanır. Daha sonra tüm model için ağ oluşturulur.

2.3.7.3. Sınır şartlarını ve yüklemeleri uygulamak

Üç-boyutlu statik termoelektrik analizde hem katı model (anahtar noktalar, çizgiler, alanlar ve hacimler) hem de sonlu elemanlar modelinde (düğüm noktaları ve elemanlar) sınır şartları ve yüklemeler uygulanır. Kullanılan ticari ANSYS programı çözüm boyunca ağ oluşturulan katı modelde uygulanan yüklemeleri otomatik olarak aktarır. Üç-boyutlu statik termoelektrik analiz için aşağıdaki sınır şartları ve yüklemeler seçilmektedir:

- Sınır şartları: Sıcaklık ve Elektriksel potansiyel.
- Uyarılma yüklemeleri: Elektriksel akım ve Isı akışı.

2.3.7.4. Çözümleri oluşturmak

Bu kısımda üç-boyutlu statik termoelektrik analiz, problemi çözmek için yapmanız gereken işlemleri tanımlar. Program çalıştırılarak fiziksel nitelikleri atanmış bölgelerdeki çözümü yapar.

2.3.7.5. Sonuçların yeniden incelenmesi

Elde edilen sonuçlar incelenerek deneysel değerlere uygunluğu karşılaştırılır ve gerekiyorsa yeniden hesaplama yaptırılır (Anonim 2002).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Termoelektrik Soğutma Sistemlerinde Kullanılan Malzemelerin Termoelektrik Parametreleri

Tezdeki amaç termoelektrik soğutma sistemini oluşturan modüllerin fiziksel boyutlarının soğutma kapasitesi üzerine etkisinin ANSYS Workbench benzeşim programı ile modellenerek sonuçlarının incelenmesidir. Bu nedenle aşağıda belirtilen dört farklı model üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Burada analizi yapılan tüm modellerde aynı termoelektrik parametreler kullanılmıştır. Fakat her birinde modüllerin fiziksel boyutları ve meydana getirdikleri termoelektrik soğutma sisteminin etki ettiği yüzey alanları farklıdır. Aşağıdaki Çizelge 3.1’de kullanılan modüllerin termoelektrik parametreleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Kullanılan malzemelerin termoelektrik parametreleri

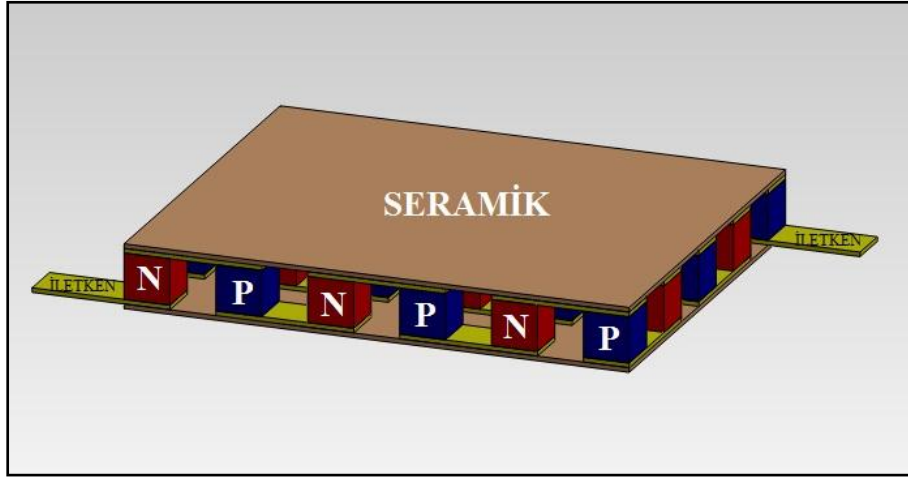
Malzemeler	Seebeck katsayısı ($\mu\text{V/K}$)	Isıl iletkenlik (W/m.K)	Elektriksel özdirenç ($\Omega\cdot\text{m}$)
Bi_2Te_3 (n-katkılı Bizmut tellür)	-287	1,2	$0,9\cdot 10^{-5}$
Bi_2Te_3 (p-katkılı Bizmut tellür)	287	1,2	$0,9\cdot 10^{-5}$
Ag (gümüş)	-	429	$15,87\cdot 10^{-9}$
Al_2O_3 (seramik)	-	30	$\sim 1\cdot 10^{12}$

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) İle Termoelektrik Soğutma Sistemlerinin Modellenmesi

Her biri farklı fiziksel boyutlara sahip modüllerin meydana getirdiği, dört farklı termoelektrik soğutma sisteminde; sıcak tarafın sıcaklığı sabit tutulup, soğuk tarafın sıcaklığı değiştirilerek farklı akım değerleri altında soğutma gücünün sıcaklık farkı (sıcak tarafın sıcaklığı – soğuk tarafın sıcaklığı) ile değişimi ticari ANSYS Workbench benzeşim programı (bkz Ek-1) kullanılarak incelenmiştir.

Bu çalışmada, termoelektrik soğutma sistemlerinin modellenmesi, soğutma gücünün termokupl sayısı (N) ile doğru orantılı olmasından ve sistemin tamamının analizinin yapılması mümkün olmamasından dolayı, 15 çiftten oluşan birim bölge referans olarak belirlenmiş ve 3-boyutlu olarak tasarlanmıştır. Modeldeki uzunluklar gerçek sisteme uygun olarak girilmiştir.

3.2.1. TEC-01'in modellenmesi

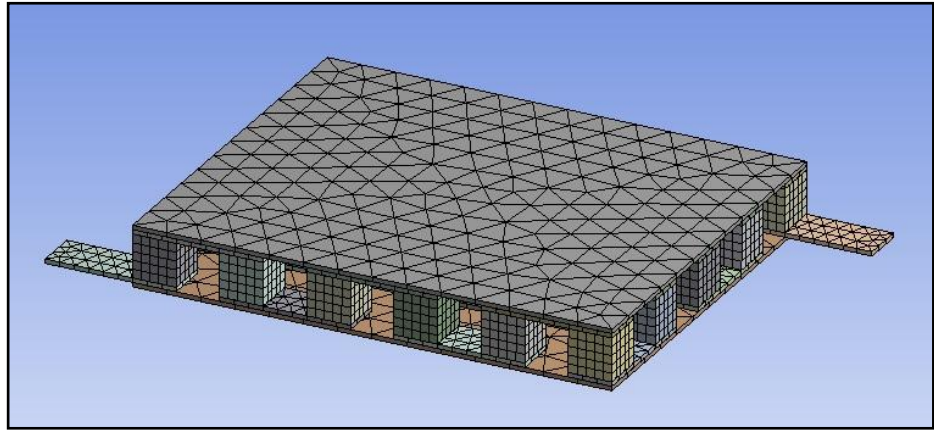


Şekil 3.1. TEC-01'in sonlu elemanlar yöntemi için yapılan modellenmesi

Şekil 3.1'de gösterilen modellemelerde N ve P tipi modüllerin boyutları; L (yükseklik)=1cm ve tabanın geometrisi kare olmakla birlikte bir kenarının uzunluğu (W)=1cm'dir. Bu sistemin etki ettiği yüzey yaklaşık olarak 100cm²'dir.

Şekil 3.1’de modelin üzerinde belirtilen N tipi n-katkılı bizmut tellür’den, P tipi p-katkılı bizmut tellür’den, iletken gümüşten ve yalıtkan seramikten oluşmaktadır. ANSYS Workbench benzeşim programı kullanılarak 3-boyutlu termoelektrik çözümlere için aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- 1- Şekil 3.1’deki modelde her bir bölgenin uzunlukları girilerek modelin çizimi SOLIDWORKS’te yapılmıştır.
- 2- Çizimi yapılan bu model ANSYS Workbench programına aktarılır.
- 3- Burada, modelde bulunan her bir parçanın (N tipi, P tipi, iletken ve yalıtkan gibi) ısıl ve elektriksel özellikleri sıcaklıktan bağımsız olarak atanır.
- 4- Analizler ANSYS Workbench’te yapıldığı için kullanılacak element tipleri program tarafından otomatik olarak seçilir. Sadece kullanılacak elemanların geometrik biçimleri (tetragonal, hexagonal) belirtilmiştir.



Şekil 3.2. TEC-01 modelinde oluşturulan ağ

- 5- Çözümlere için modelde ağ oluşturulmuştur. Modelde en uygun ağ oluşumu için çok sayıda tekrar yapılmıştır. Modelin analizinde sonucu etkileyecek kritik bölgeler olmadığı için, genelinde homojen dağılımlı bir ağ oluşturulması tercih edilmiştir.

İletkenler ve yalıtkan maddeler için serbest tetragonal ağ kullanılırken, N tipi ve P tipi maddeler için hexagonal ağ tercih edilmiştir (Bakınız ANSYS HELP).

6- Modelde sınır şartları olarak soğuk ve sıcak bölgelerin sıcaklıkları girilir ve sistemden geçirilen akımın topraklanması sağlanır. Yükleme için de gerçeğe uygun akım değerleri girilmiştir.

7- ANSYS Workbench benzeşim programı çalıştırılarak fiziksel nitelikleri atanmış bölgelerde çözümlene yapılmıştır.

3.2.2. TEC-02'nin modellenmesi

TEC-02'nin modellenmesi Şekil 3.1'de gösterilen TEC-01'in modellenmesi ile aynıdır. Farklı olarak, Şekil 3.1.'de gösterilen modellemede N ve P tipi modüllerin boyutları; L (yükseklik)=1mm ve tabanın geometrisi kare olmakla birlikte bir kenarının uzunluğu (W)=1mm'dir. Bu sistemin etki ettiği yüzey yaklaşık olarak 100mm^2 'dir. ANSYS Workbench benzeşim programı kullanılarak 3-boyutlu termoelektrik çözümlene için TEC-01'dekine benzer adımlar izlenmiştir. Analizde değişen tek şey sisteme uygulanan akım değerleridir. Bu modeldeki parçalarda da TEC-01'de kullanılan malzemeler kullanılmıştır.

3.2.3. TEC-03'ün modellenmesi

TEC-03'ün modellenmesi Şekil 3.1'de gösterilen TEC-01'in modellenmesi ile aynıdır. Farklı olarak, Şekil 3.1'de gösterilen modellemede N ve P tipi modüllerin boyutları; L (yükseklik)= $100\mu\text{m}$ ve tabanın geometrisi kare olmakla birlikte bir kenarının uzunluğu (W)= $100\mu\text{m}$ 'dir. Bu sistemin etki ettiği yüzey yaklaşık olarak $1,000,000\mu\text{m}^2$ (1mm^2)'dir. ANSYS Workbench benzeşim programı kullanılarak 3-boyutlu termoelektrik çözümlene için TEC-01'dekine benzer adımlar izlenmiştir. Analizde değişen tek şey sisteme uygulanan akım değerleridir. Bu modeldeki parçalarda da diğerlerinde kullanılan malzemeler kullanılmıştır.

3.2.4. TEC-04'ün modellenmesi

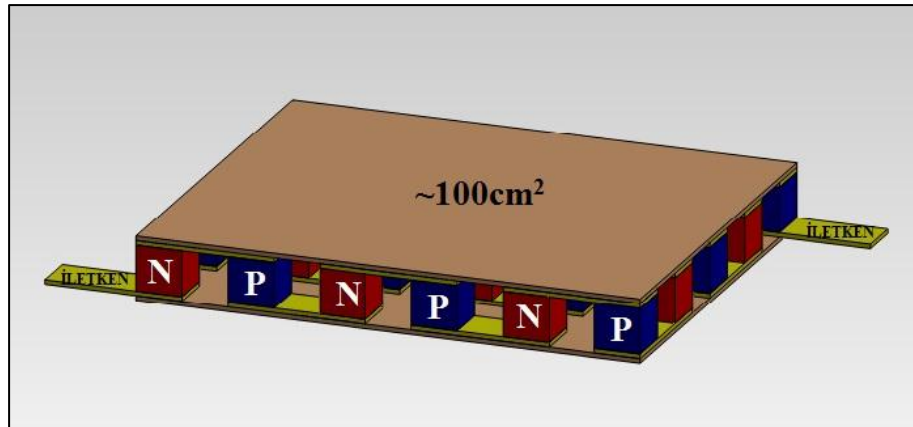
TEC-04'ün modellenmesi, Şekil 3.1'de gösterilen TEC-01'in modellenmesi ile aynıdır. Farklı olarak, Şekil 3.1'de gösterilen modellemede N ve P tipi modüllerin boyutları; L (yükseklik)=1 μ m ve tabanın geometrisi kare olmakla birlikte bir kenarının uzunluğu (W)=1 μ m'dir. Ve bu sistemin etki ettiği yüzey yaklaşık olarak 100 μ m²'dir. ANSYS Workbench benzeşim programı kullanılarak 3-boyutlu termoelektrik çözümler için TEC-01'dekine benzer adımlar izlenmiştir. Analizde değişen tek şey sisteme uygulanan akım değerleridir. Bu modeldeki parçalarda da diğerlerinde kullanılan malzemeler kullanılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Termoelektrik soğutma sistemleri; N tipi ve P tipi yarı iletken parçaların, iletken malzemeler aracılığıyla zikzak şeklinde elektriksel olarak seri, ısıl olarak paralel şekilde bağlanmasıyla oluşturulur. Analizleri yapılan tüm termoelektrik soğutma sistemleri 15 adet termo çiftten oluşmaktadır. Tüm modellerde modüllerin boyutları farklı fakat çift sayıları (N) aynıdır. Soğutma sistemleri üretilen soğuk havayı ve sıcak tarafta oluşan harareti atmak için elektriksel olarak yalıtkan, ısıl olarak çok iyi iletken bir malzeme olan seramik ile preslenmiştir (Şekil 3.1). Sistemi enerjilime için iki uçta bulunan iletken parçaların birinden elektrik akımı gönderilirken diğerinde topraklama yapılır. Bununla birlikte sistemde bir taraftan ısı emilirken, diğer tarafta ortama ısı salınır. Dolayısıyla sıcak ve soğuk bölge oluşturulmuş olur. Bundan sonra önemli olan şey oluşan soğuk hava ile sıcak havanın kontrolüdür. Sıcak bölgenin fanlar aracılığıyla yeteri kadar soğutulması gerekir eğer oluşan sıcak hava bölgeden yeteri kadar uzaklaştırılmazsa bu sistemin performansını kötü etkiler.

ANSYS Workbench benzeşim programı kullanılarak, her biri farklı fiziksel boyutlardan oluşan dört adet termoelektrik soğutma sisteminde sınır şartları ve gerekli yüklemeler uygulanması sonucunda meydana gelen soğutma gücü (Q_c), harcanan elektriksel güç (P) ve soğutma performans katsayısı (COP) değerleri hesaplatılmıştır.

4.1. TEC-01 Modelinin Analiz Verileri



Şekil 4.1. TEC-01'in modellenmesi

N ve P tipi yarı iletken malzemelerin, iletkenler ile birbirine elektriksel olarak seri, ısı olarak paralel şekilde bağlanmasıyla oluşturulmuş ve 15 adet termoelektrik modül içeren model-1 Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Bu modelde boyutlar cm boyutundadır. N ve P tipi yarı iletken parçaların boyutları; yükseklik (L) 1cm ve taban boyutları (1cm x 1cm)’dir. Bu termoelektrik soğutma sisteminin etki ettiği yüzey alanı Şekil 4.1.’de de belirtildiği gibi yaklaşık olarak 100cm²’dir. ANSYS Workbench ticari benzeşim programında yapılan termoelektrik analizde, sıcak bölgenin sıcaklığı 330K’de sabit tutularak soğuk bölgenin sıcaklığı (260K-325K) aralığında değiştirilmiştir. Bununla birlikte sistemden farklı miktarlarda akım geçirilmiştir. Bu sınır şartları ve yüklemelerin uygulanması sonucunda ortaya çıkan soğutma gücü (Qc), harcanan elektriksel güç (P) ve soğutma performans katsayısı (COP) değerleri hesaplatılmıştır. Bahsedilen bu niceliklerin sayısal değerleri Çizelge 4.1’den Çizelge 4.8’e kadar olan kısımda gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. TEC-01 modelinde T_c=260K için analiz verileri

T _c (K)	T _h (K)	I(A)	V(Volt)	P(W) 100cm ²	P(W) 1cm ²	Qc(W) 100cm ²	Qc(W) 1cm ²	β(COP)
260,0	330,0	15,0	1,022	15,333	0,153	5,190	0,052	0,338
260,0	330,0	20,0	1,163	23,264	0,233	13,869	0,139	0,596
260,0	330,0	30,0	1,445	43,356	0,434	29,127	0,291	0,672
260,0	330,0	35,0	1,586	55,517	0,555	35,708	0,357	0,643
260,0	330,0	40,0	1,727	69,088	0,691	41,592	0,416	0,602
260,0	330,0	45,0	1,868	84,069	0,841	46,779	0,468	0,556
260,0	330,0	50,0	2,009	100,460	1,005	51,270	0,513	0,510
260,0	330,0	60,0	2,291	137,472	1,375	58,164	0,582	0,423
260,0	330,0	70,0	2,573	180,124	1,801	62,283	0,623	0,346
260,0	330,0	80,0	2,855	228,424	2,284	63,630	0,636	0,279
260,0	330,0	85,0	2,996	254,686	2,547	63,267	0,633	0,248
260,0	330,0	90,0	3,137	282,357	2,824	62,213	0,622	0,220

Çizelge 4.2. TEC-01 modelinde $T_c=270K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) 100cm ²	P(W) 1cm ²	Qc(W) 100cm ²	Qc(W) 1cm ²	$\beta(COP)$
270,0	330,0	10,0	0,796	7,956	0,080	0,245	0,002	0,031
270,0	330,0	15,0	0,937	14,050	0,140	10,052	0,101	0,715
270,0	330,0	20,0	1,078	21,554	0,216	19,157	0,192	0,889
270,0	330,0	25,0	1,219	30,468	0,305	27,563	0,276	0,905
270,0	330,0	30,0	1,360	40,791	0,408	35,269	0,353	0,865
270,0	330,0	35,0	1,501	52,528	0,525	42,276	0,423	0,805
270,0	330,0	40,0	1,642	65,672	0,657	48,586	0,486	0,740
270,0	330,0	50,0	1,924	96,195	0,962	59,114	0,591	0,615
270,0	330,0	60,0	2,206	132,360	1,324	66,858	0,669	0,505
270,0	330,0	70,0	2,488	174,167	1,742	71,824	0,718	0,412
270,0	330,0	80,0	2,770	221,616	2,216	74,019	0,740	0,334
270,0	330,0	85,0	2,911	247,452	2,475	74,079	0,741	0,299
270,0	330,0	90,0	3,052	274,707	2,747	73,447	0,734	0,267

Çizelge 4.3. TEC-01 modelinde $T_c=280K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) 100cm ²	P(W) 1cm ²	Qc(W) 100cm ²	Qc(W) 1cm ²	$\beta(COP)$
280,0	330,0	10,0	0,710	7,100	0,071	4,679	0,047	0,659
280,0	330,0	15,0	0,851	12,767	0,128	14,913	0,149	1,168
280,0	330,0	20,0	0,992	19,844	0,198	24,446	0,244	1,232
280,0	330,0	30,0	1,274	38,229	0,382	41,411	0,414	1,083
280,0	330,0	40,0	1,556	62,256	0,623	55,579	0,556	0,893
280,0	330,0	45,0	1,698	76,388	0,764	61,617	0,616	0,807
280,0	330,0	50,0	1,839	91,930	0,919	66,958	0,670	0,728
280,0	330,0	60,0	2,121	127,242	1,272	75,551	0,756	0,594
280,0	330,0	70,0	2,403	168,203	1,682	81,366	0,814	0,484
280,0	330,0	80,0	2,685	214,800	2,148	84,408	0,844	0,393
280,0	330,0	85,0	2,826	240,219	2,402	84,890	0,849	0,353
280,0	330,0	90,0	2,967	267,048	2,670	84,682	0,847	0,317

Çizelge 4.4. TEC-01 modelinde $T_c=290K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) 100cm ²	P(W) 1cm ²	Qc(W) 100cm ²	Qc(W) 1cm ²	$\beta(COP)$
290,0	330,0	10,0	0,625	6,246	0,062	9,114	0,091	1,459
290,0	330,0	15,0	0,766	11,485	0,115	19,775	0,198	1,722
290,0	330,0	20,0	0,907	18,135	0,181	29,734	0,297	1,640
290,0	330,0	25,0	1,048	26,195	0,262	38,993	0,390	1,489
290,0	330,0	30,0	1,189	35,667	0,357	47,552	0,476	1,333
290,0	330,0	40,0	1,471	58,844	0,588	62,573	0,626	1,063
290,0	330,0	50,0	1,753	87,665	0,877	74,802	0,748	0,853
290,0	330,0	60,0	2,036	122,130	1,221	84,245	0,842	0,690
290,0	330,0	70,0	2,318	162,239	1,622	90,908	0,909	0,560
290,0	330,0	80,0	2,600	207,992	2,080	94,797	0,948	0,456
290,0	330,0	85,0	2,741	232,985	2,330	95,702	0,957	0,411
290,0	330,0	90,0	2,882	259,389	2,594	95,917	0,959	0,370

Çizelge 4.5. TEC-01 modelinde $T_c=300K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) 100cm ²	P(W) 1cm ²	Qc(W) 100cm ²	Qc(W) 1cm ²	$\beta(COP)$
300,0	330,0	10,0	0,539	5,390	0,054	13,548	0,135	2,513
300,0	330,0	20,0	0,821	16,425	0,164	35,023	0,350	2,132
300,0	330,0	30,0	1,104	33,105	0,331	53,694	0,537	1,622
300,0	330,0	35,0	1,245	43,561	0,436	61,979	0,620	1,423
300,0	330,0	40,0	1,386	55,428	0,554	69,566	0,696	1,255
300,0	330,0	50,0	1,668	83,400	0,834	82,646	0,826	0,991
300,0	330,0	60,0	1,950	117,012	1,170	92,938	0,929	0,794
300,0	330,0	70,0	2,233	156,275	1,563	100,450	1,005	0,643
300,0	330,0	80,0	2,515	201,184	2,012	105,190	1,052	0,523
300,0	330,0	85,0	2,656	225,752	2,258	106,510	1,065	0,472
300,0	330,0	90,0	2,797	251,739	2,517	107,150	1,072	0,426
300,0	330,0	95,0	2,938	279,129	2,791	107,100	1,071	0,384

Çizelge 4.6. TEC-01 modelinde $T_c=310K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) 100cm ²	P(W) 1cm ²	Qc(W) 100cm ²	Qc(W) 1cm ²	$\beta(COP)$
310,0	330,0	5,0	0,312	1,562	0,016	5,764	0,058	3,691
310,0	330,0	10,0	0,453	4,535	0,045	17,982	0,180	3,965
310,0	330,0	20,0	0,736	14,715	0,147	40,312	0,403	2,739
310,0	330,0	30,0	1,018	30,543	0,305	59,835	0,598	1,959
310,0	330,0	35,0	1,159	40,572	0,406	68,547	0,685	1,690
310,0	330,0	40,0	1,300	52,016	0,520	76,569	0,766	1,472
310,0	330,0	50,0	1,583	79,135	0,791	90,490	0,905	1,143
310,0	330,0	60,0	1,865	111,900	1,119	101,630	1,016	0,908
310,0	330,0	70,0	2,147	150,311	1,503	109,990	1,100	0,732
310,0	330,0	80,0	2,430	194,376	1,944	115,570	1,156	0,595
310,0	330,0	90,0	2,712	244,080	2,441	118,390	1,184	0,485
310,0	330,0	100,0	2,994	299,440	2,994	118,430	1,184	0,396

Çizelge 4.7. TEC-01 modelinde $T_c=320K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) 100cm ²	P(W) 1cm ²	Qc(W) 100cm ²	Qc(W) 1cm ²	$\beta(COP)$
320,0	330,0	5,0	0,227	1,134	0,011	9,771	0,098	8,617
320,0	330,0	10,0	0,368	3,679	0,037	22,417	0,224	6,093
320,0	330,0	15,0	0,509	7,637	0,076	34,360	0,344	4,499
320,0	330,0	20,0	0,650	13,006	0,130	45,600	0,456	3,506
320,0	330,0	25,0	0,791	19,787	0,198	56,139	0,561	2,837
320,0	330,0	30,0	0,933	27,980	0,280	65,977	0,660	2,358
320,0	330,0	40,0	1,215	48,600	0,486	83,553	0,836	1,719
320,0	330,0	50,0	1,497	74,870	0,749	98,334	0,983	1,313
320,0	330,0	60,0	1,780	106,788	1,068	110,330	1,103	1,033
320,0	330,0	70,0	2,062	144,354	1,444	119,530	1,195	0,828
320,0	330,0	80,0	2,345	187,560	1,876	125,960	1,260	0,672
320,0	330,0	90,0	2,627	236,430	2,364	129,620	1,296	0,548
320,0	330,0	100,0	2,909	290,940	2,909	130,510	1,305	0,449

Çizelge 4.8. TEC-01 modelinde $T_c=325K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) 100cm ²	P(W) 1cm ²	Q _c (W) 100cm ²	Q _c (W) 1cm ²	β(COP)
325,0	330,0	5,0	0,184	0,920	0,009	11,774	0,118	12,799
325,0	330,0	10,0	0,325	3,252	0,033	24,634	0,246	7,576
325,0	330,0	15,0	0,466	6,995	0,070	36,790	0,368	5,259
325,0	330,0	20,0	0,608	12,151	0,122	48,244	0,482	3,970
325,0	330,0	25,0	0,749	18,719	0,187	58,997	0,590	3,152
325,0	330,0	30,0	0,890	26,698	0,267	69,048	0,690	2,586
325,0	330,0	40,0	1,172	46,892	0,469	87,050	0,871	1,856
325,0	330,0	50,0	1,455	72,735	0,727	102,260	1,023	1,406
325,0	330,0	60,0	1,737	104,226	1,042	114,670	1,147	1,100
325,0	330,0	70,0	2,020	141,372	1,414	124,300	1,243	0,879
325,0	330,0	80,0	2,302	184,160	1,842	131,160	1,312	0,712
325,0	330,0	90,0	2,584	232,596	2,326	135,240	1,352	0,581
325,0	330,0	100,0	2,867	286,690	2,867	136,550	1,366	0,476

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de, termoelektrik modüllerin (1cm x 1cm x 1cm) oluşturduğu 100cm² yüzey alanı için, her bir T_c değerinde soğutma gücünün maksimum ve bunlara karşılık iki uç arasında oluşan voltaj değerlerinin ANSYS Workbench benzeşim programından elde edilen raporları gösterilmektedir.

T_c=260K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	63,63 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	63,63 W		

T_c=270K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	74,079 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	74,079 W		

T_c=280K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	84,89 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	84,89 W		

T_c=290K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	95,917 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	95,917 W		

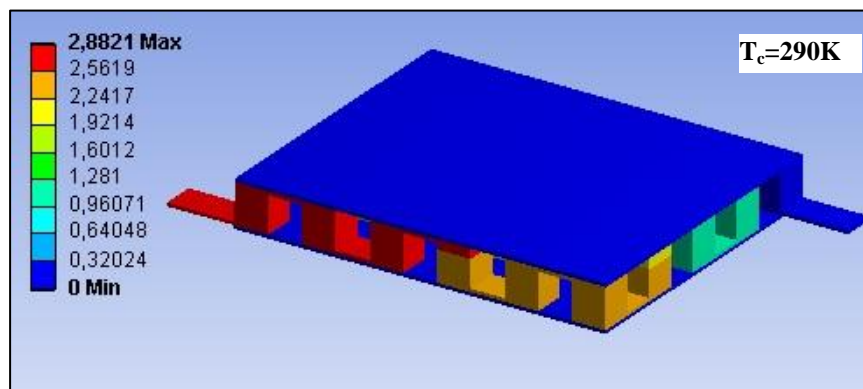
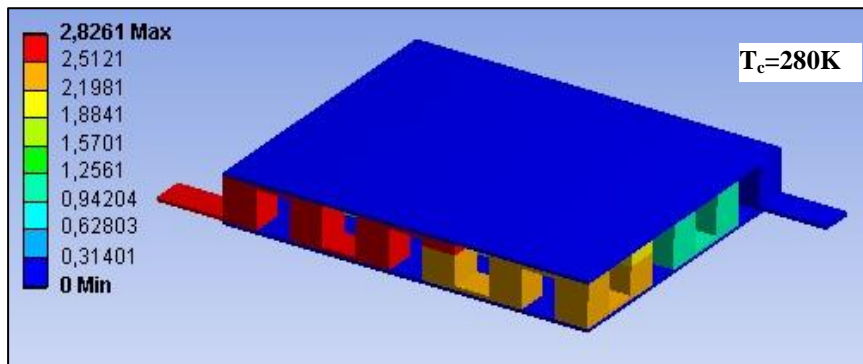
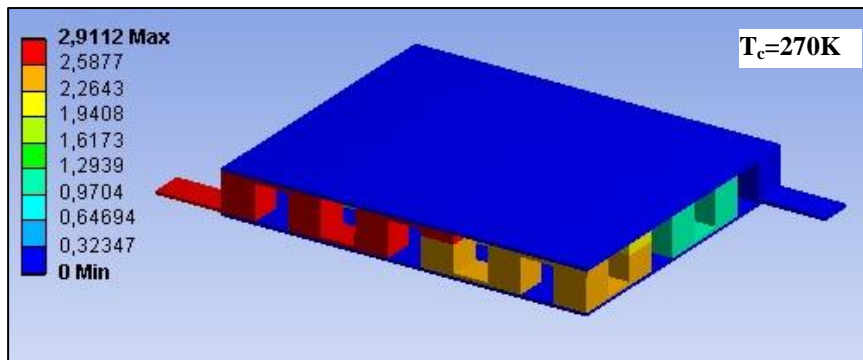
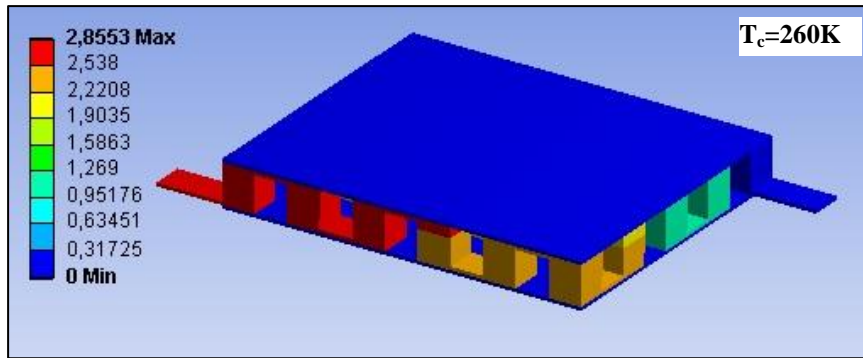
T_c=300K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	107,15 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	107,15 W		

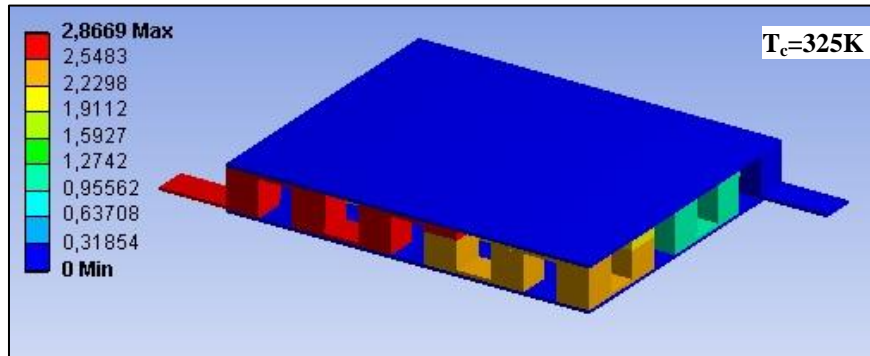
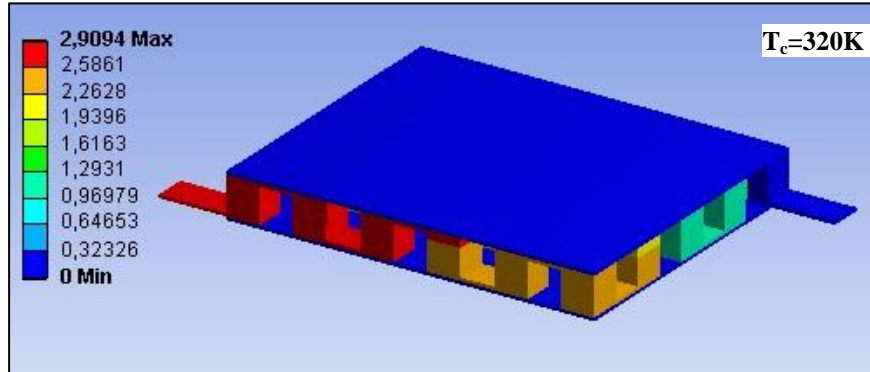
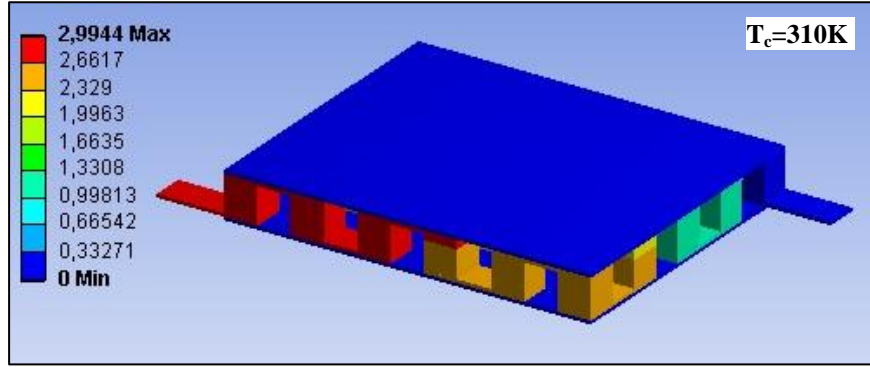
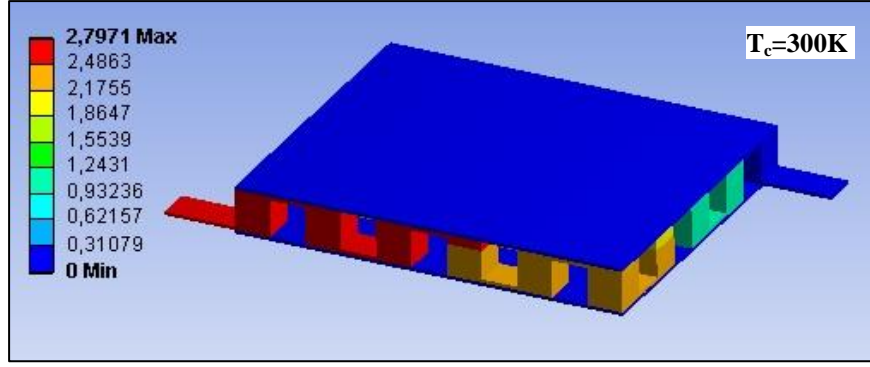
T_c=310K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	118,43 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	118,43 W		

T_c=320K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	130,51 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	130,51 W		

T_c=325K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	136,55 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	136,55 W		

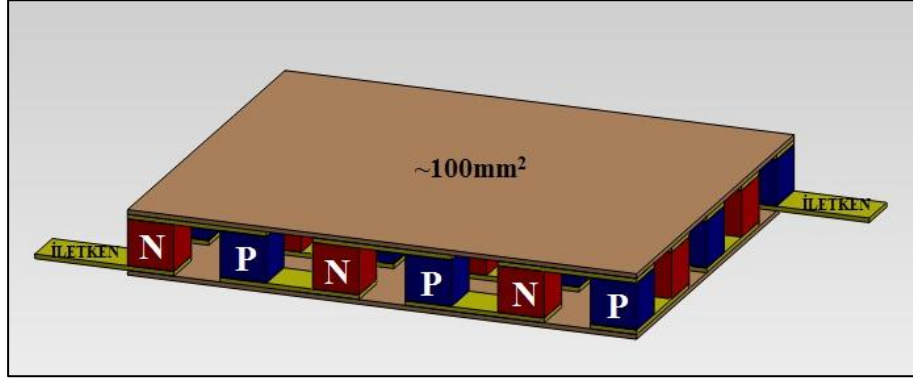
Şekil 4.2. TEC-01 modelinde T_c=260K-325K aralığında yapılan her bir analiz için maksimum soğutma gücünün elde edildiği analiz raporları





Şekil 4.3. TEC-01 modelinde $T_c=260K-325K$ aralığında yapılan ve maksimum soğutma gücüne karşılık iki uç arasında elde edilen voltaj verilerinin analiz raporları

4.2. TEC-02 Modelinin Analiz Verileri



Şekil 4.4. TEC-02'nin modellenmesi

N ve P tipi yarı iletken malzemelerin, iletkenler ile birbirine elektriksel olarak seri, ısı olarak paralel şekilde bağlanmasıyla oluşturulmuş ve 15 adet termoelektrik modül içeren model-2 Şekil 4.4'de gösterilmektedir. Bu modelde boyutlar mm boyutundadır. N ve P tipi yarı iletken parçaların boyutları; yükseklik (L) 1mm ve taban boyutları (1mm x 1mm)'dir. Bu termoelektrik soğutma sisteminin etki ettiği yüzey alanı Şekil 4.4'de de belirtildiği gibi yaklaşık olarak 100mm²'dir. ANSYS Workbench ticari benzeşim programında yapılan termoelektrik analizde, sıcak bölgenin sıcaklığı sabit (330K) tutularak soğuk bölgenin sıcaklığı (260K-325K) değiştirilmiştir. Bununla birlikte sistemden farklı miktarlarda akım geçirilmiştir. Bu sınır şartları ve yüklemelerin uygulanması sonucunda ortaya çıkan soğutma gücü (Qc), harcanan elektriksel güç (P) ve soğutma performans katsayısı (COP) hesaplatılmıştır. Bahsedilen bu niceliklerin sayısal değerleri Çizelge 4.9'dan Çizelge 4.16'ya kadar olan kısımda gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. TEC-02 modelinde $T_c=260K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) 100mm ²	P(W) 1cm ²	Q _c (W) 100mm ²	Q _c (W) 1cm ²	β(COP)
260,0	330,0	1,3	0,966	1,255	1,255	0,152	0,152	0,121
260,0	330,0	1,5	1,022	1,533	1,533	0,519	0,519	0,338
260,0	330,0	2,0	1,163	2,326	2,326	1,387	1,387	0,596
260,0	330,0	2,5	1,304	3,261	3,261	2,185	2,185	0,670
260,0	330,0	3,0	1,445	4,336	4,336	2,913	2,913	0,672
260,0	330,0	4,0	1,727	6,909	6,909	4,159	4,159	0,602
260,0	330,0	5,0	2,009	10,046	10,046	5,127	5,127	0,510
260,0	330,0	6,0	2,291	13,747	13,747	5,816	5,816	0,423
260,0	330,0	7,0	2,573	18,012	18,012	6,228	6,228	0,346
260,0	330,0	8,0	2,855	22,842	22,842	6,363	6,363	0,279
260,0	330,0	9,0	3,137	28,236	28,236	6,221	6,221	0,220
260,0	330,0	10,0	3,419	34,194	34,194	5,804	5,804	0,170

Çizelge 4.10. TEC-02 modelinde $T_c=270K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) 100mm ²	P(W) 1cm ²	Q _c (W) 100mm ²	Q _c (W) 1cm ²	β(COP)
270,0	330,0	1,0	0,796	0,796	0,796	0,025	0,025	0,031
270,0	330,0	1,5	0,937	1,405	1,405	1,005	1,005	0,715
270,0	330,0	2,0	1,078	2,155	2,155	1,916	1,916	0,889
270,0	330,0	2,5	1,219	3,047	3,047	2,756	2,756	0,905
270,0	330,0	3,0	1,360	4,079	4,079	3,527	3,527	0,865
270,0	330,0	4,0	1,642	6,567	6,567	4,859	4,859	0,740
270,0	330,0	5,0	1,924	9,620	9,620	5,911	5,911	0,615
270,0	330,0	6,0	2,206	13,236	13,236	6,686	6,686	0,505
270,0	330,0	7,0	2,488	17,417	17,417	7,182	7,182	0,412
270,0	330,0	8,0	2,770	22,162	22,162	7,402	7,402	0,334
270,0	330,0	9,0	3,052	27,471	27,471	7,345	7,345	0,267
270,0	330,0	10,0	3,334	33,344	33,344	7,012	7,012	0,210

Çizelge 4.11. TEC-02 modelinde $T_c=280K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) 100mm ²	P(W) 1cm ²	Q _c (W) 100mm ²	Q _c (W) 1cm ²	β(COP)
280,0	330,0	1,0	0,710	0,710	0,710	0,468	0,468	0,659
280,0	330,0	1,5	0,851	1,277	1,277	1,491	1,491	1,168
280,0	330,0	2,0	0,992	1,984	1,984	2,445	2,445	1,232
280,0	330,0	2,5	1,133	2,833	2,833	3,328	3,328	1,175
280,0	330,0	3,0	1,274	3,823	3,823	4,141	4,141	1,083
280,0	330,0	4,0	1,556	6,226	6,226	5,558	5,558	0,893
280,0	330,0	5,0	1,839	9,193	9,193	6,696	6,696	0,728
280,0	330,0	6,0	2,121	12,724	12,724	7,555	7,555	0,594
280,0	330,0	7,0	2,403	16,820	16,820	8,137	8,137	0,484
280,0	330,0	8,0	2,685	21,480	21,480	8,441	8,441	0,393
280,0	330,0	9,0	2,967	26,705	26,705	8,468	8,468	0,317
280,0	330,0	10,0	3,249	32,494	32,494	8,219	8,219	0,253

Çizelge 4.12. TEC-02 modelinde $T_c=290K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) 100mm ²	P(W) 1cm ²	Q _c (W) 100mm ²	Q _c (W) 1cm ²	β(COP)
290,0	330,0	1,0	0,625	0,625	0,625	0,911	0,911	1,459
290,0	330,0	1,5	0,766	1,148	1,148	1,978	1,978	1,722
290,0	330,0	2,0	0,907	1,813	1,813	2,973	2,973	1,640
290,0	330,0	2,5	1,048	2,620	2,620	3,899	3,899	1,489
290,0	330,0	3,0	1,189	3,567	3,567	4,755	4,755	1,333
290,0	330,0	4,0	1,471	5,884	5,884	6,257	6,257	1,063
290,0	330,0	5,0	1,753	8,767	8,767	7,480	7,480	0,853
290,0	330,0	6,0	2,036	12,213	12,213	8,425	8,425	0,690
290,0	330,0	7,0	2,318	16,224	16,224	9,091	9,091	0,560
290,0	330,0	8,0	2,600	20,799	20,799	9,480	9,480	0,456
290,0	330,0	9,0	2,882	25,939	25,939	9,592	9,592	0,370
290,0	330,0	10,0	3,164	31,644	31,644	9,427	9,427	0,298

Çizelge 4.13. TEC-02 modelinde $T_c=300K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	$I(A)$	$V(Volt)$	$P(W)$ $100mm^2$	$P(W)$ $1cm^2$	$Q_c(W)$ $100mm^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
300,0	330,0	1,0	0,539	0,539	0,539	1,355	1,355	2,513
300,0	330,0	1,5	0,680	1,020	1,020	2,464	2,464	2,415
300,0	330,0	2,0	0,821	1,643	1,643	3,502	3,502	2,132
300,0	330,0	2,5	0,962	2,406	2,406	4,471	4,471	1,858
300,0	330,0	3,0	1,104	3,311	3,311	5,369	5,369	1,622
300,0	330,0	4,0	1,386	5,543	5,543	6,957	6,957	1,255
300,0	330,0	5,0	1,668	8,340	8,340	8,265	8,265	0,991
300,0	330,0	6,0	1,950	11,701	11,701	9,294	9,294	0,794
300,0	330,0	7,0	2,233	15,628	15,628	10,045	10,045	0,643
300,0	330,0	8,0	2,515	20,118	20,118	10,519	10,519	0,523
300,0	330,0	9,0	2,797	25,174	25,174	10,715	10,715	0,426
300,0	330,0	10,0	3,079	30,794	30,794	10,635	10,635	0,345

Çizelge 4.14. TEC-02 modelinde $T_c=310K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	$I(A)$	$V(Volt)$	$P(W)$ $100mm^2$	$P(W)$ $1cm^2$	$Q_c(W)$ $100mm^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
310,0	330,0	1,0	0,453	0,453	0,453	1,798	1,798	3,965
310,0	330,0	1,5	0,595	0,892	0,892	2,950	2,950	3,307
310,0	330,0	2,0	0,736	1,472	1,472	4,031	4,031	2,739
310,0	330,0	2,5	0,877	2,192	2,192	5,042	5,042	2,300
310,0	330,0	3,0	1,018	3,054	3,054	5,984	5,984	1,959
310,0	330,0	4,0	1,300	5,202	5,202	7,656	7,656	1,472
310,0	330,0	5,0	1,583	7,914	7,914	9,049	9,049	1,143
310,0	330,0	6,0	1,865	11,190	11,190	10,163	10,163	0,908
310,0	330,0	7,0	2,147	15,031	15,031	10,999	10,999	0,732
310,0	330,0	8,0	2,430	19,438	19,438	11,557	11,557	0,595
310,0	330,0	9,0	2,712	24,408	24,408	11,839	11,839	0,485
310,0	330,0	10,0	2,994	29,944	29,944	11,843	11,843	0,396

Çizelge 4.15. TEC-02 modelinde $T_c=320K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) 100mm ²	P(W) 1cm ²	Q _c (W) 100mm ²	Q _c (W) 1cm ²	β(COP)
320,0	330,0	0,5	0,227	0,113	0,113	0,977	0,977	8,617
320,0	330,0	1,0	0,368	0,368	0,368	2,242	2,242	6,093
320,0	330,0	2,0	0,650	1,301	1,301	4,560	4,560	3,506
320,0	330,0	3,0	0,933	2,798	2,798	6,598	6,598	2,358
320,0	330,0	4,0	1,215	4,860	4,860	8,355	8,355	1,719
320,0	330,0	5,0	1,497	7,487	7,487	9,833	9,833	1,313
320,0	330,0	6,0	1,780	10,679	10,679	11,033	11,033	1,033
320,0	330,0	7,0	2,062	14,435	14,435	11,953	11,953	0,828
320,0	330,0	8,0	2,345	18,757	18,757	12,596	12,596	0,672
320,0	330,0	9,0	2,627	23,643	23,643	12,962	12,962	0,548
320,0	330,0	10,0	2,909	29,094	29,094	13,051	13,051	0,449

Çizelge 4.16. TEC-02 modelinde $T_c=325K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) 100mm ²	P(W) 1cm ²	Q _c (W) 100mm ²	Q _c (W) 1cm ²	β(COP)
325,0	330,0	0,5	0,184	0,092	0,092	1,177	1,177	12,799
325,0	330,0	1,0	0,325	0,325	0,325	2,463	2,463	7,576
325,0	330,0	2,0	0,608	1,215	1,215	4,824	4,824	3,970
325,0	330,0	3,0	0,890	2,670	2,670	6,905	6,905	2,586
325,0	330,0	4,0	1,172	4,689	4,689	8,705	8,705	1,856
325,0	330,0	5,0	1,455	7,274	7,274	10,226	10,226	1,406
325,0	330,0	6,0	1,737	10,423	10,423	11,467	11,467	1,100
325,0	330,0	7,0	2,020	14,137	14,137	12,430	12,430	0,879
325,0	330,0	8,0	2,302	18,416	18,416	13,116	13,116	0,712
325,0	330,0	9,0	2,584	23,260	23,260	13,524	13,524	0,581
325,0	330,0	10,0	2,867	28,669	28,669	13,655	13,655	0,476

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da, 100mm² yüzey alanı için, her bir T_c değerinde soğutma gücünün maksimum ve bunlara karşılık iki uç arasında oluşan voltaj değerlerinin ANSYS Workbench benzeşim programından elde edilen raporları gösterilmektedir.

T_c=260K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	6,363 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	6,363 W		

T_c=270K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	7,4019 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	7,4019 W		

T_c=280K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	8,4682 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	8,4682 W		

T_c=290K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	9,5917 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	9,5917 W		

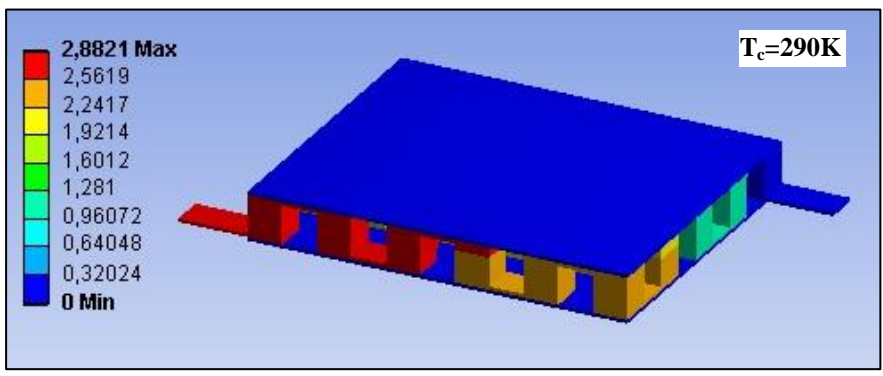
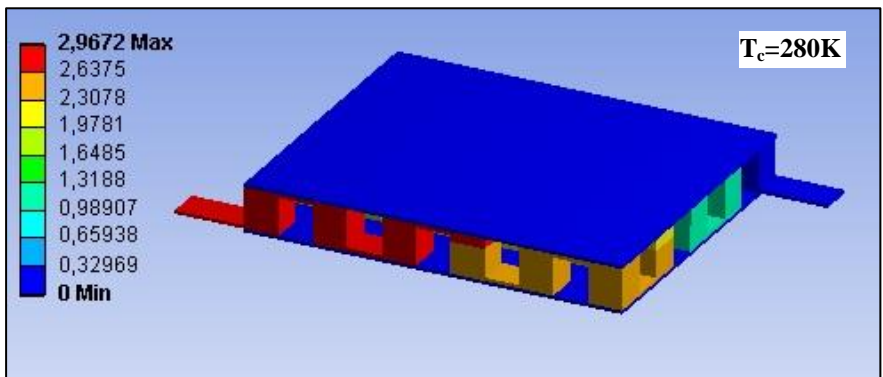
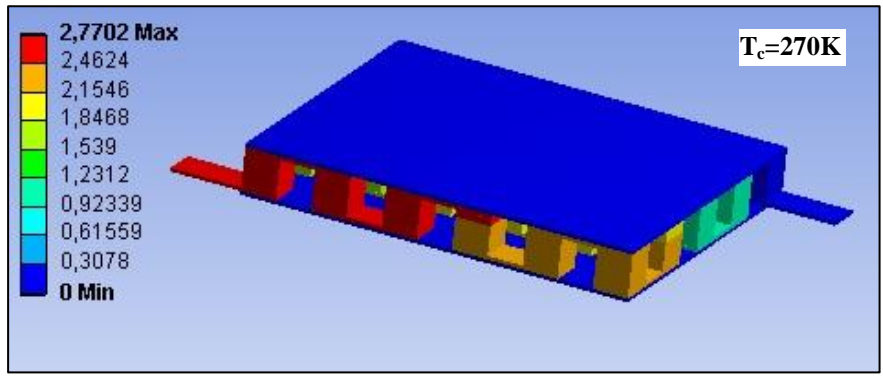
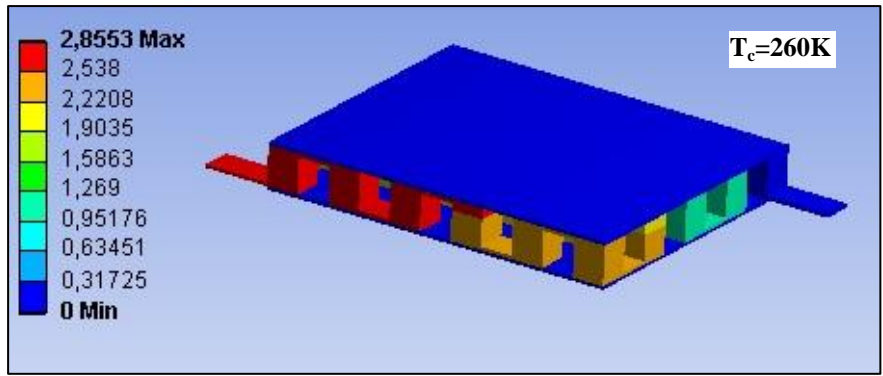
T_c=300K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	10,715 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	10,715 W		

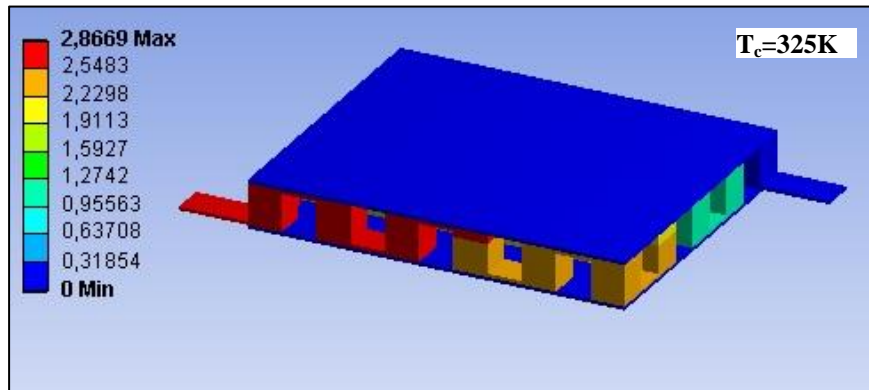
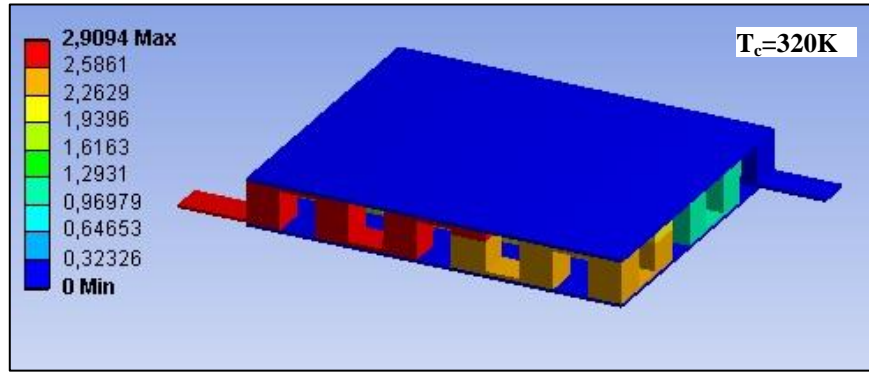
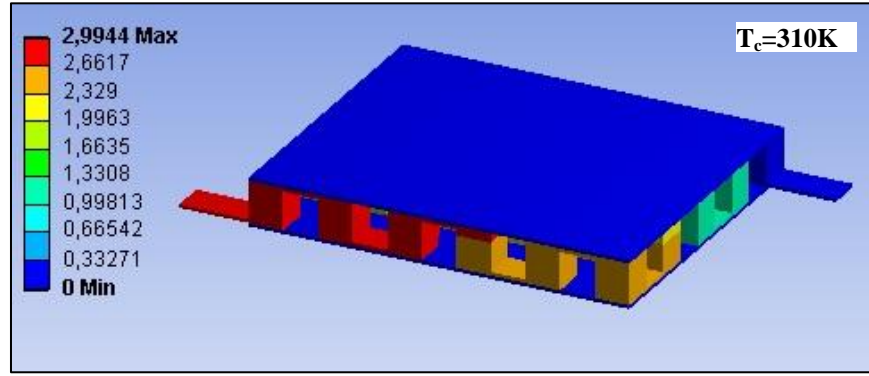
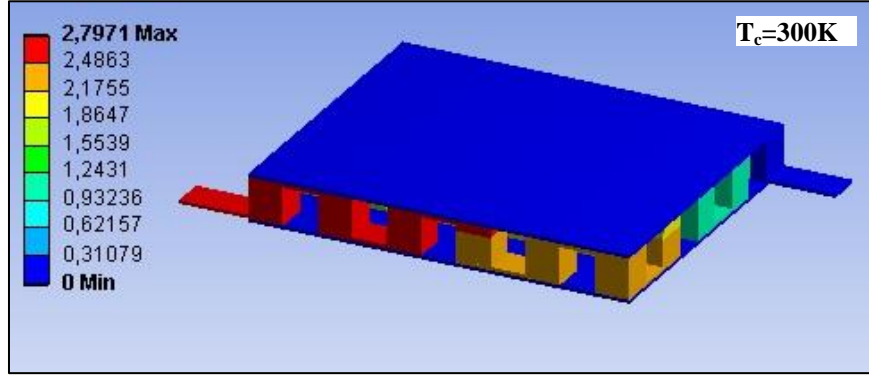
T_c=310K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	11,843 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	11,843 W		

T_c=320K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	13,051 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	13,051 W		

T_c=325K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	13,655 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	13,655 W		

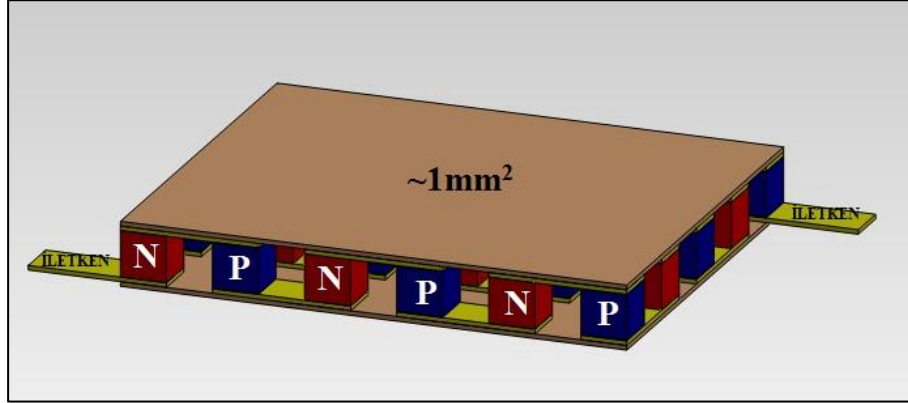
Şekil 4.5. TEC-02 modelinde T_c=260K-325K aralığında yapılan her bir analiz için maksimum soğutma gücünün elde edildiği analiz raporları





Şekil 4.6. TEC-02 modelinde $T_c=260K-325K$ aralığında yapılan ve maksimum soğutma gücüne karşılık iki uç arasında elde edilen voltaj verilerinin analiz raporları

4.3. TEC-03 Modelinin Analiz Verileri



Şekil 4.7. TEC-03'ün modellenmesi

N ve P tipi yarı iletken malzemelerin, iletkenler ile birbirine elektriksel olarak seri, ısı olarak paralel şekilde bağlanmasıyla oluşturulmuş ve 15 adet termoelektrik modül çifti içeren model-3 Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Bu modelde boyutlar μm boyutundadır. N ve P tipi yarı iletken parçaların boyutları; yükseklik (L) $100\mu\text{m}$ ve taban boyutları ($100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$)'dir. Bu termoelektrik soğutma sisteminin etki ettiği yüzey alanı Şekil 4.7.'de de belirtildiği gibi yaklaşık olarak 1mm^2 'dir. ANSYS Workbench ticari benzeşim programında yapılan termoelektrik analizde, sıcak bölgenin sıcaklığı sabit 330K tutularak soğuk bölgenin sıcaklığı (260K - 325K) değiştirilmiştir. Bununla birlikte sistemden farklı miktarlarda akım geçirilmiştir. Bu sınır şartları ve yüklemelerin uygulanması sonucunda ortaya çıkan soğutma gücü (Q_c), harcanan elektriksel güç (P) ve soğutma performans katsayısı (COP) değerleri hesaplatılmıştır. Bahsedilen bu niceliklerin sayısal değerleri Çizelge 4.17'den Çizelge 4.24'e kadar olan kısımda gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. TEC-03 modelinde $T_c=260K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) $1*10^6\mu m^2$	P(W) $1cm^2$	$Q_c(W)$ $1*10^6\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
260,0	330,0	0,15	1,022	0,153	15,333	0,052	5,190	0,338
260,0	330,0	0,20	1,163	0,233	23,264	0,139	13,869	0,596
260,0	330,0	0,25	1,304	0,326	32,605	0,218	21,848	0,670
260,0	330,0	0,30	1,445	0,434	43,356	0,291	29,128	0,672
260,0	330,0	0,40	1,727	0,691	69,088	0,416	41,593	0,602
260,0	330,0	0,50	2,009	1,005	100,460	0,513	51,270	0,510
260,0	330,0	0,60	2,291	1,375	137,472	0,582	58,164	0,423
260,0	330,0	0,70	2,573	1,801	180,124	0,623	62,283	0,346
260,0	330,0	0,80	2,855	2,284	228,424	0,636	63,630	0,279
260,0	330,0	0,90	3,137	2,824	282,357	0,622	62,213	0,220
260,0	330,0	1,00	3,419	3,419	341,940	0,580	58,036	0,170

Çizelge 4.18. TEC-03 modelinde $T_c=270K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) $1*10^6\mu m^2$	P(W) $1cm^2$	$Q_c(W)$ $1*10^6\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
270,0	330,0	0,15	0,937	0,140	14,050	0,101	10,052	0,715
270,0	330,0	0,20	1,078	0,216	21,554	0,192	19,157	0,889
270,0	330,0	0,25	1,219	0,305	30,468	0,276	27,563	0,905
270,0	330,0	0,30	1,360	0,408	40,791	0,353	35,269	0,865
270,0	330,0	0,40	1,642	0,657	65,672	0,486	48,586	0,740
270,0	330,0	0,50	1,924	0,962	96,195	0,591	59,114	0,615
270,0	330,0	0,60	2,206	1,324	132,360	0,669	66,858	0,505
270,0	330,0	0,70	2,488	1,742	174,167	0,718	71,825	0,412
270,0	330,0	0,80	2,770	2,216	221,616	0,740	74,019	0,334
270,0	330,0	0,90	3,052	2,747	274,707	0,734	73,447	0,267
270,0	330,0	1,00	3,334	3,334	333,440	0,701	70,115	0,210

Çizelge 4.19. TEC-03 modelinde $T_c=280K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	$P(W)$ $1*10^6\mu m^2$	$P(W)$ $1cm^2$	$Q_c(W)$ $1*10^6\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
280,0	330,0	0,15	0,851	0,128	12,767	0,149	14,913	1,168
280,0	330,0	0,20	0,992	0,198	19,844	0,244	24,446	1,232
280,0	330,0	0,25	1,133	0,283	28,333	0,333	33,278	1,175
280,0	330,0	0,30	1,274	0,382	38,229	0,414	41,411	1,083
280,0	330,0	0,40	1,556	0,623	62,256	0,556	55,579	0,893
280,0	330,0	0,50	1,839	0,919	91,930	0,670	66,958	0,728
280,0	330,0	0,60	2,121	1,272	127,242	0,756	75,551	0,594
280,0	330,0	0,70	2,403	1,682	168,203	0,814	81,366	0,484
280,0	330,0	0,80	2,685	2,148	214,800	0,844	84,408	0,393
280,0	330,0	0,90	2,967	2,670	267,048	0,847	84,682	0,317
280,0	330,0	1,00	3,249	3,249	324,940	0,822	82,195	0,253

Çizelge 4.20. TEC-03 modelinde $T_c=290K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	$P(W)$ $1*10^6\mu m^2$	$P(W)$ $1cm^2$	$Q_c(W)$ $1*10^6\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
290,0	330,0	0,15	0,766	0,115	11,485	0,198	19,775	1,722
290,0	330,0	0,20	0,907	0,181	18,135	0,297	29,734	1,640
290,0	330,0	0,25	1,048	0,262	26,195	0,390	38,993	1,489
290,0	330,0	0,30	1,189	0,357	35,667	0,476	47,552	1,333
290,0	330,0	0,40	1,471	0,588	58,844	0,626	62,573	1,063
290,0	330,0	0,50	1,753	0,877	87,665	0,748	74,802	0,853
290,0	330,0	0,60	2,036	1,221	122,130	0,842	84,245	0,690
290,0	330,0	0,70	2,318	1,622	162,239	0,909	90,908	0,560
290,0	330,0	0,80	2,600	2,080	207,992	0,948	94,797	0,456
290,0	330,0	0,90	2,882	2,594	259,389	0,959	95,917	0,370
290,0	330,0	1,00	3,164	3,164	316,440	0,943	94,274	0,298

Çizelge 4.21. TEC-03 modelinde $T_c=300K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	$P(W)$ $1*10^6\mu m^2$	$P(W)$ $1cm^2$	$Q_c(W)$ $1*10^6\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
300,0	330,0	0,10	0,539	0,054	5,390	0,135	13,548	2,513
300,0	330,0	0,20	0,821	0,164	16,425	0,350	35,023	2,132
300,0	330,0	0,25	0,962	0,241	24,059	0,447	44,709	1,858
300,0	330,0	0,30	1,104	0,331	33,105	0,537	53,694	1,622
300,0	330,0	0,40	1,386	0,554	55,428	0,696	69,566	1,255
300,0	330,0	0,50	1,668	0,834	83,400	0,826	82,646	0,991
300,0	330,0	0,60	1,950	1,170	117,012	0,929	92,939	0,794
300,0	330,0	0,70	2,233	1,563	156,275	1,005	100,450	0,643
300,0	330,0	0,80	2,515	2,012	201,184	1,052	105,190	0,523
300,0	330,0	0,90	2,797	2,517	251,739	1,072	107,150	0,426
300,0	330,0	1,00	3,079	3,079	307,940	1,064	106,350	0,345

Çizelge 4.22. TEC-03 modelinde $T_c=310K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	$P(W)$ $1*10^6\mu m^2$	$P(W)$ $1cm^2$	$Q_c(W)$ $1*10^6\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
310,0	330,0	0,10	0,453	0,045	4,535	0,180	17,982	3,965
310,0	330,0	0,20	0,736	0,147	14,715	0,403	40,312	2,739
310,0	330,0	0,25	0,877	0,219	21,923	0,504	50,424	2,300
310,0	330,0	0,30	1,018	0,305	30,543	0,598	59,835	1,959
310,0	330,0	0,40	1,300	0,520	52,016	0,766	76,560	1,472
310,0	330,0	0,50	1,583	0,791	79,135	0,905	90,490	1,143
310,0	330,0	0,60	1,865	1,119	111,900	1,016	101,630	0,908
310,0	330,0	0,70	2,147	1,503	150,311	1,100	109,990	0,732
310,0	330,0	0,80	2,430	1,944	194,376	1,156	115,570	0,595
310,0	330,0	0,90	2,712	2,441	244,080	1,184	118,390	0,485
310,0	330,0	1,00	2,994	2,994	299,440	1,184	118,430	0,396

Çizelge 4.23. TEC-03 modelinde $T_c=320K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) $1*10^6\mu m^2$	P(W) $1cm^2$	$Q_c(W)$ $1*10^6\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
320,0	330,0	0,10	0,368	0,037	3,679	0,224	22,417	6,093
320,0	330,0	0,20	0,650	0,130	13,006	0,456	45,600	3,506
320,0	330,0	0,25	0,791	0,198	19,787	0,561	56,139	2,837
320,0	330,0	0,30	0,933	0,280	27,980	0,660	65,977	2,358
320,0	330,0	0,40	1,215	0,486	48,600	0,836	83,553	1,719
320,0	330,0	0,50	1,497	0,749	74,870	0,983	98,334	1,313
320,0	330,0	0,60	1,780	1,068	106,788	1,103	110,330	1,033
320,0	330,0	0,70	2,062	1,443	144,347	1,195	119,530	0,828
320,0	330,0	0,80	2,345	1,876	187,560	1,260	125,960	0,672
320,0	330,0	0,90	2,627	2,364	236,430	1,296	129,620	0,548
320,0	330,0	1,00	2,909	2,909	290,940	1,305	130,510	0,449

Çizelge 4.24. TEC-03 modelinde $T_c=325K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	I(A)	V(Volt)	P(W) $1*10^6\mu m^2$	P(W) $1cm^2$	$Q_c(W)$ $1*10^6\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
325,0	330,0	0,10	0,325	0,033	3,252	0,246	24,634	7,576
325,0	330,0	0,20	0,608	0,122	12,151	0,482	48,244	3,970
325,0	330,0	0,25	0,749	0,187	18,719	0,590	58,997	3,152
325,0	330,0	0,30	0,890	0,267	26,698	0,690	69,048	2,586
325,0	330,0	0,40	1,172	0,469	46,892	0,871	87,050	1,856
325,0	330,0	0,50	1,455	0,727	72,735	1,023	102,260	1,406
325,0	330,0	0,60	1,737	1,042	104,226	1,147	114,670	1,100
325,0	330,0	0,70	2,020	1,414	141,372	1,243	124,300	0,879
325,0	330,0	0,80	2,302	1,842	184,160	1,312	131,160	0,712
325,0	330,0	0,90	2,584	2,326	232,596	1,352	135,240	0,581
325,0	330,0	1,00	2,867	2,867	286,690	1,366	136,550	0,476

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da, $1mm^2$ yüzey alanı için, her bir T_c değerinde soğutma gücünün maksimum ve bunlara karşılık iki uç arasında oluşan voltaj değerlerinin ANSYS Workbench benzeşim programından elde edilen raporları gösterilmektedir.

T_c=260K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	0,6363 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	0,6363 W		

T_c=270K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	0,74019 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	0,74019 W		

T_c=280K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	0,84682 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	0,84682 W		

T_c=290K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	0,95917 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	0,95917 W		

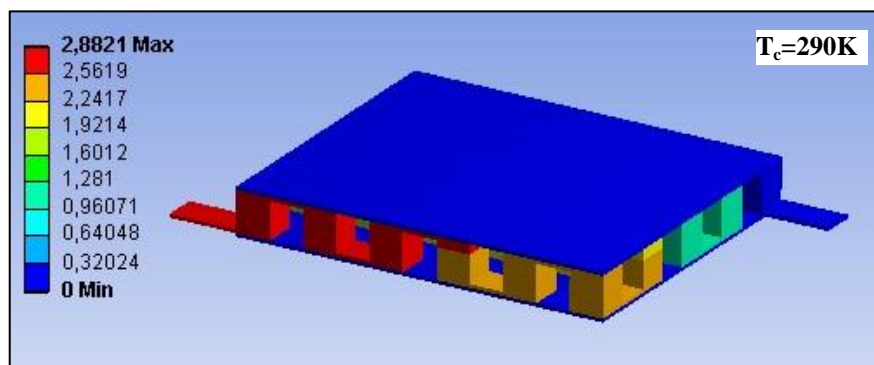
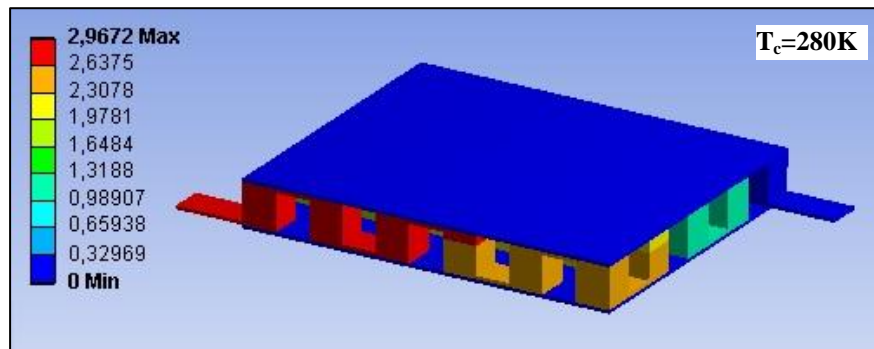
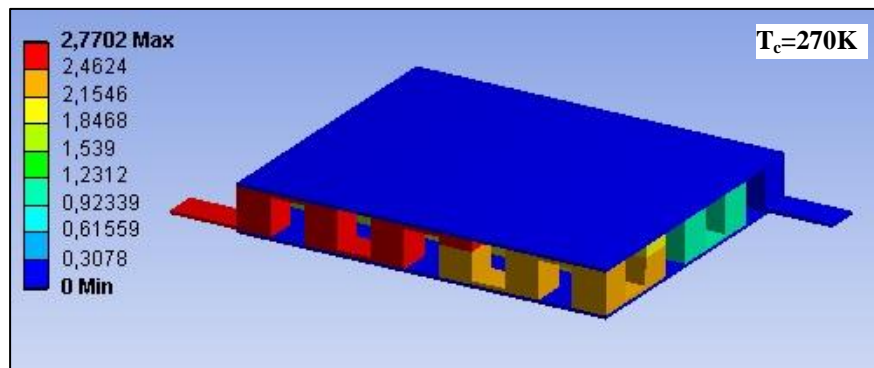
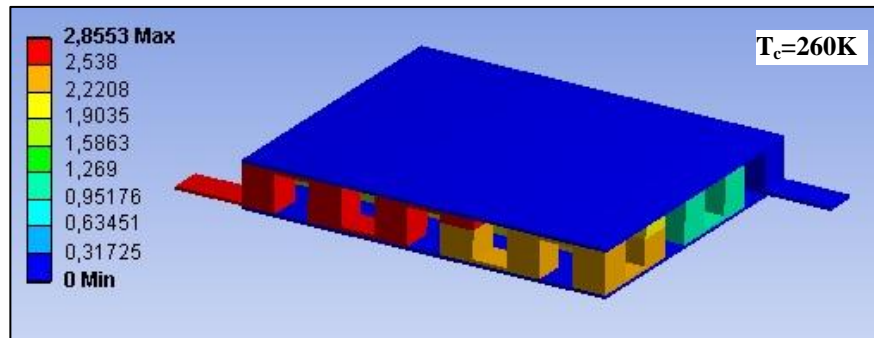
T_c=300K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	1,0715 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	1,0715 W		

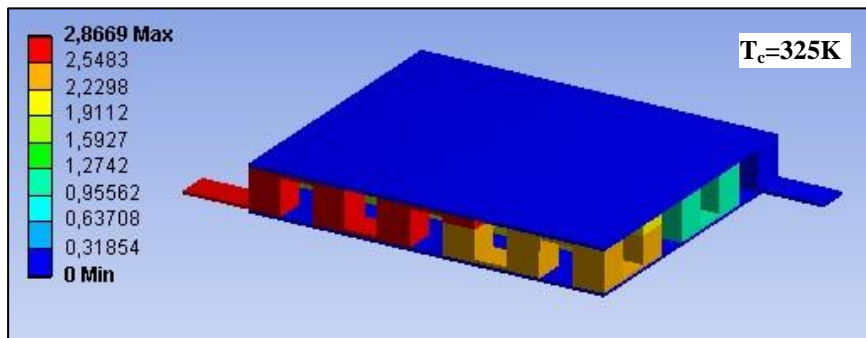
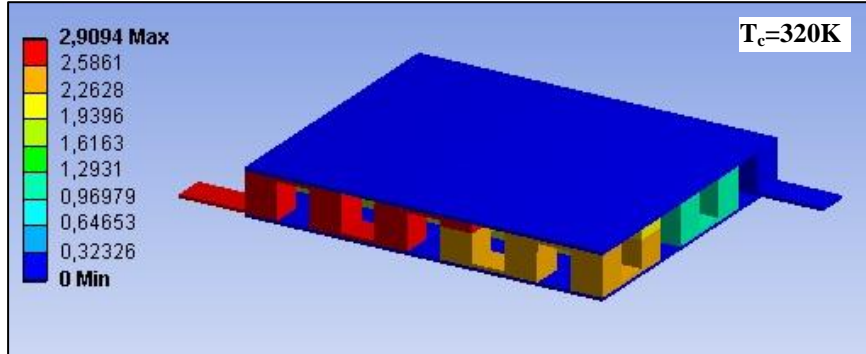
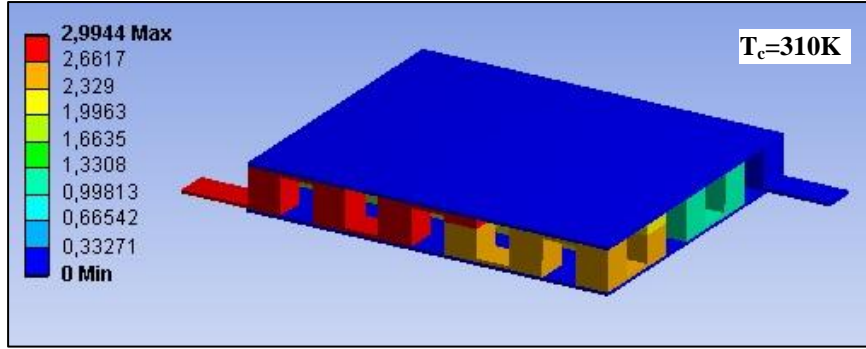
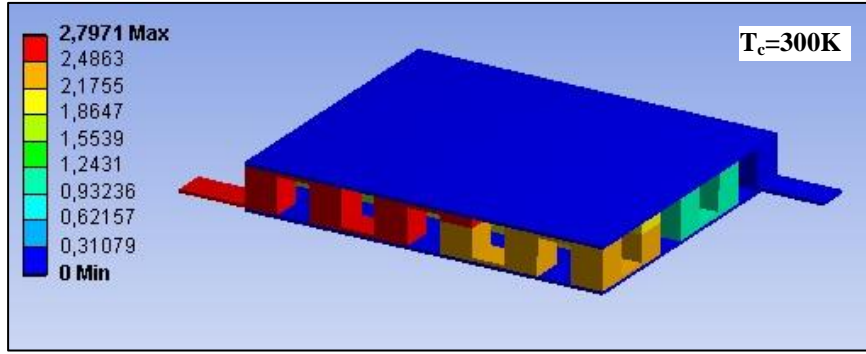
T_c=310K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	1,1843 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	1,1843 W		

T_c=320K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	1,3051 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	1,3051 W		

T_c=325K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	1,3655 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	1,3655 W		

Şekil 4.8. TEC-03 modelinde T_c=260K-325K aralığında yapılan her bir analiz için maksimum soğutma gücünün elde edildiği analiz raporları

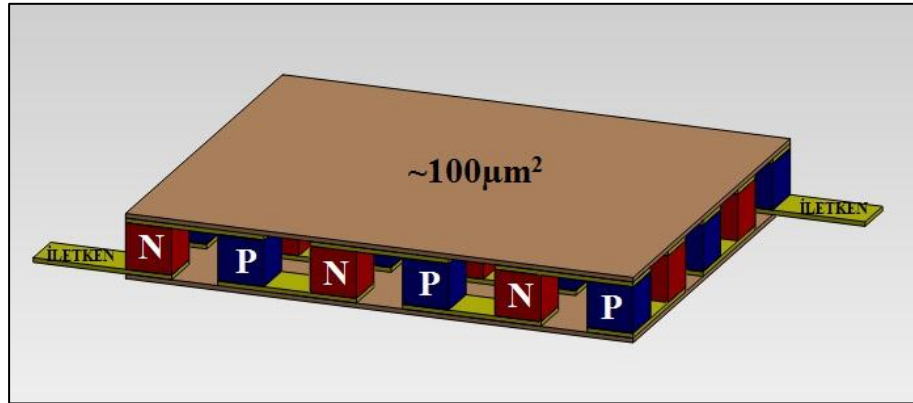




Şekil 4.9. TEC-03 modelinde $T_c=260K-325K$ aralığında yapılan ve maksimum soğutma gücüne karşılık iki uç arasında elde edilen voltaj verilerinin analiz raporları

4.4. TEC-04 Modelinin Analiz Verileri

N ve P tipi yarı iletken malzemelerin, iletkenler ile birbirine elektriksel olarak seri, ısıl olarak paralel şekilde bağlanmasıyla oluşturulmuş ve 15 adet termoelektrik modül çifti içeren model-4 şekil 4.10'da gösterilmektedir. Bu modelde boyutlar μm boyutundadır. N ve P tipi yarı iletken parçaların boyutları; yükseklik (L) $1\mu\text{m}$ ve taban boyutları ($1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$)'dir. Bu termoelektrik soğutma sisteminin etki ettiği yüzey alanı Şekil 4.10'da da belirtildiği gibi yaklaşık olarak $100\mu\text{m}^2$ 'dir. ANSYS Workbench ticari benzeşim programında yapılan termoelektrik analizde, sıcak bölgenin sıcaklığı sabit 330K tutularak soğuk bölgenin sıcaklığı (260K-325K) değiştirilmiştir. Bununla birlikte sistemden farklı miktarlarda akım geçirilmiştir. Bu sınır şartları ve yüklemelerin uygulanması sonucunda ortaya çıkan soğutma gücü (Q_c), harcanan elektriksel güç (P) ve soğutma performans katsayısı (COP) değerleri hesaplatılmıştır. Bahsedilen bu niceliklerin sayısal değerleri Çizelge 4.25'den Çizelge 4.32'ye kadar olan kısımda gösterilmiştir.



Şekil 4.10. TEC-04'ün modellenmesi

Çizelge 4.25. TEC-04 modelinde $T_c=260K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	$I(mA)$	$V(Volt)$	$P(mW)$ $100\mu m^2$	$P(W)$ $1cm^2$	$Q_c(mW)$ $100\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
260,0	330,0	1,3	0,966	1,255	1255	0,152	152	0,121
260,0	330,0	1,5	1,022	1,533	1533	0,519	519	0,338
260,0	330,0	2,0	1,163	2,326	2326	1,387	1387	0,596
260,0	330,0	3,0	1,445	4,336	4336	2,913	2913	0,672
260,0	330,0	4,0	1,727	6,909	6909	4,159	4159	0,602
260,0	330,0	5,0	2,009	10,046	10046	5,127	5127	0,510
260,0	330,0	6,0	2,291	13,747	13747	5,816	5816	0,423
260,0	330,0	7,0	2,573	18,012	18012	6,228	6228	0,346
260,0	330,0	8,0	2,855	22,842	22842	6,363	6363	0,279
260,0	330,0	9,0	3,137	28,236	28236	6,221	6221	0,220
260,0	330,0	10,0	3,419	34,194	34194	5,804	5804	0,170

Çizelge 4.26. TEC-04 modelinde $T_c=270K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	$I(mA)$	$V(Volt)$	$P(mW)$ $100\mu m^2$	$P(W)$ $1cm^2$	$Q_c(mW)$ $100\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
270,0	330,0	1,3	0,796	1,034	1034	0,025	25	0,024
270,0	330,0	1,5	0,937	1,405	1405	1,005	1005	0,715
270,0	330,0	2,0	1,078	2,155	2155	1,916	1916	0,889
270,0	330,0	3,0	1,360	4,079	4079	3,527	3527	0,865
270,0	330,0	4,0	1,642	6,567	6567	4,859	4859	0,740
270,0	330,0	5,0	1,924	9,620	9620	5,911	5911	0,615
270,0	330,0	6,0	2,206	13,236	13236	6,686	6686	0,505
270,0	330,0	7,0	2,488	17,417	17417	7,183	7183	0,412
270,0	330,0	8,0	2,770	22,162	22162	7,402	7402	0,334
270,0	330,0	9,0	3,052	27,471	27471	7,345	7345	0,267
270,0	330,0	10,0	3,334	33,344	33344	7,012	7012	0,210

Çizelge 4.27. TEC-04 modelinde $T_c=280K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	$I(mA)$	$V(Volt)$	$P(mW)$ $100\mu m^2$	$P(W)$ $1cm^2$	$Q_c(mW)$ $100\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
280,0	330,0	1,0	0,710	0,710	710	0,468	468	0,659
280,0	330,0	1,5	0,851	1,277	1277	1,491	1491	1,168
280,0	330,0	2,0	0,992	1,984	1984	2,445	2445	1,232
280,0	330,0	3,0	1,274	3,823	3823	4,141	4141	1,083
280,0	330,0	4,0	1,556	6,226	6226	5,558	5558	0,893
280,0	330,0	5,0	1,839	9,193	9193	6,696	6696	0,728
280,0	330,0	6,0	2,121	12,724	12724	7,555	7555	0,594
280,0	330,0	7,0	2,403	16,820	16820	8,137	8137	0,484
280,0	330,0	8,0	2,685	21,480	21480	8,441	8441	0,393
280,0	330,0	9,0	2,967	26,705	26705	8,468	8468	0,317
280,0	330,0	10,0	3,249	32,494	32494	8,220	8220	0,253

Çizelge 4.28. TEC-04 modelinde $T_c=290K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	$I(mA)$	$V(Volt)$	$P(mW)$ $100\mu m^2$	$P(W)$ $1cm^2$	$Q_c(mW)$ $100\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
290,0	330,0	1,0	0,625	0,625	625	0,911	911	1,459
290,0	330,0	1,5	0,766	1,148	1148	1,978	1978	1,722
290,0	330,0	2,0	0,907	1,813	1813	2,973	2973	1,640
290,0	330,0	3,0	1,189	3,567	3567	4,755	4755	1,333
290,0	330,0	4,0	1,471	5,884	5884	6,257	6257	1,063
290,0	330,0	5,0	1,753	8,767	8767	7,480	7480	0,853
290,0	330,0	6,0	2,036	12,213	12213	8,425	8425	0,690
290,0	330,0	7,0	2,318	16,224	16224	9,091	9091	0,560
290,0	330,0	8,0	2,600	20,799	20799	9,480	9480	0,456
290,0	330,0	9,0	2,882	25,939	25939	9,592	9592	0,370
290,0	330,0	10,0	3,164	31,644	31644	9,427	9427	0,298

Çizelge 4.29. TEC-04 modelinde $T_c=300K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	$I(mA)$	$V(Volt)$	$P(mW)$ $100\mu m^2$	$P(W)$ $1cm^2$	$Q_c(mW)$ $100\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
300,0	330,0	1,0	0,539	0,539	539	1,355	1355	2,513
300,0	330,0	1,5	0,680	1,020	1020	2,464	2464	2,415
300,0	330,0	2,0	0,821	1,643	1643	3,502	3502	2,132
300,0	330,0	3,0	1,104	3,311	3311	5,369	5369	1,622
300,0	330,0	4,0	1,386	5,543	5543	6,957	6957	1,255
300,0	330,0	5,0	1,668	8,340	8340	8,265	8265	0,991
300,0	330,0	6,0	1,950	11,701	11701	9,294	9294	0,794
300,0	330,0	7,0	2,233	15,628	15628	10,045	10045	0,643
300,0	330,0	8,0	2,515	20,118	20118	10,519	10519	0,523
300,0	330,0	9,0	2,797	25,174	25174	10,715	10715	0,426
300,0	330,0	10,0	3,079	30,794	30794	10,635	10635	0,345

Çizelge 4.30. TEC-04 modelinde $T_c=310K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	$I(mA)$	$V(Volt)$	$P(mW)$ $100\mu m^2$	$P(W)$ $1cm^2$	$Q_c(mW)$ $100\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
310,0	330,0	1,0	0,453	0,453	453	1,798	1798	3,965
310,0	330,0	1,5	0,595	0,892	892	2,950	2950	3,307
310,0	330,0	2,0	0,736	1,472	1472	4,031	4031	2,739
310,0	330,0	3,0	1,018	3,054	3054	5,984	5984	1,959
310,0	330,0	4,0	1,300	5,202	5202	7,656	7656	1,472
310,0	330,0	5,0	1,583	7,914	7914	9,049	9049	1,143
310,0	330,0	6,0	1,865	11,190	11190	10,163	10163	0,908
310,0	330,0	7,0	2,147	15,031	15031	10,999	10999	0,732
310,0	330,0	8,0	2,430	19,438	19438	11,557	11557	0,595
310,0	330,0	9,0	2,712	24,408	24408	11,839	11839	0,485
310,0	330,0	10,0	2,994	29,944	29944	11,843	11843	0,396

Çizelge 4.31. TEC-04 modelinde $T_c=320K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	$I(mA)$	$V(Volt)$	$P(mW)$ $100\mu m^2$	$P(W)$ $1cm^2$	$Q_c(mW)$ $100\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
320,0	330,0	1,0	0,368	0,368	368	2,242	2242	6,093
320,0	330,0	1,5	0,509	0,764	764	3,436	3436	4,499
320,0	330,0	2,0	0,650	1,301	1301	4,560	4560	3,506
320,0	330,0	3,0	0,933	2,798	2798	6,598	6598	2,358
320,0	330,0	4,0	1,215	4,860	4860	8,355	8355	1,719
320,0	330,0	5,0	1,497	7,487	7487	9,833	9833	1,313
320,0	330,0	6,0	1,780	10,679	10679	11,033	11033	1,033
320,0	330,0	7,0	2,062	14,435	14435	11,953	11953	0,828
320,0	330,0	8,0	2,345	18,756	18756	12,596	12596	0,672
320,0	330,0	9,0	2,627	23,643	23643	12,962	12962	0,548
320,0	330,0	10,0	2,909	29,094	29094	13,051	13051	0,449

Çizelge 4.32. TEC-04 modelinde $T_c=325K$ için analiz verileri

$T_c(K)$	$T_h(K)$	$I(mA)$	$V(Volt)$	$P(mW)$ $100\mu m^2$	$P(W)$ $1cm^2$	$Q_c(mW)$ $100\mu m^2$	$Q_c(W)$ $1cm^2$	$\beta(COP)$
325,0	330,0	1,0	0,325	0,325	325	2,463	2463	7,576
325,0	330,0	1,5	0,466	0,700	700	3,679	3679	5,259
325,0	330,0	2,0	0,608	1,215	1215	4,824	4824	3,970
325,0	330,0	3,0	0,890	2,670	2670	6,905	6905	2,586
325,0	330,0	4,0	1,172	4,689	4689	8,705	8705	1,856
325,0	330,0	5,0	1,455	7,274	7274	10,226	10226	1,406
325,0	330,0	6,0	1,737	10,423	10423	11,467	11467	1,100
325,0	330,0	7,0	2,020	14,137	14137	12,430	12430	0,879
325,0	330,0	8,0	2,302	18,416	18416	13,116	13116	0,712
325,0	330,0	9,0	2,584	23,260	23260	13,524	13524	0,581
325,0	330,0	10,0	2,867	28,669	28669	13,655	13655	0,476

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de $100\mu m^2$ yüzey alanı için, her bir T_c değerinde soğutma gücünün maksimum ve bunlara karşılık iki uç arasında oluşan voltaj değerlerinin ANSYS Workbench benzeşim programından elde edilen raporları gösterilmektedir.

T_c=260K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	6,363e-003 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	6,363e-003 W		

T_c=270K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	7,4019e-003 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	7,4019e-003 W		

T_c=280K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	8,4682e-003 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	8,4682e-003 W		

T_c=290K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	9,5917e-003 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	9,5917e-003 W		

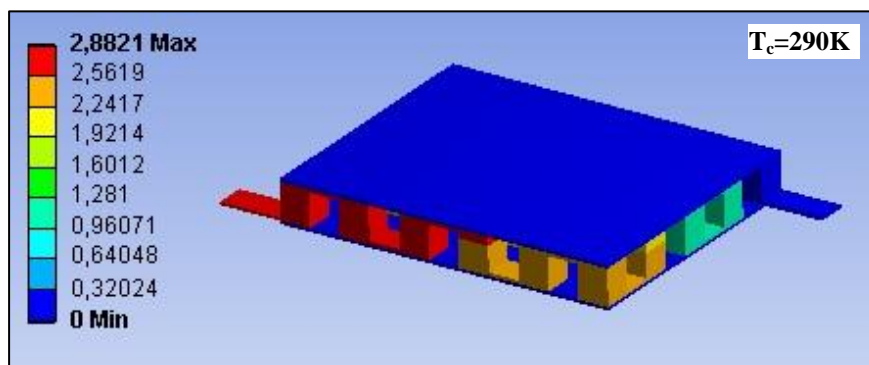
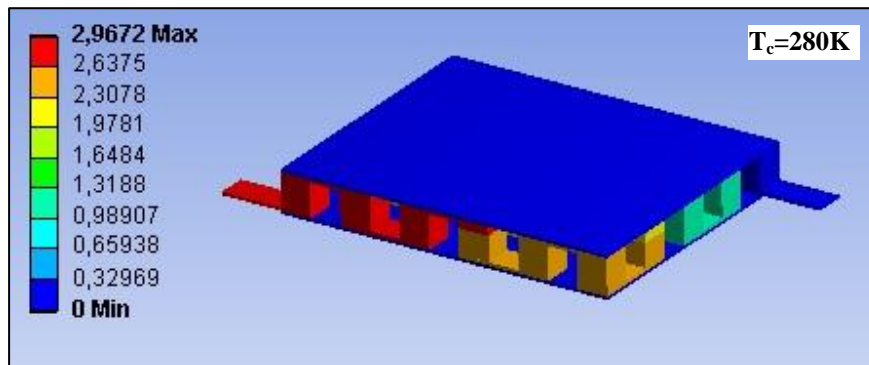
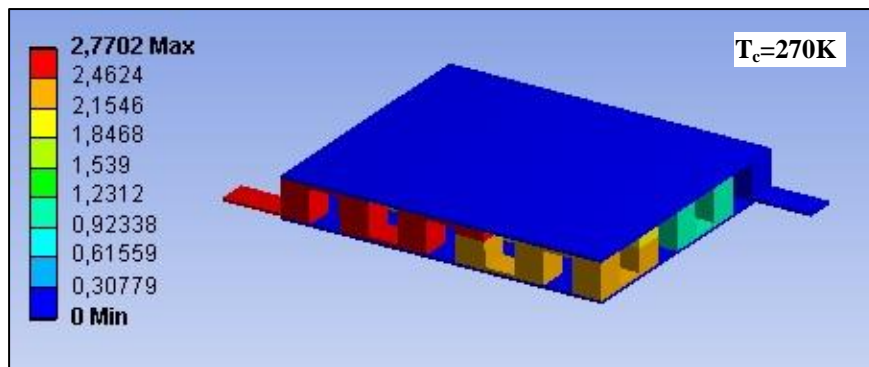
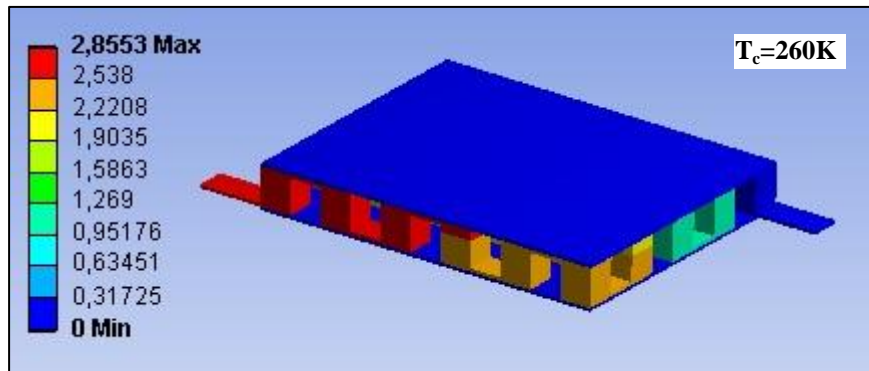
T_c=300K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	1,0715e-002 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	1,0715e-002 W		

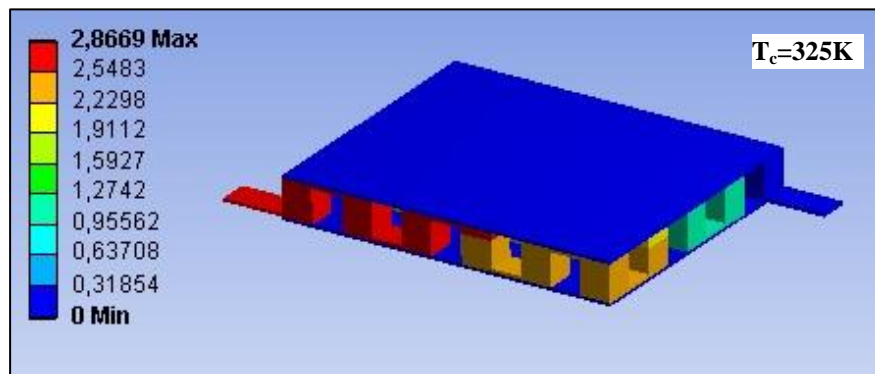
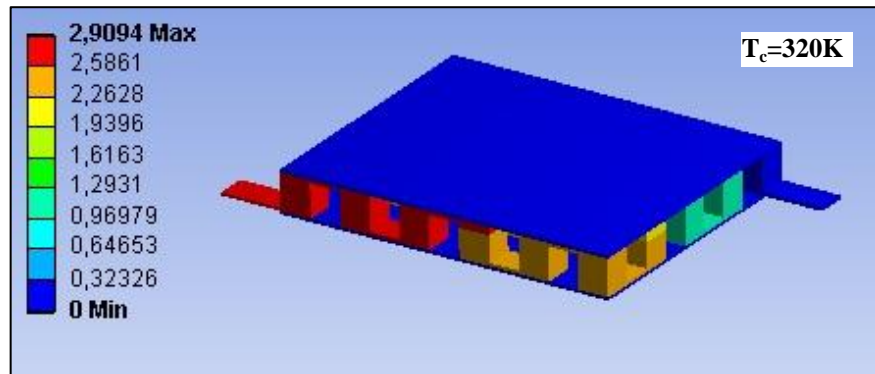
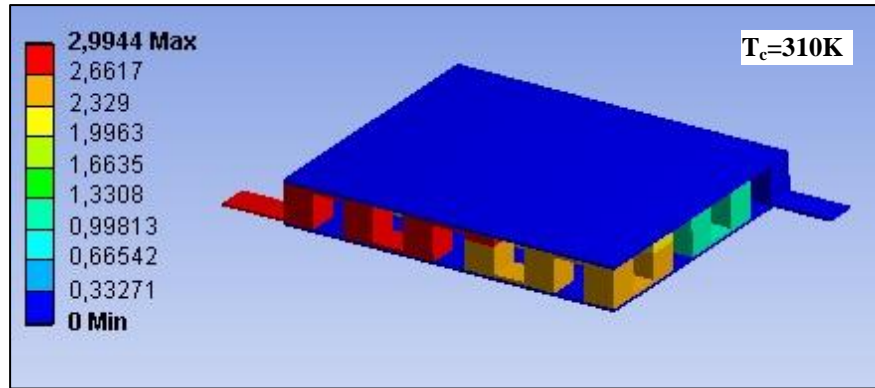
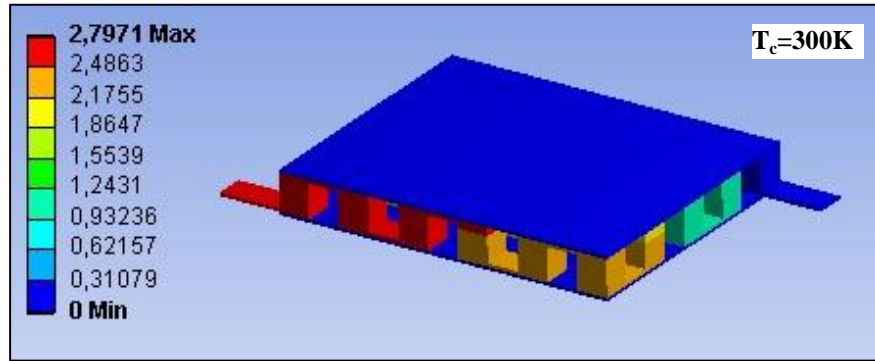
T_c=310K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	1,1843e-002 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	1,1843e-002 W		

T_c=320K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	1,3051e-002 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	1,3051e-002 W		

T_c=325K		Definition	
Type	Reaction		
Location Method	Boundary Condition		
Boundary Condition	Temperature		
Options			
Display Time	End Time		
Results			
Heat	1,3655e-002 W		
Maximum Value Over Time			
Heat	1,3655e-002 W		

Şekil 4.11. TEC-04 modelinde T_c=260K-325K aralığında yapılan her bir analiz için maksimum soğutma gücünün elde edildiği analiz raporları



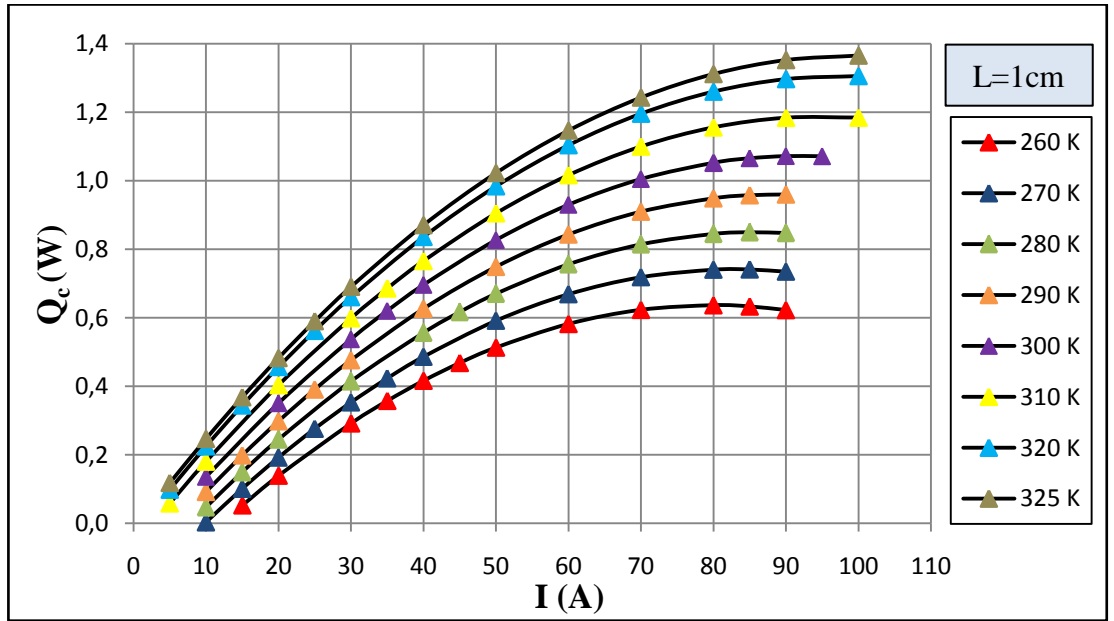


Şekil 4.12. TEC-04 modelinde $T_c=260K-325K$ aralığında yapılan ve maksimum soğutma gücüne karşılık iki uç arasında elde edilen voltaj verilerinin analiz raporları

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1.Oluşturulan Tüm TEC Modellerin Analiz Sonuçlarının Tartışılması

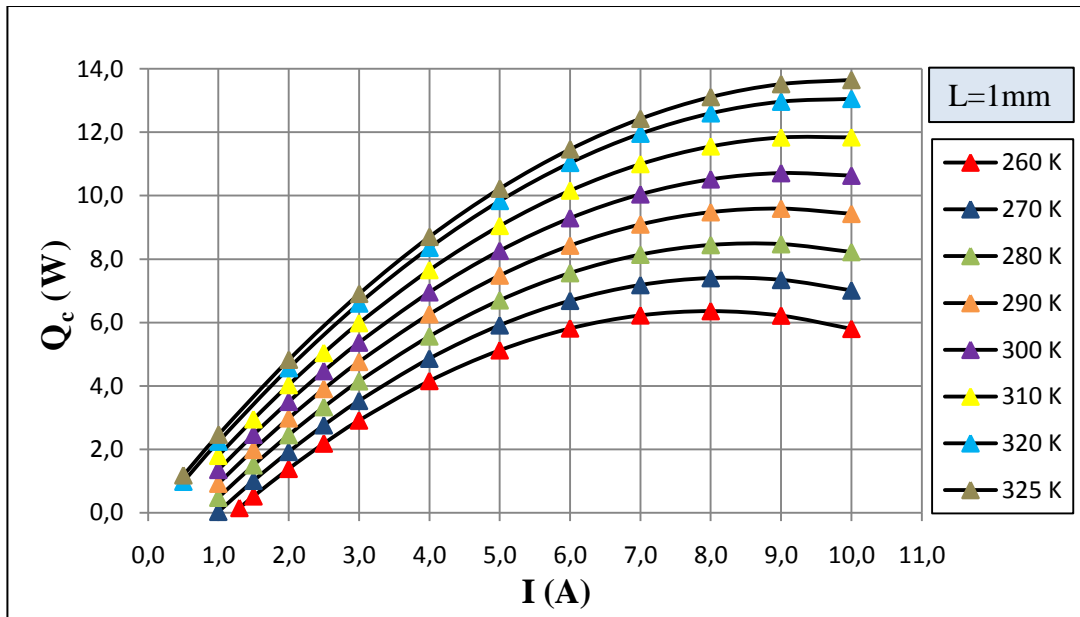
N ve P tipi yarı iletken malzemelerin, iletkenler aracılığı ile elektriksel olarak seri, yalıtkanlar aracılığı ile ısıl olarak paralel şekilde bağlanmasıyla oluşturulmuş TEC-01 modelinde N ve P tipi yarı iletken parçaların boyutları; yükseklik (L) 1cm ve taban boyutları (W) (1cm x 1cm)'dir. Bu termoelektrik soğutma sisteminin etki ettiği yüzey alanı Şekil 4.1.'de de belirtildiği gibi yaklaşık olarak 100cm²'dir. ANSYS Workbench ticari benzeşim programında yapılan termoelektrik analizde, sıcak bölgenin sıcaklığı 330K'de sabit tutularak soğuk bölgenin sıcaklığı 260K-325K sıcaklıkları arasında değiştirilmiştir. Şekil 5.1'de TEC-01 modeline ait olan ve akım ile soğutma gücünün değişimini gösteren grafik gösterilmektedir. Buradaki soğutma gücü değerleri, Watt cinsinden olup cm² başına elde edilmiş değerlerdir.



Şekil 5.1. L=W=1cm olan TEC-01 modelinde 260K-325K sıcaklıkları arasında, akım(I) ile soğutma gücü (Q_c) değişimi

Şekil 5.1'den. ve Çizelge 4.1'den Çizelge 4.8'e kadar elde edilen analiz sonuçlarından da görüleceği gibi, soğuk tarafın sıcaklığı arttıkça soğutma gücü performansının arttığı açıkça görülmektedir. Bunun nedeni; sıcak taraf ile soğuk taraf arasındaki sıcaklık farkının az olduğu durumlarda sistem hızlı bir şekilde soğutmaya başlamakta, fakat sıcaklık farkı büyüdükçe sistem yavaş yavaş doyuma ulaşmaktadır ve bu yüzden soğutma gücü azalmaktadır. Hatta sıcaklık farkı (ΔT) gereğinden fazla büyük olduğunda soğutma gücü değeri teorik olarak negatif elde edilir. Bu da bize soğuk taraf ile sıcak taraf arasındaki sıcaklık farkının o kadar olamayacağını belirtir. Sıcaklık farkının yanı sıra soğutma gücünü etkileyen diğer önemli bir faktör ise elektrik akımıdır. Elektrik akımı arttıkça soğutma gücü belirli bir noktaya kadar artmaktadır ve belirli bir akım değerinde alabileceği maksimum değere ulaşır. Bundan sonra elektrik akımı hala arttırılmaya devam edilirse soğutma gücü azalacaktır. İşte bu ince sınırı korumak termoelektrik soğutma sistemlerinde oldukça önemli bir durumdur. Bu azalmanın nedeni Eşitlik 2.4.'teki ifadede görülebilmektedir.

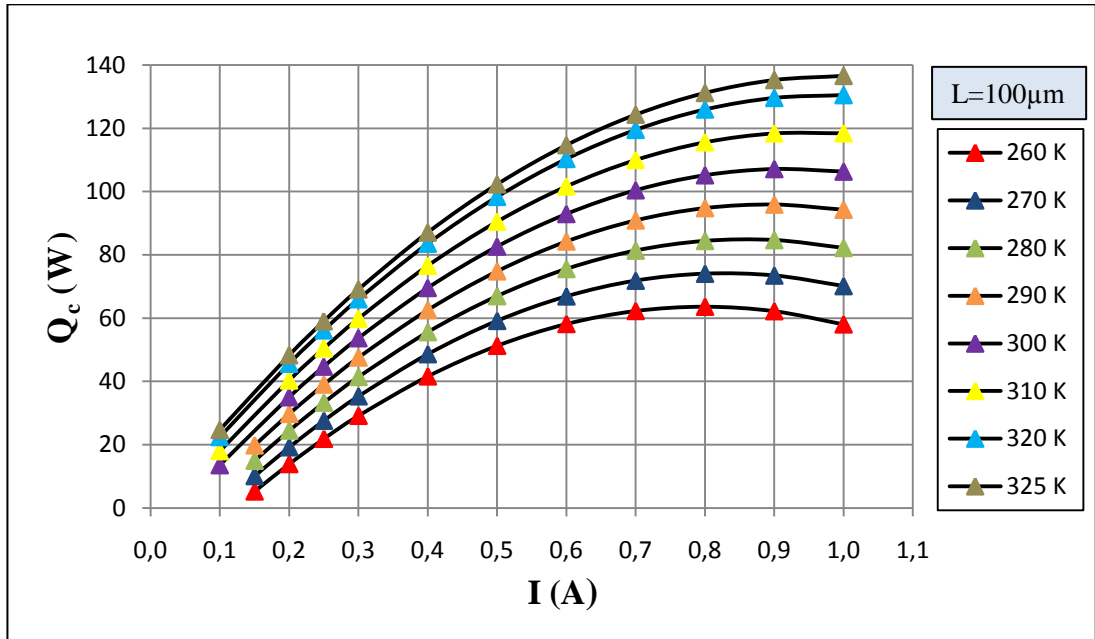
TEC-02 modelinde N ve P tipi yarı iletken parçaların boyutları; yükseklik (L) 1mm ve taban boyutları (W) (1mm x 1mm)'dir. Bu termoelektrik soğutma sisteminin etki ettiği yüzey alanı Şekil 4.4.'de belirtildiği gibi yaklaşık olarak 1cm²'dir.



Şekil 5.2. L=W=1mm olan TEC-02 modelinde 260K-325K sıcaklıkları arasında akım(I) ile soğutma gücü (Q_c) değişimi

Şekil 5.2’de TEC-02 modeline ait olan ve akım ile soğutma gücünün değişimini gösteren grafik gösterilmektedir. TEC-01 modeli için yukarıda tartışılan durumlar TEC-02 modeli ve diğer iki model için de aynen geçerlidir. Buradaki fark; 1cm^2 ’de elde edilen soğutma gücü değerinin, TEC-01 modelinde elde edilenden daha büyük olmasıdır. Bunun nedeni; TEC-02’yi oluşturan termoelektrik modüllerin (N tipi ve P tipi) boyutlarının TEC-01’i oluşturanlardan daha küçük olmasıdır. Dolayısıyla 1cm^2 yüzey alanına etki edecek termo çift sayısı burada daha fazladır. Daha önceden de bahsedildiği gibi soğutma gücü termo çift sayısı (N) ile doğru orantılı olduğundan, birim yüzeye etki eden çift sayısı arttıkça soğutma performansı artacaktır.

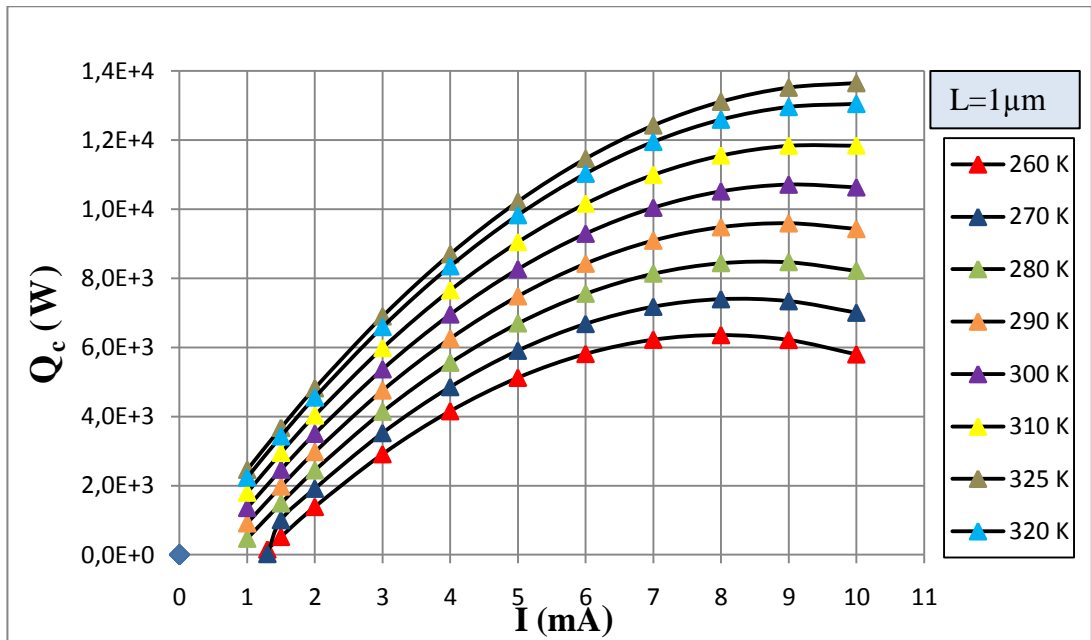
TEC-03 modelinde N ve P tipi yarı iletken parçaların boyutları; yükseklik (L) $100\mu\text{m}$ ve taban boyutları (W) ($100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$)’dir. Bu termoelektrik soğutma sisteminin etki ettiği yüzey alanı Şekil 4.7.’de belirtildiği gibi yaklaşık olarak 1mm^2 ’dir. Şekil 5.3’te TEC-03 modeline ait olan ve akım ile soğutma gücünün değişimini gösteren grafik gösterilmektedir.



Şekil 5.3. $L=W=100\mu\text{m}$ olan TEC-03 modelinde 260K-325K sıcaklıkları arasında akım(I) ile soğutma gücü (Q_c) değişimi

TEC-01 ve TEC-02 modelleri için yapılan tartışmalar aynen TEC-03 modeli içinde geçerlidir. Yine burada dikkat edilmesi gereken en önemli şey boyut küçüldükçe soğutma performansının artmasıdır.

TEC-03 modelinde N ve P tipi yarı iletken parçaların boyutları; yükseklik (L) $1\mu\text{m}$ ve taban boyutları (W) ($1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$)'dir. Bu termoelektrik soğutma sisteminin etki ettiği yüzey alanı Şekil 4.10'da belirtildiği gibi yaklaşık olarak $100\mu\text{m}^2$ 'dir. Şekil 5.4'te TEC-04 modeline ait olan ve akım ile soğutma gücünün değişimini gösteren grafik gösterilmektedir.



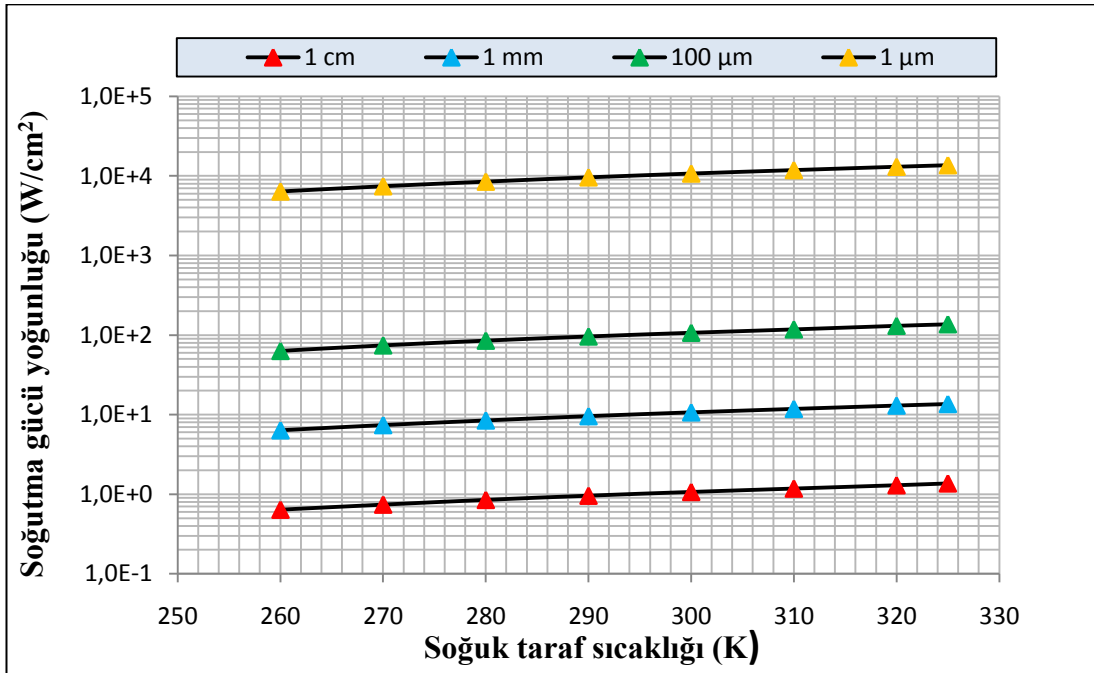
Şekil 5.4. $L=W=1\mu\text{m}$ olan TEC-04 modelinde 260K-325K sıcaklıkları arasında akım(I) ile soğutma gücü (Q_c) değişimi

5.2.Tartışmalardan Elde edilen Sonuçlar

Termoelektrik soğutma sistemleri, semi kondüktörler (termoelektrik malzeme) elektriksel güç kullanarak bir ortamdaki ısı enerjisini başka bir ortama pompalayarak ısı transfer eder. Bu sebeple termoelektrik sistemleri, bazı soğutma ve ısıtma uygulamalarında alternatif çözümler olabilmektedir. Sistemlerin 1 cm^2 gibi küçük boyutlarda modellenebilmesi, rejime girme süresinin kısa olması ve ayarlanan şartlardaki çalışma hassasiyetlerinin istenen seviyelerde olması (Laboratuvar cihazlarında $\pm 0,01^\circ\text{C}$ hassasiyetinde çalışırlar) çevreye zararlı sayılan soğutucu akışkanlara bağımlı olmamaları gibi avantajlarından dolayı, termoelektrik soğutucular hem endüstriyel hem de ticari amaçlı birçok alanda alternatif çözüm olarak kullanılabilir. Termoelektrik sistemlerin en çok kullanıldığı uygulama alanları, soğutma ve iklimlendirme süreçleridir. Trenlerin ve helikopterlerin iklimlendirilmesi, gemilerde soğuk hava depolarının soğutulması gibi uygulamalarda geliştirme çalışmaları halen devam etmektedir. Pc-Elektronik sanayisinde üretilen ürünlerin yüksek performansta çalışması için ısınan mikroişlemcilerinin (chiplerin) soğutulması çok önemli konudur. Günümüzde üretilen hızlı çipler de termoelektrik soğutuculu şekilde üretilmektedir. Önde gelen Pc-elektronik firmaları termoelektrik soğutucular üzerine araştırmalar yapmaktadırlar.

Bu tezde dört farklı termoelektrik soğutma sistemi modeli incelenmiştir. Bunlar; TEC-01, 02, 03 ve 04'tür. TEC-01'i oluşturan modüllerinin boyutu 1cm, TEC-02'yi oluşturan modüllerinin boyutu 1mm, TEC-03'ü oluşturan modüllerinin boyutu $100\mu\text{m}$ ve TEC-04'ü oluşturan modüllerinin boyutu $1\mu\text{m}$ 'dir. Araştırma sonuçlarından da açıkça görülebileceği gibi boyutların soğutma gücü üzerindeki etkisi oldukça büyüktür. Termoelektrik modüllerin boyutları küçüldükçe sistemin performansı artmakta ve birim yüzeyde daha fazla soğutma gücü elde edilebilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken çok önemli bir husus vardır. Modüllerin boyutları küçüldükçe soğutma gücü artar demek tam olarak doğru olmaz, birim yüzeyde elde edilen soğutma gücü artar tanımlaması daha doğru olacaktır. Bu husus oldukça önemlidir. Bu çalışmada yapılan analizler ve elde edilen tüm sonuçlar tamamen bu hususta incelenmiştir. Yani bir başka deyişle elde edilen sonuçlar 1cm^2 'ye normalize edilmiştir.

Bunun nedeni modeller arasında sağlıklı bir şekilde kıyaslama yapabilmektir. Mesela TEC-01'i oluşturan modüllerin etki ettiği yüzeyin alanı 100cm^2 'dir. Dolayısıyla analizler sonucunda elde edilen sonuçlar 1cm^2 'ye normalize edilmiştir. Bu işlem elde edilen soğutma gücü değerlerinin 100'e bölünmesiyle yapılmıştır. Bu şekilde yapılmasının nedeni, etki edilen yüzey alanındaki soğutma gücünün, yüzeye etki eden termo çift sayısı ile doğrudan ilişkili olmasıdır. Bu normalize işlemleri benzer şekilde diğer üç model için de uygulanmıştır. Tüm modellerin analizlerinde aynı sayıda termo çift kullanılmıştır. Her modelde modüllerin boyutları farklı olduğundan dolayı her birinin etki ettiği yüzey alanı da farklıdır. Ama az önce yukarıda belirtildiği gibi modeller arasında performans kıyaslamasının sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için böyle bir yöntem başvurulmuştur. TEC-02 modeli 1cm^2 yüzey alanına etki etmektedir ve bu model için normalize yapmaya gerek kalmamıştır. TEC-03 ve TEC-04 modelleri sırasıyla 1mm^2 ve $100\mu\text{m}^2$ 'dir ve bu modeller de gerekli katsayılarla çarpılarak normalize edilmişlerdir. Bu işlemlerin sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 5.5'teki logaritmik ölçekli grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Tüm modeller için 1cm^2 başına elde edilen soğutma güçlerinin soğuk taraf sıcaklığı ile değişimi

Şekil 5.5'ten de görüldüğü gibi soğutma gücü yoğunluğu en fazla olan model, modül boyutları 1µm olan TEC-04'tür. Bunun nedeni birim yüzeye etki eden termo çift sayısının çok fazla olmasıdır. Daha önceden de belirtildiği gibi soğutma gücü performansı termo çift sayısı (N) ile doğru orantılıdır. TEC-04'ün performansı 325K'de 14kWatt'lara ulaşırken TEC-01'de bu değer sadece 1.4Watt'larda seyretmektedir. İşte bu yüzden modüllerin boyutlarının etkisi çok büyüktür. Termoelektrik soğutma sistemlerindeki önemli bir diğer husus ise performans katsayısı değerleridir (COP). Performans katsayısı; sistemde elde edilen soğutma gücünün, sisteme verilen elektriksel gücüne oranıdır (Q_c/W). Günümüzde elektrikli ve elektronik aletler üretilirken en fazla dikkat edilen husus cihazların ne kadar elektrik enerjisi tükettiği ve bunun karşılığında ne kadar verim sağladığıdır. Artık cihazların performansından önce bu performansı ne kadar enerji tüketerek yaptığı çok daha önemlidir. Bu işlem termoelektrik soğutma sistemlerinde bu katsayı yardımıyla yapılır. Çıkış gücünün giriş gücüne oranının en büyük olduğu noktalar cihazların en performanslı çalıştığı anlardır. Bundan dolayı herhangi bir cihaz çalıştırılırken optimum değerlerinde çalıştırılması önerilir. Bu tezde modellenen dört örnekten elde edilen analiz verileri çizelgelerinde optimum çalışma noktaları açıkça görülebilmektedir.

KAYNAKLAR

RIFFAT, S.B., MA, X., 2003. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. Applied Thermal Engineering, 23: 913-935.

CHUNG, M., MISKOVSKY, N. M., CUTLER P. H., KUMAR, N., PATEL, V., 2003. Theroretical analysis of a field emission enhanced semiconductor thermoelectric cooler. Solid-state Electronics, 47: 745-1751.

SEEBECK, T. J., 1826. Methode, Platinatiegel auf ihr chemische reinheit durck thermomagnetismus zu prafen. Schweigger's, J. Phys., 46:101.

ÇENGEL, Y., BOLES M.A., 2000. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik. Literatür Yayıncılık, 525-555.

IOFFE, A.F., 1957. Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling. Infosearch, pp. 5-10, London.

THOMSON, W., 1851. On a mechanical theory of thermoelectric currents, Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, 91.

IOFFE, A. F., AIRAPETYANTS S. V., IOFFE, A. V., KOLOMOETS, N. V., STILBANS, L. S., 1956. On Increasing the efficiency of semiconducting thermocouples. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 106: 931.

TELKS, M., 1947. The efficiency of thermoelectric generators. International Journal Applied Physics, 18: 1116.

GOLDSMID, H. J., DOUGLAS, R. W., 1954. The use of semiconductors in thermoelectric refrigeration. Br. J. Applied Physics, 5(11): 386.

ALTENKIRCH, E., 1911. Electrothermische Kalteerzeugung und Reversible Electriche Heizung. Physikalische Zeitschrift, 12: 920.

YARBOROUGH, E. H., YEAT, F.W., 1975. Efficient thermo-mechanical generation of electricity from the heat of radio isotopes. Proc. Xth IECEC, 1033.

ROWE, D. M., 1989. United States thermoelectric activities in space. Proc. VIII th Int. Conf. Thermoelectric Energy Conversion, July 10-13, 133, Nancy, France.

ROWE, D. M., 1993. Thermoelectric generation. 28th Consultative Conference, to be published on behalf of the U.K. Watt Committee on Energy by IEEE, 10-13,10

MATSUURA, K., ROWE, D. M., KOUMOTO, K., MIN, G., TSUYOSHI, A., 1992. Design Optimisation for a Large Scale Low Temperature Thermoelectric Generator. Proc. XI th International Conference on Thermoelectric, October 7-9, 10, University of Texas, Arlington,

ÇENGEL, Y. A., BOLES, M.A., 1996. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik. Literatür Yayıncılık, İstanbul.

RICHARD, J., BUIST, and PAUL, G., LAU, 1997. Calculation of Thermoelectric Power Generation Performance Using Finite Element Analysis. Proceeding of the XVI th International Conference on Thermoelectrics, August 26-29, Dresden, Germany.

FIDAN, U.,2000. Mikro denetleyici kontrollü taşınabilir termoelektrik tıp kiti cihazı tasarımı ve uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, G. Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

BULUT, H., 2005. Termoelektrik soğutma sistemleri. Soğutma Dünyası, Sayı 31, 9-16.

LENDECKER, K., 1976. Proceeding First International Conference on Thermoelectric Energy Conversion, Arlington, Texas, IEEE, 150, Newyork.

ROWE, D., M., 1995. CRC Handbook Thermoelectric. CRC Press, Florida, 1-650.

MOSES, A., J., F., AL-NAEMI, J., HALL, 2003. Designind and Prototyping for Production Practical Applications of Electromagnetic Modelling. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 254-255, p. 228-233.

JIN, J., 1993. The Finite Element Method in Electromagnetics. John Wiley and Sons, Inc., Newyork, p. 1-4, 23-24, 72-73, 77-81.

ANONIM, 2002. ANSYS (Lisanslı program). İngilizce, Figes A.Ş. Celal Bayar caddesi, Petek Bozkaya İş Merkezi, C blok, 301-311, No:6 Bursa-Türkiye.

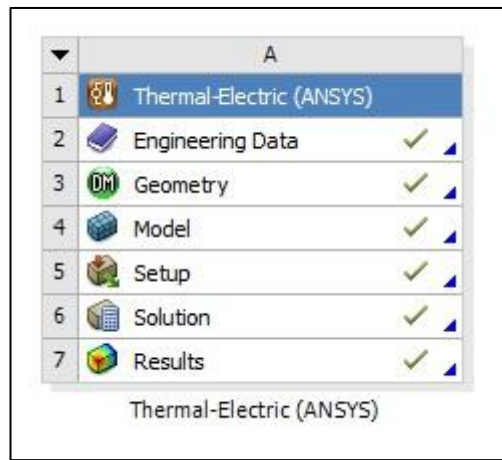
ANTONOVA, E., E., LOOMAN, D., C., 2005. Finite Elements for Thermoelectric Device Analysis in Ansys. International Conference on Thermoelectrics, pp. 200.

SILVESTER, P., P., and FERRARI, R., L.,1996. Finite Elements for Electrical Engineers. 3rd Edition, University Press, Cambridge.

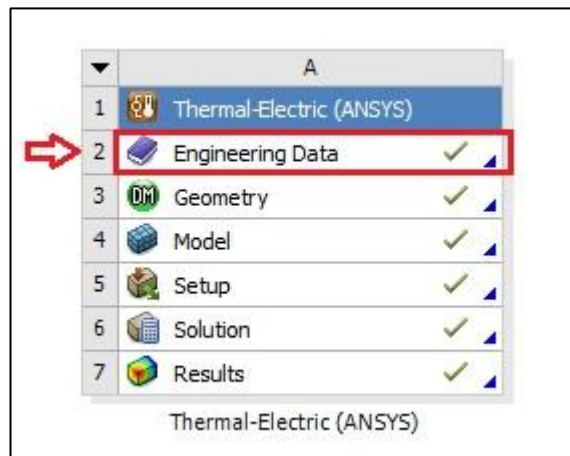
EKLER

Bu tezde yapılan termoelektrik analiz için ticari benzeşim programı ANSYS Workbench kullanılmıştır. Aşağıda termoelektrik analizin uygulanışı adım adım gösterilmektedir.

1. Masa üstündeki ANSYS Workbench programına çift tıklanarak program açılır.
2. Sol taraftaki araç çubuğundan “Thermal-Electric Analysis” yazısı çift tıklanır veya sağ iç tarafa sürüklenerek bırakılır. Bunun sonucunda sağ tarafta aşağıda şekil görülür.



3. Açılan bu kutucuk yapılacak işlemlerin ana başlıklarını içerir. İlk olarak 2. Sıradaki “Engineering Data” çift tıklanır.

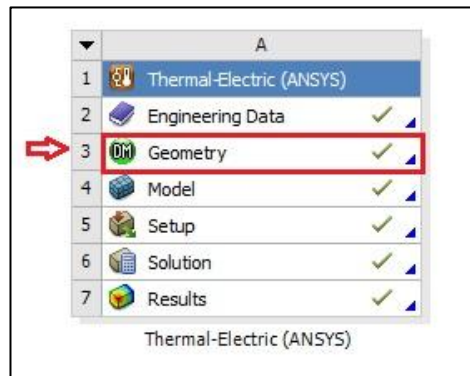


Bu basamakta malzeme analizde kullanılacak olan malzeme özellikleri tanımlanır.

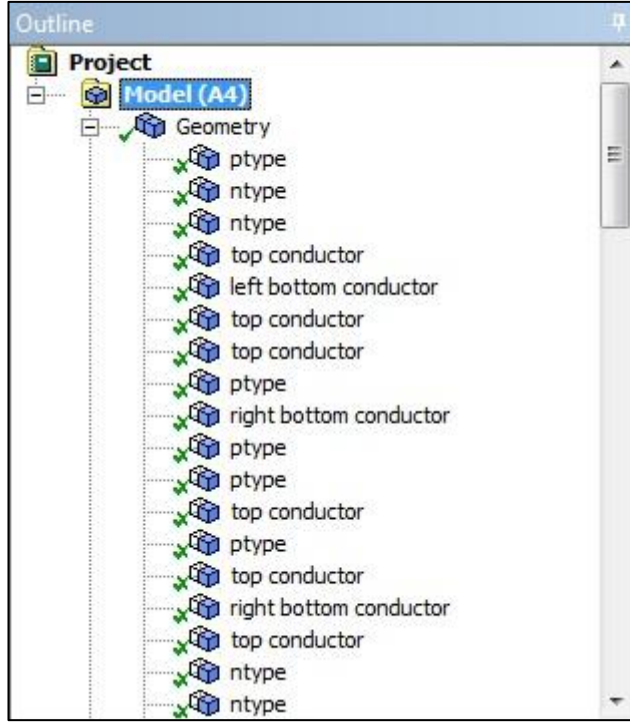
Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	ceramics	<input type="checkbox"/>	C.	
4	ntype	<input type="checkbox"/>	C.	
5	ptype	<input type="checkbox"/>	C.	
6	silver	<input type="checkbox"/>	C.	

4. 3. Sırada bulunan “Geometry” yazısı üzerinde mouse sağ click yapılarak import seçeneği seçilir. Açılan klasörden daha önceden herhangi bir tasarım programında çizilen geometri seçilir ve OK tuşuna basılır. Böylece daha önceden tasarlanmış olan geometri Workbench’e aktarılmış olur.

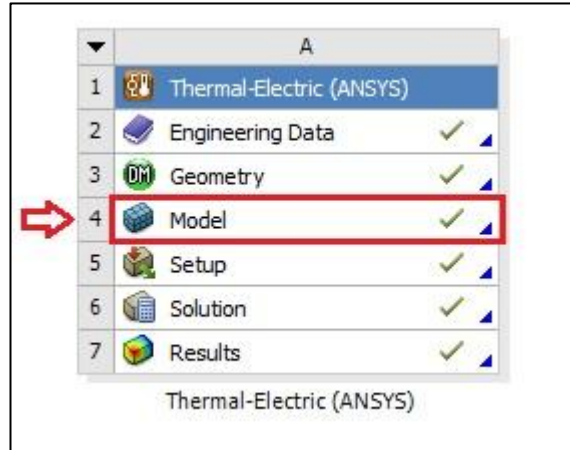
5. Geometry yazısına çift tıklanarak aktarılan geometri açılır.



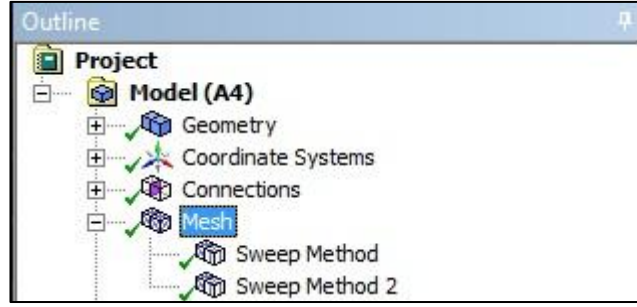
6. Daha önceden tanımlanmış olan malzeme özellikleri geometriyi oluşturan parçalara tek tek atanır.



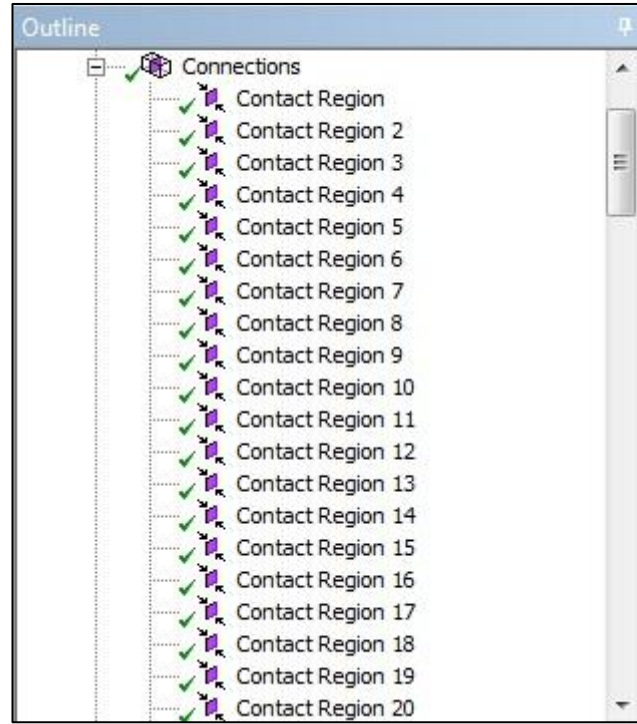
7. Malzeme atama işlemi yapıldıktan sonra “Model” ismi üzerinde çift tıklanarak hazırlanan model açılır. Artık burada Geometrinin modellenmesi yapılacaktır.



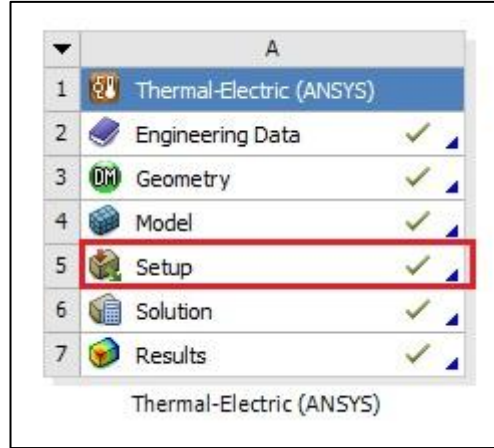
8. Modelleme işlemine Mesh yapılarak başlanır. Mesh kişinin tercihine ve gereğine göre üçgen ve kare olmak üzere iki şekilde düzenlenir.



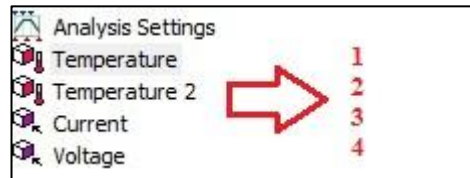
9. Modeli oluşturan parçalar arasındaki ilişkiyi ANSYS Workbench otomatik olarak kurar.



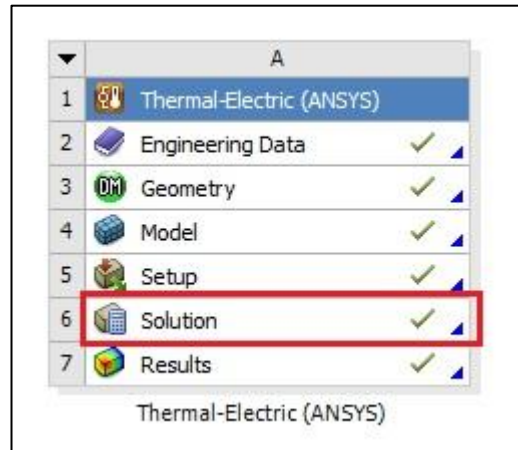
10. Mesh yapıldıktan sonra “Setup” seçeneğinden model üzerine yüklemeler ve sınır koşulları uygulanır. Yükleme olarak modül üzerinden geçen elektriksel akım uygulanırken, sınır koşulları olarak modülün üst taraf sıcaklığı, alt taraf sıcaklığı girilir ve sistemin elektriksel olarak topraklanması sağlanır.



11. Yukarda bahsedilen yüklemeler ve sınır koşullarının uygulanması aşağıdaki şekilde gösterilen sıraya göre uygulanmıştır



12. Yüklemeler ve sınır koşulları uygulandıktan sonra "Solution" kısmından çözüm yaptırılır.



13. Çözüm yaptırmadan önce hangi tür sonuçların raporları görüntülenmek isteniliyorsa onlar belirtilmelidir.

14. Son olarak, analiz sonuç raporlarını gözlemek istediğimiz fiziksel niceliklerin (“Solution” kısmında belirlenmiş olan) neticeleri “Result” kısmında görüntülenir (Elektriksel voltaj, Reaksiyon prob ile soğutma gücü vb...).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fikret GÜLDİKEN
Doğum Yeri ve Tarihi : KEŞAN 11.03.1986
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Yusuf Çapraz Anadolu Lisesi (1999-2003)
Lisans : U. Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü (2004-2008)

Çalıştığı Kurum :

İletişim : guldikenf@gmail.com

Bildiriler :

1- **GÜLDİKEN,F., PEKSÖZ A., DEREBAŞI N., KAYNAK G., 2009.** Grainleri Yönlendirilmiş %3 SiFe Elektrik Çeliğindeki Kesmenin Akı Dağılımına Etkisi. TFD 26 Fizik Kongresi, 24-27 Eylül, Nurol Kültür Merkezi, Bodrum.(Poster)

2- **GULDIKEN F., HACIISMAILOGLU M. C., and DEREBASİ N.,2010.** Finite Element Model For Cutting Effect on Flux Density Distribution Near the Cut Edge of Grain-Oriented Electrical Steels. 8 th European Magnetic Sensors and Actuators Conference (EMSA) July 4-7, Nurol Kültür Merkezi, Bodrum(Poster)

3- **HACIISMAILOGLU M. C., GULDIKEN F., CAYLAK O. and DEREBASİ N., 2010.** ,Estimation of Dynamic Hysteresis Loops of Nanocrystalline Toroidal Cores Using Numerical Techniques. 8 th European Magnetic Sensors and Actuators Conference (EMSA) July 4-7, Nurol Kültür Merkezi Bodrum-Turkey (Poster)

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

TEZ ÇOĞALTMA VE ELEKTRONİK YAYIMLAMA İZİN FORMU

Yazar Adı Soyadı	Fikret GÜLDİKEN
Tez Adı	Termoelektrik Modüllerin Fiziksel Boyutlarının Soğutma Kapasitesi Üzerine Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi
Enstitü	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Fizik
Tez Türü	Yüksek Lisans
Tez Danışman(lar)ı	Prof. Dr. Naim DEREBAŞI
Çoğaltma (Fotokopi Çekim) izni	<input type="checkbox"/> Tezimden fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input checked="" type="checkbox"/> Tezimin sadece içindekiler, özet, kaynakça ve içeriğinin % 10 bölümünün fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input type="checkbox"/> Tezimden fotokopi çekilmesine izin vermiyorum
Yayımlama izni	<input checked="" type="checkbox"/> Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasına izin veriyorum <input type="checkbox"/> Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasının ertelenmesini istiyorum 1 yıl <input type="checkbox"/> 2 yıl <input type="checkbox"/> 3 yıl <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasına izin vermiyorum

Hazırlamış olduğum tezimin belirttiğim hususlar dikkate alınarak, fikri mülkiyet haklarım saklı kalmak üzere Uludağ Üniversitesi Kütüphane ve Dokümantasyon Daire Başkanlığı tarafından hizmete sunulmasına izin verdiğimi beyan ederim.

Tarih : 30.06.2011

İmza :

