

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**TERMOELEKTRİK SOĞUTUCULARIN MODELLENMESİ
VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Türker ŞAHİN

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Altuğ ŞİŞMAN

Mayıs 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**TERMOELEKTRİK SOĞUTUCULARIN MODELLENMESİ
VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Türker ŞAHİN
(301981106)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Altuğ ŞİŞMAN

Mayıs 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 301981106 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Türker ŞAHİN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**TERMÖELEKTRİK SOĞUTUCULARIN MODELLENMESİ VE KARAKTERİZASYONU**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Altuğ ŞİŞMAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Z. Fatih ÖZTÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Şükrü BEKDEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **08 Haziran 2012**

Her zaman yanımda olan sevgili eşime ve aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez projemde bana destek olan Drotel Telekomünikasyon Ltd.'ye, tez hazırlığı sırasında, hem zaman ve hem de olanak sağlayan işyerim Ericom Telekomünikasyon ve Enerji Teknolojileri A.Ş.'ye ve kurucu üyesi İlker Aydın'a, NERG ve NETRG çalışma grubumuzun kurucu üyesi danışmanım Prof.Dr. Altuğ Şişman'a, yine grubumuzun üyeleri Yrd.Doç.Dr. Fatih Öztürk ve Arş.Gör. Sevan Karabetoğlu'na, mesai arkadaşım Kerem Turhan'a ve diğer Enerji Enstitüsü çalışanlarına teşekkürlerimi sunuyorum. Bu çalışmanın, termoelektrik soğutucu ünitelerin yaygınlaşmasında ve verimli kullanımında faydalı olacağına inanıyorum.

Nisan 2012

Türker Şahin
Fizik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
SEMBOL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
1.3 Çalışmanın Temel Çıktıları	4
2. TEMEL BİLGİLER	5
2.1 Termoelektrik Etkiler	5
2.1.1 Seebeck etkisi.....	6
2.1.2 Peltier etkisi.....	7
2.1.3 Thomson etkisi.....	8
2.1.4 Kelvin eşitlikleri.....	9
2.2 Yarıiletkenler.....	9
2.3 Isıl Titreşimler ve Fononlar.....	11
2.4 Termoelektrik Cihazların Bileşenleri	12
2.5 Temel Çalışma Prensipleri	13
2.6 Termoelektrik Cihazların Uygulama Alanları.....	14
2.7 Termoelektrik Soğutucuların Avantajları.....	17
2.8 Termoelektrik Soğutucuların Dezavantajları	18
2.9 Kanatçıklı Yüzeyler ve Isı Transferi	19
2.9.1 Kanat tipleri.....	19
2.9.2 Kanat karakteristikleri.....	20
2.9.3 Kanatlı yüzeyler için tipik toplam ısı geçiş katsayıları	26
3. MATEMATİKSEL MODELLEME	29
3.1 Peltier Modül İçin Temel Denklemler	29
3.1.1 Peltier etkisi.....	29
3.1.2 Joule ısınma etkisi	29
3.1.3 Fourier ısı iletimi.....	29
3.2 Modellemeye Giriş	34
3.3 Tek Katmanlı Matematiksel Model.....	39
3.3.1 Tek katmanlı Peltier modülün karakteristiği.....	40
3.3.1.1 Analitik sonuçlar	45
3.3.2 Tek katmanlı Peltier modülün ısı değiştiricilerle modellenmesi.....	52
3.3.2.1 Analitik sonuçlar	54
3.4 İki Katmanlı Matematiksel Model	56

3.4.1 İki katmanlı Peltier modülün karakteristiği.....	57
3.4.1.1 Sayısal sonuçlar.....	59
3.4.2 İki katmanlı Peltier modülün ısı değıştircilerle modellenmesi	67
3.4.2.1 Sayısal sonuçlar.....	68
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	79
4.1 Tek Katmanlı Model.....	79
4.2 Tek Katmanlı ve Isı Değıştircili Model.....	79
4.3 İki Katmanlı Kaskad Model	81
4.4 İki Katmanlı ve Isı Değıştircili Kaskad Model	81
4.5 Öneriler.....	82
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	85

KISALTMALAR

TE	: Termoelektrik
TEC	: Termoelektrik soğutucu
TEG	: Termoelektrik jeneratör

SEMBOL LİSTESİ

A	: Kesit alan
COP	: Performans katsayısı
h	: Hava ısı taşınım katsayısı
I	: Akım
$\vec{J}$	: Akım yoğunluğu vektörü
K	: Toplam ısı iletim katsayısı
k	: Isı iletim katsayısı
l	: Uzunluk
N	: Bir modüldeki p-n çiftlerinin sayısı
$\dot{Q}$	: Isıl güç
$\dot{Q}_{C,max}^{max}$	: Sıfır sıcaklık farkı altındaki maksimum soğutma gücü
q	: Isı akısı
P	: Çevre uzunluğu
R	: Direnç
R_i	: Toplam iç direnç
T	: Sıcaklık
$\bar{T}$	: Ortalama sıcaklık
U	: Isı değiştiricileri için toplam ısı geçiş katsayısı
V	: Gerilim
$\dot{W}$	: Elektriksel güç
x	: Konum
α	: Toplam soğuk ve katsayısı
α_{np}	: Tek bir n-p çiftinin Seebeck katsayısı
θ	: Akışkana göre sıcaklık farkı
θ_b	: Taban sıcaklığının akışkan sıcaklığından farkı
ρ	: Özdirenç
Π	: Peltier katsayısı
τ	: Düşük sıcaklığın yüksek sıcaklığa oranı
ΔT	: Sıcaklık farkı

İndisler

AB	: A ve B metal çifti
C	: Soğuk yüzey veya taraf
$COP_{\max}$	: Maksimum performans katsayısı durumu
F	: Isı değiştirici; genişletilmiş yüzeyler veya sıvı soğutmalı sistemler
H	: Sıcak yüzey veya taraf
$\max$	: Maksimum
n	: n-tipi yarıiletken
np	: n-p yarıiletken çift
opt	: Üst katmanın maksimum soğutma gücü durumu
p	: p-tipi yarıiletken
$\dot{Q}_{C,\max}$	: Maksimum soğutma gücü
$1,2$	: Bileşen belirtme; 1. yüzey, 2. yüzey
$*$	: maksimum soğutma koşulunu sağlayan değer
$**$	: maksimum performans katsayısı koşulunu sağlayan değer
∞	: Dış ortam sıcaklığı
$\Delta T_{\max}$	: Maksimum sıcaklık farkı durumu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Platinyuma göre Seebeck katsayıları (Url-2).	7
Çizelge 2.2 : Kanatlarda sıcaklık dağılımı ve ısı kaybı (Incropera, 2004).	25
Çizelge 2.3 : Cool Innovations ürünleri toplam ısı geçiş katsayıları (Url-6).....	26
Çizelge 2.4 : Wakefield ürünleri toplam ısı geçiş katsayıları (Url-7).....	27
Çizelge 3.1 : Tellurex firmasına ait Peltier modül performans özellikleri (Url-8). ...	35
Çizelge 4.1 : $T_H = 27^{\circ}C$ 'de tek katmanlı model sonuçları.	79
Çizelge 4.2 : $T_H = 27^{\circ}C$ 'de tek katmanlı ve ısı değıştiricili model sonuçları.	80
Çizelge 4.3 : $T_H = 27^{\circ}C$ 'de iki katmanlı model sonuçları.	81
Çizelge 4.4 : $T_H = 27^{\circ}C$ 'de iki katmanlı ve ısı değitiricili model sonuçları.	81

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : ΔT sıcaklık farkı altında oluşan Seebeck etkisi (Url-1).....	6
Şekil 2.2 : V_{in} potansiyeli altında oluşan Peltier etkisi (Url-3).....	7
Şekil 2.3 : Thomson etkisi.....	8
Şekil 2.4 : Bir termoelektrik modülün genel görünümü.....	12
Şekil 2.5 : a) Seebeck b) Peltier c) Termoelektrik bileşen (Url-4).....	13
Şekil 2.6 : Seri bağlanmış, yarıiletken n-p çiftleri (Url-5).....	13
Şekil 2.7 : a) Plutonium-238 peleti b) Classini uzay aracı ve RTG ünitesi.....	15
Şekil 2.8 : BMW marka otomobilin atık ısı termoelektrik jeneratörü.....	16
Şekil 2.9 : Kanat tipleri. a) Düz b) Değişken c) Dairesel d) İğne (Incropera, 2004). 20	
Şekil 2.10 : Genişletilmiş yüzeyde enerji dengesi (Incropera, 2004).....	20
Şekil 3.1 : Termoelement.....	30
Şekil 3.2 : Tellurex firmasına ait Bi_2Te_3 bir Peltier modülün boyutları.	34
Şekil 3.3 : ΔT 'ye göre $T_H = 27^\circ C$ 'de soğutma gücünün grafiği (Url-8).....	35
Şekil 3.4 : ΔT 'ye göre $T_H = 50^\circ C$ 'de soğutma gücünün grafiği (Url-8).....	36
Şekil 3.5 : ΔT 'ye göre $T_H = 27^\circ C$ 'de farklı akımlarda gerilim grafiği (Url-8).....	36
Şekil 3.6 : ΔT 'ye göre $T_H = 50^\circ C$ 'de farklı akımlarda gerilim grafiği (Url-8).....	37
Şekil 3.7 : ΔT 'ye göre $T_H = 27^\circ C$ 'de Q_C ve gerilim grafiği (Url-8).	37
Şekil 3.8 : ΔT 'ye göre $T_H = 50^\circ C$ 'de Q_C ve gerilim grafiği (Url-8).	38
Şekil 3.9 : TEC sıcaklık diyagramı.	38
Şekil 3.10 : Tek katmanlı Peltier modül ısı geçişleri.	40
Şekil 3.11 : Farklı ΔT 'lerde $T_H = 27^\circ C$ 'de Q_C ve akım grafiği.	45
Şekil 3.12 : $T_H = 27^\circ C$ 'de COP 'nin akım ile değişimi.	46
Şekil 3.13 : $T_H = 27^\circ C$ 'de COP 'nin $\dot{Q}_C$ 'ye göre değişimi.	47
Şekil 3.14 : $\dot{Q}_{C,max}$ 'ın ΔT 'ye göre değişimi.	47
Şekil 3.15 : $COP^{\dot{Q}_{C,max}}$ 'ın $\dot{Q}_{C,max}$ ile değişimi.	48
Şekil 3.16 : $COP^{\dot{Q}_{C,max}}$ 'ın T_H göre değişimi.	49
Şekil 3.17 : $COP^{\dot{Q}_{C,max}}$ 'ın τ ile değişimi.	49
Şekil 3.18 : COP_{max} 'ın ΔT 'ye göre değişimi.	50
Şekil 3.19 : COP_{max} 'ın τ ile değişimi.	50
Şekil 3.20 : COP_{max} 'ın ortalama sıcaklık $\bar{T}$ ile değişimi.	51
Şekil 3.21 Tek katmanlı ve ısı değiştiricili Peltier soğutucu.	52
Şekil 3.22 : $\dot{Q}_{C,max}$ 'ın R_U 'ya göre grafiği.	54
Şekil 3.23 : COP_{max} 'ın R_U 'ya göre grafiği.	55

Şekil 3.24 : Farklı U_C ve U_H değerlerinde $\dot{Q}_{C_{\max}}$ 'ın ΔT 'ye göre değişimi.	55
Şekil 3.25 : Çok katmanlı ticari Peltier modüller.	56
Şekil 3.26 : İki katmanlı Peltier modülün şematik gösterimi.	57
Şekil 3.27 : $T_H = 27^\circ C$ 'de I_1 ile I_{2*} arasındaki ilişki.	59
Şekil 3.28 : $T_H = 27^\circ C$ 'de T_i ile I_1 arasındaki ilişki.	60
Şekil 3.29 : $T_H = 27^\circ C$ 'de Q_{C1} ile I_1 arasındaki ilişki.	60
Şekil 3.30 : $T_H = 27^\circ C$ 'de $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ ile I_1 arasındaki ilişki.	61
Şekil 3.31 : $T_H = 27^\circ C$ 'de $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ ile ΔT arasındaki ilişki.	62
Şekil 3.32 : $T_H = 27^\circ C$ 'de COP_{opt} ile I_1 arasındaki ilişki.	63
Şekil 3.33 : $T_H = 27^\circ C$ 'de COP_{opt} ile ΔT arasındaki ilişki.	64
Şekil 3.34 : Farklı ΔT 'lerde COP_{opt} ile $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ arasındaki ilişki.	64
Şekil 3.35 : $COP_{\max}$ ile ΔT arasındaki ilişkisi.	65
Şekil 3.36 : $Q_{C1}^{COP_{\max}}$ ile ΔT arasındaki ilişkisi.	66
Şekil 3.37 : $Q_{C1}^{COP_{\max}}$ ile I_1 ve I_2 arasındaki ilişkisi.	66
Şekil 3.38 : İki katmanlı Peltier soğutucu şematik gösterimi.	67
Şekil 3.39 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ C$ 'de I_1 ile I_{2*} arasındaki ilişki.	69
Şekil 3.40 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ C$ 'de $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ ile I_1 arasındaki ilişki.	70
Şekil 3.41 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ C$ 'de $\dot{Q}_{C1,\max}^{opt}$ ile U_C arasındaki ilişki.	70
Şekil 3.42 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ C$ 'de $\dot{Q}_{C1,\max}^{opt}$ ile U_H arasındaki ilişki.	71
Şekil 3.43 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ C$ 'de COP_{opt} ile U_H arasındaki ilişki.	72
Şekil 3.44 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ C$ 'de COP_{opt} ile U_C arasındaki ilişki.	72
Şekil 3.45 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ C$ 'de COP_{opt} ile U_H arasındaki ilişki.	73
Şekil 3.46 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ C$ 'de COP_{opt} ile ΔT arasındaki ilişki.	74
Şekil 3.47 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ C$ 'de COP_{opt} ile $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ arasındaki ilişki.	74
Şekil 3.48 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ 'de $COP_{\max}$ ile ΔT arasındaki ilişki.	75
Şekil 3.49 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ 'de $COP_{\max}$ ile R_U arasındaki ilişki.	76
Şekil 3.50 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ 'de $\dot{Q}_{C1,\max}$ ile ΔT arasındaki ilişki.	77
Şekil 3.51 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ 'de $\dot{Q}_{C1,\max}$ ile R_U arasındaki ilişki.	78

TERMoeLEKTRİK SOĞUTUCULARIN MODELLENMESİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Termoelektrik modüller yarıiletken malzeme tabanlı yapılar olup, jeneratör ve soğutucu tipinde olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Her iki modül tipinde de n ve p tipi yarıiletken malzemeler kullanılır. Bir n-tipi ve bir p-tipi yarıiletken biraraya gelerek yarıiletken çifti oluştururlar. Bu çiftler seri olarak birbirine bağlanır ve termoelektrik modülü meydana getirirler.

Termoelektrik jeneratörler, iki yüzeyi farklı sıcaklıklar altında iken, gerilim üretirler. Ürettikleri gerilimin büyüklüğü, yarıiletken malzemeye ve sıcaklık farkının büyüklüğüne bağlıdır. Sıcaklık farkı arttıkça gerilim artar. Termoelektrik jeneratörler ile hassas sıcaklık ölçümleri de yapmak mümkündür. Düşük sıcaklık farkı altında bile duyarlılıkları sayesinde bir yüzeyin sıcaklığı hızlı bir şekilde ölçülebilir.

Günümüzde otomobillerde, kamyonetlerde ve tırlarda egzoz gazı atık ısısından faydalanılarak termoelektrik ile enerji üretimi yapılmaktadır. Dolayısıyla, atık ısıнын oluştuğu uygun ortamlarda termoelektrik jeneratörlerin kullanılması söz konusu olabilmektedir.

Termoelektrik soğutucu modüller ise ısı pompası gibi çalışırlar ve elektriksel potansiyel fark uygulandığında, bir yüzeyinden ısı emilirken diğer yüzeyinden ısı atımı gerçekleşir. Teorik ömürlerinin sonsuz olması, bakım gerektirmemesi, arıza olasılığının çok düşük olması, sesiz olması, çok hızlı ve keskin cevap vermesi gibi avantajlarının yanı sıra, enerji verimliliği açısından gelişmesi devam eden cihazlardır.

Termoelektrik soğutucu konusu uzun süredir çalışılmakta olup birçok uygulama gerçekleştirilmiştir. Günümüzde, küçük elektronik bileşenlerden geniş hacimlerin soğutulmasına kadar birçok uygulamada termoelektrik soğutucu modüller kullanılmaktadır. Otellerde bulunan mini buzdolapları, ev tipi soğutucular, tıbbi organ taşıma kabinleri ve askeri uygulamalar gibi daha birçok alanda termoelektrik soğutucular tercih edilmektedir.

Bir soğutucu sistem içerisinde termoelektrik modüllerin kullanım şekli çeşitlilik gösterebilir. Tek katman, iki katman veya daha çok katman oluşturacak şekilde dizilebilirler. Dizilimdeki farklılıklar istenilen soğutma gücüne ve ortam sıcaklığına bağlıdır.

Bu tez ile termoelektrik soğutucular dört farklı temel durum için analitik ve sayısal olarak modellenmiştir. Bunlar tek katmanlı ve iki katmanlı termoelektrik soğutucu

sisteminin, dizayn değişkenleri olarak soğutma yükünün yanısıra, sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları ile sıcak ve soğuk akışkan sıcaklıklarının seçildiği durumlardır. Her modelde soğutma gücü ve performans katsayısının (COP), akım ve yüzeyler arasındaki sıcaklık farkına göre değişimleri incelenmiştir. Akışkan sıcaklıklarının dizayn değişkeni olarak seçildiği dolayısıyla, ısı değiştiricilerin dahil edildiği modellerde ise toplam ısı geçiş katsayısına göre soğutma gücü ve performans katsayısı değişimleri incelenmiştir. Gerek tek gerekse deok katmanlı modellerde, modüllere uygulanacak akımlar soğutma yükü ve performans katsayısını maksimize edecek şekilde ayrı ayrı belirlenmiş ve incelenmiştir.

Analitik ve sayısal modeller göstermiştir ki; ısı değiştiricilerinin olmadığı tek katmanlı dizilim, performans ve soğutma gücünün en yüksek olduğu sonuçları vermektedir. Katman sayısı arttıķa soğutma gücü ve performans düşmektedir ancak, maksimum elde edilebilen sıcaklık farkı artmaktadır. Bununla birlikte, yüzey sıcaklıklarını kusursuz kontrol edebilecek bir mekanizma pratikte varolmadığı için, gerçekçi yaklaşım akışkan sıcaklıklarının kontrol edildiği dolayısıyla ısı değiştiricili modeldir. Isı değiştiricilerin sisteme dahil edildiği durumda ise elde edilebilen maksimum soğutma gücü, maksimum performans katsayısı ve maksimum sıcaklık farkı dahil edilmedikleri duruma göre düşmektedir. Yapılan incelemeler sonucunda hangi büyüklüklerin kritik olduğu, sistem üzerinde iyileştirmelerin nasıl yapılabileceği ve sistemin nasıl boyutlandırılarak optimal çalışma koşullarının nasıl belirleneceği ortaya konulmuştur.

MODELLING OF THERMOELECTRIC COOLERS AND THEIR CHARACTERIZATION

SUMMARY

Thermoelectric modules are the modules which were made of semi-conductor components and considered as two groups as generator and cooler. Each two modules consist of n and p type doped semi-conductor materials. Semiconductors are connected in serially to bring out the thermoelectric module.

Thermoelectric generators produce voltage when two surfaces are at different temprature levels. The magnitude of the voltage is related to both the type of the semiconductor material and the temprature difference of the surfaces. The magnitude of the voltage increases with the increase of the temprature difference of the surfaces. Thermoelectric generatures are feasible for accurate temprature measurements. This sensivity provides an accurate measurement difference even under low temperature differences.

Nowadays, thermoelectric generators commonly use to produce energy by utilizing the waste heat of exhaust gas of cars, vans and trucks. Thus, thermoelectric generators can be followed up in the environments where the waste heat may be formed.

Thermoelectric cooling modules work like a heat pump and when a potential difference is applied, heat absorbtion takes place in one side while heat rejection takes place in the other surface. Thermoelectric cooling devices has got many advantages such as having theoretically infinite lifetime, does not require maintenance, a very low probability to have failure, silent, as many advantages as well as to respond quickly and sharply, the development of devices continue for energy efficiency.

Subject of thermoelectric refrigeration is sustained issue and there exist many applications. Today they are being used in lots of applications such as cooling range from large volumes to small electronic components, mini-refrigetors in hotels, home type mini-coolers, medical organ transportaions and etc..

Usage of thermoelectric modules may vary in a cooling system. They can be arrayed as single-layer, two-layer or multilayer. These arrangements depends on the desired cooling power and ambient temperature.

With this thesis thermoelectric coolers are modelled analytically for four different main cases. These are single-layer and double-layer thermoelectric module system in case of including heat exchangers and not including in which. The distribution of

cooling power and coefficient of performance are given in terms of current and temperature difference between surfaces in each analytical model. In both single and double-layer models, electrical currents which applied on modules as well as maximize cooling power and coefficient of performance are determined and analyzed.

Analytical and numerical models show that, under a certain temperature difference, there are specific current values that are maximize the coefficient of performance and the cooling power. Under different temperature ranges, these current values are also different. The coefficient of performance is reached its maximum value at lower current value than the current value of the maximum cooling power. Current values larger than this, consumed power and thermal loads to the system increase faster than the cooling power and reduces the coefficient of performance. The maximum value of cooling power takes place at greater current value than the current value of the maximum coefficient of performance. Increase in temperature difference between the case of surfaces, both cooling power and coefficient of performance decrease is approaching zero. The value of temperature difference for the zero cooling power is the maximum temperature difference value for a thermoelectric module and differs for each analytical and numerical model. Increasing the number of the layer with the maximum obtainable value of the temperature difference increases, but the increase in the number of layers, reduces the maximum value of coefficient of performance and the maximum value of cooling power.

When heat exchangers are implicated to the system, the maximum cooling power, the maximum coefficient of performance and the maximum temperature difference decrease relative to the system without heat exchangers. This type of extended surfaces due to its heat transfer coefficient reduces the cold surface and a hot surface heat transfer so, the improvement for a system seems to be necessary. Considering the system design conditions, there are optimum heat transfer coefficients and the effect of the larger than optimum values for the system has shown to be in trace amounts.

The values given by manufacturer to thermoelectric module are compared with in each model. Accordingly, without heat exchanger on hot and cold surfaces, namely infinite heat transfer to the fluid in single-layer analytical model, the values given by manufacturer are provided. This result implies that the given values can be achieved under special laboratory conditions. In case of heat exchangers, the coefficient of performance and cooling power which is lower than the given values is obtained. In a single-layer model with heat exchangers, hot and cold side air-cooled heat transfer coefficients for a system is selected, in the absence of temperature difference between hot and cold surfaces, the maximum cooling power obtained is one-third of the value is given by the manufacturer. Due to absence of a mechanism which controls the surface temperatures precisely, the fluid temperature controlled model which includes heat exchanger is more realistic and the desired thermoelectric cooler cooling powers can be obtained is always lower than the values given by the manufacturer.

As a results of analysis, the critical parameters which improve the system and optimize the operation conditions are obtained.

1. GİRİŞ

Termoelektrik modüller, TE, doğru akımın etkisi altında bir yüzeyi soğurken diğer yüzeyi ısıyan yarıiletken malzemelerden yapılan elektronik bileşenlerdir. TE'ler, n tipi ve p tipi yarıiletkenlerin birbirlerine seri olarak bağlanmaları ile oluşturulurlar ve her bir p-n çifti “çift” olarak adlandırılır. Elektronik olarak seri olmasına karşın ısı transferi açısından paralel bağlanmıştır ve böylece bir yüzeyden ısı soğurulurken diğer yüzeyden ısı atılmaktadır. TE soğutucular, TEC, küçük bir ısı pompası gibi çalışırlar ve buzdolapları ile aynı termodinamik prensibe sahiptirler. TEC'ler düşük verimli olduklarından genellikle küçük hacimlerin soğutulması için kullanılır.

Peltier modüller hareketli bileşenlere sahip olmadıkları için uzun ömürlü yapılardır. Ticari olarak çeşitli ebatlarda ve güçte peltier modüller üretilmektedir. 525 Watt'lık soğutma gücüne sahip olanları mevcuttur. Üreticilerin verdiği bu değerler maksimum değerler olup bu değerlere ancak laboratuvar koşullarında yaklaşmak mümkün olabilir. Bu yüzden bir termoelektrik modülün bir sistem içerisindeki davranışının modellenmesi önem kazanmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Termoelektrik modüller ile yapılacak herhangi bir soğutucu ünite için gerek soğutma yüklerinin gerekse de verimlerinin belirlenen ortam şartlarında en yüksek değerlerine ulaşması için uygulanacak akım koşullarının doğru bir şekilde hesaplanması ve ayrıca bu değerlerin çeşitli dizayn ve işletim parametreleriyle değişiminin bilinmesi önem arz etmektedir.

Üreticilerin termoelektrik soğutucular için verdiği ürün bilgileri, laboratuvarlarda oluşturulan en ideal koşullarda elde edilen bilgiler olması sebebiyle, bir termoelektrik modül ile dizayn edilen soğutucudan elde edilen soğutma gücü ve performansı, verilen bilgilerden farklılık göstermektedir.

Bu farklılıkların temel sebepleri çoğunlukla üreticinin verdiği yüzey sıcaklıklarından farklı gelişen sıcaklıklar ve bir termoelektrik soğutucu tasarımında sisteme dahil edilen ısı değiştirici yüzeylerin varlığı olmaktadır. Bunun dışında, farklı işletim hedefleri de farklı sonuçlara yolaçmaktadır.

Bu tez çalışmasında termoelektrik soğutucuların dört farklı temel durum için analitik ve sayısal olarak modellenmesi amaçlanmıştır. Her modelde soğutma gücü ve performans katsayısının (COP), akım ve yüzeyler arasındaki sıcaklık farkına göre değişimleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda hangi büyüklüklerin kritik olduğu, sistem üzerinde iyileştirmelerin nasıl yapılabileceği ve sistemin nasıl boyutlandırılarak optimal çalışma koşullarının nasıl belirleneceği ortaya konulmuştur.

1.2 Literatür Araştırması

Termoelektrik modüller, literatürde uzun zamandır araştırılan bir konudur. Araştırmaların ve kitapların genellikle bir termoelektrik modülü modelleme ve malzeme yapısının iyileştirilmesi üzerine kurulu olduğu söylenebilir. Özdeş termoelektrik modüllerden kurulu kaskad yapının bir sistem içerisinde modellendiği yayın sayısı, sayıca daha az olmasına karşın, modellemelerde sıklıkla kullanılan maksimum soğutma gücü, performans katsayısı ve yüzey sıcaklıklarının analizine yönelik araştırmalar incelenmiştir.

Simons ve Chu (2000), çalışmalarında kendilerinden önce yapılmış olan termoelektrik soğutma uygulamalarını analiz etmişler, IBM firmasının kendilerinden önce yaptığı çalışmaları örnek göstererek, alternatif bir termoelectric soğutma sisteminin performansını kıyaslamışlardır. Araştırmaya göre, bir MCM (Multi-Core Module) chipi 275 Watt ile çalışırken, seçilen 62x62 mm² ebatlarındaki su soğutmalı termoelektrik soğutucu ile 335 Watt güç harcanarak, ancak 20°C'lik bir sıcaklık düşümü yaratabilmişlerdir. Ancak, bu çalışmada ulaşılabilen COP değerleri yeterli bulunmamış, termoelektrik malzemelerde iyileştirmenin gerekliliği vurgulanmıştır.

Huang ve Duang (2000), araştırmalarında birçok elektronik bileşenin ve hasas yapının sabit sıcaklıkta çalışma zorunluluğunu belirterek değişken ortam sıcaklıklarında hasas bir sıcaklık kontrolünün gerekli olduğunu ifade etmişler ve bunu sağlamak için öncelikle dinamik sistemin tanımlanması gerektiğini vurgulamışlardır. alışmalarında, kısa-sinyal lineerleştirme metodunu kullanan Huang ve Duang (2000), bu sayede temel yasa denklemlerin uygulanabileceğini göstermişler ve sıcaklık kontrolü için analog bir kontrol sistemi tasarlamışlardır.

Metzger ve Huebener (1999) tarafından yapılan teorik çalışmada, beş katmanlı termoelektrik soğutucu modellenerek, 160 K civarında soğuk yüzey elde edilmiştir. Bu teorik çalışmada, Seebeck katsayısı, termal iletkenlik ve elektriksel iletkenlik sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ele alınmamıştır.

Karimi ve diğ.(2011) ok katmanlı termoelektrik modüllerin performans analizi adlı çalışmasında, bu tip termoelektrik soğutucuların, tek katmanlılara göre iki yüzeyi arasında daha büyük bir sıcaklık farkı yaratabilecekleri ve soğutucu yüzeyler kullanıldığı durumda, piramit yapılı termoelektrik soğutucuların maksimum ısıl g ve performans katsayısı verilerini incelemişlerdir. Yapılan sayısal analiz sonuçlarında, katman sayısı ile farklı akımlarda elde edilen soğutma yükü ve COP ilişkileri verilmiştir. Katman sayısı 8, akım 6(A) ve yüzey sıcaklıkları oranı 1.4 iken, maksimum soğutma yükü 275 W/cm^2 olarak gerçekleşmiş, bu durumda COP ise 0.3 civarında elde edilmiştir. Ancak, aynı katman ve sıcaklık oranında maksimum COP akım 1.2A iken gözlemlenmiştir.

Çok katmanlı termoelektrik soğutucular hakkında başka bir çalışmada, geçiş zamanı hesaplaması yapılmıştır (Ravich ve Gordienko, 2007). İki katmanlı termoelektrik soğutucular üzerinde konuyu ele alan araştırmacılar, bu soğutucular için genellikle kararlı hal zmlemesi yapıldığını, ancak kararlı hal gerçekleşene kadar uzun bir srenin geçtiğini belirterek, geçiş zamanı içerisinde de bir çözümlemenin yapılması gerekliliği vurgulamıştır. İki ve daha fazla katmanlı termoelektrik soğutucular için analitik çözümlemenin zorluğu belirtilerek, çözüm için sayısal analiz yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada teorik ve deneysel veriler arasındaki korelasyonun %10-15 civarında hata ile uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Du ve Wen (2011), Thomson etkisini göz önünde bulundurarak, tek katmanlı bir termoelektrik soğutucunun deneysel karakterizasyonunun sayısal çözümlemesini yapmışlardır. Sabit Seebeck katsayısı, 1. ve 2. dereceden Seebeck katsayısı olmak üzere, üç farklı yaklaşım ile bir termoelektrik soğutucu için soğutma gücü, performans katsayısı ve sıcaklık dağılımı deneysel ve teorik olarak verilmiştir. Sonuçlarında, maksimum sıcaklık farkını gözlemlemek için sabit Seebeck yaklaşımının yeterli olduğu belirtilirken, maksimum COP'in $\Delta T=0K$ 'e gerçekleştiği ve yüksek akımlarda ise 2. dereceden Seebeck yaklaşımının en iyi sonucu verdiği kanaatine varılmıştır.

Liu ve Wen (2011) ise, iki katmanlı peltier modülleri seri, paralel ve ayırık olmak üzere üç farklı bağlantı durumu için modellemişlerdir. Bu modelde de sabit Seebeck, 1. ve 2. dereceden Seebeck yaklaşımı uygulanmış, Thomson etkisi hesaba katılmıştır. Seebeck etkisinin deneysel karakterizasyonunda, 1. ve 2. dereceden Seebeck yaklaşımı deneysel verilerle uyumlu çıkmaktadır. 2. dereceden Seebeck yaklaşımı lineere yakın sonuç vermektedir ve seri, paralel ve ayırık bağlantılar için sıcaklık farkının akıma göre dağılımı 2. dereceden seebeck yaklaşımı ile daha uyumludur. En fazla sıcaklık farkı, ayırık bağlantıda akımların oranı $\frac{1}{2}$ iken elde edilmiştir.

1.3 Çalışmanın Temel Çıktıları

Bu çalışmada tek ve iki katmanlı termoelektrik sistemler, sıcak ve soğuk yüzeylerine ısı değiştiricilerinin dahil edildiği ve edilmediği durumlar için analitik olarak modellenmiş ve aşağıdaki temel çıktılar elde edilmiştir:

- Soğutma güçlerinin akım ve sıcaklık ile değişimleri
- Performanslarının akım ve sıcaklık ile değişimleri
- Maksimum soğutma güçleri
- Maksimum performansları
- Isı değiştiricilerinin sistemin soğutma gücüne olan etkisi
- Isı değiştiricilerinin sistemin performansına olan etkisi

2. TEMEL BİLGİLER

2.1 Termoelektrik Etkiler

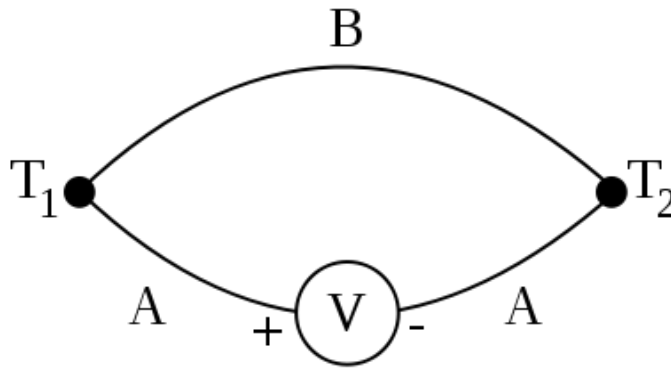
Termoelektrik etkiler Seebeck, Peltier ve Thomson etkileridir. İlk kez 1821 yılında Alman fizikçi Thomas Johann Seebeck tarafından keşfedilmiştir. İki farklı metal kullanılarak bir devre oluşturulduğunda, metallerin eklem yerleri farklı sıcaklıklarda iken pusulanın iğnesinin saptığını göstermiştir (Goldsmid, 2009, p.1). Devreden akım geçtiğini düşünmediği için, bu olayı termomanyetik etki olarak tanımlamıştır. 1820 yılında elektrik akımı ile manyetizma arasındaki ilişkiyi bulan Danimarkalı fizikçi Hans Christian Orsted termoelektrik kavramını kullanmıştır.

1934 yılında Fransız fizikçi Jean Christian Athanasa Peltier, Seebeck tarafından ilk etkinin keşfinden 13 yıl sonra, kendi adıyla anılan Peltier etkisini keşfetmiştir. Fizikçi, birbirine bağlı iki farklı metalden oluşan bir devreden akım geçirildiğinde, akımın yönüne bağlı olarak, metallerin eklem yerlerinden birinden ısı soğurulurken, diğerinden ise ısı salınımı olduğunu bulmuştur (Goldsmid, 2009, p.1). Bu etki, Seebeck etkisinin tersi olarak düşünülebilir. Bu yüzden bu iki termoelektrik etki, çoğunlukla Seebeck-Peltier etkisi olarak anılmaktadır.

Thomson etkisi ise, 1851 yılında William Thomson 1.Lord Kelvin tarafından önce tahmin edilmiş sonra ispatlanmıştır. Thomson etkisi, sıcaklık gradyanı altındaki bir metal telden akım geçirilmesi sonucu üretilen tersinir ısı akısının oluşumu ile ilişkilidir (Rowe, 2006, p.1-3). Thomson etkisi, termoelektrik cihazlar için birincil öneme sahip olan bir etki olmamakla birlikte, detaylı bir hesaplamada ihmal edilmemelidir (Rowe, 2006, p.1-3).

2.1.1 Seebeck etkisi

Aynı sıcaklıkta iki ayrı metal için, serbest elektron yoğunluğu ve ortalama hız farklı olur. Bu metaller birleştirildiğinde, elektro kimyasal potansiyeli daha büyük olan elektronlar, öteki metale geçer. Geçişten önce iki metalde artı ve eksi yükler arasında bir denge bulunur. Geçişten sonra bu denge bozulur ve metaller arasında bir elektrik alanı oluşur. Birleşme noktalarının aynı sıcaklıkta olmasına karşılık, elektrik alanının büyüklüğü sıcaklığa bağlıdır. Yani, elektrik alanının kuvveti, birleşme noktası sıcaklığıyla birlikte değişir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi bir çift ortaya çıkarıldığında, iki birleşme noktası oluşur. Birleşme noktası gerilimleri, birleşme noktaları aynı sıcaklıkta olduğunda, eşit genlikte ama ters yöndedir. Bu yüzden, birbirlerinin gerilimini yok ederler. Birleşme noktaları farklı sıcaklıklarda olduklarında, yok etme söz konusu olmaz ve net bir potansiyel fark oluşur. Bu Seebeck etkisidir. Termokupllar bu prensiple çalışırlar.



Şekil 2.1 : ΔT sıcaklık farkı altında oluşan Seebeck etkisi (Url-1).

T_1 ve T_2 sıcaklık farkından kaynaklanan V elektriksel potansiyeli (2.2) denklemi ile hesaplanabilir (Goldsamid, 2009).

$$V = \alpha_{AB}(T_1 - T_2) \quad (2.1)$$

$$\alpha_{AB} = V / \Delta T \quad (2.2)$$

Burada α_{AB} differansiyel Seebeck katsayısıdır ve birimi V/K 'dir. ΔT ise sıcaklık farkı olup, birimi K 'dir.

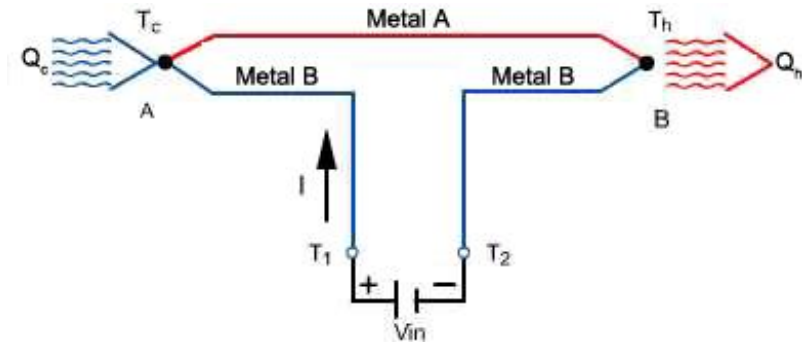
Çizelge 2.1’de platinyuma göre bazı metaller için Seebeck katsayıları verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Platinyuma göre Seebeck katsayıları (Url-2).

Metal	Seebeck Katsayısı ($\mu\text{V/K}$)
Antimon	47
Nikrom	25
Molibden	10
Kadmiyum	7.5
Tungsten	7.5
Altın	6.5
Gümüş	6.5
Bakır	6.5
Rodyum	6.0
Tantal	4.5
Kurşun	4.0
Alüminyum	3.5
Karbon	3.0
Civa	0.6
Platinyum	0
Sodyum	-2.0
Potasyum	-9.0
Nikel	-15
Konstantan	-35
Bizmut	-72

2.1.2 Peltier etkisi

Şekil 2.2’de, A ve B gibi farklı iki metal telden oluşan devreden bir akım geçirildiğinde, A noktasında ısı soğrulurken, B noktasından ısı atılır. Bu etki Peltier etkisi olarak bilinir.



Şekil 2.2 : V_{in} potansiyeli altında oluşan Peltier etkisi (Url-3).

Birim zamanda A noktasından soğurulan ısı miktarı $\dot{Q}$, uygulanan akım ve Peltier etkisi ile doğru orantılıdır.

$$\dot{Q} = \Pi_{AB} I = (\Pi_B - \Pi_A) I \quad (2.3)$$

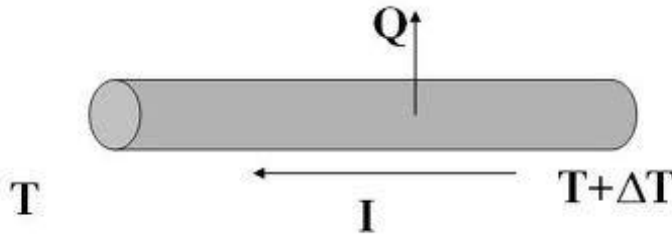
$$\Pi_{AB} = \frac{\dot{Q}}{I} \quad (2.4)$$

$$\Pi_{AB} = \alpha_{AB} T \quad (2.5)$$

Denklem (2.3), (2.4) ve (2.5)'te yer alan π_{AB} , Peltier katsayısını ifade etmektedir (Goldsmid, 2009). Sıcaklığın bir fonksiyonudur. Peltier katsayısı, seçilen bir metal için her bir yük başına taşınabilen ısıl gücün bir ölçüsüdür. Birimi J/C ya da V'dir.

2.1.3 Thomson etkisi

Homojen bir iletkenin uçları ΔT sıcaklık farkı altında iken, J akım yoğunluğunda akım geçirilir ise, malzemeye ve akımın yönüne bağlı olarak ısı soğurulur veya salınır. Birçok iletken için akım sıcak uçtan soğuk uca doğru akıyor ise ısı salınır, ters yönde akıyor ise ısı soğurulur. Isının miktarı malzemenin ve akımın şiddeti ile orantılıdır.



Şekil 2.3 : Thomson etkisi.

$$q''' = \rho \cdot \vec{J}^2 - \tau \cdot \vec{J} \cdot \vec{\nabla} T \quad (2.6)$$

Birim hacim başına üretilen ısı, q''' , denklem (2.6)'da verilmiştir. Buna göre ρ öz direnç, birimi Ωm , τ Thomson katsayısı, birimi V/K ve J de akım yoğunluğu birimi A/m^2 dir.

Thomson katsayısı, τ , Çinko ve Bakır gibi elektromotor kuvveti sıcaklıkla doğru orantılı olan metallerde pozitif değer alırken, Kobalt, Nikel ve Demir gibi metallerde ise negatif değer alabilmektedir.

2.1.4 Kelvin eşitlikleri

Kelvin eşitlikleri, Seebeck, Peltier ve Thomson katsayıları arasındaki eşitliklerdir.

$$\tau = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (2.7)$$

$$\Pi = \alpha \cdot T \quad (2.8)$$

Thomson katsayısı, tek bir materyal için ölçülebilir iken Seebeck ve Peltier katsayıları için kesin bir ölçme metodu henüz yoktur. Ancak, bir başka referans malzemeye göre ölçüm yapılabilmektedir.

2.2 Yarıiletkenler

Yarıiletken malzemelerin iletkenlikleri metallerle yalıtkanlar arasındadır. Valans bandı ile boş iletim bandı arasındaki enerji, bu malzemelerde 4eV'den küçüktür. Periyodik cetvelin IV. grubundaki Si, Ge ve Sn gibi elementler, en önemli yarıiletkenlerdir. Saf yarıiletken sayılan bu elementler, kovalent bağlı olup elmas kübik veya kompleks kübik kafes yapısına sahiptir ve birbirleriyle eşit açı yapan 4 kovalent bağ oluştururlar. Periyodik cetvelde III. grup ile V. grup elemanlar, benzer şekilde II. grup ile VI. grup elemanlar arasında oluşturulan kovalent bağlı bileşikler de aynı elektron yapısına ve aynı kristal yapısına sahiptirler, dolayısıyla bunlar da saf yarıiletken sayılırlar (Onaran, 1993, p.111).

Saf yarıiletkenlerde E_a (valans ve iletim bandı arasındaki enerji) enerji aralığı küçük olduğundan, elektriksel alan veya ısı enerjisiyle yeterli sayıda elektron boş iletim bandına geçebilir ve iletim sağlar.

Uçları arasında bir potansiyel uygulanınca enerji kazanan elektron, kovalent bağdan koparak serbest hale gelir ve artı kutba doğru hareket eder. E_a enerji aralığını aşarak boş iletim bandına geçen elektron, geriye elektron boşluğu bırakır. Valans bandında boş kalan enerji düzeyine, bandın içinde bulunan başka bir elektron, az bir enerjiyle aktive edilerek geçince serbest hale gelir. Atomsal dizilişte artık yeni bir boş enerji düzeyi oluşmuştur. Benzer şekilde, eksi kutuptan gelen diğer bir elektron boşluğu doldurur. Bu şekilde elektron deliğinin artı kutuptan eksi kutba doğru hareket ettiği ve artı yük taşıyıcı görevi yaptığı düşünülür.

Katkılı yarıiletkenler, saf yarıiletkenliğe sahip malzemelerin kafes yapısına uygun katkı malzemelerin dop edilmesiyle oluşturulurlar ve saf yapının karakteristiği değişir. Bu katkı elemanları yasak enerji aralığına yüksek enerjili yük taşıyıcı yerleştirebilirler. Genellikle seyreltilmiş katkı eriyiği şeklinde olan bu yarıiletkenlerde katkı elemanlarının miktarı atomsal yüzde olarak %0.01 ile %0.1 civarındadır (Onaran, 1993, p.114).

Katkılı yarıiletkenler n-tipi ve p-tipi olmak üzere iki gruba ayrılırlar. n-tipi yarıiletkenlerde, kovalent bağ yapımına katılmayan bir elektronun enerjisi E_v ile gösterilirse, katkıdan gelen bu elektronun iletim bandına geçebilmek için atlaması gereken enerji $\Delta E = E_a - E_v$ 'dir. Dolayısıyla, daha az bir enerji ile iletim sağlanır. Benzer şekilde p-tipi bir yarıiletkende kovalent bağlardan birinde bir elektron eksik ise bu boşluğa bir elektron yerleştirmek için gereken enerji E_b 'dir ve E_a 'dan daha küçüktür.

0 K'e saf yarıiletkenlerde, valans bandı tam dolu ve iletim bandı boş olarak düşünülür. Sıcaklık arttıkça aktive olan elektron sayısı artar ve n-p çiftleri oluşmaya başlar. Sıcaklıkla doğru orantılı olarak iletkenlik artar. Bu durum metallerde ters yönde gelişir, sıcaklık arttıkça metallerde direnç artar ve iletkenlikleri azalır. Yarıiletkenlerde de iç direnç sıcaklıkla artar, ancak yük taşıyıcı sayısındaki büyük artış, direnç artışının iletkenlik üzerinde oluşturacağı olumsuz etkiyi örter.

2.3 Isıl Titreşimler ve Fononlar

Bir örgü titreşiminin enerjisi veya elastik dalgalar kuantlanmıştır. Bir elastik dalga içindeki enerji kuantumuna “fonon” adı verilir. Fotonlarla karşılaştırıldığında bu enerji kuantumlanması, elektromanyetik dalgadaki fotona benzer. Dalga fiziğindeki hemen hemen bütün kavramlar fotonlara uygulandığı gibi fononlara da uygulanabilir. Kristallerdeki elastik dalgalar fononlardan oluşmuş olup, kristal içindeki ses dalgaları da fononları kapsar. Bunları ısısal uyarılmış fotonlarla karşılaştırdığımızda siyah cisim içerisindeki elektromanyetik ışıma benzetebiliriz (Gezici, 1992, p.156).

Gazlarda atomlar ve moleküller sürekli hareket halindedir. Isıl enerji arttıkça hızları artar. Katılarda ise atomlararası kuvvetli bağlar vardır ve hareketleri kısıtlıdır. Denge konumu etrafında ısı enerjinin etkisiyle titreşim hareketi yapabilirler. Atomlararası bağların boyunu artan ısı enerjisi uzatacağı için sıcaklık artışıyla genleşme olur. Atomlararası bağ kuvvetleri elastik yay gibi davranarak titreşimleri atomdan atoma termoelastik dalgalar halinde iletirler. Bu dalgaların frekansları ve hızları malzemenin özelliğine ve yoğunluğuna bağlıdır. Belirli bir enerji paketine sahip olan termoelastik dalgaların hareketi, fononların hareketine benzetilir. Fononların sahip olduğu enerji, titreşim frekansı ile doğru orantılıdır. Metallerde ısı iletimi fononlarla ve serbest elektronlarla sağlanır. Fermi enerjisi düzeyinin üzerine çıkarak serbest hale geçen elektronlar sıcak bölgeden soğuk bölgeye ısı enerjisini iletirler. Elektron ve fonon için ısı iletkenlik;

$$k_e = \frac{1}{3} C_e I_e V_e \quad (2.9)$$

$$k_p = \frac{1}{3} C_p I_p V_p \quad (2.10)$$

(2.9) ve (2.10) bağıntıları ile verilir. k ısı iletkenlik olmak üzere, C ısı sığası, I ortalama serbest yol ve V de hareket hızlarıdır. Elektronların ortalama serbest yolları I_e ve hareket hızları V_e , fononların serbest yollarından ve hareket hızlarından 10 ila 100 kat büyüktür.

Fononların ısı sığası da elektronlarınkinden 10 ila 100 kat büyüktür. Böylece, metallerde elektronların k_e ısı iletkenliğinin, fononların ısı iletkenliğinden 10 ila 100 kat daha büyük olacağı sonucuna varılır.

Yarıiletkenlerin iletim bandı ile valans enerji bandı arasındaki enerji aralığı metallere göre küçük olduğundan elektronlar kolaylıkla serbest iletim bandına geçerek, ısı iletkenlikte fononlara önemli ölçüde katkıda bulunurlar (Onaran, 1993, pp.168-173).

2.4 Termoelektrik Cihazların Bileşenleri

Termoelektrik cihazlar, jeneratörler (TEG) ve soğutucular (TEC) olmak üzere iki grupta incelenebilir. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te bir termoelektrik modülün genel görünümü verilmiştir. Genellikle yüzey malzemesi olarak seramik (Al_2O_3) kullanılır ve iki seramik yüzey arasında yarıiletken termoelementler yer alır.

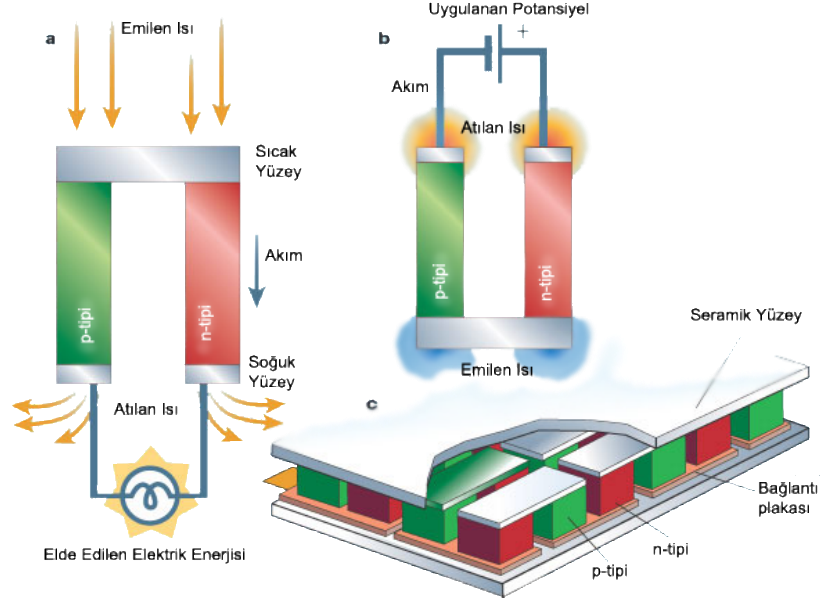


Şekil 2.4 : Bir termoelektrik modülün genel görünümü.

TEG'ler ve TEC'ler aynı görevleri üstlenebilirler. Yani bir jeneratörü soğutucu veya bir soğutucuyu da jeneratör olarak çalıştırmak mümkündür. Ancak, aralarındaki temel farklılık, jeneratörler yüksek sıcaklıklara dayanacak şekilde imal edilir ve termal yüzey iletkenliklerinin artırılarak ortam sıcaklığından maksimum seviyede faydalanması hedeflenir. Bu sebeple yüzeyleri iyi termal iletkenliğe sahip malzemelerle kaplanabilirler. Bir TEG için termoelementlerinin ebatları, gerilim üretimini maksimize edecek şekilde optimize edilir. Bu TEC'ler için de geçerlidir.

TEG'lerin en tipik örneği termokupllardır ve bunlar bir cismin veya ortamın sıcaklığını ölçmek için kullanılırlar. Fe-Const, NiCr-Ni, PtRh-Pt malzeme çiftlerinden üretilen termokupllar en çok kullanılanlarıdır.

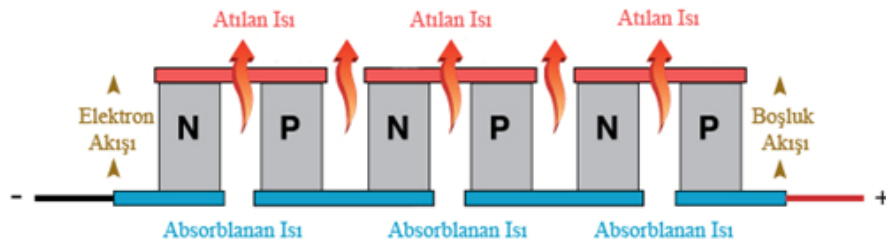
İki farklı yarı iletken malzemenin uçları birleştirilerek oluşturulan termokupllar, farklı sıcaklıktaki bir cisme temas ettirildiğinde, uçları arasındaki ΔT sıcaklık farkından dolayı Seebeck etkisine göre sıcaklıklar eşitlenene kadar devreden akım akmaya başlar. Uçları arasında oluşan potansiyel, sıcaklıkla doğru orantılıdır ve mV mertebesinde.



Şekil 2.5 : a) Seebeck b) Peltier c) Termoelektrik bileşen (Url-4).

2.5 Temel Çalışma Prensipleri

TEC'lerde ısı transferi iki şekilde meydana gelir. Bunlar yük difüzyonu ve fonon titreşimleridir. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi, belirli bir potansiyel altında elektronlar ve boşluklar yukarı yönlü olarak hareket ederler. Yarıiletkenler bölgesinde elektron ve boşluk difüzyonu fazla iken üst kontak bölgesinde boşluklarla karşılaşan elektronun difüzyonu azalır. Bu karşılaşma sırasında elektronlar ve boşluklar alt kontak bölgesinden itibaren taşıdıkları ısıyı yitirirler. Kristal ağıdaki fonon dalgalanmaları da ısı aktarımına katkıda bulunur.



Şekil 2.6 : Seri bağlanmış, yarıiletken n-p çiftleri (Url-5).

Bir TEC modülde meydana gelen ısı geçişleri, termoelektrik temel denklemleri çerçevesinde gerçekleşir. TEC'ler için temel denklemler (2.11) ve (2.12) ile ifade edilir.

$$\dot{Q}_C = N\alpha_{np}IT_C - K\Delta T - \frac{1}{2}I^2R_i \quad (2.11)$$

$$\dot{Q}_H = N\alpha_{np}IT_H - K\Delta T + \frac{1}{2}I^2R_i \quad (2.12)$$

$\dot{Q}_C$ (W) soğuk yüzeyden yutulan ısı gücü, $\dot{Q}_H$ (W) ise sıcak yüzeyden atılan ısı gücü ifade eder. N toplam n-p çift sayısını, K (W/K) toplam ısı iletim katsayısını, R_i (Ω) toplam iç direnç ve I (A) devreden geçen akımı göstermektedir. TEC'lere uygulanan güç ifadesi ise denklem (2.13)'deki gibidir ve birimi Watt cinsindendir.

$$\dot{W} = N\alpha_{np}I\Delta T + I^2R_i \quad (2.13)$$

TEC'lerin performans katsayısı, COP, bilinmek istenir. COP, soğurulan ısı gücü ile sisteme uygulanan gücün oranıdır ve (2.14) denklemi ile ifade edilir.

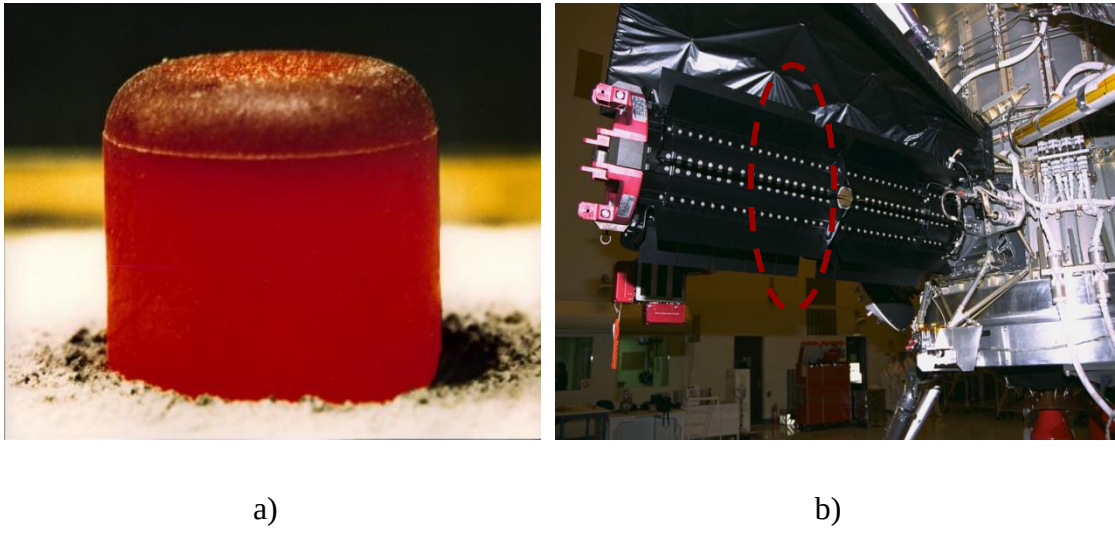
$$COP = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}} = \frac{N\alpha_{np}IT_C - K\Delta T - 0.5I^2R_i}{N\alpha_{np}I\Delta T + I^2R_i} \quad (2.14)$$

COP boyutsuz bir büyüklük olup, sistemin performansının bir ölçüsüdür.

2.6 Termoelektrik Cihazların Uygulama Alanları

Termoelektrik elemanlar, soğutma, ısıtma, güç üretimi ve sensörler olmak üzere 4 farklı uygulama alanında kullanılmaktadırlar. En çok tercih edildiği sektörler, uzay ve havacılık, medikal, biomedikal, otomotiv, laboratuvar deney düzenekleri ve elektronik sektörü sayılabilir. Bunların dışında daha birçok sektörde sıcaklık kontrolü amaçlı kullanılmaktadırlar. Bahsi geçen sektörler önemli ve hasasiyet gerektiren sektörlerdir ve termoelektrik cihazların bu alanlarda tercih edilmesinin sebebi, sınır koşulları içerisinde istenilen çözünürlükte ve çok hızlı cevap verebilmesidir. Sıcaklık yönetim sistemlerinde termoelektrik elemanlar ile % 0,1 °C hasasiyete kadar istenilen sıcaklık ölçülebilmektedir.

Termoelektrik jeneratörler ilk olarak uzay araçlarında enerji ihtiyacının karşılanması için düşünülmüş ve 1961 yılında Amerika Birleşik Devletleri tarafından gönderilen Transit uydusuyla ilk defa denenmiştir. Uydunun ömrü boyunca ihtiyacı olan elektrik enerjisini sağlamak amacıyla Pu-238 radyoizotop termoelektrik jeneratör kullanılmıştır. Şekil 2.7’de kullanılan radyoizotop ve bir radyoizotop termoelektrik jeneratör, RTG, görünmektedir. Aşırı radyoaktif Pu-238 bileşiğinin yarı ömrü yaklaşık 88 yıldır. Bu tip RTG’lerin ömrünü termoelektrik jeneratörlerin ömrü belirler. Normal çalışma koşullarında bir termoelektrik jeneratörünün ömrü 200.000 saat olarak değerlendirilirse, bir RTG, 22 yıl kesintisiz çalıştırılabilir.



Şekil 2.7 : a) Plutonium-238 peleti b) Classini uzay aracı ve RTG ünitesi.

Yeni nesil otomobillerde, atık ısı geri dönüşümü için termoelektrik jeneratörlerin kullanılması düşünülmektedir. Şekil 2.8’de, BMW marka prototip hibrit otomobilin atık ısı geridönüşüm ünitesi görülmektedir. Buna göre, sıcak yüzey ısı kaynağı olarak egzoz gazları, soğuk yüzey için ise sirkülasyonlu sıvı soğutma ve dış ortam kullanılmaktadır.



Şekil 2.8 : BMW marka otomobilin atık ısı termoelektrik jeneratörü.

Termoelektrik jeneratör uygulamaları çoğaltılabilir. Vücut ısısından faydalanarak çalışan saatler, kalorimetre ölçümü ve kablosuz veri transfer ünitesi bunlardan bazılarıdır.

Termoelektrik soğutuculara gelince TEC'lerin uygulama alanlarının oldukça geniş olduğu görülmektedir. TEC'ler, küçük ve orta ölçekli soğutma yükleri altında uzun süreli kullanımlar için idealdirler.

TEC'lerin kullanım alanları şöyle sıralanabilir (Pişkin, 2006):

- Ozmometreler
- Kızılötesi dedektörleri
- Gece görüş cihazları
- Lazer diyot soğutucular
- Çiğ noktası higrometrileri
- Devinimli soğutucular
- Buzdolapları
- Donma noktası referansı
- Hassas ısı karakterizasyon
- Sabit sıcaklık soğutucuları
- Silah dürbünleri

- Parametrik büyütücüler
- Elektronik soğutucular
- Kısa dalga amplikatörler
- Organ nakli soğutucuları
- Portatif ısıtıcı/soğutucu

TEC'ler hafif ve sessiz olması, fiziksel etkilere karşı dayanıklı olması gibi özellikleri nedeniyle askeri uygulamalarda tercih edilmektedirler. Özellikle denizati uygulamalarında hareketli parçaları olmadığı için avantaj sağlar.

Termoelektrik malzemelerdeki gelişim süreci devam etmektedir. Birçok üniversite ve araştırma kuruluşu, termoelektrik yarıiletken malzemelere farklı bileşikler katkılayarak güç katsayısını artırmaya çalışmaktadırlar.

2.7 Termoelektrik Soğutucuların Avantajları

Termoelektrik soğutucu elemanlar ısı güç yoğunluğu yüksek malzemelerdir. Avantajları kısaca şöyle özetlenebilir:

- Hareket eden parçalara sahip değildirler: TE'ler hareket eden bileşen içermedikleri için uzun ömürlüdürler ve hemen hemen hiç bakıma ihtiyaç duymazlar.
- İstenilen ebatlarda üretilebilme: İstenilen kadar çift seri bağlanarak farklı ebatlarda ve şekillerde TE'ler üretmek mümkündür.
- Hem ısıtma hemde soğutma yapabilme: TEC'ler potansiyel farkı altında bir yüzeyi ısıyı soğururken diğer yüzeyi ısı atabilen ısı pompasıdır. Bu özelliği ile hem ısıtma hem de soğutma görevi üstlenebilmektedir.
- Keskin sıcaklık kontrolü: %0,1 °C civarında sıcaklık hassasiyeti ile sınır koşulları içinde istenilen sıcaklığı sağlayabilirler.
- Her türlü ortamda çalışabilme: TEC'ler yerçekimsiz ya da yüksek ivmeli ortamlarda da çalışabilirler. Bu sebeple uzay ve havacılıkta tercih edilmektedirler.

- Sessiz çalışma: TEC'ler hareket eden parçalara sahip olmadıkları için sessiz çalışır.
- Bölgesel soğutma yeteneği: TEC'lerle uygun bir şekilde dizayn edilmiş bir cihaz ile cihazın sadece istenilen bir bölgesinin sıcaklığı değiştirilebilir. Nokta çözünürlüğü, kullanılan TEC'lerin ebatları ile doğru orantılıdır.
- Çevrecidir: Çoğu konvansiyonel soğutucular, kloroflorokarbon gazı kullanarak çalışırlar. TEC'ler sadece elektrik enerjisine ihtiyaç duyar.

2.8 Termoelektrik Soğutucuların Dezavantajları

Bir çok avantajlarının yanı sıra termoelektrik soğutucular, bazı dezavantajlara sahiptirler. Bunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Soğutma gücü azdır: Ticari olarak 550 watt civarı peltier soğutucu elemanlar bulunduğunu söylemiştik, ancak bu değerler $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$ 'taki maksimum soğutma değerleridir. Bir soğutma sistemi tasarlandığında sıcak ve soğuk bölgedeki sıcaklık farkının belirli bir değer olması beklenir. Bu sebeple, soğutma yükleri çok düşmektedir.
- COP, performans katsayısı düşüktür: İstenilen soğutma yüklerine ulaşmak için gereken güç fazladır. COP değerleri genellikle 1'den azdır.
- Watt başına maliyetleri yüksektir: İstenilen soğutma yüklerine ulaşmak için çok sayıda termoelektrik modüle ihtiyaç vardır. Bu durumda hem ebatlar hemde maliyetler büyür.

2.9 Kanatçıklı Yüzeyler ve Isı Transferi

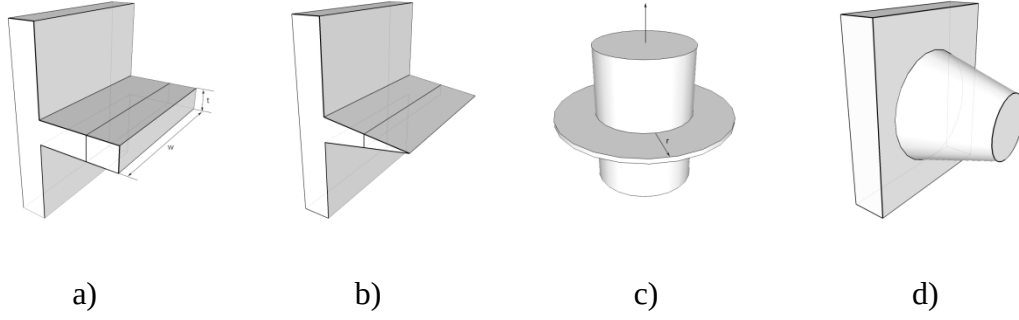
Kanatçıklı yüzeyler, çevresiyle ısı alışverişi yapabilen genişletilmiş yüzeylerdir. Belirli bir doğrultudaki sıcaklık gradyanı iletimle ısı geçişine sebep olurken, çevresi arasında taşınım ile ısı geçişi gerçekleşir. Bir çok uygulamada kendisi ile akışkan arasında taşınım ile ısı geçişini arttırmak amaçlanır. Bunun için yüzey alanı genişletilmiş yapılar kullanılır. Bunlara “kanatçıklı yüzeyler” veya “finli yüzeyler” denilmektedir (Incropera, 2004).

Akışkana ısı transferini arttırmak için kanat yüzey alanının artırılması ve ısı iletim katsayısı iyi bir malzeme kullanılması gerekir. Malzemenin ısı iletim katsayısı, kanat boyunca sıcaklık dağılımını etkiler ve dolayısıyla bundan ısı geçişi de etkilenir. Teorik olarak kanat boyunca sıcaklık gradyanının az olabilmesi için kanat malzemesinin ısı iletim katsayısının oldukça yüksek olması gerekir. Isı iletim katsayısı sonsuz olduğu durumda, sıcaklık gradyanı olmaz, kanat uçları ile kanat dibi sıcaklıkları aynı olur, böylece en iyi ısı geçişi sağlanır.

Günlük hayatımızda kullandığımız birçok elektrikli alet, sıcaklık düşümü için kanatçıklı yüzeyler kullanmaktadır. Bazı soğutma üniteleri, güç elektroniği elemanları, iki kanatlı boru düzenekleri, otomobil ve diğer taşıtlardaki motor soğutma düzenekleri örnek olarak verilebilir. Birçok uygulamada kanatçıklı yüzeyler kullanılmasına karşın, kullanılan kanat tipleri farklı olabilmektedir.

2.9.1 Kanat tipleri

Kanatlar, düzlemsel bir duvara monte edilmiş uzantılar olarak, ihtiyaca göre farklı tiplerde olabilir. Düzlemsel, dairesel ve iğne kanat adı verilen kanat tipleri uygulamada sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Şekil 2.9’da kanat çeşitlerine dair dört farklı örnek sunulmuştur. Şekilde de görüldüğü gibi sabit dikdörtgen kesitli kanatlar, düzlemsel değişken alanlı kanatlar, dairesel boru uygulamaları için daire kesitli kanatlar ve iğne kanat denilen kanat tipleri, ekonomik ve imalat açısından ticari olarak en çok bulunabilecek kanat tipleridir.



Şekil 2.9 : Kanat tipleri. a) Düz b) Değişken c) Dairesel d) İğne (Incropera, 2004).

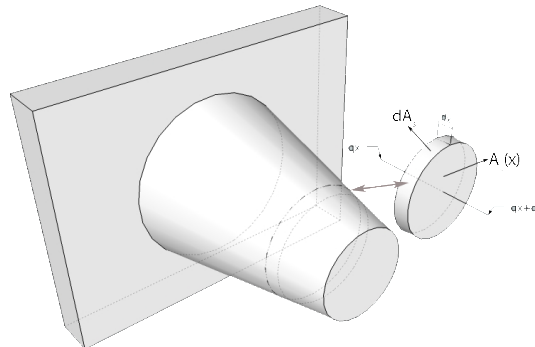
2.9.2 Kanat karakteristikleri

Kanat karakteristikleri ile anlatılmak istenen kanatlarda meydana gelen ısı geçişinin, kanat tiplerine göre nasıl değiştiğinin karakterize edilmesidir. Aşağıdaki yaklaşımlar altında, kanatlarda sıcaklık dağılımı ve ısı geçişi çözümlenir.

Yaklaşımlar;

- Isı sadece x doğrultusunda gerçekleşir.
- Sürekli rejimin vardır.
- Isı iletim katsayısı sabittir.
- Yüzey üzerinde h taşınım katsayısı sabittir.
- Kanat içerisinde ısı üretimi yoktur.
- Işınım ile ısı geçişi yoktur.

Şekil 2.10'da görüldüğü gibi diferansiyel bir alan seçilip bu alana enerji korunum denklemi uygulanırsa, (2.15) eşitliği elde edilir (Incropera, 2004).



Şekil 2.10 : Genişletilmiş yüzeyde enerji dengesi (Incropera, 2004).

Denklem (2.16) ile x konumundaki $A_c(x)$ yüzey alanında sıcaklık gradyanına bağlı Fourier yasası, denklem (2.17) ile $x+dx$ uzaklığındaki differansiyel ifadenin açık hali ve (2.18) ile dA_s diferansiyel kesit alanından taşınım ile ısı geçişi ifadeleri, denklem (2.15)'te yerine konulup gerekli sadeleştirmeler yapılırsa,

$$q_x = q_{x+dx} + dq_{taşınım} \quad (2.15)$$

$$q_x = kA_c \frac{dT}{dx} \quad (2.16)$$

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx \quad (2.17)$$

$$dq_{taşınım} = h \cdot dA_s (T - T_\infty) \quad (2.18)$$

genişletilmiş yüzeyler için bir boyutlu genel enerji denklemi olan denklem (2.19) elde edilir (Incropera, 2004).

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \left(\frac{1}{A_c} \frac{dA_c}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left(\frac{1}{A_c} \frac{h}{k} \frac{dA_s}{dx} \right) (T - T_\infty) = 0 \quad (2.19)$$

Sabit kesitli kanatlarda, A_c , A_s bellidir ve x doğrultusu boyunca kanat yüzey alanı A_c sabit, $dA_c / dx = 0$, kesit alanı $A_s = P \cdot x$, $dA_s / dx = P$ olacaktır. Burada P kanadın çevre uzunluğudur. Denklem (2.19)'da sabit kesitli kanatlar için A_c ve A_s değerleri yerine konursa ve sıcaklık farkı $\theta(x) = T(x) - T_\infty$ tanımlanır ve değişken dönüşümü yapılırsa,

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - m^2 \theta = 0 \quad (2.20)$$

$$m = \frac{hP}{kA_c} \quad (2.21)$$

lineer ve homojen bir diferansiyel denklem elde edilir. Bu diferansiyel denklemin sabit katsayılı genel çözümü denklem (2.22)'dir.

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad (2.22)$$

Sabitlerin bulunabilmesi için sınır koşullarının uygulanması yeterli olacaktır. Birinci sınır koşulu, kanadın taban seviyesi $x = 0$ 'da sahip olduğu sıcaklıktır.

$$\theta(0) = T_b - T_\infty \equiv \theta_b \quad (2.23)$$

İkinci sınır koşulu, kanadın ucu $x = L$ 'de sınır koşuludur ve dört farklı durumu içerebilir. Bunlar sırasıyla, kanat ucundan bir ısı taşınımı olması, adyabatik ortam olması, belirli bir sıcaklık olması veya sonsuz kanat olması durumlarını kapsar.

İlk durum için, kanat ucuna iletilen enerji ile kanat ucundan akışkana taşınan enerji eşit olacaktır, gerekli işlemler yapılırsa denklem (2.24) elde edilir.

$$h\theta(L) = -k \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L} \quad (2.24)$$

Denklem (2.22), denklem (2.23) ve (2.24) eşitliklerinde yerine konularak C_1 ve C_2 katsayıları çözülebilir. Gerekli ara işlemler yapıldıktan sonra denklem (2.25) elde edilir (Incropera, 2004).

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{\cosh m(L-x) + (h/mk) \sinh m(L-x)}{\cosh(mL) + (h/mk) \sinh(mL)} \quad (2.25)$$

Kanat boyunca iletilen ısı miktarını hesaplamak için en basit yöntem olan Fourier yasasını $x = 0$ 'da çözmek yeterli olacaktır. Denklem (2.25)'ten θ çekilip, denklem (2.26)'da yerine konulursa, denklem (2.27) elde edilecektir (Incropera, 2004).

$$q_f = q_b = -kA_c \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} \quad (2.26)$$

$$q_f = \theta_b \sqrt{hPkA_c} \frac{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL} \quad (2.27)$$

Buraya kadar kanat uçlarından taşınım ile ısı geçişi şartı altında sıcaklık değişimi ve toplam ısı geçişi denklemleri çıkarıldı. Kanat uçları adyabatik olması durumunda sıcaklık gradyanı olmaz. Bu durumda denklem (2.28) geçerli olacaktır.

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L} = 0 \quad (2.28)$$

Denklem (2.22), (2.28) şartı altında, denklem (2.23) ve (2.24) ile birlikte değerlendirilir ise C_1 ve C_2 katsayıları çözülebilir. Katsayılar denklem (2.22)'de yerine konulursa sıcaklık dağılımı denklem (2.29) ve ısı geçişi denklem (2.30) ifadeleri elde edilir.

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{\cosh m(L-x)}{\cosh mL} \quad (2.29)$$

$$q_f = \theta_b \sqrt{hPkA_c} \tanh mL \quad (2.30)$$

Eğer kanat ucu sıcaklığı biliniyorsa, diğer bir değişle $\theta(L) = \theta_L$ ise, bir önceki iterasyonda olduğu gibi, yeni sınır koşuluna göre denklemler tekrar çözülerek, sıcaklık dağılımı ve ısı geçişi ifadeleri denklem (2.31) ve (2.32) sırasıyla elde edilebilir (Incropera, 2004).

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{\frac{\theta_L}{\theta_b} \sinh mx + \sinh m(L-x)}{\sinh(mL)} \quad (2.31)$$

$$q_f = \theta_b \sqrt{hPkA_c} \frac{\cosh mL - \frac{\theta_L}{\theta_b}}{\sinh mL} \quad (2.32)$$

Son olarak kanat ucu sınırsız uzunlukta ise, $L \rightarrow \infty$ için, $\theta = 0$ olur. Bu durumda denklem (2.33) ve (2.34) kolayca elde edilir.

$$\frac{\theta}{\theta_b} = e^{-mx} \quad (2.33)$$

$$q_f = \theta_b \sqrt{hPkA_c} \quad (2.34)$$

Dört farklı koşul için elde edilen sıcaklık dağılımları ve ısı geçişleri Çizelge 2.2 ile özetlenmiştir.

Çizelge 2.2'ye dikkat edilirse, ısı geçişleri M değerinin bir katı olmaktadır ve M 'nin birimi Watt'tır.

Örneğin Çizelge 2.2'deki $M \tanh mL$ ifadesinde, M 'nin yanında yer alan diğer ifadeler boyutsuz ifadelerdir. Yani bir çarpan etkisi söz konusudur. Denklem θ_b ile

bölünüp çarpılırsa ifadenin değeri değişmez. Sonuçta elde edilen $\left[\frac{M \tanh mL}{\theta_b} \right] \theta_b$ ifadesinde parantez içinin birimi W/K olur. Bu aynı zamanda toplam ısı iletim katsayısının ifadesidir.

Sonuç olarak iyi bir yaklaşımla, katı cisimlerlerle gerek hava gerekse de sıvı ortamlar arasındaki ısı geçişini, bir toplam ısı geçiş katsayısı U ile sıcaklık farkı ΔT 'nin çarpımı şeklinde ifade etmek mümkündür. Kanatçıklı bir ısı kuyusunun ısı geçiş katsayısı, bu ısı kuyusuna monte edilen bir fan ile arttırılabilir, ancak ısı geçişi ifadesi hala akışkan sıcaklığı ile ısı kuyusunun taban sıcaklığı arasındaki farkın toplam ısı geçiş katsayısı ile çarpımı şeklinde ifade edilebilir.

Çizelge 2.2 : Kanatlarda sıcaklık dağılımı ve ısı kaybı (Incropera, 2004).

Durum	Sınır Koşulu	Sıcaklık Değişimi	Isı Geçişi
Isı Taşınımı	$h\theta(L) = -k \frac{d\theta}{dx} \Big _{x=L}$	$\frac{\cosh m(L-x) + (h/mk) \sinh m(L-x)}{\cosh(mL) + (h/mk) \sinh(mL)}$	$M \frac{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL}$
Adyabatik	$\frac{d\theta}{dx} \Big _{x=L} = 0$	$\frac{\cosh m(L-x)}{\cosh mL}$	$M \tanh mL$
Belirli Sıcaklık	$\theta(L) = \theta_L$	$\frac{\frac{\theta_L}{\theta_b} \sinh mx + \sinh m(L-x)}{\sinh(mL)}$	$M \frac{\cosh mL - \frac{\theta_L}{\theta_b}}{\sinh mL}$
Sonsuz kanat	$L \rightarrow \infty$ $\theta(L) = 0$	e^{-mx}	M
Kısaltmalar	$\theta = T - T_\infty$ $\theta_b = \theta(0) = T_h - T_\infty$	$m^2 = hP / kA_c$ $M = \theta_b \sqrt{hPkA_c}$	

2.9.3 Kanatlı yüzeyler için tipik toplam ısı geçiş katsayıları

Çeşitli amaçlar için farklı ebatlarda kanatlı yüzeyler tasarlanmıştır. Ne yazık ki çok az sayıda üretici ürettikleri kanatlı yüzeyler için toplam ısı geçiş katsayısı bilgisini vermektedir. Bir fikir vermesi açısından Cool innovations ve Wakefield adlı üreticilerin pazara sunmuş olduğu bazı ürünler için değerler sırasıyla Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4’te verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Cool Innovations ürünleri toplam ısı geçiş katsayıları (Url-6).

Kanatlı Yüzey Yükseklik x Uzunluk x Genişlik (mm)	Ağırlık (g)	Kanat Sayısı	Kanat Şekli	Hava Akış Hızı (m/s)	Toplam Isı Geçiş Katsayısı (W/°C)
26.7 x 76.2 x 57.2	135.5	84	Pin	1.16	0.91
26.7 x 76.2 x 57.2	135.5	84	Pin	2.03	1.53
35.1 x 76.2 x 57.2	150.5	84	Pin	1.16	1.12
35.1 x 76.2 x 57.2	150.5	84	Pin	2.32	1.78
50.0 x 152.4 x 31.8	377.5	231	Pin	2.32	1.72
50.0 x 152.4 x 31.8	377.5	231	Pin	3.48	2.38
67.0 x 152.4 x 31.8	377.5	231	Pin	2.32	2.33
67.0 x 152.4 x 31.8	377.5	231	Pin	3.48	3.13
15.2 x 127 x 127	458.3	365	Pin	1.16	1.85
15.2 x 127 x 127	458.3	365	Pin	2.32	3.03
25.4 x 127 x 127	537.4	365	Pin	1.16	3.33
25.4 x 127 x 127	537.4	365	Pin	2.32	5.26
25.4 x 63.5 x 63.5	190.5	194	Pin	2.32	2.27
25.4 x 63.5 x 63.5	190.5	194	Pin	3.48	3.33
42.4 x 63.5 x 63.5	260.9	194	Pin	2.32	3.13
42.4 x 63.5 x 63.5	260.9	194	Pin	3.48	4.55
10.2 x 77.5 x 59.2	71.5	110	Pin	2.32	0.87
26.9 x 77.5 x 59.2	71.5	110	Pin	2.32	1.79
25.4 x 249.7 x 249.7	2887.7	2788	Pin	2.32	25.00
25.4 x 249.7 x 249.7	2887.7	2788	Pin	3.48	33.33
42.4 x 249.7 x 249.7	3899.8	2788	Pin	2.32	33.33
42.4 x 249.7 x 249.7	3899.8	2788	Pin	3.48	50.00

Çizelge 2.4 : Wakefield ürünleri toplam ısı geçiş katsayıları (Url-7).

Kanatlı Yüzey Yükseklik x Uzunluk x Genişlik (mm)	Ağırlık (g)	Kanat Sayısı	Kanat Şekli	Hava Akış Hızı (m/s)	Toplam Isı Geçiş Katsayısı (W/°C)
78.9 x 76.2 x 187.45	743	20	Yaprak	3.30	11.36
78.9 x 152.4 x 187.45	1487	20	Yaprak	1.65	14.29
78.9 x 228.6 x 187.45	2231	20	Yaprak	1.10	15.15
78.9 x 304.8 x 187.45	2975	20	Yaprak	0.82	16.13
59.7 x 76.2 x 132.33	513	15	Yaprak	4.66	08.33
59.7 x 152.4 x 132.33	1027	15	Yaprak	2.33	14.71
59.7 x 228.6 x 132.33	1540	15	Yaprak	1.55	16.67
59.7 x 304.8 x 132.33	2054	15	Yaprak	1.17	22.22
24.21 x 50.29 x 72.92	68.10	252	Pin	-	0.833

3. MATEMATİKSEL MODELLEME

3.1 Peltier Modül İçin Temel Denklemler

Bu çalışmada ele alınan Peltier modülünde, Peltier etkisi, Joule ısınması ve Fourier ısı iletimi gözönüne alınmış olup, Seebeck katsayısının sıcaklık bağımlılığının zayıflığı ve çalışma sıcaklık aralığının az olması sebepleriyle Thomson etkisi ihmal edilmiştir. Kısaca bu etkilere değinilerek, soğutma ve ısıtma gücü için temel denklemler verilecektir.

3.1.1 Peltier etkisi

Peltier ısı etkisi daha önceki bölümde denklem (2.5) ile verilmişti. Buna göre Peltier ısısı, Seebeck katsayısı, akım ve mutlak sıcaklığın çarpımına eşittir.

3.1.2 Joule ısınma etkisi

Bir iletken ya da yarıiletken üzerinden akım geçerken iç direnç nedeniyle ortaya çıkan ısı güç, Joule ısınma etkisi olarak bilinir ve denklem (3.1) ile ifade edilir. Bu ifadedeki direnç R_{np} ise denklem (3.2) ile hesaplanır.

$$q_j = I^2 R_{np} \quad (3.1)$$

$$R_{np} = \frac{\rho_n l_n}{A_n} + \frac{\rho_p l_p}{A_p} \quad (3.2)$$

Burada ρ (Ωm) özgül direnci, l (m) termoelementin boyunu ve A (m^2) ise kesit alanını simgelemektedir. Alt indisler n ve p ise sırası ile n-tipi ve p-tipi katkılı yarıiletken termoelementleri ifade eder.

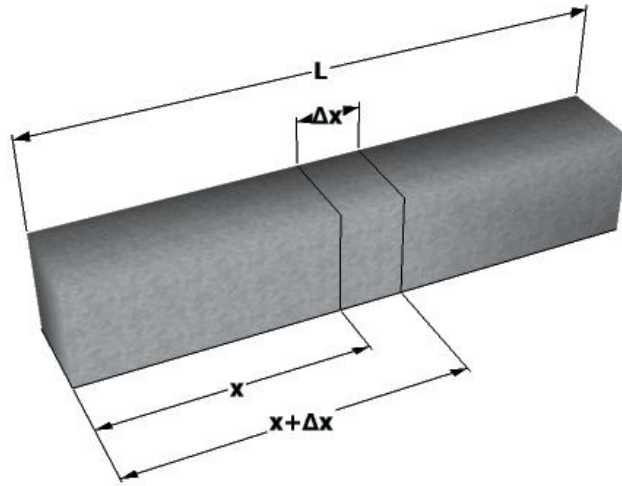
3.1.3 Fourier ısı iletimi

$\Delta T(K)$ sıcaklık farkı altında bir yüzeyden geçen ısı miktarının ifadesi denklem (3.3)'te tanımlanmıştır.

$$q_f = K\Delta T \quad (3.3)$$

$$K = \frac{k_n A_n}{l_n} + \frac{k_p A_p}{l_p} \quad (3.4)$$

Burada K (W/K) toplam ısı iletim katsayısı, k (W/m.K) ısı iletim katsayısı, l (m) ve A (m²) ise sırasıyla termoelementin boyunu ve kesit alanını ifade etmektedir.



Şekil 3.1 : Termoelement.

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi bir termoelement üzerinde Δx elemanı seçilerek bu elemana bir boyutlu enerji balans denklemi uygulanmak istendiğinde, sınır koşulları aşağıdaki gibi olacaktır.

$$x=0 \text{ için } T = T_C \text{ ve } x=l \text{ için } T = T_H \quad (3.5)$$

Herhangi bir x noktasındaki Fourier ısı iletimi ve Joule ısınması sırasıyla (3.6) ve (3.7) denklemleriyle verilir.

$$q_{f,x} = -kA_x \left[\frac{dT}{dx} \right]_x \quad (3.6)$$

$$q_{j,\Delta x} = \frac{I^2 \rho \Delta x}{A_x} \quad (3.7)$$

$\frac{dT}{dx}$ ifadesi sıcaklık gradyenini ifade etmektedir. Δx elemanı içinde oluşacak ısı miktarı ise $q_{j,\Delta x}$ Joule ısısı ile verilir.

$x+\Delta x$ noktasındaki Fourier ısısı (3.8) ifadesi gibi olacaktır.

$$q_{f,x+\Delta x} = -kA_x \left[\frac{dT}{dx} \right]_{x+\Delta x} \quad (3.8)$$

Kararlı hal altında enerji balans ifadesi, giren ve çıkan ısı güç dengesidir. Bu sebeple, x noktasındaki Fourier ısısı ile Δx boyunca oluşan Joule ısısı toplamını, $x+\Delta x$ noktasındaki Fourier ısısına denklem (3.9)'da olduğu gibi eşitleyebiliriz (Clifton, 1992).

$$q_{f,x} + q_{j,\Delta x} = q_{f,x+\Delta x} \quad (3.9)$$

Denklem (3.7) ve (3.8) eşitliği, denklem (3.9)'da yerine konulursa (3.10) ifadesi elde edilir.

$$-kA_x \left[\frac{dT}{dx} \right]_x + \frac{I^2 \rho \Delta x}{A_x} = -kA_x \left[\frac{dT}{dx} \right]_{x+\Delta x} \quad (3.10)$$

Bu denklem tekrar düzenlenir ise,

$$kA_x \left(\left[\frac{dT}{dx} \right]_{x+\Delta x} - \left[\frac{dT}{dx} \right]_x \right) + \frac{I^2 \rho \Delta x}{A_x} = 0 \quad (3.11)$$

$$kA_x \left(\frac{\left[\frac{dT}{dx} \right]_{x+\Delta x} - \left[\frac{dT}{dx} \right]_x}{\Delta x} \right) + \frac{I^2 \rho}{A_x} = 0 \quad (3.12)$$

(3.11) denklemi ve bu denklemin Δx ile bölünmesinden (3.12) eşitliğine varılır. Eşitliğin limiti alınıp Δx sıfıra götürülürse, bizi türev tanımına götürecektir.

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[kA_x \left(\frac{\left[\frac{dT}{dx} \right]_{x+\Delta x} - \left[\frac{dT}{dx} \right]_x}{\Delta x} \right) + \frac{I^2 \rho}{A_x} \right] = 0 \quad (3.13)$$

(3.13) eşitliği 2. dereceden sıcaklık denklemi olarak, (3.14) ifadesiyle de yazılabilir.

$$kA_x \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{I^2 \rho}{A_x} = 0 \quad (3.14)$$

Denklemin iki kere integrali alınırsa, (3.15) elde edilir.

$$T + \frac{I^2 \rho x^2}{2kA_x^2} + C_1 x + C_2 = 0 \quad (3.15)$$

Sıcaklık terimi T , x 'in bir fonksiyonudur ve sınır koşullarında denklem sağlanmalıdır.

$x = 0$ noktasında $T = T_C$ olduğuna göre, bu değer denklem (3.15)'te yerine konursa,

$$C_2 = -T_C \quad (3.16)$$

C_2 katsayısı bulunmuş olur.

$x = L$ iken $T = T_H$ 'dir. Benzer şekilde T 'nin bu değeri yerine konursa,

$$C_1 = - \left[\frac{T_H - T_C}{L} + \frac{I^2 \rho L^2}{2kA_x^2} \right] \quad (3.17)$$

C_1 katsayısının değeri (3.17)'deki gibi elde edilir.

Bulunan C_1 ve C_2 katsayıları (3.15) denklemde yerine konularak x 'e bağlı sıcaklık denkleminin nihai sonucu elde edilir.

$$T - T_C + \frac{I^2 \rho x^2}{2kA_x^2} - \left(\frac{T_H - T_C}{L} + \frac{I^2 \rho L^2}{2kA_x^2} \right) x = 0 \quad (3.18)$$

Bu ifadenin fonksiyon gösterimi (3.19)'daki gibidir.

$$T(x) = T_C - \frac{I^2 \rho x^2}{2kA_x^2} + \left(\frac{I^2 \rho L}{2kA_x^2} + \frac{T_H - T_C}{L} \right) x \quad (3.19)$$

Yukarıdaki denklem bize bir termoelementin sıcaklık dağılımının parabolik olduğunu söylemektedir.

$T(x)$ fonksiyonun x 'e göre türevinin sıfır olduğu nokta maksimum sıcaklık noktasını verecektir. Türevi alınıp denklemde x yalnız bırakılırsa (3.20) eşitliğine varılır.

$$x = \frac{L}{2} + \frac{k\Delta T A_x^2}{I^2 \rho L} \quad (3.20)$$

Soğuk tarafa kaçan Joule ısını hesaplayabilmek için Joule fraksiyon fonksiyonu tanımlanabilir (Clifton, 1992).

$$f = \frac{L - x}{L} = \frac{1}{2} + \frac{k\Delta T A_x^2}{I^2 \rho L^2} = \frac{1}{2} + \frac{K\Delta T}{I^2 R_{np}} \quad (3.21)$$

(3.21) denklemi (3.20) eşitliğinde denklemin sağ tarafı (3.3) ve (3.4) denklemlerindeki tanımlar yerlerine konarak elde edilmiştir.

Soğuk taraftan emilen net ısı miktarı, Peltier ısı gücü ile Joule ısı gücünün fraksiyonu kadar olacaktır.

$$\dot{q}_C = \alpha_{np} I T_C - f I^2 R_{np} \quad (3.22)$$

$$\dot{q}_C = \alpha_{np} I T_C - K\Delta T - \frac{1}{2} I^2 R_{np} \quad (3.23)$$

$$\dot{Q}_C = N \alpha_{np} I T_L - K\Delta T - \frac{1}{2} I^2 R_i \quad (3.24)$$

Sonuçta soğuk taraftan çekilen toplam ısı miktarı, N tane n-p çiftinin absorbladığı ısının toplamına eşit olacağından, nihai denklem (3.24) elde edilir. Sıcak taraftan atılan ısı miktarı da benzer şekilde hesaplanabilir ancak burada tekrar hesaplamadan denklem (3.25) ile verilecektir.

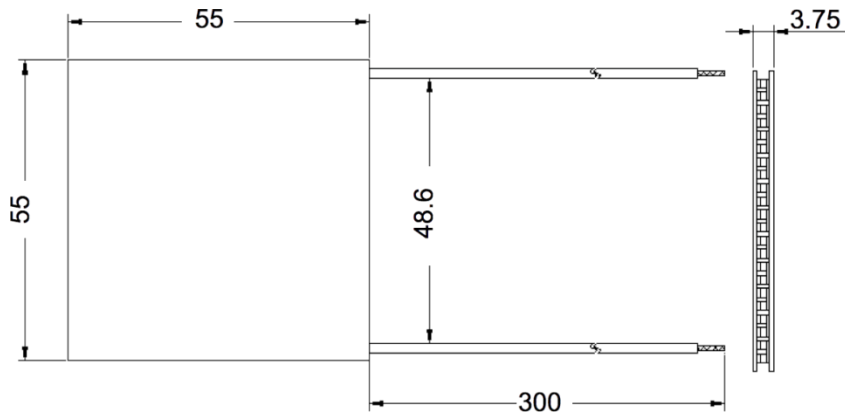
$$\dot{Q}_H = N\alpha_{np}IT_H - K\Delta T + \frac{1}{2}I^2R_i \quad (3.25)$$

Elde edilen (3.24) ve (3.25) denkelemleri bir TEC için temel denklemlerdir ve modelleme sırasında sıklıkla kullanılacaktır.

3.2 Modellemeye Giriş

Termoelektrik soğutucuların oluşturduğu sıcaklık farkının artan soğutma kapasitesi ile azaldığı bilinmektedir. Birçok uygulamada verilen bir soğutma gücü için sıcaklık farkını arttırmak amacı ile Peltier modülleri üst üste termal olarak seri (kaskad) bağlanırlar. Böylece elde edilen yüksek sıcaklık farkı, kanatçıklı yapılardan akışkana ısı geçişini arttırarak istenilen soğutma yükünün kanatçıklı yapılarla ortamdan alınmasını sağlar. Bu tez kapsamında, tek katmanlı ve kaskad bağlı Peltier modülleri için matematiksel modeller yapılmıştır.

Şekil 3.2’de bu tez çalışmasında örnek Peltier elemanı olarak ele alınan, Tellurex firmasına ait Bi_2Te_3 yarıiletken malzemeden imal edilen ve alümina (Al_2O_3) seramik yüzeylerle paketlenmiş olan Peltier modüllerin ebatları verilmiştir. Tüm modüller özdeşdir ve her bir modülde çift sayısı 241 adet olarak belirtilmiştir. Modüllerin bilgileri C2-55-2812 seri numaralı ürünün teknik dokümanından bulunabilir (Url-8).



Şekil 3.2 : Tellurex firmasına ait Bi_2Te_3 bir Peltier modülün boyutları.

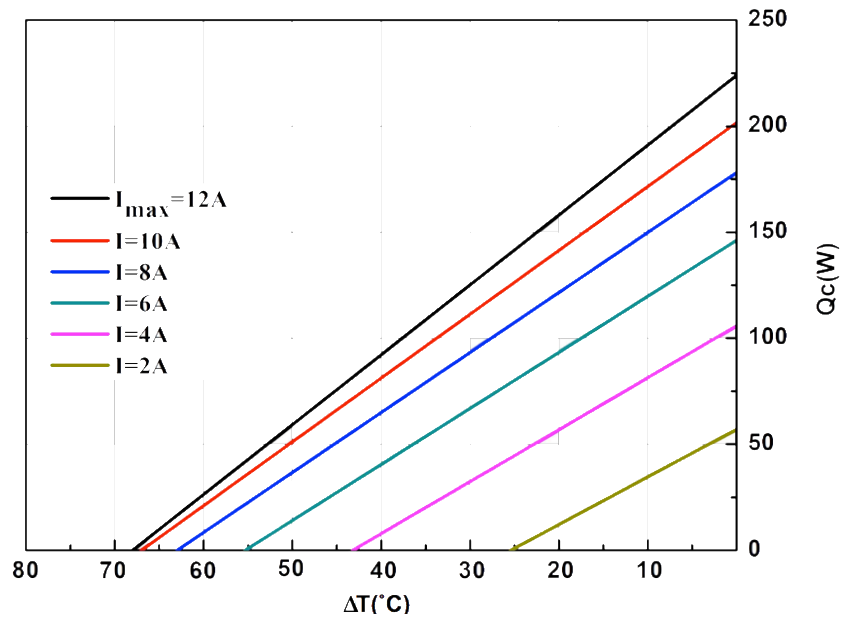
Kullanılan Peltier modüllerin performans parametreleri Çizelge 3.1 ile özetlenmiştir.

Çizelge 3.1 : Tellurex firmasına ait Peltier modül performans özellikleri (Url-8).

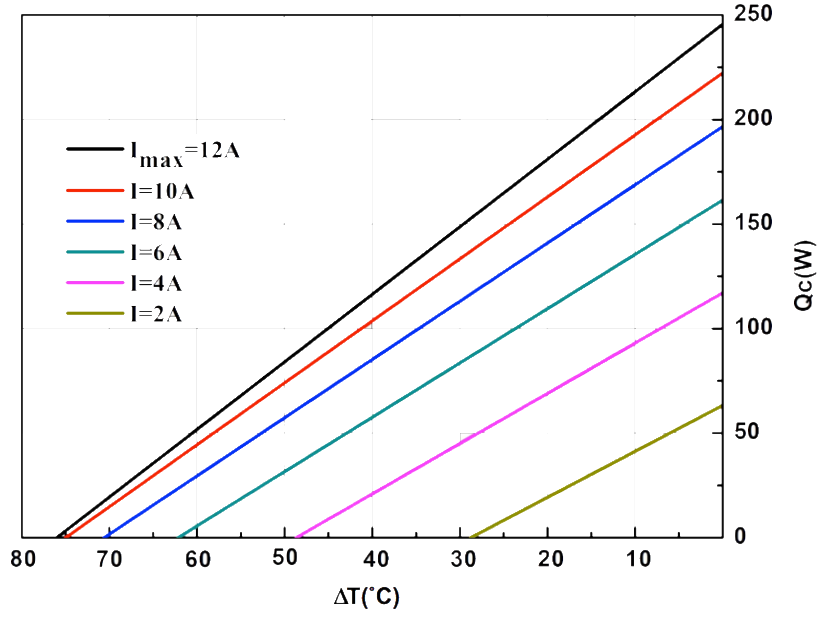
Özellik	$T_H=27^\circ\text{C}$	$T_H=50^\circ\text{C}$
$\Delta T_{\max}$ ($^\circ\text{C}$)	68	76
$V_{\max}$ (V)	28.1	31.5
$I_{\max}$ (A)	12.0	12.0
$Q_{C,\max}$ (W), $\Delta T = 0^\circ\text{C}$	224.0	245.6
İç direnç (Ω), (AC)	2.10	2.35
Toplam ısı iletim katsayısı (W/K)	1.93	
Toplam Seebeck katsayısı (V/K)	0.1306	

Şekil 3.3'den Şekil 3.8'e kadar, üretici firmanın örnek alınan termoelektrik modül için performans grafikleri verilmektedir.

Q_C soğutma yükünün, ΔT sıcaklık farkı altındaki davranışları sırasıyla $T_H=27^\circ\text{C}$ ve $T_H=50^\circ\text{C}$ olmak üzere Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de verilmiştir.



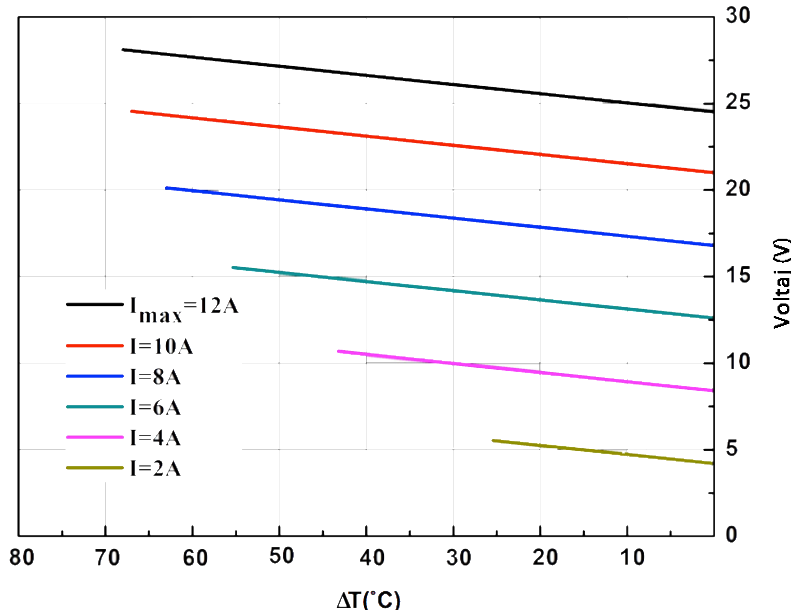
Şekil 3.3 : ΔT 'ye göre $T_H = 27^\circ\text{C}$ 'de soğutma gücünün grafiği (Url-8).



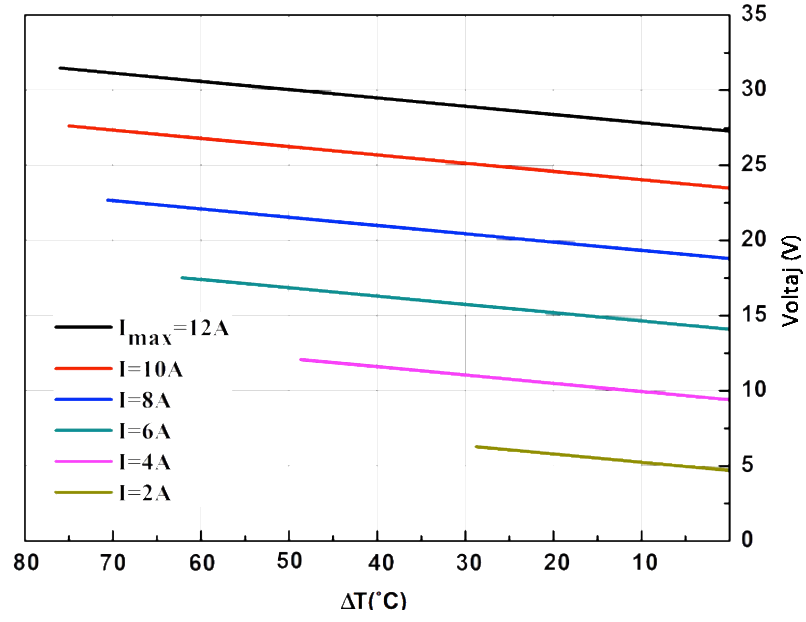
Şekil 3.4 : ΔT 'ye göre $T_H = 50^\circ\text{C}$ 'de soğutma gücünün grafiği (Url-8).

Sıcaklık farkı arttıkça ters Fourier ısı iletimi artmaktadır ve bu artış ile birlikte Q_C soğutma gücü azalır. Akımın arttırılması ile Joule ısı artar. Joule ısının bir kısmı termoelementlerin soğuk kısmına yayılacağı için Q_C soğutma gücünü yine azaltacaktır.

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'de ise Q_C sabit tutularak farklı akımlar için ΔT sıcaklık farkı arttırılmak istendiğinde, uygulanacak gerilimin de aynı Q_C yükünü yaratabilmek için sabit akım altında artmak zorunda olduğunu göstermektedir.

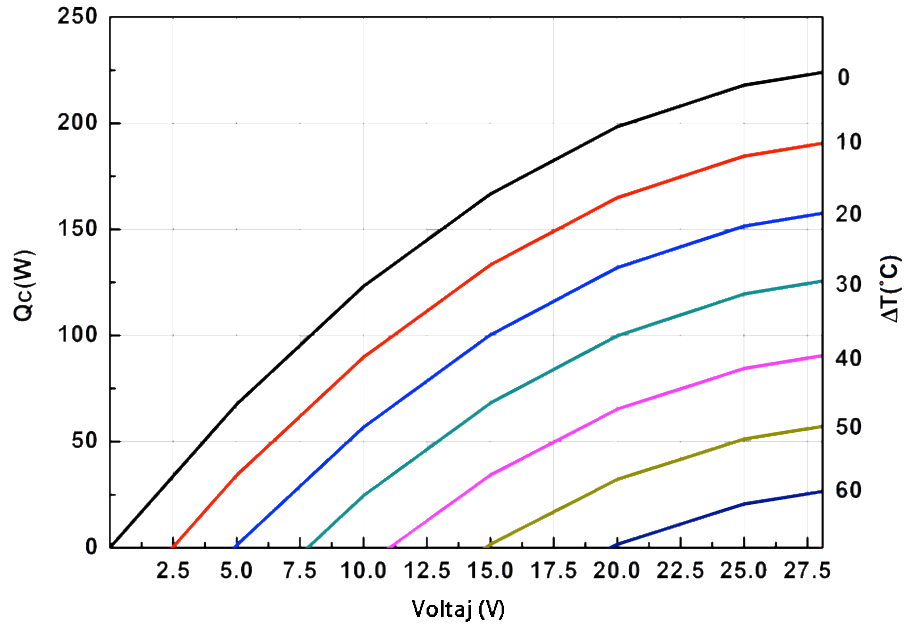


Şekil 3.5 : ΔT 'ye göre $T_H = 27^\circ\text{C}$ 'de farklı akımlarda gerilim grafiği (Url-8).

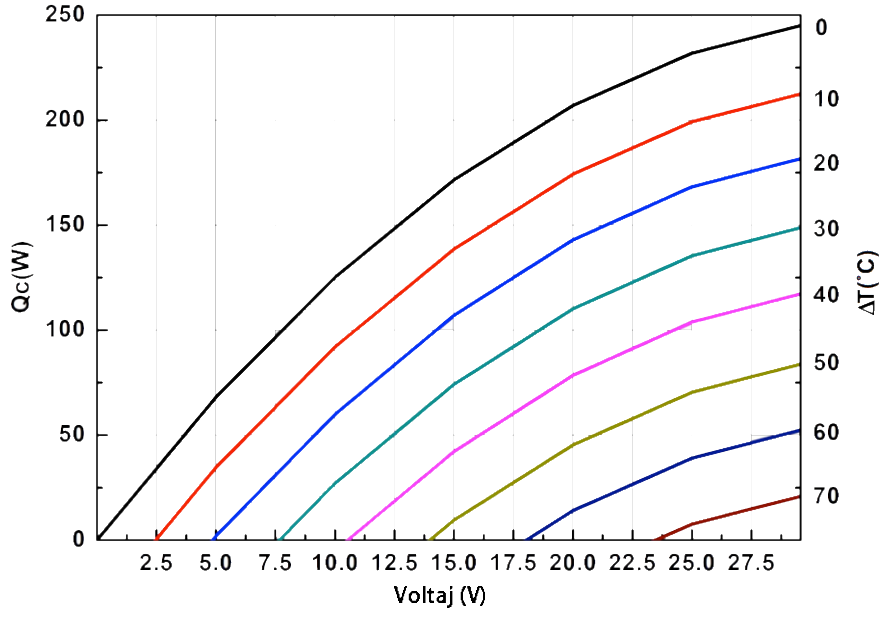


Şekil 3.6 : ΔT 'ye göre $T_H = 50^\circ C$ 'de farklı akımlarda gerilim grafiği (Url-8).

Q_C , V ve ΔT arasındaki bağlantılı ilişkiler, $T_H = 27^\circ C$ ve $T_H = 50^\circ C$ için sırasıyla Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

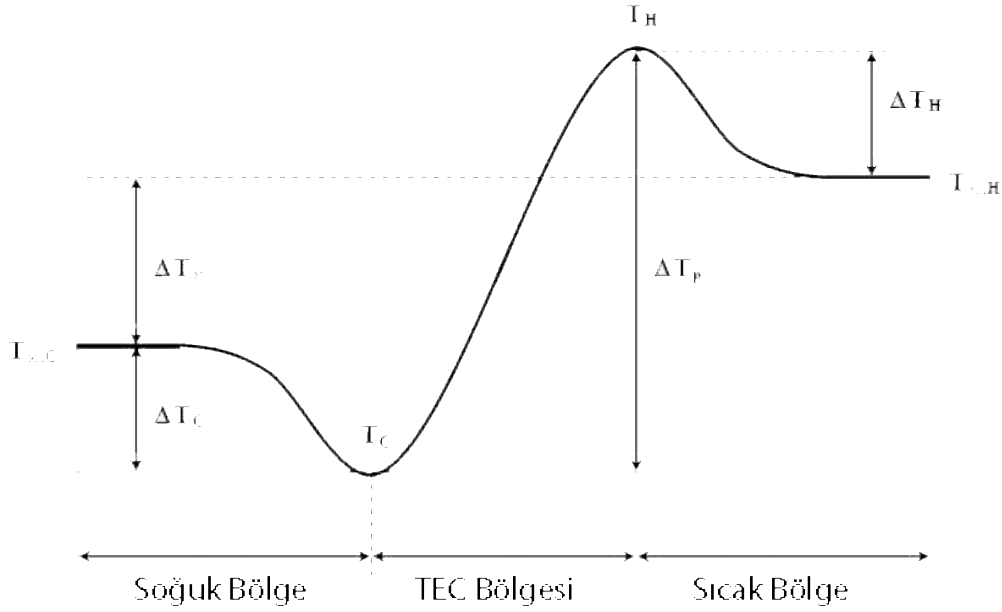


Şekil 3.7 : ΔT 'ye göre $T_H = 27^\circ C$ 'de Q_C ve gerilim grafiği (Url-8).



Şekil 3.8 : ΔT 'ye göre $T_H = 50^\circ C$ 'de Q_C ve gerilim grafiği (Url-8).

Termoelektrik bir soğutucu için genel sıcaklık dağılım diyagramı Şekil 3.9'daki gibidir. Soğuk taraftan ısının emilebilmesi için termoelektrik modülün soğuk yüzeyinde $T_{\infty,C}$ ortam sıcaklığından daha düşük olan T_C sıcaklığına inilir. Benzer şekilde, sıcak yüzeyden ısı atılabilmesi için yüzey sıcaklığı ortam sıcaklığı $T_{\infty,H}$ sıcaklığından daha yüksek bir değer olan T_H değerine Peltier süreciyle çıkarılır. Burada ΔT_P sıcaklık farkı, Peltier modül tarafından oluşturulmaktadır.



Şekil 3.9 : TEC sıcaklık diyagramı.

Evlerimizdeki buzdolapları iç sıcaklığı belirli bir değerde tutmak için farklı güçlerde çalışmaktadır. Genellikle ilk soğutmaya başladıklarında yüksek güçle soğuturlar. Yeterli sıcaklıklara inildiğinde ise, enerji bakımından daha verimli oldukları çalışma düzeninde, nispeten daha düşük güçlerde soğutmaya devam ederler. İyi yalıtılmış olduklarından belirli zamanlarda çalışmaya ara verebilirler.

Buzdolabı üreticileri, sistemin genellikle performans katsayısı yüksek yani enerji bakımından daha verimli olduğu soğutma değerlerinde çalışmasını sağlamaktadırlar. Ancak bu değerlerin ne olduğu, iyi bir modelleme ile anlaşılabilir. Bugün A sınıfı bir buzdolabının sahip olduğu özellikler, iyi yalıtım ve akıllı soğutma stratejileridir.

Bu tez çalışmasında ele alınan termoelektrik soğutma sisteminin uygulama alanlarından ötürü, buzdolaplarından farklı olarak, soğutulan ortamda ısı açığa çıkaran donanımlar bulunabilmektedir. Dolayısı ile sadece dış ortamdan soğutulan ortama olan ısı kaçakları değil, aynı zamanda soğutulan ortamda açığa çıkan ısı enerjisi de soğutucunun soğutma yükünü oluşturan bir bileşendir. Bu nedenle modelleme yardımıyla soğutma sisteminin davranışlarının, soğutma yüküne olan bağımlılığının incelenmesi özel bir önem arz etmektedir.

Matematiksel işlemlerin basitleştirilmesi amacı ile aşağıdaki yaklaşımlar uygulanmıştır.

Yaklaşımlar:

- Sistem kararlı haldedir.
- Yüzeyler pürüzsüz, termal kontak dirençler yoktur.
- Peltier modüllerinin yanal yüzeylerinden ısı kaçakları yoktur.
- Peltier modüllerinin yüzeyi üzerinde sıcaklık homojendir.

3.3 Tek Katmanlı Matematiksel Model

Tek katmanlı modelleme iki aşamada yapılmıştır. Aşamalardan ilki bir Peltier modülün karakteristiğini yansıtan çözümlemeleri kapsar. İkinci aşamada ise, Peltier modül ile kanatçıklı yüzeylerin birlikte çözümünü içermektedir.

İşlemlere başlamadan önce bazı tanımlar ve denklemleri sadeleştirmek için kısaltmaları belirtelim.

$$\alpha = N_{np} \alpha_{np} \quad (3.26)$$

$$\Delta T = T_H - T_C \quad (3.27)$$

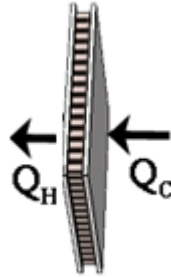
$$\tau = T_C / T_H \quad (3.28)$$

$$T_M = \frac{T_H + T_C}{2} \quad (3.29)$$

α toplam Seebeck katsayısı, ΔT tek katmanlı Peltier modül için yüzey sıcaklıkları T_C ve T_H arasındaki sıcaklık farkı, τ sıcaklıkların oranı, T_M ise ortalama sıcaklıktır. Bunların yanısıra, Seebeck katsayısı, ısı iletim katsayısı ve iç direncin sıcaklıkla değişimi ihmal edilmiştir.

3.3.1 Tek katmanlı Peltier modülün karakteristiği

Şekil 3.10'daki Peltier modülün karakteristiği modellenecektir.



Şekil 3.10 : Tek katmanlı Peltier modül ısı geçişleri.

Temel termoelektrik denklemleri (3.30), (3.31), (3.32) ve (3.33) kısaltmalara göre tekrar düzenlenmiştir. Bu formüllerden yola çıkarak bir Peltier modülün karakterizasyonunu belirten maksimum soğutma gücü, optimum akım, optimum akımdaki COP, maksimum COP, COP'yi maksimum yapan akım ve maksimum sıcaklık farkı ifadeleri elde edilerek, sıcaklıkla ve akımla olan ilişkileri incelenecektir.

$$\dot{Q}_C = \alpha T_C I - K \Delta T - \frac{I^2 R_i}{2} \quad (3.30)$$

$$\dot{Q}_H = \alpha T_H I - K\Delta T + \frac{I^2 R_i}{2} \quad (3.31)$$

$$\dot{W} = \alpha \Delta T I + I^2 R_i \quad (3.32)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}} = \frac{\alpha T_C I - K\Delta T - \frac{I^2 R_i}{2}}{\alpha \Delta T I + I^2 R_i} \quad (3.33)$$

Maksimum soğutma yükü $\dot{Q}_{C,\max}$ 'ı bulabilmek için, $\dot{Q}_C$ 'nin akıma göre türevini almamız yeterli olacaktır. Denklem (3.30)'un türevi alınır ve denklem (3.34)'teki gibi 0'a eşitlenirse $\dot{Q}_C$ 'yi maksimize eden optimum akım, I_* , bulunur.

$$\frac{\partial \dot{Q}_C}{\partial I} = \alpha T_C - IR_i = 0 \quad (3.34)$$

$$I_* = \frac{\alpha T_C}{R_i} \quad (3.35)$$

(3.34) denkleminin 2. türevinin işaretine bakarak, bu noktanın maksimum noktası olduğundan emin olabiliriz.

$$\frac{\partial^2 \dot{Q}_C}{\partial I^2} = -R_i < 0 \quad (3.36)$$

R_i iç direnç pozitifdir, dolayısıyla denklem (3.36)'nın sağ tarafı 0'dan küçüktür. Bu bize bulunan noktanın, yani akımın $\dot{Q}_C$ 'yi maksimize eden akım değeri olduğunu söylemektedir.

Denklem (3.35), (3.30)'da yerine konularak, (3.37) eşitliği elde edilir. (3.37) denklemi akımdan bağımsız gibi görünmektedir ancak, akımın etkisi T_C sıcaklığının içerisinde.

$$\dot{Q}_{C,\max} = \frac{(\alpha T_C)^2}{2R_i} - K\Delta T \quad (3.37)$$

Denklem (3.37)'de ifade edildiği gibi $\dot{Q}_{C,\max}$, termoelementlerin malzeme özellikleri ile yüzey sıcaklıklarına bağlıdır.

Bu durumda $\dot{Q}_{C,\max}$ 'ın sınır değerleri malzeme özellikleri değişmediği durumda belirlenebilir. (3.37) denkleminde $\Delta T = 0$ için $\dot{Q}_{C,\max}$ alabileceği maksimum değerine ulaşır. Bu değer, maksimum soğutma kapasitesi olarak adlandırılır ve (3.38) eşitliği kolayca bulunabilir.

$$\dot{Q}_{C,\max}^{\max} = \frac{(\alpha T_C)^2}{2R_i} \quad (3.38)$$

$$\dot{Q}_{C,\max@T_C=300K} \cong 227 \text{ W} \quad (3.39)$$

$\Delta T = 0$ koşulu altında $T_C = 300K$ iken $T_H = 300K$ veya 27°C 'dir. (3.39) eşitliği, (3.38) denkleminde T_C sıcaklığı ve malzeme değerleri yerine konularak elde edilmiştir. $\dot{Q}_{C,\max}^{\max} = 227W$ değerini veren akım hesaplanırsa, $I_* \cong 14.71A$ elde edilir.

İkinci sınır değeri ise $\dot{Q}_{C,\max} = 0$ koşulunda gerçekleşir. (3.37) denklemi dikkatlice incelendiğinde $\dot{Q}_{C,\max}$ değeri, T_H sıcaklığındaki artış, T_C sıcaklığından yeterince büyük olduğunda azalabilir. Bu durumda, ΔT değeri artar ve $\Delta T_{\max}$ değerine vardığında $\dot{Q}_{C,\max} = 0$ olur. $\Delta T_{\max}$ değeri, $\dot{Q}_{C,\max} = 0$ iken (3.37) ifadesinden çekilerek (3.40) eşitliği olarak bulunur.

$$\Delta T_{\max} = \frac{(\alpha T_C)^2}{2KR_i} = \frac{\dot{Q}_{C,\max}^{\max}}{K} \quad (3.40)$$

$$\Delta T_{\max} \cong 70^\circ\text{C} \quad (3.41)$$

$T_H = 27^\circ\text{C}$ sıcaklık altında, malzeme değerleri yerine konulursa $\Delta T_{\max}$ değeri denklem (3.41)'de olduğu gibi 70°C olarak elde edilir. Bu değer aynı zamanda katalog değeri ile uyumludur.

Sisteme optimum akım beslendiğinde harcanan güç, denklem (3.32)'de (3.35) eşitliğinin yerine konulması sonucu elde edilir. Sonuç (3.42) ile verilmiştir. Bu sonuçla maksimum soğutma gücü için harcanması gereken enerji elde edilmiş olur.

Maksimum soğutma kapasitesi koşulunda harcanması gereken güç ise, (3.42) eşitliğinde $\Delta T = 0$ konulması ile kolayca elde edilir. Eşitlik (3.43) ile verilmiştir.

$$\dot{W}^{\dot{Q}_{C,\max}} = \frac{\alpha^2 T_C}{R_i} \Delta T + \frac{(\alpha T_C)^2}{R_i} = \frac{\alpha^2 T_C T_H}{R_i} \quad (3.42)$$

$$\dot{W}^{\dot{Q}_{C,\max}} = \frac{(\alpha T_C)^2}{R_i} \quad (3.43)$$

Benzer şekilde maksimum sıcaklık farkı altında harcanan güç de elde edilebilir. (3.42) ifadesinde ΔT yerine (3.40) eşitliğindeki değer yerine konulursa, (3.44) denklemi elde edilir.

$$\dot{W}^{\Delta T_{\max}} = \frac{(\alpha T_C)^2}{R_i} \frac{\alpha^4 T_C^3}{2KR_i^2} \quad (3.44)$$

Performans katsayısı COP 'nin maksimum soğutma yükünü sağlayan akım değerindeki ifadesi olan (3.45) denklemi, (3.33) eşitliğinde, (3.35) ve (3.28)'in yerlerine konulması ile elde edilir.

$$COP^{\dot{Q}_{C,\max}} = \frac{\tau}{2} - \frac{KR_i}{\alpha^2 T_C} (1 - \tau) \quad (3.45)$$

$$COP^{\dot{Q}_{C,\max}} = \frac{\tau}{2} - 1.374(1 - \tau) \quad (3.46)$$

Elde ettiğimiz bu COP ifadesinde malzeme değerleri girilirse, (3.46) denklemi elde edilir. Maksimum soğutma kapasitesi koşulunda $\tau = 1$ olur. Bu durumda COP (3.47) denkleminde indirgenir. $\Delta T_{\max}$ için ise $COP = 0$ 'dır.

$$\Delta T = 0 \Rightarrow \tau = 1, COP^{\dot{Q}_{C,\max}} = 0.5 \quad (3.47)$$

Sıcaklık oranının en küçük değeri, sıcaklık farkının maksimum olduğu durumda oluşur. Bu değerin, $\tau_{\min}$, en küçük değeri için (3.40) eşitliğinden faydalanılır. Denklem (3.48)'de tüm işlem adımları verilmiştir.

$$\frac{\Delta T_{\max}}{T_C} = \frac{1}{\tau} - 1 = \frac{\alpha^2 T_C}{2KR_i} \Rightarrow \frac{KR_i}{\alpha^2 T_C} = \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{1}{\tau} - 1} \Rightarrow \tau_{\min} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha^2 T_C}{2KR_i}} \quad (3.48)$$

$$\tau_{\min} \cong 0.732 \quad (3.49)$$

$T_C = 300K$ için malzeme değerleri girilirse $\tau_{\min} \cong 0.732$ değeri elde edilir. Ayrıca (3.48) denklemindeki $\tau_{\min}$ değeri (3.45)'te yerine konulup gerekli sadeleştirmeler yapılırsa, $\Delta T = \Delta T_{\max} \Rightarrow COP^{\Delta T_{\max}} = 0$ olduğu bulunabilir.

Buraya kadar soğutma yükünü maksimum yapan akım üzerinde duruldu. COP 'yi maksimum yapan akımı bulabilmek için COP tanımının akıma göre türevine bakılmalıdır.

$$\frac{\partial COP}{\partial I} = 0 \quad (3.50)$$

$$I_{**} = \frac{\alpha \Delta T}{R_i \left(\left[1 + \frac{\alpha^2}{KR_i} T_M \right]^{1/2} - 1 \right)} = \frac{\alpha T_C \frac{1-\tau}{\tau}}{R_i \left(\left[1 + \frac{\alpha^2}{KR_i} \left[\frac{T_C}{2} \cdot \frac{\tau+1}{\tau} \right] \right]^{1/2} - 1 \right)} \quad (3.51)$$

Denklem (3.50) çözülür, gerekli sadeleştirmeler yapılırsa (3.51) elde edilir. COP 'yi maksimum yapan akım I_{**} olarak gösterilmiştir. Bulunan bu akım değeri denklem (3.33)'te yerine konursa, maksimum COP 'yi veren denklem (3.52) elde edilir.

$$COP_{\max} = \frac{T_C}{(T_H - T_C)} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\alpha^2}{KR_i} T_M \right)^{1/2} - \frac{T_H}{T_C}}{\left(1 + \frac{\alpha^2}{KR_i} T_M \right)^{1/2} + 1} = \frac{\tau \left[\left(1 + \frac{\alpha^2}{KR_i} \left[\frac{T_C}{2} \cdot \frac{\tau+1}{\tau} \right] \right)^{1/2} - \frac{1}{\tau} \right]}{(1-\tau) \left[\left(1 + \frac{\alpha^2}{KR_i} \left[\frac{T_C}{2} \cdot \frac{\tau+1}{\tau} \right] \right)^{1/2} + 1 \right]} \quad (3.52)$$

$\tau = 1$ değeri için $COP_{\max}$ değeri sonsuza gider.

$$\tau = 1 \Rightarrow COP_{\max} = \infty \quad (3.53)$$

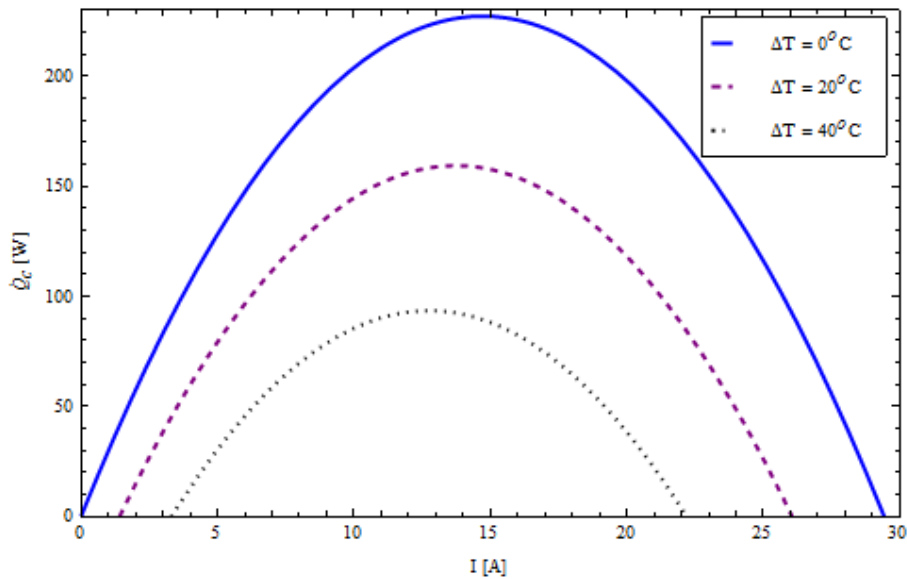
$COP_{\max}$ 'ın değeri Carnot veriminden küçük olmalıdır. COP_{carnot} ifadesi (3.54) ile verilir. Bu durumda (3.52) denklemini (3.54)'e göre göre tekrar düzenlenirse, (3.55) elde edilir ve $COP_{\max}$ 'ın Carnot veriminden daha düşük olduğu görülür.

$$COP_{carnot} = \frac{T_C}{T_H - T_C} = \frac{\tau}{(1 - \tau)} \quad (3.54)$$

$$COP_{\max} = COP_{carnot} \cdot \frac{\left[\left(1 + \frac{\alpha^2}{KR_i} \left[\frac{T_C}{2} \cdot \frac{\tau+1}{\tau} \right] \right)^{1/2} - \frac{1}{\tau} \right]}{\left[\left(1 + \frac{\alpha^2}{KR_i} \left[\frac{T_C}{2} \cdot \frac{\tau+1}{\tau} \right] \right)^{1/2} + 1 \right]} \Rightarrow COP_{\max} < COP_{carnot} \quad (3.55)$$

3.3.1.1 Analitik sonuçlar

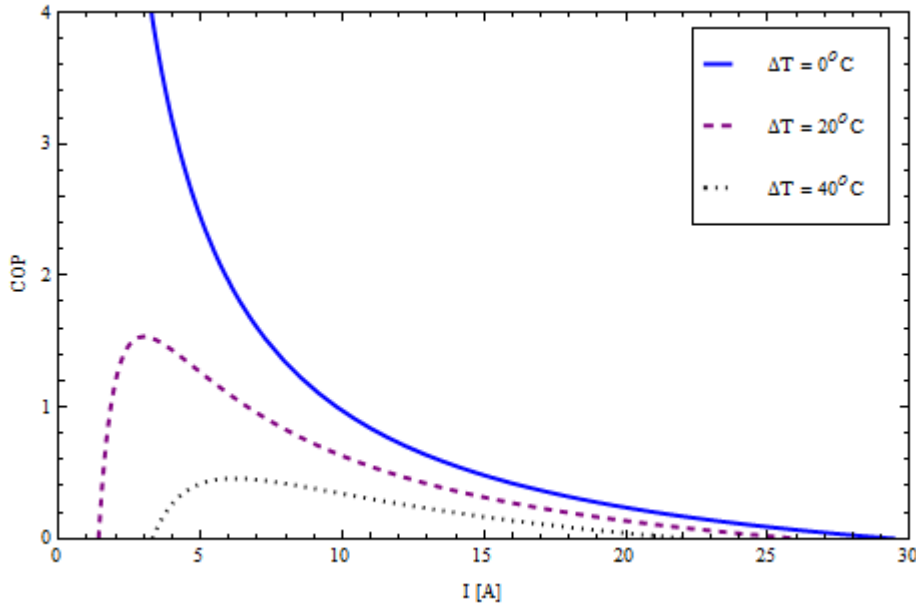
Şekil 3.11'de $T_H = 27^\circ\text{C}$ sabit sıcaklıkta iken Q_C 'in akıma göre grafiği verilmiştir. Akımın belli bir değeri için Q_C maksimum olur. Akım daha da arttırılırsa, Joule ısısı Peltier ısısından daha hızlı artmaya başlar ve efektif soğutma gücünü düşürür.



Şekil 3.11 : Farklı ΔT 'lerde $T_H = 27^\circ\text{C}$ 'de Q_C ve akım grafiği.

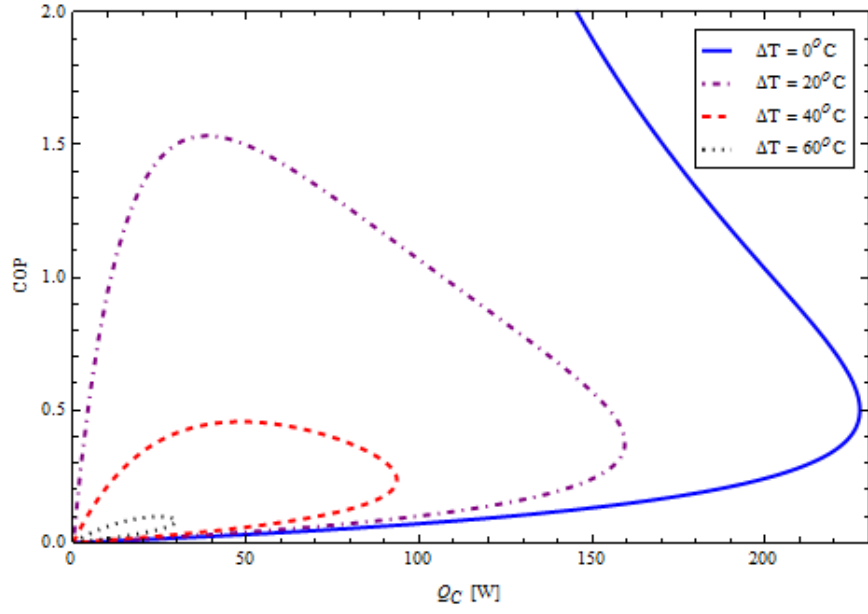
Fourier ısısı, ısıнын emildiği yüzeyin aksi doğrultuda, diğer bir deyişle soğrulan ısıyı azaltacak yönde gelişir. Q_C 'nin maksimumu, ΔT arttıkça azalır. Bu sebeple, Peltier elemanı başına düşen ΔT sıcaklık farkı, mümkün olduğu kadar küçük aralıkta olacak şekilde dizayn edilmelidir.

Şekil 3.12'de $T_H = 27^\circ\text{C}$ sabit sıcaklıkta tutulduğunda farklı ΔT sıcaklık farkı altında, COP 'nin akım ile değişimi verilmiştir. $\Delta T = 0$ için I_{**} optimum akım uygulandığında, COP 'nin sonsuza gideceği grafikten anlaşılmaktadır. COP 'yi maksimum yapan değer ile Q_C 'yi maksimum yapan değerler farklıdır. Düşük akımlarda Joule ısısı ve sıcaklık farkından dolayı meydana gelen ters Seebeck etkisi kayıplarının daha az olması sebebiyle maksimuma doğru yaklaşır.



Şekil 3.12 : $T_H = 27^\circ\text{C}$ 'de COP 'nin akım ile değişimi.

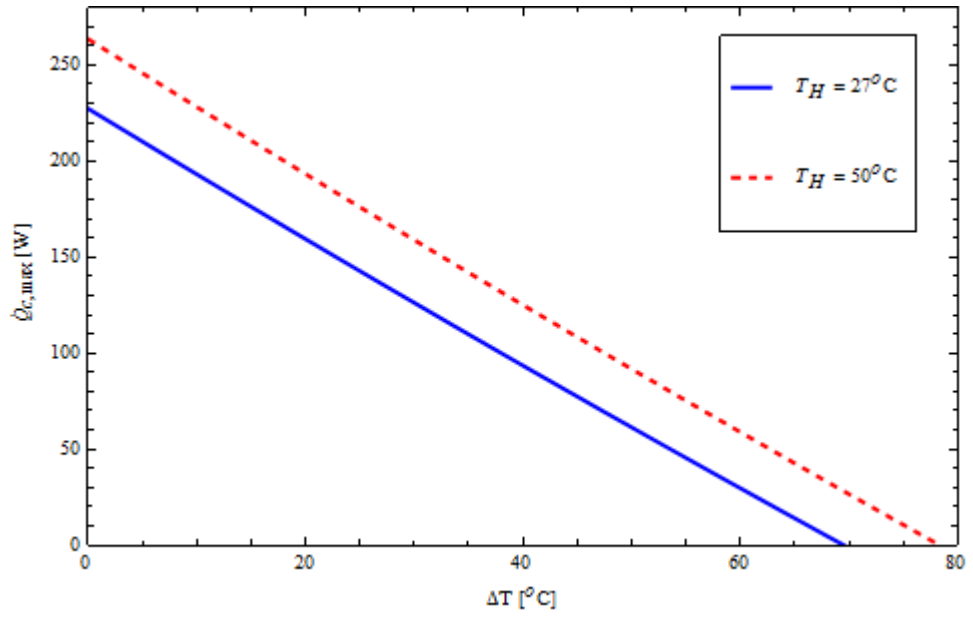
Termoelektrik bileşenlerin tipik grafiklerinden birisi de Şekil 3.13'te verilen, COP ile $\dot{Q}_C$ 'nin ilişkisini veren grafiklerdir. $\dot{Q}_C$ arttıkça COP artar ve bir maksimuma ulaşır, ancak $\dot{Q}_C$ artmaya devam ettikçe COP azalacaktır. Akımın $\dot{Q}_C$ için optimum değerinden sonra, artmaya devam ettikçe oluşan Joule ısısının etkisiyle $\dot{Q}_C$ 'nin azalmasında sebep olur. Bu sebeple grafikler, 0 noktasında birbirleri üzerine kapanır.



Şekil 3.13 : $T_H = 27^\circ\text{C}$ 'de COP 'nin $\dot{Q}_C$ 'ye göre değişimi.

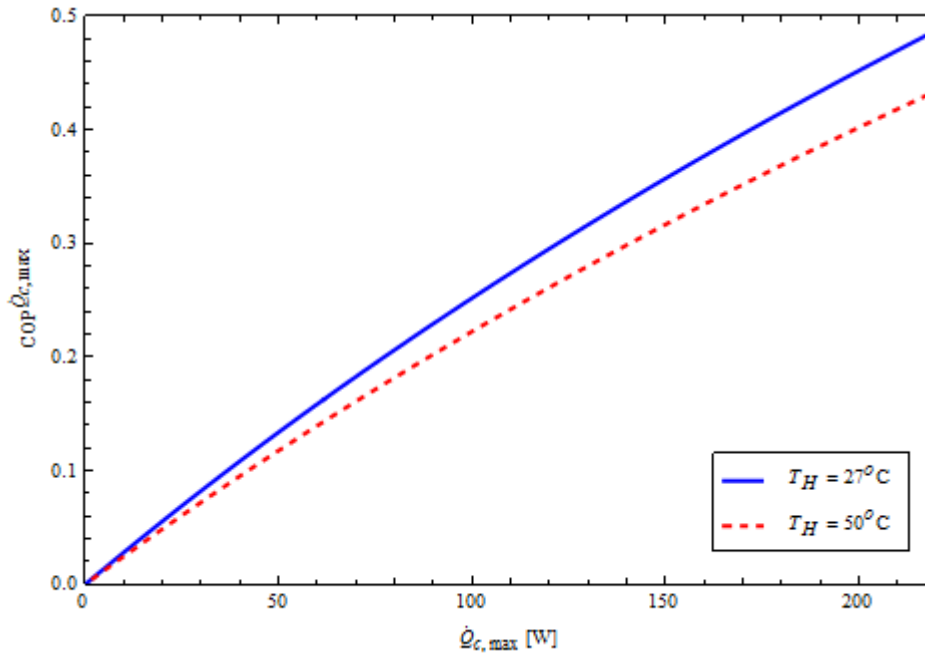
Şekil 3.14'te $\dot{Q}_{C,\max}$ 'ın $T_H = 27^\circ\text{C}$ ve 50°C iken ΔT ile değişimi verilmiştir.

Görüldüğü gibi, $\dot{Q}_{C,\max}$, ΔT arttıkça azalır ve bir $\Delta T_{\max}$ değerinde 0 olur.



Şekil 3.14 : $\dot{Q}_{C,\max}$ 'ın ΔT 'ye göre değişimi.

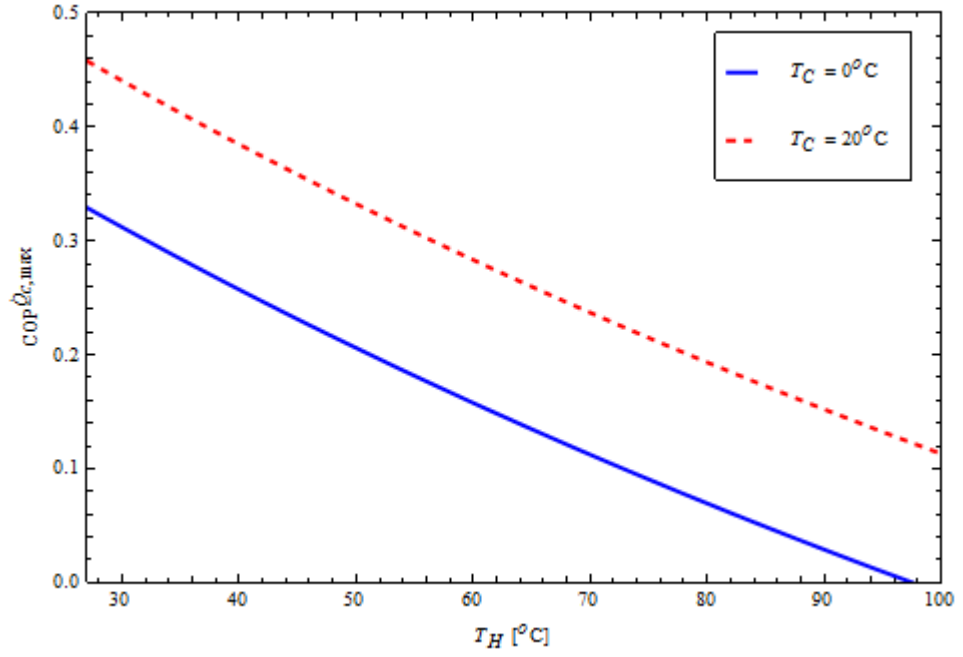
Şekil 3.15'te ΔT artarken $T_H = 27^\circ\text{C}$ ve 50°C değerleri için $\dot{Q}_{C,\max}$ ile COP 'nin birbirlerine göre grafiği verilmiştir.



Şekil 3.15 : $COP^{\dot{Q}_{C,\max}}$ 'ın $\dot{Q}_{C,\max}$ ile değişimi.

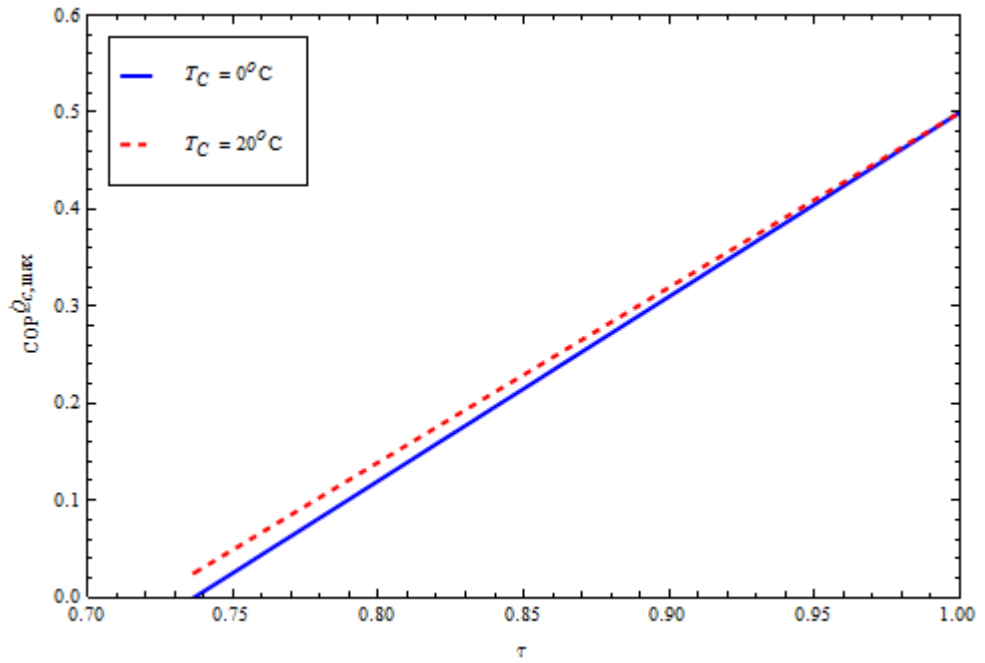
Grafikten de anlaşılabacağı gibi, sıcak yüzey sıcaklığı T_H artarsa, aynı $\dot{Q}_{C,\max}$ değerine karşılık gelen $COP^{\dot{Q}_{C,\max}}$ değeri azalır. Diğer bir deyişle, aynı $\dot{Q}_{C,\max}$ değerini oluşturmak için harcanan güç artmıştır. Diğer taraftan $\dot{Q}_{C,\max}$ değeri sıcaklık farkı azaldıkça artacaktır. Sıcaklık farkının düşmesi COP 'nin de artmasına sebep olur.

$COP^{\dot{Q}_{C,\max}}$ değerinin T_H yükseldikçe düşeceği Şekil 3.16' dan da takip edilebilir. Grafikten T_C 'nin 0°C ve 20°C değerleri için $COP^{\dot{Q}_{C,\max}}$ ve T_H bilgisi edinilebilir. T_C arttıkça $COP^{\dot{Q}_{C,\max}}$ değeri de artmaktadır. Aslında bunun sebebi T_C ile T_H arasındaki yakınlaşmadır.



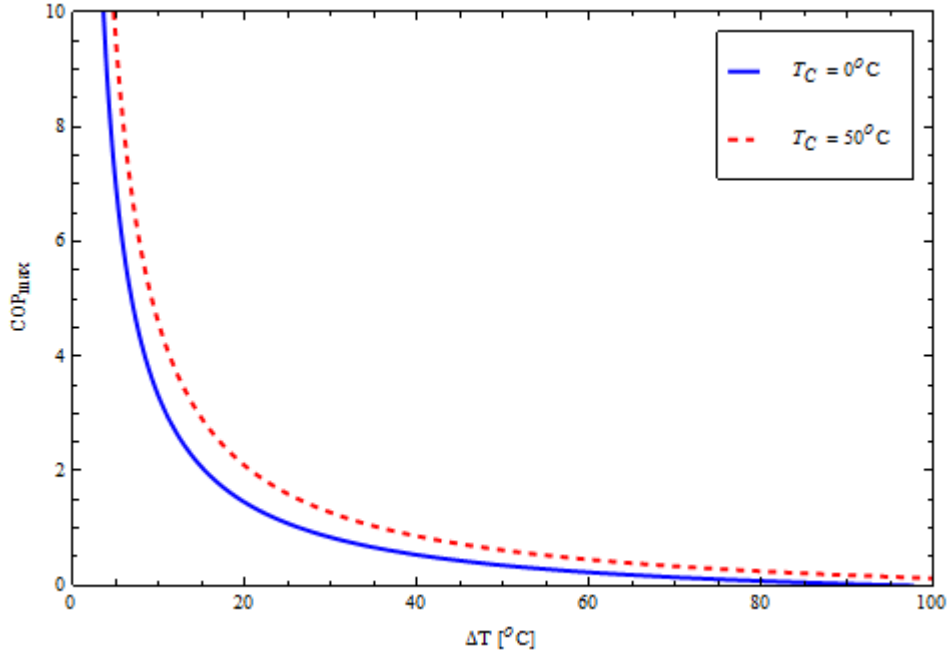
Şekil 3.16 : $COP_{Qc,max}$ 'ın T_H göre değişimi.

Yüzey sıcaklıklarının $COP_{Qc,max}$ ile olan ilişkisi, Şekil 3.17'den takip edilebilir. ΔT azaldıkça COP 'nin azalacağı bir kez daha vurgulanmaktadır. Bu grafikten faydalanarak optimum COP seçilebilir.



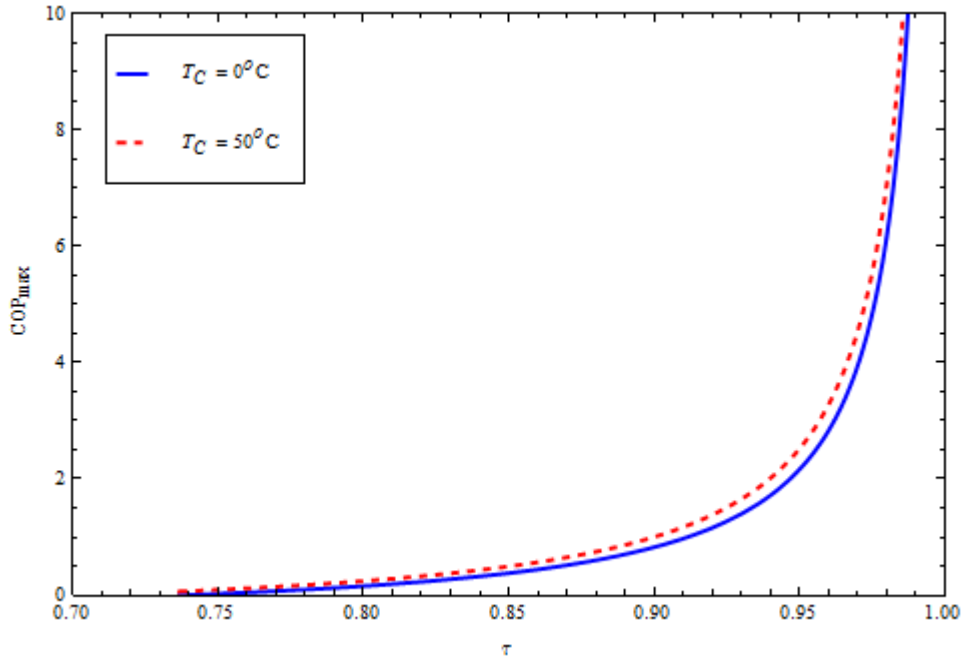
Şekil 3.17 : $COP_{Qc,max}$ 'ın τ ile değişimi.

Şekil 3.18’de COP ’nin maksimumunun sıcaklık farkına göre grafiği verilmiştir. Buna göre, T_C sıcaklık arttırımının COP ’nin maksimum noktasına katkısı fazla olmamıştır. Ancak yine de $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ için yaklaşık 1.2 katı kadar artış meydana gelmiştir. Sıcaklık farkı düştükçe bu oranın daha da artacağı grafikten görülebilir.



Şekil 3.18 : COP_{max} ’ın ΔT ’ye göre değişimi.

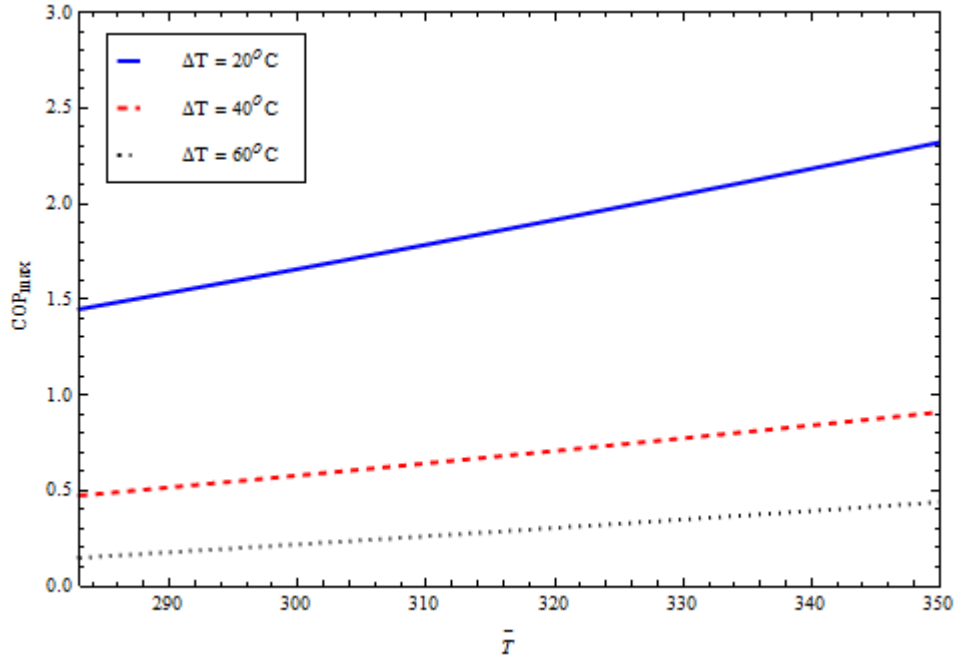
Yukarıdaki grafik daha genel olarak Şekil 3.19 ile verilebilir.



Şekil 3.19 : COP_{max} ’ın τ ile değişimi.

τ 'nın 1 değeri için COP sonsuza gitmektedir. Eğer COP 'yi maksimum değerine taşımak istersek, yüzey sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkını minimize edecek şekilde sistemin çalışma şartlarının ayarlanması gerektiği açıktır.

ΔT 'nin 20°C , 40°C ve 60°C değerleri için $COP_{\max}$ 'ın $\bar{T}$ ile değişimi Şekil 3.20'de verilmektedir.

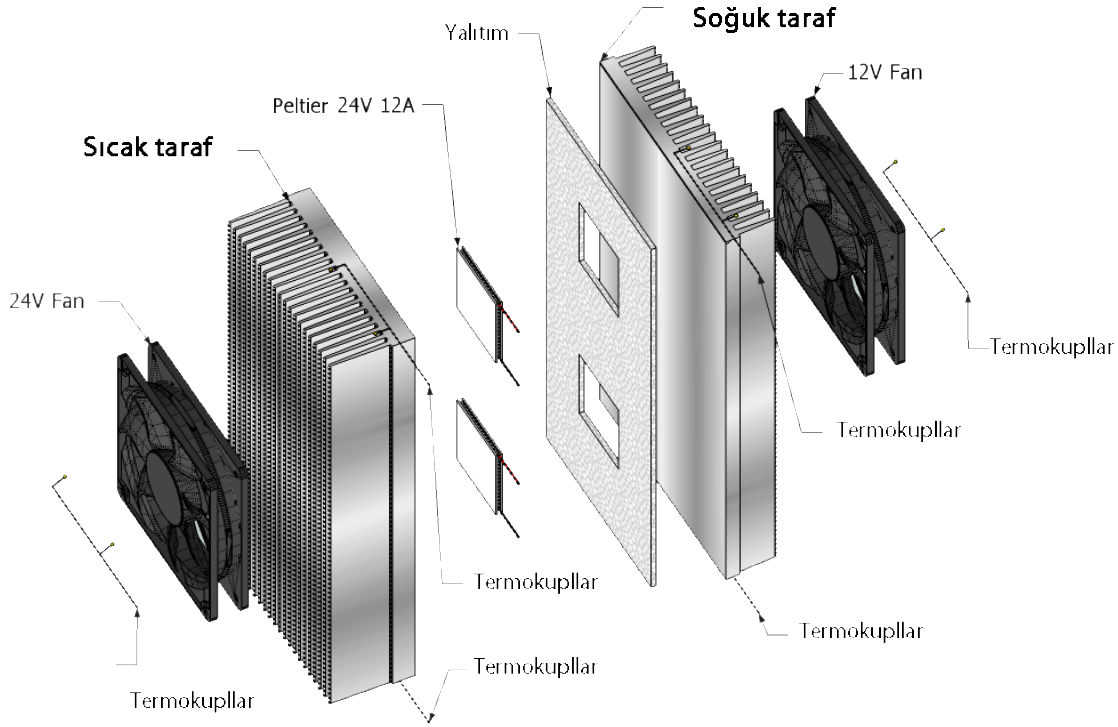


Şekil 3.20 : $COP_{\max}$ 'ın ortalama sıcaklık $\bar{T}$ ile değişimi.

$\bar{T}$ 273K ile 350K arasında değişirken, ΔT sıcaklık farkları sabit tutularak yüzey sıcaklıkları yukarıya doğru ötelenmektedir. Bu durumda sıcaklıkların yukarıya doğru çıkması, COP 'yi arttırmaktadır.

3.3.2 Tek katmanlı Peltier modülün ısı değıştircilerle modellenmesi

Modellemesi yapılan termoelektrik soğutucu Şekil 3.21’de görüldüğü gibi sıcak ve soğuk tarafta fanlar, kanatçıklı yüzeyler, aralarında izolasyon tabakası ve Peltier elemanlardan oluşmaktadır.



Şekil 3.21 Tek katmanlı ve ısı değıştircili Peltier soğutucu.

Bir Peltier elemanın soğuk ve sıcak yüzeyleri için temel ısı güç denklemleri daha önce (3.30) ve (3.31) eşitlikleri ile verilmiştir. Denklem (3.56) ve (3.57) ile de, soğuk ve sıcak kanatçıklı yüzeyler için temel denklemler belirtilmiştir. Kanatçıklı yüzeyler için verilen denklemlerde belirtilen U değerleri, fanlar dahil tüm yüzey için verilen tam ısı iletim katsayılarıdır ve birimleri $\frac{W}{K}$ ‘dir .

$$\dot{Q}_C^F = U_C \Delta T_C \quad (3.56)$$

$$\dot{Q}_H^F = U_H \Delta T_H \quad (3.57)$$

Isı kaçaqlarının olmadığı ve ısı geçişinin sürekliliği durumunda, (3.30) ile (3.56) ve (3.31) ile (3.57) denklemleri birbirlerine eşit olmalıdır. Bu eşitliklerden faydalanarak Peltier modüllerin yüzey sıcaklıkları, T_C ve T_H , verilen α , K , R_i , $T_{H,\infty}$ ve $T_{C,\infty}$ değerleri için, U_C , U_H ve I 'nin parametreleri cinsinden hesaplanabilir. Sonuç olarak, aşağıdaki (3.58) ve (3.59) denklemleri elde edilir.

$$T_C(U_C, U_H, I) = \frac{-\alpha R_i I^3 + R_i(2K + U_H)I^2 - 2T_{C,\infty}U_C N \alpha I + 2T_{C,\infty}U_C(K + U_H) + 2KT_{H,\infty}U_H}{2[-\alpha^2 I^2 + \alpha(U_H - U_C)I + K(U_H + U_C) + U_C U_H]} \quad (3.58)$$

$$T_H(U_C, U_H, I) = \frac{\alpha R_i I^3 + R_i(2K + U_C)I^2 + 2T_{H,\infty}\alpha I + 2T_{H,\infty}(K + U_H) + 2KT_{C,\infty}U_C}{2[-\alpha^2 I^2 + \alpha(U_H - U_C)I + K(U_H + U_C) + U_C U_H]} \quad (3.59)$$

Yüzey sıcaklıklarının bulunması ile soğuk ve sıcak taraf için ısı geçişleri, performans katsayısı ve uygulanması gereken gerilim denklemleri sırayla (3.60), (3.61), (3.62) ve (3.63) eşitlikleri ile ifade edilebilir.

$$\dot{Q}_C(U_C, U_H, I) = U_C [T_{\infty,C} - T_C(U_C, U_H, I)] \quad (3.60)$$

$$\dot{Q}_H(U_C, U_H, I) = U_H [T_H(U_C, U_H, I) - T_{\infty,H}] \quad (3.61)$$

$$COP(U_C, U_H, I) = \frac{\dot{Q}_C(U_C, U_H, I)}{\dot{Q}_H(U_C, U_H, I) - \dot{Q}_C(U_C, U_H, I)} \quad (3.62)$$

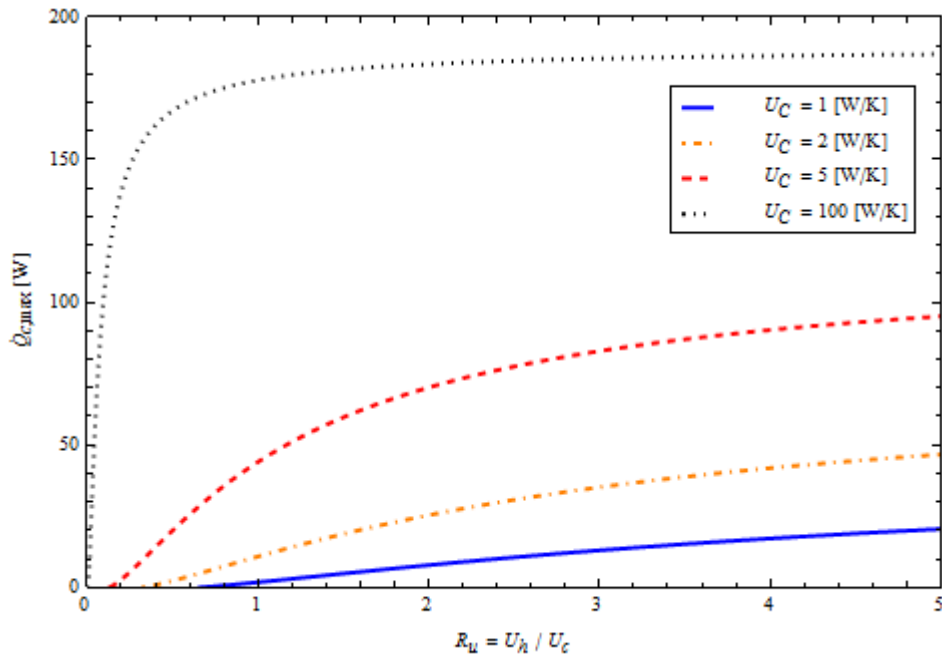
$$V(U_C, U_H, I) = \alpha [T_H(U_C, U_H, I) - T_C(U_C, U_H, I)] + IR_i \quad (3.63)$$

Soğutma gücünün maksimum olduğu andaki akım değerini bulabilmek için, denklem (3.60)'ın akıma göre türevinin sıfıra eşitlenmesi gerekir. Optimum akımın analitik ifadesi çok uzun olduğu için verilmeyecektir, ancak işlemler Mathematica ortamında elde edilebilir.

Soğutma yükünü maksimize eden optimum akım, (I_*) değeri, (3.60), (3.61), (3.62) ve (3.63) denklemlerinde yerine konursa, $\dot{Q}_{Cmax}$, $\dot{Q}_H^{\dot{Q}_{Cmax}}$, $COP^{\dot{Q}_{Cmax}}$ ve $V^{\dot{Q}_{Cmax}}$ değerleri bulunabilir. Görüldüğü gibi I_* , T_C , T_H , $\dot{Q}_{Cmax}$, $\dot{Q}_H^{\dot{Q}_{Cmax}}$, $COP^{\dot{Q}_{Cmax}}$ ve $V^{\dot{Q}_{Cmax}}$ değerleri, $T_{H,\infty}$, $T_{C,\infty}$, U_C ve U_H dizayn parametreleri cinsinden ifade edilebilmektedir.

3.3.2.1 Analitik sonuçlar

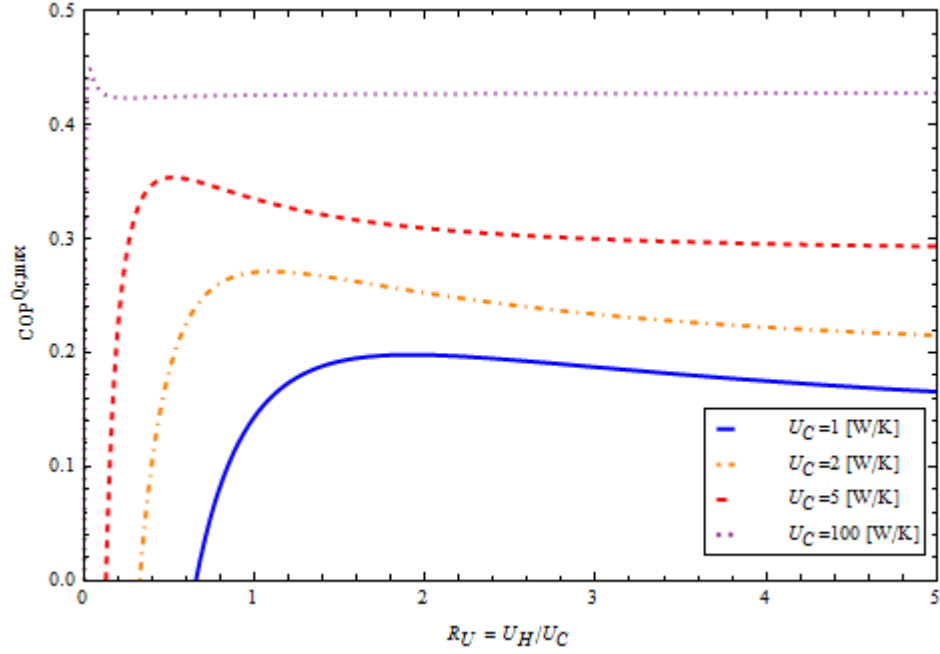
Oluşturduğumuz analitik model ile kanatçıklı yüzeyler için verilen U_C ve U_H değerlerini boyutsuz bir büyüklüğe taşıyarak, $R_U = U_H / U_C$, değişen U_C değerleri için maksimum soğutma yükünün $T_{C,\infty} = 290$ K ve $T_{H,\infty} = 300$ K olduğu 10°C 'lik sıcaklık farkı altındaki grafiği Şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.22 : $\dot{Q}_{Cmax}$ 'ın R_U 'ya göre grafiği.

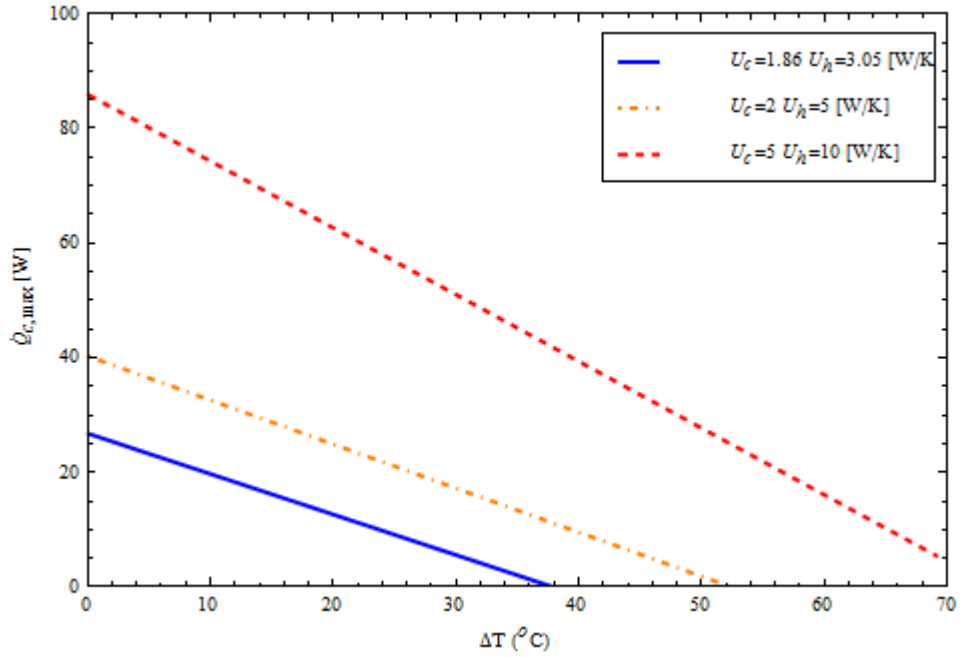
Maksimum soğutma gücü $U_C = 100$ W/K değeri için 186W civarındadır. Bu durumda, $U_H = 500$ W/K civarında olacaktır. Kabul edilen düzenek için bu mümkün değildir. Bu büyüklükteki U değerleri ancak sıvı soğutma sistemlerinde mümkün olabilmektedir. Dolayısıyla, hava soğutmalı bir sistem için kabul edilebilir U değerleri $U_C = 5$ W/K ve $U_H = 10$ W/K seçilirse maksimum soğutma gücünün 70W civarında gerçekleşeceği söylenebilir.

Farklı U değerleri ile soğutma yükünü maksimum yapan akımlardaki COP 'nin, boyutsuz ısı iletim katsayısı R_U ile değişimi Şekil 3.23'te verilmektedir.



Şekil 3.23 : $COP^{\dot{Q}_{C,max}}$ 'ın R_U 'ya göre grafiği.

Hava soğutmalı bir sistem için kabul edilebilir COP değeri, 0.42 civarında olabilmektedir. Şekil 3.24'teki grafiğe göre ΔT sıcaklık farkı arttıkça soğutma yükünün düştüğü doğrulanmaktadır.



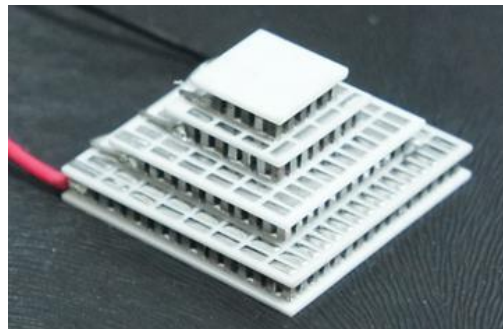
Şekil 3.24 : Farklı U_C ve U_H değerlerinde $\dot{Q}_{C,max}$ 'ın ΔT 'ye göre değişimi.

$U_C = 1.86 \text{ W/K}$ ve $U_H = 3.05 \text{ W/K}$ değerleri aynı zamanda deney düzeneğinin değerleridir. Analitik modelde bu değerler yerine konulup $\dot{Q}_C$ değerini maksimum yapan optimum akım hesaplandığında, $I_* = 4.86 \text{ A}$ olmaktadır. Bu akım ve U değerleri baz alınarak yapılacak 80W'lık bir soğutucunun yükünü karşılamak için en az 6 tane Peltier modüle ihtiyacı vardır.

3.4 İki Katmanlı Matematiksel Model

Üreticinin vermiş olduğu Q_C 'nin ΔT sıcaklık farkına göre Şekil 3.3'teki grafiğini incelersek, ΔT arttıkça Q_C soğutma gücünün azaldığını görürüz. Bu durumda bir Peltier elemanının maruz kaldığı ΔT sıcaklık farkını azaltabilmek amacıyla, iki veya daha çok katmanlı bir model tasarımına ihtiyaç vardır. Yapılan iki katmanlı matematiksel model, tek katmanlı Peltier çözümlemesinde olduğu gibi, iki aşamada anlatılacaktır.

Şekil 3.25'te ticari olarak satılan çok katmanlı Peltier elemanının geometrisi görünmektedir.



Şekil 3.25 : Çok katmanlı ticari Peltier modüller.

Çok katmanlı Peltier modüllerin uygulamasında, ısının emildiği Peltier elemanı Joule ısınması nedeniyle daima emdiği ısıdan daha fazlasını bir sonraki Peltier elemanına iletir. Bir sonraki katmanda yer alan Peltier elemanının soğutma yükü daima öncekinden fazla olacaktır. Bu nedenle her katmandan aynı akımın akması durumunda soğuk taraftan sıcak tarafa doğru, katmanların içerdiği p-n çiftlerinin sayısının artması gerekir. Aksi halde sıcak taraftan soğuk tarafa doğru katmanların gittikçe artan bir akım değerine sahip olması gerekir ki bu durumda soğuk tarafa yakın katmanlarda kullanılamayan bir Peltier kapasitesi kalır.

Bu durumdan kaçınarak maliyetleri minimize etmek için çok katmanlı Peltier modülleri genellikle Şekil 3.25’deki gibi piramit formunda yapılır.

Daha önce verilen temel Peltier modül denklemleri iki katmanlı için indislerini belirtmek amacı ile düzenlenerek (3.64), (3.65), (3.66) ve (3.67) eşitlikleriyle tekrar verilmiştir.

$$\dot{Q}_{C1} = \alpha I_1 T_{C1} - K \Delta T_{p1} - \frac{I_1^2 R_i}{2} \quad (3.64)$$

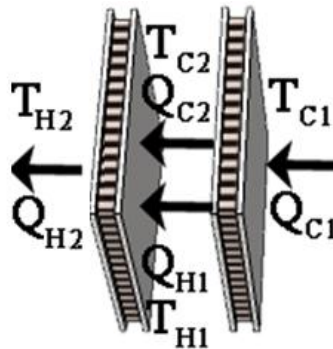
$$\dot{Q}_{H1} = \alpha I_1 T_{H1} - K \Delta T_{p1} + \frac{I_1^2 R_i}{2} \quad (3.65)$$

$$\dot{Q}_{C2} = \alpha I_2 T_{C2} - K \Delta T_{p2} - \frac{I_2^2 R_i}{2} \quad (3.66)$$

$$\dot{Q}_{H2} = \alpha I_2 T_{H2} - K \Delta T_{p2} + \frac{I_2^2 R_i}{2} \quad (3.67)$$

Burada $\dot{Q}_{C1}$, $\dot{Q}_{H1}$ ve ΔT_{p1} 1.Peltier modülün sırasıyla sıcak ve soğuk taraf ısıl gücü ve yüzey sıcaklıkları farkı olurken, $\dot{Q}_{C2}$, $\dot{Q}_{H2}$ ve ΔT_{p2} benzer şekilde 2.Peltier modüle ait değerlerdir. Kullanılan Peltier modüller, tek katmanlı Peltier modüller ile aynı özelliklere sahiptirler.

3.4.1 İki katmanlı Peltier modülün karakteristiği



Şekil 3.26 : İki katmanlı Peltier modülün şematik gösterimi.

Peltier modül tarafından ortamdan emilen Q_C ısı aksı, dış ortama Q_H yükü olarak atılmaktadır. Peltier modüllerin ısı pompası gibi çalıştığı daha önce ifade edilmişti. Öyleyse, Q_H ısıl yükü, miktar olarak Q_C ’den daha büyük olacaktır.

Q_C 'nin denklemi (3.30)'a uygulanan güç ifadesi (3.32) eklenirse, (3.31) Q_H eşitliğinin elde edileceği kontrol edilebilir. Böylece, iki katmanlı dizaynda 1. Peltier modülün Q_{C1} kadar ısı soğurarak diğer yüzeyinden attığı Q_{H1} ısı yükünü kompanze edebilecek miktarda Q_{C2} ısı gücü oluşturabilmesi için, $I_2 > I_1$ olacak şekilde Peltier modüller farklı akımlar ile beslenmelidir.

İki katmanlı sistem için, I_1 ve I_2 akımları soğutma yükünü maksimum yapacak şekilde optimize edilerek bulunabilir. Peltier modüller arasındaki sıcaklıklar birbirine eşit olacaktır. Bu durumda $T_{C2} = T_{H1} = T_i$ alınır. Sistem kararlı hal durumundayken $\dot{Q}_{H1} = \dot{Q}_{C2} = \dot{Q}_i$ olur. Bu şartlar altında (3.68) denklemi yazılabilir. Kolaylık olması açısından ara katmandaki ısı ve sıcaklık ifadelerinde “i” indisi kullanılmıştır.

$$\dot{Q}_{H1} = \dot{Q}_{C2} = \dot{Q}_i \Leftrightarrow \alpha I_2 T_{H1} - K(T_{H2} - T_i) - \frac{I_2^2 R_i}{2} = \alpha I_1 T_{H1} - K(T_i - T_{C1}) + \frac{I_1^2 R_i}{2} \quad (3.68)$$

Soğutma yükü Q_{C1} , maksimum yapılacak şekilde ele alınırsa, I_2 akımının Peltier modülün limitleri içinde kalıp kalmıyacağı belirsizdir. Ayrıca, daha çok katmanlı yapılarda katman sayısı arttıkça, limitlerin dışında kalma olasılığı da artacaktır. Bu sebeple, $\dot{Q}_i$ veya diğer bir deyişle en üst katmanın soğutma gücü maksimum yapılacak şekilde limitler dahilinde modelleme yapılabilir. Bir Peltier modül için Q_C 'yi maksimum yapan (3.37) denklemi $\dot{Q}_i$ için kullanılırsa, (3.68) eşitliği (3.69) eşitliğine dönüşür.

$$\frac{(\alpha T_i)^2}{2R_i} - K(T_{H2} - T_i) = \alpha I_1 T_i - K(T_i - T_{C1}) + \frac{I_1^2 R_i}{2} \quad (3.69)$$

Denklem (3.69)'a dikkat edilirse, ısı değiştiricileri olmaksızın yapılan bu dizaynda T_{C1} ve T_{H2} sıcaklıkları dış ortam sıcaklıkları olmaktadır. Öyleyse $T_{H1} = T_{C2} = T_i$ ara sıcaklığı, denklemden çekilerek T_{C1} , T_{H2} ve I_1 'in parametreleri cinsinden ifade edilebilir. $\dot{Q}_i$ 'nin maksimum değeri $\dot{Q}_{i,max}$ ve I_{2*} optimum akımı da ara katman sıcaklığının bir fonksiyonudur. Dolayısıyla $\dot{Q}_{C1}$, $\dot{Q}_{i,max}$, $\dot{Q}_{H2}$ ve I_{2*} büyüklüklerinin hepsi birden T_{C1} , T_{H2} ve I_1 'in fonksiyonu olurlar.

Bu fonksiyonlar aşağıdaki eşitlikler ile daha anlaşılır bir şekilde ifade edilmiştir.

$$T_{H1} = T_{C2} = T_i(T_{C1}, T_{H2}, I_1) \quad (3.70)$$

$$\dot{Q}_{C1} = \dot{Q}_{C1}(T_{C1}, T_{H2}, I_1) \quad (3.71)$$

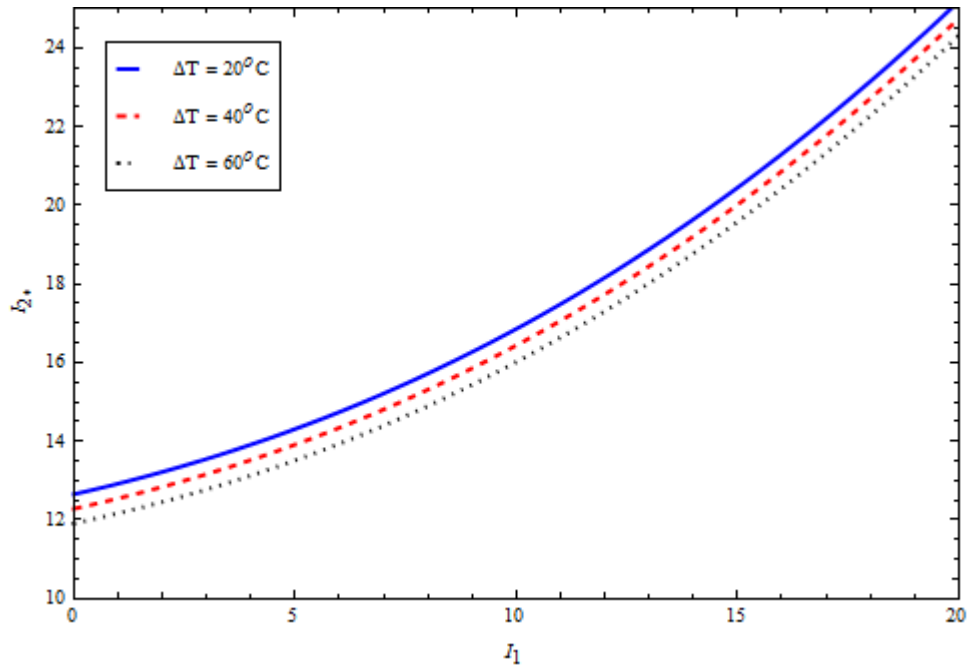
$$\dot{Q}_{C2} = \dot{Q}_{H1} = \dot{Q}_{i,max}(T_{C1}, T_{H2}, I_1) \quad (3.72)$$

$$I_{2*} = I_{2*}(T_{C1}, T_{H2}, I_1) \quad (3.73)$$

Yukarıdaki fonksiyonlar kullanılarak elde edilen denklemler uzun ve karmaşık olduklarından dolayı tez kapsamında verilmeyeceklerdir. Ancak, bunların numerik analiz sonuçları üzerinde durulacaktır. I_{2*} optimum akımı uygulandığında meydana gelen $\dot{Q}_{C1}$ ısıl gücü $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ ile, $\dot{Q}_{H2}$ ısıl gücü $\dot{Q}_{H2}^{opt}$ ile gösterilirken, COP ise COP_{opt} ile belirtilecektir.

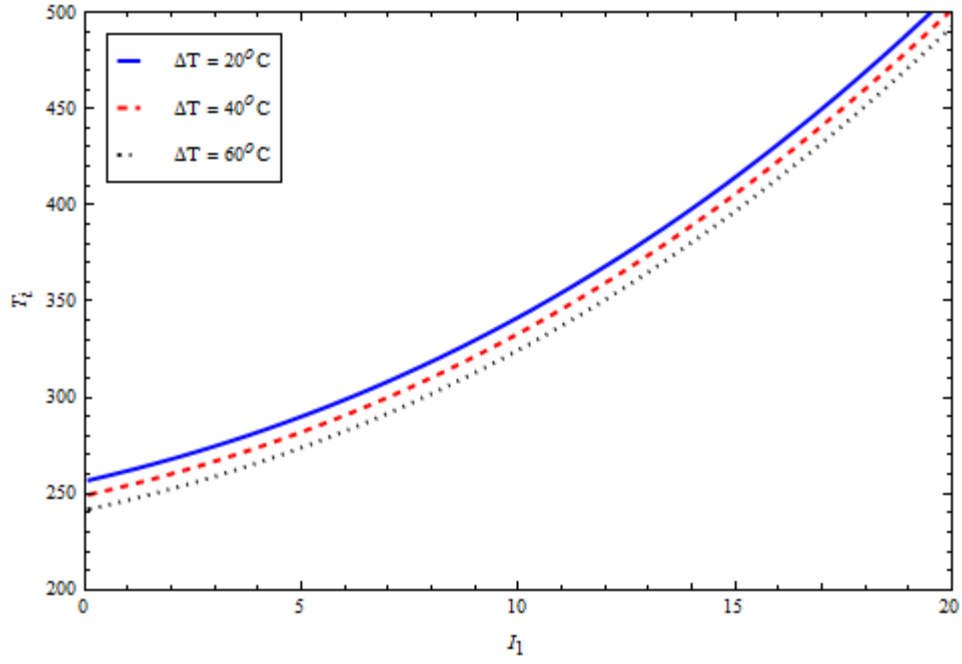
3.4.1.1 Sayısal sonuçlar

Şekil 3.27'de Q_i 'yi maksimum yapan I_{2*} akımı ile I_1 arasındaki ilişki, farklı ΔT değeri için verilmiştir. I_1 akımının her bir değeri için I_{2*} değerleri artarak değişmektedir.



Şekil 3.27 : $T_H = 27^\circ C$ 'de I_1 ile I_{2*} arasındaki ilişki.

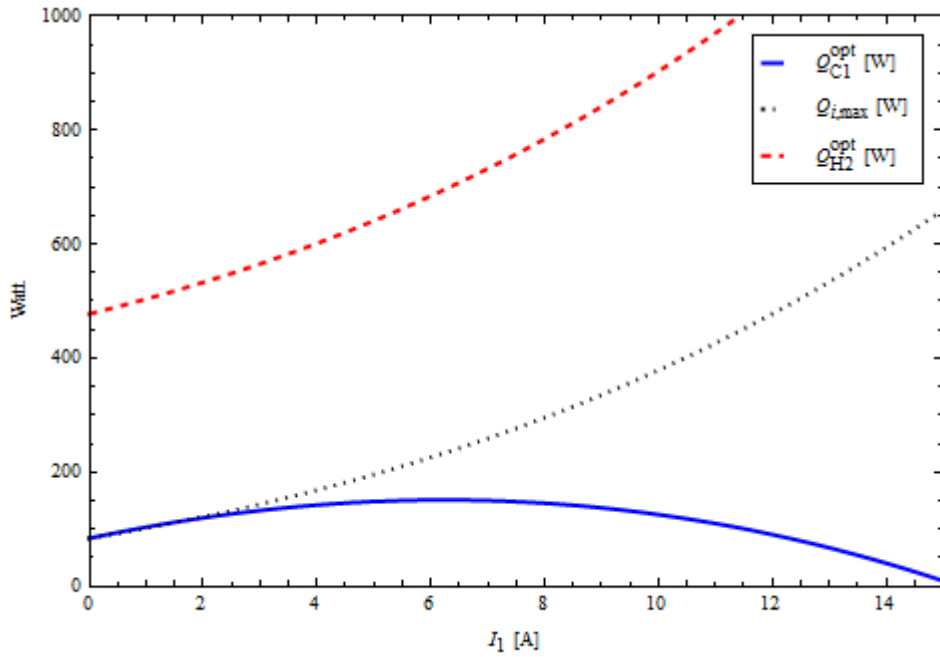
Benzer bir grafik T_i orta katman sıcaklığı için verilebilir. Şekil 3.28’de T_i ile I_1 arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 3.28 : $T_H = 27^\circ\text{C}$ ’de T_i ile I_1 arasındaki ilişki.

Şekil 3.29’da $\dot{Q}_{C1}^{opt}$, $\dot{Q}_{i,max}$ ve $\dot{Q}_{H2}^{opt}$ ısı akıları ile I_1 arasındaki dağılım incelenmiştir.

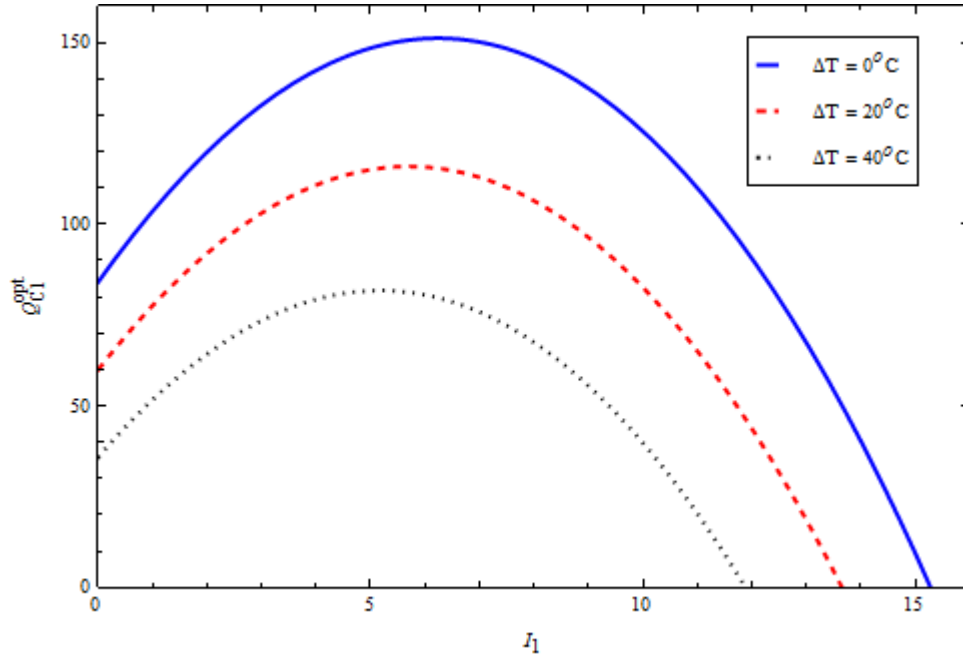
I_1 akımı $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ soğutma gücünü maksimum yapan değeri aşmamalıdır.



Şekil 3.29 : $T_H = 27^\circ\text{C}$ ’de Q_{C1} ile I_1 arasındaki ilişki.

Grafikten, maksimum $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ soğutma gücünden sonraki I_1 akımlarını devreye uygulamanın anlamsız olduğu anlaşılmaktadır. Joule ısısı ve katmanlar arasında oluşan sıcaklık farkına bağlı Fourier ısısı yüksek akımlarda ön plana çıkmaktadır.

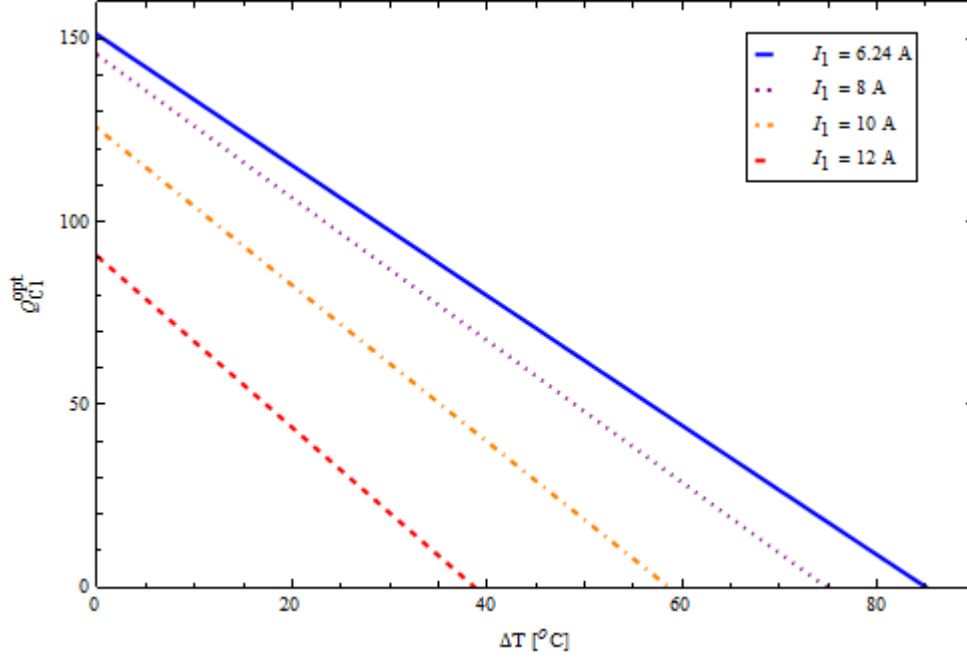
$\dot{Q}_{i,max}$ koşulunda elde edilen $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ gücünün, farklı sıcaklık farkı altındaki davranışını veren grafik Şekil 3.30 ile ifade edilmiştir. Buna göre, $\Delta T = 0^\circ C$ için $I_1 \cong 6.24A$ iken $\dot{Q}_{C1}^{opt} \cong 151W$ olarak gerçekleşmiştir. Sıcaklık farkı arttıkça soğutma gücü ters Fourier ısı iletimi ve Joule ısısından dolayı azalır.



Şekil 3.30 : $T_H = 27^\circ C$ 'de $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ ile I_1 arasındaki ilişki.

Kapalı bir alanı soğutmak istediğimizde, doğal olarak kapalı alanın sıcaklığı azalır ve dış ortam ile arasında ΔT sıcaklık farkı artar. Bu durum dış ortamdan içeriye doğru Fourier kaçaklarının artmasına sebep olacaktır. Belli bir I_1 akımında, $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ maksimum olur. Bundan sonra uygulanacak akımlar soğutma yükünü azaltacaktır.

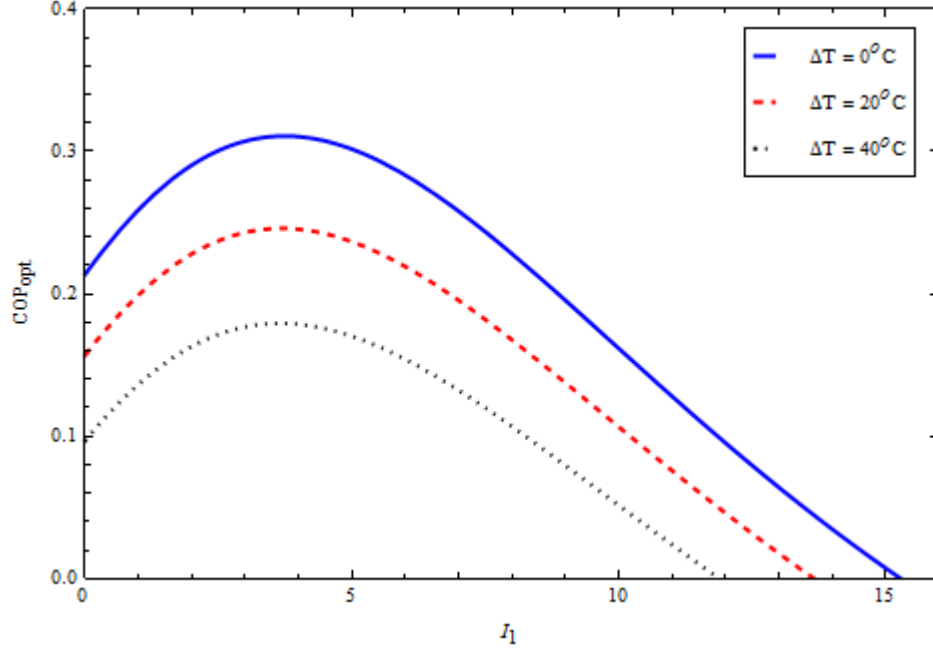
$T_H = 27^\circ C$ sabit sıcaklıkta tutulurken Şekil 3.31'deki gibi dört farklı akım değeri için ΔT arttırılırsa, her farklı akım için farklı bir $\Delta T_{\max}$ değerinde $\dot{Q}_{C1}^{opt} = 0$ olur. Örneğin $I_1 = 6.24A$ için $\Delta T_{\max} \cong 86^\circ C$ olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.31 : $T_H = 27^\circ C$ 'de $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ ile ΔT arasındaki ilişki.

$\Delta T = 0$ için $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ soğutma gücünü maksimum yapan değerler yine bu grafik ile verilir. Artan I_1 akımıyla birlikte maksimum soğutma gücü düşmektedir. Yine, $I_1 = 6.24A$ optimum akım için $\Delta T = 40^\circ C$ seçilirse, $\dot{Q}_{C1}^{opt} \cong 80W$ olur. $\Delta T = 0^\circ C$ değeri seçilirse, bir önceki grafikte de belirtildiği gibi $\dot{Q}_{C1}^{opt} \cong 151W$ 'lık soğutma gücü elde edilir.

Şekil 3.32’de optimum COP_{opt} ile I_1 arasındaki ilişki, üç farklı ΔT değeri için sunulmuştur. Buna göre ΔT ’nin her farklı değeri için COP_{opt} ’yi maksimum yapan bir I_1 değeri vardır.

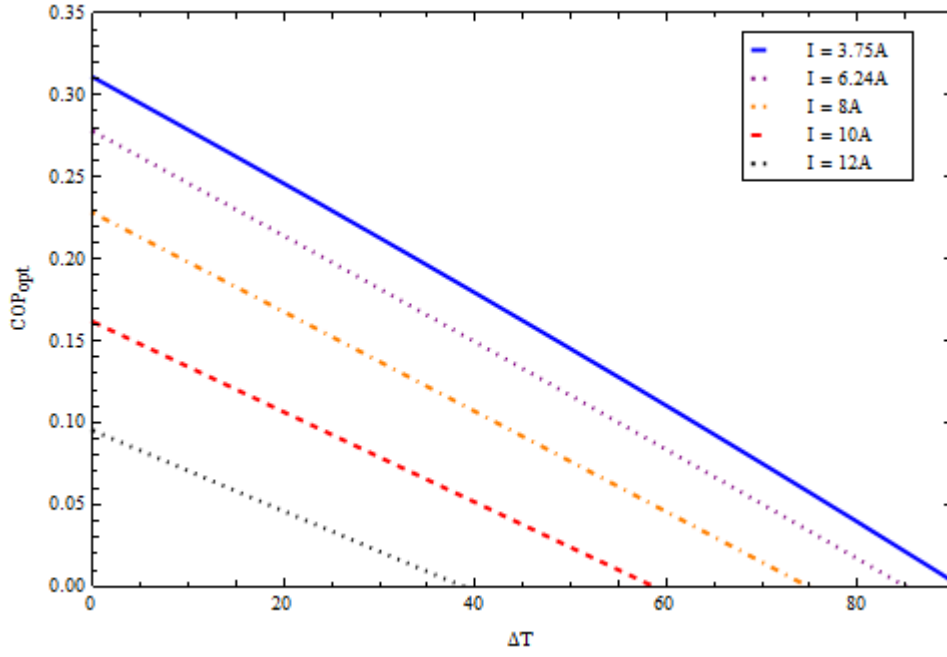


Şekil 3.32 : $T_H = 27^\circ C$ ’de COP_{opt} ile I_1 arasındaki ilişki.

Büyük I_1 değerlerinde COP_{opt} değeri azalır ve belli bir I_1 akımın değerinde sıfır olur. $\dot{Q}_{Cl}^{opt}$ ’da bu akım değerinde sıfır olacaktır. $\Delta T = 0^\circ C$ için maksimum $COP_{opt} \cong 0.31$ ve bu değeri veren akım $I_1 \cong 3.75A$ olarak hesaplanmıştır.

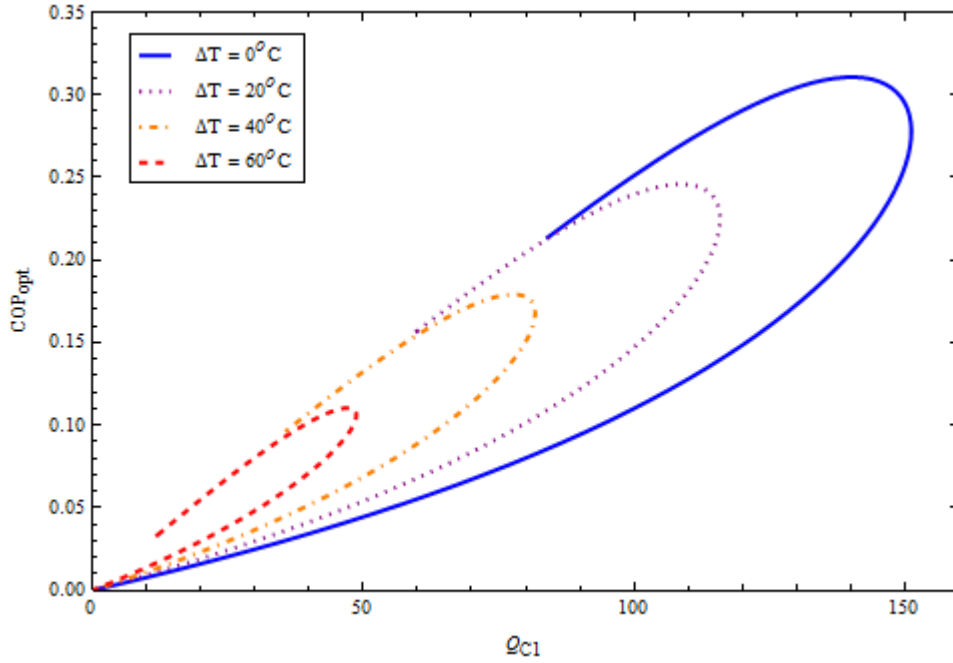
ΔT sıcaklık farkının artışı ile COP_{opt} değeri azalmaktadır. $\Delta T = 40^\circ C$ için maksimum $COP_{opt} \cong 0.18$ olarak gerçekleşmektedir.

Yukarıdaki grafik ile optimum COP ’nin akım bağımlılığı incelenirken, Şekil 3.33 ile de sıcaklık farkı ile ilişkisi ele alınmıştır. Sıcaklık farkı artarken COP ’nin azaldığı bu grafikte de gösterilmektedir. Örnek akımlar ile oluşturulan bu grafikten, varsayılan çalışma sıcaklıkları altında, optimum COP değeri veya değerleri seçilebilir. Bu değerlerin ne olduğu sistem dizaynında yapılacak kabüllere göre çeşitlilik gösterecektir.



Şekil 3.33 : $T_H = 27^\circ\text{C}$ 'de COP_{opt} ile ΔT arasındaki ilişki.

COP_{opt} ile $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ 'un birlikte değişimleri Şekil 3.34'te incelenmiştir. ΔT sıcaklık farkı altında, ΔT arttıkça hem COP_{opt} hem de $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ 'un azaldığını görüyoruz.

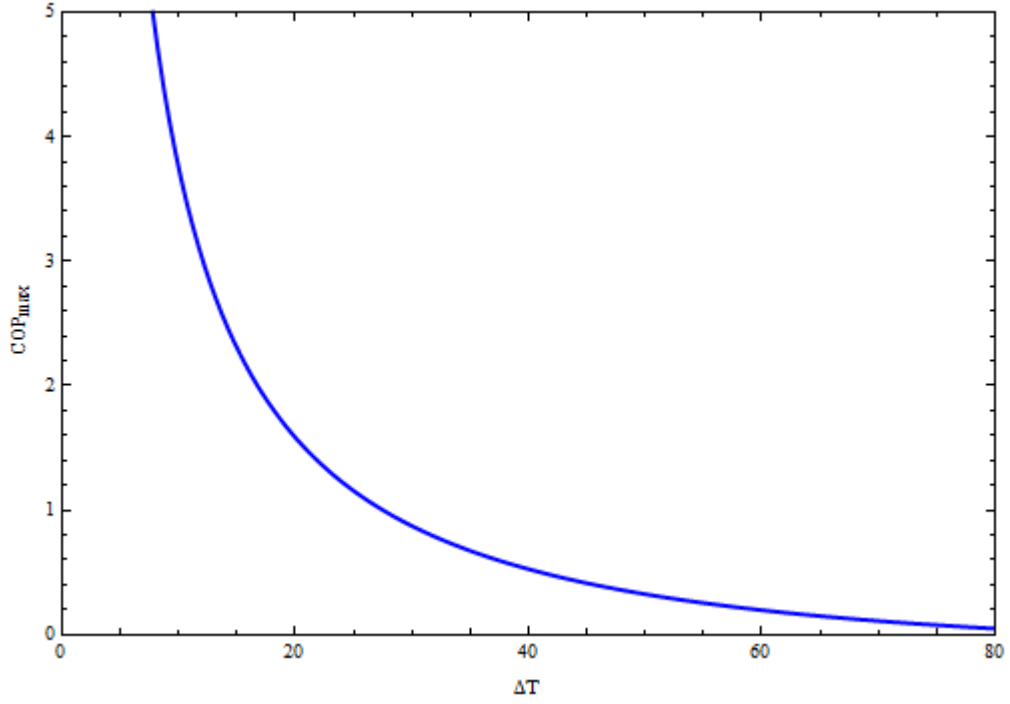


Şekil 3.34 : Farklı ΔT 'lerde COP_{opt} ile $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ arasındaki ilişki.

Seçilen bir ΔT için, COP_{opt} 'un maksimum değerindeki $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ ile maksimum $\dot{Q}_{C1}$ değeri arasında fazla bir fark olmadığı anlaşılmaktadır.

Örneğin, $\Delta T = 0^\circ C$ için, $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ maksimum değeri $\approx 151 W$ olurken, maksimum COP_{opt} değerindeki $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ değeri $\approx 140 W$ olmaktadır. Benzer şekilde COP_{opt} değeri içinde hesaplanabilir.

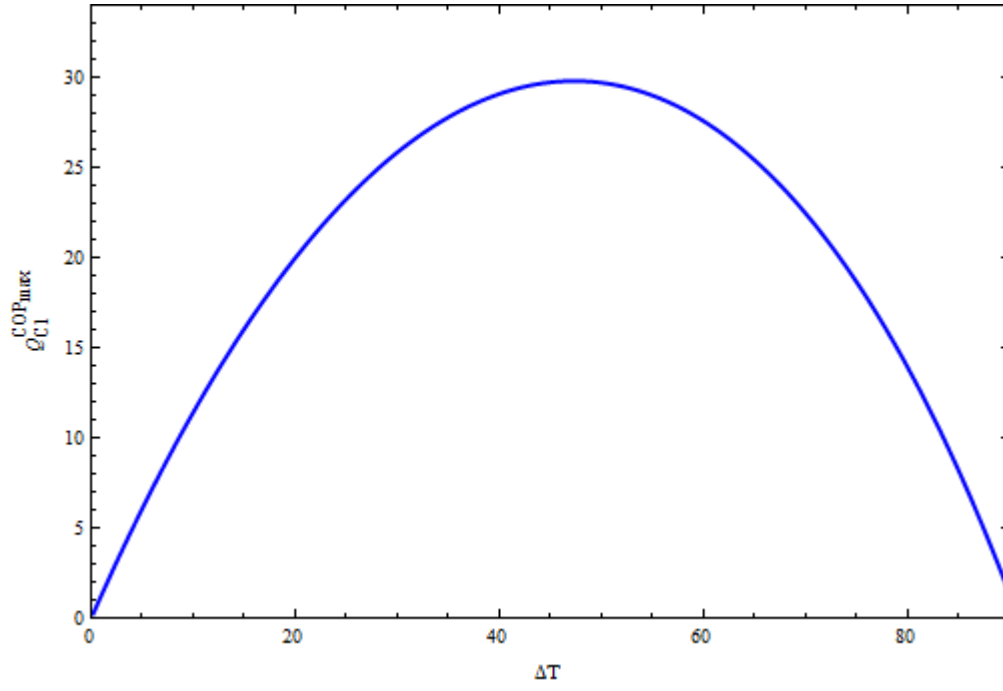
Şekil 3.35'te sistemin maksimum performans katsayısı COP_{max} ile ΔT ilişkisi verilmektedir. Sıcaklık farkı azaldığında COP 'nin maksimum değeri sonsuza gitmektedir.



Şekil 3.35 : COP_{max} ile ΔT arasındaki ilişki.

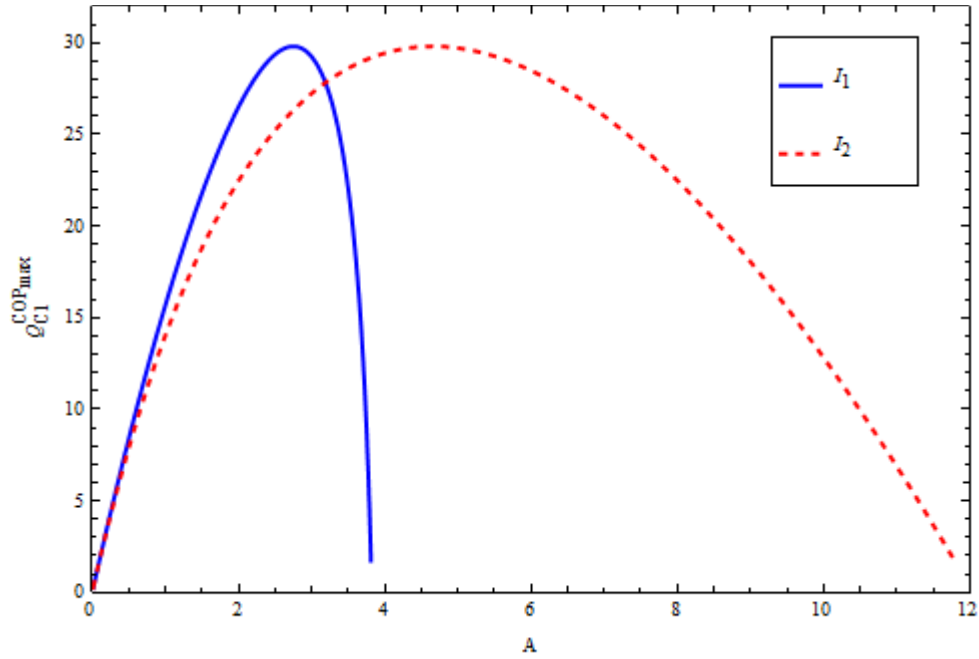
$\Delta T = 40^\circ C$ değeri için, $COP_{max} \approx 0.52$ civarındadır. Bu değeri sağlayan I_1 ve I_2 akımları sırasıyla $2.43A$ ve $3.76A$ 'dir. Bu akımlardaki soğutma gücü $\dot{Q}_{C1}$ ise ancak $29W$ olabilmektedir. Bu durumda, sürekli maksimum COP yaklaşımı ile soğutma yapmak yerine, istenilen sıcaklık ile soğuk yüzey sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının az olduğu durumlarda, bu yöntemin tercih edilmesi daha akla yatkın görünmektedir.

Şekil 3.36'da ise COP 'nin maksimum olduğu durumdaki $Q_{C1}^{COP_{max}}$ ile ΔT arasındaki bağlantı verilmiştir. Burada maksimum $Q_{C1}^{COP_{max}}$ değerinde $\Delta T \approx 43^\circ C$ 'dir.



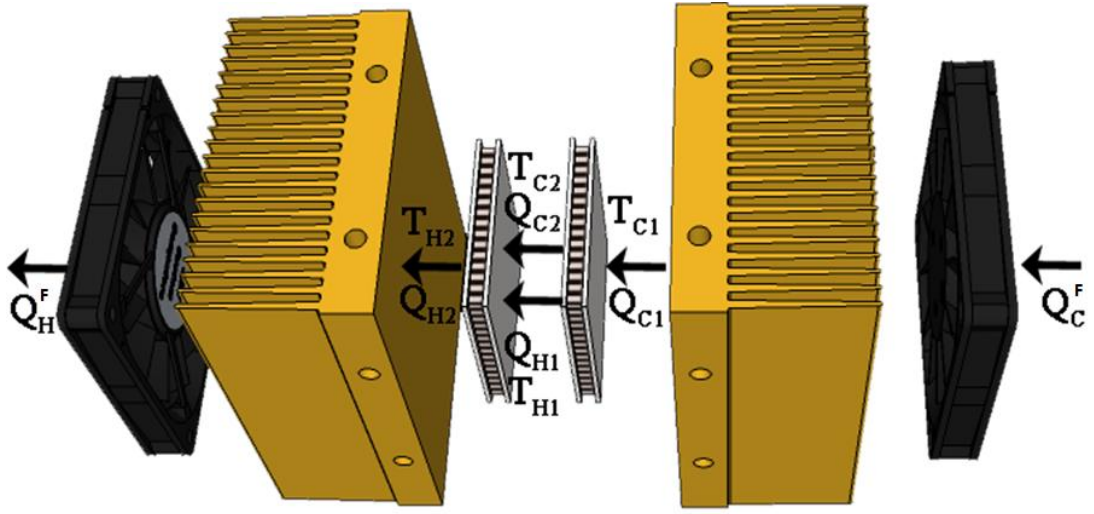
Şekil 3.36 : $Q_{C1}^{COP_{max}}$ ile ΔT arasındaki ilişkisi.

Son olarak, $Q_{C1}^{COP_{max}}$ 'ın herhangi bir ΔT değerindeki I_1 ve I_2 akım değerlerini öğrenmek için Şekil 3.37'den faydalanılabilir. $Q_{C1}^{COP_{max}}$ 'nin herhangi bir değerini veren iki farklı I_1 ve I_2 değerleri bulunmaktadır. COP 'yi maksimum yapan değer seçilmelidir.



Şekil 3.37 : $Q_{C1}^{COP_{max}}$ ile I_1 ve I_2 arasındaki ilişkisi.

3.4.2 İki katmanlı Peltier modülün ısı değıştiricilerle modellenmesi



Şekil 3.38 : İki katmanlı Peltier soğutucu şematik gösterimi.

Peltier elemanlar tarafından ortamdan Q_C ısı yükü, soğutulmak istenen alandan emilerek dış ortama Q_H yükü olarak atılmaktadır. Bu modellemede de fan ve kanatçıklı yüzeyler birlikte tek bir toplam ısı geçiş katsayısı U ile ifade edilmektedir. Bu bilgilere göre fan ve kanatçıklı yüzey çiftleri için temel denklemler (3.56) ve (3.57) eşitlikleri ile daha önce verilmişti.

Peltier elemanlarla yüzeyler arasında termal kontak dirençlerin olmadığı ve ısı gücün sürekliliği kabulü altında $T_{C2} = T_{H1} = T_i$, $\dot{Q}_{H1} = \dot{Q}_{C2} = \dot{Q}_i$, $\dot{Q}_C^F = \dot{Q}_{C1}$ ve $\dot{Q}_{H2} = \dot{Q}_H^F$ denklikleri geçerlidir ve aşağıdaki (3.74), (3.75) ve (3.76) eşitlikleri yazılabilir.

$$\dot{Q}_C^F = \dot{Q}_{C1} \Leftrightarrow U_C(T_{C,\infty} - T_{C1}) = \alpha I_1 T_{C1} - K(T_i - T_{C1}) - \frac{I_1^2 R_i}{2} \quad (3.74)$$

$$\dot{Q}_{H1} = \dot{Q}_{C2} \Leftrightarrow \alpha I_2 T_{H1} - K(T_{H2} - T_i) - \frac{I_2^2 R_i}{2} = \alpha I_1 T_i - K(T_i - T_{C1}) + \frac{I_1^2 R_i}{2} \quad (3.75)$$

$$\dot{Q}_{H2} = \dot{Q}_H^F \Leftrightarrow \alpha I_1 T_{H2} - K(T_{H2} - T_i) - \frac{I_1^2 R_i}{2} = U_H(T_{H2} - T_{H,\infty}) \quad (3.76)$$

(3.74), (3.75) ve (3.76) eşitliklerinden T_{C1} , T_i ve T_{H2} sıcaklıkları, dizayn parametreleri olan I_1 ve I_2 , U_C ve U_H , $T_{C,\infty}$ ve $T_{H,\infty}$ cinsinden $T_{C1}(U_C, U_H, I_1, I_2)$, $T_i(U_C, U_H, I_1, I_2)$ ve $T_{H2}(U_C, U_H, I_1, I_2)$ fonksiyonları olarak elde edilir.

Bu sıcaklık ifadeleri, (3.64), (3.65), (3.66) ve (3.67) denklemlerinde yerine konarak, $\dot{Q}_{C1}$, $\dot{Q}_{H1} = \dot{Q}_i = \dot{Q}_{C2}$ ve $\dot{Q}_{H2}$ ısı güçleri, benzer şekilde (3.56) ve (3.57) denklemlerinde yerine konularak ta $\dot{Q}_C^F$ ve $\dot{Q}_H^F$ ısı güçleri, I_1 ve I_2 , U_C ve U_H , $T_{C,\infty}$ ve $T_{H,\infty}$ değerlerinin birer fonksiyonu olarak elde edilmiş olur.

Elde edilen gerek sıcaklık gerekse de ısı güç ifadeleri olsun, uzun ve karmaşık olduklarından dolayı burada verilmeyecek, ancak sayısal analizleri üzerinde durulacaktır.

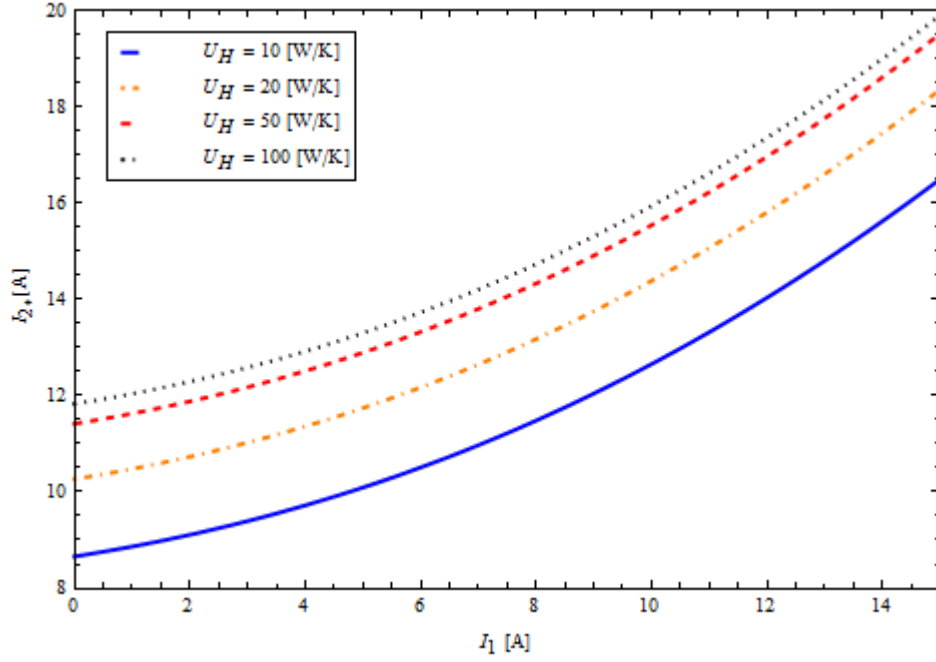
Üst katmandaki Peltier modülün soğutma yükünün türevi sifıra eşitlenerek bir önceki bölümde olduğu gibi I_{2*} optimum akımı elde edilir. I_{2*} akımının kullanıldığı durumda elde edilen büyüklükler “*opt*” alt indisi ile ifade edilecektir. Örneğin $\dot{Q}_{C1}^{opt}$, I_{2*} ve onu kompanze eden I_1 akımı kullanılırken alt Peltier yüzeyinde oluşan ısı gücü ifade ederken, COP_{opt} ise aynı akım koşullarında hesaplanan COP’yi göstermektedir.

COP ve $\dot{Q}_{C1}$ ’in akıma göre türevinin sifıra eşitlenmesi ile de maksimum performans katsayısı COP_{max} ve maksimum soğutma gücü $\dot{Q}_{C1,max}$ değerleri elde edilir.

3.4.2.1 Sayısal sonuçlar

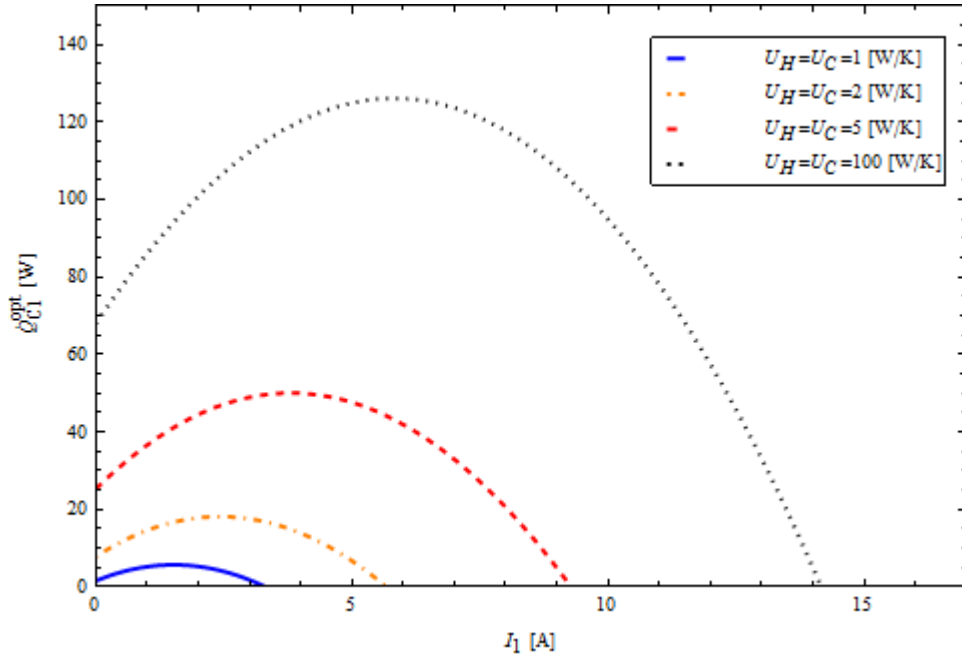
Toplam ısı geçiş katsayıları U_H ve U_C ’nin, sisteme olan etkilerini anlatabilmek için bu katsayıların değiştiği durumdaki sayısal sonuçlar verilmeye çalışılmıştır. Sıcak taraftaki ortam sıcaklığı $T_{H,\infty} = 27^\circ C$, soğutulmak istenen ortamın sıcaklığı ise bazı sayısal sonuçlarda değişken bazılarında ise $T_{C,\infty} = 17^\circ C$ olarak kabul edilmiştir. ΔT ile performans katsayısı veya soğutma yükünün akım ile değiştiği grafiklerde, $U_H = 15 \text{ W/K}$ ve $U_C = 5 \text{ W/K}$ değerleri kullanılmıştır. Bu kabul Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4’te verilen toplam ısı geçiş katsayılarının değer aralığında, makul değerler seçilerek yapılmıştır.

Şekil 3.39’da $U_C = 5 \text{ W/K}$ ve $T_{H,\infty} = 27^\circ\text{C}$ seçildiği durumda, farklı U_H değerlerinde sistemin akımlarının birbirlerine göre durumu verilmiştir. Görüldüğü gibi sistemin sıcak yüzey ısı geçiş katsayısı büyütüldüğünde, Peltier elemanlar üzerinden ısı daha iyi uzaklaştırılabilmektedir ve bir TEC üzerine düşen ΔT farkı düşürülerek Fourier ısıısının kayıpları azaltılabilmektedir.



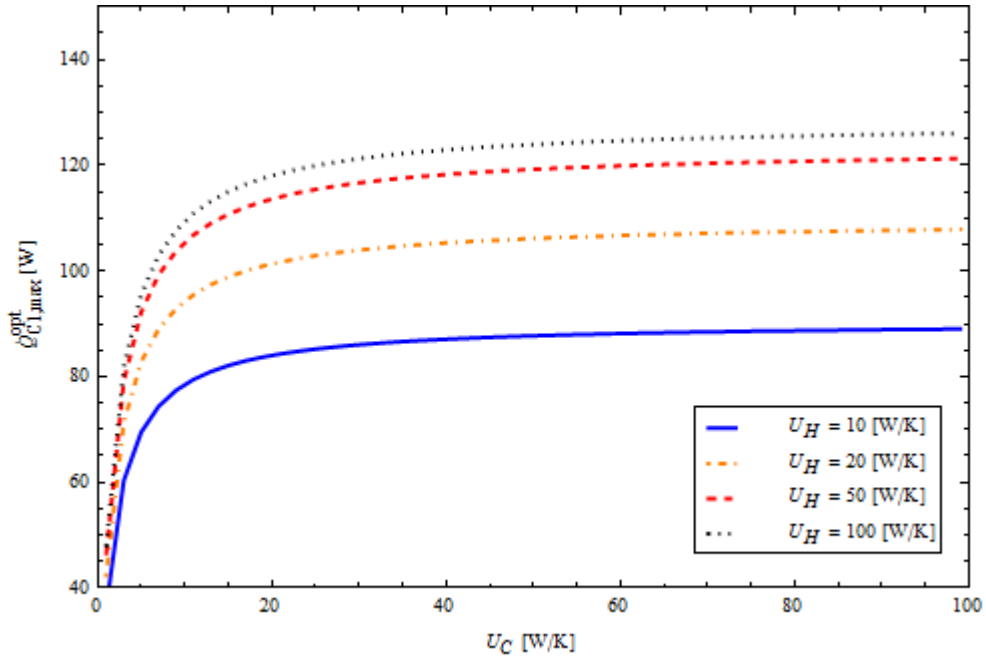
Şekil 3.39 : $T_{H,\infty} = 27^\circ\text{C}$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ\text{C}$ ’de I_1 ile I_{2*} arasındaki ilişki.

Şekil 3.40’de I_1 akımı ile bu akıma karşılık $\dot{Q}_i$ ’yi maksimum yapan akımın Peltier modülleri beslemesi ile oluşan $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ ısı geçişinin, farklı toplam ısı geçişi katsayıları ile değişim grafiği, $T_{H,\infty} = 27^\circ\text{C}$ ve $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ koşulları altında verilmektedir. Beklendiği gibi $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ maksimum değerine, $U_H = U_C = 100 \text{ W/K}$ değerleriyle ulaşmaktadır. U_H ve U_C değerleri arttıkça uygulanan akımların büyüklükleri de arttırılabilir. Diğer taraftan, $U_H = U_C = 1 \text{ W/K}$ değerinde olduğu gibi $\dot{Q}_{C1}^{opt}$, küçük akımlarda maksimumu ulaşmasına karşın, üretilebilen soğutma gücü oldukça düşüktür.



Şekil 3.40 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ C$ 'de $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ ile I_1 arasındaki ilişki.

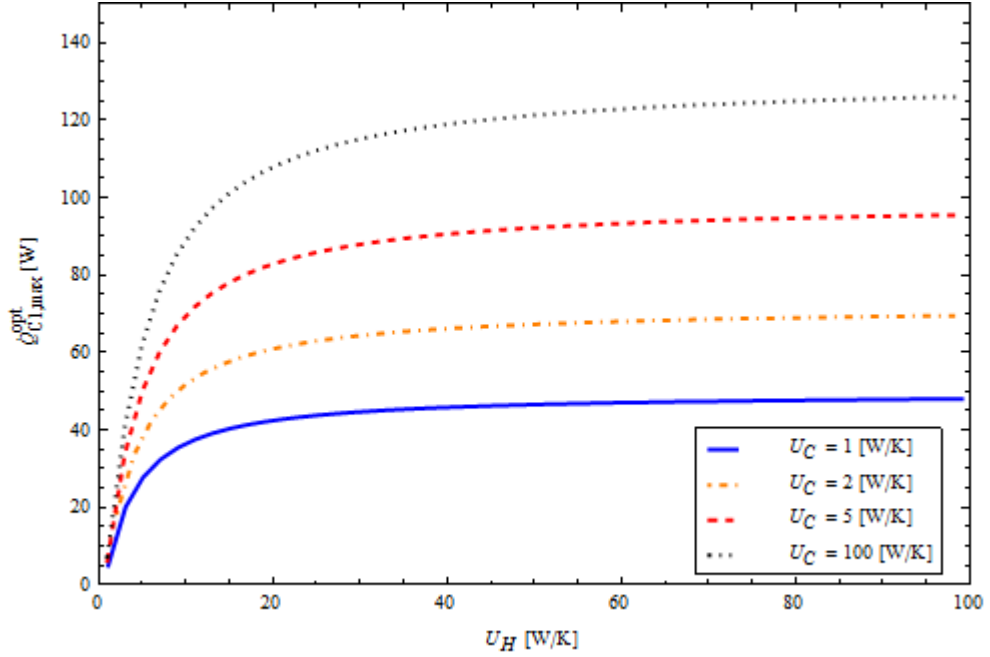
Şekil 3.41'de $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ ısı geçişinin maksimum değerinin, U_C 'ye göre grafiği verilmektedir. $U_H = 100$ W/K değeri için $\dot{Q}_{C1,max}^{opt}$ 120 Watt civarındadır.



Şekil 3.41 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ C$ 'de $\dot{Q}_{C1,max}^{opt}$ ile U_C arasındaki ilişki.

$T_{H,\infty} = 27^\circ C$ ve $\Delta T = 10^\circ C$ iken, $U_C \geq 20 \text{ W/K}$ değerinden sonra $\dot{Q}_{C1,\max}^{opt}$ fazla değişmemektedir. Maksimum güçte, bu sistem için $U_C \geq 20 \text{ W/K}$ 'lık bir ısı değiştirici seçilmesi doğru olacaktır.

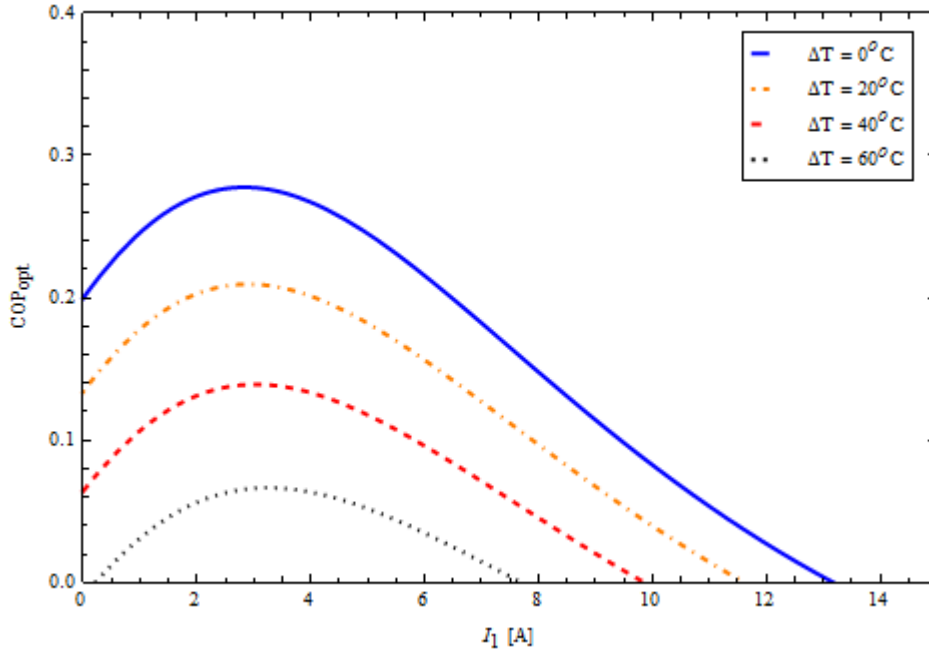
U_H 'a göre Şekil 3.42'ten U_H için çözümleme yapılabilir. $U_C \geq 20 \text{ W/K}$ olduğu durumda, yaklaşık olarak $U_H \geq 35 \text{ W/K}$ olacak şekilde tercih edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.42 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ C$ 'de $\dot{Q}_{C1,\max}^{opt}$ ile U_H arasındaki ilişki.

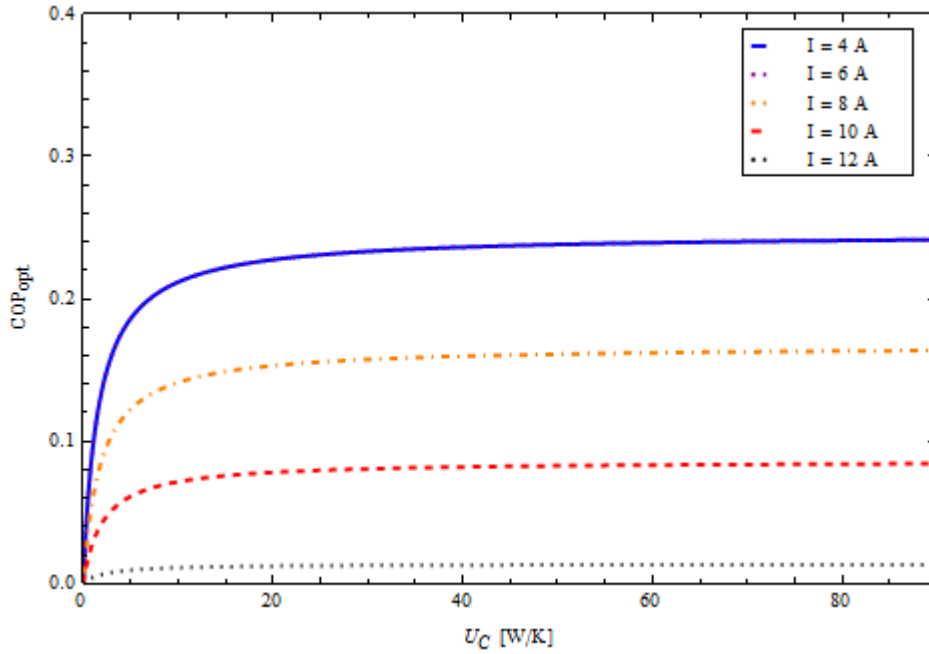
$T_{H,\infty} = 27^\circ C$ dış ortam sıcaklığında, I_{2*} akımı beslenirken COP 'nin I_1 'e göre farklı sıcaklıklardaki grafiği, Şekil 3.43 ile $U_H = 15 \text{ W/K}$ ve $U_C = 5 \text{ W/K}$ için verilmektedir. $\Delta T = 0^\circ C$ için $COP_{opt} = 0.3$, $I_1 = 2.9 \text{ A}$ ve $I_{2*} = 10.4 \text{ A}$ olarak gerçekleşmiştir. $\Delta T = 60^\circ C$ için ise $COP_{opt} = 0.06$ gibi oldukça düşük bir değerdir.

ΔT büyüdükçe COP 'nin düştüğü teyit edilmekle birlikte, aynı zamanda $\dot{Q}_i$ 'yi maksimum yapmakla da, COP 'yi azaltmaktayız.



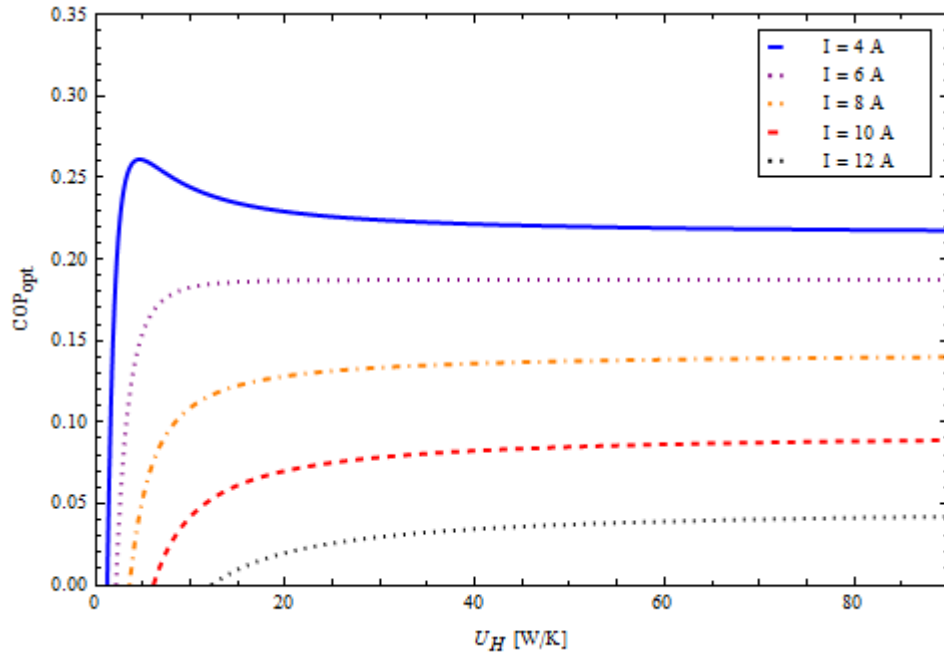
Şekil 3.43 : $T_{H,\infty} = 27^\circ\text{C}$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ\text{C}$ 'de COP_{opt} ile U_H arasındaki ilişki.

Şekil 3.44'te $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, $T_{H,\infty} = 27^\circ\text{C}$ ve $U_H = 15\text{ W/K}$ seçilmiştir. Bu koşullar altında COP_{opt} ile U_C arasındaki ilişki, farklı akımlar ile değerlendirilmektedir. U_C 'nin 20 W/K değerinden sonraki değerler sisteme katkı sağlamamaktadır.



Şekil 3.44 : $T_{H,\infty} = 27^\circ\text{C}$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ\text{C}$ 'de COP_{opt} ile U_C arasındaki ilişki.

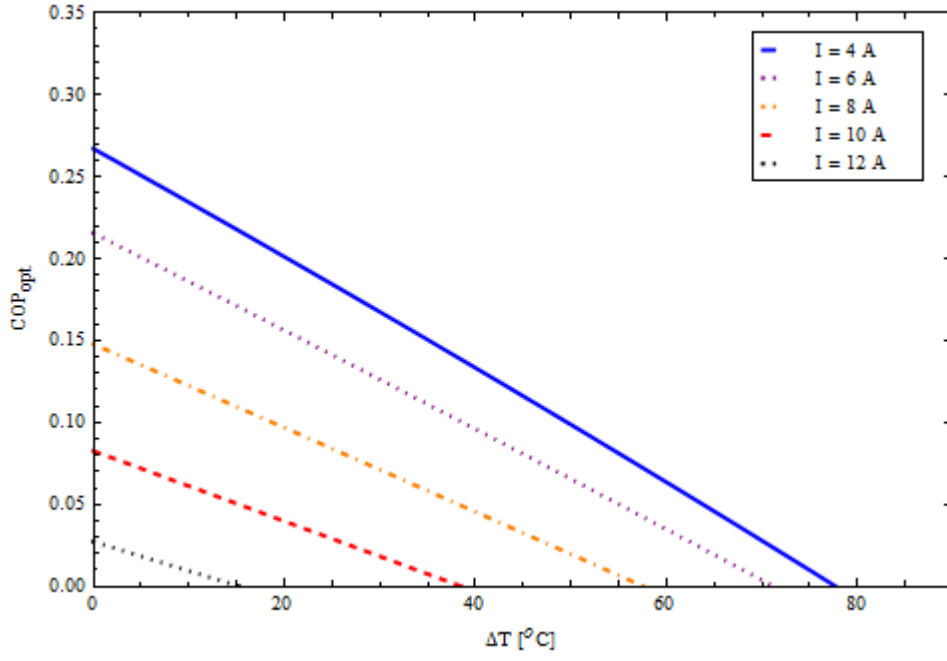
Öte yandan $U_H = 5 \text{ W/K}$ seçilirse aynı sıcaklık koşullarında, Şekil 3.45'te verilen COP_{opt} ile U_H arasındaki ilişkiden, COP_{opt} için efektif U_H değeri gözlemlenebilir.



Şekil 3.45 : $T_{H,\infty} = 27^\circ\text{C}$ ve $T_{C,\infty} = 17^\circ\text{C}$ 'de COP_{opt} ile U_H arasındaki ilişki.

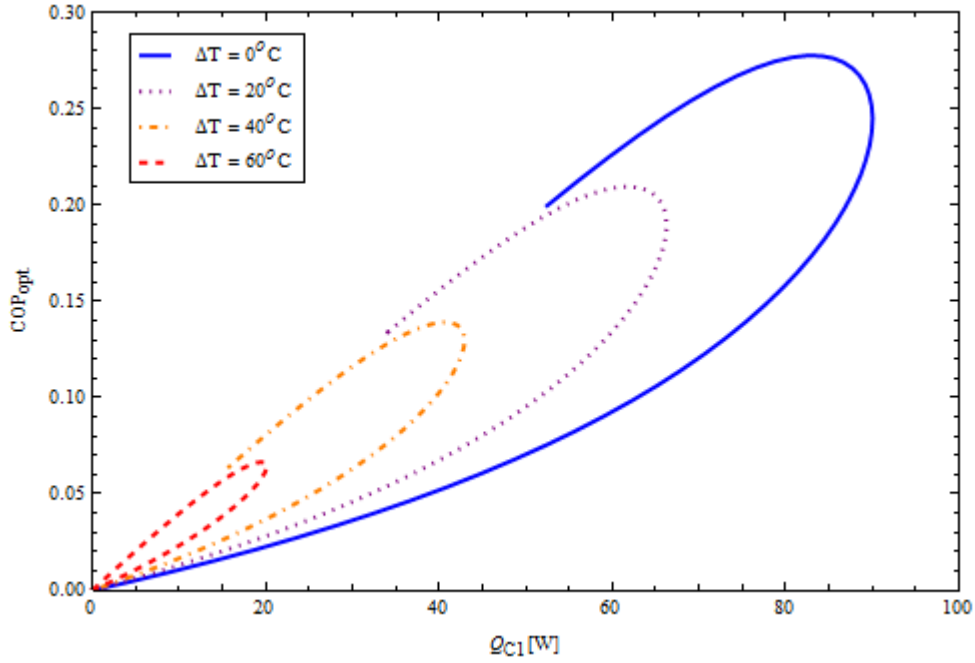
$I_1 = 4 \text{ A}$ seçilirse $COP_{opt} = 0.26$ değeri bu akımda maksimum değer olmaktadır. U_H değeri ise 5 W/K 'dir.

Şekil 3.46'dan COP_{opt} 'nin ΔT ile değişimi incelendiğinde $U_H = 15 \text{ W/K}$, $U_C = 5 \text{ W/K}$ ve $T_{H,\infty} = 27^\circ\text{C}$ iken $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ sıcaklık farkı altındaki maksimum COP_{opt} değerinin, $I_1 = 4 \text{ A}$ için ancak 0.27 kadar olduğu anlaşılmaktadır. Aynı akımdaki maksimum sıcaklık farkı ise $\Delta T = 77^\circ\text{C}$ olmaktadır.



Şekil 3.46 : $T_{H,\infty} = 27^{\circ}C$ ve $T_{C,\infty} = 17^{\circ}C$ 'de COP_{opt} ile ΔT arasındaki ilişki.

COP_{opt} ile $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ arasındaki ilişki Şekil 3.47'den takip edilebilir. Burada $U_H = 15 \text{ W/K}$ ve $U_C = 5 \text{ W/K}$ kabul edilmiştir.



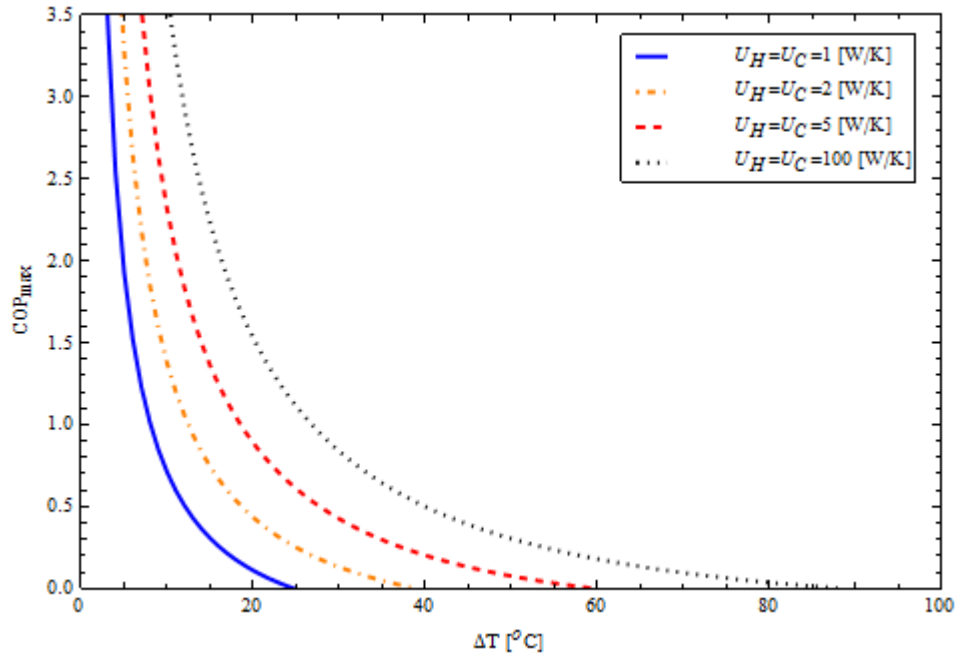
Şekil 3.47 : $T_{H,\infty} = 27^{\circ}C$ ve $T_{C,\infty} = 17^{\circ}C$ 'de COP_{opt} ile $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ arasındaki ilişki.

ΔT arttıkça hem COP_{opt} hemde $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ azalmaktadır. $\Delta T = 0^\circ C$ sıcaklık farkı altındaki maksimum COP_{opt} değeri 0.27 ve buna karşılık gelen $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ değeri 82W iken, maksimum $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ değeri 89W için COP_{opt} değeri 0.25 olmaktadır.

Grafiğin şeklinden benzer sonuçların diğer sıcaklık farkları için de örneklenebileceği anlaşılmaktadır. I_{2*} optimum akım koşullarında, COP_{opt} maksimum yapacak şekilde akımları ayarlamak yerine, $\dot{Q}_{C1}^{opt}$ ısı gücü maksimuma taşımak daha mantıklı bir seçenek olarak görünüyor.

Şekil 3.48’de maksimum performans katsayısı COP_{max} ile ΔT arasındaki ilişki seçilen U değerleri için verilmektedir. COP_{max} değeri $\dot{Q}_i$ ’yi maksimum yapan I_{2*} akım bağımlılığı olmaksızın elde edilen değerlerdir.

Burada ΔT sıfıra yaklaştıkça sistemin COP değeri sonsuza yaklaşmaktadır.



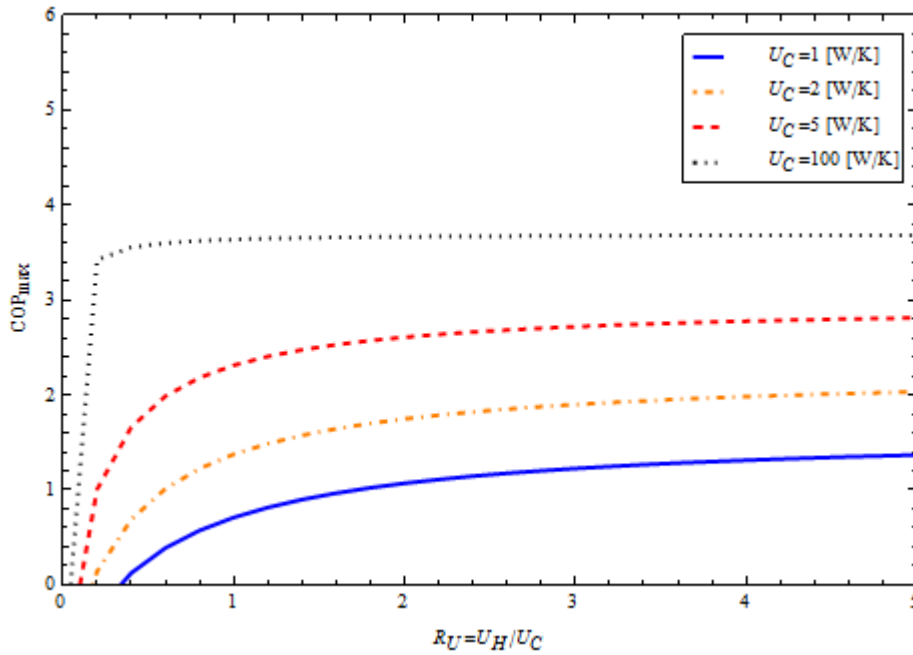
Şekil 3.48 : $T_{H,\infty} = 27^\circ C$ ’de COP_{max} ile ΔT arasındaki ilişki.

$U_H = U_C = 100 \text{ W/K}$ ve $\Delta T = 20^\circ C$ için $COP_{max} \cong 1.5$ değeri elde edilebilmektedir.

$\Delta T = 10^\circ C$ için ise daha büyük olan $COP_{max} \cong 3.6$ değeri elde edilebilir.

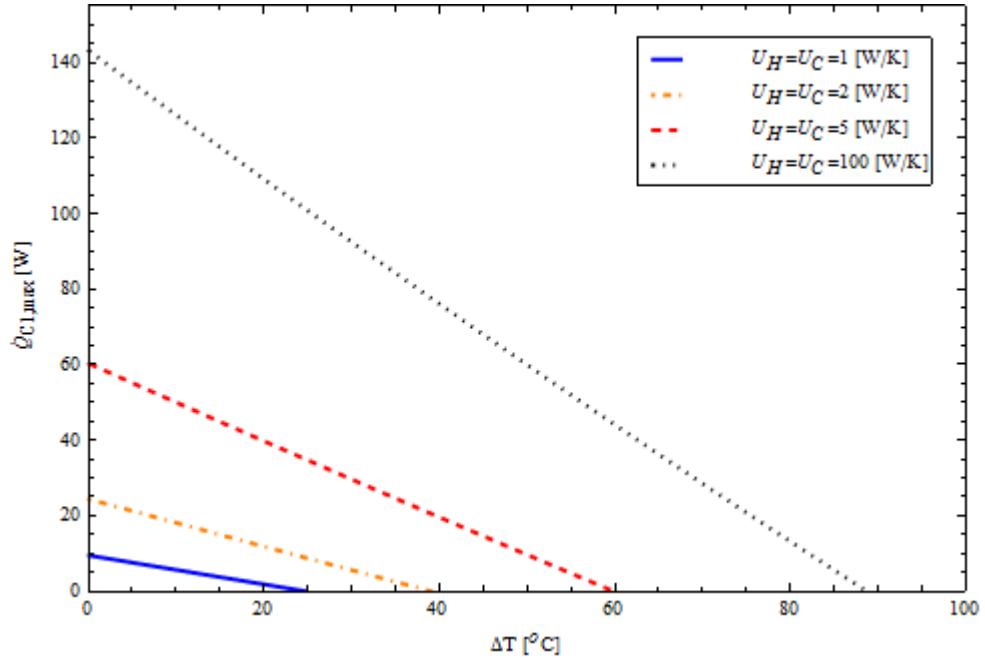
Eğer $U_H = U_C = 100 \text{ W/K}$ 'lık ısı iletim katsayısı elde edilebilirse, A sınıfı bir klimanın COP değerlerine yakın teorik COP değeri elde edilebilir fakat 100 W/K 'lık toplam ısı geçiş katsayısı değeri ancak sıvı soğutmalı sistemler ile elde edilebilir. $U_H = U_C = 5 \text{ W/K}$ makul bir değer olup $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ için ancak $COP_{\max} \cong 0.9$ değerine ulaşılabilir.

Şekil 3.49'da $T_{H,\infty} = 27^\circ\text{C}$ ve $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ iken $COP_{\max}$ ile ısı iletim katsayısı oranı R_U arasındaki ilişki, farklı U_C değerleri için verilmektedir. Artan U_C değerleri $COP_{\max}$ 'ı arttırır. $U_C = 100 \text{ W/K}$ için $COP_{\max} \cong 3.7$ olduğu görülmektedir. Bu durumda $U_H \cong 100 \text{ W/K}$ olarak hesaplanmaktadır. $U_C = 5 \text{ W/K}$ için ise maksimum performans katsayısı değeri $R_U \cong 2$ civarında elde edilir ve $COP_{\max}$ 'ın değişimi bu noktadan sonra oldukça azalır. Bu durumda ise $U_H = 10 \text{ W/K}$ ve $COP_{\max} \cong 2.6$ olmaktadır.



Şekil 3.49 : $T_{H,\infty} = 27^\circ\text{C}$ 'de $COP_{\max}$ ile R_U arasındaki ilişki.

$T_{H,\infty} = 27^\circ\text{C}$ sabit tutulurken $T_{C,\infty}$ değiştirilerek yaratılan ΔT sıcaklık farkına karşılık $\dot{Q}_{C1,\max}$ 'ın grafiği Şekil 3.50 ile verilmektedir.

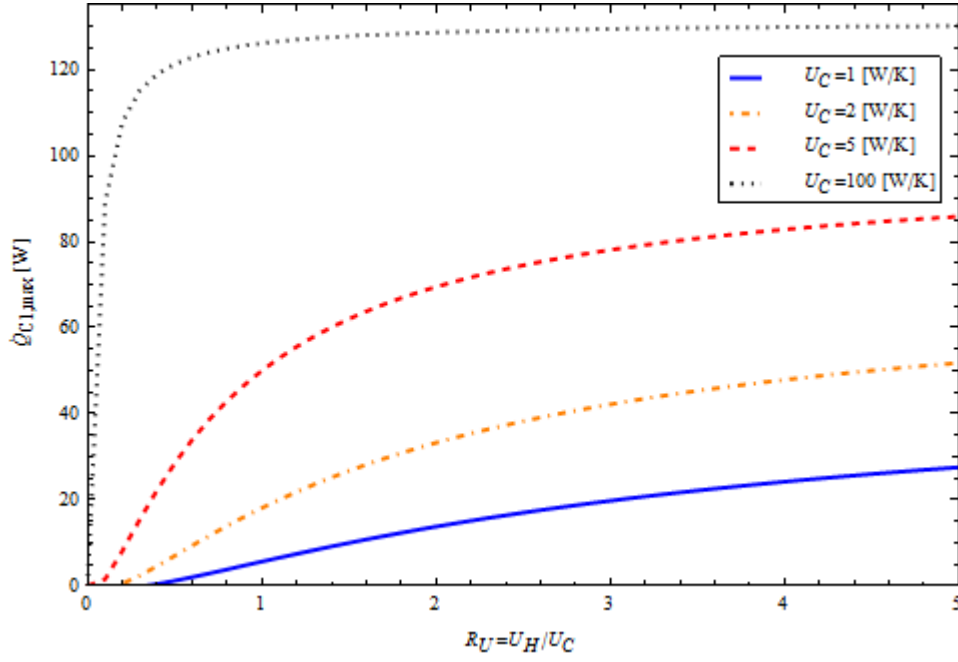


Şekil 3.50 : $T_{H,\infty} = 27^\circ\text{C}$ 'de $\dot{Q}_{C1,\max}$ ile ΔT arasındaki ilişki.

$\dot{Q}_{C1,\max}$ 'da akımların serbest değişken olduğu durumda, 1.Peltier elemanının soğuk yüzeyinden emilen ısı miktarının maksimize edilmesi ile elde edilir. $U_H = U_C = 100 \text{ W/K}$ için $\dot{Q}_{C1,\max} \cong 141 \text{ W}$ maksimum soğutma gücüne ulaşılabilir. $U_H = U_C = 5 \text{ W/K}$ için ise elde edilebilen güç ancak $\dot{Q}_{C1,\max} \cong 60 \text{ W}$ kadardır. Maksimum ΔT değeri, U_C ve U_H 'ın değerleri büyüdükçe yükselmektedir ve $U_H = U_C = 100 \text{ W/K}$ için bu değer $\Delta T \cong 88^\circ\text{C}$ 'dir.

Sayısal analiz sonuçlarının sonuncusu Şekil 3.51 ile sunulmaktadır. $T_{H,\infty} = 27^\circ\text{C}$ ve $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ sıcaklık farkı altında, $\dot{Q}_{C1,\max}$ 'ın ısı iletim katsayı oranı R_U ile değişimi verilmektedir. Bu grafikten faydalananarak, üretilmek istenen soğutma gücüne göre ısı değiştirici seçimi yapılabilir.

Kabul edilen bu sistem için maksimum soğutma gücü değeri $U_C = 100 \text{ W/K}$ ve $R_U > 1$ için $\dot{Q}_{C1,\max} \cong 126 \text{ W}$ olmaktadır. Düşük U_C ve U_H değerlerinde R_U değişkenine olan hassasiyet artar. Büyük değerlerinde ise $\dot{Q}_{C1,\max}$ 'taki değişim oldukça azalır. Bunun sebebi, büyük U değerlerinde sistem kolaylıkla ısı pompalayabilmektedir ve uygulanan akımın ürettiği ısıyı uzaklaştırmak için fazladan ısı iletim katsayısına ihtiyacı yoktur.



Şekil 3.51 : $T_{H,\infty} = 27^\circ\text{C}$ 'de $\dot{Q}_{C1,\max}$ ile R_U arasındaki ilişki.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Termoelektrik modüller kaskad ve tek katmanlı olmak üzere, sıcak ve soğuk yüzeyde ısı değiştiricileri dahil edilmeden ve dahil edilerek modellenmiştir.

4.1 Tek Katmanlı Model

Bu modellemede ısı değiştiricileri kullanılmamıştır. Termoelektrik modül, sıcak ve soğuk yüzeyinden ısı rezervuarına sonsuz iletim katsayısı ile ısı alıp verebilmektedir. Bu kapsamda modelleme Peltier modülün doğasını anlamak ve iki veya daha fazla modülün optimum koşullardaki performanslarını kıyaslamak için kullanılabilir.

Elde edilen sonuçlar, üreticinin Peltier modül için verdiği sonuçlar ile uyumludur ve Çizelge 4.1’de elde edilen örnek veriler özet olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1 : $T_H = 27^\circ C$ ’de tek katmanlı model sonuçları.

ΔT	$\dot{Q}_{C,\max}$	$COP^{Q_{C,\max}}$	$COP_{\max}$	$\dot{Q}_C^{COP_{\max}}$	$I^{Q_{C,\max}}$	$I^{COP_{\max}}$
0	227	0.50	∞	0	14.31	0
10	196	0.44	3.73	22.63	14.80	1.47

Üretici malzeme dayanıklılığını hesaba katarak uygulanacak maksimum akım değerini 12A vermesine karşın, model bize asıl maksimum değrinin akımın 14.8A olduğu durumda gerçekleşeceğini söylemektedir. Maksimum sıcaklık farkı $\Delta T_{\max} \cong 70^\circ C$ ’de üreticinin verdiği değerlerde gerçekleşmektedir.

4.2 Tek Katmanlı ve Isı Değiştiricili Model

Modellemede sıcak ve soğuk yüzeyde ısı değiştiricileri olduğu kabul edilmiştir. Termoelektrik modül, sıcak ve soğuk yüzeyinden ısı rezervuarına sınırlı ısı iletim katsayıları ile ısı alıp verebilmektedir. Bu durumda optimum koşulların belirlenmesi icap eder.

Model, ısı iletim katsayıları ile iç ve dış ortam sıcaklıkları bilindiği zaman, maksimum soğutma gücü ve performans katsayılarını ve dolayısı ile bunlara ait optimum akım değerlerini hesap edebilir. Çizelge 4.2’de hesaplanan bu değerler farklı U değerleri için verilmiştir.

Çizelge 4.2 : $T_H = 27^\circ C$ ’de tek katmanlı ve ısı değiştiricili model sonuçları.

U_C	U_H	ΔT	$\dot{Q}_{C,\max}$	$COP^{Q_{C,\max}}$	$COP_{\max}$	$\dot{Q}_C^{COP_{\max}}$	$I^{Q_{C,\max}}$	$I^{COP_{\max}}$
5	10	0	87	0.37	∞	0	9.40	0
100	500	0	219	0.49	∞	0	14.58	0
5	10	10	70	0.31	1.96	11.77	9.15	1.38
100	500	10	186	0.42	3.61	21.96	14,11	1.47

U_C ve U_H ısı iletim katsayılarının sırasıyla 5W/K ve 10W/K değerleri için hesaplanan maksimum sıcaklık farkı $\Delta T_{\max} \cong 52^\circ C$ ’olarak hesaplanmaktadır. Isı iletim katsayıları sonsuza götürülür ise ısı değiştiricileri olmadan yapılan tek katmanlı model ile aynı sonuçlar elde edilebilir.

Bir önceki modelde ısı değiştirici yüzeyler olmadığı için maksimum sıcaklık farkı daha büyük çıkmıştır. Halbuki bir soğutucu modül tasarımı ısı değiştirici yüzeyler barındırmak zorundadır. Bu sebeple istenen sıcaklık farkı, elde edilebilen maksimum sıcaklık farkı sınırları içerisinde olmak durumdadır. Bunun için mümkün olabilen en büyük ısı geçiş katsayısına sahip ısı değiştiriciler tercih edilmelidir.

80W’lık soğutma yükü için maksimum soğutma gücünde 1 tane Peltier elemanı yeterli olacaktır. Öte yandan COP ’yi maksimum yapan akım değerlerinde hesaplanan soğutma yükü düşünülür ise örneklenen U değerleri için en az 4 en fazla 7 tane Peltier modülü gerekmektedir.

4.3 İki Katmanlı Kaskad Model

Isı değıştircileri bulunmayan bu model için sayısal analiz sonuçlarının özeti Çizelge 4.3 ile verilmiştir.

Çizelge 4.3 : $T_H = 27^\circ C$ 'de iki katmanlı model sonuçları.

ΔT	$\dot{Q}_{C,\max}$	$COP^{Q_{C,\max}}$	$COP_{\max}$	$\dot{Q}_C^{COP_{\max}}$	$I_1^{Q_{C,\max}}$	$I_2^{Q_{C,\max}}$	$I_1^{COP_{\max}}$	$I_2^{COP_{\max}}$
0	151.18	0.28	∞	0	5.71	14.21	0	0
10	133.39	0.25	3.74	11.43	5.97	14.53	0.70	0.77
20	115.89	0.22	1.58	19.99	6.24	14.85	1.34	1.65

$\Delta T = 10^\circ C$ sıcaklık farkı altında maksimum COP değeri tek katmanlı ve ısı değıştircili olmayan ilk model ile aynı değeri yakalamıştır. Aynı COP değerine karşılık, bu model ile COP 'yi maksimum yapan akımlar düştüğü için daha az soğutma gücü elde edilebilmektedir. Ancak bu tip kaskad modellerin avantajı sıcaklık farkının daha da arttırılabilmesidir. Elde edilebilen maksimum sıcaklık farkı $\Delta T_{\max} \cong 92^\circ C$ olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuç ilk modele göre $24^\circ C$ daha fazladır. Diğer bir deyişle, bu model $68 \leq \Delta T_{\max} \leq 92$ sıcaklık farkı koşulunda, hala soğutma yapabilmektedir.

4.4 İki Katmanlı ve Isı Değıştircili Kaskad Model

Isı değıştircili bu modelin sayısal analiz sonuçlarının özeti Çizelge 4.4 ile verilmiştir.

Çizelge 4.4 : $T_H = 27^\circ C$ 'de iki katmanlı ve ısı değitircili model sonuçları.

U_C	U_H	ΔT	$\dot{Q}_{C,\max}$	$COP^{Q_{C,\max}}$	$COP_{\max}$	$\dot{Q}_C^{COP_{\max}}$	$I_1^{Q_{C,\max}}$	$I_2^{Q_{C,\max}}$	$I_1^{COP_{\max}}$	$I_2^{COP_{\max}}$
5	10	0	81.0	0.26	∞	0	4.72	10.1	0	0
5	10	10	69.5	0.23	2.61	07.06	4.54	09.9	0.66	0.74
5	10	20	58.0	0.20	1.05	10.17	4.37	09.7	1.28	1.59
100	500	0	147.6	0.27	∞	0	6.17	14.7	0	0
100	500	10	130.1	0.25	3.68	10.18	5.92	14.4	0.70	0.77
100	500	20	112.9	0.20	1.55	15.58	5.66	14.1	1.34	1.65

Maksimum soğutma gücü ve bu güçteki COP değeri, diğer modellere göre düşerken, bu gücü oluşturan akım değeri ise büyümüştür.

U değerleri ısı geçişini baskıladığı için maksimum soğutma gücü ancak yüksek akımlarda elde edilebilmiştir. Akım miktarını Peltier'in bileşenleri dışında, ortam sıcaklığı ve U değerleri belirlemektedir. Çizelgede rneklenen U değerleri ile elde edilen maksimum sıcaklık farkı $\Delta T = 88^{\circ}C$ olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık farkı bir önceki modele göre düşmesine karşın, ilk modele göre $20^{\circ}C$ daha fazladır ve $\Delta T = 88^{\circ}C$ sıcaklık farkına kadar soğutma yapabilecektir.

Çizelgede rneklenen U değerleri için, 80W'lık soğutma yükü, maksimum soğutma gücünde en az 1 en fazla 2 tane Peltier kaskad modül ile sağlanır. COP 'yi maksimum yapan akım değerlerinde ise en az 6 en fazla 12 tane Peltier kaskad modül gerekecektir. Soğutucunun büyük sıcaklık farkları altında çalışması gerekmiyorsa, tek katmanlı Peltier modül tercih edilmelidir.

4.5 neriler

Modellemelerde kullanılan U değerlerinin elde edilen soğutma gücüne ve performansa olan etkisi dominant etkidir. Toplam ısı geçiş katsayısı değerlerini arttırabilmek için Peltier modüllerin ısı atan yüzü, ısı eşanjörlü ve radyatörlü soğutma sistemleri ile desteklenerek U_H değerinin büyütülmesi sağlanmalıdır. Öte yandan soğuk taraftaki U_C ısı iletim katsayısının da büyütülmesi gerekir. Bunun için pin-fin olarak tabir edilen kanatçıklı yüzeyler yüksek fan hızları ile desteklenerek, bu yüzeyde kullanılabilir.

Yapılacak modülde Peltier adedi maksimum soğutma gücüne göre değil maksimum performansa göre tercih edilmelidir. Gerek tek katmanlı gerekse de iki katmanlı kaskad model olsun, 10 derecelik sıcaklık farkı altında COP değerleri 2'nin üzerindedir. Bu durumda maksimum performansa göre Peltier modül tercih edilerek hem hızlı soğutma şansı hemde verimli soğutma yapmak mümkün hale gelebilir.

KAYNAKLAR

- Clifton, W.E.** 1992. *Thermoelectric cooler design*. Master thesis, University of California.
- Du, C.Y., Wen, C.D..** 2011. Experimental investigation and numerical analysis for one-stage thermoelectric cooler considering Thomson effect, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 54, Issues 23–24, November 2011, Pages 4875-4884, ISSN 0017-9310, 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.06.043.
- Gezici, S.** 1992. *Katıhal Fiziği*. Istanbul: İTÜ Rektörlüğü.
- Huang, B.J., Duang, C.L.** 2000. System dynamic model and temperature control of a thermoelectric cooler. *International Journal of Refrigeration*, **23** (2000) 197-207
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Derbentli, T.** 2004. *Isı ve kütle geçişinin temelleri*. Istanbul: Literatür yayınları.
- Karimi G., Culham J.R., Kazerouni V.** 2011. Performance analysis of multi-stage thermoelectric coolers, *International Journal of Refrigeration*, **34** (2011) 2129-2135
- Liu, J.Y., Wen, C.D.** 2011. Examination of the Cooling Performance of a Two-Stage Thermoelectric Cooler Considering the Thomson Effect, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*,
- Muto, A.** 2008. *Device testing and characterization of thermoelectric nano composites*. Master thesis, Massachusetts Institute of Technology, Retrieved from <http://hdl.handle.net/1721.1/44915>
- Metzger, T. and Huebener, R.P.** 1999. *Modelling and cooling behavior of Peltier cascades*. *Cryogenics*, **39**, 235-239
- Onaran, K.** 1993. *Malzeme Bilimi*. Istanbul: Bilim Teknik Yayın Evi.
- Pérez-Aparicio, J.L., Taylor, R.L., Gavela, D.** 2007. Finite element analysis of nonlinear fully coupled thermoelectric materials, *Computational Mechanics*, (2007) 40: 35–45 doi 10.1007/s00466-006-0080-7
- Pişkin, M.B.** 2006. *Yarıiletken alaşımlarının elektrik, termoelektrik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi*. Doctoral Thesis, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Ravich, Yu., Gordienko, A.** 2007. A method for calculating the transient time of a multi-stage thermoelectric cooler, *Semiconductors*, Vol. 41, No. 1, pp. 110–114. MAIK Nauka/Interperiodica distributed exclusively by Springer Science+Business Media LLC.
- Rowe, D.M.** ed. 2006. *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. New York: CRC/Taylor & Francis.

- Simons R.E., Chu R.C.** 2000. Application of thermoelectric cooling to electronic equipment: a review and analysis, Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2000. Sixteenth Annual IEEE , vol., no., pp.1-9, 2000 doi: 10.1109/STHERM.2000.837055
- Yang,Y., Xie,S.H., Ma,F.Y., Li,J.Y.** 2012. On the effective thermoelectric properties of layered heterogeneous medium, *Journal of Applied Physics*, **111**, 013510 (2012); doi: 10.1063/1.3674279
- Url-1** <commons.wikimedia.org/wiki/File:Seebeck_effect_circuit.svg>, alındığı tarih: 06.11.2011.
- Url-2** <www.electronics-cooling.com/2006/11/the-seebeck-coefficient/>, alındığı tarih: 06.11.2011.
- Url-3** <www.process-cooling.com/PCE/2004/09/Files/Images/112727.jpg>, alındığı tarih: 06.11.2011.
- Url-4** <www.nature.com/nature/journal/v413/n6856/images/413577aa.2.jpg>, alındığı tarih: 06.11.2011.
- Url-5** <www.tellurex.com/technology/peltier-faq.php>,alındığı tarih: 19.10.2011.
- Url-6** < www.coolinnovations.com/products/>,alındığı tarih: 23.04.2012.
- Url-7** <www.wakefield.com>,alındığı tarih: 23.04.2012.
- Url-8** <www.tellurex.com/pdf/C2-55-2812-Specifications.pdf>, alındığı tarih: 23.04.2012.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Türker ŞAHİN
Doğum Yeri ve Tarihi: İzmir 19/05/1975
E-Posta: turker.sahin@itu.edu.tr
Lisans: Fizik Mühendisliği

Yayın ve Patent Listesi:

Karabetoğlu, S., Şişman, A., Öztürk, F., Şahin, T. *Characterization of a thermoelectric generator at low temperatures*, Energy Conversion and Management, Volume 62, October 2012, Pages 47-50, ISSN 0196-8904, 10.1016/j.enconman.2012.04.005.

Karabetoğlu, S., Şişman, A., Öztürk, F., Şahin, T. *Characterization of a thermoelectric generator at low temperatures*, ECOS2011 Conference, Novisad, Serbia, 2011.

Karabetoğlu, S., Şahin, T., Şişman, A., Öztürk, F. *Modelling, design and experimental characterization of a thermoelectric cooler*, ECOS2011 Conference, Novisad, Serbia, 2011.