

**TERMOELEKTRİK SOĞUTMA
HÜCRELERİNDE GEOMETRİK
YAPISAL ETKİLERİN İNCELENMESİ**

NAİM DEREBAŞI



T.C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TERMOELEKTRİK SOĞUTMA HÜCRELERİNDE GEOMETRİK
YAPISAL ETKİLERİN İNCELENMESİ**

Naim DEREBAŞI

Prof. Dr. Emin N ÖZMUTLU
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA 2015

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Naim DEREBAŞI tarafından hazırlanan “**Termoelektrik Soğutma Hücrelerinde Geometrik Yapısal Etkilerin İncelenmesi**” adlı çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliğı/oy çokluğı ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü FİZİK Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Emin N ÖZMUTLU

Başkan: Prof. Dr. Emin N ÖZMUTLU
Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. İlhan TAPAN
Uludağ Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Güneş YILMAZ
Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,
Elektrik Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Yüksel ERGÜN
Anadolu Üniversitesi, Fen Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç. Dr. Faruk DEMİR
Bursa Teknik Üniversitesi,
Doğa Bilimleri, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi,
Metalürji ve Malzeme Mühendisliğı Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali Osman DEMİR
Enstitü Müdürü
.../03/2015

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

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

beyan ederim.

../03/2015

İmza

Naim DEREBAŞI

ÖZET

Doktora Tezi

TERMOELEKTRİK SOĞUTMA HÜCRELERİNDE GEOMETRİK YAPISAL ETKİLERİN İNCELENMESİ

Naim DEREBAŞI

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof Dr Emin N ÖZMUTLU

Termoelektrik bir modülün en uygun termoelektrik özellikleri için bir geometrik şekil katsayısı incelenmiştir. Soğutma gücü, elektrik enerjisi tüketimi ve performans katsayısı termoelektrik elemanlardan geçen farklı akımlara göre modülün her iki tarafındaki sıcaklık farkı için benzeşim yapılarak incelenmiştir. Soğutma gücünde, termoelektrik ayakların uzunluğu ile ters orantılı olduğundan, ciddi bir artış elde edilmiştir. Her termoelektrik özellik için bir yapay sinir ağı giriş-çıkış ilişkisi kullanılarak geliştirilmiştir. Ayrıca, benzeşim ve tahmin sonuçlarına göre bir analitik denklem belirlenmiştir. Şekil katsayısını içeren modellerden iyi bir tahmin etme özelliği sağlanmış ve benzeşim sonuçları ile uyum göstermiştir. Modellerin doğruluğu %99 olarak ve tüm tahmin etme ve hesaplama hatası kabul edilebilir 0.299 ile 0.015 aralığı içinde elde edilmiştir. Sayısal yöntemlerden elde edilen modellerden yararlanılarak prototip modül yapılmıştır. Prototipten alınan ölçüler modellerden elde edilen verilerle uyum içindedir. Sayısal yöntemler tasarımcılar için zaman ve madde kazanımı sağlayan önemli bir araçtır.

Anahtar kelimeler: termoelektrik soğutma, performans katsayısı, yapay sinir ağları.

2015, xv+106 sayfa.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF GEOMETRICAL STRUCTURAL EFFECTS IN THERMOELECTRIC COOLING CELLS

Naim DEREBAŞI

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

Supervisor: Prof Dr Emin N ÖZMUTLU

A geometrical shape factor was investigated for optimum thermoelectric properties of a thermoelectric module. The cooling power, electrical energy consumption and coefficient of performance were analysed using simulation with different current values passing through thermoelectric elements for varying temperature difference between both sides of the module. The dramatic increase in the cooling power density was obtained since it is inversely proportional to the length of thermoelectric legs. An artificial neural network model for each thermoelectric property was also developed using input-output relations. Furthermore, an analytical equation as depending on simulation and prediction results has been determined. The models including the shape factor have a good prediction capability and agreement with simulation results. The correlation of the models was found to be 99% and overall prediction and calculation error was in the range of 0.299 and 0.015 which is within acceptable limits. A module prototype has been performed by the data using models obtained from the numerical methods. The test measurements from the prototype are corresponding with the data obtained from the models. This indicates that numerical methods are useful tool for designers to save time and material.

Key words: thermoelectric cooling, cooling performance, artificial neural network

2015, xv+109 pages.

TEŐEKKÖR

Yapmış olduğum doktora tez alıőmalarımı ve tezimi, kıt imkanlar olmasına rağmen tđm fedakarlıklara katlanarak çocuklarının iyi bir eğitim alması, dđrđst, ahlaklı, kendine, ailesine ve vatana faydalı yetiőmesi için her őeyin en iyisini yapmaya çalışan, onların baőarılarından çok mutlu olarak gđzleri dolan, sonunda dileklerini gerçekleőtirmeyi baőaran, 8 őubat 2012 gđnđ kaybettiğim babama atfediyorum, ruhu őad olsun.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER	8
2.1. Yarıiletkenler	8
2.1.1. <i>n</i> -tipi yarıiletkenler	8
2.1.2. <i>p</i> -tipi yarıiletkenler	9
2.1.3. Termoelektrik yarıiletkenlerin özellikleri	10
2.2. Termoelektrik ilkeler	13
2.2.1. Termoelektrik etkiler	13
2.2.2. Termoelektrik elemanlar	15
2.2.3. Termoelektrik elemanların modül oluşturması	19
2.3. Termoelektrik soğutma kuramı	20
2.3.1. İdeal model	21
2.3.2. Soğutma gücü	23
2.3.3. Materyal katsayısı (figure of merit = Z)	25
2.3.4. Başarım katsayısı	27
2.3.5. Çok katlı soğutucular (Kaskat sistem)	28
2.3.6. Termoelektrik soğutucuların üstünlükleri ve olumsuz yönleri	29
2.3.7. Termoelektrik soğutucuların kullanım alanları	30
2.4. Yapay sinir ağları	32
2.4.1. Sinir hücresinin yapısı	32
2.4.2. Nöronun matematik modeli	33
2.4.3. Yapay sinir ağları ve özellikleri	34

2.4.4. Sinir ağlarının oluşturulması	36
2.4.5. Yapay sinir ağlarının öğrenme yöntemleri	38
2.4.5.1. Öğreticili öğrenme yöntemi	40
2.4.5.2. Öğreticisiz öğrenme yöntemi	41
3. MATERYAL ve YÖNTEM	44
3.1. Sonlu elemanlar yöntemi ile benzeşim	44
3.2. Yapay sinir ağları ile tahmin	50
3.2.1. Soğutma gücü tahminleri	51
3.2.2. Güç tüketimi tahminleri	61
3.2.3. Başarım katsayısı tahmini	71
3.3. MATLAB® ile hesaplama	82
3.4. Deneysel çalışmalar	85
4. TARTIŞMA ve SONUÇ	88
4.1. TEC modelleri için yapay sinir ağları ile elde edilen tahmin sonuçlarının tartışılması	89
4.2. MATLAB® ile yapılan hesaplamaların tartışılması	92
4.3. Deneysel çalışmaların tartışılması	93
4.4. Sonuçlar	94
KAYNAKLAR	95
EKLER	100
ÖZGEÇMİŞ	106
TEZ ÇALIŞMALARINDAN YAPILAN YAYINLAR.....	108
TEZ ÇOĞALTMA VE ELEKTRONİK YAYIMLAMA İZİN FORMU	109

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
α	Seeback katsayısı
T_c	soğuk yüzey sıcaklığı
T_h	sıcak yüzey sıcaklığı
Q_h	yüksek sıcaklıktaki ısı miktarı
Q_L	düşük sıcaklıktaki ısı miktarı
W_e	yapılan net iş
dT/dx	sıcaklık değişimi
I	akım
λ	ısı iletkenliği
Z	materyal katsayısı (figure of merit)
ZT	birimsiz materyal katsayısı
σ	elektriksel iletkenlik
Q_C	termoelektrik soğutma gücü
Q_P	elektrik enerjisi tüketimi
eV	elektron volt
V	potansiyel fark
T	sıcaklık
ΔT	sıcaklık farkı
π	Peltier sabiti
Q	birim zamanda aktarılan ısı miktarı
Q_T	Thomson ısısı
t	Thomson katsayısı
L_p	p -tipi termoelektrik elemanın ayak uzunluğu
L_n	n -tipi termoelektrik elemanın ayak uzunluğu
A_p	p -tipi termoelektrik elemanın yüzey alanı
A_n	n -tipi termoelektrik elemanın yüzey alanı
α_p	termoelektrik p -tipi yarıiletkenin Seeback katsayısı
α_n	termoelektrik n -tipi yarıiletkenin Seeback katsayısı

Q_I	Joule yasasına göre ısı enerjisi
R_p	termoelektrik p -tipi yarıiletken maddenin elektriksel direnci
R_n	termoelektrik n -tipi yarıiletken maddenin elektriksel direnci
ρ_p	termoelektrik p -tipi yarıiletken maddenin öz direnci
ρ_n	termoelektrik n -tipi yarıiletken maddenin öz direnci
G	termoelektrik maddenin geometrik şekil katsayısı
G_p	termoelektrik p -tipi yarıiletken maddenin geometrik şekil katsayısı
G_n	termoelektrik n -tipi yarıiletken maddenin geometrik şekil katsayısı
Q_{hc}	ısı enerjisi taşıma oranı
k_p	termoelektrik p -tipi yarıiletken maddenin ısı iletkenliği
k_n	termoelektrik n -tipi yarıiletken maddenin ısı iletkenliği
λ	termoelektrik maddenin ısı öz iletkenliği
λ_p	termoelektrik p -tipi yarıiletken maddenin ısı öz iletkenliği
λ_n	termoelektrik n -tipi yarıiletken maddenin ısı öz iletkenliği
R	elektriksel direnç
I_q	soğutma gücünün en büyük değerinde devreden geçen akım
$(Q_C)_{max}$	en büyük soğutma gücü
$(\Delta T)_{max}$	sıcaklık farkının en büyük değeri
$(Q_p)_p$	termoelektrik p -tipi yarıiletken maddenin elektrik enerjisi tüketimi
$(Q_p)_n$	termoelektrik n -tipi yarıiletken maddenin elektrik enerjisi tüketimi
$d(COP)/dI$	en küçük başarımlık katsayısı
I_{min}	en küçük akım
T_m	ortalama sıcaklık
$(COP)_{max}$	en büyük başarımlık katsayısı
N	çok katlı soğutucularda kat sayısı
L	termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin ayak uzunluğu
w	termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin genişliği
A	termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin yüzey alanı
S	TEC modülünün yüzey alanı
X	nöron giriş verisi (vektörü)
W	giriş verilerinin ağırlığı
E	nörondaki toplam enerji

F	aktarım fonksiyonu
Y	nöron çıkışı
M	nöron sayısı
$\Delta\omega$	herhangi bir j nöronu için hata
a	ANN ağının öğrenme oranı
δ_j	ANN ağında gizli seviyede j'inci nöronun hatası
b_j	ANN ağında j'inci nöronun ağırlığı
x_{ji}^l	ANN ağında j'inci giriş verisi
u_j^l	ANN ağında j'inci nöronun hedef değeri
y_j^l	ANN ağında j'inci nöronun çıkış değeri
x_{ji}^l	ANN ağında j'inci giriş verisi
E_h	ANN ağında öğrenme hızı
°	derece

Kısaltma	Açıklama
CFC	kloroflorokarbon
TEC	termoelektrik soğutma
COP	başarım (performans) katsayısı
FEM	sonlu elemanlar yöntemi
ANN	yapay sinir ağı
TE	termoelektrik
CCD	(charge couple device)
HMDS	hexamethyldisilane
EUV	litografi yöntemi
SEM	taramalı elektron mikroskobu
A	amper
K	Kelvin
W	Watt
kW	kilowatt
V	Volt
GHz	GigaHertz
MB	Megabite

GB	Gigabite
HP	Hawlet Packard
RAM	Read Access Memory
RMSA	etkin hata
μm	mikrometre
nm	nanometre
mm	milimetre
dc	doğru akım
Al_2O_3	alüminyum oksit
Bi_2Te_3	bizmut tellür

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Farklı metaller birleştirilerek oluşturulan kapalı bir devrenin birleşim uçlarından birisi ısıtıldığında devre uçlarında bir emk indüklenir	2
Şekil 1.2. Basit bir termoelektrik güç üreticisinin genel çizimi	4
Şekil 1.3. Farklı metallere oluşan devrede soğutma olayının oluşumu	5
Şekil 1.4. İletken bir telde oluşan Thomson etkisi	5
Şekil 1.5. Termoelektrik soğutucu ve meydana gelen sıcaklık değişimleri	7
Şekil 2.1. <i>n</i> -tipi yarıiletken maddenin oluşturulması	9
Şekil 2.2. Silisyum kristaline 3 bağlı İndiyum katkı atomu	10
Şekil 2.3. Bazı a) <i>p</i> - ve b) <i>n</i> -tipi yarıiletken maddelerin termoelektrik materyal katsayısının kıyaslanması	12
Şekil 2.4. Seebeck geriliminin ölçümü	14
Şekil 2.5. <i>n</i> -tipi yarıiletkende akımla oluşan ısı enerjisi akışı	15
Şekil 2.6. <i>p</i> -tipi yarıiletkende akımla oluşan ısı enerjisi akışı	16
Şekil 2.7. Termoelektrik yarıiletkenler ile oluşturulan paralel devre	17
Şekil 2.8. Termoelektrik yarıiletkenler ile oluşturulan seri devre	18
Şekil 2.9. <i>p</i> - ve <i>n</i> -tipi termoelektrik yarıiletkenlerden oluşan bir çift	18
Şekil 2.10. <i>p</i> - ve <i>n</i> -tipi termoelektrik çiftlerin birbirine ardışık olarak bağlanması	19
Şekil 2.11. Termoelektrik modül	19
Şekil 2.12. Termoelektrik soğutucu (TEC) modülü	21
Şekil 2.13. İdeal bir termoelektrik <i>p-n</i> çifti modeli	22
Şekil 2.14. Çok katlı termoelektrik soğutucu modül	30
Şekil 2.15. Mikro işlemci soğutucuları	30
Şekil 2.16. Oto buzdolabı	31
Şekil 2.17. Biyolojik sinir hücresi	32
Şekil 2.18. Nöronun Matematik Modeli	33
Şekil 2.19. Aktarım fonksiyonları	34
Şekil 2.20. Tam ilişkili yapay sinir ağı	37
Şekil 2.21. Kademeli ilişki	37

Şekil 2.22. İleri beslemeli (nonrecurrent) ve geri beslemeli (recurrent) yapay sinir ağı.....	38
Şekil 2.14. Öğrenme yöntemleri	40
Şekil 2.15. Sembolik bir Kohonen ağı	43
Şekil 3.1. Farklı şekil katsayıları için soğuk yüzey sıcaklığı ile soğutma gücü yoğunluğunun değişimi (Simons and Chu 2000)	45
Şekil 3.2. a) Bir TEC modülün modellenmesi ve b) çözüm ağı	47
Şekil 3.3. 260 - 325 K sıcaklık aralığında TEC modellerinde geçen akım ile soğutma gücünün değişimi a) No1, b) No2	48
Şekil 3.3. 260 - 325 K sıcaklık aralığında TEC modellerinde geçen akım ile soğutma gücünün değişimi c) No3 ve d) No4	49
Şekil 3.4. Birim yüzey için soğuk yüzey sıcaklığı ile soğutma gücünün yoğunluğunun değişimi	50
Şekil 3.5. Soğutma gücü tahmini (Q_C) için geliştirilen ANN modeli	52
Şekil 3.6. Soğutma gücü tahmini (Q_C) için geliştirilen ANN modelinin öğrenme sonuçları gösteren ekran	53
Şekil 3.7. Soğutma gücü tahmini (Q_C) için geliştirilen ANN modelinde giriş verileri ile öğrenme sonucunda elde edilen çıkış verilerinin uyumu	54
Şekil 3.8. Termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin ayak uzunluğunun (L) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi	55
Şekil 3.9. Termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin genişliğinin (w) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi	55
Şekil 3.10. TEC modülün yüzey alanının (S) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi	56
Şekil 3.11. Termoelektrik yarıiletken çiftlerden geçen akımın (I) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi	56
Şekil 3.12. TEC modülün uçlarındaki potansiyel farkın (V) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi	57
Şekil 3.13. TEC modülü oluşturan termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin genişliğinin (w) ayak uzunluğu (L) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi	58
Şekil 3.14. TEC modülü yüzey alanının (S) termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin ayak uzunluğu (L) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi	59

Şekil 3.15. TEC modülü yüzey alanının (S) termoelektrik yarıiletken $p-n$ çitlerinin genişliği (w) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi	59
Şekil 3.16 Soğutma gücü tahmini için geliştirilen ANN modelinin sonuç ekranı	60
Şekil 3.17. Soğutma gücü tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş sınaama verileri ile tahmin edilen veriler arasındaki uyum	61
Şekil 3.18. Güç tüketimi tahmini (Q_P) için geliştirilen ANN modeli	62
Şekil 3.19. Güç tüketimi tahmini (Q_P) için geliştirilen ANN modelinin öğrenme sonuçları gösteren ekran	63
Şekil 3.20. Güç tüketimi tahmini (Q_P) için geliştirilen ANN modelinde giriş verileri ile öğrenme sonucunda elde edilen çıkış verilerinin uyumu	64
Şekil 3.21. Termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin ayak uzunluğunun (L) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin güç tüketimine etkisi	65
Şekil 3.22. Termoelektrik $p-n$ çiftinin genişliğinin (w) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin güç tüketimine etkisi	65
Şekil 3.23. TEC modülün yüzey alanının (S) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin güç tüketimine etkisi	66
Şekil 3.24. Termoelektrik $p-n$ çiftlerinden geçen akımın (I) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin güç tüketimine etkisi .	67
Şekil 3.25. TEC modülün uçları arasındaki potansiyel farkın (V) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin güç tüketimine etkisi	67
Şekil 3.26. TEC modülü oluşturan termoelektrik yarıiletken $p-n$ çitlerinin genişliğinin (w) ayak uzunluğu (L) ile değişiminin güç tüketimine etkisi	68
Şekil 3.27. TEC modülünün yüzey alanının (S) termoelektrik yarıiletken $p-n$ çitlerinin ayak uzunluğu (L) ile değişiminin güç tüketimine etkisi	68
Şekil 3.28. TEC modülünün yüzey alanının (S) termoelektrik yarıiletken $p-n$ çitlerinin genişliği (w) ile değişiminin güç tüketimine etkisi	69
Şekil 3.29 Güç tüketimi tahmini için geliştirilen ANN modelinin sonuç ekranı	70
Şekil 3.30. Güç tüketimi tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş sınaama verileri ile beklenen hedef veriler arasındaki uyum	71
Şekil 3.31. Başarım Katsayısı (COP) için geliştirilen ANN modeli	72
Şekil 3.32. Başarım katsayısı (COP) için geliştirilen ANN modelinin öğrenme sonuçları gösteren ekran	73

Şekil 3.33. Başarım katsayısı (COP) tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş verileri ile öğrenme sonucunda elde edilen çıkış verilerinin uyumu .	74
Şekil 3.34. Termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin ayak uzunluğunun (L) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin başarım katsayısına etkisi	75
Şekil 3.35. Termoelektrik $p-n$ çiftinin genişliğinin (w) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin başarım katsayısına etkisi	75
Şekil 3.36. Termoelektrik $p-n$ çiftinin TEC modülünün yüzey alanının (S) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin başarım katsayısına etkisi	76
Şekil 3.37. Termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinden geçen akımın (I) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin başarım katsayısına etkisi	77
Şekil 3.38. TEC modül uçlarındaki potansiyel farkının (V) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin başarım katsayısına etkisi	77
Şekil 3.39. TEC modülünü oluşturan termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin genişliği (w) ile ayak uzunluğunun (L) değişiminin başarım katsayısına etkisi	78
Şekil 3.40. TEC modülünün yüzey alanının (S) termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin ayak uzunluğu (L) ile değişiminin başarım katsayısına etkisi	79
Şekil 3.41. TEC modülünün yüzey alanının (S) termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin genişliği (w) ile değişiminin başarım katsayısına etkisi	80
Şekil 3.42 Başarım katsayısı tahmini için geliştirilen ANN modelinin sonuç ekranı.....	81
Şekil 3.43. Başarım katsayısı tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş sınaama verileri ile beklenen hedef veriler arasındaki uyum	82
Şekil 3.44. Soğutma gücü için hesaplama, tahmin ve benzeşim verileri arasındaki uyum	83
Şekil 3.45. Güç tüketimi için hesaplama, tahmin ve benzeşim verileri arasındaki uyum	84
Şekil 3.46. Başarım katsayısı için hesaplama, tahmin ve benzeşim verileri arasındaki uyum	84
Şekil 3.47. Örnek hazırlama işlemi akış şeması	86
Şekil 3.48. Litografi yöntemi ile hazırlanmış örneklerden farklı görünüşler a) modülün kenarı ve b) büyütülmüş durumu	87

Şekil 4.1. Q_C , Q_P ve COP için benzeşim, tahmin ve hesaplama verileri arasındaki uyum

..... 93

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Termoelektrik soğutucuların kullanım ve uygulama alanları	31
Çizelge 3.1. Kullanılan malzemelerin termoelektrik parametreleri	45
Çizelge 3.2. Modellenen TEC modüllerinin geometrik boyutları	46
Çizelge 3.3. Soğutma gücü tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş verilerinin TEC modülün soğutma gücüne yüzde katkı oranı	60
Çizelge 3.4. Güç tüketimi tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş verilerinin TEC modülün güç tüketimine yüzde katkı oranı	70
Çizelge 3.5. Başarım katsayısı tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş verilerinin TEC modülün başarım katsayısına yüzde katkı oranı	81
Çizelge 4.1. ANN modellerinde TEC modüllerin soğutma gücü, güç tüketimi ve başarım katsayısı tahminine giriş verilerinin katkısı	91
Çizelge 4.2. Sınaması yapılan TEC modülleri için ortalama düzeltme katsayısı, en büyük hata ve standart sapma değerleri	92
Çizelge 4.3. Sınaması yapılan TEC modülleri için ortalama düzeltme katsayısı, en büyük hata ve standart sapma değerleri	93

1.GİRİŞ

Son yıllarda, elektronik cihazların ısı kayıpları gelişen üretim teknolojileri ile hızlıca artmaktadır. Bu gelişme ciddi bir elektronik soğutma sorununu getirmektedir. Günümüzde, sağlam, güvenilir, sıkı, küçük boyutlu, hafif, uzun ömürlü, düşük maliyette, düşük enerji tüketimine sahip ve uzun süre bakım gerektirmeyen soğutuculara artan bir ihtiyaç vardır. Yaygın olarak kullanılan mevcut kompresörlü soğutma sistemleri mekanik olarak hareket eden parçaları olduğundan ve boyut olarak büyük olduklarından arzulanan ideal özelliklere sahip değildir. Bir soğutucu ve bir fanın oluşan hava soğutmalı modül oldukça rağbet görmektedir, ancak birçok uygulama için sınırlı yer bulunduğundan uygulanması güçtür (Chang, 2008).

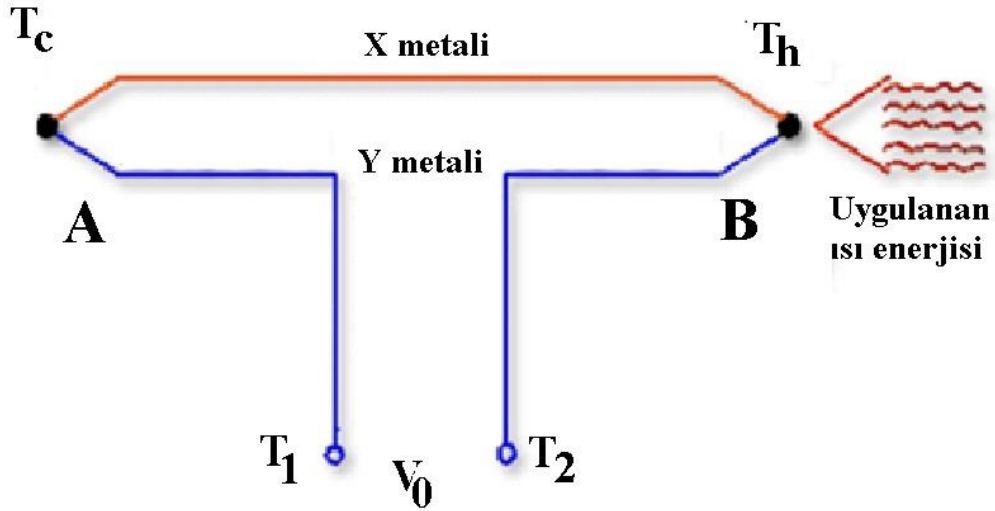
Teknolojinin hızlı bir şekilde geliştiği ve soğutma ihtiyacının sadece sıcaklık konforu ve gıdaların korunması amaçlı sınırlı kalmayacağı açıktır. Özellikle daha sıkı imal edilmiş dar hacimlerdeki elektronik cihazların kendi içinde ürettiği ve dışarıya yaydığı ısının uzaklaştırılması ve sıcaklık konfor sınırlarını aşan özel şartların istendiği soğutma gereksinimleri, buhar sıkıştırımlı konvansiyonel soğutma sistemlerinin dışında seçenek olan soğutma cihazlarına yönelmeyi ortaya koymuştur.

Geleneksel soğutma sistemi bir soğutucu, bir kompresör ve bir yoğunlaştırıcı içermektedir. Son yıllarda kullanılan soğutma sistemleri dünyada milyonlarca insan için bir yaşam biçimi olmuştur. Aynı zamanda enerji tüketimi, üreticiler hakkındaki çevresel kurallar ve kloroflorokarbon (CFC) gazlarının salınımı da artmaktadır. Bu gerçekler üreticileri ve kullanıcıları geleneksel soğutma teknolojisi için seçenekler aramaya özendirilmektedir. Bu çözümlerden birisi kullanılmakta olan soğutma teknolojilerinden termoelektrik teknolojisidir Termoelektrik soğutma sistemleri oldukça güvenilir bir yapıya sahiptir ve ömrü 200.000 saatten (≥ 22 yıl) fazladır. Aynı zamanda termoelektrik soğutma sistemleri çevre dostudur, çünkü bu sistemlerde CFC gazları yoktur. [Riffat, 2003, Tritt, 2006, Riffat, 2004].

Elektronların soğutma sıvısı olarak çalıştığı yegane soğutma cihazı olan termoelektrik soğutma (TEC) sistemi yaklaşık 50 yıldır bilinmekte ve askeri ve uzay endüstrisini de içeren birçok endüstride ticari soğutma sistemi olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu teknoloji için en önemli olumsuzluk özellikle büyük kapasiteli uygulamalardaki düşük başarımlar (performans)

katsayısıdır (COP). Bu nedenle, birçok araştırmacı, termoelektrik modül için yeni bir yarıiletken madde geliştirmek, modül sisteminin tasarım ve imalatının eniyilemesi (optimizasyon) ve ısı aktarım verimliliğinin geliştirilmesi ile termoelektrik soğutma sisteminin başarımlı katsayısının artırılmasına odaklanmıştır [Fleuriel, 1999, Arunkumar, 2010, Riffat, 2006, Chen, 2009, Riffat, 2004].

Hem ısı hem de elektriksel etkilerin bir arada bulunduğu devreye termoelektrik devre, bu devreyle çalışan sisteme de termoelektrik sistem adı verilir. Isı enerjisinin elektrik enerjisine, elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümlerinin temelini oluşturan termoelektrik etkiler, 150 yıldan daha fazla zamandır bilinmektedir. Farklı metallere yapılmış iki tel, uçlarından birleştirildiğ takdirde, kapalı bir devre oluşur. Başlangıçta bu devrede bir elektromotor kuvveti (emk) indüklenmez, fakat uçlardan biri ısıtıldığında devrede Şekil 1.1.'de gösterildiğ gibi bir emk indüklenir. Viktoria devri bilim adamlarından Thomas Seeback tarafından 1821'de keşfedilen bu olay termoelektrik etki olarak bilinmektedir (Çengel 2000).



Şekil 1.1. Farklı metaller birleştirilerek oluşturulan kapalı bir devrenin birleşim uçlarından birisi ısıtıldığında devre uçlarında bir emk indüklenir (Derebaşı 2014).

Termoelektrik etkide, elektriksel gerilim birleşim noktasının sıcaklığına bağlı olup metallere farklı elektriksel ve ısı özelliklerinden meydana gelir. İndüklenen emk sıcaklık ile orantılıdır ve aralarında kullanılan metallere özgün bir orantı sabiti vardır. Bu sabit Seeback katsayısı (α)

olarak bilinir. Seebeck katsayısı birim derecede mikrovolt olarak ($\mu\text{V}/\text{K}$) ölçülür (Seebeck 1823).

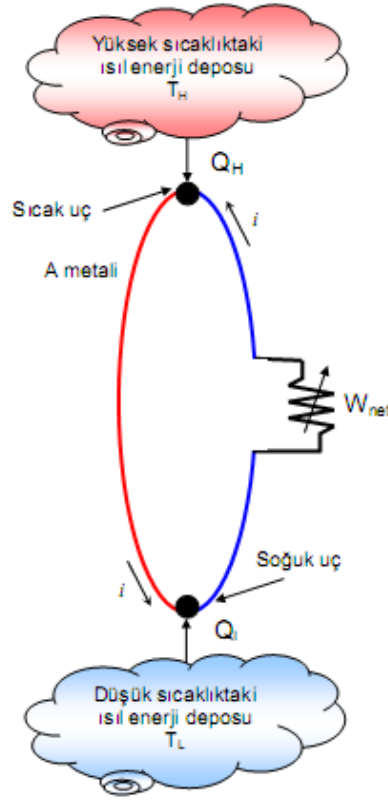
Seebeck etkisinin iki önemli uygulama alanı vardır. Bunlar sıcaklık ölçümleri ve güç üretimidir. Şekil 1.1.'de gösterildiği gibi devrenin ürettiği emk voltmetrede okunabilmektedir. Devrede üretilen emk iki uç arasındaki sıcaklık farkına ve tellerin yapıldığı malzemelere bağlıdır. Bu nedenle sıcaklık, emk ölçülerek belirlenir. Sıcaklığı bu yöntemle ölçmek için kullanılan iki yarıiletkenin oluşan sisteme ısı çifti denir. Isı çiftleri, hemen hemen her sıcaklık ölçümüne uygun olduklarından çok yaygın bir biçimde kullanılmaktadırlar. Ölçülen emk soğuk (T_c) ve sıcak (T_h) birleşimlerin sıcaklıklarına bağlıdır. T_h sıcaklığı ölçülecek ise T_c bilinen bir standart sıcaklık değeri olmalıdır ve bu sıcaklık değerini mutlaka bilmek gerekir.

Basitleştirilmiş olarak, daha yüksek sıcaklık derecesinde olan elektronlar daha soğuk uca bulunan her iki metaldeki elektronlara göre daha yüksek ısı enerjisine sahip olduğundan bu elektronlar ısı dengesi için soğuk uca doğru hareket ederler. İndüklenen emk bu iki metal arasındaki gerilim farkından oluşmaktadır. Ancak bu potansiyel fark çok küçük olup kullanılan metallerin türüne göre $1\text{ }^\circ\text{C}$ için $1\text{-}70\ \mu\text{V}$ arasındadır (Derebaşı 2014).

Seebeck etkisinden yararlanılan ikinci önemli uygulama güç üretimi yapılmasıdır. Şekil 1.2.'de bir termoelektrik güç üreticisinin şeması gösterilmektedir. Q_H miktarında ısı, yüksek sıcaklıktaki kaynaktan sıcak uca geçmekte, Q_L miktarındaki ısı da soğuk uçtan çevreye verilmektedir. Bu iki değer arasındaki fark, yapılan net işi gösterir ($W_e = Q_H - Q_L$) olmaktadır (Çengel 2000).

Seebeck keşfinden 12 yıl sonra 1834 yılında Jean Charles Athanese Peltier, termoelektrik sisteme dışarıdan bir potansiyel fark uygulayarak, termoelektrik devrede elektronların akış yönünü değiştirmeyi ve böylece soğutma etkisini gözlemleyerek termoelektrik olayının tamamlayıcı etkisini keşfetti. Yaptığı deneyler sonucunda farklı malzemelerden yapılmış iki telin oluşturduğu uçtan, zayıf bir akım geçirildiği zaman, bir ucun soğuduğunu gördü (Şekil 1.3). Bu olguya Peltier etkisi adı verilir ve termoelektrik soğutmanın temelini oluşturur (Çengel 2000). 1834'de, Peltier'in zayıf akım kullanarak yaptığı deneysel gözlemlerden elde ettiği sonuçlar tam olarak anlaşılmamıştır. Esasında Peltier'in elde ettiği bulguların temeli Seebeck etkisiyle ilgilidir. Lenz 1838'de Peltier'in yapmış olduğu deneylerden çıkardığı

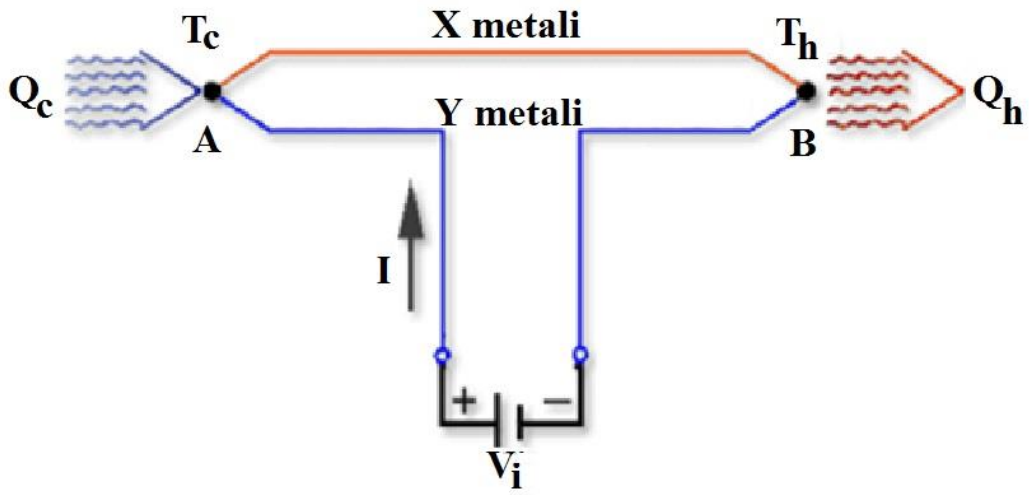
sonuçla; levhalar arasındaki iki iletkenin birleşmesi ve üzerinden doğru akım geçirilmesiyle levhanın bir yüzeyinden ısı emildiğini, akım yönünün tersine çevrilmesi durumunda ise ısı emilen yüzeyde, ısı üretildiğini açıklamıştır (Ioffe 1957).



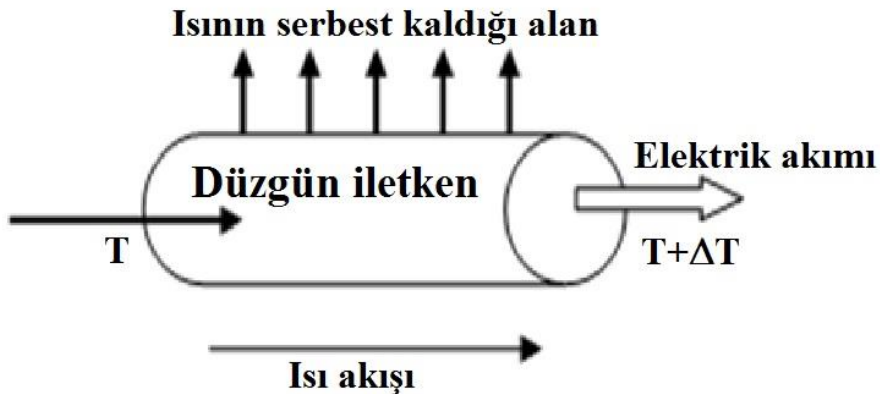
Şekil 1.2. Basit bir termoelektrik güç üreticisinin genel çizimi (Çengel 2000).

1850'den itibaren tüm enerji çevrim şekilleri üzerine bilim adamları birçok çalışmalar yapmış ve bunun sonucunda da termodinamik gelişmelerle birlikte termoelektrik olayında da yeni sonuçlar meydana çıkmıştır. 1851'de W. Thomson (Lord Kelvin) önceden bildirmiş olduğu üçüncü termoelektrik etkisi olan Thomson etkisini, deneysel metotlarla yaptığı incelemeler ve bağıntılarla kanıtlamıştır. Şekil 1.4.'de görülen Thomson etkisi; ısıtma veya soğutmada düzgün bir iletken üzerinden akım geçtiği sürece sıcaklık değişiminin meydana geldiğini göstermektedir. Isı, akım ve sıcaklık değişiminin yönüne bağlı olarak soğurular veya serbest bırakılır. Aynı yönde elektrik akımı varsa ısı aktığı için özellikle daha çok serbest bırakılır. Aksi takdirde ısı soğurular. Birim uzunlukta soğurularak edilen güç, sıcaklık farkıyla dT/dx ve elektrik akımı I ile doğru orantılıdır (Thomson 1851).

Termoelektrik olayının elektrik üretici olarak kullanılma olasılığını dikkate alan Altenkirch, 1909 ve 1911’de termoelektrik cihazların elektrik üretiminde ve soğutmada uygulanmasında mükemmel termoelektrik malzemeler kullanılması kuramını ortaya koymuştur. Yüksek başarımlı verebilecek termoelektrik malzemeler yüksek Seebeck katsayısı ile düşük ısı iletkenliğine (k) sahip olmalı ve ısı bağlantısında düşük elektrik direnciyle en küçük ısı (enerji) harcamalıdır. İstenen malzemelerin özelliklerinden oluşan Z katsayısı materyal katsayısı olarak adlandırılır. Z ’nin birimi $1/K$ ’dir ve verilen mutlak sıcaklık T , değişken Z ile birlikte kullanıldığında boyutsuzdur ve ZT ile gösterilir (Altenkirch 1911).



Şekil 1.3. Farklı metallere oluşturulan devrede soğutma olayının oluşumu (Derebaşı 2014).



Şekil 1.4. İletken bir telde oluşan Thomson etkisi (Thomson 1851).

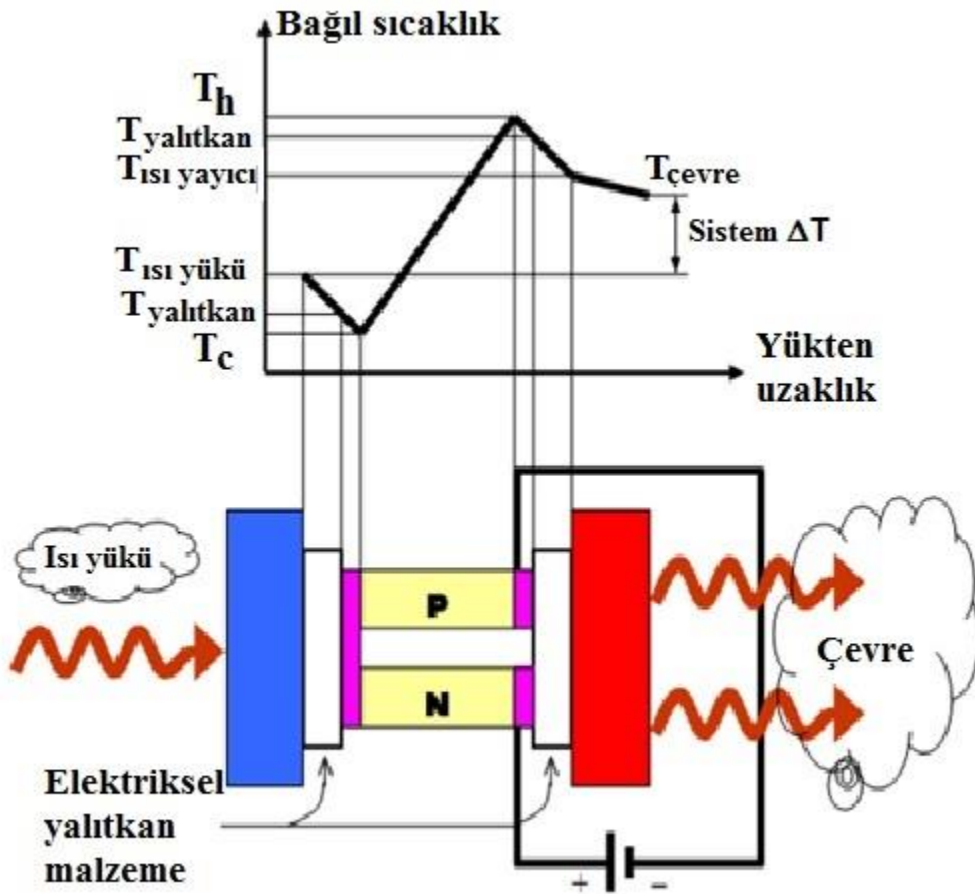
1900'lü yıllarda termoelektrik cihazların daha verimli bir şekilde elektrik üretiminde veya soğutmada kullanılabilmesi için bilim adamları mükemmel termoelektrik malzemeler üzerine çalışmalarını arttırmıştır. Mükemmel termoelektrik malzemesinin Seebeck katsayısının yüksek olması gerekmektedir. O zamanlarda metallerin Seebeck katsayısı $10 \mu\text{V/K}$ 'di. Böyle bir malzemedan oluşturulan termoelektrik cihazın verimi de %1 civarındaydı. Bundan dolayı da termoelektrik cihazların elektriksel güç kaynağı ve soğutmada kullanılması ekonomik değildi. Termoelektrik alanındaki gelişmeler sonucunda 1930'da sentetik yarı iletkenler imal edildi. Sentetik yarı iletkenlerin sahip oldukları Seebeck katsayıları $100 \mu\text{V/K}$ 'den fazladır. 1947'de Telkes bu sentetik yarı iletkenlerden yaptığı jeneratörü %5 verimle işletmiştir. 1949'da Ioffe, termoelementler kuramını geliştirmiştir. Bu kurama göre olağan çevre şartlarından düşük sıcaklıklarda 0°C 'nin altında soğutma yapılabilirdi. Bu teoriyi 1954'de Goldsmid ve Douglas ispatlamıştır. 1950'de elde edilen yeni malzemeler ile de termoelektrik özelliklerin önemli ölçüde düzeltildiği görülmüştür.

Daha önceden elde edilen [ısı iletkenliği/elektriksel iletkenlik (k/σ)] oranı oldukça düşüktü. Günümüzde, termoelektrik malzemeler ise eş yapıya veya bileşik (aynı tip) alaşımlar olup bu oran hayli yükseltilmiştir. Bu malzemenin askeri uygulamalarda kullanılabilmesi için teşvik edilmiş ve özellikle USA'daki RCA Laboratuvarlarında elde edilen yarı iletkenler ile yapılan deneylerde yarı iletkenlerin ZT'si yaklaşık 1,5 bulunmuştur (Ioffe 1957, Telkes 1947, Goldsmid ve Douglas 1954; Ioffe ve ark. 1956).

Modern termoelektrik çevriminde; gerekli miktarlarda, "p" ve "n" tipi yarı iletkenler birbirini takip edecek şekilde metal bağlantı şeritlerin üzerine yerleştirilmiştir. Bu şeritler elektriksel olarak seri şekilde bağlanır. Elektriksel iletmeyen (yalıtkan) fakat ısıyı iyi ileten seramik kaplı iki modül arasına birbirine bağlı yarı iletkenler yerleştirilerek sıkıştırılır. Modüllerin sıcaklık farkının boydan boya korunması şartıyla elektriksel güç üreticisi olarak işletilmesi mümkündür. Bunun tersine, modülün içinden elektrik akımı geçtiği zaman modülün bir yüzünden ısı emilir ve diğer yüzünden ısı atılarak bu cihaz soğutucu olarak da çalıştırılabilir. Peltier etkili iki yarıiletkenli termoelektrik soğutucunun genel şekli ve bu termoelektrik modülünün ısıyı transfer ederken gövdesinde oluşan sıcaklık değişimleri Şekil 1.5.'de gösterilmektedir.

Termoelektrik soğutucular ve soğutma maddelerin başarımı hakkında birçok araştırma olmasına rağmen (Goldsmid 2005, Atik 2009, Wang 2009), termoelektrik soğutma (TEC) modüllerinin her soğutma elemanın geometrik boyutlarını içeren soğutma modüllerinin başarımı ile ilgili çok az araştırma yapılmıştır (Arunkumar 2010).

Bu çalışmada *p* ve *n* çeşit yarıiletken soğutma elemanlarının geometrik boyutlarının bir TEC modülünün termal özelliklerine etkisi sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Bu amaçla, termoelektrik soğutma gücü (Q_c), elektrik enerjisi tüketimi (Q_p) ve COP önceki çalışmada sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile yapılan benzeşimlerden elde edilen veriler (Güldiken 2011) kullanılarak, yapay sinir ağları (ANN) ile tahmin ve MATLAB® kullanılarak oluşturulan analitik bir denklemlerle hesaplama şeklindeki sayısal yöntemlerle elde edilmiştir. Bu verilerden yararlanılarak modülün bir prototipi geliştirilmiştir.



Şekil 1.5. Termoelektrik soğutucu ve meydana gelen sıcaklık değişimleri (TECA Corp.).

2. KURAMSAL BİLGİLER

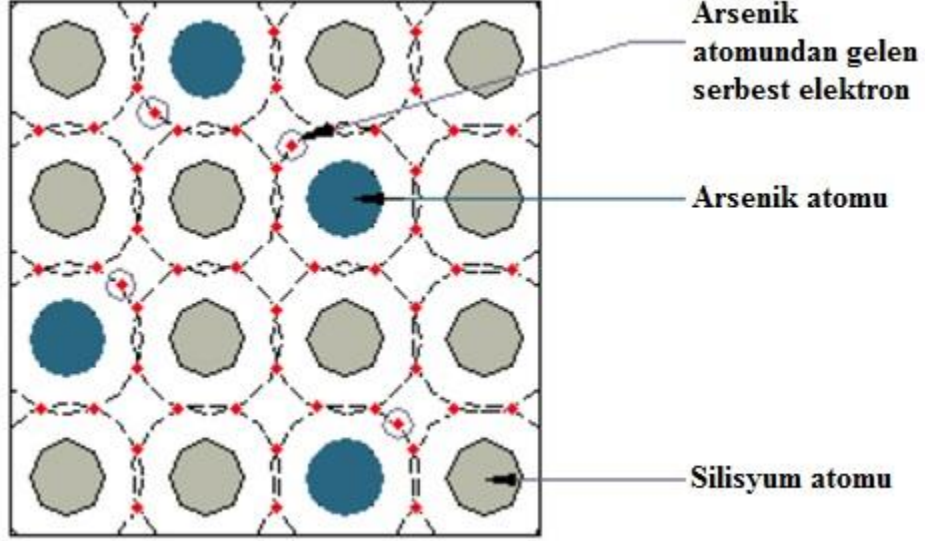
2.1. YARIİLETKENLER

Yarıiletken maddeler elektrik akımına karşı, ne iyi bir iletken nede iyi bir yalıtkan özelliği gösterirler. Elektronik endüstrisinin temelini oluşturan yarıiletken maddelerin (Silisyum Si, Germanyum Ge) son yörüngelerinde 4 adet elektron vardır. Yarıiletken malzemeler, akımı iyi iletmezler. Çünkü son yörüngedeki valans bandındaki boşlukların ve iletim bandındaki serbest elektronların sayısı sınırlıdır. Saf Silisyum veya Germanyumun mutlaka serbest elektron veya boşluk sayısı artırılarak iletkenliği ayarlanmalıdır. İletkenliği ayarlanabilen Silisyum veya Germanyum, elektronik devre elemanlarının yapımında kullanılır. Germanyum veya Silisyumun iletkenliği ise ancak saf malzemeye katkı maddesi eklenmesi ile sağlanır. Katkı maddesi eklenerek oluşturulan iki temel yarıiletken materyal vardır. Bunlara; *n*-tipi madde ve *p*-tipi madde denir. Elektronik devre elemanlarının üretiminde bu iki madde kullanılır.

Silisyum ve Germanyumun iletkenliği kontrollü olarak artırılabilir. İletkenliği kontrollü olarak artırmak için saf yarıiletken malzemeye katkı maddesi eklenir. Bu işleme “katkılama” (doping) denir. Akım taşıyıcılarının (elektron veya boşluk) sayısının artırılması malzemenin iletkenliğini, azaltılması ise malzemenin direnci artırır. Her iki katkılama olayının sonucunda *n*-tipi veya *p*-tipi madde oluşur (Kittel 2004).

2.1.1. *n*-Tipi Yarıiletken

Saf Silisyumun iletkenlik bandındaki deliklerinin arttırılması atomlara katkı maddesi ekleyerek yapılır. Bu atomlar, son yörüngede 5 valans elektronu olan Arsenik (As), Fosfor (P), Bizmut (Bi) veya Antimon’dur (Sb). Silisyuma katkı maddesi olarak son yörüngesinde 5 valans elektrona sahip (5-değerli) Fosfor veya Arsenik belli bir oranda eklendiğinde, diğer silisyum atomları ile nasıl bir kovalent bağ oluşturulduğu Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Arsenik atomunun 4 valans elektronu, silisyumun 4 valans elektronu ile kovalent bağ oluşturur. Arsenik atomunun 1 valans elektronu açıkta kalır



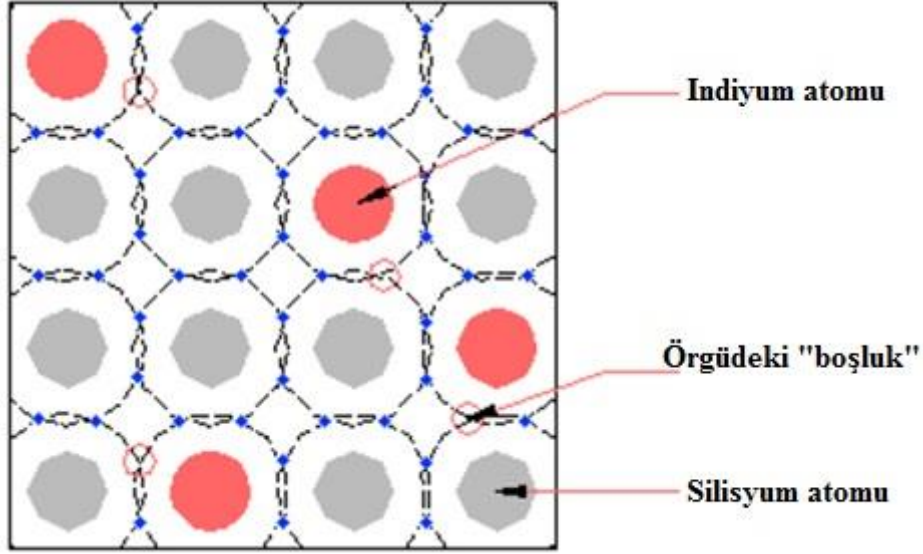
Şekil 2.1. *n*-tipi yarıiletken maddenin oluşturulması.

ve ayrılır. Bu açıktaki kalan elektron iletkenliği artırır. Çünkü herhangi bir atoma bağlı değildir. İletkenlik, elektron sayıları ile kontrol edilebilir. Bu ise Silisyuma eklenen atomların sayısı ile olur. Katkı sonucu oluşturulan bu iletkenlik elektronu, valans bandında bir boşluk oluşturmaz. Arsenik atomunun serbest elektronu akım taşıyıcılarının çoğunluğu elektron olan, Silisyum veya Germanyum maddesine *n*-tipi yarıiletken malzeme denir. *n*-tipi malzemede elektronlar, çoğunluk akım taşıyıcıları diye adlandırılır. Böylece *n*-tipi malzemede akım taşıyıcıları elektronlardır. Buna rağmen ısı ile oluşturulan birkaç tane elektron boşluk çiftleri de vardır. Bu boşluklar 5-değerli katkı maddesi ile oluşturulmamışlardır. *n*-tipi malzemede boşluklar azınlık taşıyıcıları olarak adlandırılır.

2.1.2. *p*-Tipi Yarıiletken

Saf Silisyum atomu içerisinde, son yörüngesinde 3 valans elektrona sahip (3-değerli) atomların belli bir oranda eklenmesi ile yeni bir kristal yapı oluşur. Bu yeni kristal yapıda delik (boşluk) sayısı artırılmış olur. Son yörüngesinde 3 valans elektrona sahip atomlara örnek olarak; İndiyum (In) ve Bor (B) elementlerini verebiliriz. Saf Silisyum içerisinde belli bir oranda İndiyum katılırsa; İndiyum elementinin son yörüngesinde 3 valans elektronu, Silisyumun son yörüngesindeki 3 valans elektronu ile ortak kovalent bağ oluşturur. Fakat Silisyumun 1 valans elektronu ortak bağ oluşturamaz. Bu durumda 1 elektron noksanlığı meydana gelir. Buna “boşluk” veya “delik” denir. Silisyuma eklenen katkı miktarı ile boşlukların sayısı kontrol

edilebilir. Bu yöntemle elde edilen yeni malzemeye *p*-tipi yarıiletken malzeme denir (Şekil 2.2). Çünkü boşluklar pozitif yüklüdür. Dolayısı ile *p*-tipi malzemede çoğunluk akım taşıyıcıları boşluklardır. Elektronlar ise P tipi malzemede azınlık akım taşıyıcılarıdır. *p*-tipi malzemede birkaç adet serbest elektronda oluşmuştur. Bunlar ısı ile oluşan boşluk çifti esnasında meydana gelmiştir. Bu serbest elektronlar, silisyuma yapılan katkı esnasında oluşturulamazlar. Elektronlar *p*-tipi malzemede azınlık akım taşıyıcılarıdır.



Şekil 2.2. Silisyum kristaline 3 bağlı İndiyum katkı atomu.

2.1.3. Termoelektrik yarıiletkenlerin özellikleri

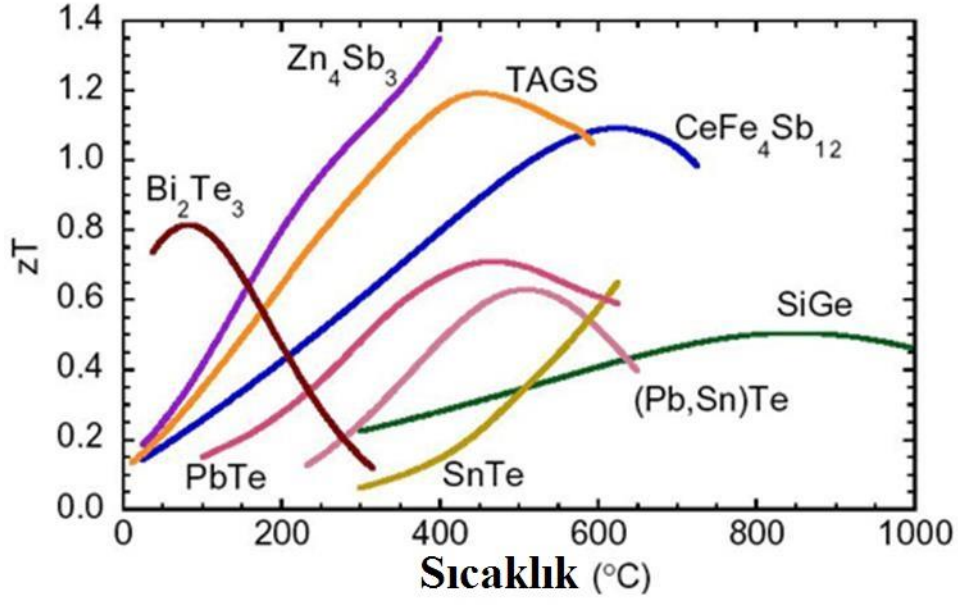
İlk termoelektrik (TE) maddeler metallere, ancak 20. Yüzyılın ortalarında yarıiletkenlerin yüksek Seebeck katsayıları keşfedildi (Ioffe 1957). Çünkü ısı iletimi elektronlar ile gerçekleşiyordu. Bağlı elektrik-ısı iletkenliği oranının yüksek olması metallere üstün özelliktir. Ancak modern termoelektrik maddeler esas olarak yarıiletkenlerdir. Yarıiletkenlerin oda sıcaklığındaki elektriksel özdirenci $10^2 - 10^9$ ohm arasındadır ve sıcaklıktan çok etkilenirler (Kittel 2004). Saflığı yüksek olan yarıiletkenler katkılanmış olanlara göre farklı iletkenlik gösterirler. En küçük iletkenlik bandı ile en yüksek valans bandı arasındaki enerji farkı bant aralığı olarak tanımlanır. Sıcaklık arttıkça elektronlar valans banttaki iletkenlik bandına sıcaklıkla uyarılırlar. İletkenlik bandındaki elektronlar ve valans bandındaki boşluklar elektriksel iletkenliğe katkı yapar. Yarıiletkenlerin büyük atom ağırlığı

daha küçük ısı iletkenliğine karşılık gelir (Ioffe, 1957; Bulusu and Walker, 2008). Çünkü yoğunluktaki artış, kristalde ısı iletkenliğini azaltan ses hızına sebep olur.

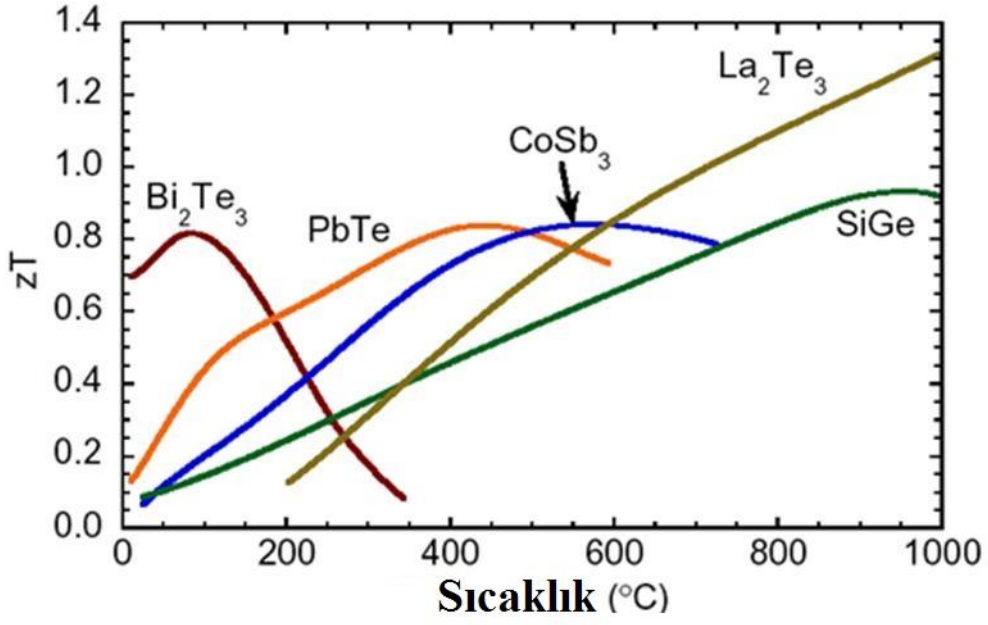
Bizmut – Tellür (Bi_2Te_3) ve alaşımları oda sıcaklığı altında üstün termoelektrik özellikler gösterir. Oda sıcaklığının üzerinde bağıl olarak dar bant genişliği olduğundan elektronlar ve boşluklar iletkenlikte karışıklığa sebep olur. Bu durum Seebeck katsayısını azaltır. Bizmut – Tellür antimon (Sb_2Te_3) ve selenyum (Bi_2Se_3) ile alaşım yapıldığında alaşımın ısı iletkenliği oldukça azalır. *n*-tipi Bizmut – Tellür yüksek Seebeck katsayısına sahiptir ($-287 \mu\text{V/K}$, 54°C). Yüksek Seebeck katsayısı yük taşıyıcılarını azalttığından elektriksel iletkenlik azalır. Ancak sıradan bir cam gibi yüksek elektriksel ve düşük ısı iletkenliği olan Bi_2Te_3 alaşımı da üretilmiştir. Termoelektrik materyal katsayısına göre *p*- ve *n*-tipi yarıiletken (figure of merit, *Z* veya birimsiz termoelektrik materyal katsayısı, *ZT*.) Bi_2Te_3 oda sıcaklığındaki termoelektrik uygulamaları için diğer termoelektrik alaşımlarla karşılaştırıldığında çok elverişlidir (Şekil 2.3 a ve b).

Kurşun – Tellür (PbTe) $300 - 700 \text{ K}$ sıcaklık aralığında iyi termoelektrik özellik gösterir. Kurşun – Kükürt (PbS) ve Kurşun – Selenyum (PbSe) benzer alaşımlardır. PbTe büyük atom ağırlığına ve çoklu – vadi bant yapısına sahiptir. 300 K sıcaklıkta Bi_2Te_3 ‘den daha büyük Seebeck katsayısı üreten bant aralığı 0.32 eV ’tur. Termoelektrik materyal katsayısı yüksek sıcaklıklarda Bi_2Te_3 ‘den daha yüksektir (Bulusu and Walker, 2008).

Silisyum – Germanyum (SiGe) alaşımı termoelektrik üretimi için idealdir. Silisyum geniş bant aralığına sahip olduğundan $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ gibi silisyum ile zenginleştirilmiş alaşımlar yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur. Çünkü, azınlık yük taşıyıcılarında artma meydana gelmez (Bulusu and Walker, 2008). Düşük ısı iletkenliği vardır.



(a)



(b)

Şekil 2.3. Bazı a) *p*- ve b) *n*-tipi yarıiletken maddelerin termoelektrik materyal katsayısının kıyaslanması.

2.2. TERMOELEKTRİK İLKELER

2.2.1. Termoelektrik Etkiler

p- ve *n*-tipi iki farklı yarı iletken malzemenin kimyasal yöntemlerle birbirine birleştirilmesiyle oluşturulan devre üzerinden, elektrik akımı geçirilmesiyle meydana gelen sıcaklık farklılıklarında, devrede aynı anda üç çeşit termoelektrik etki oluşur. Bu etkiler mucitlerinin adı ile anılır. Bunlar:

- Seebeck
- Peltier
- Thomson

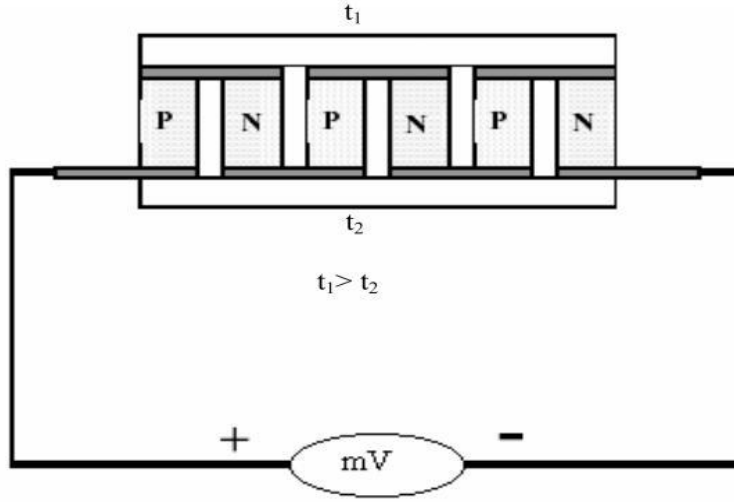
etkileridir.

p- ve *n*-tipi iki farklı yarı iletken malzemenin birbirine seri olarak birleştirilerek oluşturulan devrede, farklı sıcaklıklarda elektriksel potansiyel fark oluşur. Buna ‘Seebeck gerilimi’ adı verilir. Devreden ölçülen gerilim, malzemelerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılıdır. Şekil 2.4.’deki iki farklı yarı iletken malzemedan oluşturulan devrede ölçülen potansiyel fark;

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

ile hesaplanabilir. Burada *V* devrede ölçülen gerilim, $\Delta T = T_1 - T_2$ malzemelerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı, $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ Seebeck katsayısı olarak adlandırılır ve birimi V/K’dir. α ’nın değeri devreyi oluşturan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Bakır-Konstantan’dan (%57 Cu - %43 Ni) yapılan bir ısı çifti için yaklaşık $\alpha = 40 \mu V/^\circ C$ ’dir. Yani her $1^\circ C$ sıcaklık farkı için $40 \mu V$ ’luk gerilim üretir (Derebaşı 2014). α ’nın değeri $100 \mu V/^\circ C$ ’den büyük olan yarı iletkenlere, termoelektrik yarı iletkenler denir.

n-tipi yarıiletken için α değeri negatif, *p*-tipi yarıiletken için α değeri ise pozitiftir. Meydana gelen Seebeck etkisi yarı iletkenlerde üreteç gibi, metallerde ise ısı çifti veya ısı algılayıcısı gibi kullanılır. 1834 yılında Fransız Fizikçi Jean Charles Athanasa Peltier tarafından iki farklı yarı iletken malzeme üzerinden dc akım geçirilmesi ile akımın hareket ettiği yönde ısı hareketi oluşmasıyla keşfedilmiştir. Bu olaya Peltier etkisi denilmektedir (Ioffe 1957, Rowe 2006).



Şekil 2.4. Seebeck geriliminin ölçümü (Usta 2002).

Birleştirilen iki farklı yarıiletken malzemeden oluşturulan devre üzerinden doğru akım geçtiğinde, Joule ısısı ile birlikte birleşme noktasından ısı emilirken, eş zamanlı olarak diğer birleşme noktasından ısı açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan ısı miktarı devreden geçirilen doğru akımla doğru orantılıdır.

$$Q = \pi I \quad (2.2)$$

Burada Q birim zamanda aktarılan ısı miktarı (Watt), π Peltier sabiti (Volt), I devre üzerinden geçen doğru akımdır (Amper). Dışarıdan verilen elektriksel güç, elektronların sistem içerisinde hareket etmeleri için gerekli enerjiyi sağlamakta ve böylece hareketlenen elektronlar değişen enerji düzeyleri arasında ilerlerken ısı aktarılmaktadır, başka bir deyişle ısı taşımaktadır (Buist 1997). Dışarıdan verilen elektriksel güç arttırılırsa, hareketli elektron sayısı da artacağından soğuk yüzey ile sıcak yüzey arasındaki ısı taşıma miktarı da artacaktır. Eğer akım yönü ters çevrilirse, bu işlem tersine işleyecek sıcak yüzeyle, soğuk yüzey kendi arasında yer değiştirecektir.

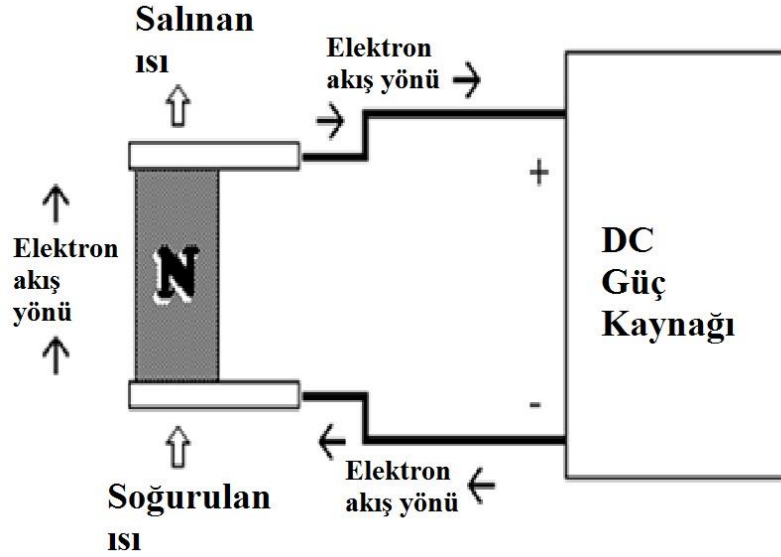
1856 yılında bulunan Thomson etkisi şöyle açıklanabilir; akım taşıyan bir iletkenin uçları arasında sıcaklık farkı varsa akım yönüne göre Joule ısısına ek olarak Thomson ısısı açığa çıkmaktadır. Thomson ısısı akım şiddeti, sıcaklık farkı ve Thomson katsayısı ile doğru orantılıdır.

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

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

2.2.2. Termoelektrik Elemanlar

n -tipi bir yarıiletken iki iletken arasına yerleştirilip Şekil 2.5'deki gibi bir doğru akım güç kaynağına bağlanırsa seri bir elektrik devresi oluşturulur ve bu devreden geçen bol miktardaki serbest elektronlar hareket ederken, sıcaklığı da beraber taşırlar. Isı enerjisi akışı, elektrik akımıyla aynı yöndedir.



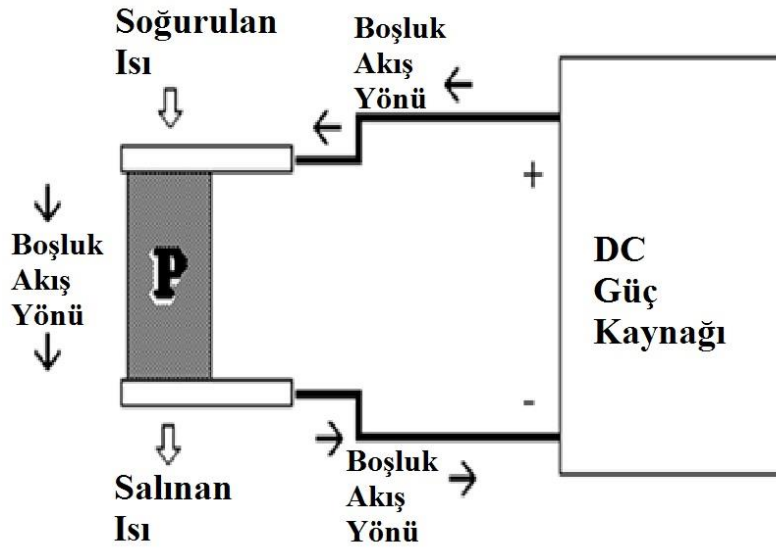
Şekil 2.5. n -tipi yarıiletkende akımla oluşan ısı enerjisi akışı.

p -tipi yarıiletken kullanıldığında boşluklar elektronların akışının ters yönünde hareket ederler. Buna bağlı olarak ısı akışı da ters yönlü olur. Esas olarak yük taşıyıcıları ısı akış yönünü belirler. Elektronlar bakır iletkenlerde serbestçe hareket eder, ancak yarıiletken maddede serbest hareket edemezler.

Bakır iletken boyunca n -tipi yarıiletkenin soğuk yüzeyine ulaşmaya kadar bakır iletkeninde serbestçe hareket ederler. Elektronlar n -tipi yarıiletkene girdiklerinde, yarıiletken içinde

ilerleyebilmek için yüksek enerji düzeyine çıkarlar. Bu sırada ısı enerjisi soğururlar. n -tipi yarıiletkenin sıcak yüzeyinden ayrılarak, bakır iletkeninde serbestçe hareket ederler. Bu sırada daha düşük enerji düzeyine inerler ve ısı yayarlar.

Şekil 2.6'de görüldüğü gibi elektronlar bakır iletkeni terk edip p -tipi yarıiletkenin sıcak yüzeyine girerken, yarıiletken boyunca hareket edebilmeleri için boşlukları doldurmalıdırlar. Bir boşluk doldurdıklarında daha düşük enerji seviyesine inerler ve bu sırada ısı yayarlar. Elektronlar p -tipi yarıiletkenden soğuk yüzeydeki bakır iletkene hareket ederken yüksek enerji seviyesine geri dönerler ve böylece bu süreçte ısı soğururlar (Bulut 2005).

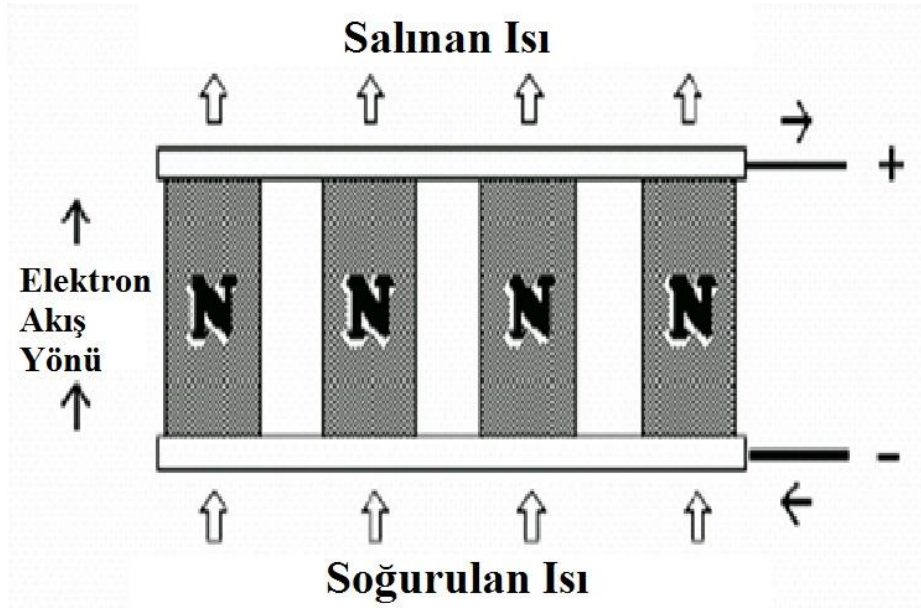


Şekil 2.6. p -tipi yarıiletkende akımla oluşan ısı enerjisi akışı.

Isı akışını arttırmak için birçok p - ve n -tipi termoelektrik yarıiletken eleman birbirine elektriksel ve termal olarak paralel bağlanmalıdır (Şekil 2.7). Ancak bu yöntem düşük gerilim fakat yüksek akım gerektirir ve ticari olarak uygun değildir. Şekil 2.8'deki gibi yarıiletken termoelektrik elemanlar birbirine elektriksel olarak seri bağlanabilir. Fakat bu yöntem ısı akışını azaltır, çünkü ara bağlantılar termoelektrik yarıiletkenler arasında ısıl kısa devreye sebep olur.

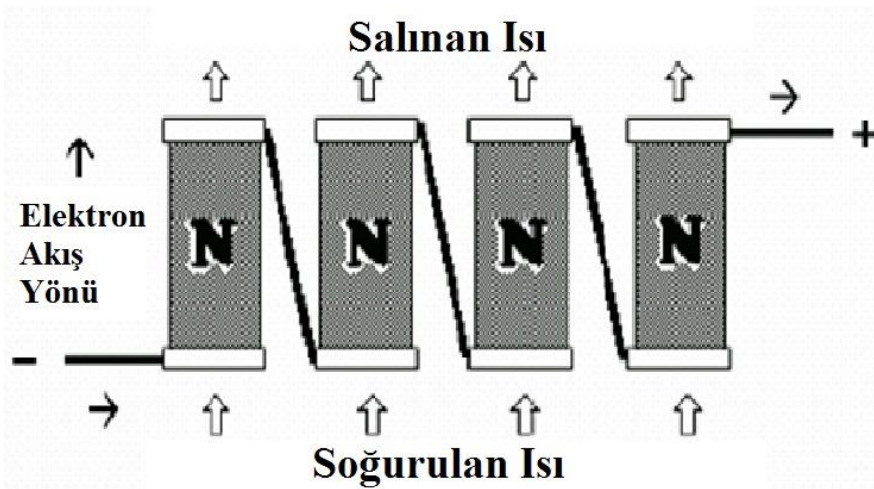
En verimli düzenleme p - ve n -tipi termoelektrik yarıiletken elemanların elektriksel olarak seri ve ısıl olarak paralel olduğu bağlantı şeklidir (Şekil 2.9) ve bu yapı p - n termoelektrik çifti olarak isimlendirilir. Bu yapıda bir yüzey ısı kaynağına doğrudan temas ederken diğer yüzey

bir soğutucu olarak ısıyı ortamdan uzaklaştırır. Isı kaynağına doğrudan temas eden yüzey “soğuk yüzey”, soğutucu olan yüzey ise “sıcak yüzey” olarak düşünülür.

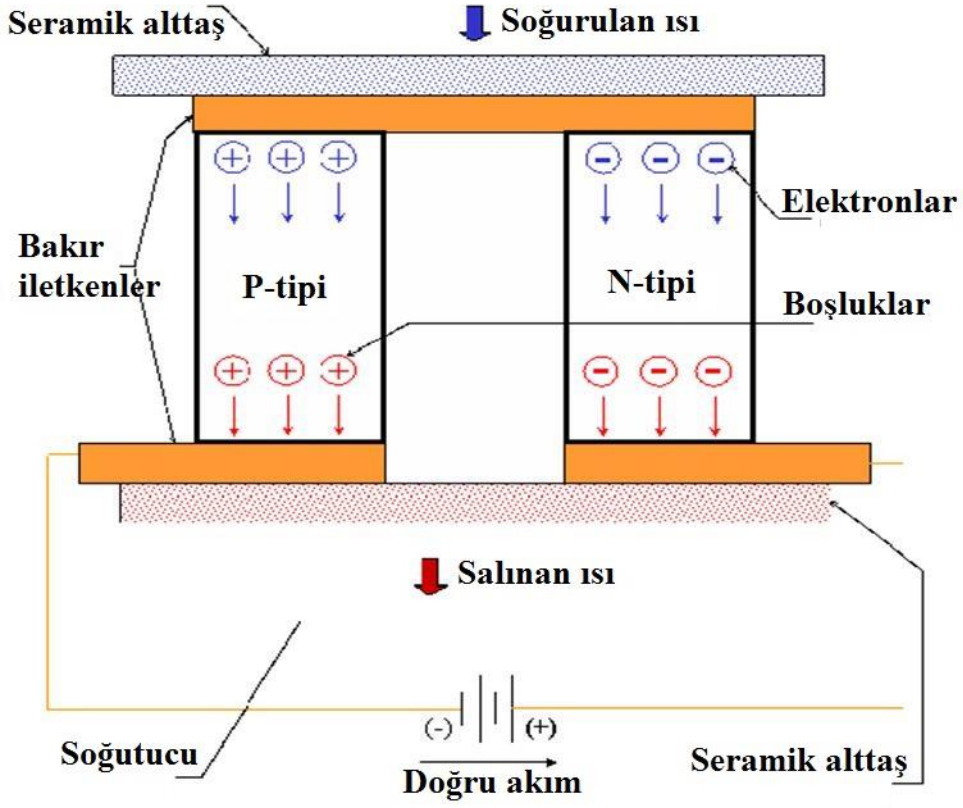


Şekil 2.7. Termoelektrik yarıiletkenler ile oluşturulan paralel devre.

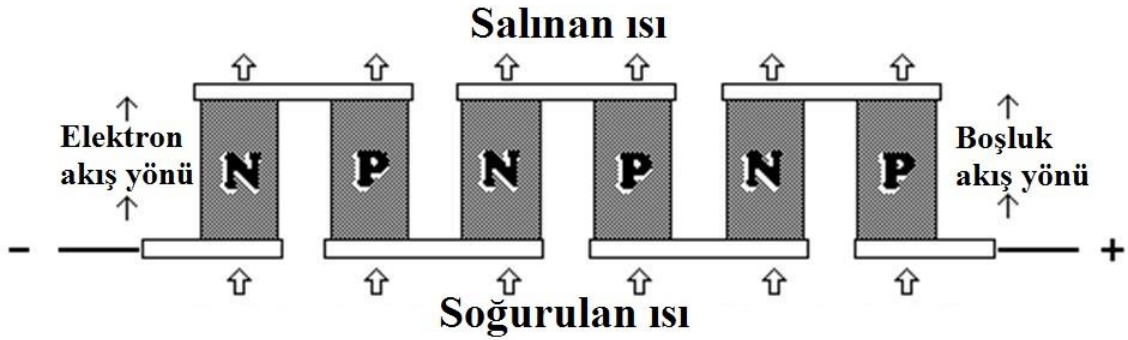
Isı üreten cihaz ve iletken arasında $p-n$ termoelektrik çift ve ısı kaynağı arasındaki elektriksel kısa devreyi önlemek için elektriksel olarak bir yalıtkan olmalıdır. Bu yalıtkanın yüksek ısı iletkenliğine sahip olmalıdır. Böylece ısı kaynağı ve $p-n$ termoelektrik çiftinin iletkeni arasında arasındaki ısı farkı küçük olur. Genellikle Alimüna (Al_2O_3) gibi seramikler kullanılır (Şekil 2.9) (Rowe, 1995). Soğuk ve sıcak yüzey arasındaki ısı aktarım kapasitesini arttırmak için $p-n$ termoelektrik çiftleri Şekil 2.10'daki gibi birbirine ardışık olarak bağlanır.



Şekil 2.8. Termoelektrik yarıiletkenler ile oluşturulan seri devre.



Şekil 2.9. *p*- ve *n*-tipi termoelektrik yarıiletkenden oluşan bir çift.

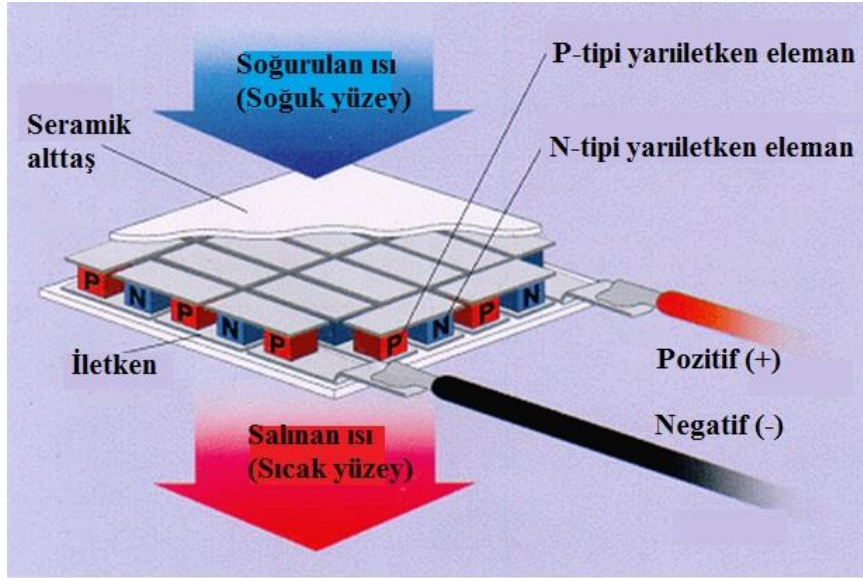


Şekil 2.10. *p*- ve *n*-tipi termoelektrik çiftlerin birbirine ardışık olarak bağlanması.

2.2.3. Termoelektrik Elemanların Modül Oluşturması

Şekil 2.11'de görüldüğü gibi bağlantı kolaylığı için *p*- ve *n*-tipi termoelektrik elemanlar metal levhalar arasına sıkıştırılıp her iki yüzeyine de Alümina gibi seramik levhalar kullanılarak ısı iletkenliği yüksek, elektriksel olarak yalıtkan olan malzeme ile kaplanarak istenilen

boyutlarda termoelektrik soğutma (TEC) modülleri oluşturulur. Elektrik akımı zikzak çizerken, ısı enerjisi akışı yönü aynı kalır. Aynı zamanda kullanılan çift sayısına bağlı olarak ısı taşıma kapasitesi arttırılmış olur. Bu $p-n$ termoelektrik çiftleri Şekil 2.11’de görüldüğü gibi düzenlenir. Birçok cihaz için 254 $p-n$ termoelektrik çifti kullanılır. Bu cihazlar genellikle 12 – 16 V gerilim altında 4 – 5 A akım çekerler. Bu değerler pratik kullanımda oldukça uygundur.



Şekil 2.11. Termoelektrik modül.

Termoelektrik modülün özellikleri:

- Yüksek katkılı yarı iletken malzeme, iki metal levha arasına sıkıştırılır.
- Seramik levhalar, sıcak ve soğuk yüzeyleri meydana getirir.
- DC kaynaktan beslenen bir termoelektrik $p-n$ çifti en küçük soğutucuyu oluşturur.
- Yarı iletken olarak Bi_2Te_3 , PbTe , SiGe veya BiSb kullanılır.
- Bi_2Te_3 , yüksek termoelektrik verimi ve uygun sıcaklık aralığı nedeniyle tercih edilir.

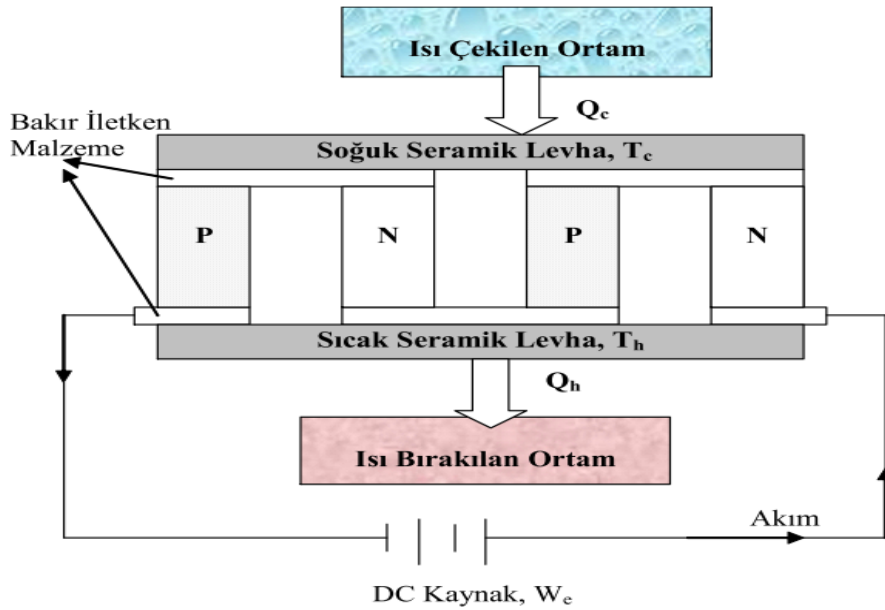
2.3. TERMOELEKTRİK SOĞUTMA KURAMI

Termoelektrik soğutma p - ve n -tipi yarı iletken metal çiftlerinden oluşmuş bir veya daha çok modülden doğru akımın geçmesi ile elde edilir. Şekil 2.12.’de p - ve n -tipi yarı iletken çiftlerinden meydana gelmiş sembolik bir TEC modülü gösterilmiştir. p - ve n -tipi termoelektrik elemanlar elektriksel olarak seri, ısı olarak paralel şekilde seramik levhalar

arasına yerleştirilir. Akımın yönüne bağlı olarak ısıtma ve soğutma elde edilebilir. Şekil 2.12'den de görüleceği gibi soğutma durumunda, doğru akım n -tipi yarıiletkeninden p -tipine geçmektedir.

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

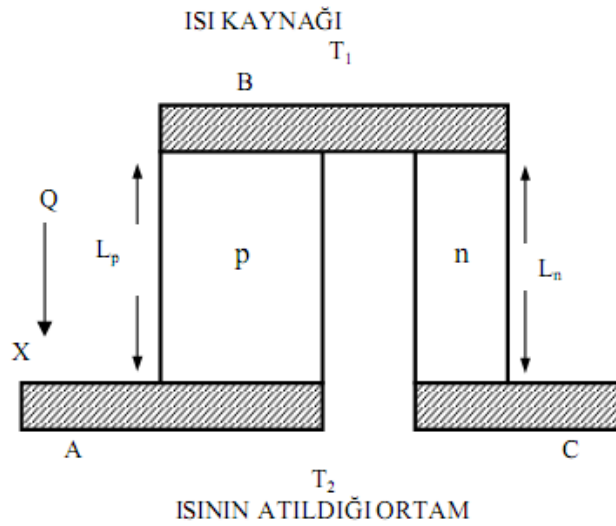
İletkene geçen elektronlar, n -tipi yarı iletkenin soğuk tarafına ulaşınca kadar burada serbestçe hareket ederler n -tipi yarı iletkenine geçen elektronlar burada hareketlerini devam ettirebilmeleri için ortamdan ısı emerler ve daha sonra n -tipi yarı iletkenin sıcak tarafından iletkenine geçer ve rahatça hareket edebilirler. Elektronlar burada daha düşük enerji seviyesine geçerek ortama ısı verirler. Böylelikle ısı enerjisi, bir ortamdan çekilerek diğer bir ortama taşınmış olur. Dolayısıyla termoelektrik modül aynı zamanda ısı pompası görevi görür.



Şekil 2.12. Termoelektrik soğutucu (TEC) modülü (Bulut 2005).

2.3.1. İdeal Model

Bir termoelektrik cihazının çevrim verimliliğini göstermek için Şekil 2.13'deki modelden faydalanılır. Burada p - ve n -tipi termoelektrik yarıiletkenler birbirine bağlanmıştır. A, B ve C ideal olarak sıfır elektrik dirençli metal iletkenlerdir. Termoelektrik yarıiletken elemanların uzunluğu L_p ve L_n 'dir. Kesit alanı ise; A_p ve A_n 'dir. Genelde L_p/A_p ve L_n/A_n oranları birbirinden farklıdır. Kolaylık olması için birbirine eşit kesit alanlarla gösterilirler. Isı enerjisi, ısı kaynağı olan B'den termoelektrik p - n çiftinin iletkenliği sayesinde ısının bırakıldığı alan olan A-C ye geçtiği kabul edilir. Birden çok sayı da termoelektrik p - n çiftlerinin, elektriksel olarak seri ve ısı olarak paralel bağlanması elektriksel gücün idaresini etkiler fakat verimliliği etkilemez.



Şekil 2.13. İdeal bir termoelektrik p - n çifti modeli (Lendecker 1976).

Termoelektrik p - n çifti iki şekilde kullanılabilir. Birincisi; güç kaynağının, A'ya negatif ve C'ye pozitif uçları bağlanır. Elektrik verildiğinde ısı pompası gibi ısı kaynağından ısı enerjisini emerek o ortamı soğutmaya çalışır. Isı kaynağında T_1 sıcaklığında oluşan ısı, Peltier etkisiyle T_2 sıcaklığında olan ve ısının atıldığı ortama pompalanır. İkinci kullanımı; A ve C arasında elektriksel dirençli bir yük konulursa, B'de ısı üretimi ve A ve C'de de ısı atılması meydana gelir yani T_1 ve T_2 sıcaklıkları arasında bir fark oluşur. Dolayısıyla bu devrede

Seebeck etkisinden dolayı bir elektrik akımı meydana gelir. Termoelektrik $p-n$ çifti üreteç (jeneratör) görevi yapar.

Çiftin başarımlı katsayısı (COP), soğutucu veya jeneratör olarak kullanıldığında önemli bir değişkenle değerlendirilir. Bu değişken termoelektrik malzemenin materyal katsayısıdır (figure-of-merit="Z") (Lendecker 1976). Aynı malzemede yüksek elektriksel iletkenlik ve termoelektrik güç ve düşük ısı iletkenliği birlikte elde etmek birimsiz bir termoelektrik katsayıyı tanımlar (ZT). Bu katsayı materyal katsayısının TEC modülün sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki ortalama sıcaklık ile çarpılarak yapılabilir.

2.3.2. Soğutma Gücü

Peltier ve Seebeck etkileri, termoelektrik $p-n$ çiftinin uçlarında olmasına rağmen, termoelektrik elemanların kesit alanlarından daha çok, hacimleriyle ilgilidir. Elektrik akımı iletkenlerden geçerken Joule yasasına bağlı olarak ısı yayar. Akımın farklı ısıdaki bir iletken geçişinde, ortamdaki ısı soğurulması veya serbest bırakılması Peltier etkisiyle açıklanır. Böylece iki termoelektrik $p-n$ çiftinin ısı kaynağı tarafından aktarılan ısı enerjisi (Şekil 2.13.'e göre);

$$Q = (\alpha_p - \alpha_n)IT_1 \quad (2.4)$$

Burada α_p ve α_n p - ve n - tipi yarıiletkenlerin Seebeck katsayılarıdır. I geçen akım ve T_1 ısı kaynağı tarafındaki sıcaklıktır. Akım geçişi termoelektrik maddede Joule yasasına göre ısı enerjisi (Q_J) üretir ve bu ısı her iki yüzeye eşit olarak yarı yarıya yayılır.

$$Q_J = I^2(R_p + R_n) \quad (2.5)$$

Burada R_p ve R_n sırasıyla p - ve n -tipi termoelektrik yarıiletken maddenin elektriksel direncidir ve toplam direnç,

$$R = R_p + R_n = \frac{\rho_p}{G_p} + \frac{\rho_n}{G_n} \quad (2.6)$$

olarak tanımlanır. ρ_p ve ρ_n ve G_p ve G_n sırasıyla p - ve n -tipi termoelektrik yarıiletken maddenin öz direnci ve geometrik şekil katsayısıdır. G_p ve G_n geometrik şekil katsayıları;

$$G_p = \frac{A_p}{L_p}, \quad ve \quad G_n = \frac{A_n}{L_n} \quad (2.7)$$

olarak tanımlanır. Burada A_p ve A_n ve L_p ve L_n sırasıyla p - ve n -tipi termoelektrik yarıiletken maddenin tesir kesiti ve ayak uzunluğudur. p - ve n -tipi termoelektrik maddenin yüzey alanlarının eşit olması durumunda $G=G_p=G_n$ olur. Akım geçmeye başladığında ısı enerjisi elektronlar ile ısı kaynağı olan B yüzeyinden ısının salındığı ortam olan A ve C yüzeylerine taşınır. Isı enerjisini taşıma oranı (Q_{hc}),

$$Q_{hc} = k(T_2 - T_1) = k \Delta T \quad (2.8)$$

bağıntısı ile verilir. Bu bağıntıdaki k ve ΔT sırasıyla yarıiletken maddelerin ısı iletkenliği ve ısı kaynağı ve ısının yayıldığı iki ortam arasındaki sıcaklık farkıdır. Her yarıiletken maddenin ısı iletkenliği k_p ve k_n ,

$$k_p = \lambda_p G_p, \quad ve \quad k_n = \lambda_n G_n \quad (2.9)$$

ve toplam ısı iletkenliği,

$$k = k_p + k_n = \lambda_p G_p + \lambda_n G_n \quad (2.10)$$

ile tanımlanır. Burada λ_p ve λ_n sırasıyla p - ve n -tipi termoelektrik yarıiletken maddelerin ısı iletkenliğidir. Yukarıdaki bağıntılardan (2.4) (2.5) ve (2.8) bir enerji eşitliği olarak birleştirilip (2.7) ve (2.9) bağıntıları yerine yazılırsa termoelektrik ısı çiftinin ısı kaynağı yüzeyindeki soğutma gücü,

$$Q_c = (\alpha_p - \alpha_n)IT_1 - k\Delta T - \frac{I^2R}{2} \quad (2.11)$$

Termoelektrik ısı çiftinin elektrik enerjisi tüketimi (Q_p) ise,

$$Q_p = I^2 R + (\alpha_p - \alpha_n) I \Delta T \quad (2.12)$$

ile tanımlanır. Eşitlik (2.11)'den elde edilen sonuç ispatlanamamıştır fakat kabul edilir. Joule ısının yarısı $\frac{I^2 R}{2}$ ısı kaynağına diğer yarısı ise ısının serbest bırakıldığı ortama geri döner (Lendecker 1976).

2.3.3. Materyal katsayısı (figure-of-merit=Z)

Eşitlik (2.11)'de görülen, Peltier'in soğutma terimi " $(\alpha_p - \alpha_n) I T_1$ ", elektrik akımı "I" ile doğru orantılıdır. Bunun yanında Joule'nin ısı terimi " $\frac{I^2 R}{2}$ ", akımın karesi ile orantılıdır. Buna göre soğutma gücü en büyük değere ulaştığında, akım I_q olmalıdır. Bu akım $dQ_c/dI = 0$ olduğunda bulunabilir. Buna göre;

$$I_q = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)}{R} T_1 \quad (2.13)$$

ve en büyük soğutma gücü;

$$(Q_c)_{max} = \left[\frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{2R} T_1^2 \right] - k \Delta T \quad (2.14)$$

Bu eşitliğe göre eğer termoelektrik çiftlerinin uçları arasında sıcaklık farkı çok büyükse pozitif soğutma gücü elde edilemez. Gerçekte aradaki en büyük sıcaklık farkı $(T_2 - T_1)_{max}$ eşitlik (2.14) $(Q_c)_{max}=0$ olduğu zaman bulunabilir. Buna göre;

$$(T_2 - T_1)_{max} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{2kR} T_1^2 \quad (2.15)$$

Termoelektrik çiftinin materyal faktörü (Z) aşağıdaki gibi ifade edilir (Rowe 2006).

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{k\rho} \quad (2.16)$$

Böylece eşitlik (2.15) yeniden yazılırsa;

$$(T_2 - T_1)_{max} = \frac{1}{2} Z T_1^2 \quad (2.17)$$

olur. Normal koşullarda, gerekli olan sıcaklık farkı (T_1-T_2) elde edilebilen en büyük sıcaklık farkından az olmalıdır (Ioffe, 1957). Eşitlik (2.17)'deki Z değeri sistemde kullanılan termoelektrik çifte aittir. Termoelektrik maddenin öz direnci ρ ve ısı iletkenliği k en küçük olduğunda, Z en büyük değerine ulaşır. Maddenin öz direnci eşitlik (2.6)'dan RG olduğundan, Z aynı zamanda geometrik şekil katsayısıyla da ters orantılıdır. p - ve n -tipi termoelektrik yarıiletken maddenin kesit alanı arttırıldığında R değeri azalır ve k değeri artar. Böylece termoelektrik maddenin geometrik özellikleri değiştirilerek, soğutma gücü elektrik akımına göre ayarlanabilir ve bu özelliğe göre termoelektrik çift imal edilebilir. Önemli olan iki termoelektrik yarıiletken maddenin geometrik şekil katsayısını G , iyi ayarlamaktır.

$$\frac{G_p}{G_n} = \frac{L_n A_p}{L_p A_n} = \left(\frac{\rho_p \lambda_n}{\rho_n \lambda_p} \right)^{1/2} \quad (2.18)$$

Eşitlik (2.18) (Rowe 2006) daha açık yazılırsa, bir çift termoelektrik yarıiletkenin Z değerine etki eden değişkenler belli olmaktadır.

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{\left[(\rho_p \lambda_p)^{1/2} + (\rho_n \lambda_n)^{1/2} \right]^2} \quad (2.19)$$

Eşitlik (2.19)'e göre Z değerinin, termoelektrik çiftindeki yarıiletken maddelerin özelliklerini temsil ettiğini göstermektedir. Seebeck ve Peltier eşitliklerinde, termoelektrik yarıiletken maddelerin özellikleri hem büyük, hem zıt işaretli olmalıdır. Bununla beraber ısı iletkenliği ve elektriksel öz direnç düşük olmalıdır. Eşitlik (2.19), her iki termoelektrik yarıiletken maddenin özelliklerini içerdiğinden bulunan sonuçlar gerçeği tam yansıtmamaktadır. Bu yüzden tek tip termoelektrik yarıiletkeni kullanmak Z değeri hesabını kolaylaştırmaktadır. Buna göre Z ;

$$Z_{p,n} = \frac{\alpha_{p,n}^2}{\rho_{p,n} \lambda_{p,n}} \quad (2.20)$$

Eşitlik (2.20)'de p - ve n -tipi termoelektrik yarıiletkenlerin değerleri birbirine eşit alınabilir. Böylece, $\alpha_p = -\alpha_n$, $\lambda_p \rho_p = \lambda_n \rho_n$ ve $Z = Z_p = Z_n$ olur. Bu durum sadece termoelektrik soğutmada kullanılan ve normal sıcaklıktaki termoelektrik yarıiletkenler için geçerlidir (Rowe 1995). Bir termoelektrik maddede aynı anda yüksek elektronik iletkenlik ve termoelektrik güç ve düşük ısı iletkenliği elde etmek birimsiz materyal katsayısı, ZT ile tanımlanır (figure of merit). Materyal katsayısı termoelektrik modülün sıcak ve soğuk yüzeylerinin ortalama değeri ile çarpılarak elde edilir.

$$Z_{p,n}T = \frac{\alpha_{p,n}^2 T}{\rho_{p,n} \lambda_{p,n}} = \frac{\alpha_{p,n}^2 T}{R_{p,n} G_{p,n} \lambda_{p,n}} \quad (2.21)$$

Her p - ve n -tipi termoelektrik yarıiletken maddenin özellikleri sıcaklıkla değişmektedir. Bundan dolayı her termoelektrik yarıiletken maddenin materyal katsayısı Z sıcaklık bağımlıdır. Madde seçiminde sıcaklığın sınırladığı materyal katsayısını büyük seçmek bir amaç olduğu gibi her p - ve n -tipi termoelektrik yarıiletken madde için geometrik şekil katsayısı G ısı taşıma kapasitesini belirlemektedir. 0-200 °C arasındaki sıcaklıklarda PbTe ve SiGe maddeleri ile ısı özelliklerine göre karşılaştırıldığında soğutma için kullanılan en uygun madde Bizmut-Tellür'dür (Bi_2Te_3).

2.3.4. Başarım Katsayısı

Bir termoelektrik çiftin başarım (performans) katsayısı (COP), elde edilen enerjinin verilen enerjiye oranı ile bulunur ve Q_c/Q_p olarak ifade edilir. Q_p , gerekli elektrik enerjisi tüketiminin değeridir. Termoelektrik p - n yarıiletken çiftinde termoelektrik maddeler ayrı ayrı incelendiğinde;

$$Q_{p_p} = \alpha_p I (T_2 - T_1) + I^2 \frac{\rho_p}{G_p} \quad (2.22)$$

$$Q_{p_n} = -\alpha_n I (T_2 - T_1) + I^2 \frac{\rho_n}{G_n}$$

olarak yazılabilir. Elektrik enerjisi tüketimi, Joule ısısından ve Seebeck etkisinden değişiminin bir fonksiyonudur. Toplam enerji tüketimi;

$$Q_p = (\alpha_p - \alpha_n)I(T_2 - T_1) + I^2R \quad (2.23)$$

olur. Kuramsal olarak başarımlar katsayısı (COP);

$$COP = \frac{Q_c}{Q_p} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)IT_1 - \frac{1}{2}I^2R - k(T_2 - T_1)}{(\alpha_p - \alpha_n)I(T_2 - T_1) + I^2R} \quad (2.24)$$

olarak elde edilir. En küçük akım, başarımlar katsayısı eşitliğini $[d(COP)/dI=0]$ sifira eşitleyerek bulunur. Bu akım;

$$I_{min} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_2 - T_1)}{R \left[(1 + ZT_m)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]} \quad (2.25)$$

Burada $T_m = (T_1 + T_2)/2$ 'ye eşittir ve ortalama sıcaklığı gösterir. En büyük başarımlar katsayısı ise;

$$COP_{max} = \frac{T_1 \left[(1 + ZT_m)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \right]}{(T_2 - T_1) \left[(1 + ZT_m)^{\frac{1}{2}} + 1 \right]} \quad (2.26)$$

olarak ifade edilir. Termoelektrik yarıiletken bir maddenin başarımlar katsayısı, sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı ile oluşan Seebeck katsayısı, elektriksel özdirenç, geometrik şekil katsayısı ve ısı iletkenliğinden oluşan birleşik etkidir.

2.3.5. Çok Katlı Soğutucular (Kaskat sistem)

Tek katlı soğutucu kullanarak ısı belirli bir noktaya düşürülebilir. Çok düşük sıcaklıklar, termoelektrik soğutucu katlar birbirine bağlanarak oluşturulan kaskat sistemlerle elde edilir. N katlı bir kaskat sistemde N'inci kat en düşük sıcaklıkta çalışan kısımdır. Böyle bir sistemin başarımlar katsayısı;

$$COP = \left[\left(1 + \frac{1}{COP^{-1}} \right)^N - 1 \right]^{-1} \quad (2.27)$$

ile ifade edilir. Çok aşamalı soğutucular, altı ya da daha fazla aşamalı olabilirler ve özel uygulamalar için tasarlanırlar. Kaskat sisteminin tipik özelliği piramit şekilde olmasıdır [Şekil (2.14)].

2.3.6. Termoelektrik Soğutucuların üstünlükleri ve olumsuz yönleri

Termoelektrik soğutucuların diğer soğutma sistemlerine göre üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

- Hareketli herhangi parçası yoktur. Çok sık bakım yapılması gerekmez.
- Uzun ömürlüdürler. Ömür testlerinde sürekli olarak 200.000 saat (>20 yıl) çalışabildikleri görülmüştür.
- Termoelektrik soğutucu, CFC'ler gibi herhangi bir soğutucu akışkanı içermez. Dolayısıyla çevre ve doğa dostudurlar.
- Termoelektrik soğutucu, ısı pompası olarak tam tersinirdir. Isının yönü DC akımın yönü değiştirilerek kolayca değiştirilebilir.
- $\pm 0.1^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında çok hassas sıcaklık kontrolü sağlanabilir.
- Çok hassas ve küçük ortamlarda çalışabilirler.

Termoelektrik soğutucular bazı olumsuz yönleri sahiptirler. Bunlar:

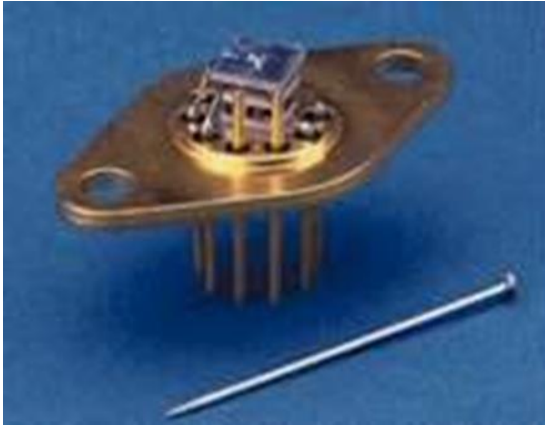
- Soğutma ve ısıtma katsayıları (COP) çok küçüktür. 0.3-0.7 arasındadır. Oysa klasik soğutma cihazlarında bu değer 2-4 arasındadır.
- Yüksek soğutma yükleri için uygun değildir.
- Şu an için pahalı bir teknolojidir, fakat son yıllarda bu konu üzerinde oldukça fazla araştırma yapılmaktadır.
- DC besleme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



Şekil 2.14. Çok katlı termoelektrik soğutucu modül.

2.3.7. Termoelektrik Soğutucuların Kullanım Alanları

Termoelektrik soğutucular yukarıda belirtilen üstünlüklerinden dolayı, tıbbi cihazlardan, günlük hayatta kullandığımız birçok cihaza kadar birçok uygulamada kullanılmaktadır. Şekil (2.15) ve Şekil (2.16) termoelektrik soğutma sisteminin uygulandığı bazı örnekleri gösterilmektedir. Çizelge 2.1.'de ise termoelektrik soğutma ürünlerinin kullanım alanları ve uygulamaları verilmiştir.



Şekil 2.15. Mikro işlemci soğutucuları.



Şekil 2.16. Oto buzdolabı.

Çizelge 2.1. Termoelektrik soğutucuların kullanım ve uygulama alanları

Askeri/Uzay araştırmaları	Elektronik soğutma, soğutulan elbise, taşınabilir soğutucu, kızılötesi algılayıcıların soğutulması, lazer diyotların soğutulması ve uzay teleskopları vb.
Bireysel	Taşınabilir ve ev soğutucuları, araba soğutucuları, taşınabilir piknik soğutucuları, motosiklet kasketi soğutucusu, taşınabilir insülin soğutucusu.
Laboratuvar ve bilimsel cihazlar	Kızılötesi algılayıcıların soğutulması, lazer diyot soğutucuları, CCD soğutucusu, bütünleşmiş devrelerin soğutulması, elektroforesis hücre soğutucusu, vb.
Endüstriyel sıcaklık kontrolü	Kritik elemanları sert çevre şartlarından koruması, PC mikroişlemcileri, mikroişlemcilerin ve bilgisayarların sayısal denetimlerinde ve robotiklerde, yazıcı ve fotokopilerde mürekkep sıcaklığının dengelenmesi, CCD kameralarda.
Çeşitli diğer amaçlar	İlaç soğutucuları (taşınabilir veya sabit), otel odaları soğutucuları, otomobil mini soğutucuları, otomobil koltuk soğutucuları, uçak içme suyu soğutucuları, yolcu otobüsü soğutucuları, gemi soğutucuları, karavan soğutucuları, kamyon soğutucusu, birçok tıbbi teşhis cihazları, vb.

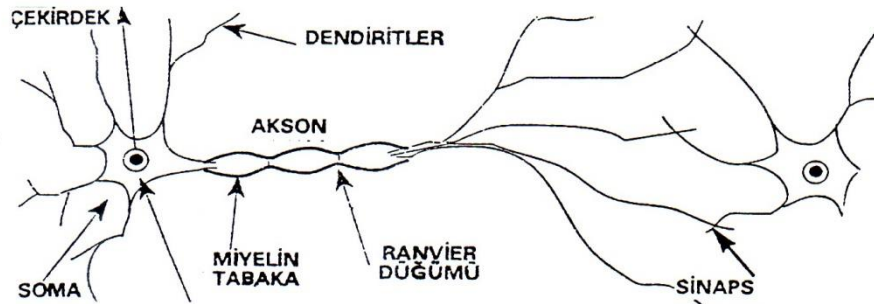
2.4. YAPAY SİNİR AĞLARI

Canlılar, cansız varlıklardan farklı olarak çevreleriyle devamlı bilgi ve madde alış-verişi yapan açık sistemlerdir. Canlı organizmalarda iç ve dış değişikliğine cevap tepkisi sinir sistemi tarafından meydana getirilir (Arbib 1987).

2.4.1. Sinir Hücresinin Yapısı

İnsanın sinir sistemi, çok çeşitli ve karmaşık faaliyetlerin denetimini sağlar. Değişik duyu organlarından gelen binlerce bilgi bu sistem sayesinde taşınır, işlenir ve bunlara uygun cevaplar hazırlanır. Sinir sistemi nöron adı verilen sinir hücrelerinden oluşmaktadır.

Şekil 2.17.'de gösterilen biyolojik sinir hücresindeki akson, hücrenin girişinden (dendrit) gelen uyarıyı, hücre merkezinden başka nöronlara ve beyine iletimde görev yapar. Sinaps ise bir nöronun alıcısı ile diğer nöronun Ranvier boğumu ve aksonuyla karşılaştığı yerdir.



Şekil 2.17. Biyolojik sinir hücresi.

Nöronlar birbirleri ile iletişim kurmak ve bu iletişim yardımıyla diğer nöronları etkileyerek çalışmaktadırlar. Bir nöronun girişleri ile diğer bir nöronun çıkışları arasındaki iletişim sinaps yardımıyla yapılır. Bir nöronda 100-1000 arasında sinaps bulunabilir. Nörondaki enerjinin toplam değeri, sinapslara gelen sinyalin değeri ve uzunluğuna bağlıdır. Diğer taraftan sinapsin kendisi de bu değerleri etkilemektedir. Bu etki, sinapsların ağırlıklarına bağlı olarak bu değerleri artırarak veya azaltarak geçirmesinde kendini göstermektedir.

2.4.2. Nöronun Matematik Modeli

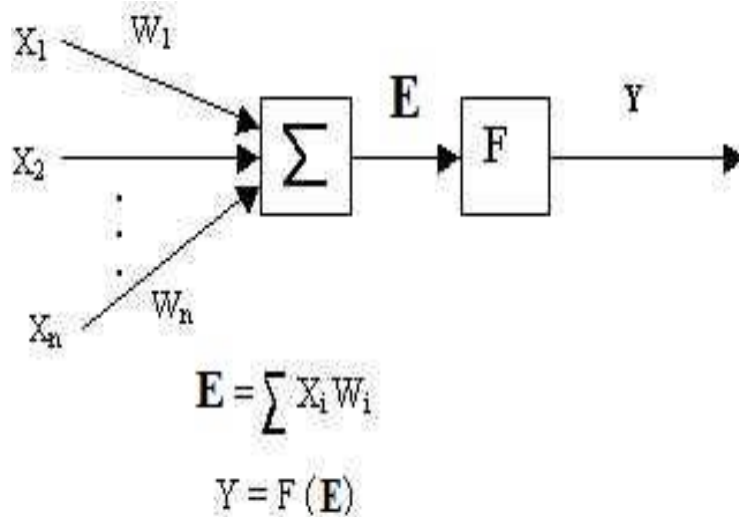
Birbirine karmaşık bir şekilde bağlanmış nöronlar bir nöron ağı oluşturmaktadırlar. Böyle bir nöron ağını matematiksel olarak modellemek için, bir nöronun girişini etkileyen sinyallerin değerlerini X_1, X_2, \dots, X_n (veya X vektörü) olarak adlandırılır. Bu değerler diğer nöronların çıkışlarıdır. X vektörünün her bir eleman sinapsin ağırlıklarına benzer olarak uygun bir W_1, W_2, \dots, W_n ağırlıkları ile çarpılır. Bu ağırlıklar pozitif ve negatif değerler alabilir. Böylece; $XW_1, X_2W_2, \dots, X_nW_n$ şeklindeki değerler bir toplam oluşturur. Bu toplam biyolojik nörondaki hücre merkezine benzemektedir. Burada bu değerler toplanır ve nörondaki toplam enerji şu şekilde belirlenir (Haykin 1994).

$$E = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (2.28)$$

Nöronda çıkış sinyalinin belirlenmesi, bu toplam değer (E) bir fonksiyonunda (F) işlenmesiyle yapılır: Bu fonksiyona aktarım fonksiyonu denilmektedir. Yani çıkış (Y),

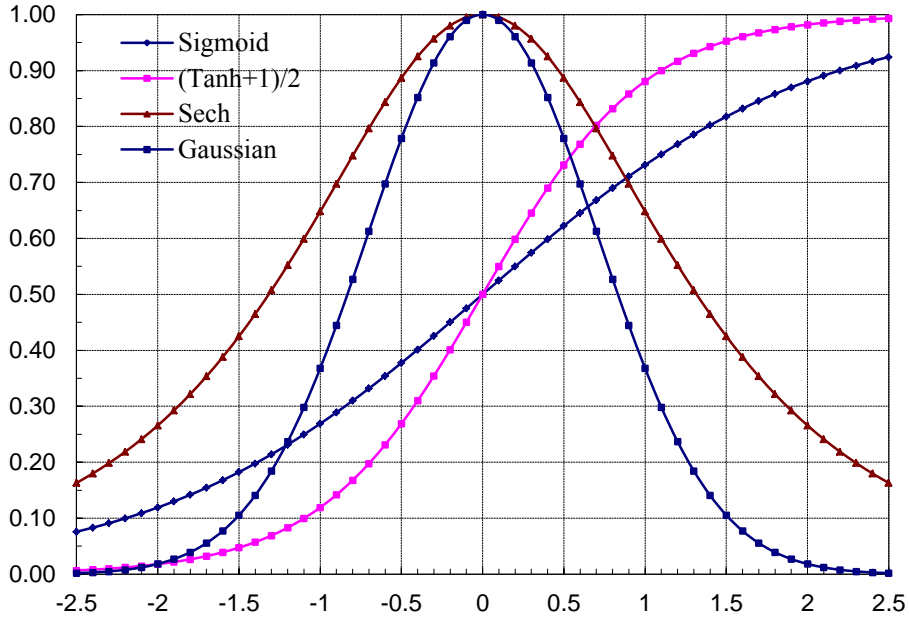
$$Y = F(E) \quad (2.29)$$

olur. Şekil 2.18.'de nöronun matematiksel modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Nöronun matematiksel modeli.

Şekil 2.19.'da ise yapay sinir ağının gizli seviye ve çıkış seviyelerinde kullanılan bazı transfer fonksiyonları ve grafikleri verilmiştir (Qnet2000 Help Manual).



Şekil 2.19. Aktarım fonksiyonları.

2.4.3. Yapay Sinir Ağları (ANN) ve Özellikleri

İnsan beyni sinaptik ilişkiler yardımı ile bir ağ oluşturan, yaklaşık 14 milyar nörondan oluşmaktadır. İnsanın tüm algılama, tanıma ve düşünme süreçleri bu ağda elektrik sinyallerinin geçmesi sonucudur. Tabii ki gerçek biyolojik nöronların sinyalleri işleme süreci çok karmaşıktır. Eğer i . nöronun X_i girişi ile ilişkisinin j . ağırlığı W_j ise ve nöronların çalışmaya başlaması eş zamanlı değilse,

$$\frac{dW_j}{dt} \ll \frac{dX_i}{dt} \quad (2.30)$$

olarak yazılabilir. Eğer iki nöron aynı anda çalışmaya başlarsa, bir nöronun aksonunu diğer nöronun merkezi ile birleştiren Ranvier boğumlarının sayısı veya boyutları artmaktadır. Her iki durumda, her iki nöron arasındaki ağırlıklı ilişkinin güçlenmesi demektir. Sinir ağlarının bazı özellikleri doğrusal olmama, öğrenme, genelleme, uyarlanabilirlik, hatayı iyileştirme, donanım ve tasarım kolaylığı olarak sıralanabilir (Haykin 1994).

ANN'nin temel işlem elemanı olan hücre doğrusal değildir. Dolayısıyla hücrelerin birleşmesinden meydana gelen ANN da doğrusal değildir ve bu özellik bütün ağa yayılmış durumdadır. Bu özelliği ile ANN, doğrusal olmayan karmaşık problemlerin çözümünde

kullanılan en önemli araçlardan birisidir. ANN'nın arzu edilen davranışı gösterebilmesi için amaca uygun olarak tasarlanması gerekir. Bu, hücreler arasında doğru bağlantıların yapılması ve bağlantıların uygun ağırlıklara sahip olması gerektiğini ifade eder. ANN'ın karmaşık yapısı nedeniyle bağlantılar ve ağırlıklar önceden ayarlı olarak verilemez. Bu nedenle ANN, istenen davranışı gösterecek şekilde ilgilendiği problemden aldığı eğitim örneklerini kullanarak problemi öğrenmelidir.

ANN, ilgilendiği problemi öğrendikten sonra eğitim sırasında karşılaşmadığı test örnekleri için de arzu edilen tepkiyi üretebilir. Örneğin, karakter tanıma amacıyla eğitilmiş bir ANN, bozuk karakter girişlerinde de doğru karakterleri verebilir veya bir sistemin eğitilmiş ANN modeli, eğitim sürecinde verilmeyen giriş sinyalleri için de sistemle aynı davranışı gösterebilir. ANN, ilgilendiği problemdeki değişikliklere göre ağırlıklarını ayarlar. Yani, belirli bir problemi çözmek amacıyla eğitilen ANN, problemdeki değişimlere göre tekrar eğitilebilir, değişimler devamlı ise gerçek zamanda da eğitime devam edilebilir. Bu özelliği ile ANN, uyarlamalı örnek tanıma, sinyal işleme, sistem tanımlama ve denetim gibi alanlarda etkin olarak kullanılır.

ANN, çok sayıda hücrenin çeşitli şekillerde bağlanmasından oluştuğundan paralel dağılmış bir yapıya sahiptir ve ağına sahip olduğu bilgi, ağıdaki bütün bağlantılar üzerine dağılmış durumdadır. Bu nedenle, eğitilmiş bir ANN'nın bazı bağlantılarının hatta bazı hücrelerinin etkisiz hale gelmesi, ağına doğru bilgi üretmesini önemli ölçüde etkilemez. Bu nedenle, geleneksel yöntemlere göre hatayı iyileştirme yetenekleri son derece yüksektir. ANN, paralel yapısı nedeniyle büyük ölçekli entegre devre teknolojisi ile kullanılabilir. Bu özellik, ANN'nın hızlı bilgi işleme yeteneğini artırır ve gerçek zamanlı uygulamalarda tercih edilir.

ANN'nın temel işlem elemanı olan hücrenin yapısı ve modeli, bütün ANN yapılarında yaklaşık aynıdır. Dolayısıyla, ANN'nın farklı uygulama alanlarındaki yapıları da standart yapıdaki bu hücrelerden oluşacaktır. Bu nedenle, farklı uygulama alanlarında kullanılan ANN'ları benzer öğrenme algoritmalarını ve kuramlarını paylaşabilirler. Bu özellik, problemlerin ANN ile çözümünde önemli bir kolaylık getirir.

Yapay sinir ağları biyolojik sistemlerden esinlenerek geliştirilmiş bilgisayar programlarıdır. Canlılarda değişik duyu organlarından gelen birçok bilgi, sinir sistemi sayesinde beyne ulaşarak öğrenme, tepki verme vb. davranışlar sergilenir. Beyin, çok sayıda ($\sim 10^{11}$) ve

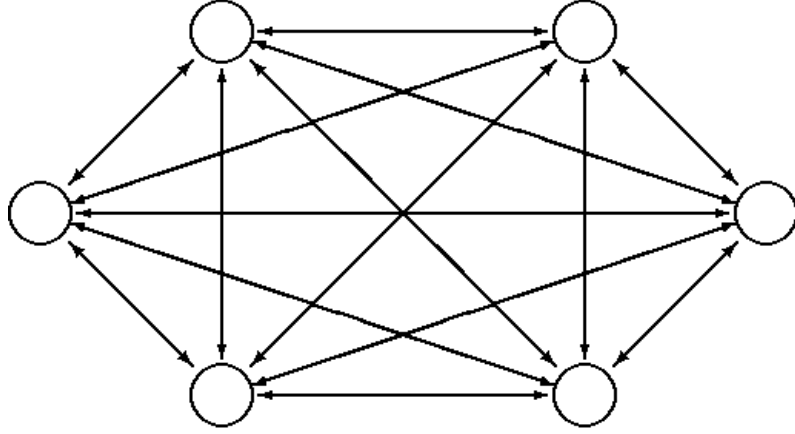
birbirleri ile çoklu bağlantıya ($\sim 10^4$) sahip nöronlardan oluşur. Nöronlar üç temel bileşene sahiptirler: Dendritler, hücre gövdesi ve aksonlar. Dendritler, duyu organlarından gelen elektriksel sinyalleri sinir hücresine ileten alıcı (reseptör) dallardır. Hücre gövdesi, gelen bu elektrik sinyallerini toplamak ile görevlidir. Aksonlar ise diğer nöronlar ile bağlantıyı sağlayan ince teli yapılarıdır. Bir nörona ait akson ile diğer bir nörona ait dendritlerin birleşme noktasına sinaps denir. Biyolojik iki nöronun şematik diyagramı Şekil 2.17'de gösterilmiştir.

Yapay sinir ağları beyin kadar karmaşık yapıda olmamasına rağmen aralarında iki önemli benzerlik vardır. Bunlardan birincisi, her iki ağ da birbirleri ile çok sayıda bağlantıya sahip hesaplama seviyelerinden oluşmaktadır. Diğeri ise nöronlar arasındaki bağlantıların, ağın fonksiyonunu belirlemesidir (Hagan 1996).

2.4.4. Sinir Ağlarının Oluşturulması

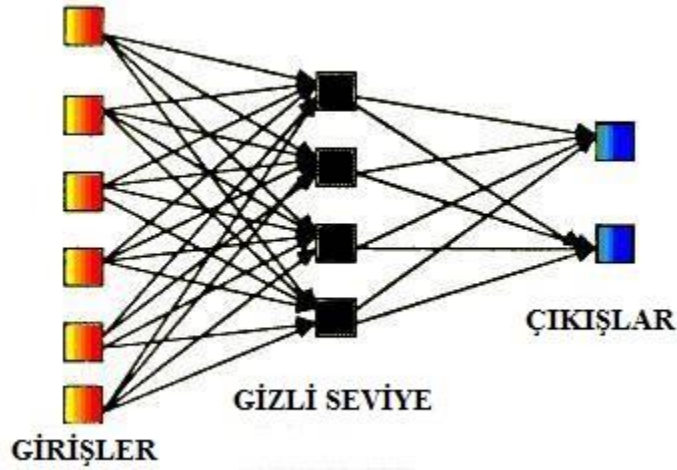
Bir sinir ağı birbiri ile ilişkilendirilmiş nöronlar topluluğudur. Bir ağın hesaplama gücü bu ilişkilerle belirlenmektedir. İlişkiler bazı nöronların çıkışlarını diğerlerinin girişine birleştirmektedir ve bunlar da ağırlık katsayıları ile verilmektedir. Bundan dolayı bir nöronun davranışının diğerine etkisi onlar arasındaki ilişkinin ağırlığıyla ilgilidir. Sinir ağındaki ilişkilerin düzeni, sinir ağının mimarisini veya modelin oluşturulmasının temelidir. Genelde nöronlar arasındaki ilişkilere göre tam ilişkili veya kademeli (hiyerarşik) olmak üzere iki sınıf mimarinin olduğu söylenebilir.

Tam ilişkili ağlarda, tüm elemanlar birbiri ile birleştirilmişler. Sinir ağında bu, her bir nöron çıkışının diğer tüm nöronların girişleri ile ilişkilendirilmesi demektir. Ayrıca her bir nöron kendine de ilişkilendirilmiştir. M nöronu olan böyle bir ağda nöronlar arası ilişkilerin sayısı $M \times M$ olacaktır. Şekil 2.20 beş nörondan oluşan tam ilişkili bir ağı göstermektedir.



Şekil 2.20. Tam ilişkili yapay sinir ağı.

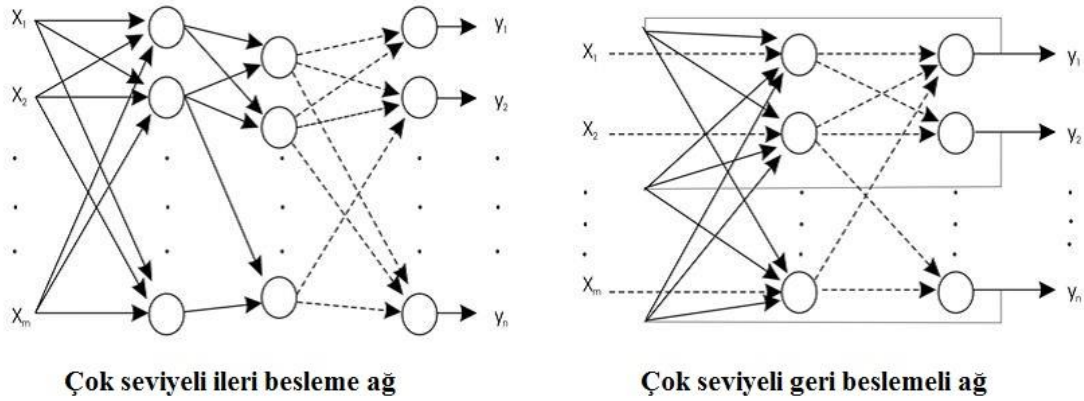
Kademeli yapıda ise nöron grupları ayrı ayrı seviyelere yerleştirilmiştir. Her bir seviyedeki nöronlar önceki ve sonraki seviyelerdeki nöronlarla ilişkilendirilmiştir. Burada giriş ve çıkış seviyelerini özel olarak ayırmak gerekmektedir. Giriş katındaki nöronlar giriş verilerini diğer katlara iletir. Giriş seviyesi ile çıkış seviyesi arasında kalan seviyelere gizli seviye denilmektedir, çünkü bu seviyenin, Şekil 2.21.'de görüldüğü gibi doğrudan dış ortamla ilişkisi yoktur.



Şekil 2.21. Kademeli ilişki.

Sinir ağında giriş verilerinin iletim yönüne göre, geri beslemesiz ve ileri beslemeli olmak üzere iki tür ağ mevcuttur (Efe 2000). İleri beslemeli ağlarda verilerin iletim yönü yalnız girişten çıkışa doğru yönlendirilmektedir. Geri beslemeli ağlarda ise bir seviyedeki nöron, kendi

kendinden ve kendi seviyesindeki diğer nöronlardan veya diğer kattaki nöronlardan veri alabilmektedir. Şekil 2.22’de geri beslemesiz ve geri beslemeli sinir ağları görülmektedir. Eğer geri beslemeli ağda nöronlar arasındaki ilişki engelleyici ise yani nöronlar negatif ağırlığa sahip iseler, böyle ağlara engellemeli ağ olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca sinir ağında katların veya seviyelerin sayısının artırılması, hesaplama gücünün, yani daha karmaşık fonksiyonlar elde etme imkanının artmasını sağlar.



Şekil 2.22. İleri beslemeli (nonrecurrent) ve geri beslemeli (recurrent) yapay sinir ağı.

2.4.5. Yapay Sinir Ağlarının Öğrenme Yöntemleri

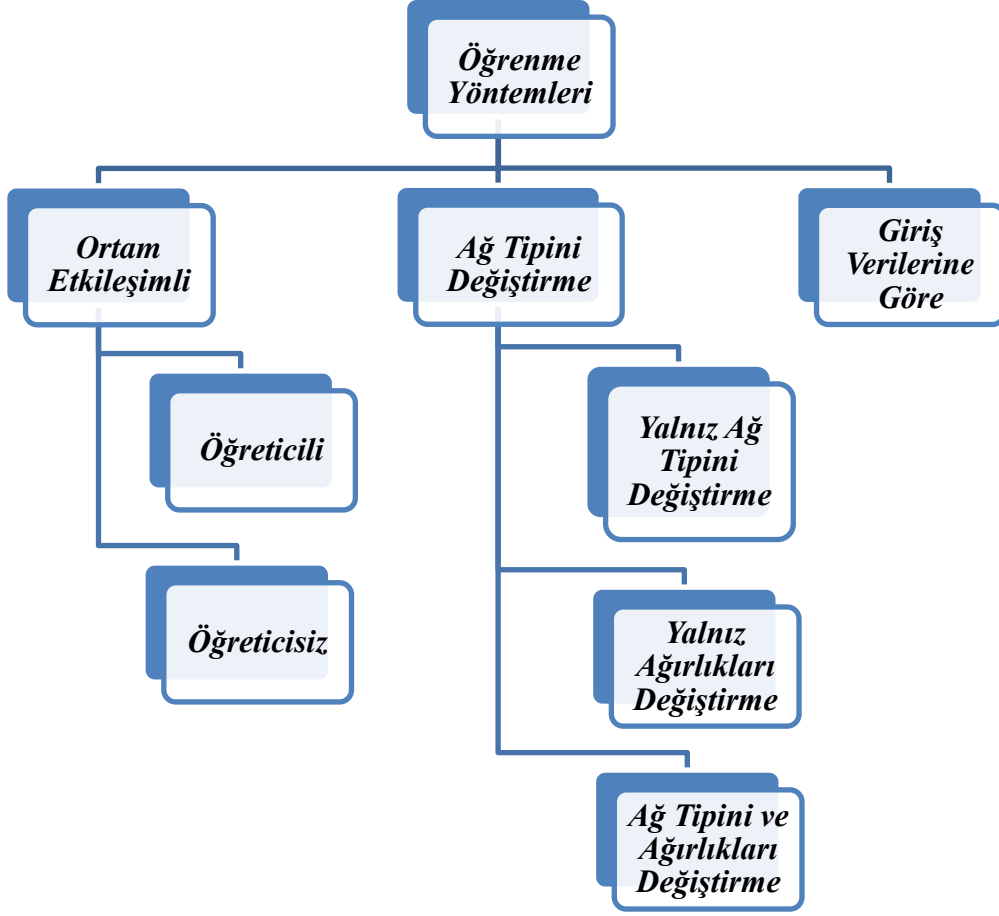
Bir yapay sinir ağı tasarlamak için önce gizli seviyelerin sayısını, sonra gizli seviyedeki nöronların sayısı, daha sonra nöronlar arasındaki ilişkilerin ağırlığını ve daha birçok parametreyi belirlemek gerekmektedir. Bir sinir ağı ilk çalışmaya başladığında ağırlık katsayıları rasgele verilir ve bu yüzden ağ henüz doğru olarak çalışmaya hazır değildir. Ağın doğru olarak çalışabilmesi için, öğrenme işlemi yapılarak eğitilmesi gerekmektedir. Eğitim sürecinde, ağın yapısı ve diğer parametreler öğrenme durumuna göre değiştirilebilir. Öğrenme sonucunda ağın verdiği sonuçlar hedef verilere istenilen sınırlar içinde ulaşınca ağın sistemi öğrendiği kabul edilir. Ağ tipinin belirlenmesi gizli seviyelerin sayısının ve öğrenme algoritmalarının seçimi, kullanıcının deneyimine bağlıdır (Boozarjomehry 2001). Çünkü problemin tipine bağlı olarak ağın yapısı da değişmektedir. Şekil 2.23’de öğrenme yöntemlerinin genel bir sınıflandırılması gösterilmiştir.

Yapay sinir ağları (ANN), hem kavramsal yenilikler hem de uygulama gelişimi ile birlikte ilerlemiştir. Yapay sinir ağları üzerindeki çalışmalar 19. yy sonunda başlamıştır. Bu alışmalar Hermann von Helmholtz, Ernst Mach ve Ivan Pavlov gibi bilim insanları tarafından yapılan fizik, psikoloji ve nöropsikoloji alanlarındaki disiplinler arası çalışmalardan oluşmaktaydı. Ancak bu ilk çalışmalar genellikle öğrenme, önsezi, koşullandırma vb. gibi genel teoriler üzerine yapılmıştı ve özel matematiksel modelleri içermemekteydi.

Yapay sinir ağlarını kullanan modern çalışmalar ilk olarak 1940'ların başlangıcında Warren McCulloch ve Walter Pitts tarafından yapılmıştır. McCulloch ve Pitts, ilkesel olarak, yapay nöronlardan oluşan ağların herhangi bir aritmetik ya da mantıksal fonksiyonu hesaplayabileceğini göstermişlerdir. Yapay sinir ağlarının ilk uygulaması, 1950'lerin sonunda Frank Rosenblatt tarafından, ilk algılayıcı ağ (perceptron network) ve bu ağın öğrenme kurallarının keşfi ile olmuştur. Rosenblatt ve çalışma arkadaşları, bu algılayıcı ağ ile Şekil tanınması yapılabileceğini göstermişlerdir. Bu alışma yapay sinir ağlarına olan ilgiyi arttırmasına rağmen, temel algılayıcı ağ daha karmaşık problemlerin üzümünde yetersiz kalmıştır.

Bununla birlikte yapay sinir ağları üzerine olan çalışmalar daha sonraları da devam etmiştir. 1972'de, Teuvo Kohonen ve James Anderson, birbirlerinden bağımsız olarak, insan hafızası gibi işlev görev gören yeni yapay sinir ağları (Kohonen ağları) geliştirmişlerdir. Ancak, yeni düşüncelerin ve bilgisayarların yetersizliklerinden dolayı bu dönemde yapay sinir ağları üzerinde kısıtlı düzeyde gelişme sağlanmıştır. 1980 yılından sonra, daha hızlı kişisel bilgisayarların ve çalışma istasyonlarının geliştirilmesi ve bunların yaygınlaşması ve ayrıca yeni kavramların ortaya atılması ile yapay sinir ağları üzerindeki araştırmalar birdenbire artış göstermiştir.

Bu dönemde göze çarpan iki kavram vardır. Bunlardan ilki, yardımcı hafıza olarak kullanılabilen yayılımlı ağların (recurrent network) alışma ilkesini açıklayan istatistiksel mekaniğin kullanımınıdır. Bu kavram, fizikçi John Hopfield tarafından tanımlanmıştır (Hopfield ağı). İkinci önemli kavram ise çeşitli araştırmacılar tarafından bağımsız olarak geliştirilen, çok katmanlı tanımlayıcı ağ (multilayer perceptron network) için geri yayılımlı (backpropagation) ğrenme algoritmasıdır. Geri yayılımlı öğrenme algoritması hakkındaki en önemli alışma David Rumelhart ve James McClelland tarafından 1986 yılında yayımlanmıştır.



Şekil 2.14. Öğrenme yöntemleri.

2.4.5.1. Öğreticili Öğrenme Yöntemi

Çevre ile en sıkı ilişkili eğitim yöntemidir. Bu yöntemde giriş vektörleri kümesi ve onlara uygun çıkış vektörleri önceden bellidir. En önemli öğreticili öğrenme algoritması geri yayımlı algoritmadır. Öğrenmemiş yapay sinir ağı modelinde giriş vektörü X , genellikle hedef verilerden çok farklı olan çıkış vektörünün Y bir ürünüdür. Bu ağ, deneysel olarak elde edilmiş ve ağa hedef olarak verilmiş vektörler Y_r ile ve giriş vektörlerini temsil eden X vektörü ile beslenir. Y ve Y_r arasındaki fark azalınca kadar program çalıştırılır (Gurney 1999).

Gizli seviye veya çıkış seviyesindeki herhangi bir j nöronu için hata;

$$\Delta w = a\delta_j x_{ji}^l \quad (2.31)$$

şeklinde ifade edilir. burada a ağın öğrenme oranı, x_{ji}^l j'inci giriş verisidir. Ayrıca;

$$\delta_j = F'(b_j) \sum_{r=s_j} \delta_r w_{rj} \quad (2.32)$$

ve çıkış nöronu için,

$$\delta_j = F'(b_j)(u_j^l - y_j^l) \quad (2.33)$$

olur. δ_j gizli seviyede j'inci nöronun hatası, F' aktarım fonksiyonu, b_j j'inci nöronun ağırlığı, u_j^l j'inci nöronun hedef değeri, y_j^l j'inci nöronun çıkış değeri ve x_{ji}^l j'inci giriş verisidir. Yapay sinir ağı bu bağıntıları kullanarak sırası ile;

- Ağırlıklar rasgele küçük değerler için başlatılır,
- Ağa giriş seviyesi girilir,
- Gizli seviyelerde, giriş verileri kullanılarak çıkış verileri hesaplanır,
- Çıkış seviyesinde gizli seviyelerde elde edilen veriler hesaplanır,
- Hedef veriler çıkış seviyesine girilir,
- δ_j değeri çıkış nöronunda hesaplanır,
- Her çıkış nöronu öğrenmeye başlar,
- δ_j her gizli seviyedeki nöron için hesaplanır,
- Gizli seviyelerdeki her nöron δ_j değerini kullanarak öğrenir.

2.4.5.2. Öğreticisiz Öğrenme Yöntemi

Bu tür algoritmalarda yalnızca giriş vektörleri bellidir. Çıkış verileri ile hatanın değerleri belli değildir. Hopfield ve Kohonen (Garupe 1997) algoritmaları en yaygın kullanılanlarıdır.

Hopfield yöntemi iki nöron arasındaki ilişkinin güçlenmesi ilkesine göre çalışır. Giriş nöronları doğrudan diğer nöronlara bağlanarak ağda giriş nöronlarının oluşturduğu vektör X ve diğer nöronların çıkışının oluşturduğu vektör Y 'dir. her giriş nöronu diğerine w_{ij} ağırlıkla bağlanmıştır ve toplam bir w vektörü oluşturur. Öğrenme süreci w matrisinin elemanlarının denetlenmesi ile oluşmaktadır. w matrisinin her elemanının değiştirilmesi,

$$\Delta w_{ij} = E_n X_i Y_j \quad (2.34)$$

ifadesi ile belirlenmektedir. Burada E_h öğrenme hızını gösteren sabit bir değerdir. Vektörel dönüşümler kullanılarak bu ifade;

$$\Delta w_{ij} = E_h Y X^T \quad (2.35)$$

yazılabilir. Yeni ağırlık değerleri ise,

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \Delta w_{ij}(n+1) \quad (2.36)$$

Bu ifade Hopfield algoritmasını vermektedir. Hopfield algoritmasında ağı çalışmasında her zaman belli bir hatanın olmaması için tüm giriş vektörlerinin ortogonal olması gerekir.

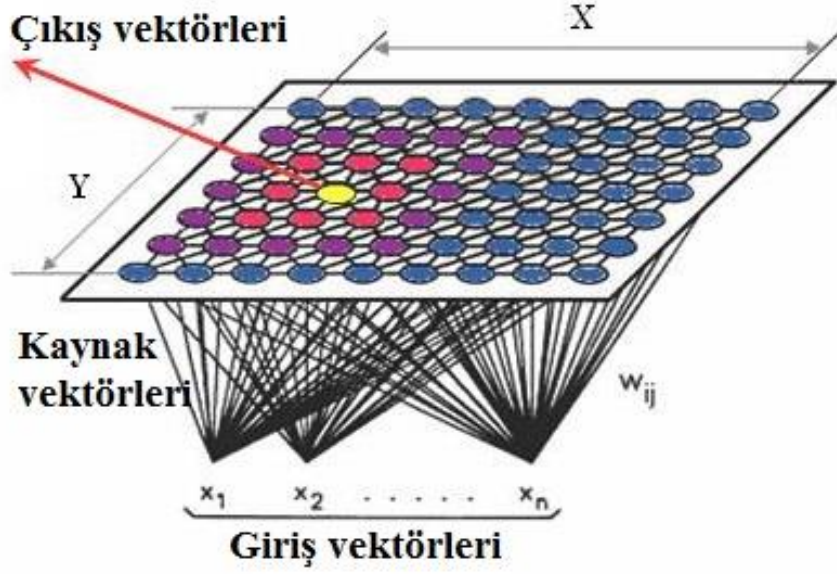
$$X_1 X_2 X_3 \dots \dots \dots X_n = 0 \quad (2.37)$$

Böylece Hopfield algoritması öğreticisiz, yani hedef çıkışın dikkate almadan yalnızca iki bölgesel nöronun karşılıklı ilişkisini dikkate alarak yapılan bir öğrenme algoritmasıdır.

Kohonen algoritması Hopfield algoritmasının geliştirilmiş ve genelleştirilmiş şeklidir. Kohonen ağı bir girişi ve bir çıkış seviyesi olmak üzere iki seviyeden oluşur. Şekil 2.15 sembolik Kohonen ağını göstermektedir. Çıkış seviyesindeki işlemci vektörler genellikle düzenli iki boyutlu aralıklar olarak düzenlenir. Çıkıştaki her işlemci vektörü, bütün giriş vektörlerine bağlıdır. Bağlantıların ağırlıkları verilen çıkış işlemci vektörleri ile ilgili olan kaynak vektörünün elemanlarını oluşturur.

Kohonen ağının öğrenme adımları;

- Çıkış işlemci vektörleri bütün kaynak vektörlerini küçük rasgele değerleri olarak alınır,
- Bir giriş seviyesi oluşturulur,
- Kazanan giriş verisine en yakın kaynak vektörüne sahip işlemci vektörü kazanan çıkış vektörü belirlenir,
- Kazanan işlemci elemanın ve onun komşularının kaynak vektörünü güncelleştirilir.



Şekil 2.15. Sembolik bir Kohonen ağı.

Kaynak vektörleri giriş vektörlerine yaklaştırılır. Bu ayarlama kazanan işlemci vektörü için en fazla, bu işlemci vektörden uzaklaştıkça azalmaktadır. Öğrenme ilerledikçe komşuların sayısı azalmakta ve öğrenme sonunda sadece kazanan işlemci vektörü kaynak vektörünü ayarlamaktadır. İyi öğrenmiş bir Kohonen ağında birbirine yakın çıkış işlemci vektörlerinin kaynak vektörleri vardır. Öğrenmeden sonra iyi bir etiketleme işlemi yapılır. Bilinen sınıfların giriş verileri ağına giriş olarak verilir ve bu giriş verileri tarafından aktif hale gelen çıkış işlemci vektörlerine bu sınıfın etiketi verilir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

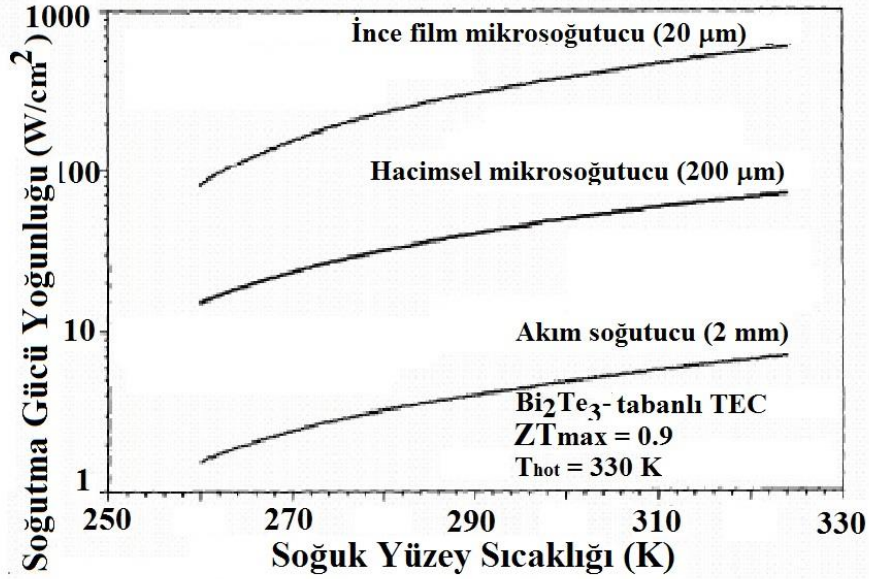
3.1. FEM İLE BENZEŞİM

Bir TEC modülü en iyi başarı için en uygun ısıl özelliklere ve geometrik boyutlara sahip olmalıdır. Bu sebepten, soğutma işleminde COP'nin artması için aşağıdaki değişkenler dikkate alınmalıdır (Simons and Chu 2000);

- 1) Optimum akım ($\frac{\partial COP}{\partial I} = 0$) (kuramsal),
- 2) İki yüzey arasındaki en büyük sıcaklık farkı ($\Delta T = \frac{1}{2}(T_h + T_c)$) (kuramsal),
- 3) Termoelektrik maddeye ve çalışma sıcaklığına uygun Seebeck katsayısı. (0-200 °C sıcaklık aralığı için Bi_2Te_3 en iyi maddedir),
- 4) Özdirenç (Bi_2Te_3),
- 5) Termal iletkenlik (Bi_2Te_3),
- 6) G geometrik şekil faktörü farklı boyutlar için araştırılmalıdır (Simons and Chu 2000)!

İnce film termoelektrik soğutucular potansiyel üstünlüklere sahiptir. İnce film soğutucuların başlıca üstünlüğü termoelektrik madde ayakların uzunluğu ile soğutma gücü ters orantılı olduğundan soğutma gücünde meydana gelen anlamlı artıştır. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi 100 W/cm^2 'nin üstünde bir soğutma güç yoğunluğu elde etmek için termoelektrik çiftin ayak uzunlukları 20 ile 50 μm arasında olmalıdır.

Termoelektrik soğutma sistemini oluşturan modüllerin fiziksel boyutlarının soğutma kapasitesi üzerine etkisinin ANSYS Workbench benzeşim programı ile modellenerek sonuçlar incelenmiştir (Güldiken 2011). Bu inceleme için dört farklı tasarım yapılmıştır. Analizi yapılan tüm modellerde aynı termoelektrik değişkenler kullanılmıştır. Fakat her birinde modüllerin fiziksel boyutları ve meydana getirdikleri termoelektrik soğutma sisteminin etki ettiği yüzey alanları farklıdır. Çizelge 3.1. kullanılan modüllerin termoelektrik değişkenlerini göstermektedir.



Şekil 3.1. Farklı şekil katsayıları için soğuk yüzey sıcaklığı ile soğutma gücü yoğunluğunun değişimi (Simons and Chu 2000).

Çizelge 3.1. Kullanılan malzemelerin termoelektrik parametreleri

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

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

Birbirine eşdeğer 15 çift *p* ve *n* çeşit yarıiletken malzemeden oluşan dört çeşit TEC modülünün modeli yapılmıştır [Şekil 3.2a] (Güldiken 2011). Farklı ayak uzunluğunda (*L*) ve genişlikte (*w*), yarıiletken Bi_2Te_3 *p* ve *n* çeşit yarıiletken elemanlar elektriksel olarak seri

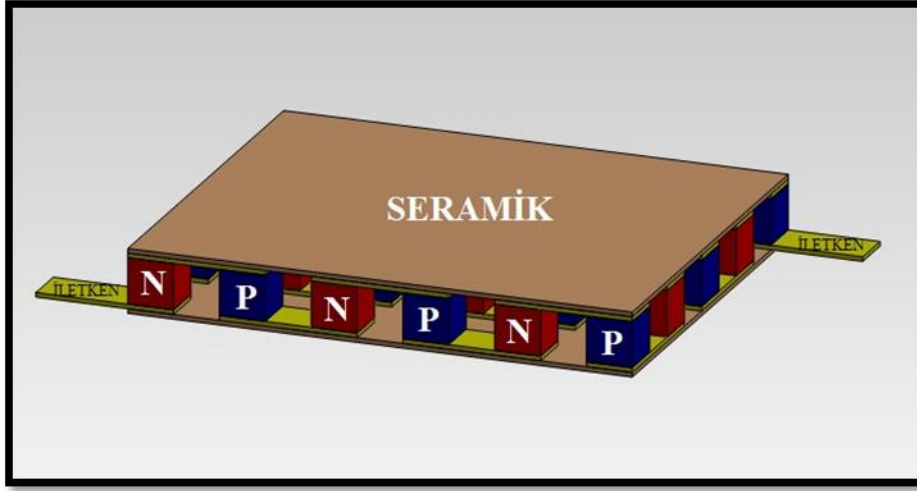
gümüş metal levhalar ile ve termal olarak birbirine paralel bağlanmışlar ve kare yüzey alanı (S) olacak şekilde seramik Al_2O_3 levhaların arasına yerleştirilmişlerdir. *n*-tipi, Arsenik (As), Fosfor (P), Bizmut (Bi) veya Antimon'dur (Sb) katkılı Bi_2Te_3 , *p*-tipi ise İndiyum (In) veya Bor (B) katkılı Bi_2Te_3 , iletkenler gümüşten (Ag) ve sandviç yüzey yalıtkan seramikten oluşmaktadır. TEC modüllerin geometrik boyutları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Termoelektrik soğutma benzeşimleri ANSYS® Workbench modelleme yazılımı ile yapılmıştır. Termal ve elektriksel skalar potansiyel vektörler sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak hesaplanmıştır. Problemi çözmek için elde edilen en uygun çözüm ağı birçok denemeden sonra elde edilmiş ve FEM çözümlerinde altıgen ve dörtgen eleman çeşitleri kullanılmıştır [Şekil 3.2b]. Sonucu etkileyecek önemli bölgeler olmadığından düzgün bir ağ tercih edilmiştir. Gümüş iletkenlerde ve seramik levhada dörtgen ağ kullanılırken *p* ve *n* çeşit yarıiletken maddede altıgen ağ kullanılmıştır. Soğuk yüzey sıcaklığı 260 ve 325 K arasında değişirken sıcak yüzey sıcaklığı 330 K'de sabit tutulmuştur. Soğutma gücü (Q_c), elektrik enerjisi tüketimi (Q_p) ve soğutma başarımlarını COP her iki yüzeydeki değişen sıcaklık farkı için termoelektrik elemanlardan geçen farklı akımlarla benzeşim yapılmıştır.

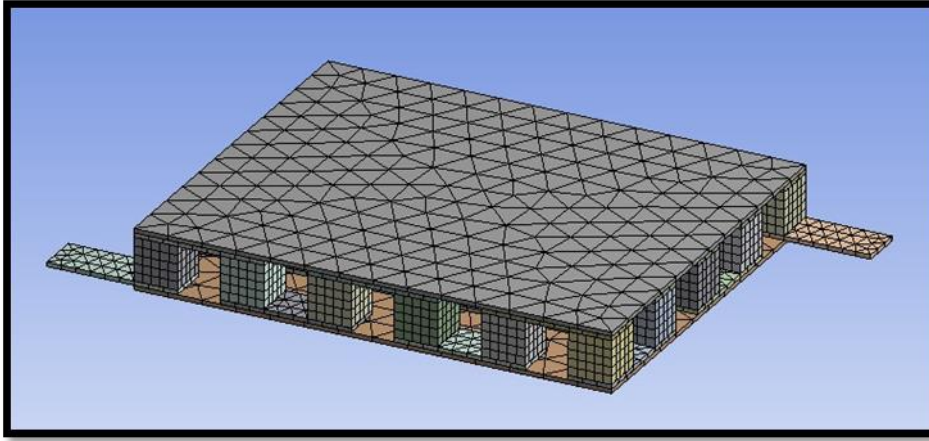
Termoelektrik soğutma sistemlerinin modellenmesi, soğutma gücünün ısı çifti sayısı (*n*) ile doğru orantılı olmasından ve sistemin tamamının analizinin yapılması mümkün olmamasından dolayı, 15 çiftten oluşan birim bölge referans olarak belirlenmiş ve 3-boyutlu olarak tasarlanmıştır (Güldiken 2011). Modeldeki uzunluklar gerçek sisteme uygun olarak girilmiştir.

Çizelge 3.2. Modellenen TEC modüllerinin geometrik boyutları

Modüle No	L	w	S
1	1 cm	1 cm	100 cm ²
2	1 mm	1 mm	100 mm ²
3	100 µm	100 µm	1mm ²
4	1 µm	1 µm	100 µm ²



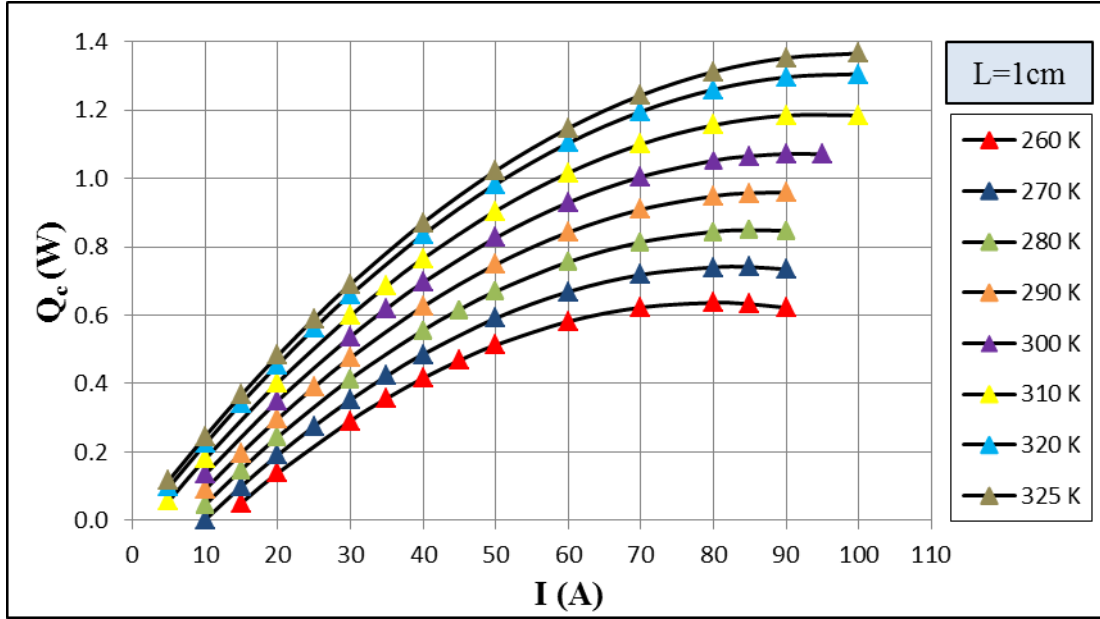
(a)



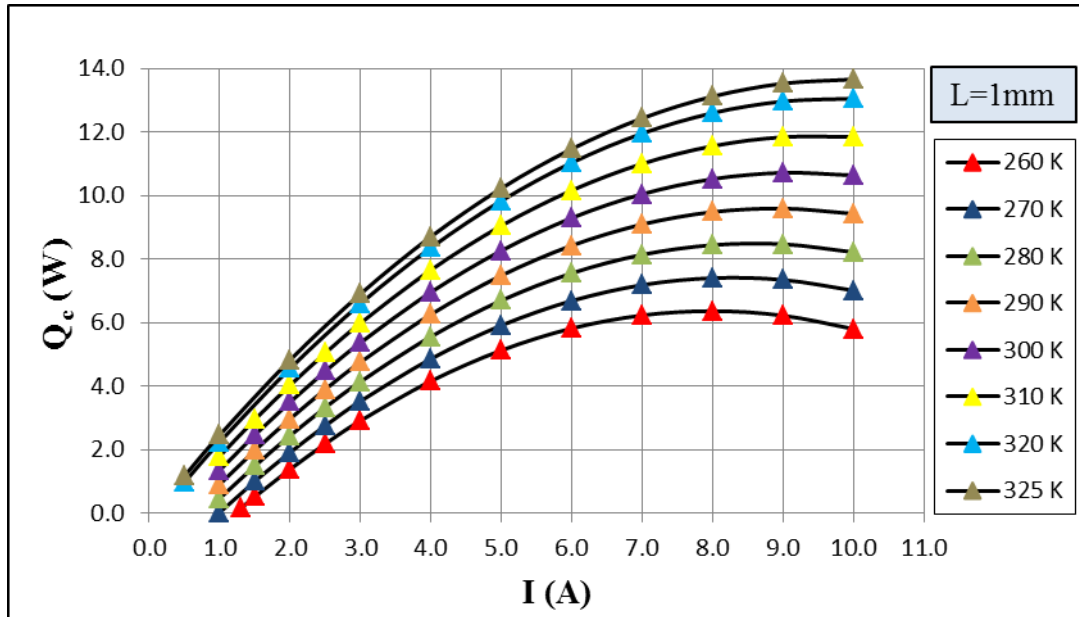
(b)

Şekil 3.2. a) Bir TEC modülün modellenmesi ve b) çözüm ağı (Güldiken 2011)

Şekil 3.3, No1, No2, No3 ve No4 model numaralı TEC modüllerinden elde edilen termal çözümleri göstermektedir. No1 modelinde soğutma gücü, devreden geçen akıma bağlı olarak yaklaşık 80 A akım değerinde en büyük olmaktadır, daha büyük akım değerlerinde yavaşça azalmaktadır. En büyük Q_C değeri 325 K soğuk yüzey sıcaklığında elde edilmiştir. No2 ve No3 modellerinde de Q_C No1 modelindeki gibi aynı eğilimle değişmektedir. Ancak G şekil katsayısı azalırken akım da azalmaktadır.

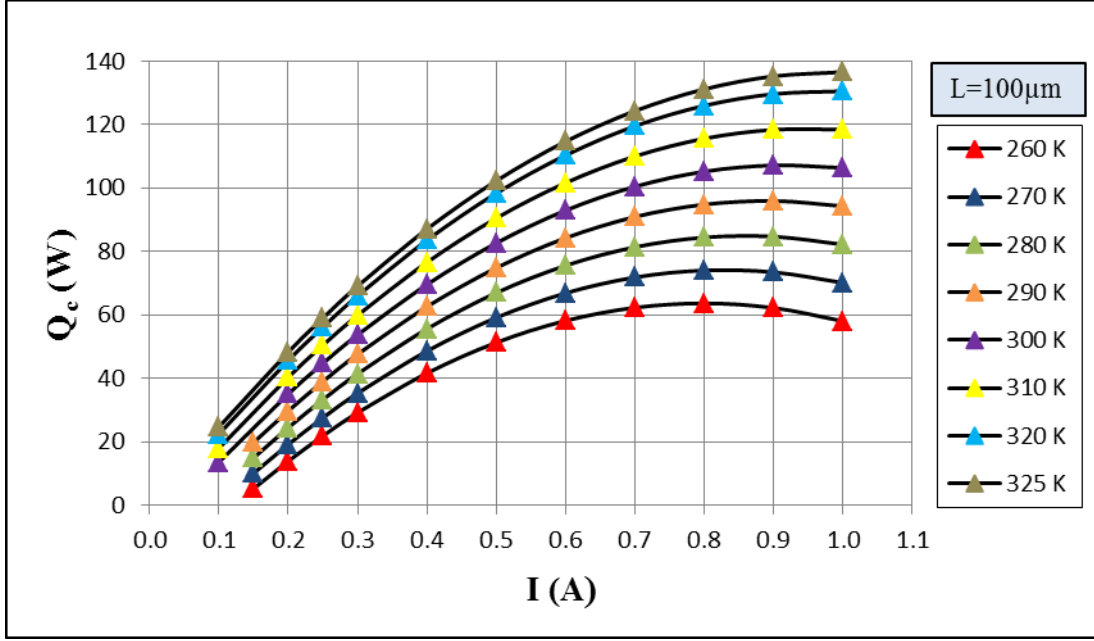


(a)

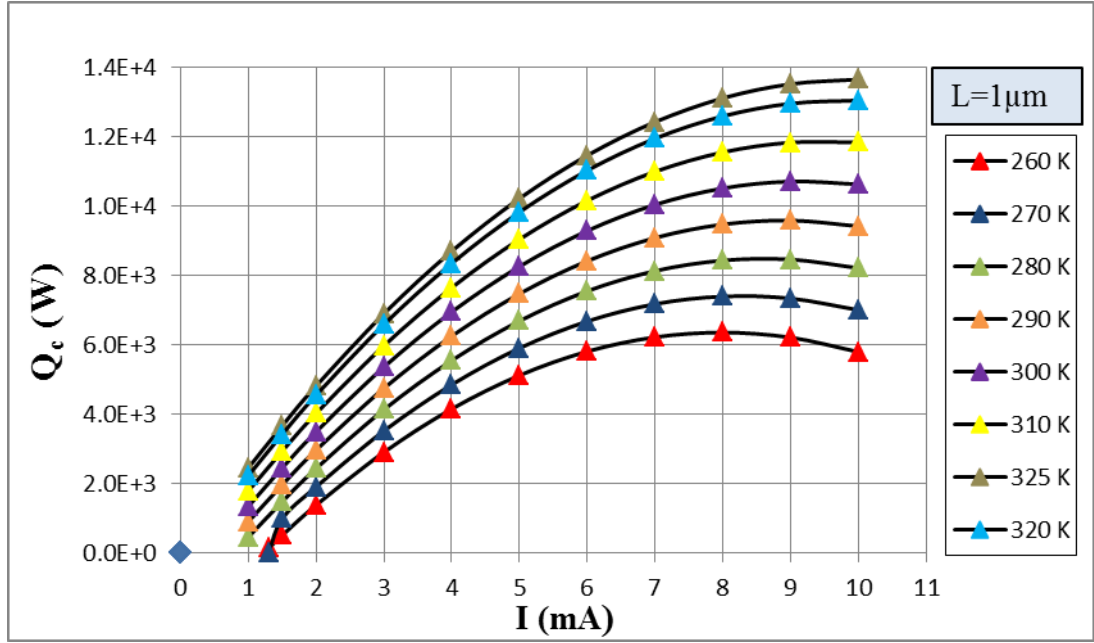


(b)

Şekil 3.3. 260 - 325 K sıcaklık aralığında TEC modellerinde geçen akım ile soğutma gücünün değişimi a) No1, b) No2 (Güldiken 2011).



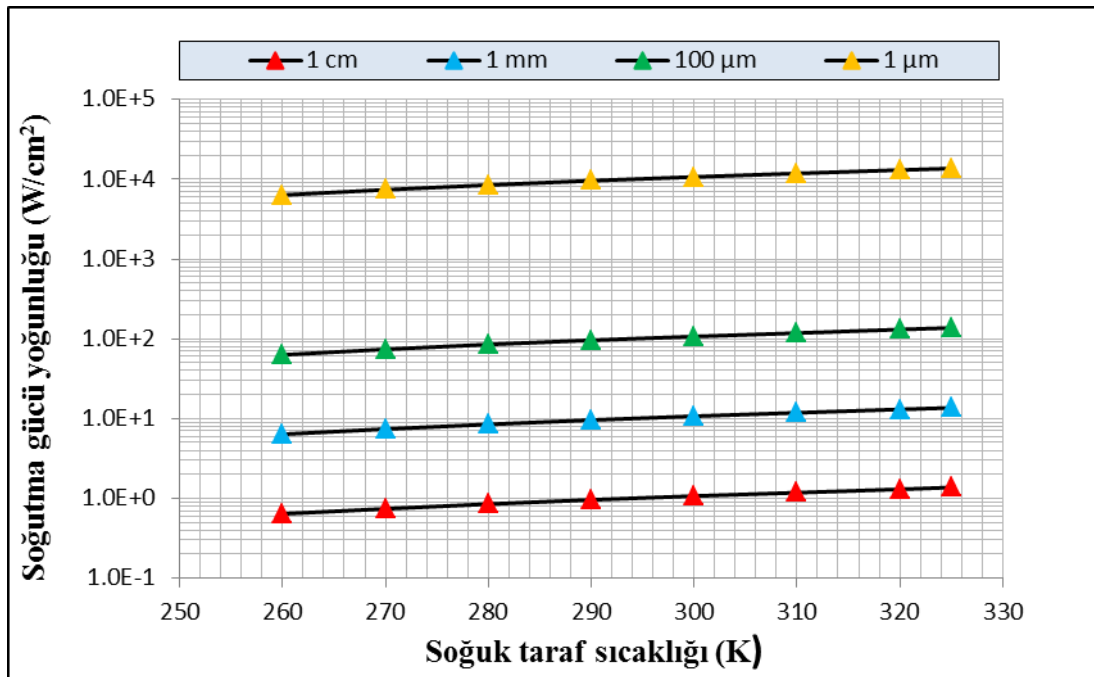
(c)



(d)

Şekil 3.3. 260 - 325 K sıcaklık aralığında TEC modellerinde geçen akım ile soğutma gücünün değişimi c) No3 ve d) No4 (Güldiken 2011).

No4 modelindeki sonuçlar oldukça anlamlıdır. Termoelektrik çiftlerden geçen akım 10^{-4} azalırken soğutma gücü 10^4 ile artmaktadır [Şekil 3.3d]. Termoelektrik ayakların uzunluğu 1 cm'den $1 \mu\text{m}$ 'ye 10^{-4} ile azalmıştır. Böylece benzeşim sonuçları kuramsal değerlerle uyumludur. Yani, soğutma gücü yoğunluğu termoelektrik ayakların uzunluğu ile ters orantılı değiştiğinden ince film soğutucular yüksek soğutma gücüne sahip olduğu görülmektedir [Şekil 3.4] (Güldiken 2011). Termoelektrik soğutma çiftleri etkin soğutma yüzeyi ile doğrudan ilişkilidir. No4 modelinde 325 K sıcaklıkta soğutma başarımı 1.4 kW değerine ulaşırken aynı sıcaklık aralığında No1 modelinde sadece 1.4 W değerindedir.



Şekil 3.4. Birim yüzey için soğuk yüzey sıcaklığı ile soğutma gücünün yoğunluğunun değişimi (Güldiken 2011).

3.2. YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TAHMİN

ANN kullanımı son on yılda oldukça rağbet görmektedir (Miti 2003, Laidi 2013). Bunun sebebi; yapay sinir ağları geleneksel matematiğin, algoritmaların ve yöntemlerin kabul edilebilir ve doyurucu bir çözüm bulamadığı problemlere güncel ve modern bir çözüm

sağlamasıdır. ANN, nöron olarak isimlendirilen birbirine bağlantıları içeren bir devre yapısında ve insan beyninin çalışmasından esinlenmiştir (Gurney 1999).

Giriş nöronlarına veriler uygulandığında devre ağırlıklı katsayılar ile girişleri düzenleyerek bir veya daha fazla verilen problemi en uygun bir cevapla çözen bir çıkış verir. Genellikle giriş ile çıkış verilerinin uygunluğunu denetleyen geri beslemeli ANN kullanılır. En yaygın ANN ileri doğru akışı bulunan çok katmanlı algılama devresidir (Graupe 1997). Bunlar üç seviyede incelenir. Birinci seviye dış dünya ile ilgili fiziksel verilerin girişidir. İkinci seviye bir veya daha fazla seviyenin bulunduğu problemin istek ve koşullarını yerine getiren gizli seviyelerdir. Son seviye ise çıkış seviyesidir.

Qnet2000[®] ticari bir ANN yazılımıdır ve ilk kez bir TEC modülün başarımını tahmin etmek için bu araştırmada kullanılmaktadır.

3.2.1. Soğutma gücü tahminleri

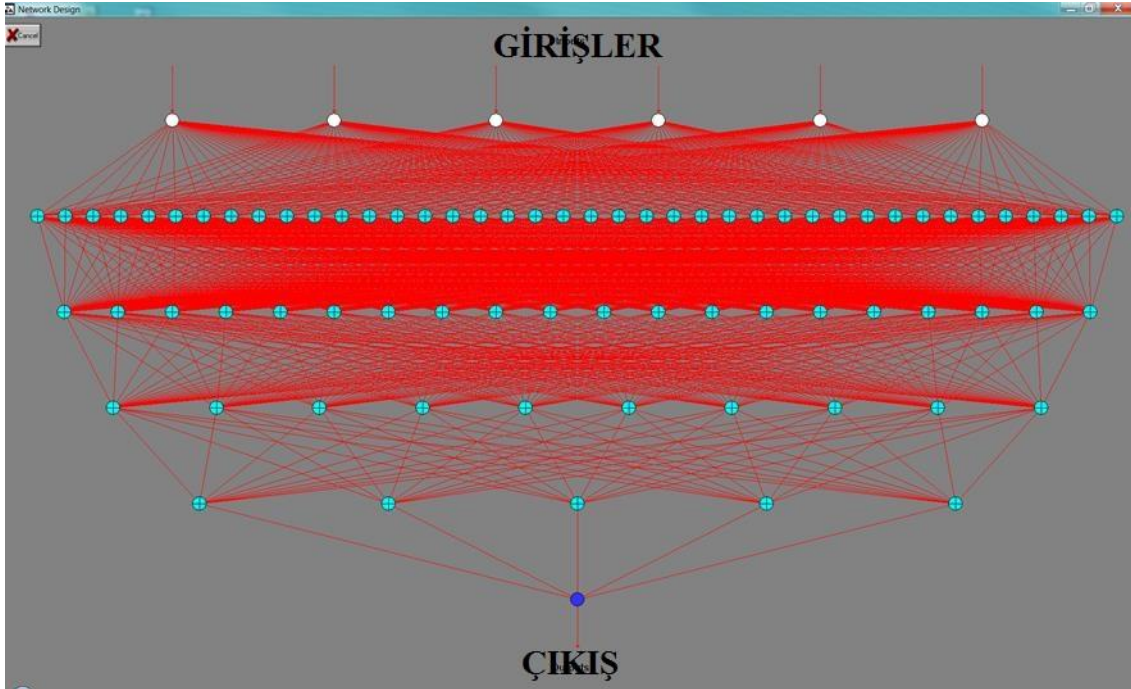
ANN modeli ile esas bir problem bu çalışmada olduğu gibi birçok değişkenin eğitim verileri olarak girilmesi ile oluşturulabilir. FEM çözümleri kullanılarak benzeşimleri yapılan 4 adet TEC modülünden elde edilen veriler, öğrenme verileri olarak kullanılabilir. Önerilen modelde soğutma gücü (Q_C), çıkış verisi olarak, soğuk yüzey sıcaklığı (T_C) ve termoelektrik çiftin ayak uzunluğu (L), genişliği (w) ve modül yüzey alanı (S), geçen akım (I) ve TEC modülü uçlarındaki gerilim (V) giriş verileri olarak alınmıştır (Şekil 3.5).

Q_C , için FEM ile modellenen 4 TEC modülünün çözümlerinden alınan toplam 357 giriş verisi geri beslemeli ANN modelinin öğrenmesi için kullanılmıştır. Gizli seviyelerin ve içerdiği nöronların sayısı deneme ve yanılma yöntemi ile tanjant hiperbolik ve sigmoid aktarım fonksiyonları kullanılarak belirlenmiştir. Devre eğitildikten sonra en iyi sonuç gizli seviyeler için tanjant hiperbolik ve çıkış seviyesi için sigmoid aktarım fonksiyonları ile elde edilmiştir (Qnet2000 el kitabı). Bu aktarım fonksiyonları;

$$\tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (3.1)$$

$$\text{sigmoid} = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (3.2)$$

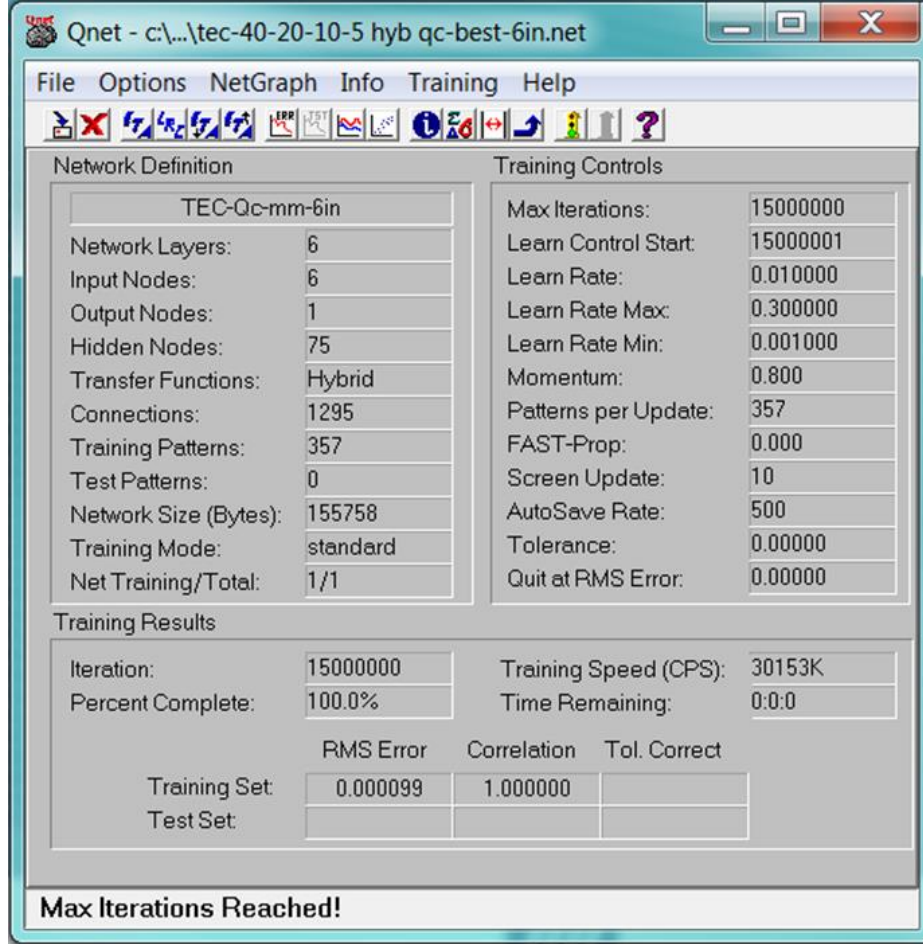
Şekil 3.6 357 giriş verisi ile öğrenmesi tamamlanan geri beslemeli ANN modelinin özelliklerini göstermektedir. Devre 6 giriş, bir çıkış nöronu ile 4 gizli seviyede Q_C için 75 nöron içermektedir. Nöronlar arasında tam bağlantı gerçekleştirilerek 1295 bağlantı oluşturulmuştur. Çok katmanlı geri beslemeli ANN devrelerinde tüm öğrenme verilerinin denkleştirilmesi (normalize) gerektirmektedir. Bu sebepten girişteki ve çıkıştaki her nörondaki tüm veriler 0.15 ile 0.85 sınırları arasında denkleştirilmiştir.



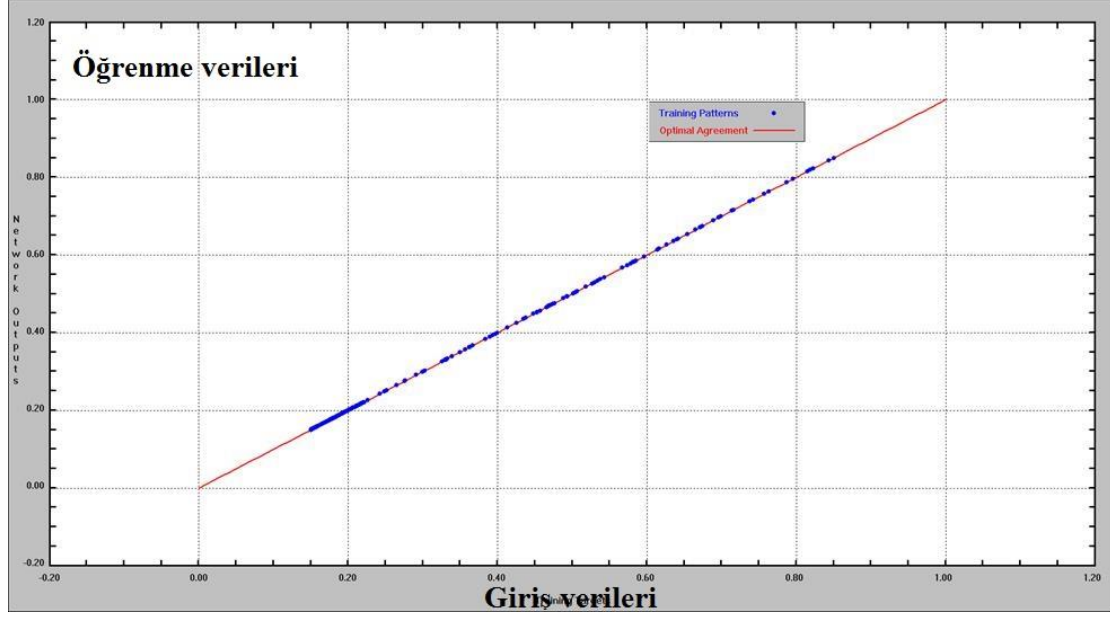
Şekil 3.5. Soğutma gücü tahmini (Q_C) için geliştirilen ANN modeli.

Hesaplamlarda i7-720QM intel işlemcisine, 1.6 GHz hıza, 6 MB L3 ön hafızaya ve 16 GB RAM'e sahip HP iş istasyonu kullanılmıştır. Her modelin öğrenmesi için hesaplama zamanı yaklaşık 1 hafta olmuştur. Soğutma gücü (Q_C) tahmini için giriş verileri ve model değişkenleri ile model tam bir öğrenme sağlamış ortalama düzeltme katsayısı %100 olurken, en büyük hata %0,0099 olmuştur. Bu sonuçlar 15 Milyon iterasyon sonucunda elde edilmiştir. Şekil 3.6

geliştirilen modele ait değişkenleri göstermektedir. Q_C için geliştirilen ANN modelinin giriş verileri ile çıkış verilerinin uyumu ise Şekil 3.7’de verilmektedir.



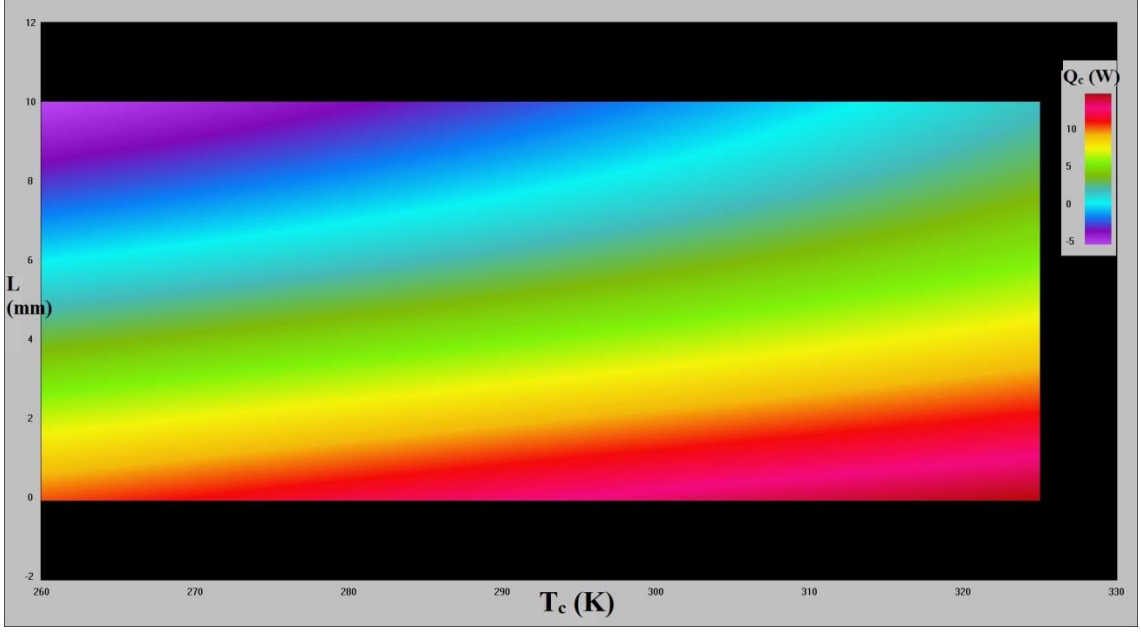
Şekil 3.6. Soğutma gücü tahmini (Q_C) için geliştirilen ANN modelinin öğrenme sonuçları gösteren ekran.



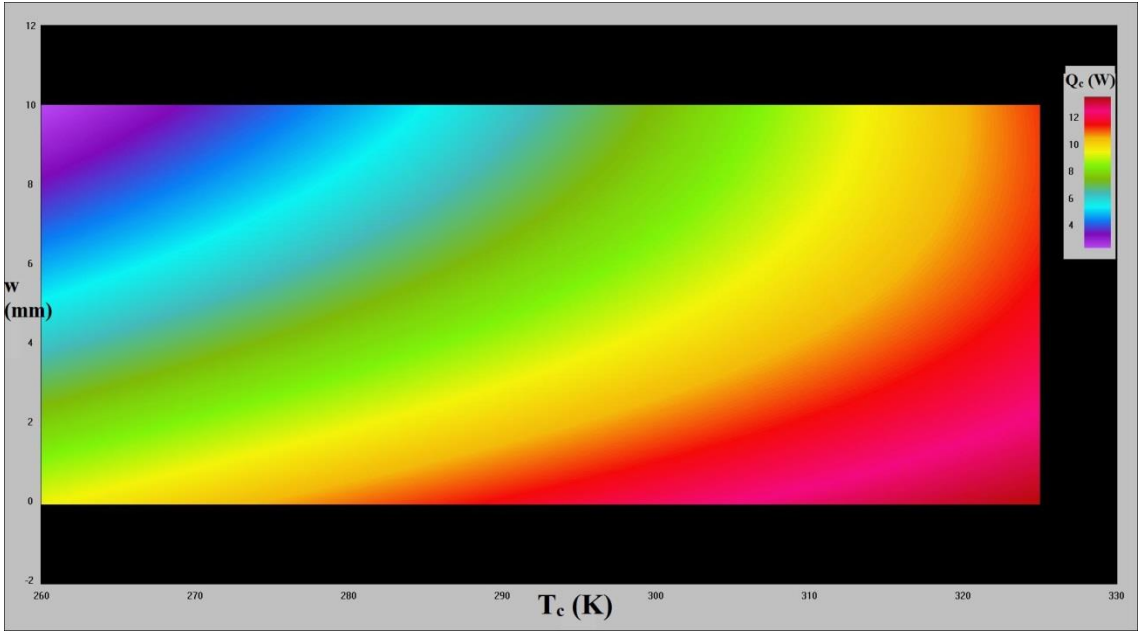
Şekil 3.7. Soğutma gücü tahmini (Q_C) için geliştirilen ANN modelinde giriş verileri ile öğrenme sonucunda elde edilen çıkış verilerinin uyumu.

Geliştirilen ANN modelinin kabul edilebilir öğrenme yeteneği ve tahmin kapasitesi sonucunda giriş verilerinin, tahmin edilen değer olan soğutma gücü ile değişimi incelenmiştir. Şekil 3.8 termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin ayak uzunluğunun (L) soğuk yüzey sıcaklığı ile değişiminin soğutma gücünü nasıl etkilediğini göstermektedir. Açıkça görüldüğü gibi küçülen ayak uzunluğu (L) ile artan soğuk yüzey sıcaklığı en büyük soğutma gücünü verirken artan ayak uzunluğu ve azalan soğuk yüzey sıcaklığı en küçük soğutma gücünü vermektedir.

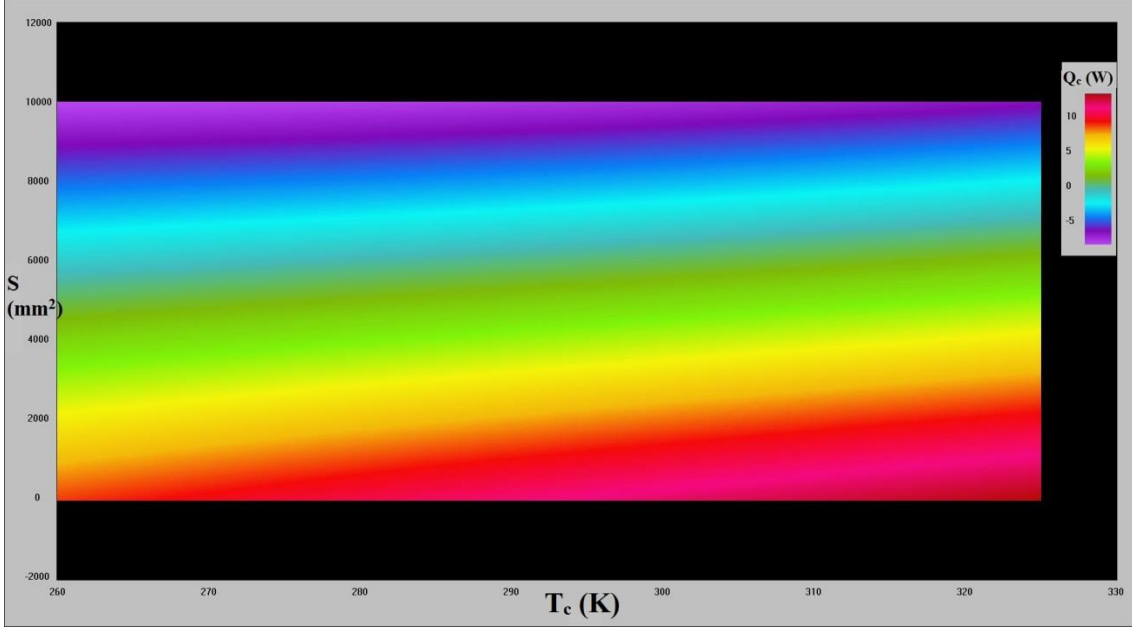
Benzer olarak Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12, termoelektrik çiftin genişliğinin (w) ve modül yüzey alanının (S), geçen akımın (I) ve TEC modülü uçlarındaki gerilimin (V), soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin soğutma gücüne etkisini göstermektedir. Bu şekillerde azalan geometrik boyutlar ile artan soğuk yüzey sıcaklığının soğutma gücünün artmasına olumlu katkı yaptığı görülmektedir. Şekil 3.11'de artan akım değerleri ve soğuk yüzey sıcaklığında soğutma gücünün en büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir. TEC modül uçlarındaki azalan gerilimin artan soğuk yüzey sıcaklığı değişimi, soğutma gücüne olumlu etki yaparken, artan gerilim ve yüzey sıcaklığının soğutma gücüne olumsuz etki yaptığı görülmektedir (Şekil 3.12).



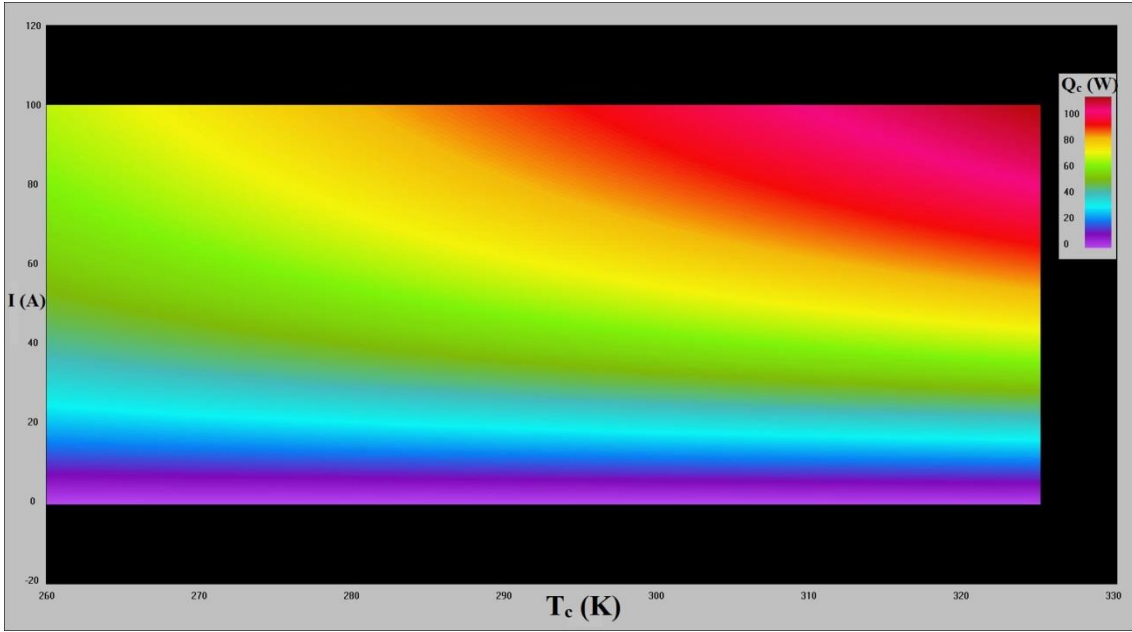
Şekil 3.8. Termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin ayak uzunluğunun (L) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi.



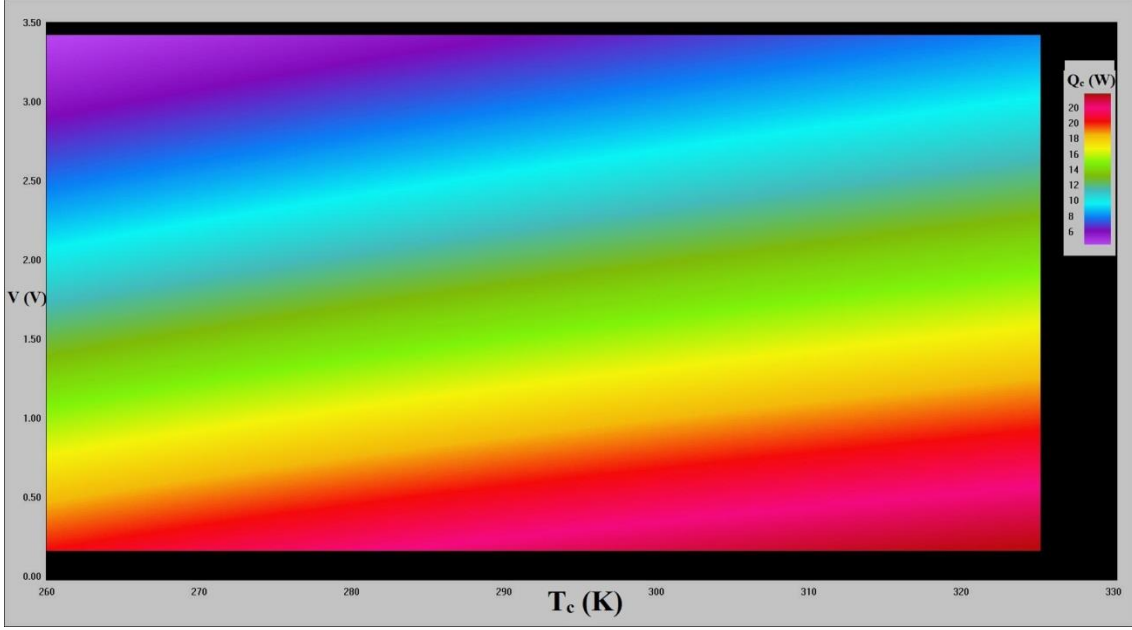
Şekil 3.9. Termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin genişliğinin (w) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi.



Şekil 3.10. TEC modülün yüzey alanının (S) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi.



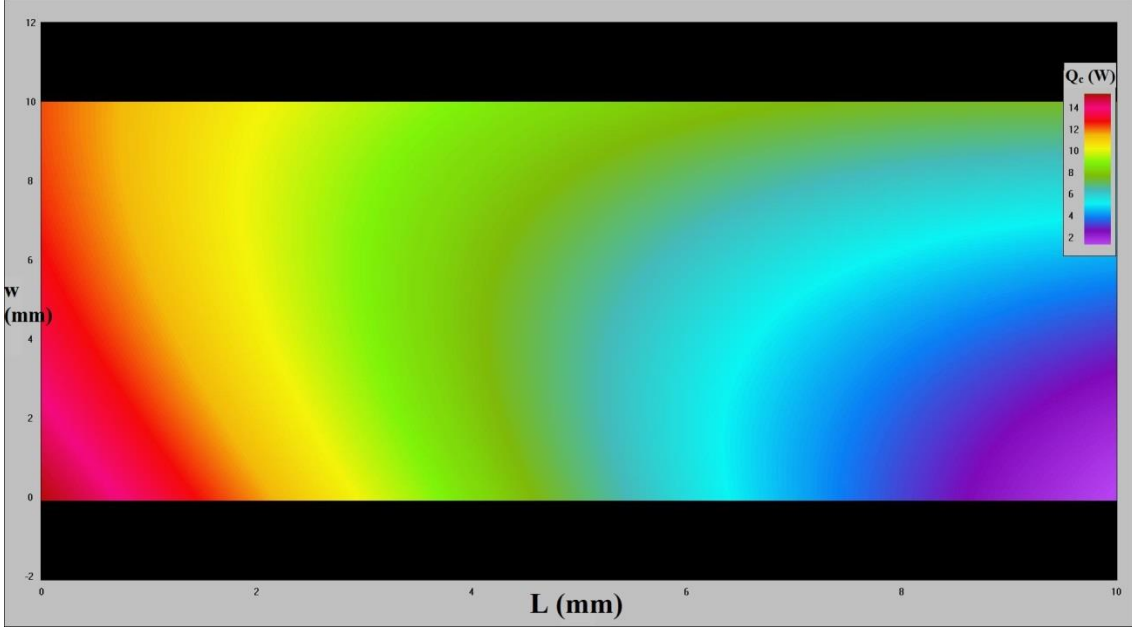
Şekil 3.11. Termoelektrik yarıiletken çiftlerden geçen akımın (I) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi.



Şekil 3.12. TEC modülün uçlarındaki potansiyel farkın (V) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi.

Şekil 3.13 TEC modülü oluşturan termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin genişliğinin ayak uzunluğu ile değişiminin soğutma gücüne etkisini göstermektedir. Genişlik ve ayak uzunluğu küçüldükçe soğutma gücünün arttığı gözlenirken, genişliğin küçük ancak ayak uzunluğunun büyük olduğu durumda ise soğutma gücünün en küçük olduğu görülmektedir.

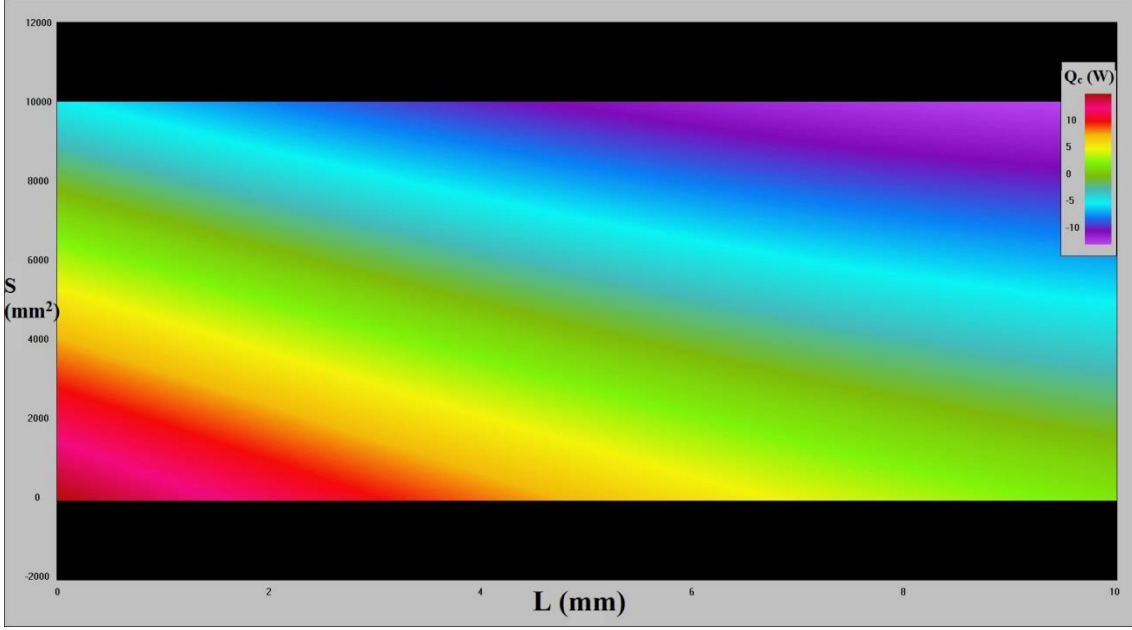
TEC modülünün yüzey alanının ve ayak uzunluğunun küçük olduğu bölgede soğutma gücünün en büyük olduğu, modül yüzey alanının ve ayak uzunluğunun büyük olduğu durumda soğutma gücünün küçük olduğu Şekil 3.14'de görülmektedir.



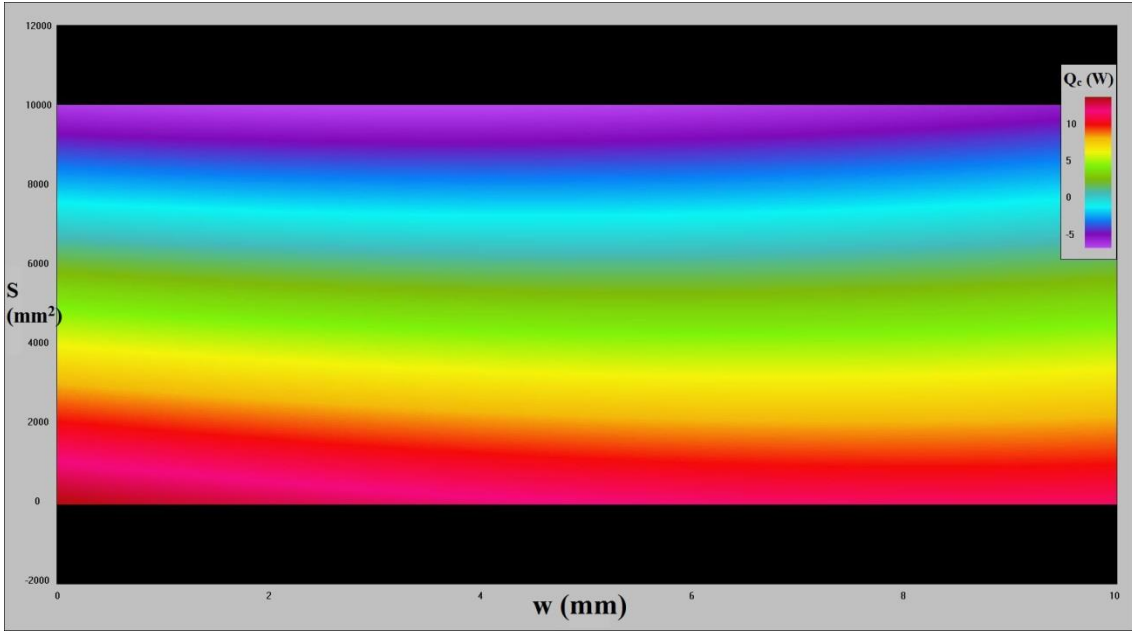
Şekil 3.13. TEC modülü oluşturan termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin genişliğinin (w) ayak uzunluğu (L) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi.

TEC modülünün yüzey alanı ile termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin genişliğinin soğutma gücüne etkisi ise Şekil 3.15’de görülmektedir. Yüzey alanının küçük olduğu durumlarda soğutma gücü büyük olurken, yüzey alanının büyük olduğu durumlarda ise soğutma gücü en küçük değerlerini almaktadır. Genişliğin ise soğutma gücüne anlamlı bir etkisinin olmadığı, artan veya azalan değerlerinde soğutma gücünün etkilenmediği görülmektedir.

Soğutma gücü tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş verilerinin TEC modülün soğutma gücüne yüzde katkı oranı Çizelge 3.3’de verilmektedir. Beklendiği gibi %65.79 ile en büyük katkı devreden geçen akımdan ve buna bağlı olarak TEC modülün uçlarındaki potansiyel farktan (%10.87) gelmektedir. Ancak geometrik boyutların katkısı oldukça anlamlıdır. TEC yüzey alanı %8.86 ile akım ve gerilim değerlerinden sonra soğutma gücüne en büyük katkısı olan değişkendir. Katkı oranını yüzey alanından sonra soğuk yüzey sıcaklığı (%6.28) ve $p-n$ çiftlerin ayak uzunluğu (%5.40) takip etmektedir. $p-n$ çiftlerinin genişliği ise %2.80 ile en az katkı oranına sahiptir.



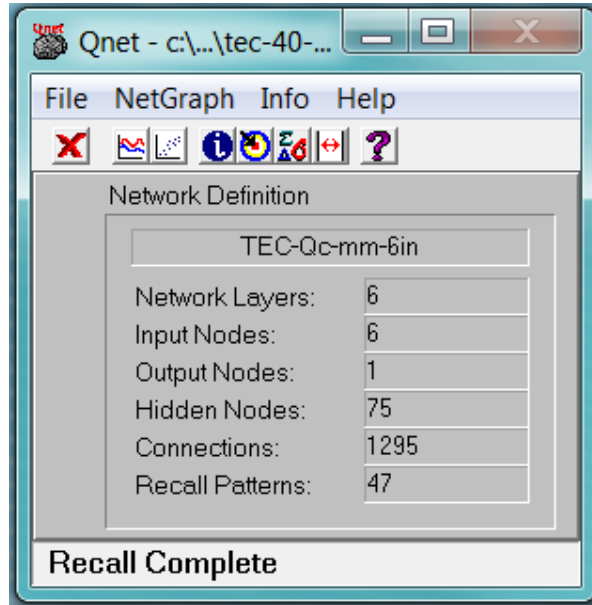
Şekil 3.14. TEC modülü yüzey alanının (S) termoelektrik yarıiletken $p-n$ çitlerinin ayak uzunluğu (L) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi.



Şekil 3.15. TEC modülü yüzey alanının (S) termoelektrik yarıiletken $p-n$ çitlerinin genişliği (w) ile değişiminin soğutma gücüne etkisi.

Çizelge 3.3. Soğutma gücü tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş verilerinin TEC modülün soğutma gücüne yüzde katkı oranı

Giriş değişkenleri	Q_c için % Katkı oranı
T_c	6.28
L	5.40
w	2.80
S	8.86
I	65.79
V	10.87

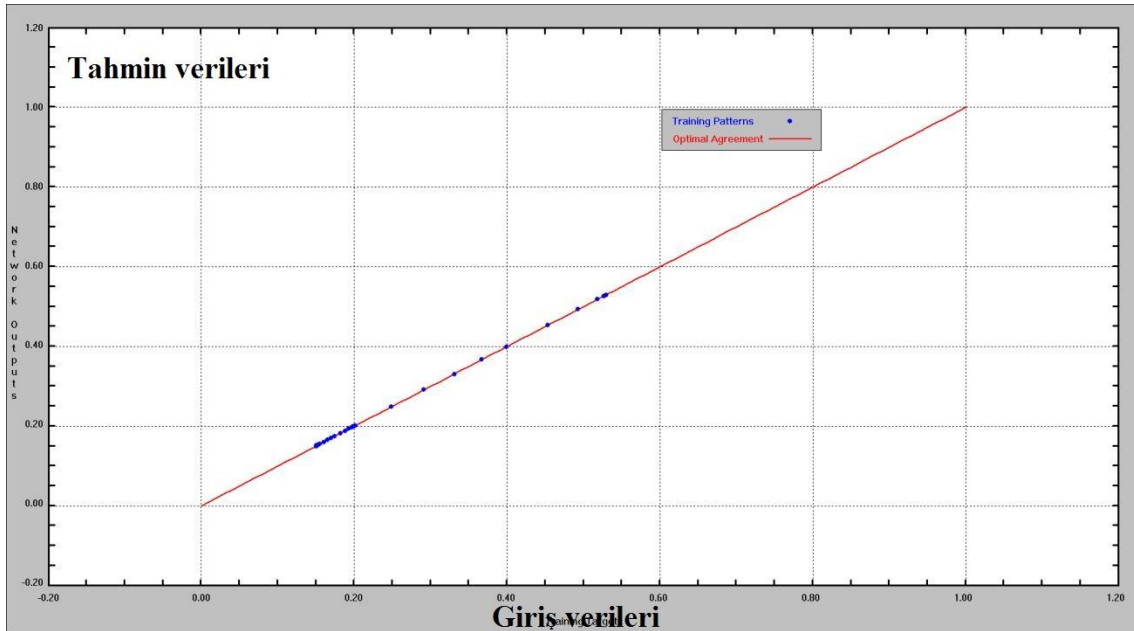


Şekil 3.16 Soğutma gücü tahmini için geliştirilen ANN modelinin sonuç ekranı.

ANN modelinin başarımı istatistiksel olarak etkin hata ve ortalama düzeltme katsayısı ile ölçülmektedir. Soğutma gücü (Q_c) verilerinin öğrenme verileri içinde olmayan bir bölümü ANN modelinin doğruluğunu ölçmek için kullanılmıştır. Şekil 3.16 bu denemeden sonra elde edilen ANN sonuç ekranını göstermektedir. Giriş sınamaya verileri ve beklenen hedef verileri

arasındaki uyum Şekil 3.17’de görülmektedir. Ortalama düzeltme katsayısı ve en büyük hata denenen TEC modülleri için sırası ile %99 ve %6.1 bulunmuştur.

Geliştirilen ANN modeli ile tahmin yüksek düzeltme katsayısına ve küçük hata oranına sahiptir. Benzeşim ve tahmin sonuçları arasında kabul edilebilir kesinlik ve iyi bir düzeltme katsayısı ile TEC modülün soğutma gücü (Q_C) için geliştirilen ANN modeli kabul edilebilir tahmin kapasitesine sahiptir. Geliştirilen ANN modelinin doğrulanması için öğrenme verileri içinde bulunmayan $L=w=1$ mm ve $S=100$ mm² olan TEC modülünde 290 K’de elde edilen benzeşim verileri kullanılmıştır.



Şekil 3.17. Soğutma gücü tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş sınama verileri ile tahmin edilen veriler arasındaki uyum.

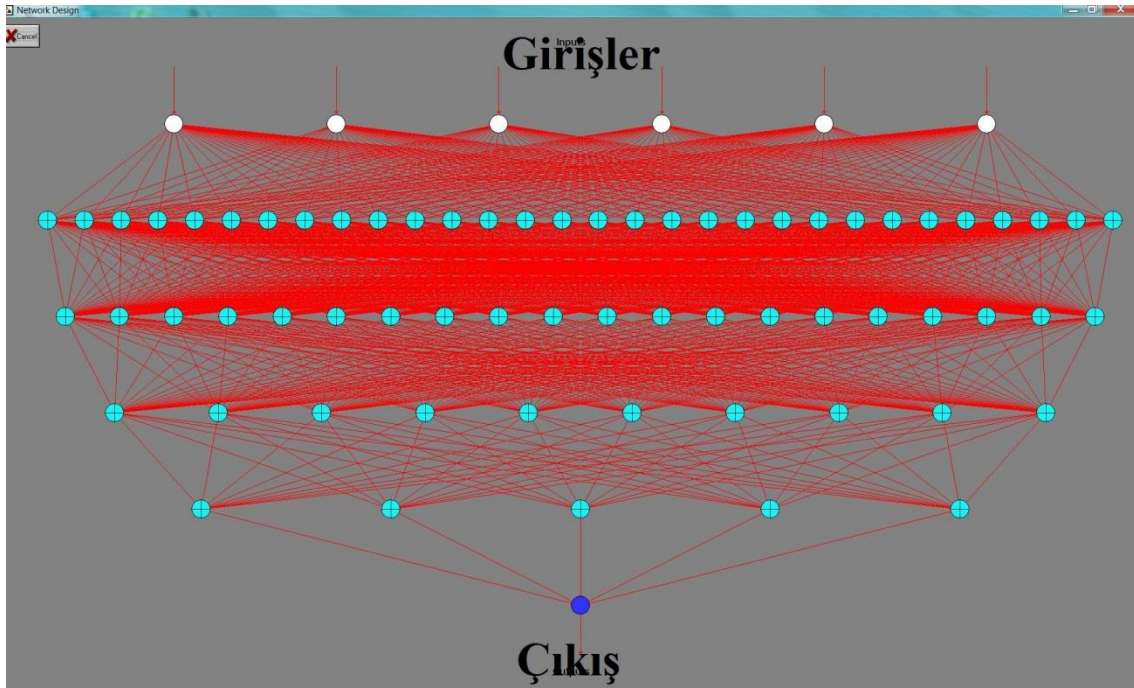
3.2.2. Güç tüketimi tahminleri

Güç tüketimi (Q_P) için geliştirilen ANN modeli soğutma gücü modeline benzer olarak gibi 6 giriş, bir çıkış nöronu ile 4 gizli seviyede 65 nöron içermektedir. Modelin, tüm öğrenme verilerinin denkleştirilmesi (normalize) yapılmıştır ve giriş ve çıkıştaki her nörondaki veriler 0.15 ile 0.85 sınırları arasında denkleştirilmiştir.

Güç tüketimi için geliştirilen ANN modelinde, çıkış verisi olarak güç tüketimi (Q_p), giriş verisi olarak ise soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ve termoelektrik yarıiletken çiftin ayak uzunluğu (L), genişliği (w) ve modül yüzey alanı (S), geçen akım (I) ve TEC modülü uçlarındaki gerilim (V) giriş verileri olarak alınmıştır (Şekil 3.18).

Q_p , için FEM ile modellenen 4 TEC modülünün çözümlenmesinden elde edilen toplam 357 giriş verisi çok katmanlı geri beslemeli ANN modelinin öğrenmesi için kullanılmıştır. Gizli seviyelerin ve içerdiği nöronların sayısı deneme ve yanılma yöntemi ile tanjant hiperbolik ve sigmoid aktarım fonksiyonları kullanılarak belirlenmiştir. Devre öğrendikten sonra en iyi sonuç gizli seviyeler için tanjant hiperbolik ve çıkış seviyesi için sigmoid aktarım fonksiyonları ile elde edilmiştir (Eş. 3.1, ve Eş. 3.2).

Şekil 3.19, 357 giriş verisi ile öğrenmesi tamamlanan geri beslemeli ANN modelinin özelliklerini göstermektedir. Nöronlar arasında tam bağlantı gerçekleştirilerek 1035 bağlantı oluşturulmuştur.

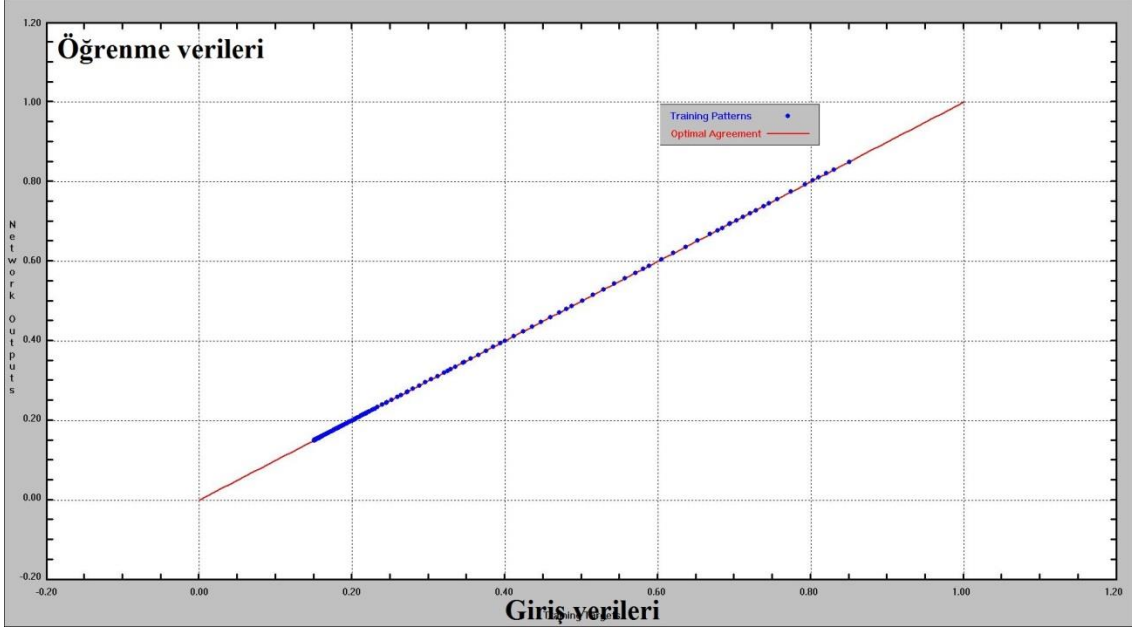


Şekil 3.18. Güç tüketimi tahmini (Q_p) için geliştirilen ANN modeli.



Şekil 3.19. Güç tüketimi tahmini (Q_P) için geliştirilen ANN modelinin öğrenme sonuçları gösteren ekran.

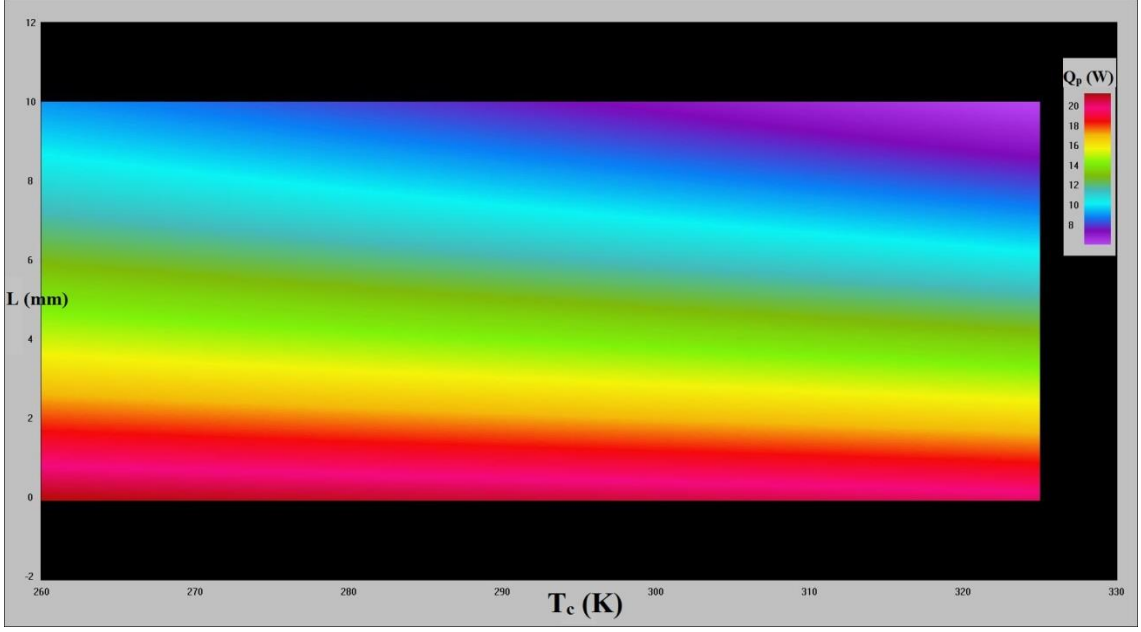
Hesaplamalarda i7-720QM intel işlemcisine, 1.6 GHz hıza, 6 MB L3 ön hafızaya ve 16 GB RAM'e sahip HP iş istasyonu kullanılmıştır. Geliştirilen modelin öğrenmesi için hesaplama zamanı yaklaşık 1 hafta olmuştur. Güç tüketimi (Q_P) tahmini için giriş verileri ve model değişkenleri ile model tam bir öğrenme sağlamış ortalama düzeltme katsayısı %100 olurken, en büyük hata %0,0138 olmuştur. Bu sonuçlar 15 Milyon iterasyon sonucunda elde edilmiştir. Q_P tahmini için geliştirilen ANN modelinin giriş verileri ile çıkış verilerinin uyumu ise Şekil 3.20'de verilmektedir.



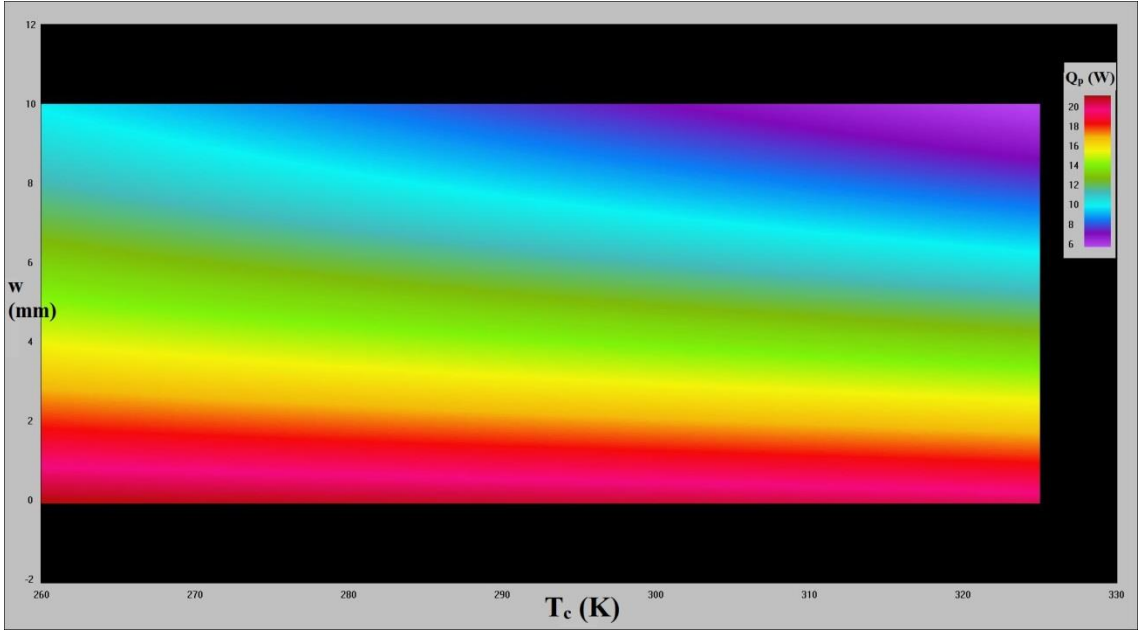
Şekil 3.20. Güç tüketimi tahmini (Q_p) için geliştirilen ANN modelinde giriş verileri ile öğrenme sonucunda elde edilen çıkış verilerinin uyumu.

Geliştirilen ANN modelinin kabul edilebilir öğrenme yeteneği ve tahmin kapasitesi sonucunda giriş verilerinin, tahmin edilen değer olan güç tüketimi ile değişimi incelenmiştir. Şekil 3.21 termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin ayak uzunluğunun (L) soğuk yüzey sıcaklığı ile değişiminin soğutma gücünü nasıl etkilediğini göstermektedir. Açıkça görüldüğü gibi küçülen ayak uzunluğu (L) güç tüketimini olumsuz etkilemesine rağmen, en küçük güç tüketiminin soğuk yüzey sıcaklığının ve ayak uzunluğunun büyük değerlerinde olduğu gözlenmiştir.

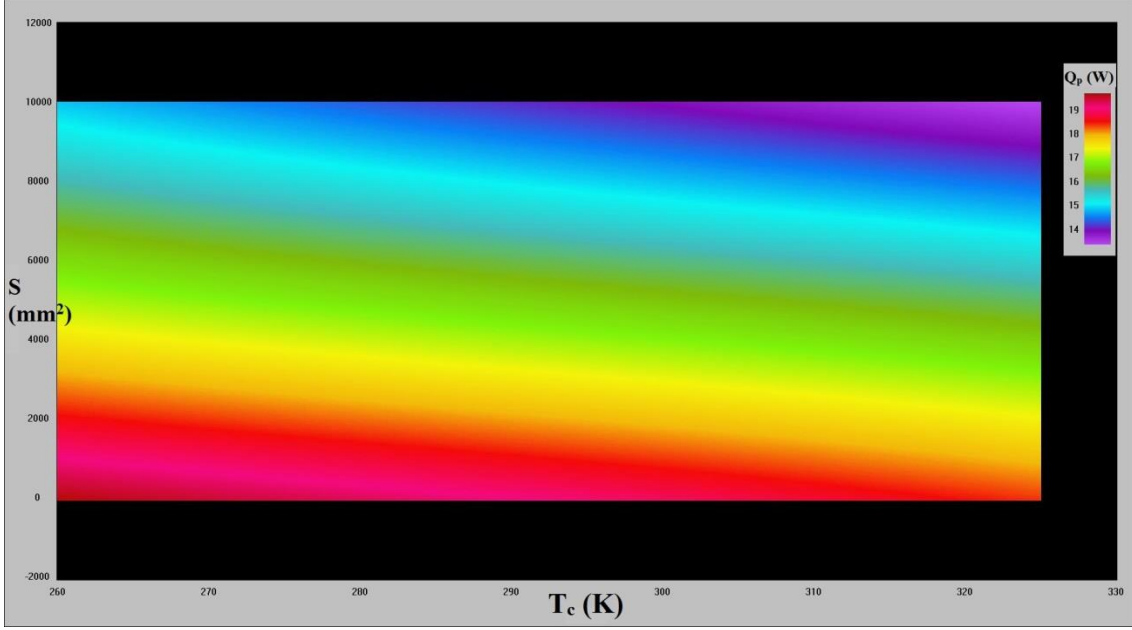
Şekil 3.22 ve Şekil 3.23 yarıiletken $p-n$ çiftinin genişliği ve TEC modülün yüzey alanının soğuk yüzey ile değişiminin güç tüketimi üzerindeki etkisini göstermektedir. $p-n$ çiftinin ayak uzunluğunun etkisine benzer olarak genişliğin küçük değerlerinde güç tüketimi daha az olduğu görünürken, soğuk yüzey sıcaklığının anlamlı bir etkisi yoktur. TEC yüzey alanı ise artan yüzey alanı ve soğuk yüzey sıcaklığında güç tüketimi en az seviyeye gelmektedir. En büyük güç tüketimi ise küçük yüzey alanı ve soğuk yüzey sıcaklığı durumunda olmaktadır. Şekil 3.23'de bu değişim açıkça görülmektedir.



Şekil 3.21. Termoelektrik yarıiletken p - n çiftinin ayak uzunluğunun (L) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin güç tüketimine etkisi.



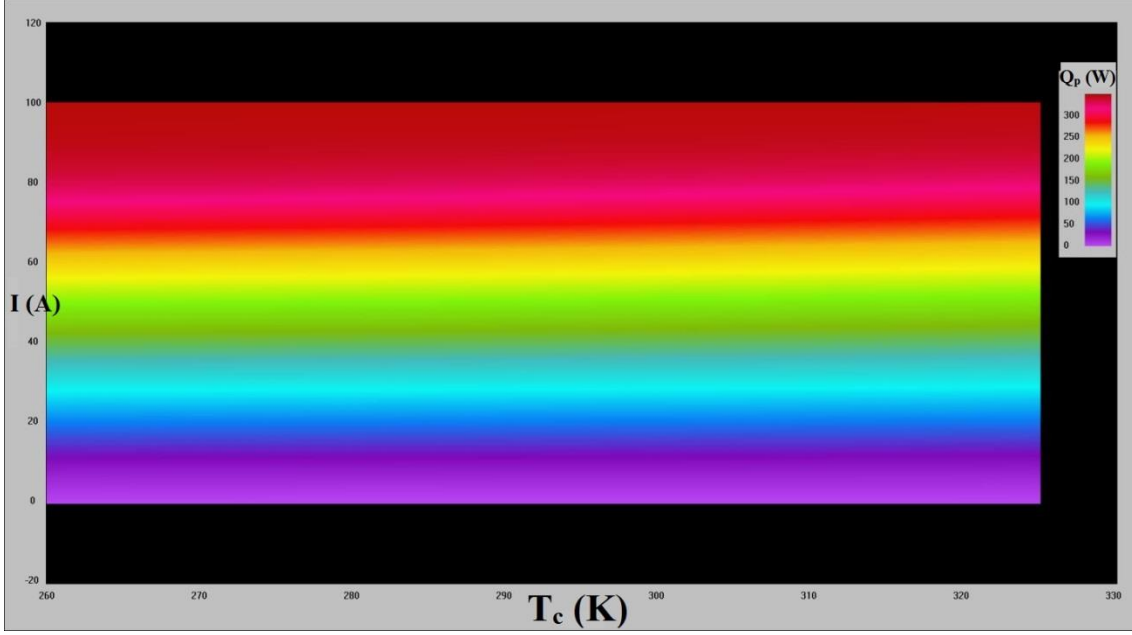
Şekil 3.22. Termoelektrik p - n çiftinin genişliğinin (w) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin güç tüketimine etkisi.



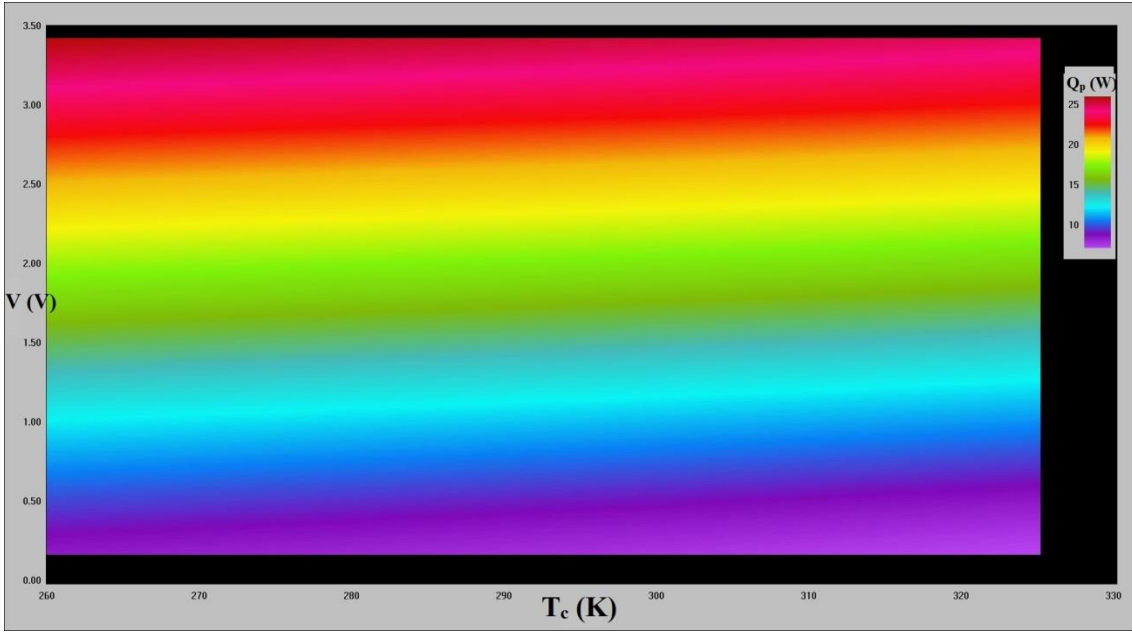
Şekil 3.23. TEC modülün yüzey alanının (S) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin güç tüketimine etkisi.

Şekil 3.24 ve Şekil 3.25 geçen akım değerlerinin ve modül uçlarındaki gerilimin soğuk yüzey sıcaklığı ile değişiminin güç tüketimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Beklendiği gibi yüksek akım gerilim değerlerinde güç tüketiminin yüksek olacağı görülmektedir.

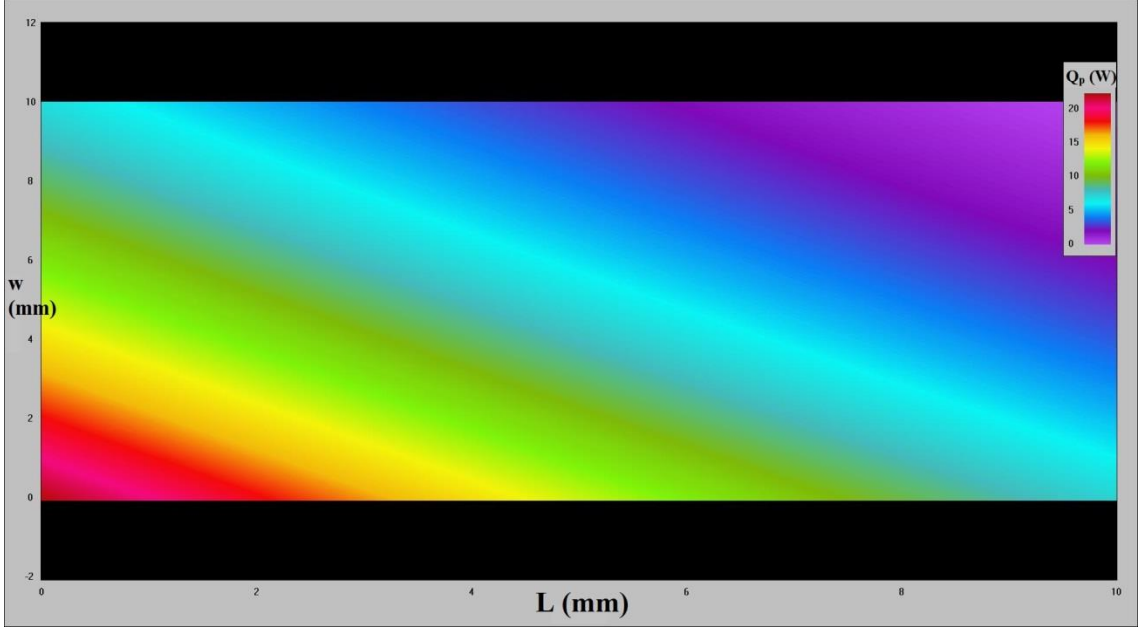
Şekil 3.26 TEC modülü oluşturan termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin genişliğinin ayak uzunluğu ile değişiminin güç tüketimine etkisini göstermektedir. Genişlik ve ayak uzunluğu küçülürken güç tüketimi büyümekte, ancak genişlik ve ayak uzunluğu büyürken güç tüketimi azalmaktadır. Benzer bir etki TEC modül yüzey alanının ayak uzunluğu ile değişiminde görülmektedir (Şekil 3.27). Şekil 3.28’de ise aynı etki TEC modül yüzey alanı ve termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin genişliği ile değişiminde gözlenmektedir. Yüzey alanı ve genişlik küçülürken güç tüketimi azalmakta, artarken ise güç tüketimi artmaktadır.



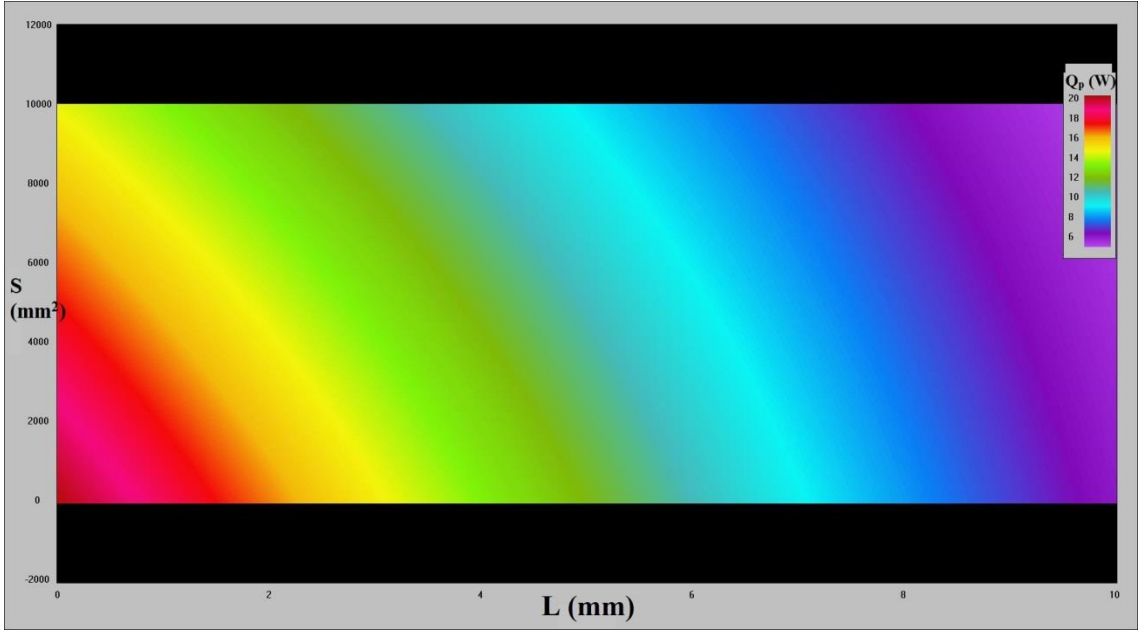
Şekil 3.24. Termoelektrik $p-n$ çiftlerinden geçen akımın (I) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin güç tüketimine etkisi.



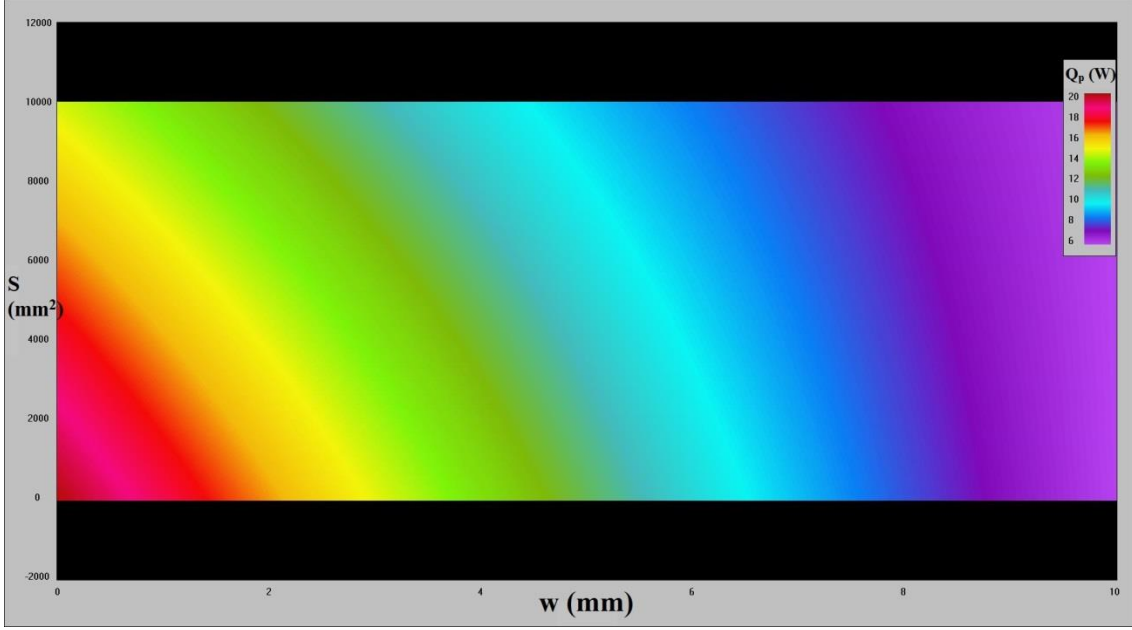
Şekil 3.25. TEC modülün uçları arasındaki potansiyel farkın (V) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin güç tüketimine etkisi.



Şekil 3.26. TEC modülü oluşturan termoelektrik yarıiletken p - n çitlerinin genişliğinin (w) ayak uzunluğu (L) ile değişiminin güç tüketimine etkisi.



Şekil 3.27. TEC modülünün yüzey alanının (S) termoelektrik yarıiletken p - n çitlerinin ayak uzunluğu (L) ile değişiminin güç tüketimine etkisi.



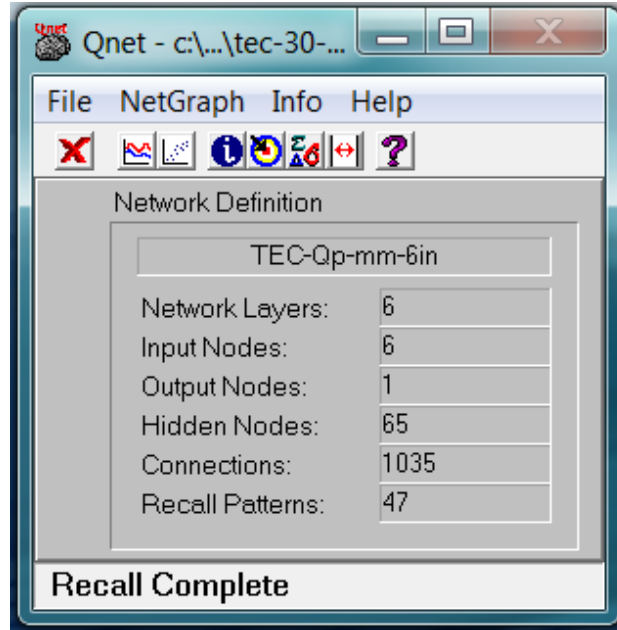
Şekil 3.28. TEC modülünün yüzey alanının (S) termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin genişliği (w) ile değişiminin güç tüketimine etkisi.

Çizelge 3.4’de görüldüğü gibi Q_P tahmininde beklendiği gibi geçen akım ve gerilim sırası ile %85.07 ve %5.64 oranları ile en büyük katkıyı yapmaktadır. Burada geometrik boyutların katkı oranı soğutma gücü tahmininde olduğu kadar büyük değildir. TEC modülün yüzey alanı (S) en küçük katkıyı yapmaktadır. $p-n$ çiftinin ayak uzunluğu (L) ve genişliği (w) sırası ile %3.60 ve %3.50 güç tüketimine katkı yapmaktadır. Soğuk yüzey sıcaklığının (T_C) katkı oranı ise sadece %1.19’dur.

ANN modelinin başarımı istatistiksel olarak etkin hata ve ortalama düzeltme katsayısı ile ölçülmektedir. Güç tüketimi (Q_P) verilerinin öğrenme verileri içinde olmayan bir bölümü geliştirilen ANN modelinin doğruluğunu ölçmek için kullanılmıştır. Şekil 3.29 bu denemeden sonra elde edilen ANN sonuç ekranını göstermektedir.

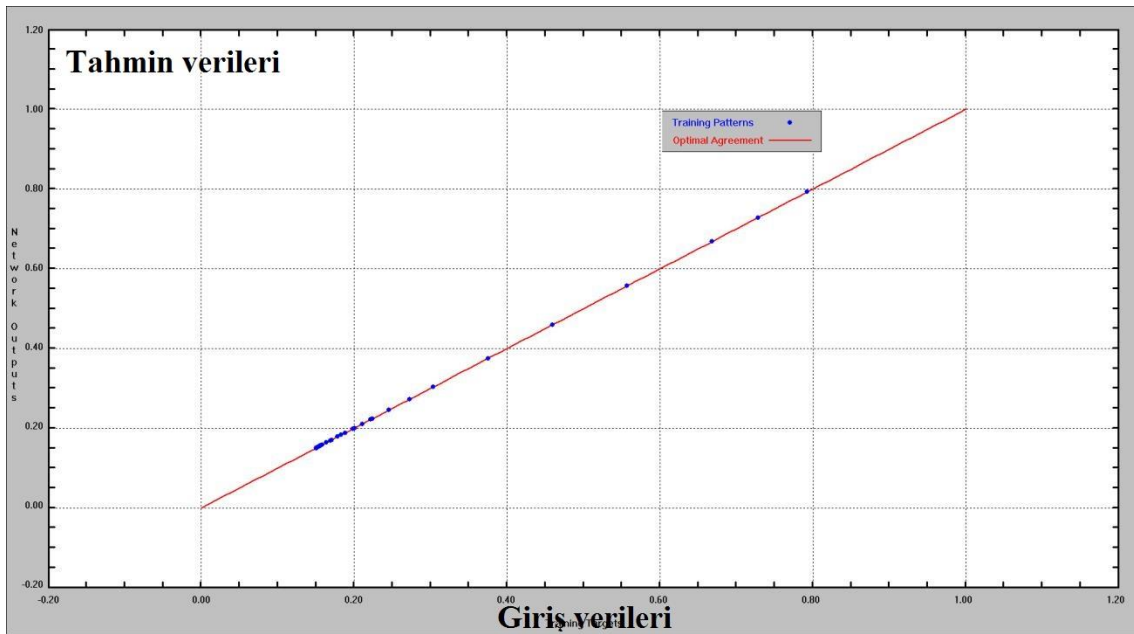
Çizelge 3.4. Güç tüketimi tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş verilerinin TEC modülün güç tüketimine yüzde katkı oranı

Giriş değişkenleri	Q_p için % Katkı oranı
T_c	1.19
L	3.60
w	3.50
S	1.01
I	85.07
V	5.64



Şekil 3.29 Güç tüketimi tahmini için geliştirilen ANN modelinin sonuç ekranı.

Giriş sınaama verileri ve beklenen hedef verileri arasındaki uyum Şekil 3.30’de görülmektedir. Ortalama düzeltme katsayısı ve en büyük hata denenen TEC modülleri için sırası ile %99 ve %1.5 bulunmuştur. Geliştirilen ANN modeli ile tahmin yüksek düzeltme katsayısına ve küçük hata oranına sahiptir. Benzeşim ve tahmin sonuçları arasında kabul edilebilir kesinlik ve iyi bir düzeltme katsayısı ile geliştirilen ANN modeli, TEC modülün güç tüketimi (Q_p) için kabul edilebilir tahmin kapasitesine sahiptir. Geliştirilen ANN modelinin doğrulanması için öğrenme verileri içinde bulunmayan $L=w=1$ mm ve $S=100$ mm² olan TEC modülünde 290 K’de elde edilen benzeşim verileri kullanılmıştır.



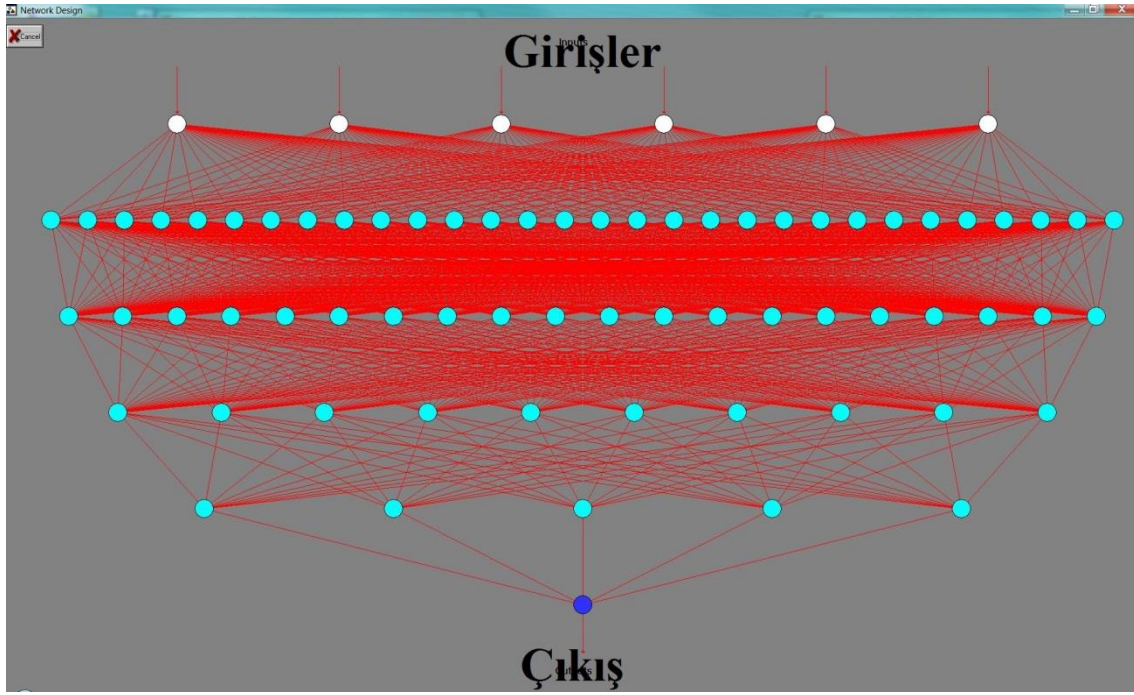
Şekil 3.30. Güç tüketimi tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş sınaama verileri ile beklenen hedef veriler arasındaki uyum.

3.2.3. Başarım katsayısı (COP) tahmini

Başarım katsayısı (COP) için geliştirilen ANN modeli soğutma gücü ve güç tüketimine modellerine benzer olarak 6 giriş, bir çıkış nöronu ile 4 gizli seviyede 65 nöron içermektedir. Modelin, tüm öğrenme verilerinin denkleştirilmesi (normalize) yapılmıştır ve giriş ve çıkıştaki her nörondaki veriler 0.15 ile 0.85 sınırları arasında denkleştirilmiştir.

Başarım katsayısı için geliştirilen ANN modelinde, çıkış verisi olarak başarıım katsayısı (COP), giriş verisi olarak ise soğutma gücü ve güç tüketimi tahminlerinde kullanılan soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ve termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftin ayak uzunluğu (L), genişliği (w) ve modül yüzey alanı (S), geçen akım (I) ve TEC modülü uçlarındaki gerilim (V) giriş verileri aynı şekilde kullanılmıştır (Şekil 3.31).

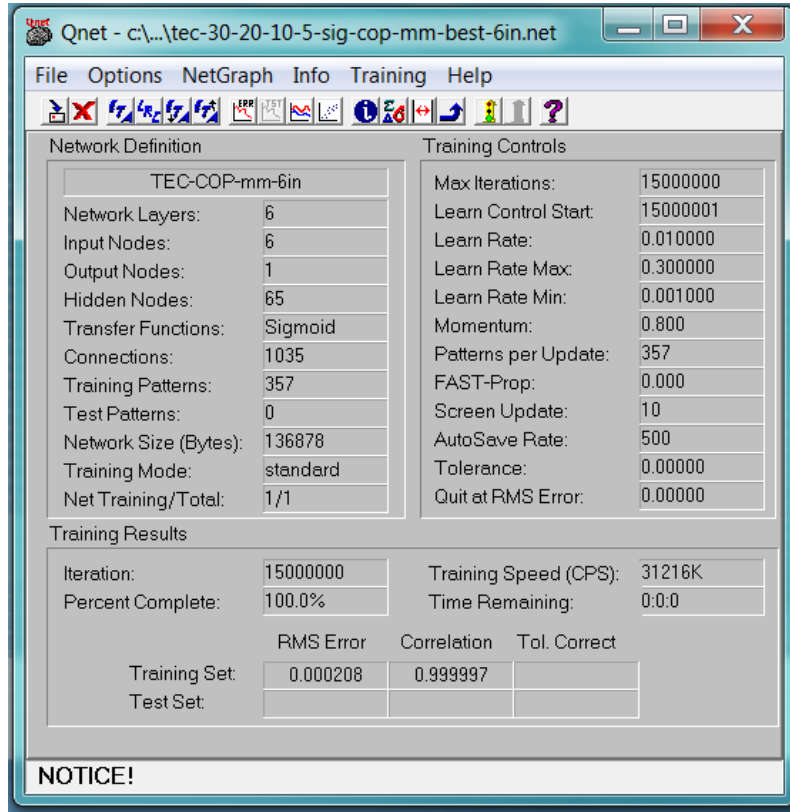
COP için FEM ile modellenen 4 TEC modülünün çözümlenmesinden elde edilen soğutma gücü ve güç tüketimi tahminlerinde kullanılan toplam 357 giriş verisi çok katmanlı geri beslemeli ANN modelinin öğrenmesi için kullanılmıştır. Gizli seviyelerin ve içerdiği nöronların sayısı deneme ve yanılma yöntemi ile tanjant hiperbolik ve sigmoid aktarım fonksiyonları kullanılarak belirlenmiştir. Devre öğrendikten sonra en iyi sonuç gizli seviyeler için ve çıkış seviyesi için sigmoid aktarım fonksiyonu ile elde edilmiştir (Eş. 3.2).



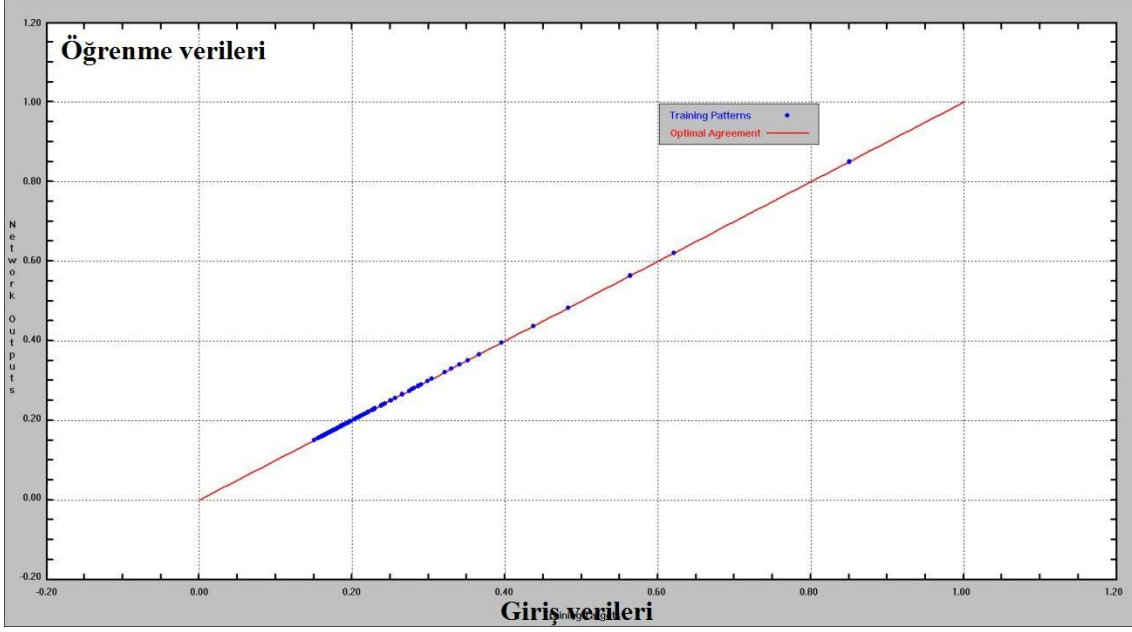
Şekil 3.31. Başarım Katsayısı (COP) için geliştirilen ANN modeli.

Şekil 3.32, 357 giriş verisi ile öğrenmesi tamamlanan geri beslemeli ANN modelinin özelliklerini göstermektedir. Nöronlar arasında tam bağlantı gerçekleştirilerek 1035 bağlantı oluşturulmuştur.

Hesaplamalarda i7-720QM intel işlemcisine, 1.6 GHz hıza, 6 MB L3 ön hafızaya ve 16 GB RAM'e sahip HP iş istasyonu kullanılmıştır. Geliştirilen modelin öğrenmesi için hesaplama zamanı yaklaşık 1 hafta olmuştur. Başarım katsayısı (COP) tahmini için giriş verileri ve model değişkenleri ile model iyi bir öğrenme sağlamış ortalama düzeltme katsayısı %99.9997 olurken, en büyük hata %0,0208 olmuştur. Bu sonuçlar 15 Milyon iterasyon sonucunda elde edilmiştir. COP tahmini için geliştirilen ANN modelinin giriş verileri ile çıkış verilerinin uyumu ise Şekil 3.33'de verilmektedir.



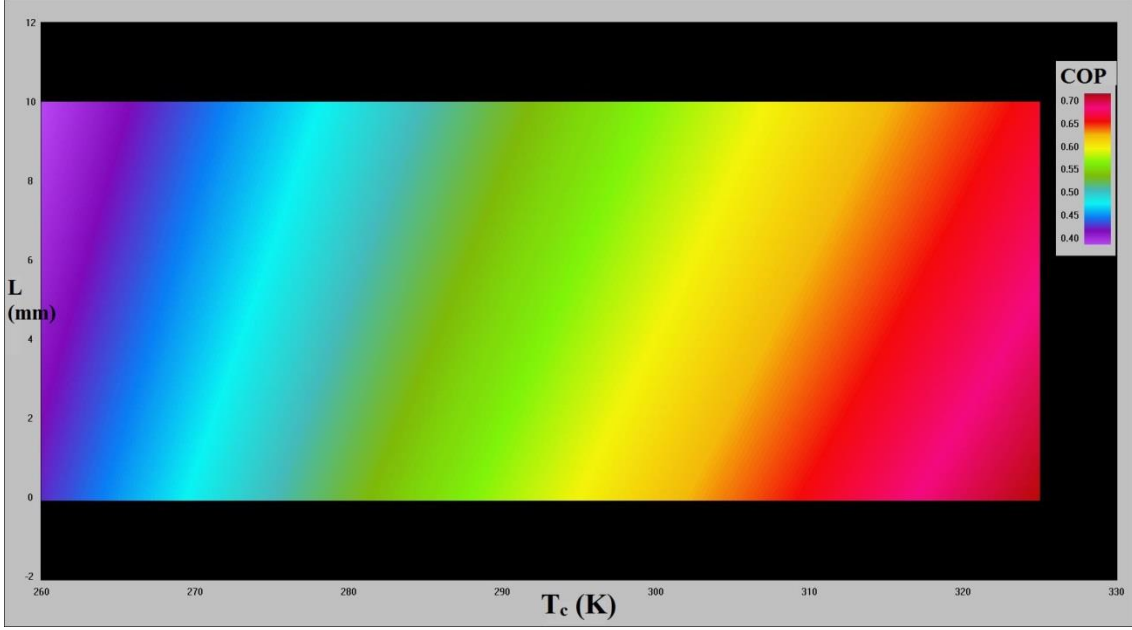
Şekil 3.32. Başarım katsayısı (COP) için geliştirilen ANN modelinin öğrenme sonuçları gösteren ekran.



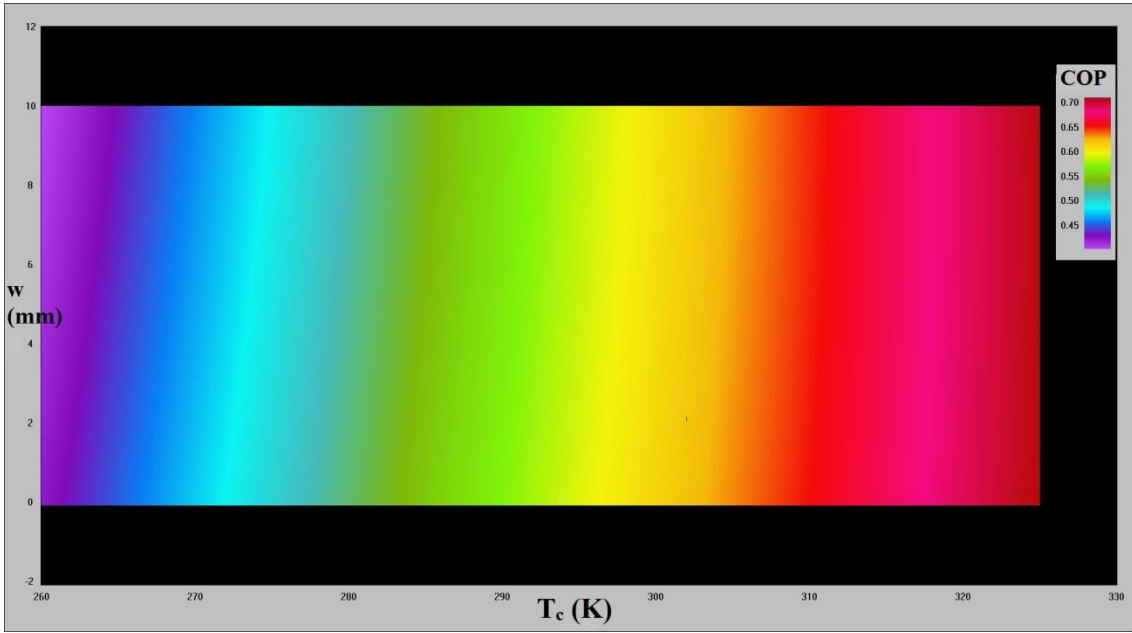
Şekil 3.33. Başarım katsayısı (COP) tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş verileri ile öğrenme sonucunda elde edilen çıkış verilerinin uyumu.

Geliştirilen ANN modelinin kabul edilebilir öğrenme yeteneği ve tahmin kapasitesi sonucunda giriş verilerinin, tahmin edilen değer olan başarım katsayısı ile değişimi incelenmiştir. Şekil 3.34 termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin ayak uzunluğunun (L) soğuk yüzey sıcaklığı ile değişiminin başarım katsayısını nasıl etkilediğini göstermektedir. Açıkça görüldüğü gibi azalan ayak uzunluğu (L) ve artan soğuk yüzey sıcaklığında başarım katsayısı en büyük değerine ulaşırken, artan ayak uzunluğu ve azalan soğuk yüzey sıcaklığı ile başarım katsayısı en küçük değerini almaktadır.

Şekil 3.35 ve Şekil 3.36 $p-n$ çiftinin genişliği ve TEC modülün yüzey alanının soğuk yüzey ile değişiminin başarım katsayısı üzerindeki etkisini göstermektedir. Soğuk yüzey sıcaklığının yüksek değerleri başarım katsayısının artmasına olumlu bir etki yaparken, $p-n$ çiftinin genişliğin küçük veya büyük değerlerinin COP üzerinde anlamlı bir katkısı yoktur hatta sabit kaldığı görülmektedir. Aynı şekilde soğuk yüzey sıcaklığının azalması ise COP üzerinde olumsuz bir etki yaratmakta, yani en küçük değerine gitmektedir.

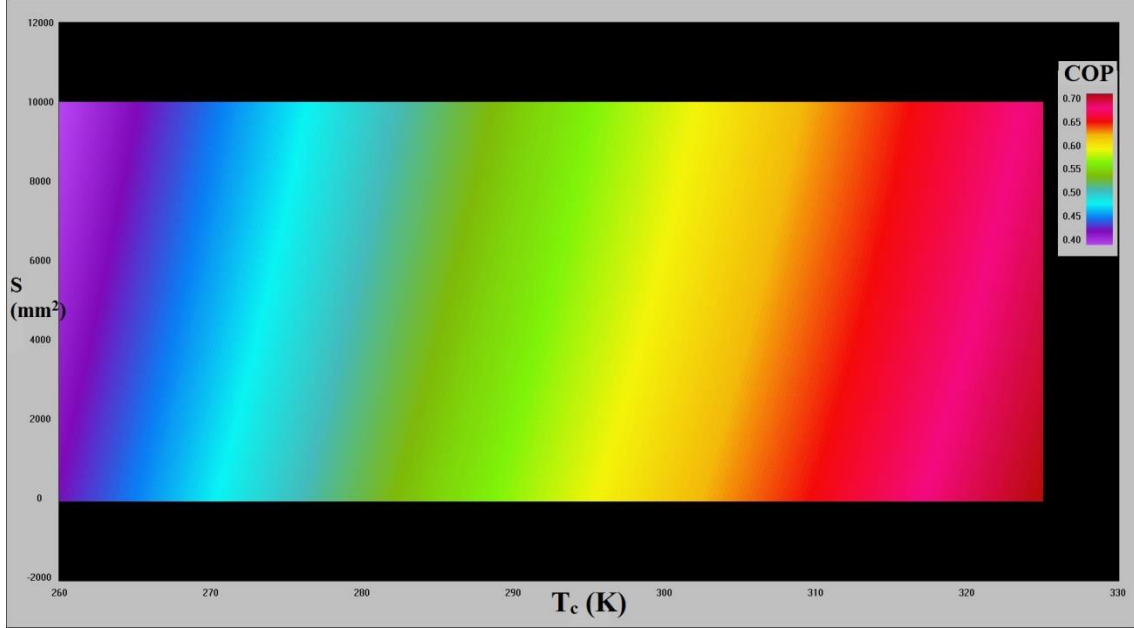


Şekil 3.34. Termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin ayak uzunluğunun (L) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin başarımlar katsayısına etkisi.



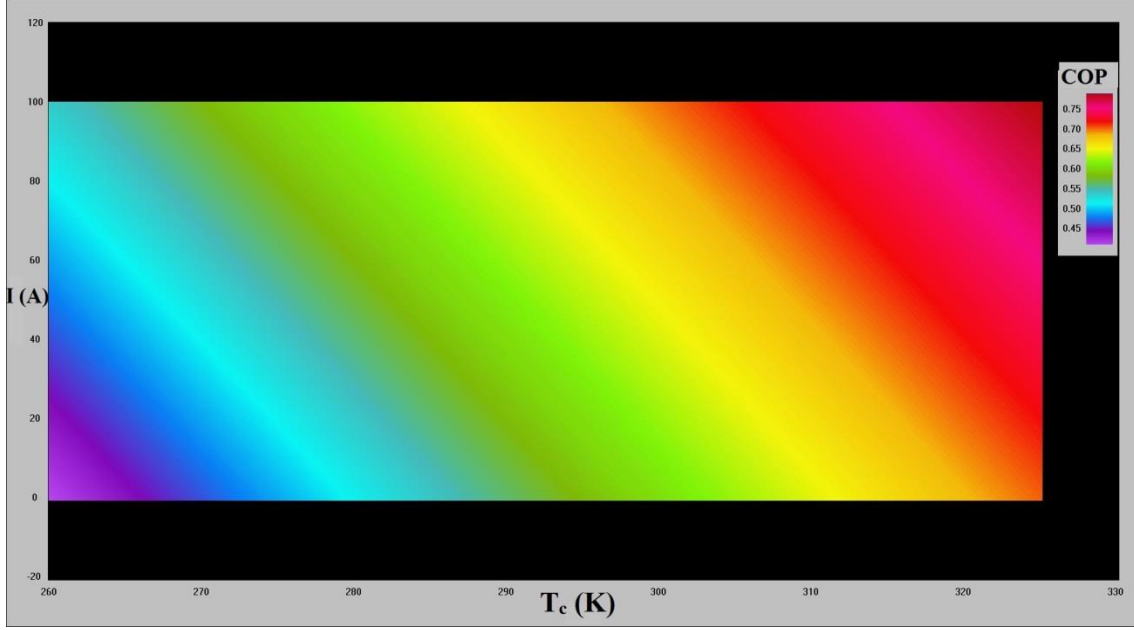
Şekil 3.35. Termoelektrik $p-n$ çiftinin genişliğinin (w) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin başarımlar katsayısına etkisi.

TEC yüzey alanı ise $p-n$ çiftinin genişliği etkisinden biraz daha farklı olarak, daha çok küçük yüzey alanı ve artan soğuk yüzey sıcaklığında başarımlarını en büyük değerine getirmektedir. En büyük TEC yüzey alanı ve en küçük soğuk yüzey sıcaklığına gelen değerlerde başarımlarını en küçük değerini almaktadır. Şekil 3.36'da bu değişim açıkça görülmektedir.

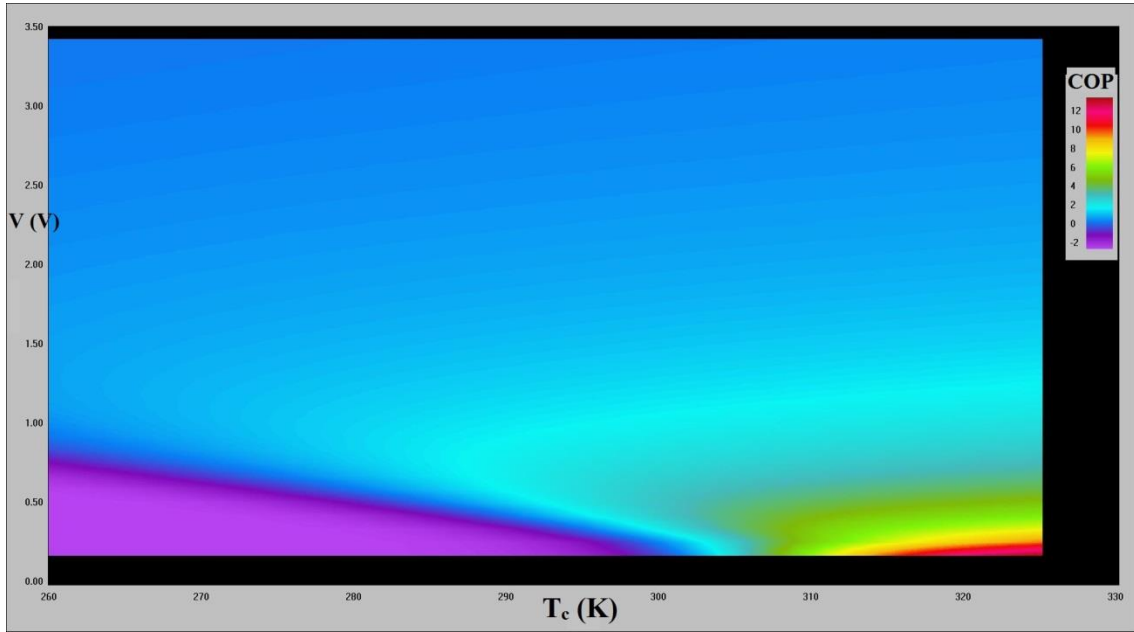


Şekil 3.36. Termoelektrik $p-n$ çiftinin TEC modülünün yüzey alanının (S) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin başarımlarına etkisi.

Şekil 3.37 ve Şekil 3.38 geçen akım değerlerinin ve modül uçlarındaki gerilimin soğuk yüzey sıcaklığı ile değişiminin başarımlarını üzerindeki etkisini göstermektedir. Akım ve soğuk yüzey sıcaklığı değerleri en küçük durumda olduğunda COP da en küçük değerini almaktadır. Aynı şekilde akım ve soğuk yüzey sıcaklığı değerleri en büyük olduğunda başarımlarını en büyüktür.



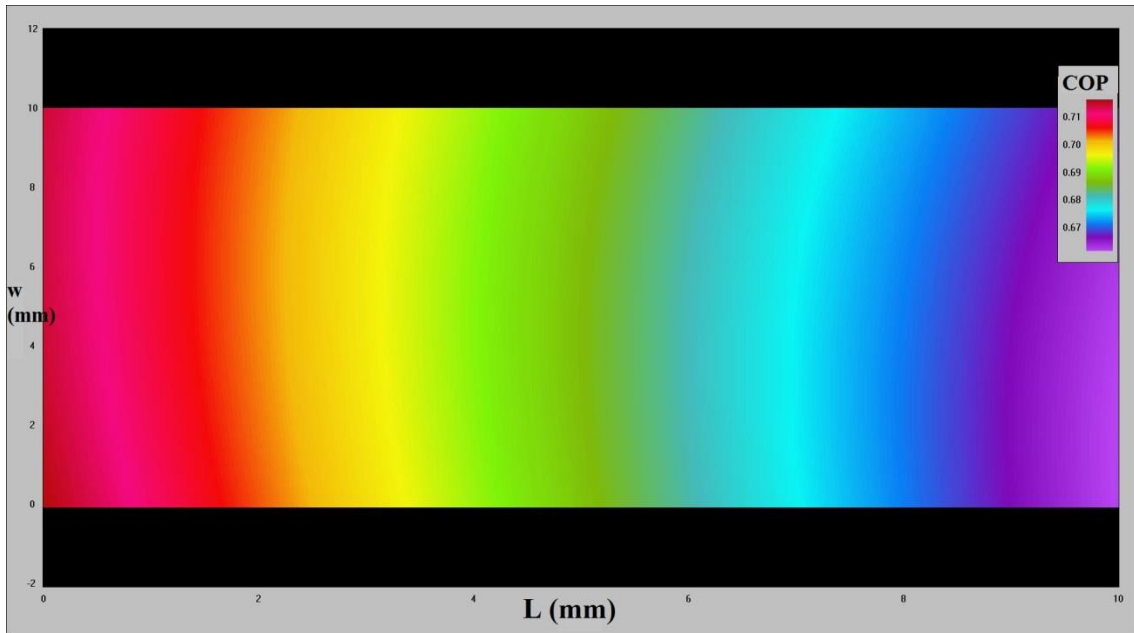
Şekil 3.37. Termoelektrik yarıiletken p - n çiftlerinden geçen akımın (I) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin başarımlarına etkisi.



Şekil 3.38. TEC modül uçlarındaki potansiyel farkının (V) soğuk yüzey sıcaklığı (T_c) ile değişiminin başarımlarına etkisi.

Şekil 3.38’de görülen TEC modül uçlarındaki gerilim ile soğuk yüzey sıcaklığının başarımlar katsayısı üzerindeki etkisi oldukça farklı bir değişim göstermektedir. Gerilimin yaklaşık 1 V ve soğuk yüzey sıcaklığının 300 K değerinden daha az olduğu durumlarda başarımlar katsayısı en küçük değerinde olurken, küçük bir dağılım olan gerilimin 0.50 V ve soğuk yüzey sıcaklığının 310 K değerinden daha büyük olduğu değerlerde başarımlar katsayısı em büyük değerine ulaşmaktadır. Bu değerlerin dışındaki değerlerde başarımlar katsayısı oldukça kararlı olarak 2 değerinde bulunmaktadır.

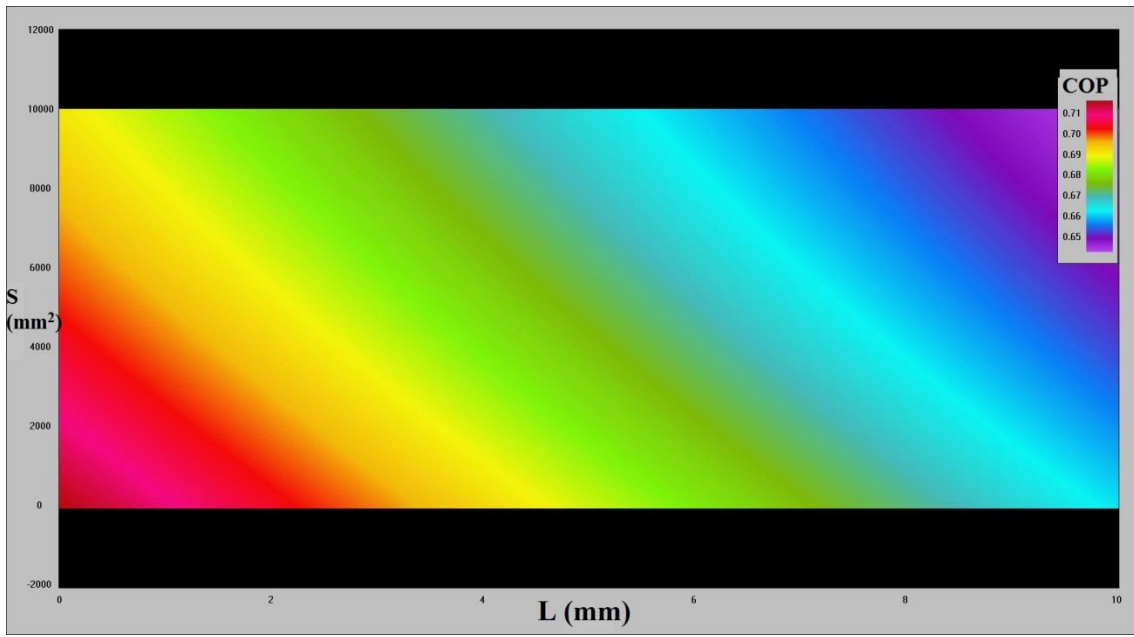
Şekil 3.39 TEC modülünü oluşturan termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin genişliği ile ayak uzunluğunun değişiminin başarımlar katsayısına etkisini göstermektedir. Açıkça görüldüğü gibi genişliğin başarımlar katsayısı üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı halde ayak uzunluğu ile başarımlar katsayısı ters orantılı değişerek ayak uzunluğunun azalan değerlerinde başarımlar katsayısı artarken artan ayak uzunluğu değerlerinde başarımlar katsayısı azalmaktadır.



Şekil 3.39. TEC modülünü oluşturan termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin genişliği (w) ile ayak uzunluğunun (L) değişiminin başarımlar katsayısına etkisi.

TEC modülün yüzey alanı ile ayak uzunluğunun değişiminde ise (Şekil 3.40), yüzey alanı ve ayak uzunluğunun küçük değerlerinde başarımlar en büyük olurken, her ikisinin de büyük değerlerinde başarımlar en küçük değerine ulaşmaktadır.

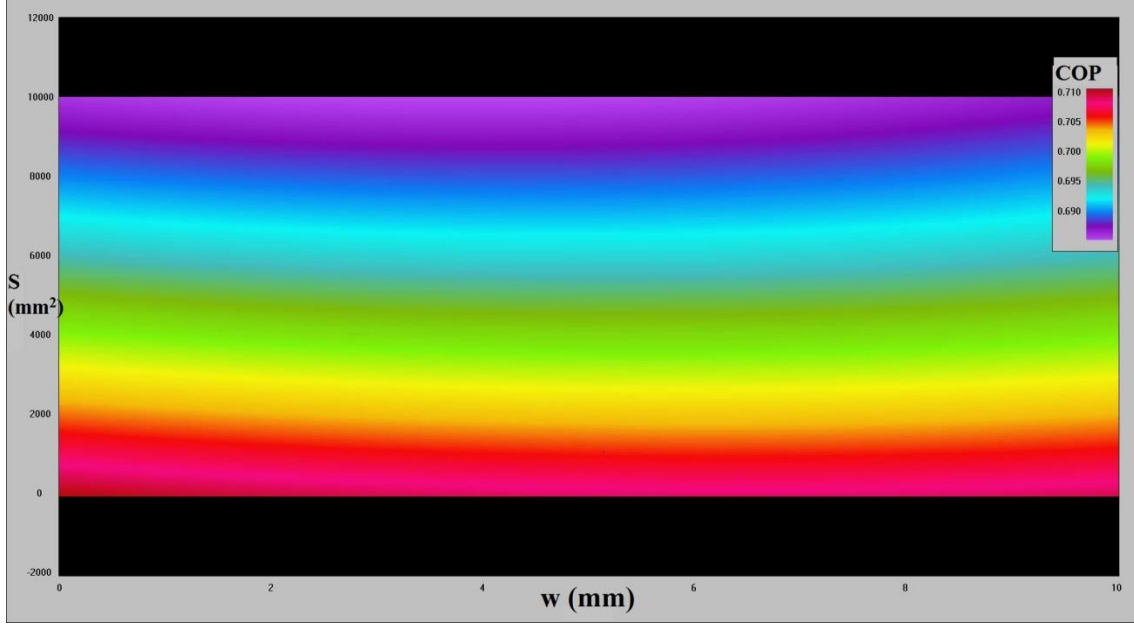
Şekil 3.41 TEC modülünün yüzey alanının termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin genişliği ile değişiminin başarımlar katsayısına etkisini göstermektedir. Genişliğin başarımlar katsayısı üzerinde anlamlı bir katkısı olmadığı halde, azalan yüzey alanı değerlerinde başarımlar katsayısı en büyük, artan yüzey alanı değerlerinde ise en küçük değerini almaktadır.



Şekil 3.40. TEC modülünün yüzey alanının (S) termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin ayak uzunluğu (L) ile değişiminin başarımlar katsayısına etkisi.

Şekil 3.42 bu denemeden sonra elde edilen ANN sonuç ekranını göstermektedir. Giriş sına verileri ve beklenen hedef verileri arasındaki uyum Şekil 3.43'de görülmektedir. Ortalama düzeltme katsayısı ve en büyük hata denenen TEC modülleri için sırası ile %99 ve %0.15 bulunmuştur. Geliştirilen ANN modeli ile tahmin yüksek düzeltme katsayısına ve küçük hata oranına sahiptir. Benzeşim ve tahmin sonuçları arasında kabul edilebilir kesinlik ve iyi bir düzeltme katsayısı ile geliştirilen ANN modeli, TEC modülün başarımlar katsayısı (COP) için kabul edilebilir tahmin kapasitesine sahiptir. Geliştirilen ANN modelinin doğrulanması için

öğrenme verileri içinde bulunmayan $L=w=1$ mm ve $S=100$ mm² olan TEC modülünde 290 K'de elde edilen benzeşim verileri kullanılmıştır.

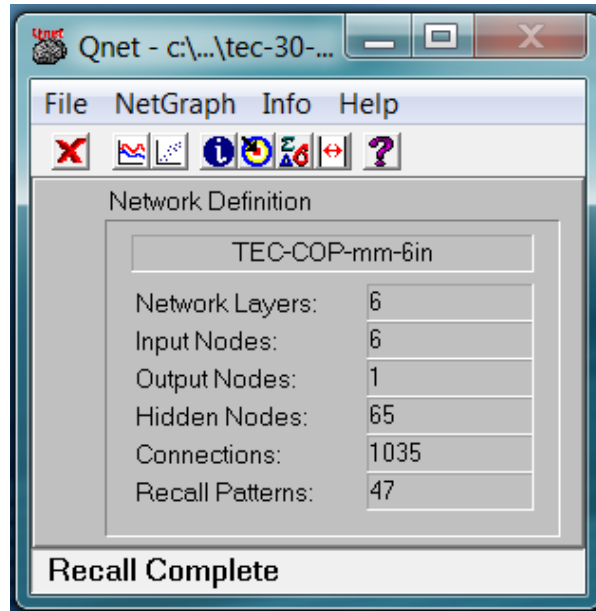


Şekil 3.41. TEC modülünün yüzey alanının (S) termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin genişliği (w) ile değişiminin başarımlarına etkisi.

Çizelge 3.5'de görüldüğü gibi COP tahmininde TEC modül uçlarındaki gerilim %71.13 oranı ile COP üzerine en büyük katkıyı sağlamaktadır. Soğuk yüzey sıcaklığı %22.70 oranı ile ikinci sırada katkısı bulunmaktadır. Devreden geçen akım %3.10 oranı ile üçüncü sırada katkı sağlamaktadır. COP üzerindeki geometrik boyutların etkisi ise diğer değişkenlere göre daha düşük değerdedir. Yarıiletken $p-n$ çiftinin ayak uzunluğu %1.22, genişliği %1.16 oranında katkı sağlarken %0.70 oranı ile TEC modül yüzeyi en küçük katkıyı sağlamaktadır.

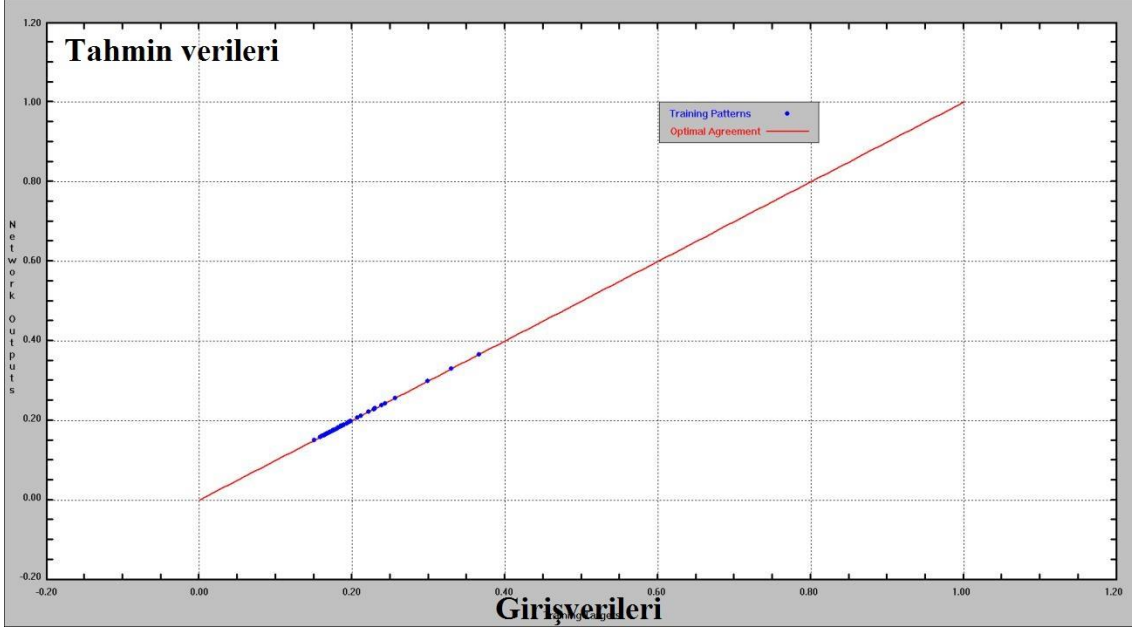
Çizelge 3.5. Başarım katsayısı tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş verilerinin TEC modülün başarım katsayısına yüzde katkı oranı

Giriş değişkenleri	COP için % Katkı oranı
T_c	22.70
L	1.22
w	1.16
S	0.70
I	3.10
V	71.13



Şekil 3.42 Başarım katsayısı tahmini için geliştirilen ANN modelinin sonuç ekranı.

ANN modelinin başarımı istatistiksel olarak etkin hata ve ortalama düzeltme katsayısı ile ölçülmektedir. Başarım katsayısı (COP) verilerinin öğrenme verileri içinde olmayan bir bölümü geliştirilen ANN modelinin doğruluğunu ölçmek için kullanılmıştır. Şekil 3.43’de görüldüğü gibi başarım katsayısı için ortalama düzeltme ve en büyük hata sırası ile %99 ve %0.5 olarak elde edilmiştir.



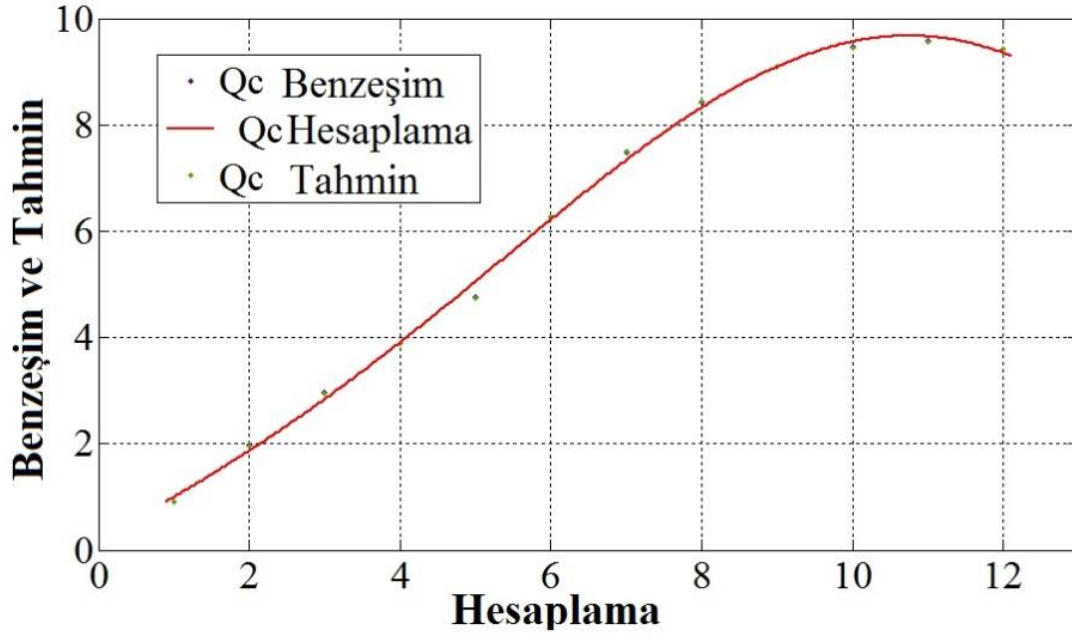
Şekil 3.43. Başarım katsayısı tahmini için geliştirilen ANN modelinde giriş sınama verileri ile beklenen hedef veriler arasındaki uyum.

3.3. MATLAB® İLE HESAPLAMA,

MATLAB® Curve Fitting Toolbox™ ANN gibi ilk defa TEC modülünün termoelektrik özelliklerini hesaplamak için kullanılmıştır ve sonuç verilerine uygun fonksiyonlar ve grafik sağlamaktadır (MATLAB® User's guide). Giriş verileri yüklendikten sonra, üstel, Fourier, Gauss, polinom gibi fonksiyonlar ile bir hesaplama denklemi oluşturulmaktadır.

Soğutma gücü (Q_C) için en iyi model güç serisi modeli bulunmuştur (Şekil 3.44). Güç serisi x değişkeninin üstel fonksiyonlarının toplamıdır. Q_C için bu model;

$$Q_c(x) = -0.0096x^3 + 0.1337x^2 + 0.5412x + 0.2992 \quad (3.3)$$



Şekil 3.44. Soğutma gücü için hesaplama, tahmin ve benzeşim verileri arasındaki uyum.

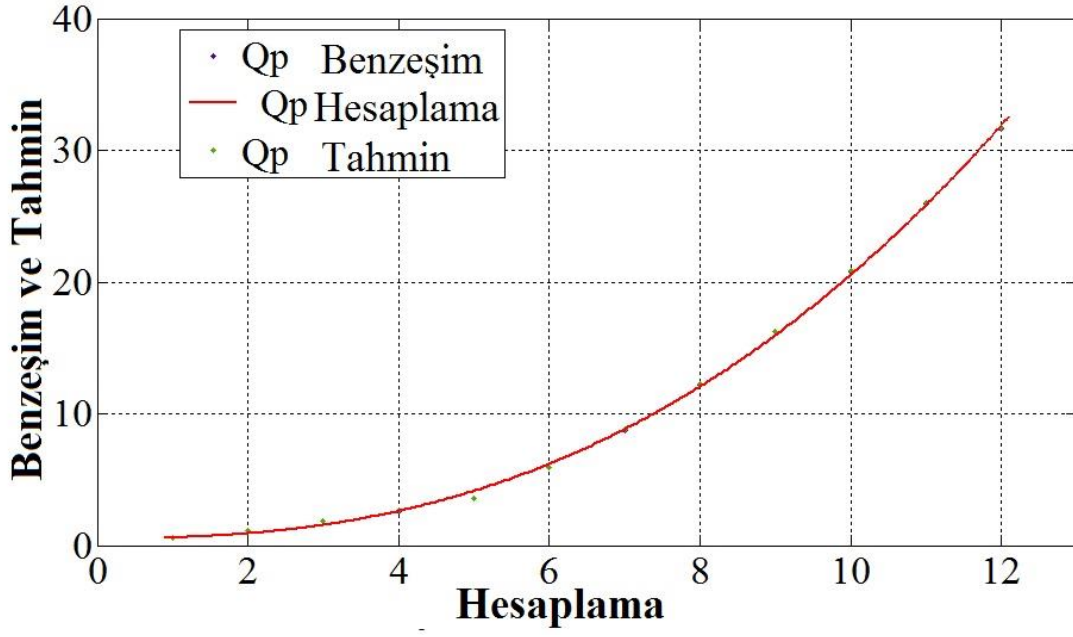
olarak elde edilmiştir. Bu modelde sıfıra yakın değerler için iyi bir hesaplama olduğunu gösteren etkin hata (RMSE) 0.173 olarak bulunmuştur. Bire yakın değerlerin model için daha iyi bir düzeltme katsayısı verdiği değer ise 0.998 olarak elde edilmiştir.

Güç tüketimi (Q_P) için ikinci modelde iki terimli güç serisi modeli bulunmuştur (Şekil 3.45). Bu modelde düzeltme katsayısı 0.999 ve etkin hata 0.299 olarak bulunmuştur. Q_P için elde edilen bu model ise Eşitlik 3.4'de görüldüğü gibidir.

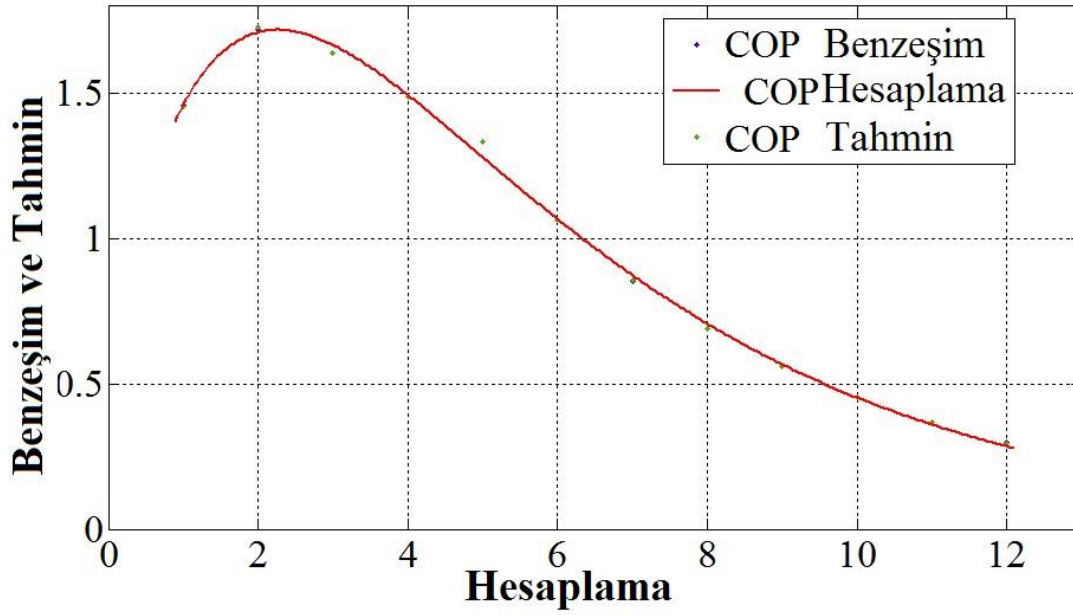
$$Q_P(x) = 0.068x^{2.47} + 0.533 \quad (3.4)$$

Başarım katsayısı (COP) için üçüncü model iki terimli üstel olarak azalan bir fonksiyondur (Şekil 3.46). Bu model için etkin hata 0.024 ve düzeltme katsayısı 0.998 olarak bulunmuştur.

$$COP(x) = 5.18e^{-0.24x} - 4.57e^{-0.56x} \quad (3.5)$$



Şekil 3.45. Güç tüketimi için hesaplama, tahmin ve benzeşim verileri arasındaki uyum.



Şekil 3.46. Başarım katsayısı için hesaplama, tahmin ve benzeşim verileri arasındaki uyum.

3.4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

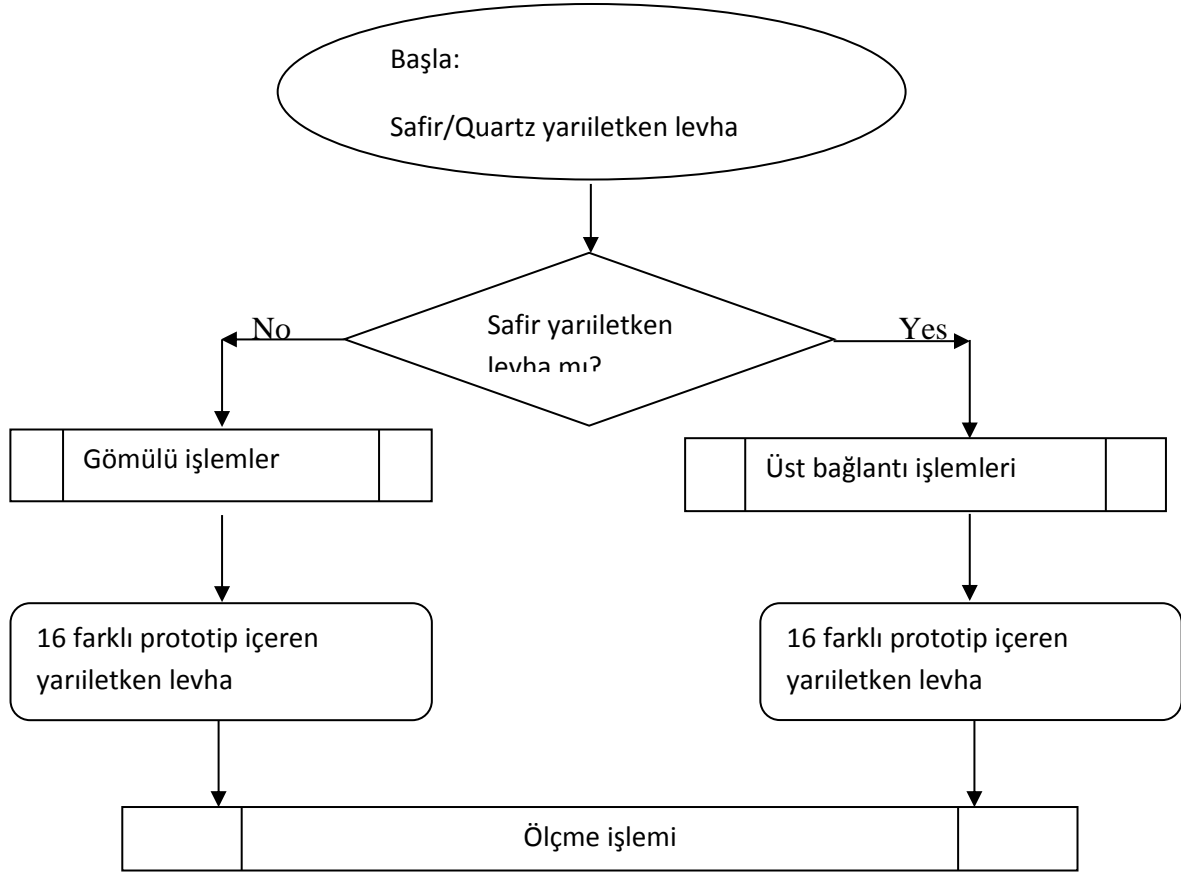
Yapılan benzeşim ve tahmin sonuçlarından yararlanılarak uygun bir TEC modülü prototipi için deneysel çalışmalar Dortmund Teknik Üniversitesi, Almanya laboratuvarlarında yapılmıştır. Prototip çalışmaları farklı deneysel aşamaları gerektirmektedir. Bu aşamalar sırası ile aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Maskların tasarımı
- Hammaddenin ve deney cihazlarını temini
- Prototipin ölçme sisteminin geliştirilmesi
- Ön ölçmelerin yapımı
- Ön ölçmelere göre prototip yapım ayarlarının yapılması
- Prototip yarıiletken levhanın üretimi ve ölçme sisteminde ölçülmesi
- Prototip yarıiletken manyetik alanda ölçülmesi
- Ölçme sonuçlarının bilgisayar benzeşimleri ile karşılaştırılması

Bu aşamalar Şekil 3.47’de görülen akış şemasına göre izlenebilir. Prototip üretimine iki yüzü de parlatılmış 670 µm kalınlığında alüminyum oksit (Al_2O_3) levha ile başlanmıştır. Daha sonra *p*- ve *n*-tipi termoelektrik yarıiletken elemanlar sırası ile %1 selenyum ve %1 antimon Bizmut-Tellüre (Bi_2Te_3) katkılanarak elde edilmiştir.

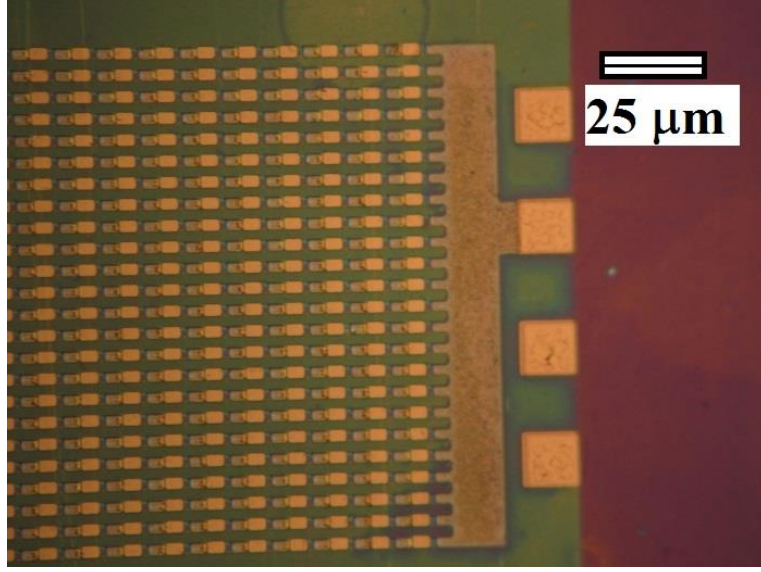
TiN bileşimi yapıştırma tabakası olarak kullanılmıştır. Titanyum elementi alt tabaka bağlantıları için kullanılırken üst tabaka bağlantıları alüminyumdan yapılmıştır. Al_2O_3 ve Bi_2Te_3 arasında daima kalınlığı 95 nm olan TiN yapıştırıcı bir tabaka vardır. bu yapıştırıcı tabaka asla doğrudan alttaki Ti bağlantılara temas etmemektedir.

“Plazma 80” saçılma yöntemi 1350 °C sıcaklıkta 30 dakika tavlanan örnekler için kullanılmıştır. Bu işlemde “hexamethyldisilane (HMDS)” ortam atmosferidir. 30 saniye süre ile dönme hızı dakikada 3500 olmuş ve bu 60 saniye 1000 °C sıcaklıkta tavlama işlemi izlemiştir. 18 saniye ile MA4 (EUV) litografi yöntemi kullanılmıştır. Prototiplere son tavlama olarak 1350 °sıcaklıkta 30 dakika ısı işlem yapılmıştır.

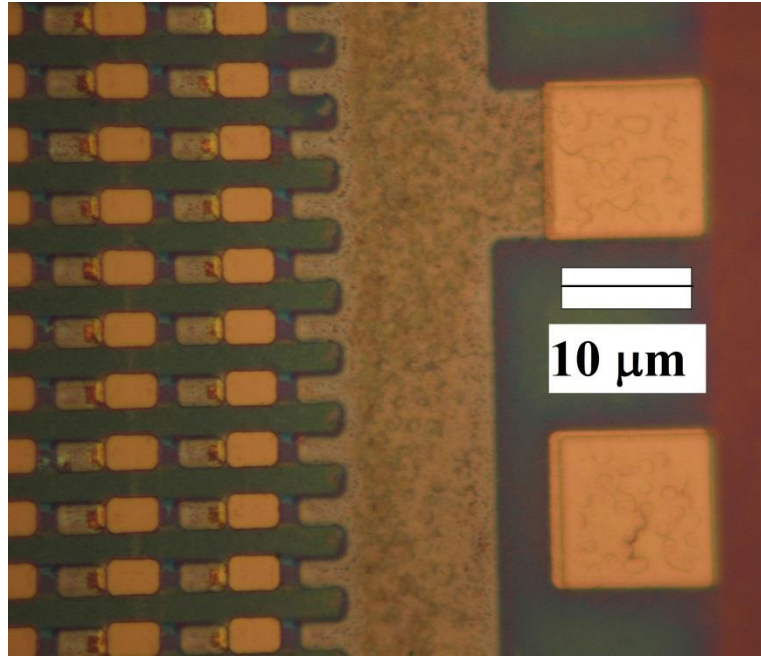


Şekil 3.47. Örnek hazırlama işlemi akış şeması.

Kullanılan geliştirici 2:1 oranında sulandırılmış su kullanan AZ cihazıdır. Temizlendikten sonra 1350 °C sıcaklıkta 10 dakika kurutulan örnekler reaktif iyon aşındırma yöntemi ile aşındırılmıştır. Ellipsometry ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemleri hazırlanan örneklerin incelenmesinde kullanılmıştır. Şekil 3.48 bu işlemler ile hazırlanan örneklerden bazılarını göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.48. Litografi yöntemi ile hazırlanmış örneklerden farklı görünüşler a) modülün kenarı ve b) büyütülmüş durumu.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Termoelektrik soğutma sistemleri, semi kondüktörler (termoelektrik malzeme) elektriksel güç kullanarak bir ortamdaki ısı enerjisini başka bir ortama pompalayarak ısı transfer eder. Bu sebeple termoelektrik sistemleri, bazı soğutma ve ısıtma uygulamalarında alternatif çözümler olabilmektedir. Sistemlerin 1 cm² gibi küçük boyutlarda modellenenebilmesi, çalışmaya başlama süresinin kısa olması ve ayarlanan şartlardaki çalışma hassasiyetlerinin istenen seviyelerde olması (Laboratuvar cihazlarında $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ hassasiyetinde çalışırlar) çevreye zararlı sayılan soğutucu akışkanlara bağımlı olmamaları gibi üstünlüklerinden dolayı, termoelektrik soğutucular hem endüstriyel hem de ticari amaçlı birçok alanda ikinci bir çözüm olarak kullanılabilir.

Termoelektrik sistemlerin en çok kullanıldığı uygulama alanları, soğutma ve iklimlendirme süreçleridir. Trenlerin ve helikopterlerin iklimlendirilmesi, gemilerde soğuk hava depolarının soğutulması gibi uygulamalarda geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Kişisel bilgisayar ve elektronik sanayisinde üretilen ürünlerin yüksek performansta çalışması için ısınan mikroişlemcilerinin (chiplerin) soğutulması çok önemli konudur. Günümüzde üretilen hızlı mikroişlemciler termoelektrik soğutuculu şekilde üretilmektedir.

Günümüzde elektrikli ve elektronik aletler üretilirken en fazla dikkat edilen husus cihazların ne kadar elektrik enerjisi tükettiği ve bunun karşılığında ne kadar verim sağladığıdır. Artık cihazların çalışırken yapması gereken işi ne kadar enerji tüketerek yaptığı çok daha önemlidir. Bu işlem termoelektrik soğutma sistemlerinde başarımlı katsayısı (COP) yardımıyla yapılır. Çıkış gücünün giriş gücüne oranının en büyük olduğu noktalar cihazların en verimli çalıştığı durumdur. Bundan dolayı herhangi bir cihaz çalıştırılırken en verimli değerlerinde çalıştırılması önerilir.

4.1. TEC MODELLERİN İÇİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ELDE EDİLEN TAHMİN SONUÇLARININ TARTIŞILMASI

Bu araştırma tezinde termoelektrik soğutma modüllerinin performansının termoelektrik p-n çiftlerinin geometrik boyutlarına göre değişimi sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Bu inceleme için daha önce modellenen dört farklı termoelektrik soğutma sisteminden sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen veriler kullanılmıştır. Dört farklı boyutta modül modellenerek FEM yöntemi bunlara ait çözümler yapılmıştır. Modellenen modüllerin boyutlarında p-n çiftlerinin ayak uzunluğu (L) 1cm'den 1 μ m'ye değişirken, modül yüzey alanı (S) 100 cm²'den 100 μ m²'ye değişmektedir (Çizelge 3.2). FEM ile yapılan çözümlemede boyutların soğutma gücü üzerindeki etkisi oldukça büyüktür. Termoelektrik modüllerin boyutları küçüldükçe sistemin başarımı artmakta ve birim yüzeyde daha fazla soğutma gücü elde edilebilmektedir.

Şekil 3.4'de görüldüğü gibi soğutma gücü yoğunluğu en fazla olan model, p-n çiftinin ayak uzunluğu (L) ve genişliği (w) 1 μ m olan modeldir. Bunun nedeni birim yüzeye etki eden termoelektrik yarıiletken p-n çifti sayısının daha fazla olmasıdır. Başarım katsayısı termoelektrik yarıiletken p-n çifti sayısı ile doğru orantılıdır. 4 numaralı TEC modülünde 325 K'de 14 kWatt değerine ulaşırken 1 numaralı TEC modülde bu değer sadece 1.4 Watt değerinde bulunmaktadır.

FEM çözümlerini kullanarak benzeşimleri yapılan 4 adet TEC modülünden elde edilen veriler ANN modellerinde öğrenme verileri olarak kullanılmıştır. Tüm modeller için giriş verileri; soğuk yüzey sıcaklığı (T_C), termoelektrik yarıiletken çiftin ayak uzunluğu (L), genişliği (w), modül yüzey alanı (S), geçen akım (I) ve TEC modülü uçlarındaki gerilim (V) giriş verileri olarak kullanılmış ve bu veriler yardımı ile ANN modeli öğrenme sağlayıp çıkış verisi olarak soğutma gücü (Q_C), güç tüketimi (Q_P) ve başarım katsayısı (COP) tahmin edilmiştir.

Öğrenme verileri her ANN modeli için, TEC modüllerinin çözümlenmesinde elde edilen giriş değişkenlerini içeren toplam 357 satır veri bankasından oluşmuştur. İlk olarak bu veriler yardımı ile ANN modeli öğrenmesini 4 gizli seviyeli tanjant-hiperbolik ve sigmoid aktarım fonksiyonlarından oluşan model ile tam bir öğrenme sağlamıştır. Öğrenmede yapılan hata oranı ise %0099 düzeyinde olmuştur (Şekil 3.6 ve Şekil 3.7). soğutma gücü tahmininde

gerçekleştirilen modelin öğrenmesinde termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin önemli bir katkısı olmuştur. Genel anlamda $p-n$ çiftinin boyutlarının küçülmesi soğutma gücünün (Q_C) gelişmesine olumlu katkı yapmaktadır. Bu değişimi sırası ile Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de gözlenmektedir.

Güç tüketiminin (Q_P) tahmini için dört gizli seviyeli ve tanjant-hiperbolik ve sigmoid aktarım fonksiyonlarından oluşturulan ANN modelinde tam bir öğrenme sağlanırken öğrenme hatası %0.0138 düzeyinde gerçekleşmiştir. Şekil 3.21, Şekil 3.22, Şekil 3.23’de görüldüğü gibi termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin boyutlarının artan değerlerinde güç tüketimi azalmaktadır. Geometrik boyutlar azaldıkça güç tüketiminin artmaktadır (Şekil 3.26, Şekil 3.27 ve Şekil 3.28).

Başarım katsayısı (COP) için geliştirilen dört gizli seviyeli ve tümüyle sigmoid aktarım fonksiyonlarından oluşan ANN modeli %99.9997 öğrenme oranına ulaşırken %0.0208 hata oranındadır. Termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin azalan boyutlarının başarım katsayısına oldukça önemli olumlu bir katkı yaptığı açıkça Şekil 3.34, Şekil 3.35, Şekil 3.36, Şekil 3.39, Şekil 3.40 ve Şekil 3.41’de gözlenmektedir.

Çizelge 4.1 giriş verilerinin soğutma gücü, güç tüketimi ve başarım katsayısı tahminine katkı oranlarını göstermektedir. Beklendiği gibi soğutma gücü ve güç tüketiminde en büyük katkıyı devreden geçen akım vermektedir. Bu oran soğutma gücünde %65.79 olurken, güç tüketiminde %85.07 ile en büyük değerine ulaşmaktadır. Soğutma gücünde TEC modülün uçları arasındaki potansiyel fark %10.87 ikinci büyük değerdedir. Önemli olan TEC modülün geometrik boyutlarının katkısıdır. Görüldüğü gibi %8.86 ile TEC modülün yüzey alanı tahmin için üçüncü sırada katkı sağlamaktadır. Daha sonra %6.28 değeri ile soğuk yüzey sıcaklığı olurken, termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin ayak uzunluğu %5.40 ile soğutma gücü tahminine anlamlı bir katkı yapmaktadır. En az katkı ise %2.80 ile $p-n$ çiftinin genişliğinden gelmektedir.

Güç tüketimi tahminine akımdan sonra en büyük katkıyı %5.64 oranı ile TEC modülün uçları arasındaki potansiyel fark vermektedir. Termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftinin ayak uzunluğu ve genişliği %3.60 ve %3.50 ile birbirine oldukça yakın değerlerde güç tüketiminin tahminine katkı sağlamaktadır. En az katkı oranı ise sırası ile soğuk yüzey sıcaklığı %1.19 ve TEC modülünün yüzey alanından %1.01 gelmektedir.

Çizelge 4.1. ANN modellerinde TEC modüllerin soğutma gücü, güç tüketimi ve başarımların tahminine giriş verilerinin katkısı

Giriş değişkenleri	Katkı oranı %		
	Q _c	Q _p	COP
T _c	6.28	1.19	22.70
L	5.40	3.60	1.22
w	2.80	3.50	1.16
S	8.86	1.01	0.70
I	65.79	85.07	3.10
V	10.87	5.64	71.13

Soğutma gücü, güç tüketimi ve başarımların tahminine giriş verilerinin katkısı için kabul edilebilir öğrenme gerçekleştiğinden sonra, bu modellerin doğrulaması yapılmıştır. Doğrulama işlemi için öğrenme verileri içinde olmayan $L=w=1$ mm ve $S=100$ mm² ölçülerinde olan TEC modülün 290 K'deki verileri kullanılmıştır. Soğutma gücü için Şekil 3.17'de görüldüğü gibi ortalama düzeltme katsayısı, en büyük hata ve standart sapma sırası ile 1.000, 0.060 ve 0.018 olarak bulunmuştur.

Doğrulama işlemi öğrenme verileri içinde bulunmayan aynı verilerle güç tüketimi için yapıldığında Şekil 3.30'de görülen uyum elde edilmiştir. Ortalama düzeltme katsayısı, en büyük hata ve standart sapma sırası ile 1.000, 0.151 ve 0.052 olarak bulunmuştur. Şekil 3.43 ise başarımların tahminine giriş verilerinin katkısı için yapılan doğrulama sonucunda elde edilen uyumu göstermektedir. Başarımların tahminine giriş verilerinin katkısı için ortalama düzeltme katsayısı, en büyük hata ve standart sapma sırası ile 0.999, 0.006 ve 0.003 olarak bulunmuştur. Bu değerler Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Geliştirilen ANN modelleri benzeşim ve tahmin sonuçları arasında kabul edilebilir kesinlik ve iyi bir düzeltme katsayısı ile TEC modülün termoelektrik özellikleri için kabul edilebilir tahmin kapasitesine sahiptir.

Çizelge 4.2. Sınaması yapılan TEC modülleri için ortalama düzeltme katsayısı, en büyük hata ve standart sapma değerleri

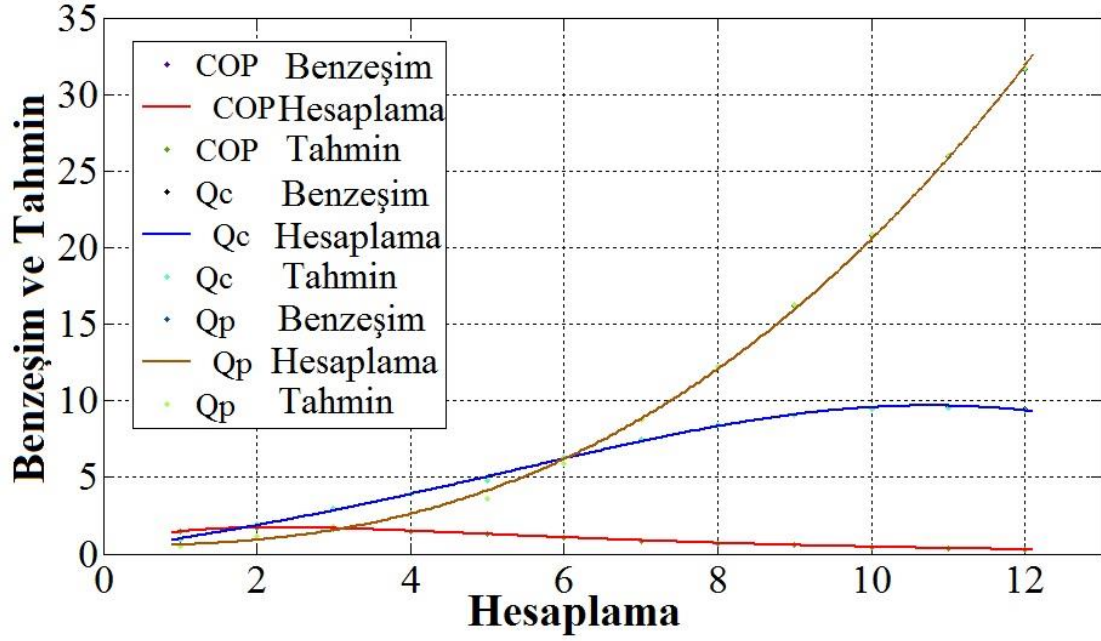
	Düzeltilme katsayısı	En büyük hata	Standart sapma
Q_c	1.00000	0.06058	0.01814
Q_p	1.00000	0.01513	0.05240
COP	0.99999	0.00597	0.00262

4.2. MATLAB® İLE YAPILAN HESAPLAMALARIN TARTIŞILMASI

MATLAB® Curve Fitting Toolbox™, ANN gibi ilk defa TEC modülünün termoelektrik özelliklerini hesaplamak için kullanılmıştır. Sonuç verilerine uygun fonksiyonlar bulunmuş ve grafikleri çizilmiştir. Giriş verileri yüklendikten sonra, üstel, Fourier, Gauss, polinom gibi fonksiyonlar ile analitik hesaplama denklemi oluşturulmuştur. Bu denklemler soğutma gücü için Eş. 3.3, güç tüketimi için Eş.3.4 ve başarımların katsayısı için Eş. 3.5’de verilmektedir.

Şekil 4.1 soğutma gücü (Q_c), güç tüketimi (Q_p) ve başarımların katsayısı (COP) için hesaplanan değerler ile benzeşim ve tahminden elde edilen sonuçların değişimini göstermektedir. Her modelden elde edilen tüm sonuçlar yaklaşık olarak %99 ortalama düzeltme katsayısı ve yaklaşık en büyük etkin hata 0.3 ile çok iyi bir uyum içindedir. Tablo 3 elde edilen tüm sonuçları göstermektedir. Tahmin ve hesaplama modellerinin her ikisi de oldukça iyi sonuç vererek benzeşim sonuçlarını teyit etmektedir.

Çizelge 4.3. ise ANN ile elde edilen tüm modellerden elde edilen tahmin verileri ile MATLAB® Curve Fitting Toolbox™, ile elde edilen eşitliklerden hesaplanan verileri karşılaştırmaktadır. Görüldüğü gibi elde edilen veriler arasında çok yüksek bir uyum vardır.



Şekil 4.1. Q_c , Q_p ve COP için benzeşim, tahmin ve hesaplama verileri arasındaki uyum.

Çizelge 4.3. Sınaması yapılan TEC modülleri için ortalama düzeltme katsayısı, en büyük hata ve standart sapma değerleri

	Tahmin		Hesaplama	
	Düzeltilme katsayısı	En büyük hata	Düzeltilme katsayısı	En büyük hata
Q_c	1.000	0.061	0.998	0.173
Q_p	1.000	0.015	0.999	0.299
COP	0.999	0.006	0.998	0.024

4.3. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN TARTIŞILMASI

Sayısal yöntemlerin sonuçlarından yararlanılarak bir TEC modülünün prototipi Dortmund Teknik Üniversitesi'nin gelişmiş temiz oda ve cihazları olan laboratuvarlarında litografi yöntemi ile yapılmıştır. Prototip yapım aşmaları Şekil 3.47'de görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 100 nm boyutunda çalışılarak Şekil 3.48'de bir kesiti görülen örnekler hazırlanmıştır. Bu örneklerde bağlantı ve ölçmeler kısmen tamamlanmış olmasına

rağmen alınan ilk ölçmeler ümit vericidir ve yapılan sayısal yöntemlerin son ürünü hazırlamaya olan katkısını açıkça ortaya koymaktadır.

4.4. SONUÇLAR

TEC modülü oluşturan termoelektrik yarıiletken $p-n$ çiftlerinin ve TEC modülün geometrik boyutları ve geometrik şekil katsayısı bir TEC modülünün termoelektrik özelliklerinin en iyi olabilmesi için sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Bu incelemeden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) Soğutma gücünün değişimi, düşük enerji tüketimi ve COP soğutma teknolojisine anlamlı bir katkı yapmaktadır.
- 2) Benzeşim sonuçlarının en önemli katkılarında birisi yarıiletken teknolojisi ve uygulamalarındaki soğutma için bir çözüm olabileceğidir.
- 3) Geometrik şekil katsayısını içeren geliştirilmiş ANN modelleri benzeşim sonuçları ile kabul edilebilir kesinlikte iyi bir tahmin kapasitesine sahiptir.
- 4) Benzeşim ve tahmin sonuçlarına bağlı MATLAB® ile bulunan analitik eşitlikler ise benzeşim ve tahmin sonuçları ile iyi bir uyum içindedir.
- 5) Sayısal yöntemlerle elde edilen bu modellerden elde edilen sonuçlar tasarımcılar için zaman ve madde kazanımı sağlayan TEC modülün termoelektrik özelliklerini önceden belirleme için kullanışlı bir araç olduğunu kanıtlamaktadır.
- 6) Sayısal yöntemler yardımı ile hazırlanan TEC modülünün yapılan ön ölçmeleri sayısal yöntemlerin ve deneysel ölçmelerin uyumu beklenen özelliklerde en kısa zamanda ve en az ekonomik harcama ile bir modül üretmenin önemini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

Chang Y.W., Cheng C.H., Wu W.F. and Chen S.L., 2008. An experimental investigation of thermoelectric air-cooling module, *International Journal of Engineering and Applied Science*, Vol. 4:3, p. 173.

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

Tritt T.M. and Subramanian M.A., 2006. Thermoelectric materials, phenomena and applications, *Mrs Bulletin*, Vol. 31, p. 188.

Riffat S.B. and Ma X., 2004. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: a review, *International Journal of Energy Research*, Vol. 28, p. 753.

Fleurial J.P., Snyder G.J., Herman J.A., Smart M. and Shakkottai P., 1999. Miniaturised thermoelectric power sources, *34th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference Proc.*, Vancouver, BC, Canada, 992569.

Arunkumar P., Iswarya P., Supraja S., Rajarayan P. and Balaj G., 2010. A new concept of energy recovery and cooling solution for integrated circuit heat using thermoelectric technology, *International Journal of Computer Communication and Information System*, Vol.2, No. 1, p. 28.

Riffat S.B., Ma X. and Wilson R., 2006. Performance simulation and experimental testing of a novel thermoelectric heat pump system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, p. 494.

Chen L., Meng F. and Sun F., 2009. Effect of heat transfer on the performance of a thermoelectric heat pump driven by a thermoelectric generator, *Revista Mexicana De Fisica*, Vol. 55, p. 282.

Riffat S.B. and Ma X., 2004. Optimum selection (design) of thermoelectric modules for large capacity heat pump applications, *International Journal of Energy Research*, Vol. 28, p. 1231.

Çengel Y., Boles M.A., 2000. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik. Literatür Yayıncılık, 525-555.

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

Derebaşı N. 2014. U. Ü. Fizik Bölümü, Fzk4203 Sensörler dersi ders notları.

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

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

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

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

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

Ioffe A. F., Airapetyants S. V., Ioffe A. V., Kolomoets N. V., Stlbans L. S., 1956. On Increasing the efficiency of semiconducting thermocouples. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 106: 931.

Goldsmid H.J., 2005. A realistic assessment of the future performance of thermoelectric refrigerators, *Journal of Thermoelectricity*, No. 4, p. 14.

Atik K., 2009. Thermoeconomic optimisation in the design of thermoelectric cooler, *5th International Advanced Technologies Symposium*, Karabük University, Turkey,

Wang N., Wang C.H., Lei J.X. and Zhu D.S., 2009. Numerical study on thermal management of LED packaging by using thermoelectric cooling, *International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*, IEEE.

Güldiken F., 2011. Termoelektrik modüllerin fiziksel boyutlarının soğutma kapasitesi üzerine etkisinin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.

Kittel C., 2004. Introduction to solid state physics, John Wiley & Sons Inc. 8th ed.

Bulusu A. and Walker D.G., 2008. Review of electronic transport models for thermoelectric materials, *Superlattices and Microstructures*, Vol. 44, Issue 1, p 1–36.

Rowe D. M., 2006. Thermoelectrics Handbook Macro to Nano, CRC Taylor & Francis.

Buist R. J. and Lau P. G., 1997. Calculation of thermoelectric power generation performance using finite element analysis, 16th International conference on thermoelectrics, Dresden, Germany, p. 551.

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

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

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

Haykin S. 1994. Neural networks: A comprehensive foundation, Prentice Hall, 1-768.

Arbib M. A., 1987. Brains, Machines and Mathematics, Springer, 1-202.

Qnet2000 Help Manuel.

Hagan M. T., Demuth H. B., Beale M. H. 1996. Neural network design, Mark Hudson Beale, MHB Inc. Hayden, Idaho, 1-1002.

Efe, Ö. ve Kaynak O. 2000. Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları. Boğaziçi Üniversitesi Yayınları. İstanbul, s. 3, 103.

Boozarjomehry, R. B. , Svrcek W. Y.. 2001. Automatic Design of Neural Network Structures. 25. p. 1075-1088.

Gurney K., 1999. An Introduction to Neural Networks, UCL Press, London,

Graupe D., 1997. Principles of Artificial Neural Networks, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.

Simons R.E. and Chu R.C., 2000. Application of thermoelectric cooling to electronic equipment: a review and analysis, 16th *IEEE Semi-Therm Symposium*.

Miti G.K., Moses A.J., Derebasi N., Fox D., 2003. A neural network-based tool for magnetic performance prediction of toroidal cores, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* Vol. 254, p. 262.

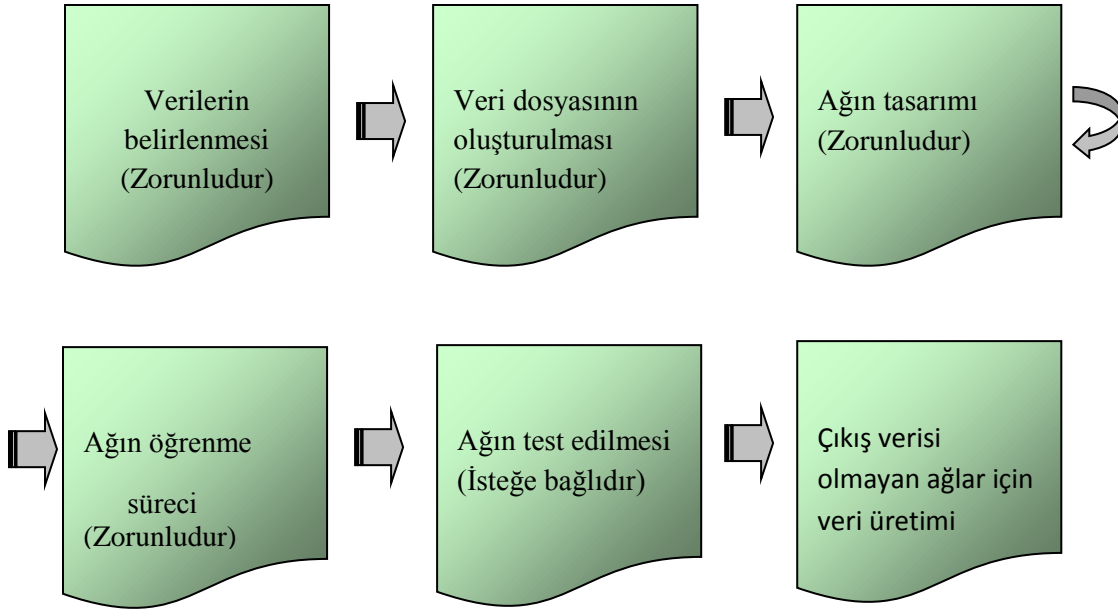
Laidi M. and Hanini S., 2013. Optimal solar COP prediction of a solar-assisted adsorption refrigeration system working with activated carbon/methanol as working pairs using direct and inverse artificial neural network, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 36, p. 247.

MATLAB® Curve Fitting Toolbox™ User's Guide, R2013a.

EKLER

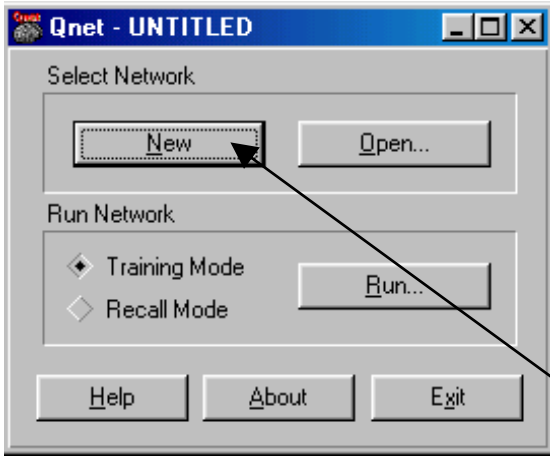
EK-1 Qnet2000® PROGRAMIN KULLANIMI

Program, MS® Excel ile birlikte çalışmaktadır. Programın akış şeması Şekil E1.1.'de verilmiştir. Programda kullanılan giriş ve hedef verileri, normalleştirme gerekliliği, ağın testi isteğe bağlıdır. Fakat, sinir ağının seviye sayısı, gizli seviye sayısı, gizli seviyelerdeki nöron sayısı, kullanılan transfer fonksiyonu, döngü sayısı, programın tarayacağı satır sayısı programda yapılması zorunlu olan adımlardır.



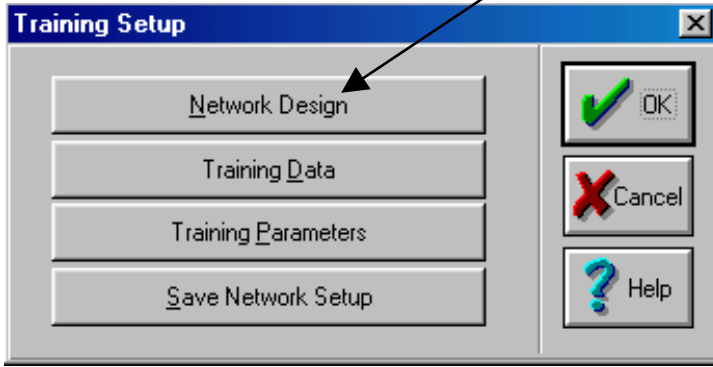
Şekil E.1.1. Qnet2000® Programın akış diyagramı

Yeni bir yapay sinir ağı oluşturmak için, Şekil E1.2.'de görüldüğü gibi "New" menüsüne girilir. Sinir ağı tasarlamak için, Şekil E1.3.'deki "Network Design" seçeneği işaretlenir.



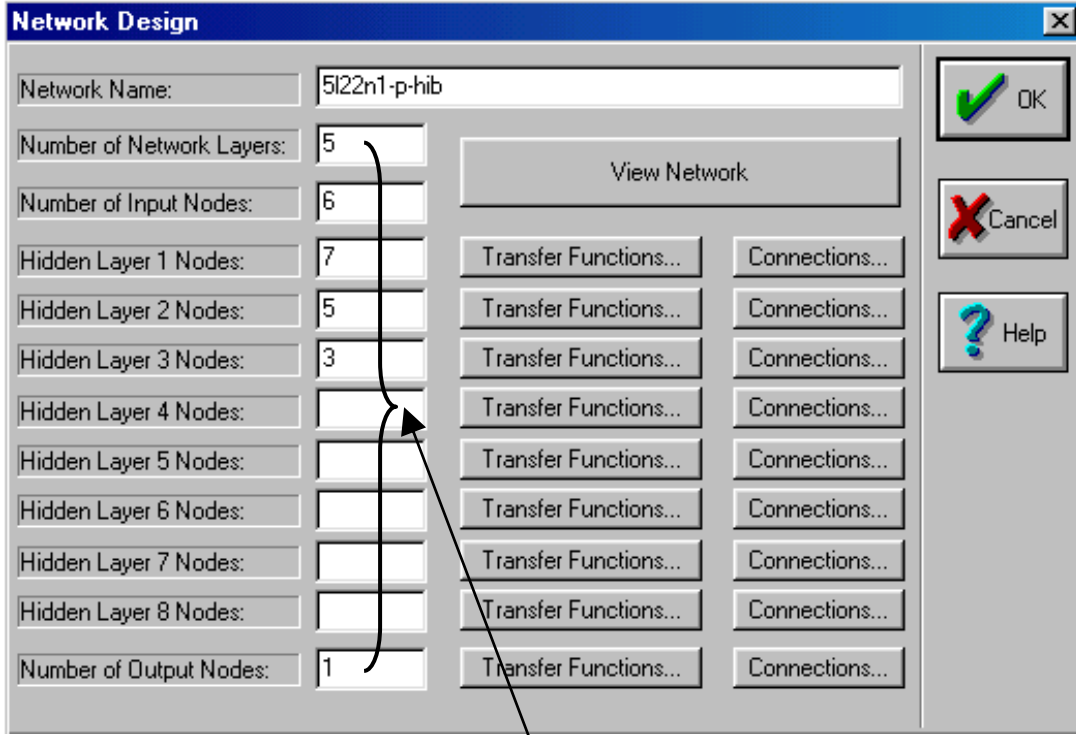
Sinir ağına giriş adımları

Şekil E.1.2. Programa giriş adımı

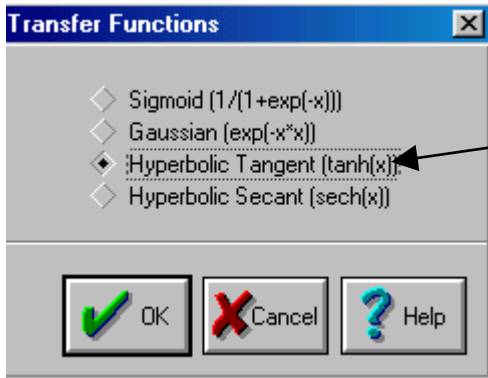


Şekil E.1.3. Sinir ağı tasarımına giriş adımı

Şekil E1.4.'deki bu pencerede, ağın adı, seviye sayısı, giriş, gizli seviye ve çıkış nöron sayıları yazılır. Aktarım fonksiyonları seçeneklerinden, Şekil E1.5.'deki gibi her bir seviye için gizli seviyeler ve çıkış seviyesinde kullanılacak olan fonksiyonlar seçilir. "Tamam" tuşuna basılınca, Şekil E1.3.'deki ana menüye dönülür ve bir sonraki "Training Data" menüsüne girilir.



Şekil E.1.4. Sinir ağı tasarımı

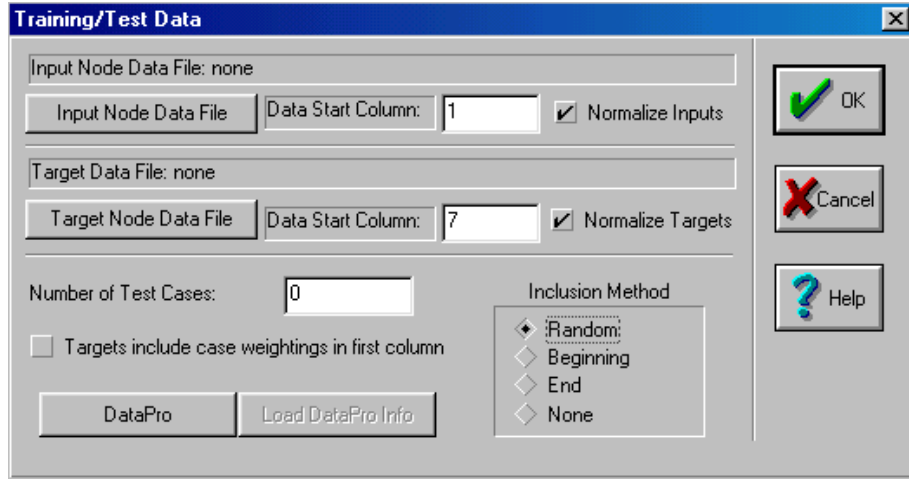


Ağ seviyeleri ve transfer fonksiyonları

Şekil E.1.5. Aktarım fonksiyonunun seçimi

“Training Data” menüsünde karşımıza çıkan ekranda Şekil E.1.6’deki DataPro seçeneğine girilerek, Şekil E.1.7.’deki giriş verileri, Şekil E1.8.’deki “Inputs” bölümüne “Paste Inputs” komutuyla yapıştırılır. “Paste Inputs” menüsünün altındaki “Labels” menüsüne girilir. Ekrana gelen Şekil E1.9.’daki pencerede “Add/Edit” menüsü işaretlenir. Ekrana gelen pencereye giriş değişkenleri birimleriyle birlikte yazılır. Tamam tuşu işaretlenir. Şekil E1.7.’deki hedef veriler (sadece güç kaybı sütunu veya sadece manyetik geçirgenlik sütunu) seçilip, Şekil E1.8.’deki “Targets” bölümüne “Paste Targets” komutuyla yapıştırılır. Yine “Labels” menüsüne girilerek, hedef veri olan güç kaybı veya manyetik geçirgenlik birimiyle birlikte

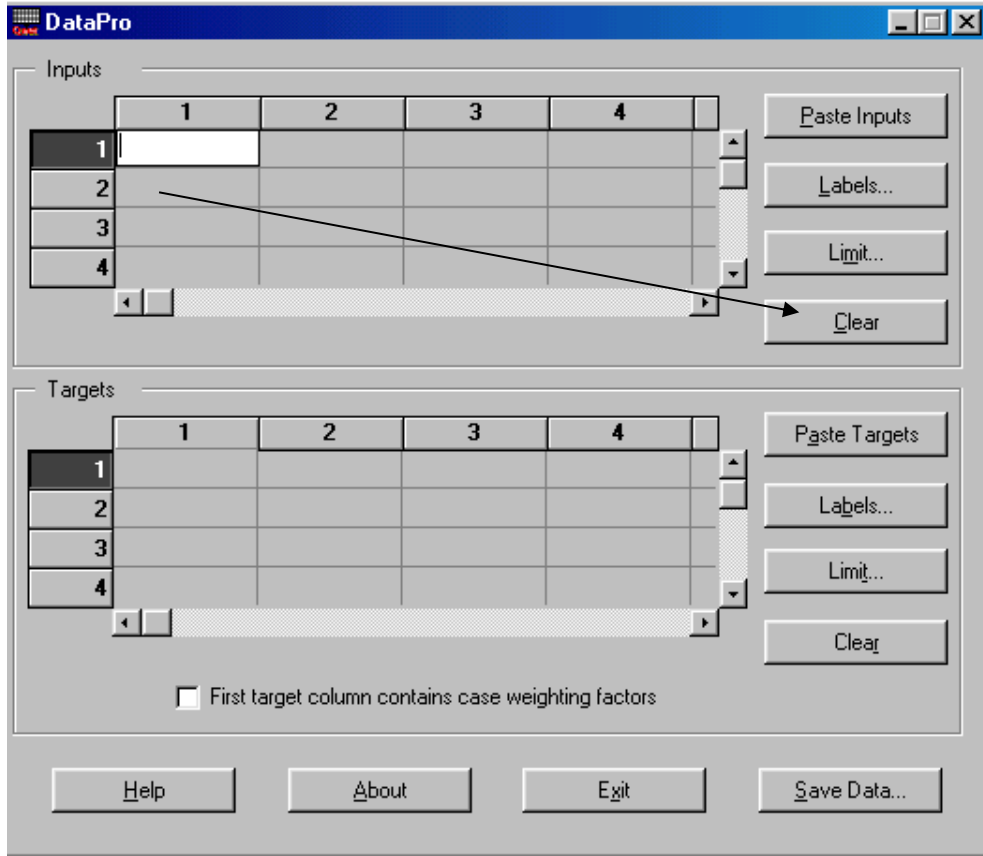
yazılır ve son olarak Şekil E 1.8.’deki “Save Data” seçeneğine girilerek, oluşturulan veri dosyası kaydedilir. “Tamam” tuşuna basılınca tekrar Şekil E1.3.’deki ana menüye dönülür, “Training Parameters” seçeneği işaretlenir. Şekil E1.10.’da karşımıza gelen ekrandan, ağ değişkenleri belirlenir. “Tamam” tuşuna basılıp, ana menüdeki “Save Network Setup” işaretlenerek ağ kaydedilir ve “Tamam” tuşuna basılıp ağ çalıştırılır. Ağ öğrenme işlemini tamamladığında, Şekil E1.11.’deki gibi öğrenme işleminde oluşan ortalama hata ve hedef verilerle ağ çıkışı arasındaki uyum ekranda görülmektedir.



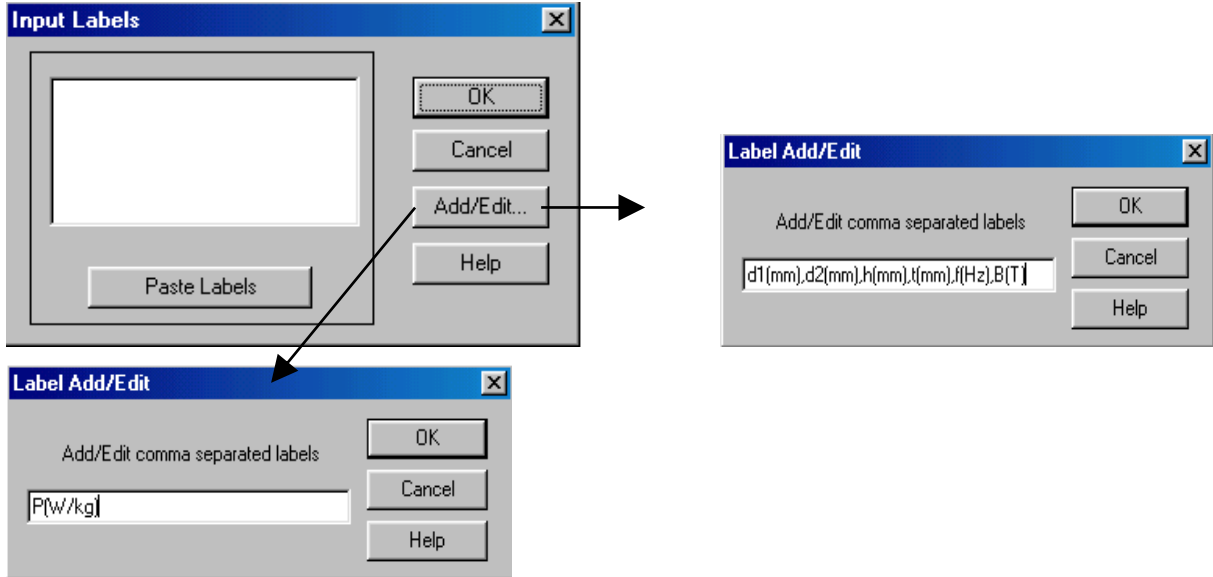
Şekil E.1.6. Giriş verilerinden yapay sinir ağı için veri dosyası oluşturma

	A1	f _s d1 (mm)									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	h (mm)	t (mm)	f (Hz)	B (T)	P (W/kg)	μ _t			
2	35	25	10	0,27	50	0,05	0,001	18375,22			
3	35	25	10	0,27	50	0,10	0,004	20790,18			
4	35	25	10	0,27	50	0,30	0,035	27844,93			
5	35	25	10	0,27	50	0,50	0,094	32194,52			
6	35	25	10	0,27	50	0,70	0,177	35649,41	s1M4		
7	35	25	10	0,27	50	1,00	0,364	37985,23			
8	35	25	10	0,27	50	1,30	0,648	29359,49			
9	35	25	10	0,27	50	1,49	0,981	17717,06			
10	35	25	10	0,27	50	1,59	1,320	11512,37			
11	35	25	10	0,27	50	1,69	1,583	7316,77			
12	35	25	10	0,27	50	1,75	2,761	5038,03			
13	35	25	10	0,27	50	1,79	3,272	4070,41			
14	35	25	10	0,27	100	0,02	0,001	13409,84			
15	35	25	10	0,27	100	0,09	0,011	17078,88			
16	35	25	10	0,27	100	0,30	0,102	21377,46			
17	35	25	10	0,27	100	0,50	0,275	24106,38			
18	35	25	10	0,27	100	0,69	0,520	26323,19	s1M4		
19	35	25	10	0,27	100	1,00	1,051	28865,85			
20	35	25	10	0,27	100	1,31	1,889	25428,22			

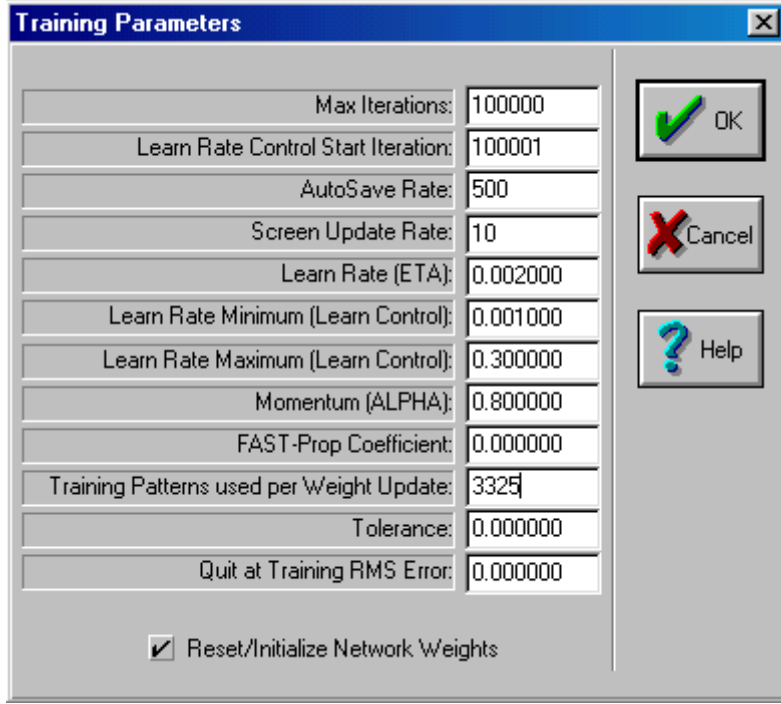
Şekil E.1.7. Giriş verilerinin seçilmesi



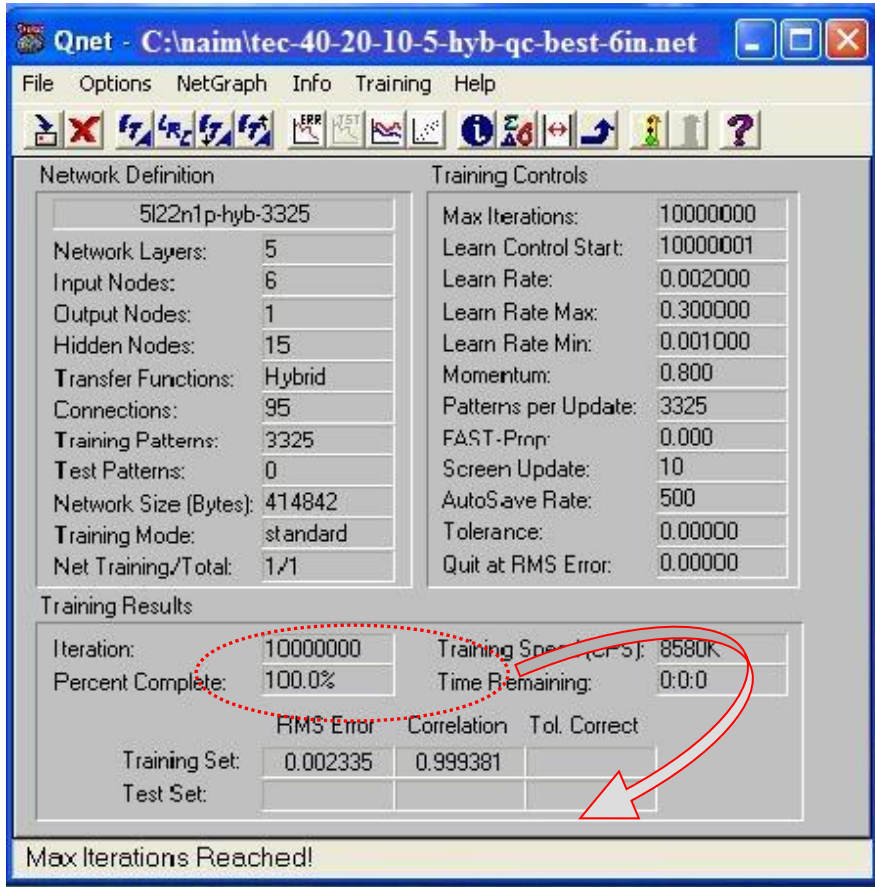
Şekil E.1.8. Giriş verilerinin veri dosyasına yapıştırılması



Şekil E.1.9. Giriş ve çıkış değişkenlerinin veri dosyasına girilmesi



Şekil E.1.10. Ağ değişkenlerinin belirlenmesi



Şekil E.1.11. Öğrenme işlemi sonunda ağ çıkışı

ÖZGEÇMİŞ

Naim Derebaşı; 1960 yılında Orhangazi’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Orhangazi ve Gemlik’de tamamladıktan sonra Bursa, Demirtaş Teknik Lisesi, Elektrik Bölümü’nden mezun oldu. Daha sonra Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü’nü 1986 yılında tamamladı. Aynı yıl Uludağ Üniversitesi Fizik Bölümü’nde Yüksek Lisans’a ve araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Yüksek Lisans öğrenimini tamamladıktan sonra U.Ü. Fizik Bölümü’nde doktora eğitimine başlamışken yarım bırakarak, YÖK bursu ile İngiltere’ye doktora için gönderildi. Doktorasını manyetizma ve ileri manyetik malzemeler konularında Cardiff Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği’nde, (Wolfson Centre Magnetism Technology) 1994 yılında tamamladı.

Doktoradan sonra U.Ü., Fizik Bölümü’nde Öğretim Görevlisi ve Yardımcı Doçent olarak görev aldı çeşitli fizik ve elektromanyetik ile ilgili konularda dersler verdi. 1996 yılında başlayan ve iki yıl devam eden Tübitak tarafından desteklenen üniversite –sanayi işbirliği kapsamındaki **“TİDEP305 Transformatör çekirdeklerinde üretim yöntemlerinin geliştirilmesine ve kullanılan ileri malzemeye bağlı olarak verimin artırılması”** isimli projenin yürütücülüğünü yaptı. 1997 yılında Doçent oldu. Aynı yıl **“Royal Society”** bursu ile Wolfson Centre Magnetism Technology araştırma merkezinde 2 ay **‘Amorf ferromanyetik teller’** konusunda araştırma yaptı.

1998 yılından itibaren aynı araştırma merkezinde İngiliz, Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) ve sanayi kuruluşu TELMAG firması tarafından desteklenen ve bittiğinde ***mükemmele en yakın proje*** olarak derecelendirilen **“Geometrical factors affecting the performance of magnetic wound cores in medium to high frequency”** konulu projede iki yıl doktora sonrası araştırmacı olarak çalıştı. Bu projede elektrik çelikleri, güç kayıpları, transformatörlerde verim, ileri manyetik malzemeler (elektrik çelikleri, amorf şerit ve teller, nanokristal maddeler, kompozit maddeler) gibi konular üzerinde araştırma yaptı.

Bunların dışında 4 Üniversite 1 DPT projesi tamamladı. Yapay zeka ile manyetik özelliklerin tahmin edilmesini Dünya’da ilk uygulayanlardan oldu. 10 yüksek lisans ve 8 doktora öğrencisinin yetişmesine danışmalık yaptı. 2003 yılında profesör oldu.

Konusunda yaptığı araştırmaları sunmak amacıyla çeşitli ülkelerde uluslararası konferanslara katıldı ve 150’den fazla makale ve bildirisi yayınlandı. Yaptığı yayınlara 200’ün üzerinde atıf aldı. 2007 yılında düzenli olarak katılmış olduğu bu konferanslardan **‘Soft Magnetic Materials (SMM)’** konferansının uluslararası yürütme kuruluna seçildi. 2008 yılında ise **‘European Magnetic Sensors and Actuators (EMSA)’** konferansının uluslararası yürütme kuruluna da seçildi ve 2010 yılında bu konferansı Bordum’da başarı ile düzenledi.

Bölüm Başkan yardımcılığı, katıhal fiziği anabilim dalı başkanlığı, bölüm başkanlığı, dekan yardımcılığı, dekan vekilliği gibi idari görevlerde ve çeşitli akademik kurullarda bulundu. Evli ve iki çocuk babasıdır. İyi derecede İngilizce ve kısmen de Almanca bilmektedir.

TEZ ÇALIŞMALARINDAN YAPILAN YAYINLAR

Bildiriler:

1) **Derebasi N., Güldiken F., Caylak O., Kilic H., zmutlu E. N., 2013.** Modelling of thermoelectric cooling module with geometrical factors using numerical methods, *the 2nd International Conference on Water, Energy and the Environment*, Kuşadası, İzmir.,

2) **Derebasi N., Eltez M., Guldiken F., Sever A., Kallis K., Kilic H., Ozmutlu E. N., 2014.** Performance of novel thermoelectric cooling module depending on geometrical factors, *International Conference on Thermoelectrics - ICT2014*, Nashville, Tennessee, USA.

3) **Derebasi N., Eltez M., Guldiken F., Sever A., Kallis K., Kilic H., Ozmutlu E. N., 2014.** Influence of geometrical factors on performance of thermoelectric material using numerical methods, *International Conference on Thermoelectrics - ICT2014*, Nashville, Tennessee, USA.

Makale:

1) **Derebasi N., Güldiken F., Caylak O., Kilic H., zmutlu E. N., 2013.** Modelling of thermoelectric cooling module with geometrical factors using numerical methods, *Proceedings of the Second International Conference on Water, Energy and the Environment*, Kusadası, Turkey September 21-24, 2013, paper 314.

2) **Derebasi N., Eltez M., Guldiken F., Sever A., Kallis K., Kilic H., Ozmutlu E. N., 2015.** Performance of novel thermoelectric cooling module depending on geometrical factors, *Journal of Electronic Materials*, Vol. 44, No. 6, pp. 1566-1572, 2015, (SCI).